

# **BMBF Forschungsvorhaben 03KIS036**

## **Stationäres 3D-Strömungsmesssystem für hochturbulente Strömungszustände unter Tide-, Strömungs- und Welleneinfluss**

### **Abschlussbericht**

für den Zeitraum  
01.10.2001 – 30.09.2004

Teil A: Zusammenfassung

Teil B: Institut für Werkstoffkunde

Mechanisches Anströmkörper-Messsystem, Entwicklung des Trägersystems und der Tauchgehäuse

Teil C: Laser Zentrum Hannover

Erfassung von turbulenten Strömungen mittels PIV-System (Particle Image Velocimeter)

**Teil D: Franzius Institut für Wasserbau und Küsteningenieurwesen**

**Numerische Simulationen und physikalische Versuche**

von

Dipl.-Ing. J. Scheffermann    Dr.-Ing. A. Matheja    Prof. Dr.-Ing. C. Zimmermann

Projektkoordination:

**Universität Hannover, Institut für Werkstoffkunde**

Projektpartner:

**Universität Hannover, FRANZIUS-INSTITUT  
FÜR WASSERBAU UND KÜSTENINGENIEURWESEN**

Unterauftragnehmer:

**Laser Zentrum Hannover e.V.**

BERICHT NR. 682 DES FRANZIUS-INSTITUTES

Dezember 2004

## **Abschlussbericht Teil D**

### Numerische Simulationen und physikalische Versuche

FRANZIUS-INSTITUT FÜR WASSERBAU UND KÜSTENINGENIEURWESEN

Institutsleitung: Prof. Dr.-Ing. C. Zimmermann

Projektleitung: Dr.-Ing. A. Matheja

Projektbearbeitung: Dipl.-Ing. J. Scheffermann

Nienburger Str. 4, 30167 Hannover

Tel.: 0511 / 762 – 5481 Fax: 0511 / 762 – 4002

e-Mail: {zi, am, js}@fi.uni-hannover.de

## Inhaltsverzeichnis

|  | Seite: |
|--|--------|
| Abbildungs- und Tabellenverzeichnis.....   | III    |
| 1 Aufgabenstellung .....   | 1      |
| 2 Modellierung hochturbulenter dreidimensionaler Strömungen .....                                  | 5      |
| 2.1 Allgemeines .....  | 5      |
| 2.2 Erhaltungssätze für Masse und Impuls an einem ortsfesten Kontrollvolumen .....                 | 5      |
| 2.3 Anfangs- und Randbedingungen.....  | 6      |
| 2.4 Simulation turbulenter Strömungen .....  | 7      |
| 2.4.1 Allgemeines .....  | 7      |
| 2.4.2 Das Prinzip der Wirbelviskosität .....   | 10     |
| 2.4.3 Mischungswegmodell .....   | 10     |
| 2.4.4 k- $\epsilon$ -Modell .....  | 12     |
| 2.4.5 k- $\omega$ -Modell .....  | 14     |
| 2.5 Modellierung der freien Oberfläche .....   | 14     |
| 2.6 Einbindung beweglicher Strukturen in die numerische Simulation .....                           | 16     |
| 2.7 Eignung des numerischen Modells.....   | 16     |
| 2.7.1 Allgemeines .....  | 16     |
| 2.7.2 Verifikation .....   | 16     |
| 2.7.3 Kalibrierung.....  | 16     |
| 2.7.4 Validierung.....   | 17     |
| 3 Aufbau der numerischen Modelle .....   | 18     |
| 3.1 Allgemeines .....  | 18     |
| 3.2 Modellierung eines unbeweglichen Hubtores.....   | 18     |
| 3.3 Modellierung eines beweglichen Hubtores.....   | 20     |
| 3.4 Modellierung eines kleineren Fließgewässers.....   | 25     |
| 3.5 Modellierung des Emssperrwerkes .....  | 26     |
| 3.6 Modellierung beweglicher Strukturen im Emssperrwerk .....                                      | 27     |
| 4 Strömungsmechanische Versuchsanlagen zum Test der entwickelten Messgeräte<br>und HN-Modelle..... | 28     |
| 4.1 Eingesetzte Messtechnik - ADV-Sonde.....   | 28     |
| 4.2 Umlaufrinne Hannover - Marienwerder .....  | 28     |
| 4.3 Strömungsrinne Wasserbauhalle Schneiderberg .....  | 29     |
| 4.4 Modellversuche am unbeweglichen Hubtormodell .....   | 31     |
| 4.5 Modellversuche am beweglichen Hubtormodell .....   | 33     |

|            |   |    |
|------------|---|----|
| 4.6        | Modellversuche für ein kleineres Fließgewässer.....   | 33 |
| 4.7        | Modellversuche im hydraulischen Tidemodell des Emssperrwerkes .....   | 34 |
| 4.8        | Auswertung der Mess- und Simulationsergebnisse mit MATLAB .....   | 35 |
| 5          | Ergebnisse .....  | 37 |
| 5.1        | Ergebnisse der Simulationen eines unbeweglichen Hubtores .....  | 37 |
| 5.1.1      | Ergebnisse oberstrom des unbeweglichen Hubtores -<br>Messquerschnitt 1.....   | 37 |
| 5.1.2      | Ergebnisse unterstrom des unbeweglichen Hubtores -<br>Messquerschnitt 2 und 3.....  | 38 |
| 5.2        | Ergebnisse der Simulationen eines beweglichen Hubtores .....  | 40 |
| 5.3        | Ergebnisse der Simulation eines kleineren Fließgewässers .....  | 45 |
| 5.4        | Ergebnisse der Simulation des Emssperrwerkes – unbewegliche Geometrie .....   | 46 |
| 5.5        | Ergebnisse der Simulation des Emssperrwerkes – bewegliche Geometrien .....  | 52 |
| 6          | Zusammenfassung .....   | 53 |
| 7          | Schrifttum.....   | 55 |
|            |   |    |
| Anlage D-1 | Ergebnisse für das bewegliche Hubtor (Vergleich der Strömungsgeschwindigkeiten zwischen physikalischem Modell und numerischer Simulation)                     |    |
| Anlage D-2 | Ergebnisse für das Emssperrwerk – unbewegliche Geometrie (Vergleich der Strömungsgeschwindigkeiten zwischen physikalischem Modell und numerischer Simulation) |    |

## Abbildungs- und Tabellenverzeichnis

|   |    |
|---|----|
| Abb. 1-1: Struktur des BMBF-Projektes „Stationäres 3D-Strömungsmesssystem für hochturbulente Strömungszustände unter Tide-, Strömungs- und Welleneinfluss“ .....    | 1  |
| Abb. 1-2: Sturmflutsperrwerk in der Ems bei Gandersum .....   | 2  |
| Abb. 1-3: Lageplan des Sturmflutsperrwerkes in der Ems .....  | 2  |
| Abb. 2-1: Kontrollvolumen für die Bilanzierung der Transportgleichung von Masse und Impuls .....  | 5  |
| Abb. 2-2: Kolmogoroffsche Energiekaskade (BREUER, 1996) .....   | 7  |
| Abb. 2-3: Darstellung der von einem Turbulenzmodell zu erfassenden Wirbelstrukturen in Abhängigkeit von der Netzauflösung $\Delta$ (BREUER, 1996) .....             | 9  |
| Abb. 2-4: Einordnung der einzelnen Simulationsmodelle .....   | 9  |
| Abb. 2-5: Vertikale Verteilung der Wirbelviskosität in der offenen Kanalströmung (NEZU und NAKAWAGA, 1993) .....  | 11 |
| Abb. 2-6: Position der freien Oberfläche im Gitternetz .....  | 15 |
| Abb. 3-1: Netzausschnitt der Strömungsrinne für den Lastfall 1 „Strömender Abfluss“ (links) und für den Lastfall 2 „Schießender Abfluss“ (rechts) .....             | 19 |
| Abb. 3-3: Numerisches Netz des Hubtormodells (oben); Bereich des sich bewegenden Netzes (links unten); Innenansicht des sich bewegenden Netzes (rechts unten) ..... | 21 |
| Abb. 3-4: Schließungsvorgang: Bild A: Ausgangsposition; Bild B bis G: Übergangstellungen; Bild H: Endposition 10 cm über der Sohle .....                            | 22 |
| Abb. 3-5: Darstellung der Randbedingungen im numerischen Modell .....   | 24 |
| Abb. 3-6: Darstellung des Berechnungsgitters bestehend aus Tetraederzellen (links; 160.000 Zellen); bestehend aus Hexaederzellen (rechts; 90.000 Zellen) .....      | 25 |
| Abb. 3-7: Ausschnitt des numerischen Modells des Emssperrwerkes .....   | 26 |
| Abb. 4-2: Umlaufrinne des FRANZIUS-INSTITUTES in Hannover - Marienwerder .....  | 29 |
| Abb. 4-3: Übersichtsplan der Strömungsrinne / Schneiderberg .....   | 30 |
| Abb. 4-4: Strömungsrinne mit eingebautem Hubtor und Hubvorrichtung .....  | 30 |
| Abb. 4-5: Messanordnung am stationären Hubtor in der Strömungsrinne / Schneiderberg .....   | 31 |
| Abb. 4-6: Skizze des Aufbaus und Anordnung der Komponenten (Schema) .....   | 32 |
| Abb. 4-7 : Versuchsaufbau Strömungsrinne Schneiderberg .....  | 32 |

|  |    |
|--|----|
| Abb. 4-8: Versuchsaufbau am beweglichen Hubtor in der Strömungsrinne /<br>Schneiderberg.....   | 33 |
| Abb. 4-9: Schneller Graben in Hannover; im Vordergrund Mündung in die Ihme .....   | 34 |
| Abb. 4-10: Darstellung der in den hydraulischen Modellversuchen eingesetzten<br>Modelltide.....  | 35 |
| Abb. 4-11: Darstellung von Ergebnisdaten in STAR-CD.....   | 36 |
| Abb. 4-12: Darstellung von Ergebnisdaten in MATLAB .....   | 36 |
| Abb. 5-1: Strömungsgeschwindigkeiten in Hauptströmungsrichtung im Messquerschnitt 1<br>(63 cm oberstrom des Hubtores) für den Lastfall „Strömender Abfluss“<br>(links) und für den Lastfall „Schießender Abfluss“ (rechts) .....                         | 37 |
| Abb. 5-2: Strömungsgeschwindigkeiten in Hauptströmungsrichtung im Messquerschnitt 2<br>(90 cm unterstrom des Hubtores) für den Lastfall „Strömender Abfluss“<br>(links) und für den Lastfall „Schießender Abfluss“ (rechts) .....                        | 39 |
| Abb. 5-3: Strömungsgeschwindigkeiten in Hauptströmungsrichtung im Messquerschnitt 3<br>(165 cm unterstrom des Hubtores) für den Lastfall „Strömender Abfluss“<br>(links) und für den Lastfall „Schießender Abfluss“ (rechts) .....                       | 39 |
| Abb. 5-4: Vergleich der gemessenen und berechneten Strömungsgeschwindigkeiten<br>70 cm stromab der Hubtorvorderkante mittig der Strömungsrinne<br>(h = Öffnungsweite Hubtor, t = Tiefenlage des Messpunktes).....  | 41 |
| Abb. 5-5: Vergleich der gemessenen und berechneten Strömungsgeschwindigkeiten<br>70 cm stromab der Hubtorvorderkante mittig der Strömungsrinne<br>(h = Öffnungsweite Hubtor, t = Tiefenlage des Messpunktes) .....                                       | 42 |
| Abb. 5-6: Vergleich der gemessenen und berechneten Wasserspiegellage 100 cm<br>oberstrom des Hubtores.....   | 44 |
| Abb. 5-7: Vergleich der PIV-gemessenen und berechneten Strömungsvektoren zum<br>Zeitpunkt t = 50 Sekunden .....  | 44 |
| Abb. 5-8: Vergleich der PIV-gemessenen und berechneten Strömungsvektoren zum<br>Zeitpunkt t = 100 Sekunden .....   | 45 |
| Abb. 5-9: Numerisches Modell: Strömungsgeschwindigkeiten in cm/s an der<br>Wasseroberfläche (+ 48,30 mNN) bei $Q_{SG} = 14,30 \text{ m}^3/\text{s}$ und $Q_I = 0,18 \text{ m}^3/\text{s}$ ....   | 45 |
| Abb. 5-10: Strömungsgeschwindigkeiten im hydraulischen Modell des Schnellen<br>Grabens in cm/s an der Wasseroberfläche (+ 48,30 mNN) bei $Q_{SG} =$<br>$14,30 \text{ m}^3/\text{s}$ und $Q_I = 0,18 \text{ m}^3/\text{s}$ (FRANZIUS INSTITUT, 1997)..... | 46 |
| Abb. 5-11: Strömungsgeschwindigkeiten aus Schwimmerbahnen im hydraulischen<br>Modell des Emssperrwerkes (vollkommen geöffnet, Ebbe, Tidezeit 330)<br>[FRANZIUS-INSITUT, 2000] .....  | 47 |

|   |       |
|---|-------|
| Abb. 5-12: Vergleich der berechneten und gemessenen Strömungsgeschwindigkeiten auf einer Achse 100 m westlich des Sperrwerkes (2. NÖ und 3. NÖ geschlossen), Tidezeit 90 .....                          | 48    |
| Abb. 5-13 : Vergleich der berechneten und gemessenen Strömungsgeschwindigkeiten auf einer Achse 100 m westlich des Sperrwerkes (alle Sperrwerkstore geöffnet) .....                                     | 49    |
| Abb. 5-14 : Vergleich der berechneten und gemessenen Strömungsgeschwindigkeiten auf einer Achse 100 m östlich des Sperrwerkes (2. NÖ und 3. NÖ geschlossen), Tidezeit 90 .....                          | 49    |
| Abb. 5-15 : Vergleich der berechneten und gemessenen Strömungsgeschwindigkeiten in der Sperrwerksachse (2. NÖ und 3. NÖ geschlossen), Tidezeit 330 .....  | 50    |
| Abb. 5-16 : Vergleich der berechneten und gemessenen Strömungsgeschwindigkeiten in der Sperrwerksachse (HSÖ geschlossen), Tidezeit 330 .....  | 50    |
| Abb. 5-17 : Vergleich der berechneten und gemessenen Strömungsgeschwindigkeiten auf einer Achse 100 m stromab des Sperrwerkes (Sturmflutkehrung, HSÖ bleibt offen, alle anderen Tore geschlossen) ..... | 51    |
| Abb. 5-18 : Berechnete Strömungsgeschwindigkeiten während des Schließens der Hauptschiffahrtsöffnung (0 bis 20 min.) .....  | 52    |
| Abb. D1-1: Vergleich der berechneten und gemessenen Strömungsgeschwindigkeiten unterstrom des beweglichen Hubtors im Abstand von 40 cm .....  | D 1-2 |
| Abb. D1-2: Vergleich der berechneten und gemessenen Strömungsgeschwindigkeiten unterstrom des beweglichen Hubtors im Abstand von 50 cm .....  | D 1-3 |
| Abb. D1-3: Vergleich der berechneten und gemessenen Strömungsgeschwindigkeiten unterstrom des beweglichen Hubtors im Abstand von 75 cm .....  | D 1-4 |
| Abb. D1-4: Vergleich der berechneten und gemessenen Strömungsgeschwindigkeiten unterstrom des beweglichen Hubtors im Abstand von 100 cm .....   | D 1-5 |
| Abb. D1-5: Vergleich der berechneten und gemessenen Strömungsgeschwindigkeiten unterstrom des beweglichen Hubtors im Abstand von 150 cm .....   | D 1-6 |
| Abb. D1-6: Vergleich der berechneten und gemessenen Strömungsgeschwindigkeiten unterstrom des beweglichen Hubtors im Abstand von 200 cm .....   | D 1-7 |
| Abb. D1-7: Vergleich der berechneten und gemessenen Strömungsgeschwindigkeiten unterstrom des beweglichen Hubtors im Abstand von 250 cm .....   | D 1-8 |
| Abb. D2-1: Strömungsgeschwindigkeiten aus Schwimmerbahnen im hydraulischen Tidemodell (alle Sperrwerkstore geöffnet, Flut, Tidezeit 90).....  | D 2-2 |
| Abb. D2-2: Vergleich der berechneten und gemessenen Strömungsgeschwindigkeiten auf einer Achse 100 m westlich des Sperrwerkes (alle Sperrwerkstore geöffnet) .....                                      | D 2-2 |

|   |        |
|---|--------|
| Abb. D2-3: Vergleich der berechneten und gemessenen Strömungsgeschwindigkeiten in der Sperrwerksachse (alle Sperrwerkstore geöffnet).....                           | D 2-3  |
| Abb. D2-4: Vergleich der berechneten und gemessenen Strömungsgeschwindigkeiten auf einer Achse 100 m östlich des Sperrwerkes (alle Sperrwerkstore geöffnet).....    | D 2-3  |
| Abb. D2-5: Strömungsgeschwindigkeiten aus Schwimmerbahnen im hydraulischen Tidemodell (alle Sperrwerkstore geöffnet, Ebbe, Tidezeit 330) .....                      | D 2-4  |
| Abb. D2-6: Vergleich der berechneten und gemessenen Strömungsgeschwindigkeiten auf einer Achse 100 m westlich des Sperrwerkes (alle Sperrwerkstore geöffnet).....   | D 2-4  |
| Abb. D2-7: Vergleich der berechneten und gemessenen Strömungsgeschwindigkeiten in der Sperrwerksachse (alle Sperrwerkstore geöffnet).....                           | D 2-5  |
| Abb. D2-8: Vergleich der berechneten und gemessenen Strömungsgeschwindigkeiten auf einer Achse 100 m östlich des Sperrwerkes (alle Sperrwerkstore geöffnet).....    | D 2-5  |
| Abb. D2-9: Strömungsgeschwindigkeiten aus Schwimmerbahnen im hydraulischen Tidemodell (HSÖ geschlossen, Flut, Tidezeit 90).....                                     | D 2-6  |
| Abb. D2-10: Vergleich der berechneten und gemessenen Strömungsgeschwindigkeiten auf einer Achse 100 m westlich des Sperrwerkes (HSÖ geschlossen), Tidezeit 90.....  | D 2-6  |
| Abb. D2-11: Vergleich der berechneten und gemessenen Strömungsgeschwindigkeiten in der Sperrwerksachse (HSÖ geschlossen), Tidezeit 90.....                          | D 2-7  |
| Abb. D2-12: Vergleich der berechneten und gemessenen Strömungsgeschwindigkeiten auf einer Achse 100 m östlich des Sperrwerkes (HSÖ geschlossen), Tidezeit 90.....   | D 2-7  |
| Abb. D2-13: Strömungsgeschwindigkeiten aus Schwimmerbahnen im hydraulischen Tidemodell (HSÖ geschlossen, Ebbe, Tidezeit 330) .....                                  | D 2-8  |
| Abb. D2-14: Vergleich der berechneten und gemessenen Strömungsgeschwindigkeiten auf einer Achse 100 m westlich des Sperrwerkes (HSÖ geschlossen), Tidezeit 330..... | D 2-8  |
| Abb. D2-15: Vergleich der berechneten und gemessenen Strömungsgeschwindigkeiten in der Sperrwerksachse (HSÖ geschlossen), Tidezeit 330.....                         | D 2-9  |
| Abb. D2-16: Vergleich der berechneten und gemessenen Strömungsgeschwindigkeiten auf einer Achse 100 m östlich des Sperrwerkes (HSÖ geschlossen), Tidezeit 330.....  | D 2-9  |
| Abb. D2-17: Strömungsgeschwindigkeiten aus Schwimmerbahnen im hydraulischen Tidemodell (2. NÖ und 3. NÖ geschlossen, Flut, Tidezeit 90).....                        | D 2-10 |

|  |        |
|--|--------|
| Abb. D2-18: Vergleich der berechneten und gemessenen Strömungsgeschwindigkeiten auf einer Achse 100 m westlich des Sperrwerkes (2. NÖ und 3. NÖ geschlossen), Tidezeit 90 .....  | D 2-10 |
| Abb. D2-19: Vergleich der berechneten und gemessenen Strömungsgeschwindigkeiten in der Sperrwerksachse (2. NÖ und 3. NÖ geschlossen), Tidezeit 90.....                           | D 2-11 |
| Abb. D2-20: Vergleich der berechneten und gemessenen Strömungsgeschwindigkeiten auf einer Achse 100 m östlich des Sperrwerkes (2. NÖ und 3. NÖ geschlossen), Tidezeit 90 .....   | D 2-11 |
| Abb. D2-21: Strömungsgeschwindigkeiten aus Schwimmerbahnen im hydraulischen Tidemodell (2. NÖ und 3. NÖ geschlossen, Ebbe, Tidezeit 330) .....                                   | D 2-12 |
| Abb. D2-22: Vergleich der berechneten und gemessenen Strömungsgeschwindigkeiten auf einer Achse 100 m westlich des Sperrwerkes (2. NÖ und 3. NÖ geschlossen), Tidezeit 330 ..... | D 2-12 |
| Abb. D2-23: Vergleich der berechneten und gemessenen Strömungsgeschwindigkeiten in der Sperrwerksachse (2. NÖ und 3. NÖ geschlossen), Tidezeit 330.....                          | D 2-13 |
| Abb. D2-24: Vergleich der berechneten und gemessenen Strömungsgeschwindigkeiten auf einer Achse 100 m östlich des Sperrwerkes (2. NÖ und 3. NÖ geschlossen), Tidezeit 330 .....  | D 2-13 |
| Abb. D2-25: Strömungsgeschwindigkeiten aus Schwimmerbahnen im hydraulischen Tidemodell (Sturmflutkehrung, HSÖ bleibt offen) .....  | D 2-14 |
| Abb. D2-26: Vergleich der berechneten und gemessenen Strömungsgeschwindigkeiten auf einer Achse 100 m westlich des Sperrwerkes (Sturmflutkehrung, HSÖ bleibt offen) .....        | D 2-14 |
| Abb. D2-27: Vergleich der berechneten und gemessenen Strömungsgeschwindigkeiten in der Sperrwerksachse (Sturmflutkehrung, HSÖ bleibt offen) .....                                | D 2-15 |
| Abb. D2-28: Vergleich der berechneten und gemessenen Strömungsgeschwindigkeiten auf einer Achse 100 m östlich des Sperrwerkes (Sturmflutkehrung, HSÖ bleibt offen) .....         | D 2-15 |
| Abb. D2-29: Strömungsgeschwindigkeiten aus Schwimmerbahnen im hydraulischen Tidemodell (Sturmflutkehrung, HSÖ und BSÖ bleiben offen).....  | D 2-16 |
| Abb. D2-30: Vergleich der berechneten und gemessenen Strömungsgeschwindigkeiten auf einer Achse 100 m westlich des Sperrwerkes (Sturmflutkehrung, HSÖ und BSÖ offen) .....       | D 2-16 |
| Abb. D2-31: Vergleich der berechneten und gemessenen Strömungsgeschwindigkeiten in der Sperrwerksachse (Sturmflutkehrung, HSÖ und BSÖ offen) .....                               | D 2-17 |
| Abb. D2-32: Vergleich der berechneten und gemessenen Strömungsgeschwindigkeiten auf einer Achse 100 m östlich des Sperrwerkes (Sturmflutkehrung, HSÖ und BSÖ offen) .....        | D 2-17 |

|   |    |
|---|----|
| Tab. 2-1: Konstanten des k- $\epsilon$ -Modells.....                                  | 13 |
| Tab. 3-1: Randbedingungen für das numerische Modell der Strömungsrinne.....           | 19 |
| Tab. 3-2: Parameter des eingesetzten k- $\epsilon$ -Turbulenzmodells.....             | 19 |
| Tab. 3-3: Randbedingungen des numerischen Modells der Leine.....                      | 25 |
| Tab. 3-4.: Versuchsparameter für die vergleichenden Berechnungen am Emssperrwerk..... | 27 |
| Tab. 4-1: Versuchsprogramm in der Strömungsrinne / Schneiderberg.....                 | 31 |
| Tab. 4-2: Durchgeführte PIV-Messungen am stationären Hubtormodell.....                | 31 |
| Tab. 4-3: Versuchsparameter für die Untersuchungen am beweglichen Hubtor.....         | 33 |

## 1 Aufgabenstellung

Mit Bescheid vom 28.11.2001 des Bundesministeriums für Bildung und Forschung (BMBF) erhielt das Institut für Werkstoffkunde der Universität Hannover eine Zuwendung für die Bearbeitung des Vorhabens „Stationäres 3D-Strömungsmesssystem für hochturbulente Strömungszustände unter Tide-, Strömungs- und Welleneinfluss“ in Zusammenarbeit mit dem FRANZIUS-INSTITUT FÜR WASSERBAU UND KÜSTENINGENIEURWESEN der Universität Hannover und dem Laser Zentrum Hannover e.V.

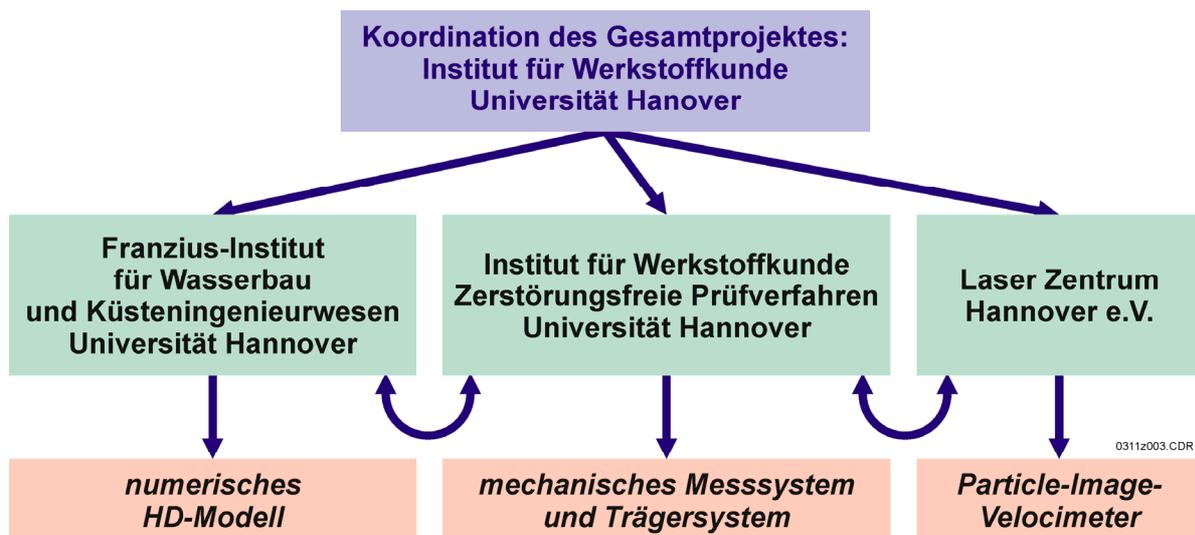


Abb. 1-1: Struktur des BMBF-Projektes „Stationäres 3D-Strömungsmesssystem für hochturbulente Strömungszustände unter Tide-, Strömungs- und Welleneinfluss“

Übergeordnetes Ziel des Vorhabens war es, ein stationäres 3D-Strömungsmesssystem, bestehend aus Particle-Image-Velocimeter, mechanischem Strömungsmesssystem und Trägersystem, für hochturbulente Strömungszustände zu entwickeln, aufzubauen, im Wasserbaulabor zu testen und anhand eines ausgewählten Fallbeispiels zu erproben.

Während der Entwicklungsphase des Messsystems sollte der Laser zunächst unter Laborbedingungen getestet werden, um die optimale Konfiguration der einzelnen Komponenten, die Leistungsfähigkeit des Lasers und die Genauigkeit der Messergebnisse zu ermitteln. Hierfür wurden einzelne Versuchsanlagen des FRANZIUS-INSTITUTES ausgewählt. In einer späteren Phase des Projektes sollte das PIV-System an einem Anwendungsfall in der Natur erprobt werden.

Bei der Auswahl des Anwendungsfalles waren neben den durch die im Antrag definierten Randbedingungen eines zu entwickelnden Strömungsmessgerätes auch das Vorhandensein von zur Entwicklung heranzuziehenden bestehenden Untersuchungen ausschlaggebend. Aus diesem Grunde wurde für den Anwendungsfall das Sturmflutsperrwerk in der Ems zwischen Gandersum und Nendorp (Ems-km 32,2, Abb. 1-2 und 1-3) ausgewählt.

Abschlussbericht des Verbundprojektes „Stationäres 3D-Strömungsmesssystem für hochturbulente Strömungszustände unter Tide-, Strömungs- und Welleneinfluss“ - Teil D: „Numerische Simulationen und physikalische Versuche“



Abb. 1-2: Sturmflutsperrwerk in der Ems bei Gandersum

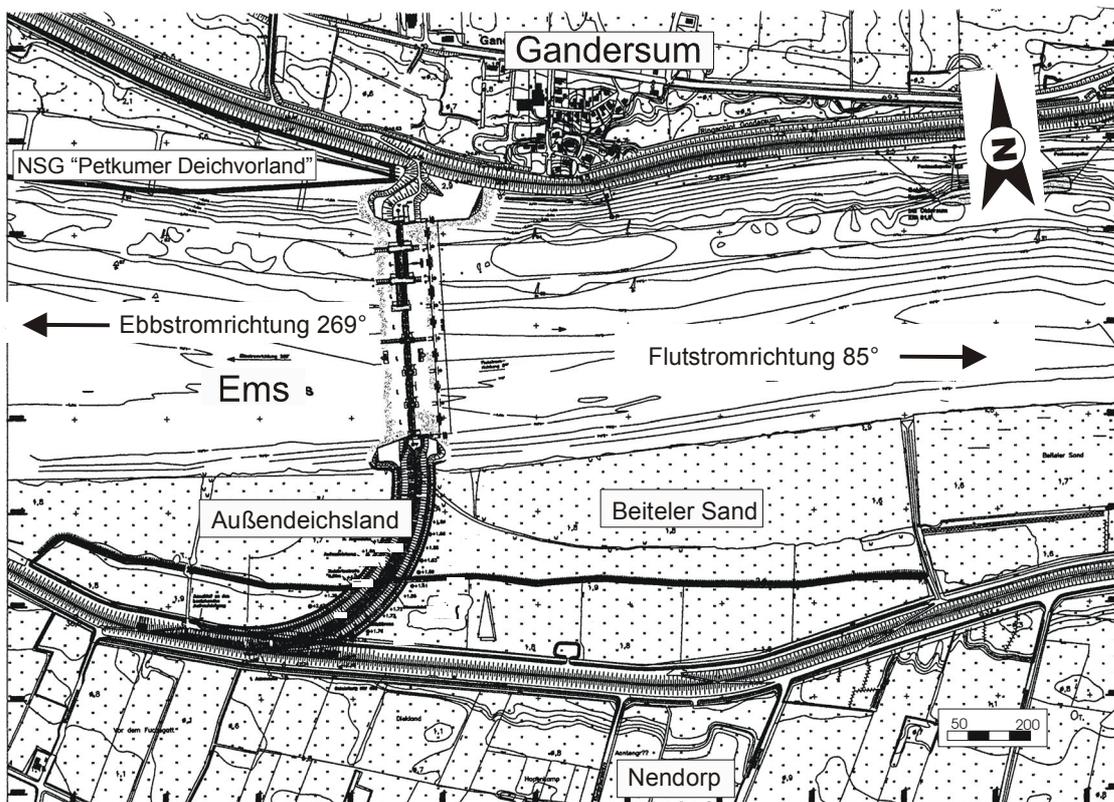


Abb. 1-3: Lageplan des Sturmflutsperrwerkes in der Ems

Dieses vom LAND NIEDERSACHSEN, vertreten durch das PROJEKTTEAM „BAU DES EMSSPERRWERKES“ des NIEDERSÄCHSISCHEN LANDESBETRIEBES FÜR WASSERWIRTSCHAFT UND KÜSTENSCHUTZ in Norden als Träger des Vorhabens in den Jahren 1999 bis 2002 errichtete Bauwerk dient im Rahmen von Küstenschutzmaßnahmen als Alternative zur Erhöhung und Verstärkung der Deiche des Emsästuars als Sturmflutschutzbauwerk. Zusätzlich wurde durch das Sperrwerk – bei gleichzeitiger Staufunktion nach oberstrom – eine höhere Flexibilität des Schifffahrtsweges Unterems erreicht.

An diesem Bauwerk finden sich alle geforderten Randbedingungen für das zu entwickelnde Strömungsmessgerät:

- Hohe Strömungsgeschwindigkeiten infolge Ebb- und Flutstrom,
- Stark variierende Wasserstände innerhalb einer Tide,
- Variierender Salzgehalt infolge der Tide,
- In der Zusammensetzung und Trübung des Wassers variierende Schwebstofffracht und
- Verschiedene Durchflusszustände beim Öffnen und Schließen der Sperrwerkstore.

Für einen Vergleich der innerhalb des Projektes durchzuführenden Messungen mit dem PIV-System und numerischen Simulationen standen die Ergebnisse von am FRANZIUS-INSTITUT durchgeführten Untersuchungen<sup>1</sup> zu verschiedenen Bauteilen und Problemstellungen des Emssperrwerkes und die in den Versuchen zum Einsatz gekommenen Versuchsanlagen und Ausschnittmodelle des Emssperrwerkes zur Verfügung.

In zwei Versuchsanlagen des FRANZIUS-INSTITUTES wurde die optimale Konfiguration des PIV-Systems und seiner Komponenten ermittelt und getestet, indem ein Vergleich der Messergebnisse in quantitativer und qualitativer Hinsicht mit den Messergebnissen anderer Messverfahren und den Ergebnissen der numerischen Simulationen erfolgte:

#### **(a) Umlaufrinne Marienwerder**

Der Schwerpunkt der Versuche in der Umlaufrinne Marienwerder lag auf der Handhabung des PIV-Systems und der qualitativen Bewertung der Messdaten unter besonderer Berücksichtigung des Einflusses von variierenden Strömungsgeschwindigkeiten und variierenden Trübungen.

#### **(b) Strömungsrinne Schneiderberg**

Der Schwerpunkt der Versuche in der Strömungsrinne Schneiderberg lag auf der Messung bei strömendem / schießendem Abfluss und der Beeinflussung der Messungen durch Luftblasen im Wasser.

<sup>1</sup> „Emssperrwerk bei Gandersum, Strömungsuntersuchungen im hydraulischen Tidemodell, Teil 2/2: Durchflüsse und Strömungsverhältnisse im Nahbereich des Sperrwerkes bei Normaltiden“, Franzius-Institut der Universität Hannover, 2001

„Untersuchungen der strömungsinduzierten Schwingungen an den Verschlussorganen des geplanten Emssperrwerkes, Abschlussbericht“, Franzius-Institut der Universität Hannover, 1999

Für den Vergleich mit numerischen Simulationen standen Daten aus drei physikalischen Versuchen zur Verfügung:

**(A) Physikalisches Ausschnittsmodell eines beweglichen Hubtores**

Der Schwerpunkt der Simulationen lag auf der exakten Abbildung der Strömungsverhältnisse während der Bewegung des beweglichen Hubtores unter Berücksichtigung der freien Wasserspiegeloberfläche.

**(B) Physikalisches Modell eines kleineren Flussabschnittes**

Der Schwerpunkt der Simulationen und der mit den Ergebnisdaten durchgeführten Vergleiche mit den Ergebnisdaten der physikalischen Modellversuche lag auf der Bestimmung des optimalen Netzaufbaus für Simulationen mit freier Oberfläche.

**(C) Hydraulisches Tidemodell des Emssperrwerkes bei Gandersum**

Der Schwerpunkt der Simulationen und der durchgeführten Vergleiche lag auf der Bestimmung der Genauigkeit bei der Ermittlung von Strömungsgeschwindigkeiten.

Das FRANZIUS-INSTITUT hat in diesem Projekt folgende Aufgaben übernommen:

- Auswahl der Anwendungsfälle,
- Datenbeschaffung und –analyse bereits erhobener Daten im Bereich des ausgewählten Bauwerkes und Analyse der naturräumlichen Randbedingungen,
- Definition eines geeigneten Messprogramms für den Aufbau eines numerischen 3D-Modells,
- Bereitstellung von Versuchsanlagen zur Durchführung von Messungen mit dem PIV-System und dem Anströmkörpermesssystem, sowie Unterstützung bei diesen Messungen,
- Entwicklung eines Modellkonzeptes, Gebietsabgrenzung, Spezifizierung von Randbedingungen und Auswahl der zu verwendenden Programmsysteme für die numerischen Simulationen,
- Erstellung eines numerischen Modells einer bewegten Geometrie,
- Aufbau des numerischen HD-Modells auf der Grundlage bereits erhobener Daten und
- Dokumentation der numerischen Modelluntersuchungen und abschließende Beurteilung des angewandten Methodik.

Im vorliegenden Teil D des Abschlussberichtes werden die Ergebnisse der Arbeiten des FRANZIUS-INSTITUTES dargestellt. Die Grundlagen des eingesetzten CFD-Programmsystems STAR-CD sind in Kapitel 2 und die hiermit aufgebauten Modelle in Kapitel 3 beschrieben. Kapitel 4 enthält Beschreibungen der durchgeführten physikalischen Modellversuche, deren Ergebnisse in Kapitel 5 mit den Ergebnissen der numerischen Simulationen verglichen werden. Kapitel 6 fasst die Ergebnisse der Untersuchungen zusammen.

## 2 Modellierung hochturbulenter dreidimensionaler Strömungen

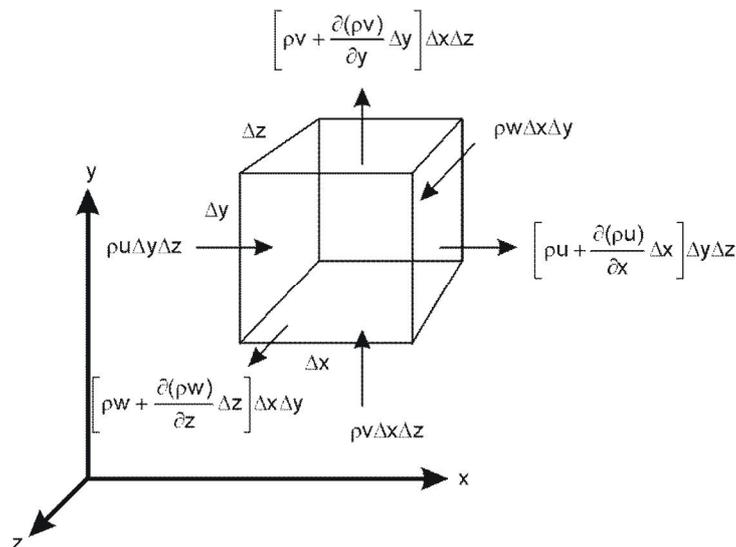
### 2.1 Allgemeines

Strömungen von Fluiden sind überwiegend dreidimensional und aufgrund turbulenter Schwankungsbewegungen häufig instationär. Der Beschreibung der physikalischen Prozesse liegen für den Strömungsfall Wasser zwei Annahmen zugrunde. Zum einen wird die Inkompressibilität des Fluids angenommen, zum anderen werden die inneren (viskosen) Spannungen mit dem NEWTONSCHEN Reibungsansatz beschrieben. Der NEWTONSCHE Reibungsansatz (Schubspannungsgesetz) beschreibt Fluide, die sich durch leichte Verschiebungen ihrer Elemente auszeichnen, d.h. einer Formänderung nur geringen Widerstand entgegensetzen. Nach Gleichung 2-1 ist die Schubspannung dem Geschwindigkeitsgradienten normal zur Strömungsrichtung  $\partial u / \partial y$  proportional.

$$\tau = \frac{\text{Schubkraft}}{\text{Berührungsfläche}} = \eta \frac{\partial u}{\partial y} \quad \text{Gl. 2-1}$$

### 2.2 Erhaltungssätze für Masse und Impuls an einem ortsfesten Kontrollvolumen

Die Transportgleichungen der Strömungsmechanik können aus integralen Bilanzen an einem ortsfesten Kontrollvolumen hergeleitet werden (Abb. 2-1). In diesen werden die Flüsse der Bilanzgrößen an den Rändern des Kontrollvolumens sowie Quellen und Senken im und am Kontrollvolumen berücksichtigt.



- mit  $\Delta x, \Delta y, \Delta z$  Seitenlänge des Raumelementes in x-, y-, z-Richtung [m]  
 $\rho$  Dichte des betrachteten Stoffes [kg/m<sup>3</sup>]  
 $u, v, w$  Strömungsgeschwindigkeiten in x-, y-, z-Richtung [m/s]

Abb. 2-1: Kontrollvolumen für die Bilanzierung der Transportgleichung von Masse und Impuls

Für den Massen- und Impulsstrom erfolgt die Formulierung von Erhaltungssätzen unter der Annahme eines ortsfesten Koordinatensystems an einem infinitesimalen Raumelement. Dies führt zur Kontinuitätsgleichung 2-2 und den NAVIER-STOKES-Gleichungen 2-3:

$$\frac{\partial u_i}{\partial x_i} = 0 \quad \text{Gl. 2-2}$$

$$\frac{\partial u_i}{\partial t} + u_j \frac{\partial u_i}{\partial x_j} = - \frac{1}{\rho} \left[ \frac{\partial p}{\partial x_i} - \rho \nu \frac{\partial}{\partial x_j} \left( \frac{\partial u_i}{\partial x_j} \right) \right] + \frac{1}{\rho} f_i \quad \text{Gl. 2-3}$$

1            2            3            4            5

mit  $u_i$  dreidimensionaler Strömungsvektor [ - ]  
 $p$  Druck [ N/m<sup>2</sup> ]  
 $\nu$  kinematische Viskosität [ m<sup>2</sup>/s ]  
 $\rho$  Dichte [ kg/m<sup>3</sup> ]  
 $f$  Massenkräfte [ N ]

In Gleichung 2-3 steht Term **1** für die lokale, Term **2** für die konvektive Beschleunigung, Term **3** für den Druck, Term **4** für die Spannung und Term **5** für die Massenkräfte.

Mit der Definition von Zustandsgleichungen in Gleichung 2-4, welche die Dichte in Abhängigkeit von Temperatur  $T$  und den Konzentrationen  $c_i$  gelöster bzw. suspendierter Stoffe festlegen, werden die Gleichungen 2-2 und 2-3 geschlossen:

$$\rho = \rho(T, c_i) \quad \text{Gl. 2-4}$$

mit  $c_i$  Konzentration gelöster, bzw. suspendierter Stoffe [ kg/m<sup>3</sup> ]

### 2.3 Anfangs- und Randbedingungen

Die zeitabhängigen Differentialgleichungen 2-2 und 2-3 sind nur dann lösbar, wenn Anfangs- und Randbedingungen festgelegt sind.

Bei den NAVIER-STOKES-Gleichungen handelt es sich um partielle Differentialgleichungen zweiter Ordnung. Randbedingungen sind durch die direkte Spezifikation der unbekanntenen Fließgeschwindigkeiten zu definieren. Der erste Typ wird als DIRICHLET-Randbedingung und der zweite als NEUMANN-Randbedingung bezeichnet.<sup>1</sup>

<sup>1</sup> Definition: Eine DIRICHLET-Randbedingung bedeutet das Anlegen eines festen Randwertes, z.B. eines konstanten Durchflusses. Eine NEUMANN-Randbedingung ist die einfachste Randbedingung, da die Kontrollfunktion am Rande gleich 0 ist. Das heißt, dass der Strom über den Rand 0 ist.

## 2.4 Simulation turbulenter Strömungen

### 2.4.1 Allgemeines

Die meisten Strömungen in der Natur oder in technischen Bauwerken sind turbulent. Turbulenz tendiert zu dreidimensionalen hochgradig instationären Wirbelstrukturen. Die größten Wirbel können auf die Größe des betrachteten Strömungsgebietes anwachsen und entziehen der mittleren Strömung kinetische Energie. In der KOLMOGOROFF'SCHEN Energiekaskade (Abb. 2-2) zerfallen die größten Wirbel als stationärer Energietransport von großen zu kleinen Längenskalen, bis am Ende dieser Wirbelkaskade die kleinsten Wirbel in Wärmeenergie umgewandelt werden (Dissipation).

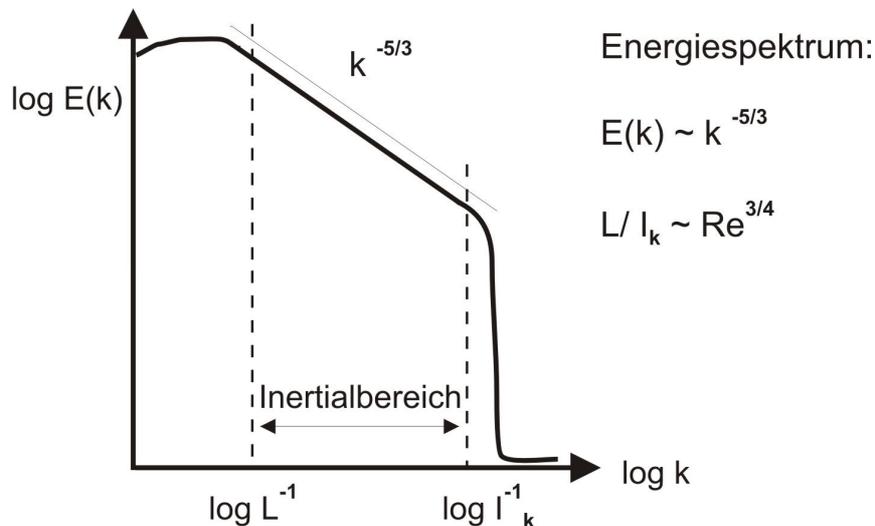


Abb. 2-2: Kolmogoroffsche Energiekaskade (BREUER, 1996)

Die Frequenz der Wirbelbewegung ist umgekehrt proportional zum Längenmaß der Wirbelstrukturen. Die niederfrequenten großen Wirbel dominieren das Strömungsgeschehen. Die hochfrequenten Wirbel dissipieren ab einer bestimmten Größenordnung.

Die kleinsten im Wasserbau auftretenden turbulenten Wirbelstrukturen besitzen einen sehr kurzen Zeit- und Längenmaßstab, welcher nur mit einer hohen zeitlichen und räumlichen Auflösung des Modellgebietes nachgebildet werden kann. Bei Wirbelabmessungen vom  $10^{-3}$  bis  $10^{-4}$ -fachen der Wassertiefe und einer vergleichbaren Auflösung in den beiden anderen Raumrichtungen, wäre eine Anzahl von  $10^9$  bis  $10^{16}$  Gitterpunkten erforderlich. Dieses als „Direkte Numerische Simulation“ (DNS) bezeichnete Lösungsverfahren ist deswegen auf einfache Geometrien beschränkt (BREUER, 1996).

Da in der Regel die zeitlichen Strömungsparameter und nicht die kleinsten turbulenten Strukturen von Interesse sind, wird eine statistische (zeitliche) Mittelung der Strömungsgleichungen vorgenommen. Ausgangspunkt ist die Zerlegung des momentanen Strömungsvektors  $u_i$  und des momentanen Druckes  $p$  in zeitliche Mittelwerte  $\bar{u}_i, \bar{p}$  und Schwankungsgrößen  $u_i', p'$ :

$$u_i = \bar{u}_i + u_i' \quad \text{Gl. 2-5}$$

$$p = \bar{p} + p' \quad \text{Gl. 2-6}$$

mit  $\bar{u}_i$  zeitlicher Mittelwert des Strömungsvektors  $u_i$  [ m/s ]  
 $u_i'$  Schwankungsgröße des Strömungsvektors  $u_i$  [ m/s ]  
 $\bar{p}$  zeitlicher Mittelwert des Druckes  $p$  [ N/m<sup>2</sup> ]  
 $p'$  Schwankungsgröße des Druckes  $p$  [ N/m<sup>2</sup> ]

Mit diesen Ausdrücken gehen die Gleichungen 2-2 und 2-3 in die gemittelte Kontinuitätsgleichung 2-7 und die gemittelten REYNOLDS-Gleichungen 2-8 über:

$$\frac{\partial \bar{u}_i}{\partial x_i} = 0 \quad \text{Gl. 2-7}$$

$$\frac{\partial \bar{u}_i}{\partial t} + \bar{u}_j \frac{\partial \bar{u}_i}{\partial x_j} = -\frac{1}{\rho} \left[ \frac{\partial \bar{p}}{\partial x_i} - \rho \frac{\partial}{\partial x_j} \left( \nu_t \frac{\partial \bar{u}_i}{\partial x_j} \right) - \overline{u_i' u_j'} \right] + \bar{f}_i \quad \text{Gl. 2-8}$$

mit  $\nu_t$  Wirbelviskosität [ m<sup>2</sup>/s ]

Durch die Mittelung tritt in Gleichung 2-8 im Vergleich zu Gleichung 2-3 ein zusätzlicher Spannungsterm  $\rho \overline{u_i' u_j'}$  auf, mit dem die turbulenten Schwankungen berücksichtigt werden, die nicht von dem Strömungsmodell selbst abgebildet werden.

Die Zeitspanne für die statistische Mittelung wird durch den Zeitmaßstab der turbulenten Spannungen und den Zeitmaßstab der mittleren Fließbewegung bestimmt. Bei den klassischen Turbulenzmodellen ist die Zeitspanne gerade so groß, dass alle turbulenten Schwankungen aus der Strömungsmodellierung herausgefiltert werden.

Bei einer Grobstruktursimulation („Large Eddy Simulation“ – LES) werden nur die turbulenten Wirbelstrukturen, die kleiner als die gewählte Auflösung (Filter) sind, von einem Turbulenzmodell erfasst (Abb. 2-3). Die größeren Strukturen werden durch das Strömungsmodell simuliert.

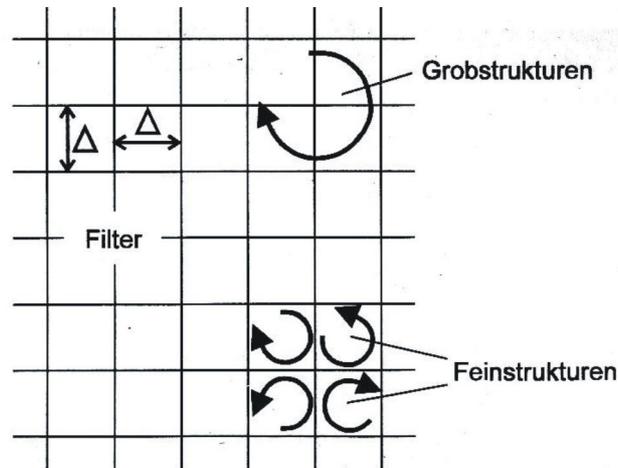


Abb. 2-3: Darstellung der von einem Turbulenzmodell zu erfassenden Wirbelstrukturen in Abhängigkeit von der Netzauflösung  $\Delta$  (BREUER, 1996)

Die Vorteile der Grobstruktursimulation liegen in der differenzierten Betrachtung des Spektrums der turbulenten Wirbel. Die Genauigkeit dieses Verfahrens ist als höher einzuschätzen als die Turbulenzmodellierung mit stärker vereinfachenden Turbulenzmodellen. Der Rechenaufwand ist jedoch relativ hoch und durch Skalierungseffekte können manche Wirbelgrößen nicht abgebildet werden.

Eine Einordnung der einzelnen Simulationsmodelle in Abhängigkeit vom Rechenaufwand und dem Grad der Modellierbarkeit ist Abbildung 2-4 zu entnehmen.

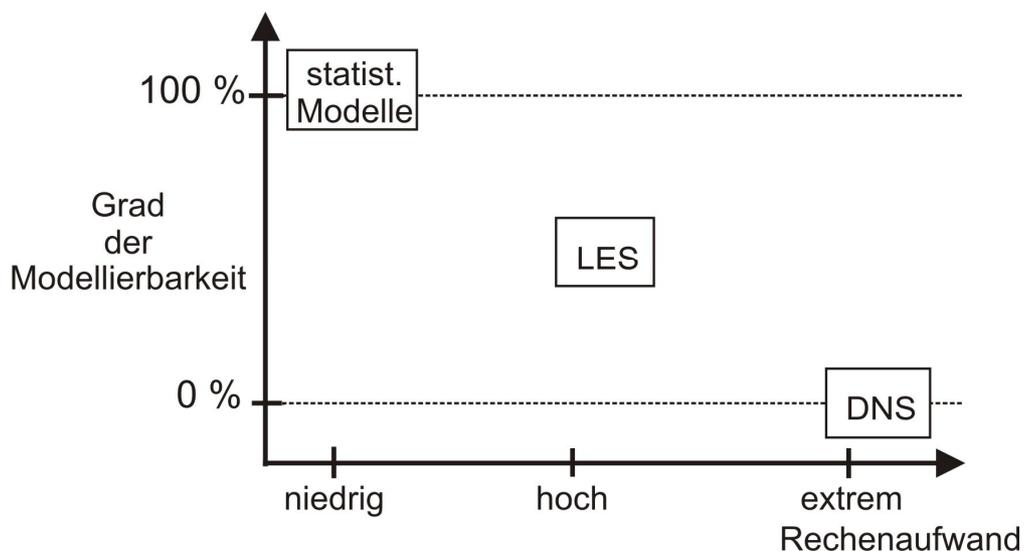


Abb. 2-4: Einordnung der einzelnen Simulationsmodelle

## 2.4.2 Das Prinzip der Wirbelviskosität

Das Prinzip der Wirbelviskosität („eddy viscosity concept“) geht auf BOUSSINESQ (1877) zurück und liegt den gebräuchlichsten Turbulenzmodellen in der Hydrodynamik zugrunde. Es definiert die Wirbelviskosität  $\nu_t$  als Proportionalitätsfaktor, mit dem die REYNOLDS-Spannungen<sup>2</sup> an die Gradienten der mittleren Strömungsgeschwindigkeit geknüpft werden. Dieser Faktor ist keine konstante Stoffeigenschaft, sondern variiert mit dem Strömungsfeld und ist von der Strömungsgeometrie und von Parametern wie der REYNOLDS-Zahl abhängig.

$$-\overline{u_i' u_j'} = \nu_t \left( \frac{\partial \bar{u}_i}{\partial x_j} + \frac{\partial \bar{u}_j}{\partial x_i} \right) - \frac{2}{3} k \delta_{ij} \quad \text{Gl. 2-9}$$

mit  $k$      kinetische Energie (Gl. 2-9) [  $\text{m}^2/\text{s}^2$  ]  
 $\delta_{ij}$      KRONECKER-Delta [ - ]

In Gleichung 2-9 ist  $\delta_{ij}$  das KRONECKER-Delta, welches für  $i = j$  eins und ansonsten Null ist. Der das KRONECKER-Delta enthaltende Term gewährleistet, dass die Summe der Normalspannungen mit der Definition der turbulenten kinetischen Energie  $k$  in Gleichung 2-10 konform ist.

$$k = \frac{1}{2} \overline{u_i' u_i'} \quad \text{Gl. 2-10}$$

Das Wirbelviskositätsprinzip reduziert die Anzahl der unbekanntenen Turbulenzgrößen auf die Ermittlung des Proportionalitätsfaktors  $\nu_t$ , der im einfachsten Fall bereichsweise konstant vorgegeben und durch eine Kalibrierung des Modells anhand experimenteller Daten festgelegt werden kann.

## 2.4.3 Mischungswegmodell

Der Mischungswegansatz ist ein algebraisches Turbulenzmodell zur Bestimmung der vertikalen turbulenten Viskositäten, unter Berücksichtigung der sich einstellenden vertikalen Geschwindigkeitsverteilung sowie der turbulenten Eigenschaften der Bodengrenzschicht.

Eine stationär-gleichförmige offene Gerinneströmung, bei der die Fließtiefe gegenüber der Gerinnebreite sehr klein ist, kann als zweidimensionale Strömung vereinfacht werden. Die REYNOLDS-Gleichungen 2-3 vereinfachen sich dadurch und können mit wenigen empirischen Annahmen integriert werden. Es ergibt sich eine funktionale Abhängigkeit der Wirbelviskosi-

<sup>2</sup> Definition: Die Terme  $\overline{\rho u_i' u_j'}$  stellen gemittelte Impulsflüsse (pro Flächeneinheit) dar und rufen an der Fläche mit der Normalen in  $i$ -Richtung eine Kraft in  $j$ -Richtung hervor. Deshalb werden sie REYNOLDSISCHE-Spannungen oder turbulente Scheinspannungen genannt.

tät  $v_t$  von der Sohlschubspannungsgeschwindigkeit  $\bar{u}_\tau$  und der Fließtiefe  $\bar{h}$ . (MALCHAREK, 1998).

$$\frac{v_t}{\bar{h}\bar{u}_\tau} = \frac{\kappa(1-\eta)}{\frac{1}{\eta} + \pi\Pi \sin(\pi\eta)} \quad \text{Gl. 2-11}$$

- mit  $\kappa$  KÁRMÁN-Konstante [ - ]  
 $\eta$  auf die Fließtiefe bezogener Abstand von der Gerinnesohle:  $\eta = x_n/h$  [ - ]  
 $\Pi$  COLES' Parameter, angesetzt mit einem Wert von 0,0 bis 0,2 [ - ]  
 $u_\tau$  Sohlschubspannungsgeschwindigkeit [ m/s ]  
 $v_t$  Viskosität [ m<sup>2</sup>/s ]

Nach Gleichung 2-11 nimmt die Wirbelviskosität eine parabolische Verteilung in vertikaler Richtung an. Dieser Ansatz wird oft nur in der unteren Gerinnehälfte ( $h < 0,5$ ) verwendet. In der oberen Gerinnehälfte wird ein konstanter Wert angenommen (VAN RIJN, 1986 bzw. WANG, 1991).

$$\frac{v_t}{\bar{h}\bar{u}_\tau} = \frac{\kappa}{4} \quad \text{Gl. 2-12}$$

NEZU und ROCK (1986) untersuchten die vertikale Verteilung der Wirbelviskosität in Abhängigkeit von der REYNOLDS-Zahl. Die Ergebnisse sind in Abbildung 2-5 dargestellt.

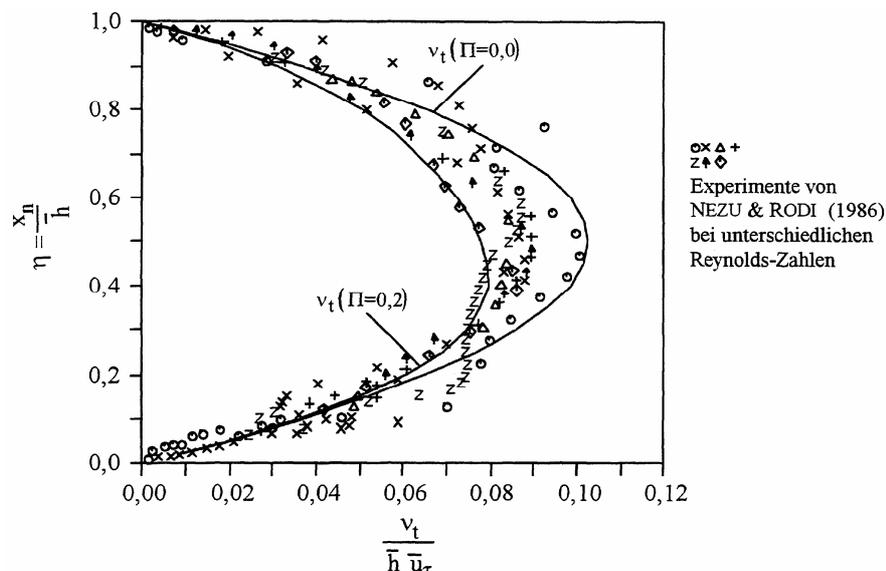


Abb. 2-5: Vertikale Verteilung der Wirbelviskosität in der offenen Kanalströmung (NEZU und NAKAWAGA, 1993)



$$u_j' \left( \frac{p'}{\rho} + \frac{u_i' u_j'}{2} \right) = \frac{v_t}{\sigma_k} \frac{\partial k}{\partial x_j} \quad \text{Gl. 2-14}$$

Die Dissipation wird durch folgenden Ausdruck modelliert:

$$\varepsilon = \nu \frac{\partial u_i'}{\partial x_j} \frac{\partial u_i'}{\partial x_j} = c_D \frac{k^{3/2}}{L} \quad \text{Gl. 2-15}$$

Dies setzt jedoch die empirische Vorgabe des turbulenten Längenmaßstabes  $L$  voraus, was nur für sehr einfache Strömungsgeometrien gelingt. Aus diesem Grund besitzen die Eingleichungsmodelle, bei denen neben der Transportgleichung für  $k$  algebraische Ansätze für das Längenmaß  $L$  verwendet werden, kaum Allgemeingültigkeit.

Der Längenmaßstab wird beim  $k$ - $\varepsilon$ -Modell durch die Dissipation charakterisiert. Auch für die Dissipation lässt sich eine exakte Gleichung aus den NAVIER-STOKES-Gleichungen herleiten. Gegenüber Gleichung 2-9 müssen jedoch wesentlich mehr Modellannahmen für unbekannte Korrelationen getroffen werden. Deswegen ist an dieser Stelle die modifizierte Form der  $k$ - $\varepsilon$ -Gleichungen angegeben.

$$\frac{\Delta k}{\Delta t} = \frac{\partial}{\partial x_j} \left( \left( \nu + \frac{v_t}{\sigma_k} \right) \frac{\partial k}{\partial x_j} \right) + P_k - \varepsilon \quad \text{Gl. 2-16}$$

$$\frac{\Delta \varepsilon}{\Delta t} = \frac{\partial}{\partial x_j} \left( \left( \nu + \frac{v_t}{\sigma_\varepsilon} \right) \frac{\partial \varepsilon}{\partial x_j} \right) + c_{1\varepsilon} \frac{\varepsilon}{k} P_k - c_{2\varepsilon} \frac{\varepsilon^2}{k} \quad \text{Gl. 2-17}$$

$$P_k = -\overline{u_i' u_j'} \frac{\partial \overline{u_i}}{\partial x_j} = \nu_t \left( \frac{\partial \overline{u_i}}{\partial x_j} + \frac{\partial \overline{u_j}}{\partial x_i} \right) \frac{\partial \overline{u_i}}{\partial x_j} \quad \text{Gl. 2-18}$$

Der Quellterm  $P_k$  beschreibt die Produktion turbulenter kinetischer Energie aus den mittleren Strömungsgrößen.

| $c_\mu$ | $\sigma_k$ | $\sigma_\varepsilon$ | $c_{1\varepsilon}$ | $c_{2\varepsilon}$ |
|---------|------------|----------------------|--------------------|--------------------|
| 0,09    | 1,00       | 1,30                 | 1,44               | 1,92               |

Tab. 2-1: Konstanten des  $k$ - $\varepsilon$ -Modells

Die Konstanten aus Tabelle 2-1 wurden mit einer KÁRMÁN-Konstanten von  $\kappa = 0,43$  durch Vergleichsrechnungen bestimmt. Bei Verwendung des üblichen Wertes von  $\kappa = 0,41$  empfehlen NEZU und NAKAGAWA (1993) die Konstanten  $\sigma_k$  und  $\sigma_z$  zu jeweils 1,2 zu wählen.

Neben dem hier gegebenen Standard-k- $\epsilon$ -Modell existieren einige Modifikationen. LAUNDER und SPALDING (1974) beschreiben eine Erweiterung für Strömungen bei niedrigen REYNOLDS-Zahlen, CELIK und RODI (1984) nehmen eine Modifikation der Konstanten  $c_{\mu}$  zur Berücksichtigung des Einflusses von Oberflächen vor. KATO und LAUNDER (1993) modifizieren den Produktionsterm  $P_k$ , um eine realistischere Verteilung der turbulenten kinetischen Energie im Bereich von Staupunkten zu erhalten.

#### 2.4.5 k- $\omega$ -Modell

WILCOX (1988) entwickelte das k- $\omega$ -Modell um die wandnahe Turbulenz ohne Aussparung der viskosen Schicht darzustellen. Hiermit wäre eine Schwäche des o.g. k- $\epsilon$ -Modells behoben.

Neben der Transportgleichung für die turbulente kinetische Energie beinhaltet das k- $\omega$ -Modell für die Energiedissipation die Größe  $\omega$ . Die Wirbelviskosität wird mit der Gleichung 2-19 berechnet.

$$v_t = \gamma^* \frac{k}{\omega} \quad \text{Gl. 2-19}$$

### 2.5 Modellierung der freien Oberfläche

Bei der Berücksichtigung der freien Oberfläche (Free Surface Flow) von Fließgewässern in numerischen Simulationen sind einige Besonderheiten zu beachten, da die freie Oberfläche die Ausdehnung des Strömungsgebietes beeinflusst. Eine freie Oberfläche stellt den Sonderfall einer Randbedingung dar, bei der die Lage des Randes nicht bekannt ist. Die Wasseroberfläche bildet eine unregelmäßige und zeitlich variable Strömungsberandung, wobei die Position zu späteren Zeitpunkten als Teil der Lösung bestimmt werden muss. Diese freie Oberfläche kann als eine genau abgegrenzte Berührungsfläche zwischen einem Fluid und einem Gas oder zwischen zwei Fluiden definiert werden. Die obere Begrenzung des Strömungsfeldes wird durch die Isofläche  $p = 0$  gebildet. Hier findet senkrecht zum Rand weder ein Massenfluss noch ein Impulsaustausch statt. Der vertikale Impulsaustausch an der freien Oberfläche wird bei turbulenter Strömung verhindert. Damit verschwinden die Normalkomponente des Geschwindigkeitsvektors und die Schubspannungen.

Die zahlreichen CFD-Methoden zur Beschreibung der freien Oberfläche können in zwei Gruppen eingeteilt werden. Die erste Gruppe definiert die freie Oberfläche als eine klar abgegrenzte Zwischenschicht, deren Bewegung berechnet wird. Es werden Gitternetze benutzt, die die Berandungen genau nachzeichnen und jedes Mal wieder angepasst werden (adaptive Gitternetze), wenn die freie Oberfläche bewegt wurde. Diese Methode versagt jedoch, wenn sich die Zwischenschicht überschlägt (z.B. brechende Welle, Wechselsprung).

Die zweite Gruppe, die nochmals in zwei Untergruppen aufgeteilt werden kann, definiert keine klare Berandung an der freien Oberfläche. Die Berechnung wird an einem festen Gitter

(statisches Gitternetz) durchgeführt, welches sich auch oberhalb der freien Oberfläche fortsetzt. Hiermit kann eine sich überschlagende Zwischenschicht berechnet werden:

- Als MAC-Schema (Marker-and-Cell) wird das Verfolgen von masselosen Partikeln, die anfänglich in der Nähe der freien Oberfläche des Fluids eingeleitet werden, bezeichnet. Phänomene wie das Wellenbrechen können behandelt werden. Der Berechnungsaufwand ist groß, da zusätzlich zu dem Lösen der Gleichungen der Fluidströmung, die Bewegungen einer Vielzahl von Partikeln verfolgt werden müssen.
- Das Lösen einer Transportgleichung für den Anteil der Zelle, der frei vom Fluid ist, wird als VOF-Schema (Volume-of-Fluid) bezeichnet. Hier wird das Verhältnis zweier Fluide in einer Zelle betrachtet. Zusätzlich zu den Erhaltungsgleichungen für die Masse und den Impuls muss bei dieser Methode die Gleichung für den Fluidanteil  $c$  der Zelle gelöst werden. Für gefüllte Kontrollzellen (KZ) wird  $c = 1$  und für leere KZ  $c = 0$  gesetzt. Die Veränderung von  $c$  wird durch die Transportgleichung bestimmt:

$$\frac{\partial c}{\partial t} + \text{div}(cu) = 0 \quad \text{Gl. 2-20}$$

- mit
- $c$  Fluidanteil der Kontrollzelle,  $c = 1$  für gefüllte;  $c = 0$  für leere Kontrollzellen [-]
  - $t$  Zeit [s]
  - $u$  Strömungsgeschwindigkeit in x-Richtung [m/s]

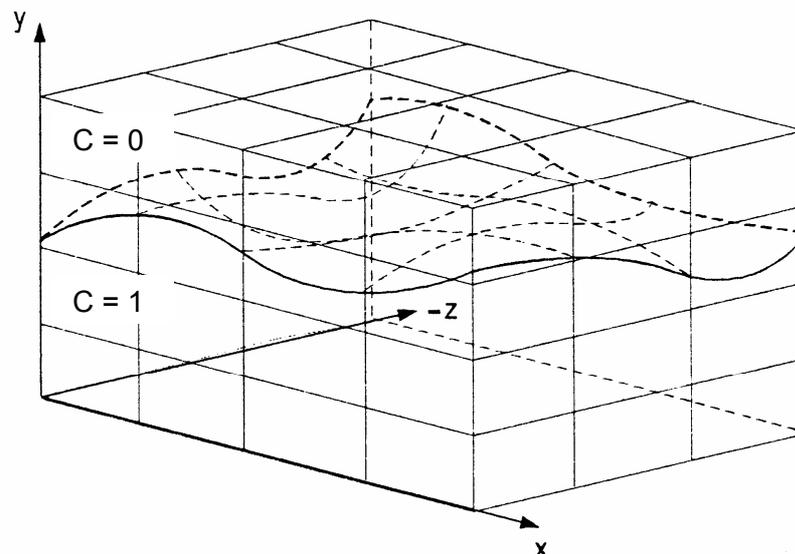


Abb. 2-6: Position der freien Oberfläche im Gitternetz

Die VOF-Methode ist effizienter als das MAC-Schema. Die Kontur der freien Oberfläche ist jedoch nicht als klare Begrenzung definiert. Es ergeben sich hohe Rechenzeiten, um ein genaues Profil der Oberfläche zu erhalten. Dabei sollten Zellen mit  $0 < c < 1$  verfeinert werden. Da die Berandung der freien Oberfläche eine Diskontinuität in  $c$  ist, wird sie normalerweise in drei oder mehr Zellen aufgelöst (FRANZIUS-INSTITUT, 2000).

Die Berechnung wird an einem festen Gitter (statisches Gitternetz) durchgeführt, welches sich auch oberhalb der freien Oberfläche fortsetzt. Hiermit kann eine sich überschlagende Zwischenschicht berechnet werden.

Die VOF-Methode wurde mit dem vom Franzius-Institut verwendeten Programmsystem STAR-CD für die Simulationen der freien Oberfläche genutzt.

## **2.6 Einbindung beweglicher Strukturen in die numerische Simulation**

Bei der Berechnung von Strömungen um bewegliche Strukturen muss während der einzelnen Zeitschritte in das Berechnungsnetz eingegriffen werden. Dies kann durch das einfache Verschieben von Knoten oder durch das Aktivieren und Deaktivieren von Zellschichten geschehen. Letzteres ist immer dann notwendig, wenn sich das Berechnungsvolumen nicht nur um wenige Prozent, sondern im Bereich von Potenzen verändert, wie z.B. innerhalb eines Motorenzylinders. Hierbei wird die Bewegung zum einen durch das Verschieben von Knoten erreicht, zum anderen werden bei größer werdendem Volumen Zellen aktiviert und bei schrumpfendem Volumen Zellen deaktiviert. Detaillierte Angaben zum Aufbau eines beweglichen Netzes sind in Kapitel 3.3 anhand eines Anwendungsfalles angegeben.

## **2.7 Eignung des numerischen Modells**

### **2.7.1 Allgemeines**

Die Qualität numerischer Simulationsprogramme wird durch Verifikation, Kalibrierung und Validierung überprüft.

### **2.7.2 Verifikation**

Die Verifikation dient zur Überprüfung der korrekten Implementierung der physikalischen Grundgleichungen im numerischen Verfahren. Sie beantwortet die Frage nach der Modellierbarkeit eines bestimmten Problems. Mit Hilfe der Verifikation kann die Frage nach der Anwendbarkeit der mathematischen Gesetzmäßigkeiten und die Frage nach einer fehlerhaften Programmierung beantwortet werden.

Eine abschließende Verifikation im Sinne von richtig oder falsch ist nicht zu erwarten, da das numerische Modell Aufgaben lösen soll, die mit analytischen Lösungen nicht gelöst werden können. Trotzdem ist der Vergleich mit analytischen Lösungen zur Bewertung der numerischen Verfahren und zur Überprüfung auf Programmierfehler von Bedeutung.

### **2.7.3 Kalibrierung**

Um mit einem Modell naturnahe Ergebnisse zu erzielen, sind Kalibrierungsrechnungen notwendig. Mit den gewonnenen Daten aus dem Vergleich der Modellergebnisse mit den Ergebnissen der physikalischen Versuche lässt sich das Modell kalibrieren. Dieser Prozess wird „Modelleichung“ genannt.

Bei den Eingangsdaten ist zwischen sicheren Daten, z.B. geometrische, und Daten mit erheblichen Unsicherheiten zu unterscheiden. Diese, auch „weiche Daten“ genannten Werte,

können aus Büchern, Tabellen oder durch eine Kalibrierung, auch „Parameteridentifikation“ genannt, gewonnen werden. Innerhalb der Kalibrierung wird ein Systemparameter (i. d. R. der Systemparameter mit der größten Unsicherheit, z. B. die Rauigkeit) so verändert, dass das Modellergebnis und die Reaktion des Natursystems übereinstimmen. In einem an nur einen einzigen Parameter, z.B. mit dem Reibungsbeiwert, kalibriertem Modell schlagen sich auch die Unsicherheiten aller anderen Parameter, einschließlich der geometrischen, an diesem Kalibrierungsparameter nieder.

Die Kalibrierung ist entsprechend ihrer hohen Bedeutung für die spätere Aussagefähigkeit des numerischen Modells durch Kontrollen, die möglichst modellunabhängig sind, abzusichern.

#### **2.7.4 Validierung**

Mit Hilfe der Validierung wird der Nachweis der Modellgenauigkeit durch Ausnutzung der innerhalb der Kalibrierung nicht verwendeten Messdaten erbracht. Die Modelleigenschaften werden an komplexeren Testfällen untersucht und die Ergebnisse mit Messdaten verglichen. Daraus ergibt sich, dass die untersuchten Systemzustände von dem innerhalb der Kalibrierung untersuchten Systemzustand abweichen müssen. Die Validierung ist somit eine Überprüfung, ob die das System beschreibenden Parameter für beliebige Systemzustände naturähnliche Resultate erbringen.

### **3 Aufbau der numerischen Modelle**

#### **3.1 Allgemeines**

Die gleichzeitige Simulation von freier Oberfläche und beweglichen Strukturen wurde in mehreren Stufen entwickelt.

Zunächst wurde eine unbewegliche Hubtorsimulation auf die Genauigkeit der Simulation der Strömungsgeschwindigkeiten untersucht (Kapitel 3.2).

Die hierbei gewonnenen Erkenntnisse wurden zum Aufbau von zwei Modellen eines beweglichen Hubtormodells genutzt (Kapitel 3.3).

Um die Simulation des Emssperrwerkes vorzubereiten, wurde zunächst ein kleineres Flussgebiet zur Bestimmung der räumlichen Diskretisierung modelliert (Kapitel 3.4).

Die hierbei gewonnenen Erkenntnisse wurden dann zum Aufbau der Emssperrwerksmodelle genutzt (Kapitel 3.5)

#### **3.2 Modellierung eines unbeweglichen Hubtores**

Die Geometrie des physikalischen Modells (Kapitel 4.2) wurde im Maßstab 1:1 auf das numerische Modell übertragen, um einen direkten Vergleich der gemessenen und berechneten Geschwindigkeiten zu ermöglichen und Maßstabeffekte auszuschließen. Dazu wurde ein ca. 22 m langer, 0,90 m hoher und lediglich 0,10 m breiter Bereich mit einer Zellschicht in z-Richtung nachgebildet. Die Reduktion auf zwei Dimensionen ist physikalisch gerechtfertigt, sofern in der dritten Raumrichtung nahezu konstante Bedingungen vorliegen, was bei der hier gerichteten Strömung der Fall war. Hierdurch konnte eine starke Minimierung der Rechenzeiten erreicht werden. Abbildung 3-1 zeigt die für die untersuchten Lastfälle erzeugten Gitternetze in einer 2-D-Ansicht. Der Abbildung ist zu entnehmen, welche Zellen für den Anfangszustand der Berechnung als wassergefüllt (dunkel) und welche als luftgefüllt (hell) definiert waren. Im Anströmbereich des Hubtores sowie im Bereich hinter dem Tor wurde das Rechengitter verfeinert (Zellgrößen bis 1 cm Kantenlänge), um eine höhere Genauigkeit der Ergebnisse zu erzielen. Im Bereich der Verfeinerung lagen auch die Messebenen in den physikalischen Modellversuchen. Die Modelldiskretisierung wurde so gewählt, dass Messpunkte im physikalischen Modell unmittelbar durch Rechenknoten dargestellt wurden.

Für das gesamte Kontrollgebiet ergaben sich Kantenlängen der Zellen bis maximal 0,10 m. Die Gesamtzahl der erzeugten Zellen einschließlich der Verfeinerung betrug ca. 4900 bei strömendem und ca. 5000 bei schießendem Abfluss. Am Inlet wurde eine Turbulenzintensität von 25% und eine Länge von 0,10 m angegeben.

An den seitlichen Berandungen wurde eine Symmetrierandbedingung (axialsymmetrisches Strömungsfeld) vorgegeben. Die übrigen Ränder wurden als reibungsbehaftete Wand (Wall) definiert.

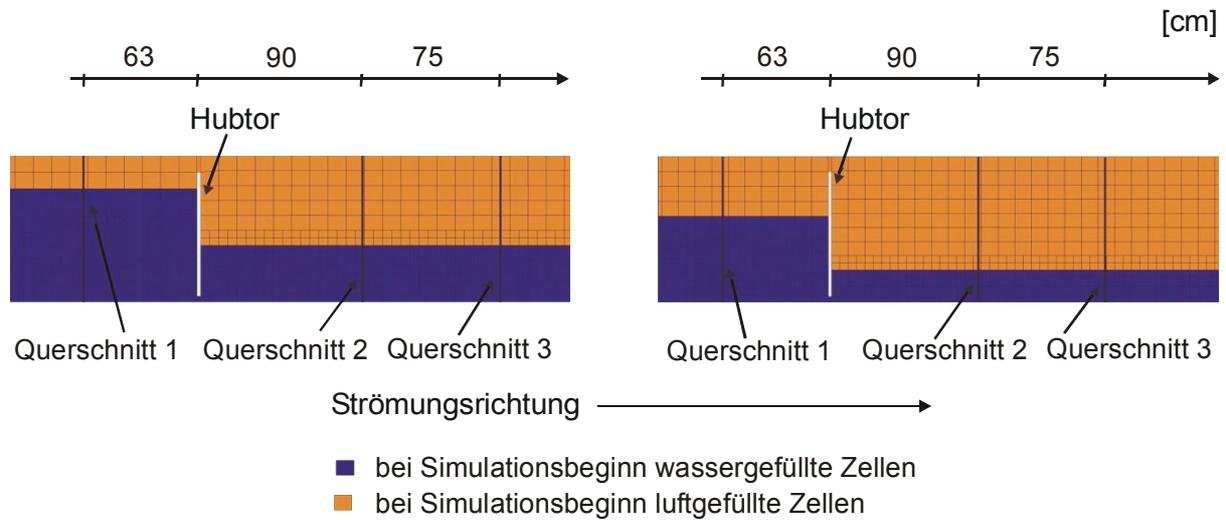


Abb. 3-1: Netzausschnitt der Strömungsrinne für den Lastfall 1 „Strömender Abfluss“ (links) und für den Lastfall 2 „Schießender Abfluss“ (rechts)

|                   | $v_{\text{Inlet}}$ [m/s] | $A_{\text{Inlet}}$ [m <sup>2</sup> ] | Oberwasserstand [cm] | Unterwasserstand [cm] | Strömungszustand (UW) |
|-------------------|--------------------------|--------------------------------------|----------------------|-----------------------|-----------------------|
| <b>Lastfall 1</b> | 0,11                     | 0,67                                 | 68.0                 | 34.0                  | strömend              |
| <b>Lastfall 2</b> | 0,14                     | 0,51                                 | 52.0                 | 19.5                  | schießend             |

Tab. 3-1: Randbedingungen für das numerische Modell der Strömungsrinne

| C-Mu | C-Eps1 | C-Eps2 | C-Eps3 | C-Eps4 | CAPPA | Prandtl (K.E.) | Prandtl (Eps) | Prandtl (Enth) |
|------|--------|--------|--------|--------|-------|----------------|---------------|----------------|
| 0,09 | 1,44   | 1,92   | 1,44   | -0,33  | 0,419 | 1              | 1,219         | 0,9            |

Tab. 3-2: Parameter des eingesetzten  $k$ - $\epsilon$ -Turbulenzmodells

### 3.3 Modellierung eines beweglichen Hubtores

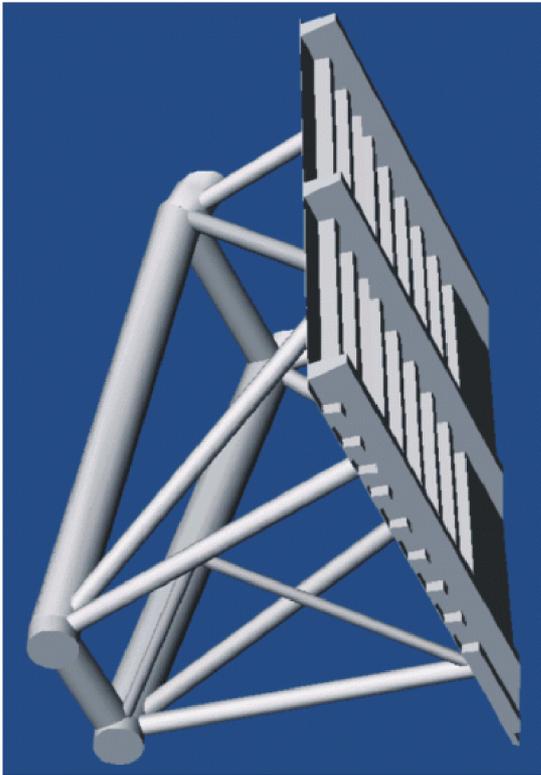


Abb. 3-2: CAD-Geometrie des Hubtores

Das numerische Modell des Hubtores basiert auf dem in den physikalischen Modellversuchen eingesetzten Hubtor im Maßstab 1:1 entsprechend den Originalplänen des Emssperrwerkes. Der Geometrieimport erfolgte als STL-File (STL = Stereo Lithography) in das numerische Simulationsprogramm wobei eine automatische Vernetzung stattfand. Hierbei wurde besonders am unteren Ende des Hubtores auf die genaue Nachbildung der Dichtung und eine entsprechend hohe Auflösung dieses Bereiches geachtet, da dieser maßgebend für die Ausbildung der Ablösezone in diesem Bereich und damit für die Strömungsverhältnisse unterstrom des Hubtores ist.

Um Simulationen mit modifizierten Torgeometrien zu erleichtern, erfolgte der Aufbau des Modellgitters zunächst ohne das Hubtor, an dessen Stelle eine Ausparung vorgesehen wurde. Dies war zum einen für

nachfolgende Simulationen mit veränderten Geometrien hilfreich, da nur die modifizierte Geometrie in die Ausparung einzupassen war und ansonsten alle das bewegliche Gitter betreffenden Unterprogramme erhalten und unverändert blieben. Zum anderen ließen sich so während der Erprobungsphase schnellere Simulationen durchführen, da der hoch aufzulösende Bereich des Hubtores unberücksichtigt blieb, was die erforderliche Rechenzeit deutlich verkürzte.

Im Bereich der vorderen 590 cm ab dem Einstromrand besteht das Netz sowohl im wasser- als auch im luftgefüllten Bereich aus Zellen mit einer Kantenlänge von 10 cm in Hauptströmungsrichtung und von jeweils 5 cm in y- und z-Richtung (33.040 Zellen). Diese Auflösung fand auch Anwendung im Bereich hinter dem Tor ab 690 cm bis zum Ende des numerischen Gitters bei 1200 cm (28.560 Zellen). Die maximale Kantenlänge im beweglichen Teil des Netzes zwischen 590 cm und 690 cm liegt bei 5 cm, im unmittelbaren Nahbereich des Tores bei durchschnittlich 1 bis 2 cm (insgesamt 66.625 Zellen). Insgesamt ergaben sich somit für das Gesamtmodell (Abb. 3-3a) ca. 128.000 Zellen (Abb. 3-3b und c), von denen ca. 50 % für die Diskretisierung des Hubtores notwendig sind, mit hauptsächlich undeformierten Hexaederzellen (ca. 98%). Nur im Bereich des Hubtores besteht die Vernetzung aus deformierten Hexaederzellen, was sich allerdings nicht auf die Qualität der numerischen Lösung auswirkt.

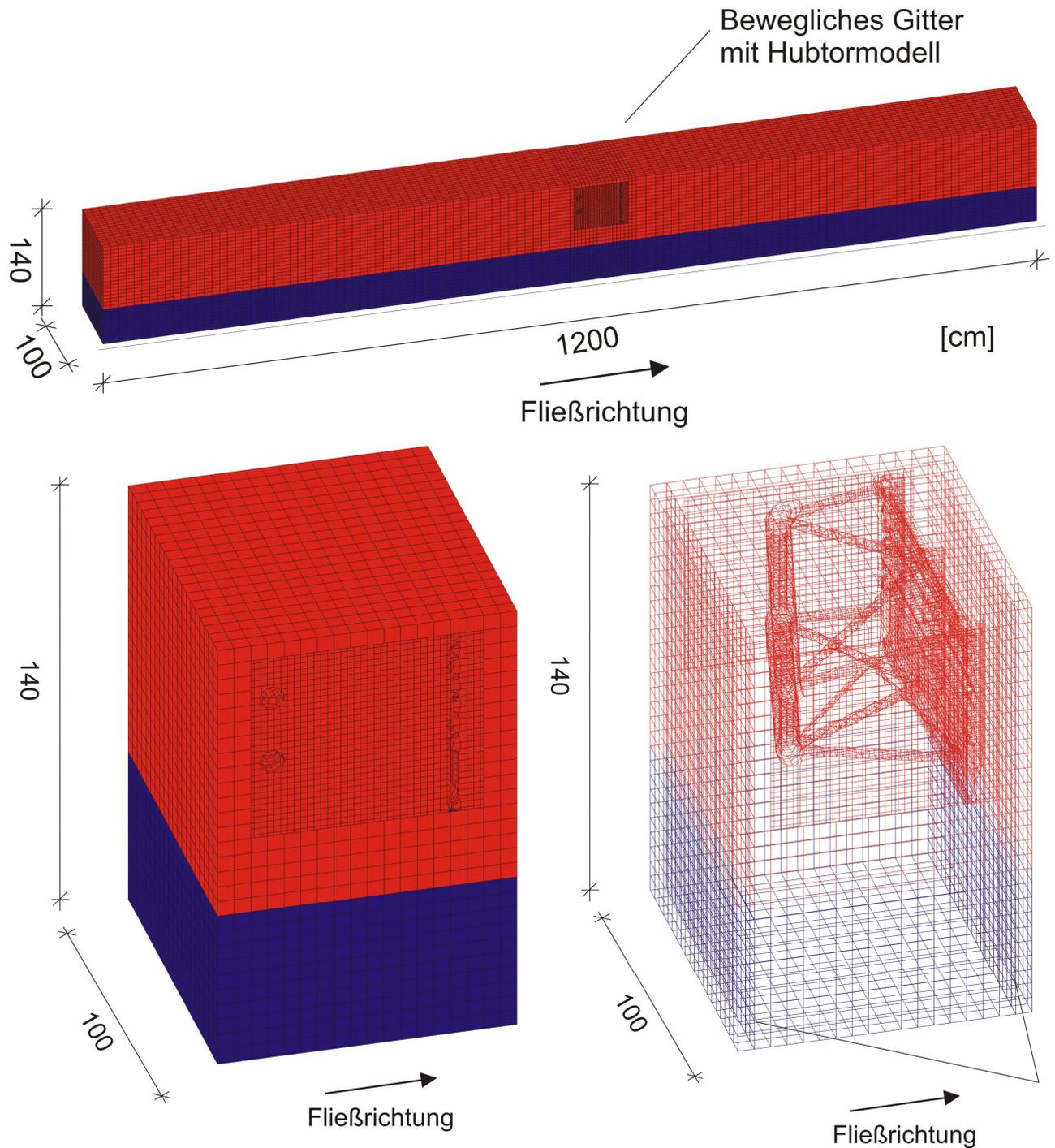


Abb. 3-3: Numerisches Netz des Hubtormodells (oben); Bereich des sich bewegenden Netzes (links unten); Innenansicht des sich bewegenden Netzes (rechts unten)

Die Verschiebung aller Knoten innerhalb des beweglichen Blockes in negativer (Schließen) bzw. positiver (Öffnen) y-Richtung erzeugte die Bewegung des Hubtores, wobei die unterste Knotenlage in Sohlhöhe gehalten und dadurch beim Schließen die jeweils unterste Zellschicht deformiert wurde. Bei einer Deformation von mehr als 50% wurde die betreffende Zellschicht deaktiviert und die darüber liegende Zellschicht um den gleichen Betrag

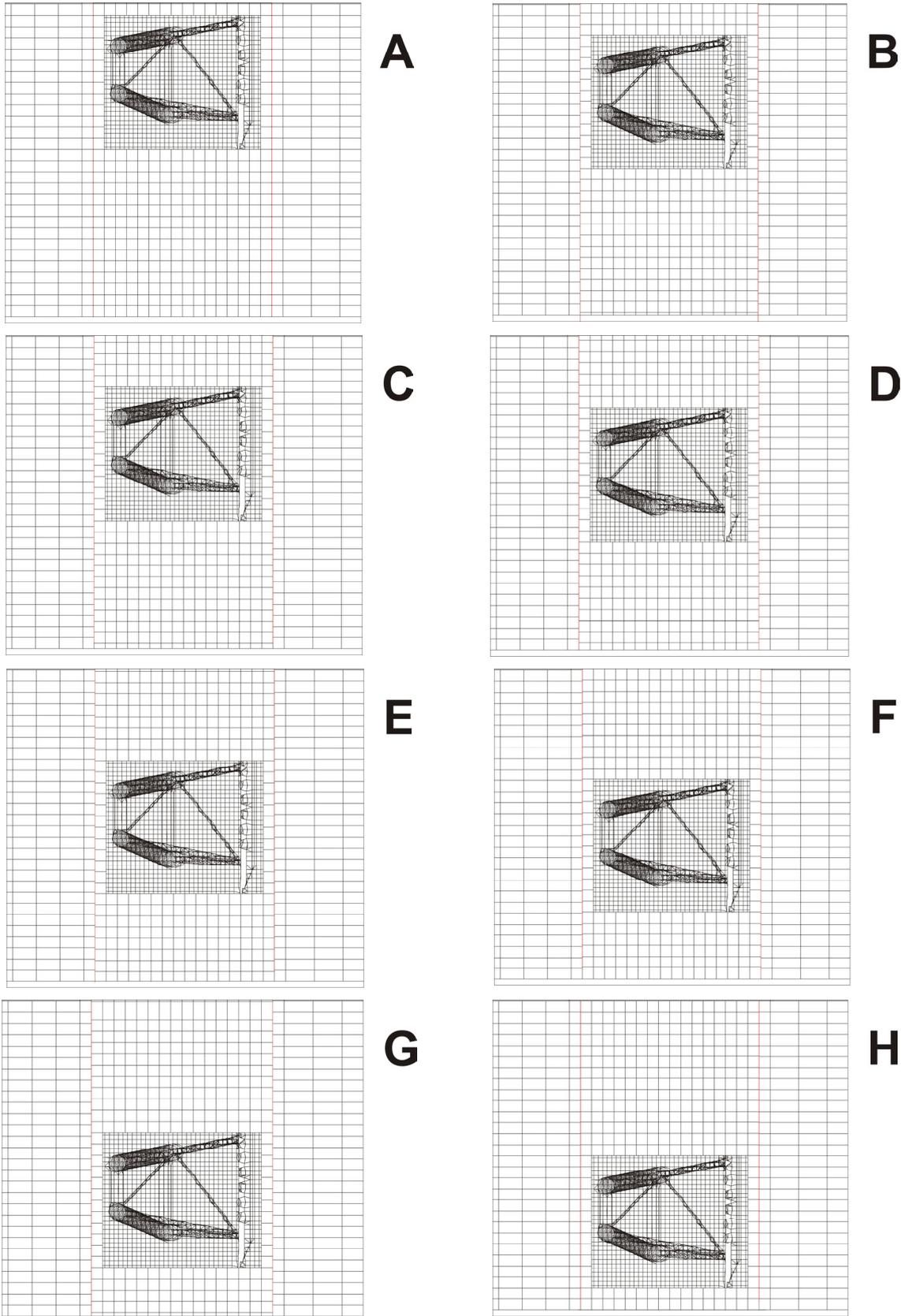


Abb. 3-4: Schließungsvorgang: Bild A: Ausgangsposition;  
Bild B bis G: Übergangsstellungen; Bild H: Endposition 10 cm über der Sohle

vergrößert. Dieser Vorgang wiederholte sich bis zum vollständigen Schließen des Tores (alle Schichten unterhalb des Tores deaktiviert) oder bis zur vorbestimmten Öffnungsweite des Tores.

Dieses Vorgehen war notwendig, da sich eine zu starke Stauchung der Zellen (>90%) negativ auf die Qualität der Rechnung auswirkt bzw. ein Divergieren der Simulation zur Folge hat.

Oberhalb des Tores vergrößerte sich die oberste Zellschicht durch die Bewegung des Blockes. Bei einer Vergrößerung von über 50% war die Zelldicke von 5 cm wiederhergestellt und die so entstehende Aussparung jeweils durch das Aktivieren einer neuen Zellschicht aufgefüllt. Dieser Vorgang erfolgte zeitgleich mit dem Deformieren und Deaktivieren der Zellschichten unterhalb des Hubtores (Abb. 3-5). Zwischen den unbeweglichen Bereichen und dem beweglichen Teil des Gitters wurden so genannte Anschluss-Randbedingungen (Abb. 3-4; Attachment-Randbedingung) angeordnet. Diese Randbedingungen übergeben während der Simulation die in den verschiedenen Teilen des Gitters berechneten Werte in den jeweils anderen Teil. Dies geschieht durch die in den Unterprogrammen definierte Lage der Zellen in diesem Bereich zueinander. Ohne diese Randbedingung würden die jeweiligen Bereiche nicht miteinander verbunden und ein Durchströmen wäre unmöglich. Insofern war darauf zu achten, dass die Zellnummerierung im betreffenden Bereich nicht verändert wurde. Dies trifft ebenso auf die Nummerierung und Definition der Randbedingungen und der Knoten in diesem Bereich zu. Ansonsten würden die in den Unterprogrammen zur Steuerung des beweglichen Netzes angegebenen Knoten nicht mehr den richtigen Zellen zugeordnet sein. Dies hätte eine Zerstörung des Rechennetzes und somit einen Abbruch der Simulation zur Folge.

Am oberen Modellrand wurde eine Strömungsgeschwindigkeit von 0,25 m/s über die gesamte Breite und bis 50 cm über der Sohle angegeben, entsprechend dem Wasserstand bei ungestörter Strömung. Der untere Rand wurde durch eine Überfallklappe und daran anschließend einen Auslass auf der Sohle des Modells gebildet. Am Inlet wurde eine Turbulenzintensität von 25% und eine Länge von 0,10 m angegeben.

Zum Zeitpunkt  $t = 0$  beträgt im gesamten Modellgebiet die Strömungsgeschwindigkeit  $v_x = 0,25$  m/s, um die Rechenzeit bis zu einem stabilen Strömungszustand und damit bis zu einem in den physikalischen Modellversuchen vorherrschenden Zustand zu verkürzen. Als Zeitdiskretisierung wurde 0,025 s angegeben. Da das Rechenprogramm diese jedoch bei hochturbulenten Strömungszuständen zur Verbesserung der Lösung automatisch anpassen kann, verkleinerte sich die Diskretisierungsweite zeitweise.

Abschlussbericht des Verbundprojektes „Stationäres 3D-Strömungsmesssystem für hochturbulente Strömungszustände unter Tide-, Strömungs- und Welleneinfluss“ - Teil D: „Numerische Simulationen und physikalische Versuche“

In nächsten Schritt wurde das numerische Modell entsprechend Abbildung 3-4 neu aufgebaut und hierbei auf eine höhere Auflösung im Bereich unterstrom des Hubtores geachtet.

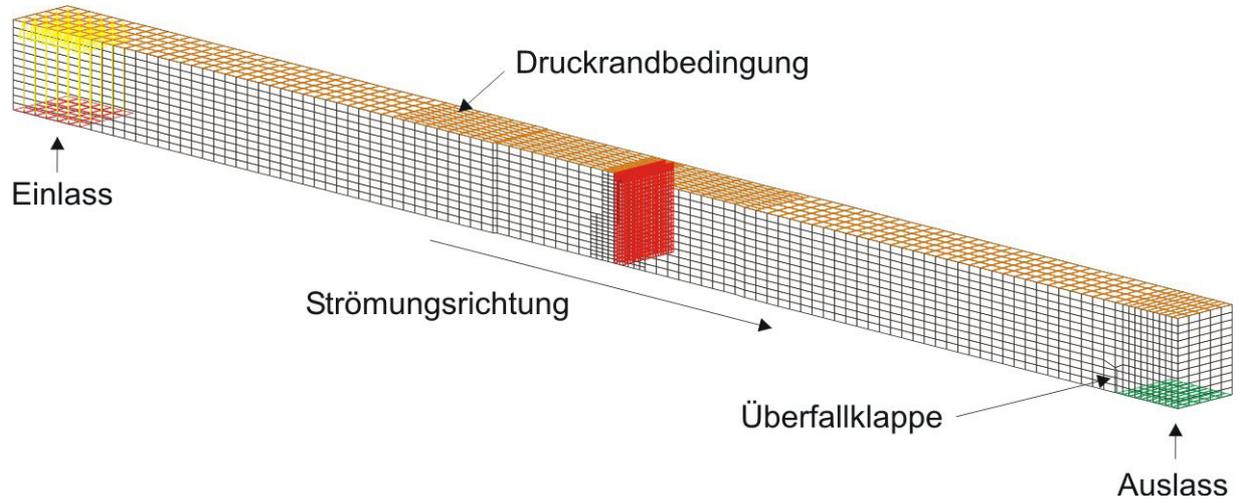


Abb. 3-5: Darstellung der Randbedingungen im numerischen Modell

### 3.4 Modellierung eines kleineren Fließgewässers

Ein kleineres Fließgewässer sollte als Prototyp für spätere Simulationen des Emssperrwerkes simuliert werden. Hierfür wurde ein ca. 400 m langer Ausschnitt der Leine bei Hannover nachgebildet.

Für die numerische Simulation dieses Leineabschnittes wurden zwei Modelle mit unterschiedlichen Gitternetzstrukturen aufgesetzt (Abb. 3-6). Den Abbildungen ist zu entnehmen, welche Zellen für den Anfangszustand der Berechnung als wassergefüllt (hell) und welche als luftgefüllt (dunkel) definiert waren.

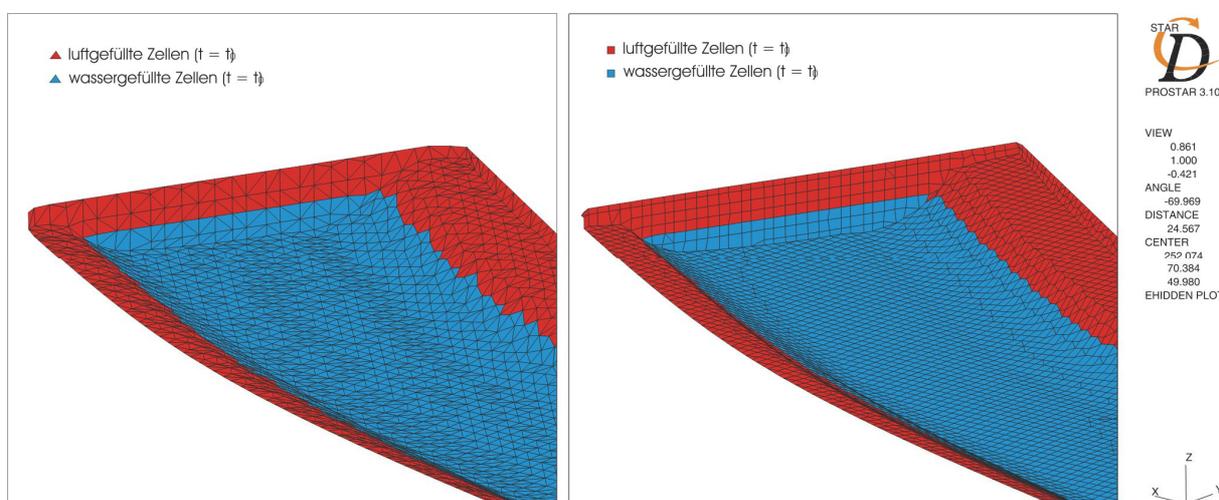


Abb. 3-6:: Darstellung des Berechnungsgitters bestehend aus Tetraederzellen (links; 160.000 Zellen); bestehend aus Hexaederzellen (rechts; 90.000 Zellen)

Bei den Testsimulationen mit verschiedenen Turbulenzmodellen wurden mit dem k- $\epsilon$  / High-Reynolds-Number-Modell konvergierende Simulationen erreicht, sodass alle weiteren Simulationen mit diesem Modell durchgeführt wurden. Den Simulationen liegen die in Tabelle 3-3 angegebenen Parameter zugrunde.

| Parameter                       | Wert  |
|---------------------------------|-------|
| Durchfluss $Q_{SG}$ [ $m^3/s$ ] | 14,30 |
| Durchfluss $Q_l$ [ $m^3/s$ ]    | 0,18  |
| Elog-Beiwert Sohle [-]          | 6     |
| Zeitschrittweite [sec]          | 0.1   |
| Iterationsschritte [-]          | 16000 |

Tab. 3-3: Randbedingungen des numerischen Modells der Leine

### 3.5 Modellierung des Emssperrwerkes

Der Aufbau des Gitternetzes erfolgte zunächst über das Einlesen von vorliegenden Peildaten in 30 Profilen im zu berücksichtigenden Abschnitt von 1,5 km stromauf und 1,0 km stromab des Emssperrwerkes. Anhand dieser Daten wurde die Flussgeometrie modelliert und in diese das nach den Originalplänen als CAD-Datei erstellte Emssperrwerk eingefügt (Abb. 3-7).

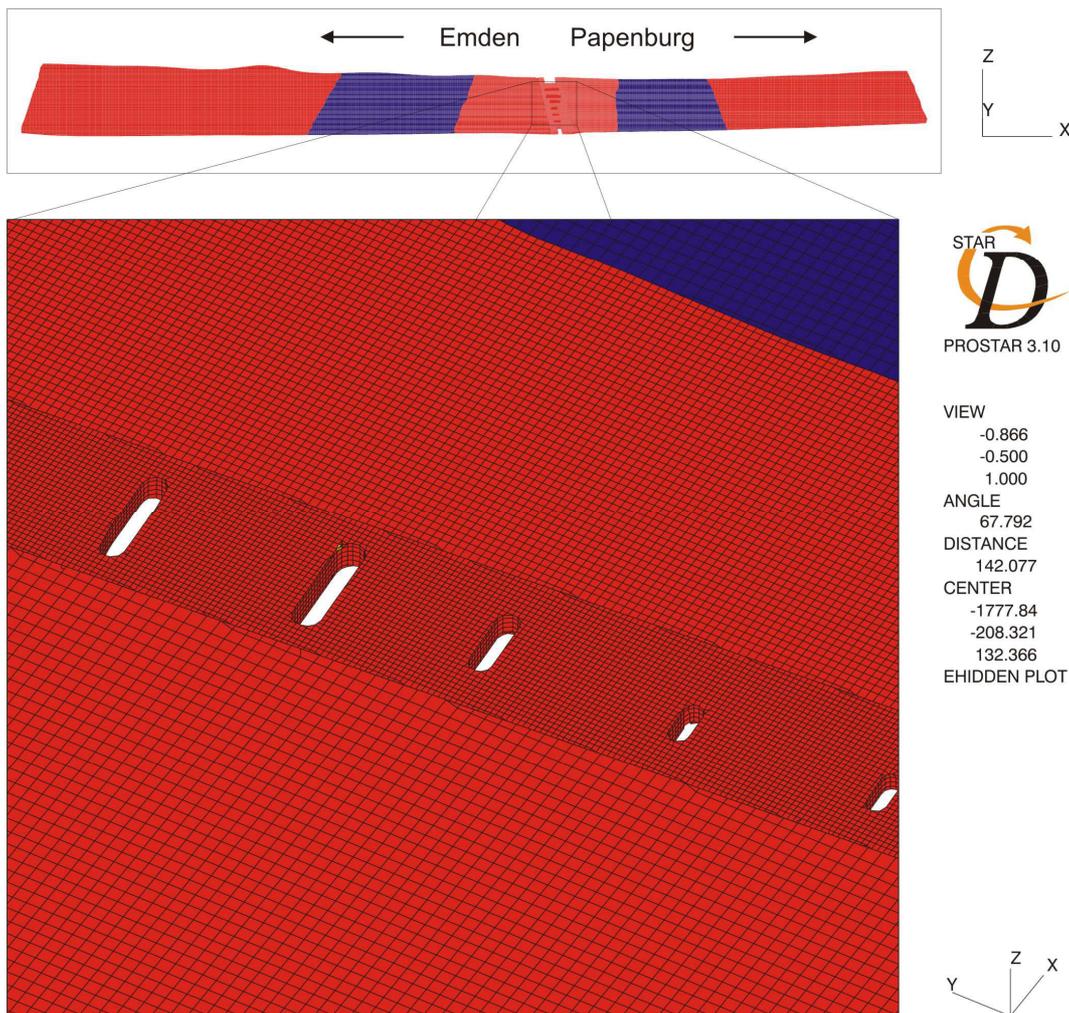


Abb. 3-7: Ausschnitt des numerischen Modells des Emssperrwerkes

Das numerische Modell besteht aus ca. 590.000 Zellen mit einer Kantenlänge von 3 bis 5 cm für die Modelle im Maßstab 1:60. Für Modelle im Naturmaßstab lag die minimale Zellgröße bei 50 cm im Bereich der Pfeiler. Eine explizite Abbildung der numerischen Modelle soll an dieser Stelle nicht erfolgen, da die Größe des Modellgebietes zusammen mit der hohen Auflösung eine zusammenhängende Darstellung unmöglich macht.

Die Simulationen wurden den Versuchen im hydraulischen Tidemodell (Kapitel 4-7) entsprechend mit den in Tabelle 3-3 dargestellten Randbedingungen durchgeführt. Am Inlet wurde eine Turbulenzintensität von 10 % und eine Länge von 0,50 m angegeben.

| Lastfall   | Beschreibung Lastfall       | Fläche Eintrittsrandbedingung / Inlet [m <sup>2</sup> ]* | Strömungsgeschwindigkeit Inlet [m/s] | Durchfluss Natur [m <sup>3</sup> /s] |
|------------|-----------------------------|--|--------------------------------------|--------------------------------------|
| 1.1 Flut   | Gesamtes Sperrwerk geöffnet | 2615   | 1.235                                | 3230                                 |
| 1.1 Ebbe   |                             | 2415   | 1.118                                | 2700                                 |
| 1.2.1 Flut | HSÖ geschlossen             | 2615   | 1.235                                | 3230                                 |
| 1.2.1 Ebbe |                             | 2415   | 1.118                                | 2700                                 |
| 1.3.4 Flut | 1. NÖ und 2.NÖ geschlossen  | 2615   | 1.235                                | 3230                                 |
| 1.3.4 Ebbe |                             | 2415   | 1.118                                | 2700                                 |
| 3.1.1      | Sturmflutkehrung            | 2615   | 1.683                                | 4400                                 |
| 3.2        | Sturmflutkehrung            | 2615   | 1.682                                | 4400                                 |

\* Die Fläche der Eintrittsrandbedingung wird in STAR-CD einheitenfrei angegeben. Je nach Modellmaßstab wird diese dann auf cm<sup>2</sup>, m<sup>2</sup>, etc. umgerechnet.

Tab. 3-4: Versuchparameter für die vergleichenden Berechnungen am Emssperrwerk

### 3.6 Modellierung beweglicher Strukturen im Emssperrwerk

Das im Kapitel 3.5 beschriebene numerische Modell wurde um vereinfachte Torgeometrien ohne Trägerkonstruktion erweitert, mit denen die sich bewegenden Tore des Sperrwerkes naturähnlich in ihrer Bewegung nachbilden lassen. Hiermit lassen sich die veränderlichen Strömungsgeschwindigkeiten infolge des Schließens einzelner oder mehrerer Tore nachbilden. Bei den Toren wurde die Trägerkonstruktion nicht berücksichtigt, da dies zu einer weiteren Erhöhung der Zellanzahl um mehrere Hunderttausend geführt hätte. Durch das Beschränken auf die für die Strömungsbeeinflussung maßgeblichen äußeren Abmessungen der Tore wurde eine Beschränkung der Rechenzeit erreicht.

## 4 Strömungsmechanische Versuchsanlagen zum Test der entwickelten Messgeräte und HN-Modelle

### 4.1 Eingesetzte Messtechnik - ADV-Sonde

Zur Messung der Strömungsgeschwindigkeiten wurde eine nach dem Doppler-Prinzip arbeitende ADV-Sonde (Acoustic-Doppler-Velocimetry) der Firma NORTEK eingesetzt. Es wird ein kurzer akustischer Impuls bekannter Frequenz entlang der vertikalen Achse des Messkopfes

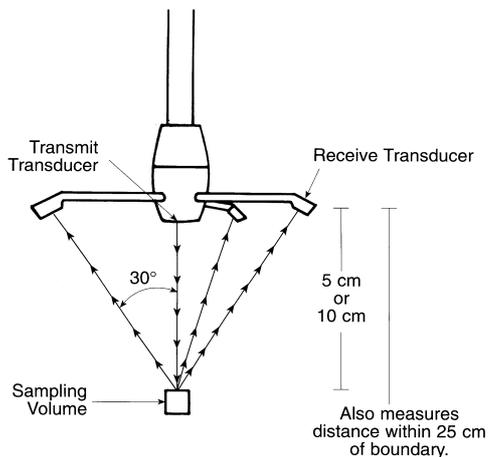


Abb. 4-1: ADV-Sonde der Firma NORTEK zur Messung der Strömungen [NORTEK, 1996]

ausgesendet. Partikel im vorbeiströmenden Wasser werfen ein Echo dieses Impulses zurück. Das reflektierte Signal wird von drei Empfangselementen des Messkopfes registriert und die auftretende Frequenzverschiebung zwischen ausgesendetem Impuls und zurückgeworfenem Echo erfasst. (NORTEK AS, 1996). Ungenaue Messungen können auftreten, wenn die Konzentration reflektierender Partikel im Wasser zu gering ist oder ein starker Luftblasenanteil vorhanden ist

Für die Auswertung der ADV-Daten wurde für jeden Messpunkt eine zeitliche Mittelung für die gemessenen Ge-

schwindigkeitskomponenten  $u$ ,  $v$  und  $w$  durchgeführt. Aus den gemessenen Zeitreihen der Ergebnisdarstellung wurde außerdem das Turbulenzspektrum dargestellt, das aus der Standardabweichung o.g. Messgrößen berechnet wurde.

### 4.2 Umlaufrinne Hannover - Marienwerder

Die Umlaufrinne / Marienwerder des FRANZIUS-INSTITUTES besteht aus zwei sich 22 m voneinander entfernt gegenüberliegenden Halbkreisen mit einem Durchmesser von 5,90 m (Abb. 4-3). Zwischen den beiden Halbkreisen sind auf der einen Seite eine gerade Fließstrecke mit Sichtfenstern zur Strömungsbeobachtung und gegenüberliegend 4 Pumpen zur Erzeugung einer Strömung angeordnet. Die Strömungsgeschwindigkeit in der Rinne kann über separat regelbare Pumpen stufenlos eingestellt werden. Dies gilt ebenso für die zwei zum Befüllen und Leeren der Rinne vorgesehenen Pumpen.



Abb. 4-2: Umlaufrinne des FRANZIUS-INSTITUTES in Hannover - Marienwerder

Alle Pumpen können elektronisch über Computer geregelt werden, so dass die Steuerung von Versuchen mit wechselnder Strömungsgeschwindigkeit, Änderung der Strömungsrichtung und der Wassertiefe sehr exakt auch über einen längeren Zeitraum möglich ist.

Da die in der Umlaufrinne befindliche Wassermenge relativ klein und konstant ist, kann die in den Versuchen erforderliche Trübung mit verhältnismäßig kleinen Mengen an Schwebstoffen erreicht und über einen langen Zeitraum gehalten werden. Dies war insbesondere in der Phase der Erprobung eine Voraussetzung für die Kalibrierung des PIV-Systems.

Die Umlaufrinne verfügt über folgende technische Spezifikationen:

- Umlaufgeschwindigkeit regelbar, abhängig vom Füllstand
- Wasserstand von 0 m bis 1,0 m
- 4 einstufige Kreiselpumpen (Weise & Monski – Typ PL XII)

### 4.3 Strömungsrinne Wasserbauhalle Schneiderberg

In der Strömungsrinne des FRANZIUS-INSTITUTES können über eine Überfallklappe am Ablauf variable Wasserstände eingestellt, gehalten und die Zuflusswassermenge über induktive Durchflussmesser mit Drosselverschlüssen stufenlos reguliert werden. Im mittleren Bereich sind Glasscheiben angeordnet, die eine Beobachtung der Strömungsvorgänge während der Untersuchungen ermöglichen. In diesem Bereich erfolgte der Einbau eines Ausschnittsmodells eines Hubtores des Emssperrwerkes im Maßstab 1:15 (Abb. 4-4).

An diesem Modell wurden zunächst Untersuchungen quasi-stationärer Strömungsvorgänge am unbeweglichen, teilgeschlossenen Hubtor untersucht.

In einem zweiten Schritt wurden Strömungsvorgänge an einem sich bewegenden Hubtor in einem engmaschigen Messpunktnetz untersucht.

Grundriss [nicht maßstäblich], Maße in [cm]

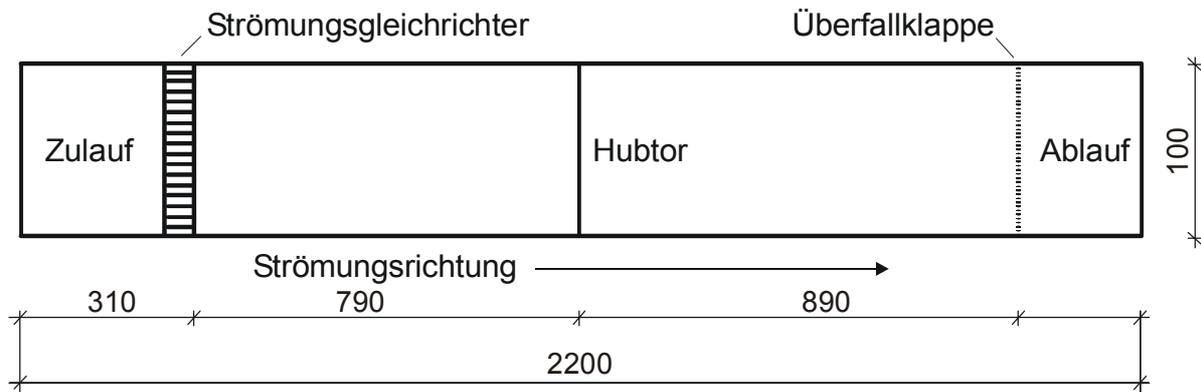


Abb. 4-3: Übersichtsplan der Strömungsrinne / Schneiderberg

Eine Hubvorrichtung erlaubt es das Hubtor mit einer Positioniergenauigkeit von 1/10 mm auf und ab zu bewegen (Abb. 4-5). Die Bewegung des Tores, inklusive Beschleunigung und zeitweiligem Verharren an bestimmten Positionen, ist stufenlos steuerbar. Mit der verfahrbaren Halterung konnte die ADV-Sonde hoch genau (im Bereich von 1/10 mm) positioniert werden.

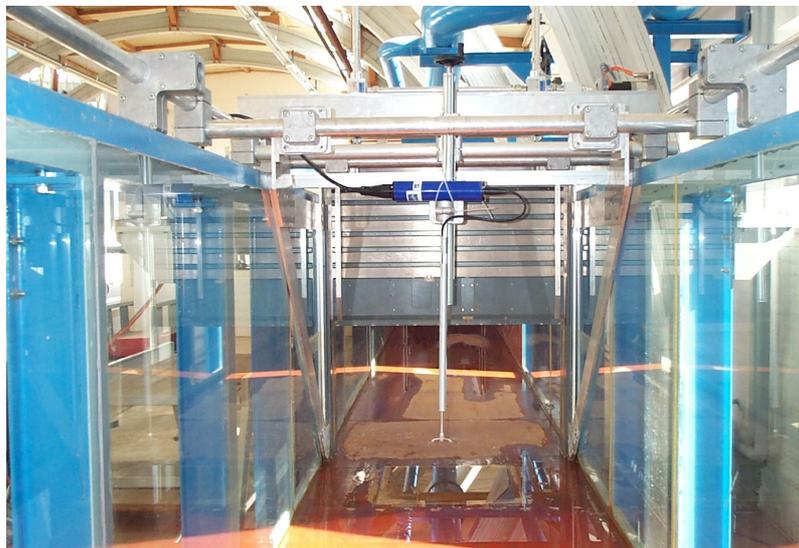


Abb. 4-4: Strömungsrinne mit eingebautem Hubtor und Hubvorrichtung

Es wurde eine Fehlerbetrachtung der eingestellten Wasserstände durchgeführt, bei der die prozentuale Abweichung der eingestellten Randbedingungen von den geforderten Randbedingungen ermittelt wurde. Die Wasserstände können mit einer Abweichung von maximal +/- 2 % eingestellt werden, soweit dies in Abhängigkeit von der Bewegung der Wasserspiegellage durch Turbulenzen abzuschätzen ist. Abweichungen durch eine falsch eingestellte Durchflussmenge liegen im Bereich von maximal +/- 1%.

#### 4.4 Modellversuche am unbeweglichen Hubtormodell

Es wurden zwei verschiedene Wasserstände (Lastfall 1 und Lastfall 2) bei einer konstanten Öffnungsweite des Tores eingestellt (Tab. 4-1).

|                   | Öffnungsweite des Tores [cm] | Durchfluss [l/s] | Oberwasserstand [cm] | Unterwasserstand [cm] | Strömungszustand (UW) |
|-------------------|------------------------------|------------------|----------------------|-----------------------|-----------------------|
| <b>Lastfall 1</b> | 3,3                          | 70,5             | 68,0                 | 34,0                  | strömend              |
| <b>Lastfall 2</b> | 3,3                          | 70,5             | 52,0                 | 19,5                  | schießend             |

Tab. 4-1: Versuchsprogramm in der Strömungsrinne / Schneiderberg

In 3 Messebenen (Abb. 4-6) wurden mit der ADV-Sonde an festen Messpunkten im Abstand von 2,5 bzw. 5,0 cm (abhängig von der Wassertiefe) Strömungsgeschwindigkeiten in allen drei Raumrichtungen aufgezeichnet. Die Geschwindigkeiten wurden für jeden Messpunkt über einen Zeitraum von  $t = 60$  s digital erfasst, um bei der Auswertung eine ausreichende Genauigkeit bei der zeitlichen Mittelung zu erzielen.

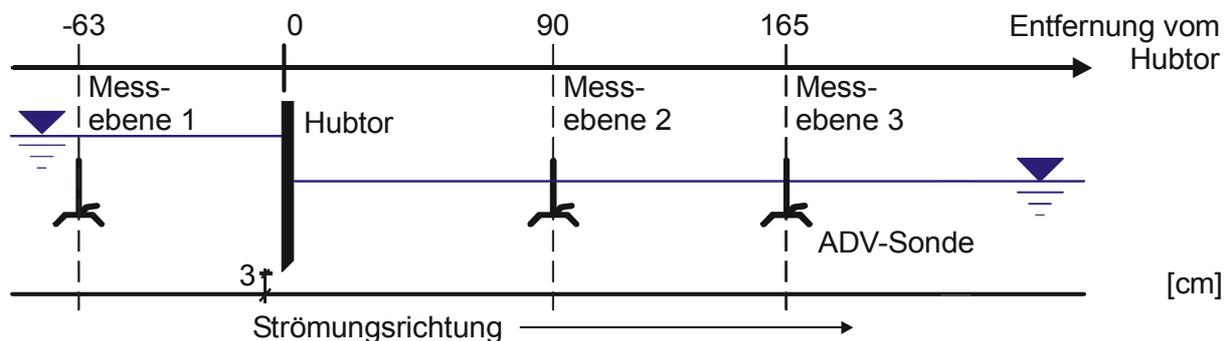


Abb 4-5: Messanordnung am stationären Hubtor in der Strömungsrinne / Schneiderberg

Das PIV-System wurde bei diesen Versuchen für die Messung von Strömungsgeschwindigkeiten an folgenden Positionen eingesetzt:

|                                  | Pos. 1: 63 cm<br>stromauf des Tores | Pos. 2: 90 cm<br>stromab des Tores | Pos. 3: 165 cm<br>stromab des Tores |
|----------------------------------|-------------------------------------|------------------------------------|-------------------------------------|
| Lastfall 1 – strömender Abfluss  | Ja                                  | Ja                                 | Ja                                  |
| Lastfall 2 – schießender Abfluss | Ja                                  | Nein                               | Nein                                |

Tab. 4-2: Durchgeführte PIV-Messungen am stationären Hubtormodell

Die für die Versuche variablen Prozessparameter des PIV-Systems wurden im Verlauf der Experimente den unterschiedlichen Lastfällen angepasst und optimiert. Die wesentlichen Randbedingungen waren die Einflüsse der optischen Übergänge zwischen den Medien mit

Abschlussbericht des Verbundprojektes „Stationäres 3D-Strömungsmesssystem für hochturbulente Strömungszustände unter Tide-, Strömungs- und Welleneinfluss“ - Teil D: „Numerische Simulationen und physikalische Versuche“

unterschiedlichem Brechungsindex (Luft, Glas, Wasser), sowie die Abstände der Systemkomponenten untereinander, der Beobachtungswinkel und die Korrektur der auftretenden Abbildungsverzerrungen (Scheimpflug-Korrektur). Zusätzlich gewannen der Einfluss von Wellen an der Wasseroberfläche und Luftblasenbildung in der Strömung an Bedeutung.

Der Blickwinkel der Kameras betrug  $30^{\circ}$ - $45^{\circ}$  gegen die Strömungsrichtung. Der Abstand der Kameras zur Lichtschnittebene betrug 1,20-1,90 m.

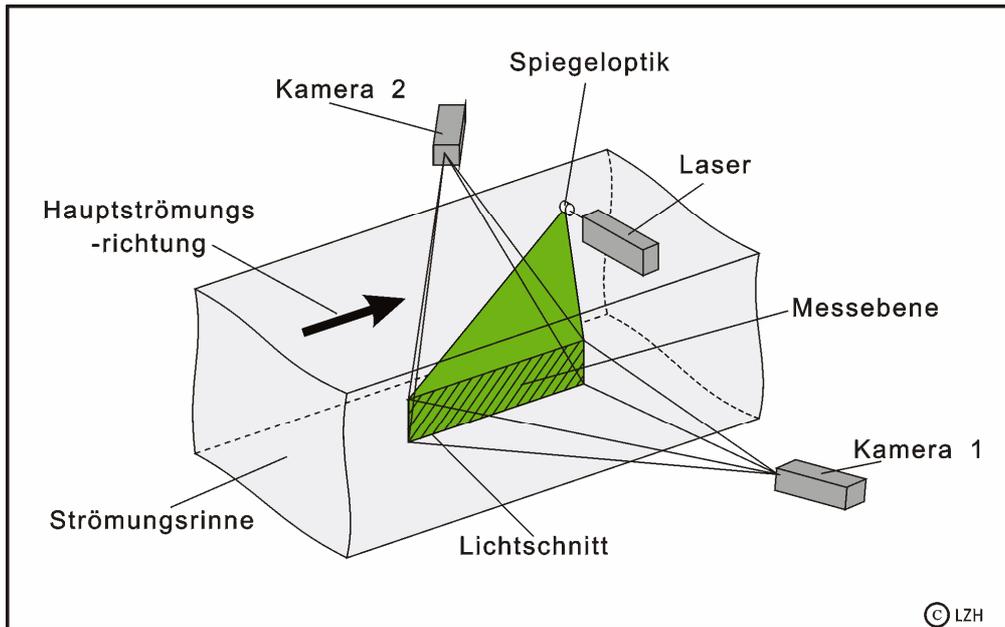


Abb. 4-6: Skizze des Aufbaus und Anordnung der Komponenten (Schema)



Abb. 4-7 : Versuchsaufbau Strömungsrinne Schneiderberg

Als Tracerpartikel diente ein rundkörniges Kunststoffmaterial mit einem Durchmesser von 0,5 – 1,5 mm. Die Messebenen befanden sich dabei senkrecht zur Hauptströmungsrichtung.

#### 4.5 Modellversuche am beweglichen Hubtormodell

Für erste Vergleiche der gemessenen Strömungsgeschwindigkeiten an einer beweglichen Struktur mit der numerischen Simulation wurde bei einem konstant eingestelltem Wasserstand von  $H = 50$  cm und einem Durchfluss von  $Q = 50$  l/s (Tab. 4-4) die Entwicklung der Strömungsgeschwindigkeiten stromab des Hubtores untersucht. Entsprechend Abbildung 4-9 wurde ein Messraster aus 189 Messpunkten aufgespannt. Die Messungen erfolgten hierbei in der Mitte und in den Viertelpunkten der Rinne.

| Durchfluss [l/s] | Wasserstand [cm] | Max. Öffnungsweite [cm] | Min. Öffnungsweite [cm] | Heben / Senken [cm/s] |
|------------------|------------------|-------------------------|-------------------------|-----------------------|
| 50.0             | 50.0             | 50.0                    | 10.0                    | 0.5                   |

Tab. 4-3: Versuchsparameter für die Untersuchungen am beweglichen Hubtor

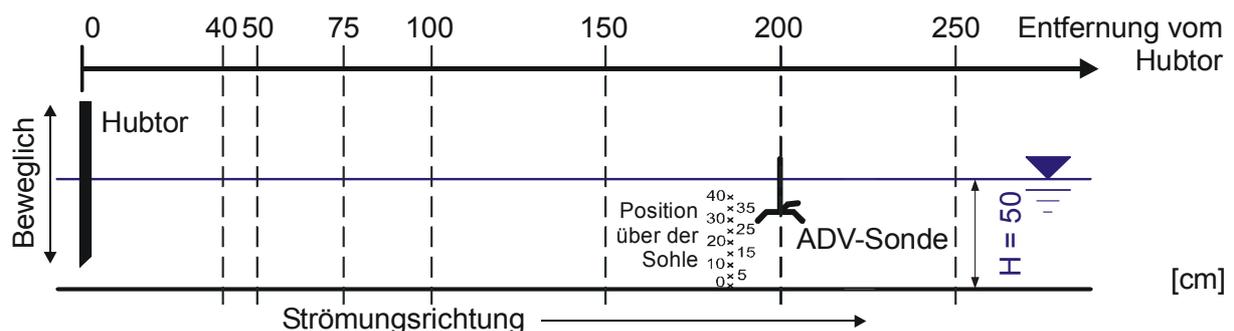


Abb. 4-8: Versuchsaufbau am beweglichen Hubtor in der Strömungsrinne / Schneiderberg

#### 4.6 Modellversuche für ein kleineres Fließgewässer

Um die Eignung des ausgewählten Programmsystems für die Simulation eines Ausschnittes der Ems zu überprüfen, sollte zunächst das numerische Modell eines kleineren Flusses aufgebaut werden. Dieses war von den geometrischen Abmessungen kleiner als das spätere Modell des Emssperwerkes. Hiermit konnte eine optimierte Diskretisierung in den Randbereichen des Gewässers ermittelt werden. Zur Simulation wurde ein Teilabschnitt des Schnellen Grabens (Abb. 4-10) in Hannover ausgewählt, da durch das FRANZIUS-INSTITUT 1997 Untersuchungen für die Gestaltung der Einmündung eines Fischaufstiegs in den Schnellen Graben durchgeführt wurden.

Der Untersuchungsbereich beinhaltete die gesamte Bogenstrecke des Schnellen Grabens bis rd. 200 m oberhalb und bis rd. 180 m unterhalb der Ihmemündung (km 17,100 bis km 17,480), d. h. eine Fließstrecke von ca. 380 m.



Abb. 4-9: Schneller Graben in Hannover; im Vordergrund Mündung in die Ihme

Die Modellgeometrie wurde auf der Grundlage von 13 Querprofilen aufgebaut.

Eine Messung ergab einen Abfluss im Schnellen Graben von  $Q_{SG} = 14,3 \text{ m}^3/\text{s}$  und in der Ihme  $Q_I = 0,18 \text{ m}^3/\text{s}$ . Die Wasserspiegellage wurde mit  $N_{SG} = +48,29 \text{ mNN}$  im Profil 1 und  $N_{SG} = +43,32$  im Profil 10 eingemessen.

Mittels der gepeilten Querprofile wurde ein hydraulisches Modell im Maßstab 1:20 aufgebaut. Die hydraulischen Modellversuche wurden durchgeführt, um die optimale Lage und Strömungsgeschwindigkeit in dem Bereich einer Fischaufstiegsanlage zur Überwindung des Wehres Schneller Graben zu bestimmen. Zur Beurteilung und Dokumentation der Strömungsgeschwindigkeiten und der Geschwindigkeitsverteilung wurden digitale Bildaufnahmen von Oberflächenschwimmern ausgewertet.

#### 4.7 Modellversuche im hydraulischen Tidemodell des Emssperrwerkes

In einem hydraulischen Tidemodell wurden Untersuchungen zu den im Sperrwerksbereich zu erwartenden tide- und betriebsbedingt instationären Strömungsgeschwindigkeiten und -richtungen bei mittleren Tideverhältnissen und bei Sturmfluten durchgeführt.

Um diesen Anforderungen zu genügen, wurde für die vorliegenden Modelluntersuchungen ein Bereich der Ems von 1500 m seewärts des Sperrwerkes bis 1000 m binnenseitig des Sperrwerkes im gewählten Modellmaßstab von 1:60 nachgebildet.

Für Untersuchungen der tidebedingten Strömungsverhältnisse im Bereich des Emssperrwerkes, die sich in verschiedenen Betriebszuständen des Sperrwerkes einstellen, war es erforderlich, charakteristische Tideverläufe naturähnlich zu simulieren. Dazu wurde ein natürlicher Tidezyklus (14-tägige Tidefolge mit halbtäglicher und halbmonatlicher Ungleichheit, Spring- und Nipptiden), überlagert mit meteorologischen Ereignissen, nachgebildet (Abb. 4-11).

Die großräumigen Tideströmungsverhältnisse an der Wasseroberfläche wurden analysiert. Bildaufnahmen von Modelltreibkörpern ermöglichten aus dem zurückgelegten Weg eines Treibkörpers auf einem belichteten Film über die bekannte Belichtungszeit und die vorgegebene Einheitslänge die Strömungsgeschwindigkeit zu ermitteln. Die Genauigkeit dieses Verfahrens lag bei ca.  $\pm 2 \text{ cm/s}$  für die Naturwerte.

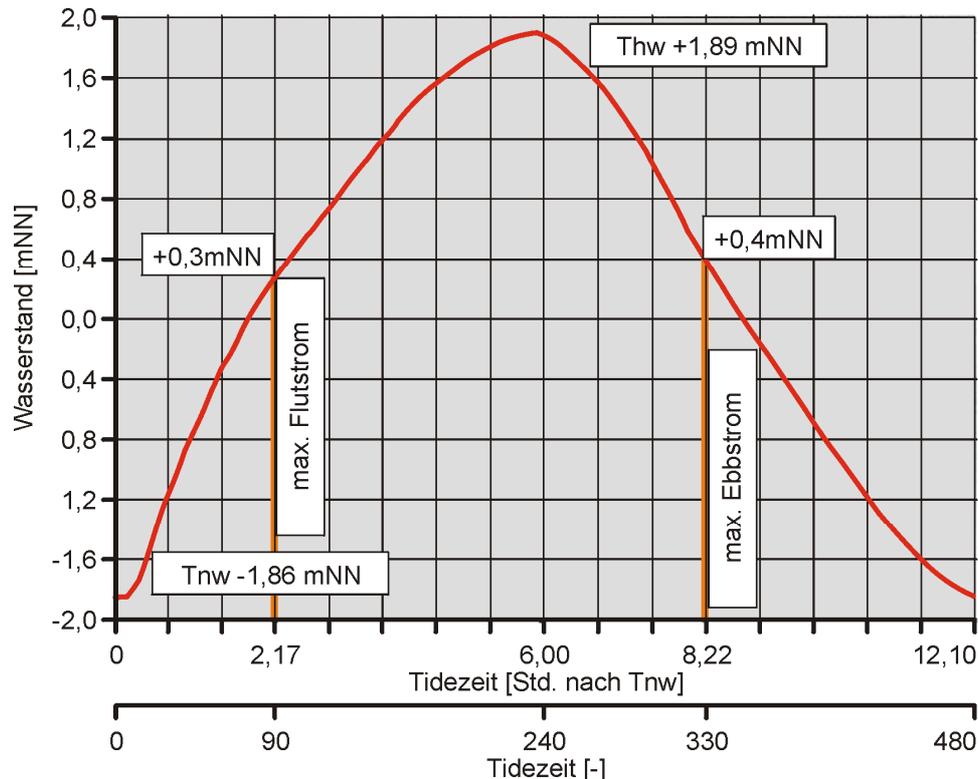


Abb. 4-10: Darstellung der in den hydraulischen Modellversuchen eingesetzten Modelltide

#### 4.8 Auswertung der Mess- und Simulationsergebnisse mit MATLAB

Für die Auswertung von Messergebnissen der entwickelten Messsysteme und Simulationsergebnissen wurde zur Vereinfachung nachfolgender Untersuchungen ein gemeinsames Auswerteverfahren entwickelt. Aus folgenden Gründen wurde sich für das Programmsystem MATLAB entschieden:

1. Der zusammen mit dem PIV-System nutzbare MATLAB-Link macht es möglich die FlowManager Software durch ein einfaches, effizientes und flexibles Werkzeug bei der Datenverarbeitung und Darstellung der Ergebnisse zu erweitern. Hierdurch können während der Messung Daten aus der FlowManager Datenbank in die MATLAB Oberfläche transferiert werden und Datenanalysen unter Verwendung der MATLAB Skripts durchgeführt werden.

Sollte der direkte Link zu MATLAB nicht Online genutzt werden, so ist auch der Import abgespeicherter ASCII Dateien möglich. Im Anschluss daran konnte die Aufbereitung und Darstellung in einem gemeinsam mit den Projektpartnern definierten Format erfolgen.

2. Die Ablage der aufgezeichneten Daten des mechanischen Anströmkörper-Strömungsmesssystems erfolgt ebenfalls in einem Format, welches eine Weiterverarbeitung in MATLAB ermöglicht. Hier stehen ein Single-Block-Format, sowie die ASCII-Ausgabe zur Verfügung, wobei letztere deutlich mehr Speicherplatz benötigt.

- Die in den numerischen Simulationen in hoher räumlicher und zeitlicher Auflösung erzeugten Daten sind vergleichbar zu analysieren und auszuwerten. MATLAB arbeitet auf Matrizenbasis und ist daher bei gleicher oder höherer Qualität in der Bearbeitung der Ergebnisse zu nutzen und kann so das in STAR-CD integrierte Tool für Auf- und Weiterverarbeitung von Simulationsergebnissen ergänzen.

Die in STAR-CD berechneten Werte (Abb. 4-12) werden in einem Userfile gespeichert. In MATLAB müssen die Daten in Matrizen (2-D) bzw. Arrays (3-D) vorliegen. Die Auswertung der dreidimensionalen Geschwindigkeitsvektoren in einem Volumen erfordert sechs 3-D-Arrays, alle mit identischem Format (X kreuz Y kreuz Z, Anzahl der Zellen in der jeweiligen Richtung). Der Array X enthält die x-Koordinaten der Zellen in den Spalten, alle Zeilen und Schichten sind gleich. Entsprechend ändern sich in Y nur die Zeilen, Z besteht aus unterschiedlichen Schichten von identischen Matrizen. Die Arrays U, V und W enthalten die Vektorkomponenten für jeden einzelnen Punkt, hier sind also alle Elemente unterschiedlich. Die Userdatei muss daher für MATLAB mit z.B. Excel automatisiert aufbereitet werden und kann dann in MATLAB eingelesen und zur Darstellung weiterbearbeitet werden (Abb. 4-13).

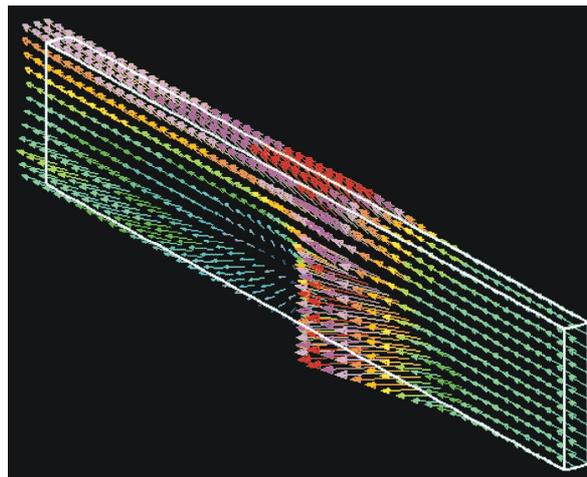


Abb. 4-11: Darstellung von Ergebnisdaten in STAR-CD

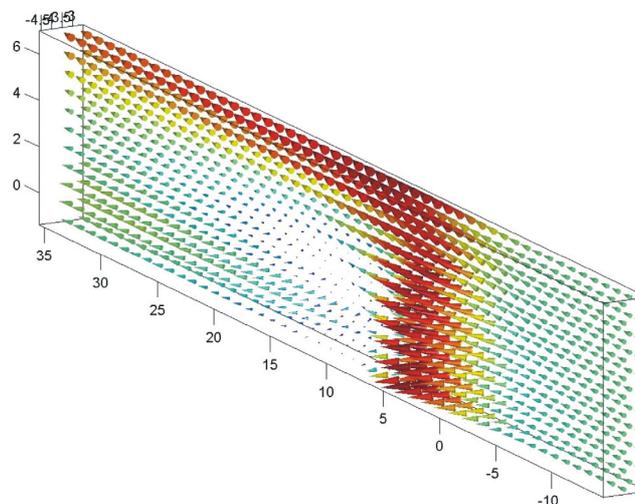


Abb. 4-12: Darstellung von Ergebnisdaten in MATLAB

## 5 Ergebnisse

### 5.1 Ergebnisse der Simulationen eines unbeweglichen Hubtores

Für den Vergleich der PIV-Messungen mit den numerischen Simulationen wurden in ausgewählten Schnitten Isolinienplots der Strömungsgeschwindigkeiten betrachtet.

Außerdem wurden aus den Punktmessungen der ADV-Sonde und den Ergebnissen der dreidimensionalen Simulationen an ausgewählten Stellen Strömungsprofile über die jeweilige Wassertiefe erzeugt. Durch eine Reduktion auf eine gemeinsame Datenbasis wurde eine Auswertung im Hinblick auf die Übereinstimmung zwischen den Messungen und den numerischen Simulationen möglich.

In den Diagrammen der Abbildungen 5-1, 5-2 und 5-3 werden die gemessenen Strömungsgeschwindigkeiten in Hauptströmungsrichtung ( $x$ -Richtung) mit der rechnerischen in den drei Messebenen und für die zwei untersuchten Lastfälle verglichen. Auf der  $x$ -Achse ist jeweils die Strömungskomponente in Hauptströmungsrichtung aufgetragen, während die  $y$ -Achse die Lage der Messwerte über der Sohle angibt. Um die dargestellten, zeitlich gemittelten Werte ist die Standardabweichung der ADV-Sonde aufgetragen.

#### 5.1.1 Ergebnisse oberstrom des unbeweglichen Hubtores - Messquerschnitt 1

Es zeigt sich, dass die gemessenen und berechneten Geschwindigkeiten oberstrom des Hubtores außerhalb der bodennahen Grenzschicht nur geringfügig voneinander abweichen (Abb. 5-1).

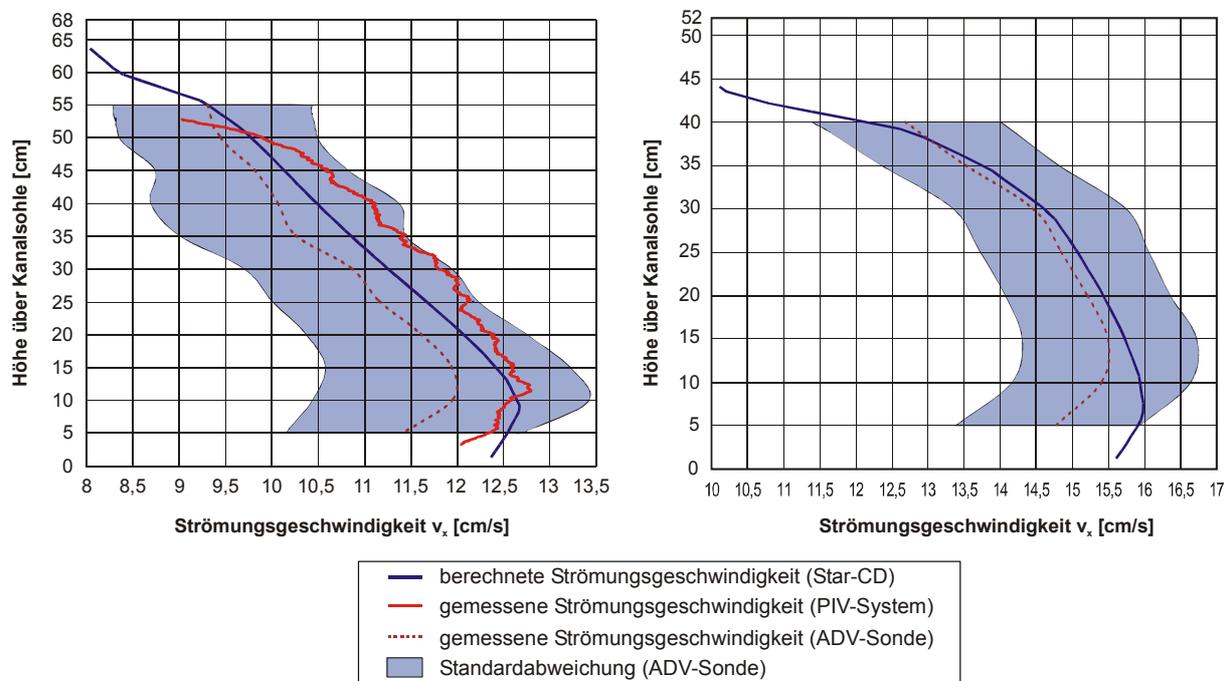


Abb. 5-1: Strömungsgeschwindigkeiten in Hauptströmungsrichtung im Messquerschnitt 1 (63 cm oberstrom des Hubtores) für den Lastfall „Strömender Abfluss“ (links) und für den Lastfall „Schießender Abfluss“ (rechts)

Die maximale Abweichung liegt im Sohlbereich bei ca. 1,00 cm/s beim Lastfall „Strömender Abfluss“. Dies entspricht einer prozentualen Abweichung von ca.  $\pm 6,5$  %. Weiter oberhalb der Sohle betragen die Abweichungen bis zu 0,25 cm/s, was einer prozentualen Abweichung von ca.  $\pm 1,5$  % entspricht. Beim Lastfall „Schießender Abfluss“ sind die Abweichungen noch geringer.

Die Standardabweichungen für den strömenden Abfluss liegen über den Messquerschnitt zwischen 0,97 cm/s und 1,79 cm/s. Im Durchschnitt beträgt die Standardabweichung 1,24 cm/s und somit ca. 8 %. Beim schießenden Abfluss liegen die Werte zwischen 0,99 cm/s und maximal 1,85 cm/s. Im Durchschnitt betragen sie 1,23 cm/s und somit ebenfalls ca. 8 %.

Des Weiteren ist zu erkennen, dass die simulierten Werte im gesamten Gebiet innerhalb des Bereiches der Standardabweichung liegen. Der von der Messsonde angegebene Korrelationsparameter für die Komponenten in Strömungsrichtung lag bei beiden Lastfällen im Bereich von ca. 90 bis 95, so dass ein deutlicher Zusammenhang der Werte gegeben ist.

Insgesamt lässt sich aus den beschriebenen Ergebnissen schließen, dass das CFD-Programm STAR-CD unter Verwendung des Turbulenzmodells „ $k-\varepsilon$  / High Reynolds Number“ die Strömungsgeschwindigkeiten im Messquerschnitt oberhalb des Schützes sehr gut wiedergibt.

Die mit Hilfe des PIV-Systems gemessenen Strömungsgeschwindigkeiten ergeben ein Strömungsprofil, das dem der ADV-Messungen und dem der Simulationen gleicht. Es sind über die gesamte Tiefe höhere Strömungsgeschwindigkeiten gemessen worden. Besonders die höchste Strömungsgeschwindigkeit im Tiefenprofil des Lastfalls „Strömender Abfluss“ wurde in der richtigen Sohlage berechnet. Dies zeigt eine richtige Simulation der Ausdehnung der bodennahen Grenzschicht.

### **5.1.2 Ergebnisse unterstrom des unbeweglichen Hubtores - Messquerschnitt 2 und 3**

Die gemessenen und berechneten Strömungsgeschwindigkeiten weichen in den Messebenen 2 und 3 unterhalb des Hubtores zum Teil erheblich voneinander ab. Die ADV-Sonde misst hier sehr fluktuierende Geschwindigkeiten, wie dies auch zu erwarten ist, bei sehr geringen Korrelationen. Insbesondere im Messquerschnitt 2 (0,90 m unterhalb des Hubtores) ist erwartungsgemäß eine hohe Standardabweichung (Turbulenz) festzustellen.

Für die betrachteten Querschnitte unterhalb des Schützes nimmt der Korrelationsparameter Werte von z.T. unter 40 an, wobei Werte unter 70 auf schwierige Messbedingungen hindeuten. Dies kann bedeuten, dass die Sonde sich nicht im Wasser befindet, aber z.B. auch, dass die Sonde sich in einem Bereich mit großen Luftblasen befindet, wie es in diesem sehr turbulenten Abschnitt der Fall ist. Die gemessenen niedrigen Werte sind auf den Lufteintrag zurückzuführen, da die Sonde in weniger turbulenten Bereichen wieder einwandfreie Korrelationsdaten lieferte und somit ein Defekt auf jeden Fall ausgeschlossen werden konnte.

Daraus lässt sich schließen, dass die Geschwindigkeit im turbulenten Bereich aufgrund des erhöhten Lufteinschlusses mit der Messsonde nicht genau genug bzw. nicht mit der geforderten Genauigkeit wiedergegeben werden kann, bzw. es nicht möglich ist, eine mittlere Geschwindigkeit für jeden Messpunkt mit sehr guter Näherung zu bestimmen. Für diese Mess-

Abschlussbericht des Verbundprojektes „Stationäres 3D-Strömungsmesssystem für hochturbulente Strömungszustände unter Tide-, Strömungs- und Welleneinfluss“ - Teil D: „Numerische Simulationen und physikalische Versuche“

querschnitte kann daher nur bedingt eine Aussage über die Qualität der gewonnenen numerischen Ergebnisse getroffen werden. Ein Vergleich von numerischen Simulations- und physikalischen Messergebnissen ist in diesem Bereich schwer. Das Simulationsergebnis kann unter Beachtung der möglichen Fehlerquellen als zufrieden stellend betrachtet werden.

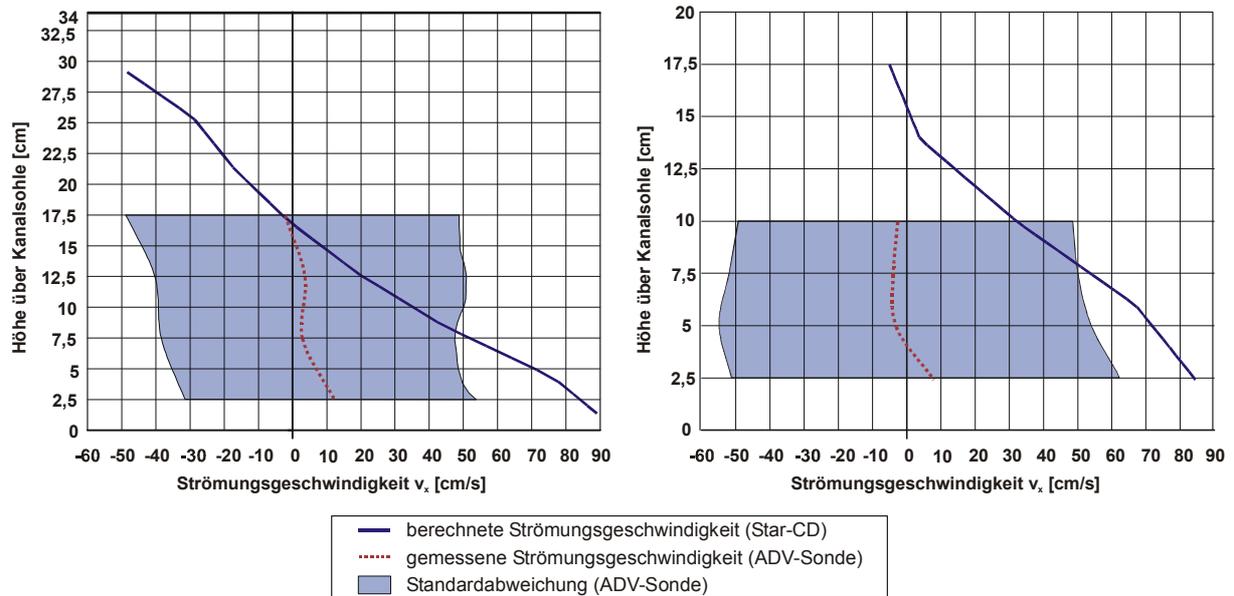


Abb. 5-2: Strömungsgeschwindigkeiten in Hauptströmungsrichtung im Messquerschnitt 2 (90 cm unterstrom des Hubtores) für den Lastfall „Strömender Abfluss“ (links) und für den Lastfall „Schießender Abfluss“ (rechts)

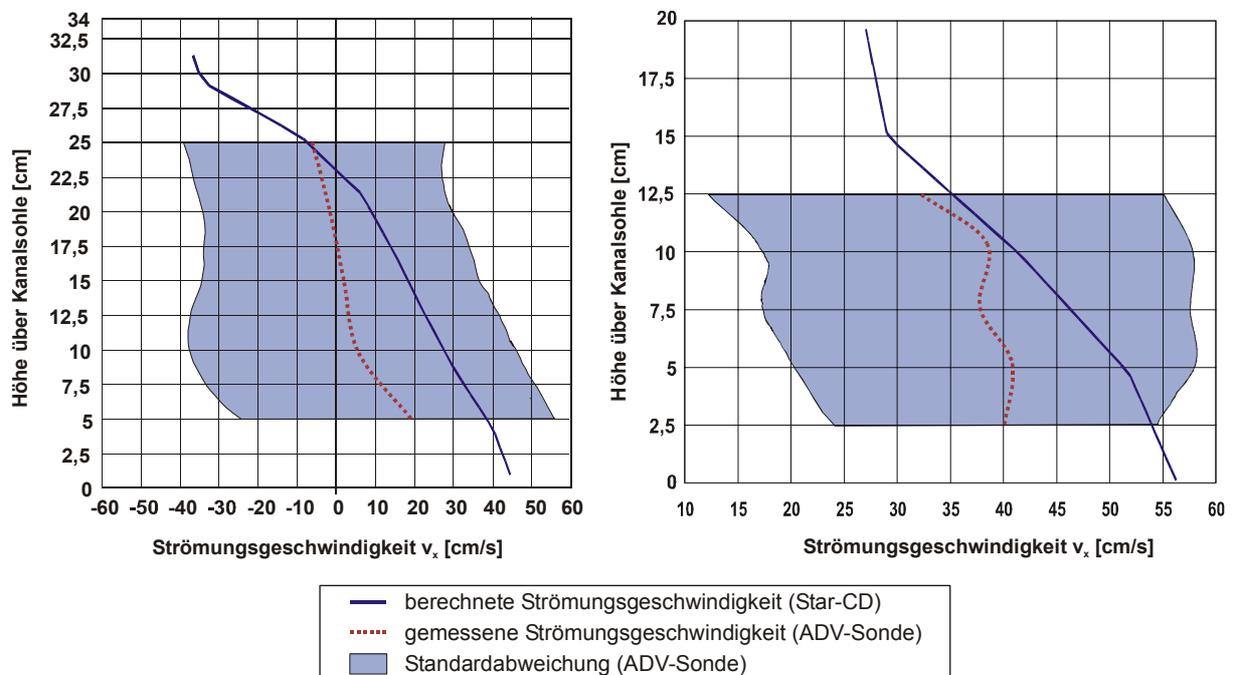


Abb. 5-3: Strömungsgeschwindigkeiten in Hauptströmungsrichtung im Messquerschnitt 3 (165 cm unterstrom des Hubtores) für den Lastfall „Strömender Abfluss“ (links) und für den Lastfall „Schießender Abfluss“ (rechts)

Das Turbulenzmodell „k- $\epsilon$  / High Reynolds Number“ liefert in den Messquerschnitten 2 und 3 unterhalb des Hubtores physikalisch richtige Ergebnisse. Die Strömungsgeschwindigkeit an der Wasseroberfläche ist bis auf den Lastfall „Schießender Abfluss“ in diesen Querschnitten negativ, d.h. es findet eine Rückströmung statt. Dies wird beim strömenden Abfluss deutlicher als beim schießenden Abfluss. An der Rinnensohle sind die Strömungsgeschwindigkeiten erwartungsgemäß am größten; sie betragen im Messquerschnitt 2 90 cm unterhalb des Hubtores bis zu 85 cm/s bei beiden Lastfällen.

Im Messquerschnitt 3 165 cm unterhalb des Hubtores ergeben sich maximale Strömungsgeschwindigkeiten von bis zu 55 cm/s. Es ist weiterhin zu erkennen, dass diese Geschwindigkeiten mit zunehmendem Abstand vom Hubtor geringer werden. Beim Vergleich der gemessenen und berechneten Strömungsgeschwindigkeiten im Messquerschnitt 3 ist zudem eine Annäherung, insbesondere für den schießenden Abfluss, zu erkennen. D.h. mit zunehmendem Abstand vom Hubtor werden auch zunehmend physikalisch korrekte Strömungsgeschwindigkeiten mit der ADV-Sonde gemessen.

## 5.2 Ergebnisse der Simulationen eines beweglichen Hubtores

Die Auswertung erfolgt für jeden der 9 Messpunkte einzeln (Abb. 5-17). Die x-Achse zeigt hierbei die Zeit der jeweiligen Messung an (0 bis 120 s). Die primäre y-Achse definiert die Lage des jeweiligen Messpunktes über der Sohle. An der sekundären y-Achse ist für jeden Messpunkt eine separate Geschwindigkeitsskala angeordnet. Zur Orientierung ist der Nulldurchgang für die Messwerte des jeweiligen Messpunktes angegeben.

Erwartungsgemäß zeigt sich beim zeitlichen Verlauf der Strömungsgeschwindigkeiten an den einzelnen Messpunkten eine starke Abhängigkeit von der Lage über der Sohle.

Je näher die Messpunkte an der Sohle liegen, desto stärker steigt die Strömungsgeschwindigkeit infolge des verringerten Durchflussquerschnittes bei gleichbleibendem Zufluss oberstrom (Abb. 5-4, Messpunktlage  $h/t = 0,1$ ). Die Strömungsgeschwindigkeiten nahe der Wasserspiegeloberfläche fallen infolge des Schließungsvorganges zunächst auf Werte um 0 cm/s ab (Abb. 5-4, Messpunktlage  $h/t = 0,6$ ). Nach der Schließung steigen die Strömungsgeschwindigkeiten in Sohlhöhe an. Hinter dem Hubtor bildet sich eine Walze mit nach oberstrom gerichteten Strömungsvektoren.

Der Vergleich der berechneten mit den gemessenen Strömungsgeschwindigkeiten zeigt temporäre Abweichungen in der dem sich schließenden Hubtor nächstgelegenen Messpunktebene. Diese Abweichungen sind in den Messpunktlagen 0,7, 0,6 und 0,5 durchschnittlich nach ca. 20 Sekunden abgeklungen. Danach pendeln sich die zuvor zu hoch prognostizierten Strömungsgeschwindigkeiten auf die Messergebnisse ein.

Die festgestellten Abweichungen liegen im Mittel zwischen 20 und 30 cm/s. In den Messpunktlagen 0,5 bis 0,1 sind geringere mittlere Abweichungen von 10 bis 20 cm/s zu verzeichnen.

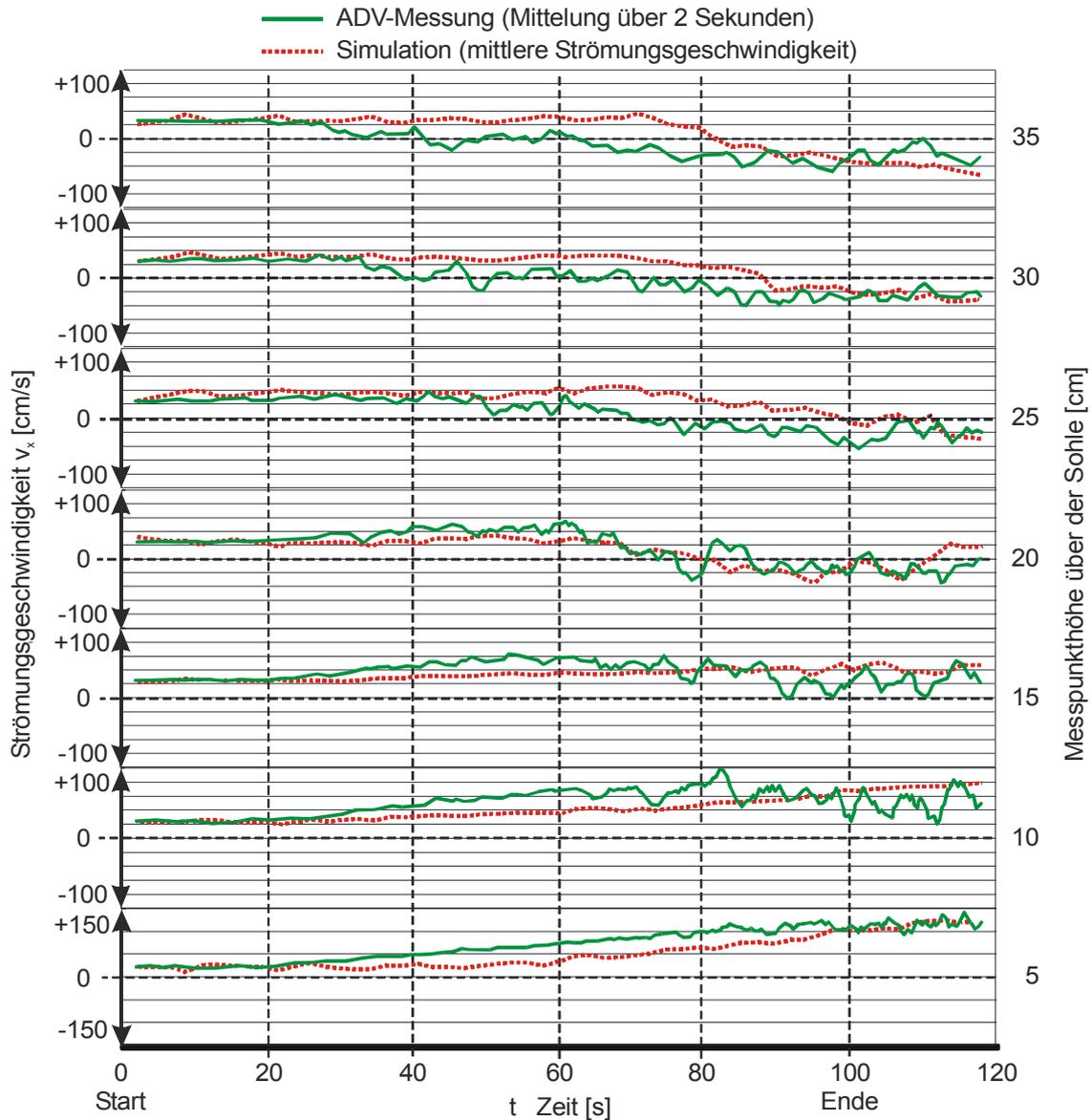


Abb. 5-4: Vergleich der gemessenen und berechneten Strömungsgeschwindigkeiten 70 cm stromab der Hubtorvorderkante mittig der Strömungsrinne ( $h$  = Öffnungsweite Hubtor,  $t$  = Tiefenlage des Messpunktes)

Eine feinere Modellierung der Nachlaufströmung unterhalb des Hubtores (Verdichtung im Bereich der Abrisskante) führte zu besseren Ergebnissen (Abb. 5-5). Genauer wird an dieser Stelle lediglich auf den Messquerschnitt 40 cm unterstrom eingegangen, da sich hier Tendenzen erkennen lassen, die sich ebenfalls in den anderen Messquerschnitten zeigen. Sowohl dieser als auch die Querschnitte von 50, 75, 100, 150, 200 und 250 cm unterstrom des Hubtores sind in den Anlagen als Abbildungen A-1 bis A-7 enthalten.

Zum Zeitpunkt  $t = 0$  Sekunden (Tor vollständig geöffnet, bzw. in Ausgangslage) ist die Strömung unbeeinflusst, was sich durch eine konstante Geschwindigkeitsverteilung und –größe (rund 10 cm/s) in allen Höhenlagen zeigt. Bei der untersten Höhenlage geht die Geschwindigkeit aufgrund der Reibungseinflüsse am Boden gegen Null. Zum Zeitpunkt  $t = 200$  Sekun-

Abschlussbericht des Verbundprojektes „Stationäres 3D-Strömungsmesssystem für hochturbulente Strömungszustände unter Tide-, Strömungs- und Welleneinfluss“ - Teil D: „Numerische Simulationen und physikalische Versuche“

den ist das Tor wieder vollständig nach oben in die Ausgangslage verfahren und übt keinen Einfluss auf die Strömung aus. Die Strömungsgeschwindigkeit entspricht in Größe und Verlauf wieder der Anfangsgeschwindigkeit.

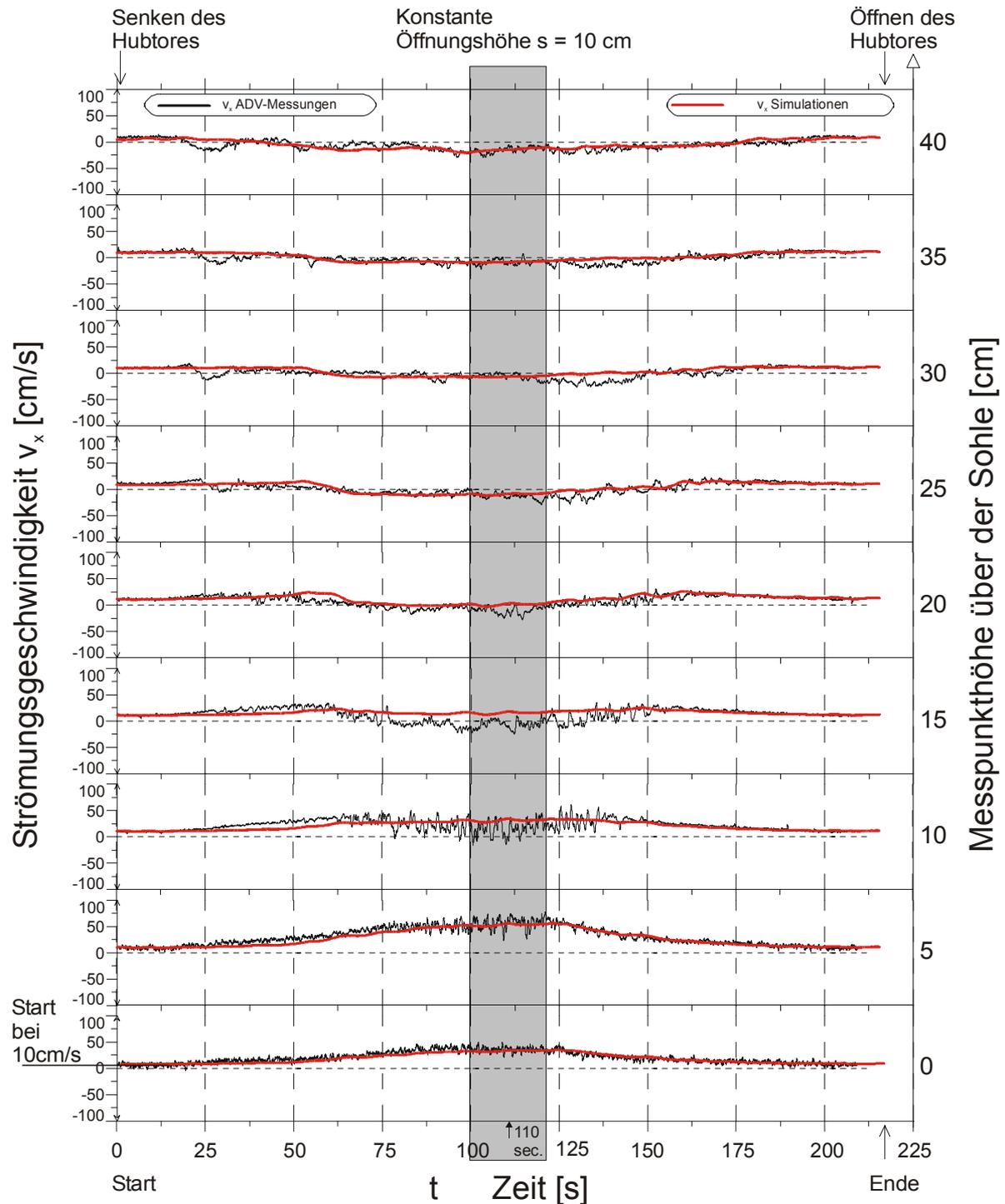


Abb. 5-5: Vergleich der gemessenen und berechneten Strömungsgeschwindigkeiten 70 cm stromab der Hubtorvorderkante mittig der Strömungsrinne ( $h$  = Öffnungsweite Hubtor,  $t$  = Tiefenlage des Messpunktes)

Der Einfluss des eintauchenden Tores macht sich zuerst am obersten Messpunkt bei 40 cm über der Sohle bemerkbar. Bei ca. 20 Sekunden schlägt die Strömung in den negativen Geschwindigkeitsbereich um, was eine Folge von Wirbelablösungen an der Torunterseite ist. Diese negativen Strömungsgeschwindigkeiten treten in den Messpunkten von 20 bis 35 cm über der Sohle auf. Nach rund 15 Sekunden verläuft die Strömung wieder im positiven Bereich.

Bei den Messpunkten von 0 bis 15 cm über der Sohle ist dieser Umschwung nicht auszumachen. Nach 25 Sekunden beträgt die Geschwindigkeit bei 20 cm ü.d.S. (über der Sohle) bereits rund 25 cm/s. An der Sohle steigt die Geschwindigkeit im weiteren Zeitverlauf auf rund 50 cm/s an. Vor allem während des 20 Sekunden langen Stillstands des Tores liegt die Geschwindigkeit relativ konstant in dieser Größenordnung. Nach 125 Sekunden ist das Tor bereits wieder um rund 8 cm nach oben verfahren und die Strömungsgeschwindigkeit sinkt aufgrund des sich vergrößernden Fließquerschnitts. Ein ähnlicher Verlauf mit höheren Absolutwerten (bis 75 cm/s) stellt sich am Messpunkt 5 cm ü.d.S. ein.

Für den Geschwindigkeitsverlauf bei 10 cm ü.d.S. ist zwischen 65 und 140 Sekunden ein parabelförmiger Geschwindigkeitsabfall bis in den negativen Bereich zu beobachten. Dies ist mit der Lage des Messpunktes zwischen dem Schussstrahl unter dem Tor und der sich ausbildenden Deckwalze zu erklären.

Der Verlauf der Kurven von 25 bis 40 cm ü.d.S. lässt den Einfluss der Rückströmung erkennen. Zwischen 50 und 175 Sekunden entsteht hier eine Rückströmung mit Geschwindigkeiten von bis zu 25 cm/s.

Bei Versuchsbeginn und –ende korrelieren die Kurven der numerischen Ergebnisse sehr gut mit den Messergebnissen, was auch die korrekt eingestellte Randbedingung  $Q$  (Durchfluss) im numerischen Modell bestätigt. Im weiteren Zeitverlauf folgen die Werte der Simulation prinzipiell den Messwerten. Es gibt aber in Abhängig von der Messpunktlage Unterschiede.

Bei den Messpunktlagen 15 bis 25 cm ü.d.S. liegen die Simulationswerte nicht den Messwerten entsprechend im negativen Bereich. Die Geschwindigkeit verlangsamt sich zwar, der Umschlag in den negativen Bereich, d.h. die Richtungsänderung der Strömung, findet nicht statt.

In den Messpunktlagen von 30 bis 40 cm ü.d.S. korrelieren die Ergebnisse besser. Hier liegen auch die Absolutwerte der Strömungsgeschwindigkeit übereinander oder sehr nahe beieinander.

Die Glättung der numerischen Ergebniskurven resultiert aus dem Berechnungsalgorithmus und dem verwendeten  $k-\varepsilon$ -Turbulenzmodell. Bei der Beurteilung der Übereinstimmung von gemessenen und berechneten Werten muss berücksichtigt werden, dass eventuell auch die ADV-Sonde die Strömungsgeschwindigkeiten vor allem im Schussstrahlbereich mit sehr hohen Strömungsgeschwindigkeiten nicht exakt aufzeichnet. Insbesondere bei den Strömungsgeschwindigkeiten in halber Wassertiefe gibt es stärkere Abweichungen. Allerdings zeigt ein Vergleich der Wasserspiegellage oberstrom des Hubtores eine gute Übereinstimmung. Es kann davon ausgegangen werden, dass die Abweichungen eher von einer nicht ganz genau bestimmten Messpunktlage als von einer falschen Simulation herrühren.

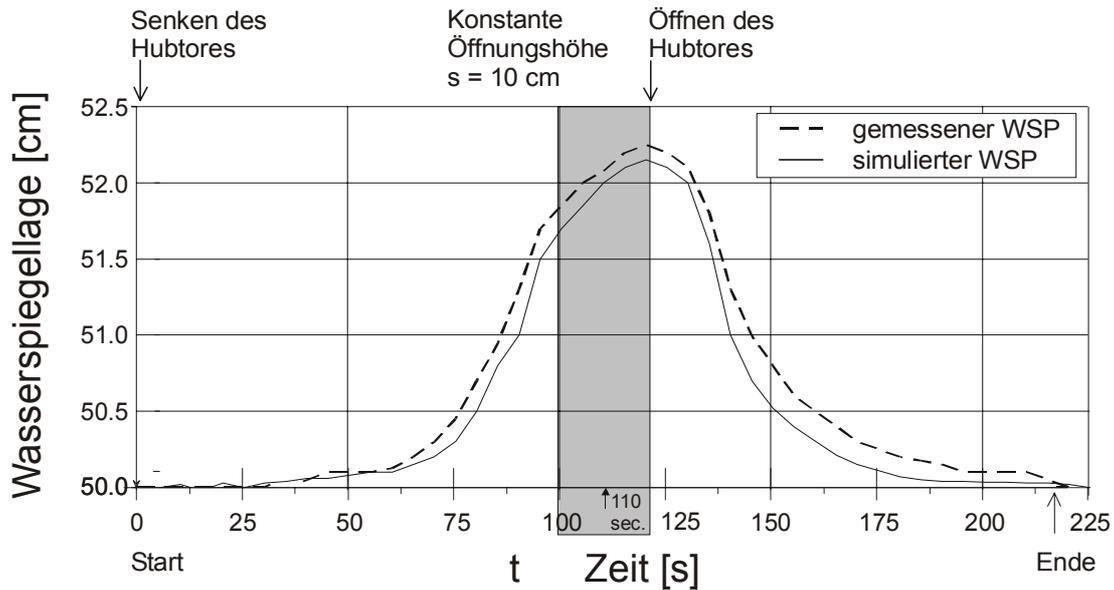


Abb. 5-6: Vergleich der gemessenen und berechneten Wasserspiegellage 100 cm oberstrom des Hubtores

Die PIV-Messungen in einem kleinen Ausschnittsfenster unterstrom zeigen eine richtige Nachbildung der Strömung in der numerischen Simulation (Abb. 5-20 und 5-21). Zum Zeitpunkt  $t = 50$  Sekunden zeigt sich in der Simulation eine klar zur Sohle gerichtete Strömung die ebenfalls im PIV-Image zu erkennen ist. Zum Zeitpunkt  $t = 100$  Sekunden hat sich eine Rückströmung eingestellt. Diese ist sowohl auf dem PIV-Image als auch in der numerischen Simulation zu erkennen. Es ist erkennbar, dass die Simulationsergebnisse das Turbulenzspektrum nicht wiedergeben können, die Grundströmung aber wird richtig wiedergegeben.

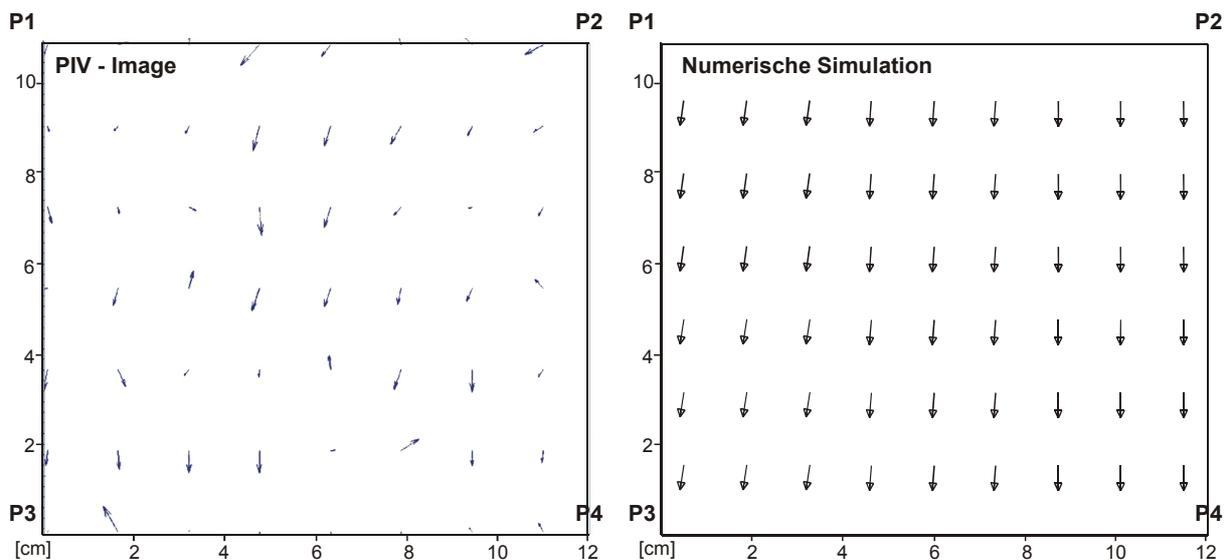


Abb. 5-7: Vergleich der PIV-gemessenen und berechneten Strömungsvektoren zum Zeitpunkt  $t = 50$  Sekunden

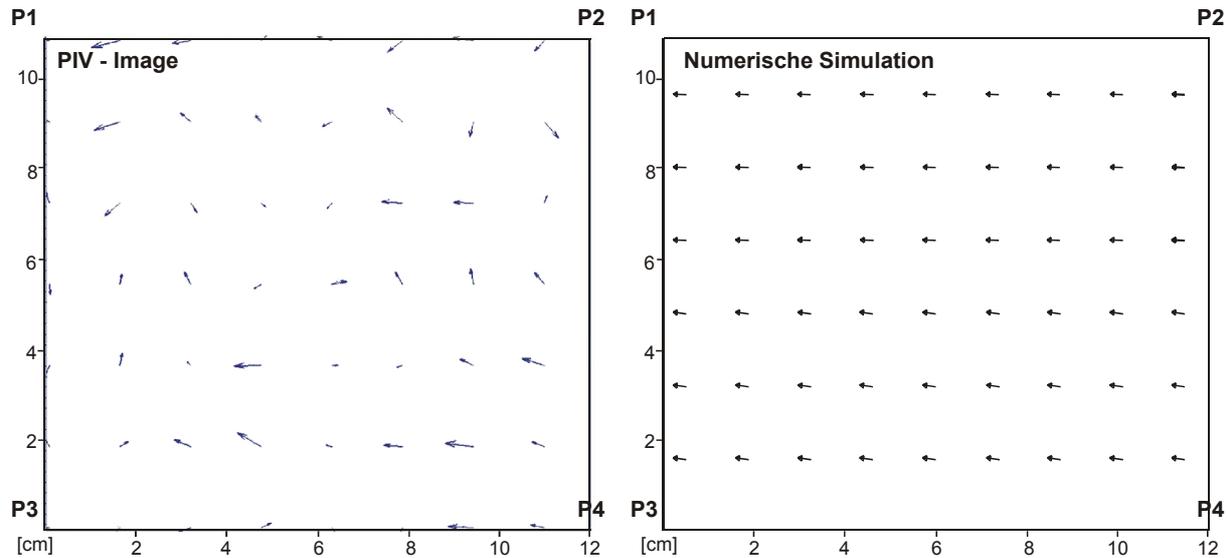


Abb. 5-8: Vergleich der PIV-gemessenen und berechneten Strömungsvektoren zum Zeitpunkt  $t = 100$  Sekunden

### 5.3 Ergebnisse der Simulation eines kleineren Fließgewässers

Die in den physikalischen Modellversuchen aufgenommenen Strömungsgeschwindigkeiten sind Momentaufnahmen der tatsächlich vorherrschenden turbulenten Strömung an der Oberfläche und sollten daher qualitativ verglichen werden. Die Simulationsergebnisse zeigen hierbei in den fünf Schnitten P2, P3, P6, P7 und P8 eine gute Übereinstimmung.

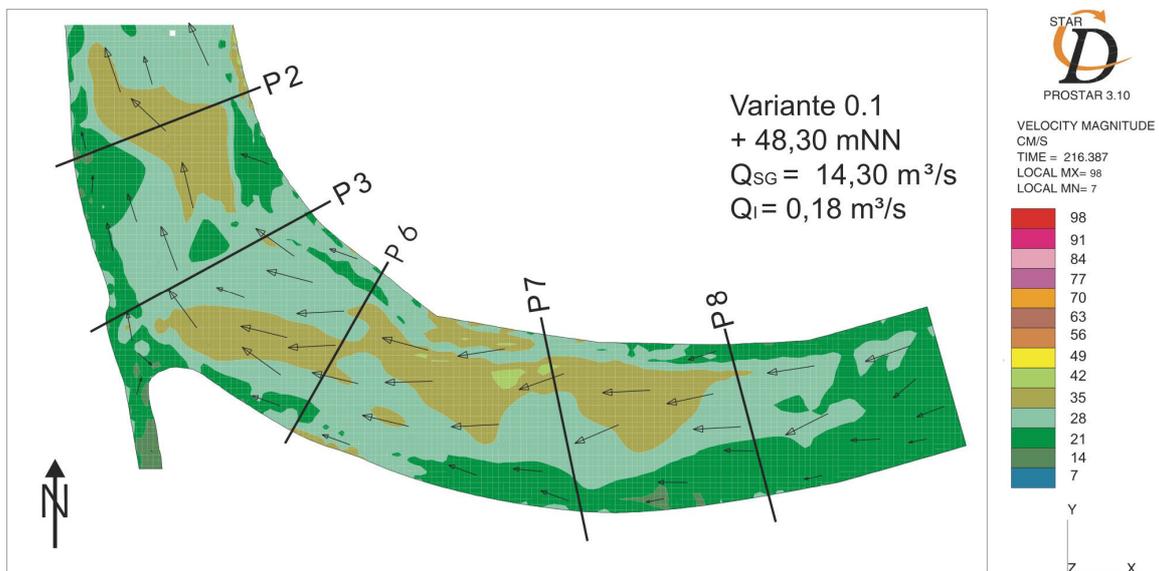


Abb. 5-9: Numerisches Modell: Strömungsgeschwindigkeiten in cm/s an der Wasseroberfläche (+ 48,30 mNN) bei  $Q_{SG} = 14,30 \text{ m}^3/\text{s}$  und  $Q_I = 0,18 \text{ m}^3/\text{s}$

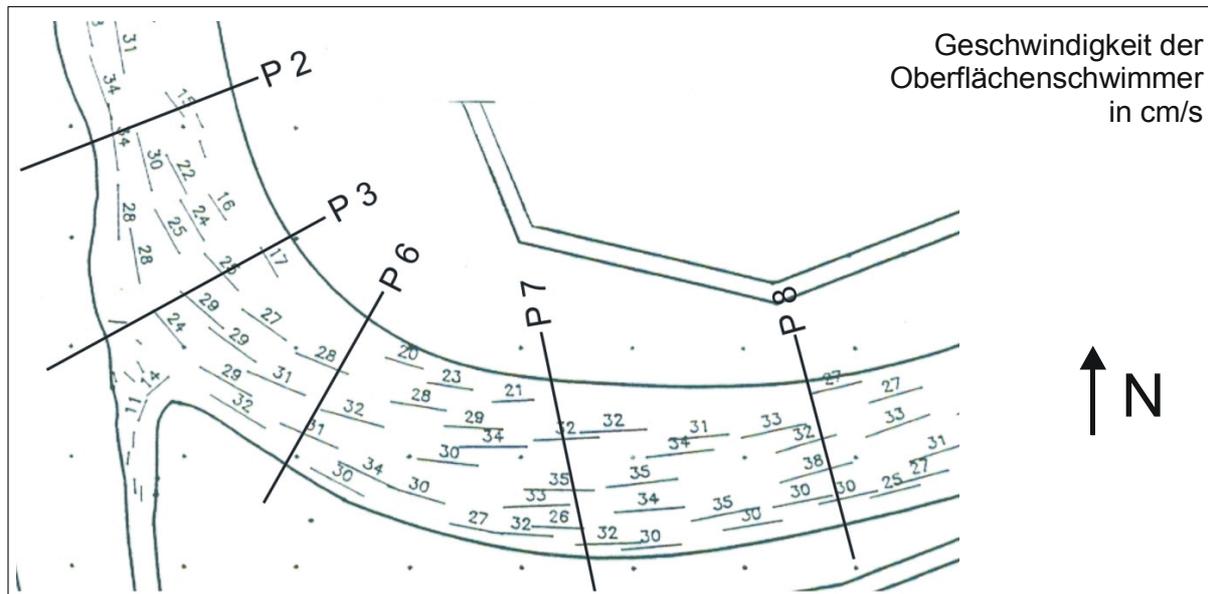


Abb. 5-10: Strömungsgeschwindigkeiten im hydraulischen Modell des Schnellen Grabens in cm/s an der Wasseroberfläche (+ 48,30 mNN) bei  $Q_{SG} = 14,30 \text{ m}^3/\text{s}$  und  $Q_I = 0,18 \text{ m}^3/\text{s}$  (FRANZIUS INSTITUT, 1997)

Bei der Erstellung der Flussgeometrie und der anschließenden Simulation stellte sich heraus, dass in diesem Anwendungsbereich ein Hexaedernetz wesentliche Vorteile vor einem Tetraedernetz hat. Dies hängt zum einen mit der schnelleren Gittererstellung aufgrund einer kleineren Zellanzahl zusammen. Auch die Bestimmung der freien Oberfläche gestaltet sich mit einem Hexaedernetz effizienter. Bei einem Hexaedernetz lässt sich zu Beginn der Simulation die Lage der freien Oberfläche durch die Lage der horizontalen Hexaederflächen festlegen. Bereits im ersten Iterationsschritt ist diese bei vorausplanender Gestaltung des Netzes der endgültigen Lage der freien Oberfläche sehr nahe. Innerhalb eines Tetraedernetzes sind die Zellen stärker miteinander verzahnt und zu Beginn einer jeden Simulation durchstoßen ganz gefüllte und ganz leere Zellen die gedachte Lage der freien Oberfläche, sodass sich diese zu Beginn einer jeden Simulation erst in einem langwierigen Prozess einstellen muss. Dies führt zu einer längeren Rechenzeit. Aufgrund dieser Erkenntnis und weiteren Vorteilen eines Hexaedernetzes bei der Auswertung der Simulationen, erfolgten weitere Gometrierstellungen lediglich mit Hexaedernetzen.

#### 5.4 Ergebnisse der Simulation des Emssperrwerkes – unbewegliche Geometrie

Ein Beispiel der Bildaufnahmen von Modelltreibkörpern für einen Vergleich mit den numerischen Simulationen ist in der Abbildung 5-11 gegeben. Für den Vergleich zwischen hydraulischem Tidemodell und dem numerischen Modell wurde ein Schnitt durch die Sperrwerksachse gelegt. Die im hydraulischen Tidemodell gemessenen Strömungsgeschwindigkeiten (zwischen einem und fünf Messwerten pro Sperrwerksöffnung variierend) wurden auf dieser Achse mit den simulierten Strömungsgeschwindigkeiten überlagert. Dieser Vergleich wurde auch 100 m westlich und 100 m östlich der Sperrwerksachse durchgeführt.

Insgesamt zeigen die im hydraulischen Tidemodell gemessenen Strömungsgeschwindigkeiten eine hohe Variabilität. Für einen Vergleich mit den Ergebnissen des numerischen Modells stehen bei einigen Lastfällen nur ein oder zwei Messwerte zur Verfügung, sodass Aussagen über die Simulationsqualität hier nur bedingt möglich sind.

Die Ergebnisse der Untersuchungen sind detailliert in Anlage 2 dargestellt.

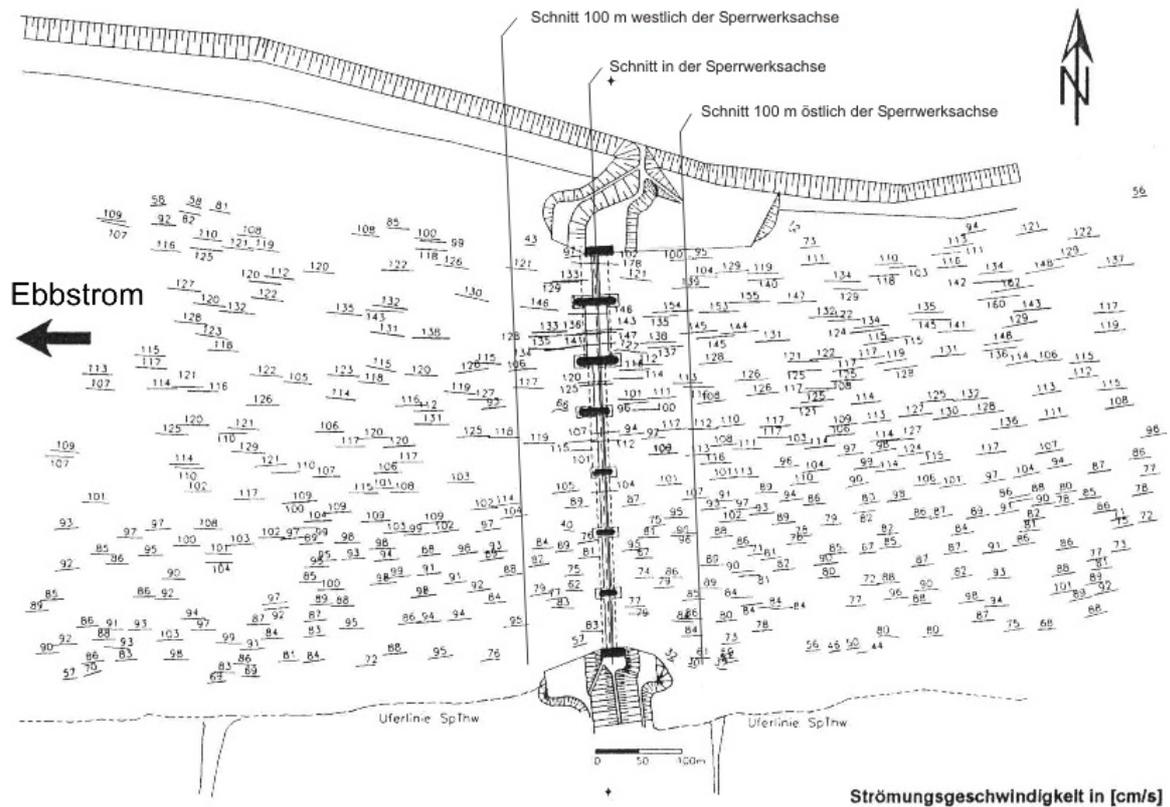


Abb. 5-11: Strömungsgeschwindigkeiten aus Schwimmerbahnen im hydraulischen Modell des Emssperrwerkes (vollkommen geöffnet, Ebbe, Tidezeit 330)  
[FRANZIUS-INSITUT, 2000]

Beim Vergleich der Strömungsgeschwindigkeiten zeigt sich eine sehr gute Übereinstimmung bei der Anströmung des Sperrwerkes. Dies gilt sowohl für den maximalen Flutstrom als auch für den maximalen Ebbstrom. Exemplarisch sei hier der Flutstrom beim Lastfall 1.3.4 (2. NÖ und 3. NÖ geschlossen) angeführt. Der Verlauf der Strömungsgeschwindigkeiten wird bis auf einen Messwert am äußersten Rand über die gesamte Flussbreite nachgebildet. Insgesamt lassen die Ergebnisse auf eine korrekt nachgebildete Flussgeometrie und eine der im hydraulischen Tidemodell entsprechende Grundströmung erkennen.

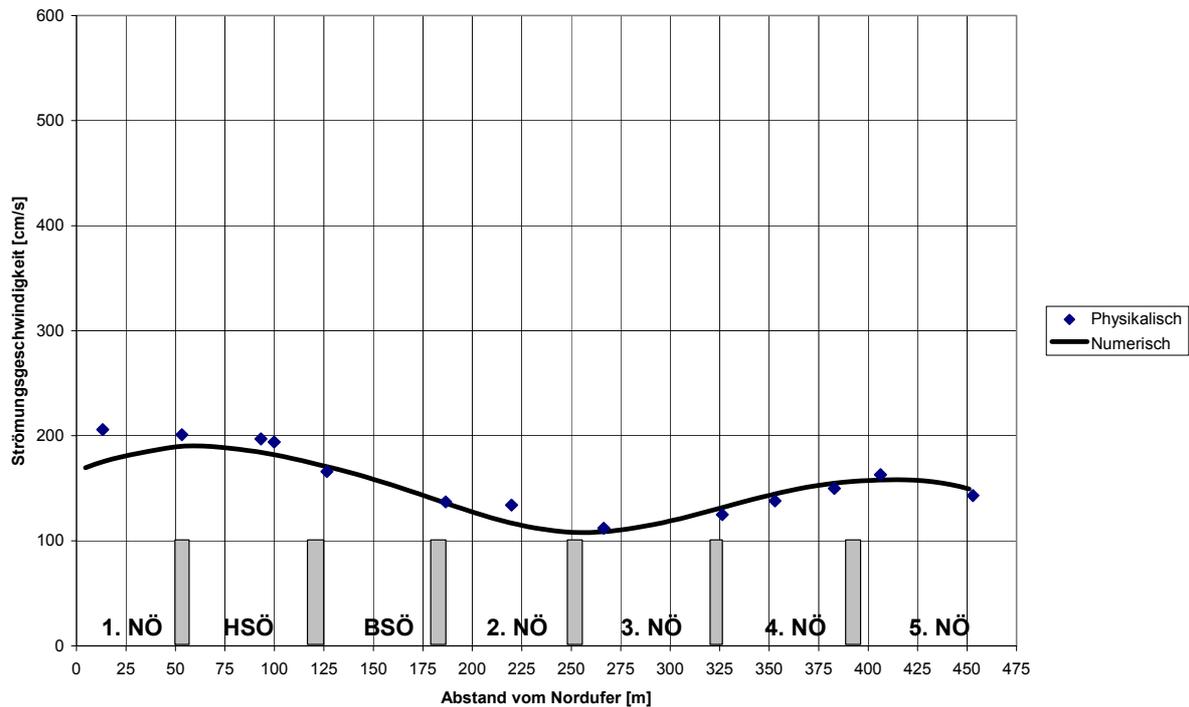


Abb. 5-12: Vergleich der berechneten und gemessenen Strömungsgeschwindigkeiten auf einer Achse 100 m westlich des Sperrwerkes (2. NÖ und 3. NÖ geschlossen), Tidezeit 90

Auch die Strömung im Abstrom des Sperrwerkes wird gut nachgebildet. Beim Lastfall 1.1 liegen bei maximalem Ebbstrom die Abweichungen wiederum meist im einstelligen Prozentbereich (Abb. 5-13). In Abb. 10-14 (Lastfall 1.3.4; 2. NÖ und 3. NÖ geschlossen, Flutstrom) wird der Verlauf der Strömungsgeschwindigkeit wiederum über die gesamte Breite qualitativ richtig wiedergegeben. Die Abweichungen sind hier mit 18 bis 19 % höher. Eine Erklärung hierfür könnte die schwierige räumliche Zuordnung der Schwimmggeschwindigkeiten sein. Insgesamt deuten die Ergebnisse auf eine korrekte Abbildung der Strömungsverhältnisse beim Durchströmen des Bauwerkes hin.

Abschlussbericht des Verbundprojektes „Stationäres 3D-Strömungsmesssystem für hochturbulente Strömungszustände unter Tide-, Strömungs- und Welleneinfluss“ - Teil D: „Numerische Simulationen und physikalische Versuche“

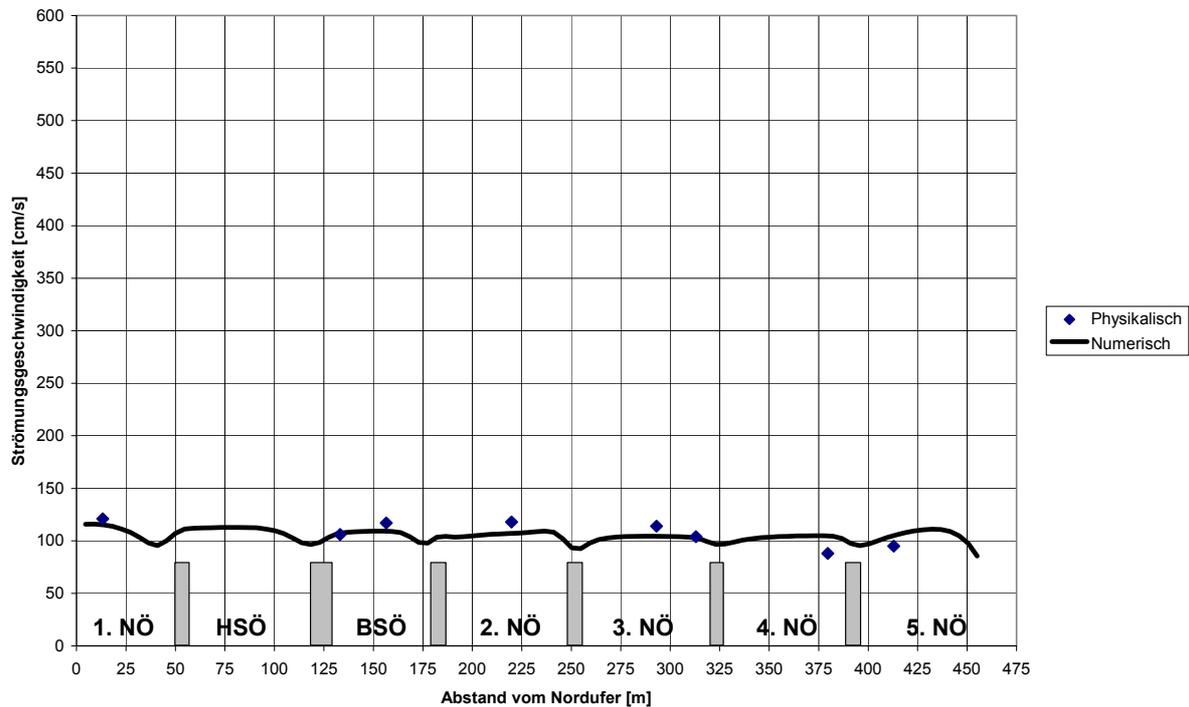


Abb. 5-13 : Vergleich der berechneten und gemessenen Strömungsgeschwindigkeiten auf einer Achse 100 m westlich des Sperrwerkes (alle Sperrwerkstore geöffnet)

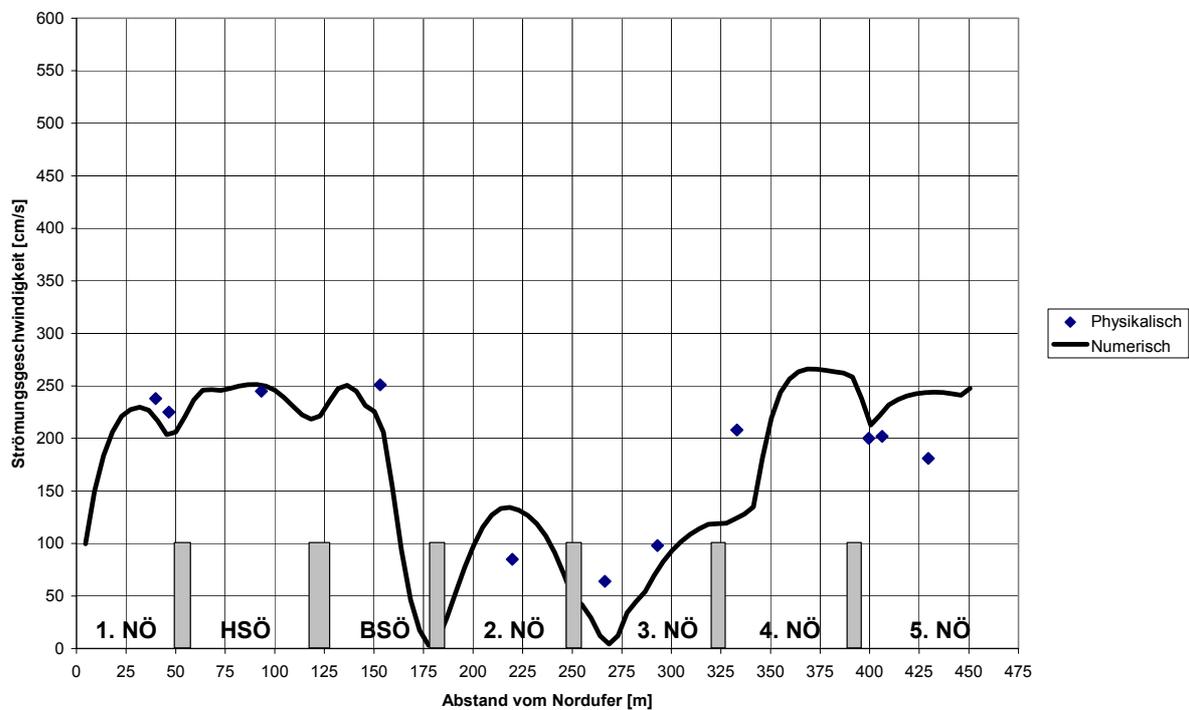


Abb. 5-14 : Vergleich der berechneten und gemessenen Strömungsgeschwindigkeiten auf einer Achse 100 m östlich des Sperrwerkes (2. NÖ und 3. NÖ geschlossen), Tidezeit 90

Abschlussbericht des Verbundprojektes „Stationäres 3D-Strömungsmesssystem für hochturbulente Strömungszustände unter Tide-, Strömungs- und Welleneinfluss“ - Teil D: „Numerische Simulationen und physikalische Versuche“

Bei den Vergleichen in der Sperrwerksachse (zwischen den Pfeilern) sind Abweichungen von bis zu 45 % (Abb. 5-15, 2. NÖ und 3. NÖ geschlossen), aber auch Abweichungen von lediglich 5 bis 10 % (Abb. 5-16, HSÖ geschlossen) zu verzeichnen.

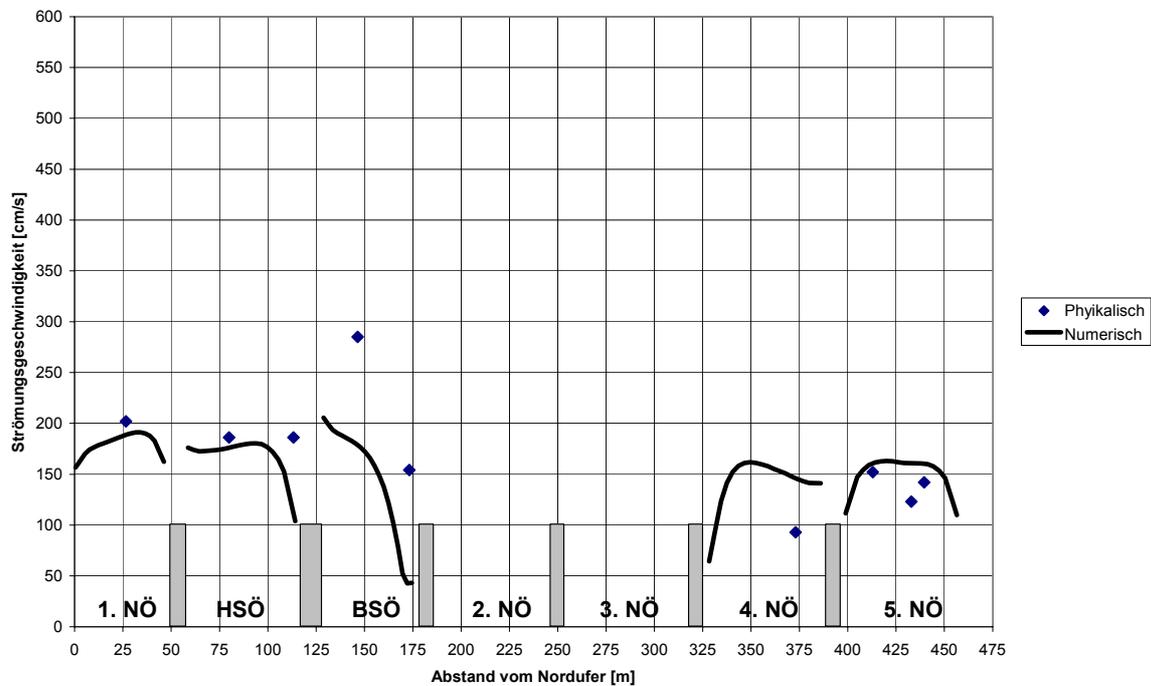


Abb. 5-15 : Vergleich der berechneten und gemessenen Strömungsgeschwindigkeiten in der Sperrwerksachse (2. NÖ und 3. NÖ geschlossen), Tidezeit 330

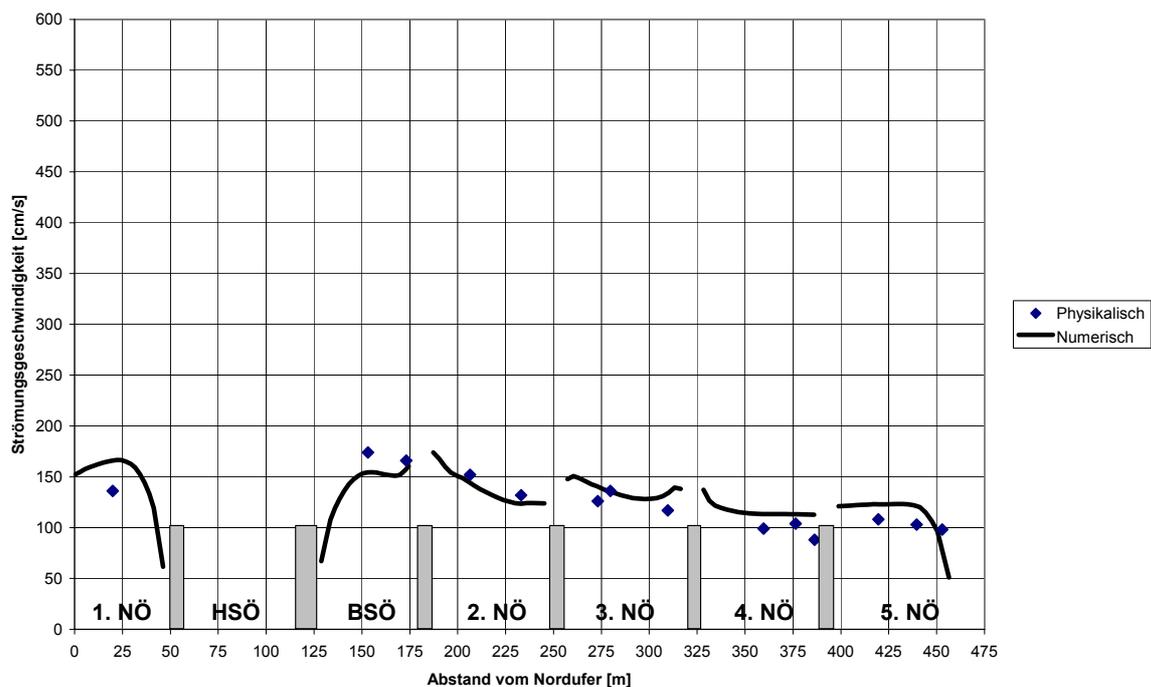


Abb. 5-16 : Vergleich der berechneten und gemessenen Strömungsgeschwindigkeiten in der Sperrwerksachse (HSÖ geschlossen), Tidezeit 330

Insgesamt lässt sich auch hier die Aussage treffen, dass grundsätzlich die Strömungscharakteristika korrekt nachgebildet werden konnten. Es ist bei keinem der Schnitte eine vollkommen falsche Ausrichtung der Strömung zu sehen.

Bei den Vergleichen der Lastfälle 3.1.1 und 3.2 (beide Sturmflutkehrung) sind die Ergebnisse nicht ganz so zufrieden stellend. Bei beiden Lastfällen ist die im hydraulischen Tidemodell deutlich zu erkennende Beschleunigung der Strömung zur offenen HSÖ bzw. HSÖ und BSÖ hin nicht so deutlich in der numerischen Simulation zu erkennen. Hier liegen die Ergebnisse der numerischen Simulationen zum Teil 40 % unter denen des hydraulischen Tidemodells (Abb. 5-17). Die Strömungsgeschwindigkeiten in den Öffnungen des Sperrwerkes stimmen wiederum besser überein. Im Abstrom des Sperrwerkes werden Abweichungen zwischen 4% und 8% erreicht. Auch diese Daten deuten wiederum darauf hin, dass die Geometrie des Sperrwerksbereiches korrekt nachgebildet wurde.

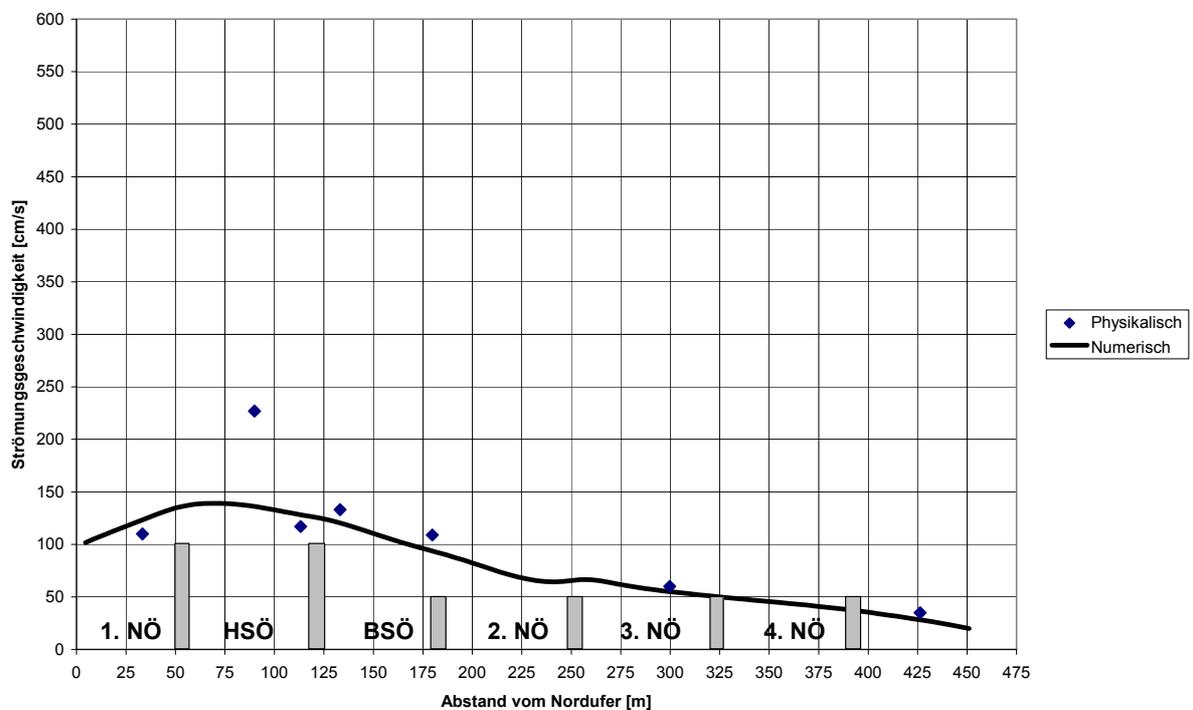


Abb. 5-17 : Vergleich der berechneten und gemessenen Strömungsgeschwindigkeiten auf einer Achse 100 m stromab des Sperrwerkes (Sturmflutkehrung, HSÖ bleibt offen, alle anderen Tore geschlossen)

Die Ergebnisse der Simulationen zeigen zum einen die Stärken und zum anderen die Schwächen der gewählten Methodik.

Die Strömungsgeschwindigkeiten im Bereich des Emssperrwerkes konnten mit einer hinreichenden Genauigkeit berechnet werden.

Die erforderlichen Rechenzeiten sind jedoch für den praxisnahen Einsatz nicht praktikabel. Auf einer Mehrprozessormaschine vom Typ Origin2 mit Cray Link zu einer weiteren Maschine gleichen Typs ergaben sich bei Ausnutzung aller 4 Prozessoren Rechenzeiten von mehreren Wochen für die Berechnung einer Tide.

## 5.5 Ergebnisse der Simulation des Emssperrwerkes – bewegliche Geometrien

Für den Fall des zunächst voll geöffneten Emssperrwerkes und einer sich innerhalb von 20 Minuten schließenden Hauptschiffahrtsöffnung wurden die sich in der 1. Nebenöffnung, der Hauptschiffahrtsöffnung und der Binnenschiffahrtsöffnung entwickelnden Strömungsgeschwindigkeiten betrachtet.

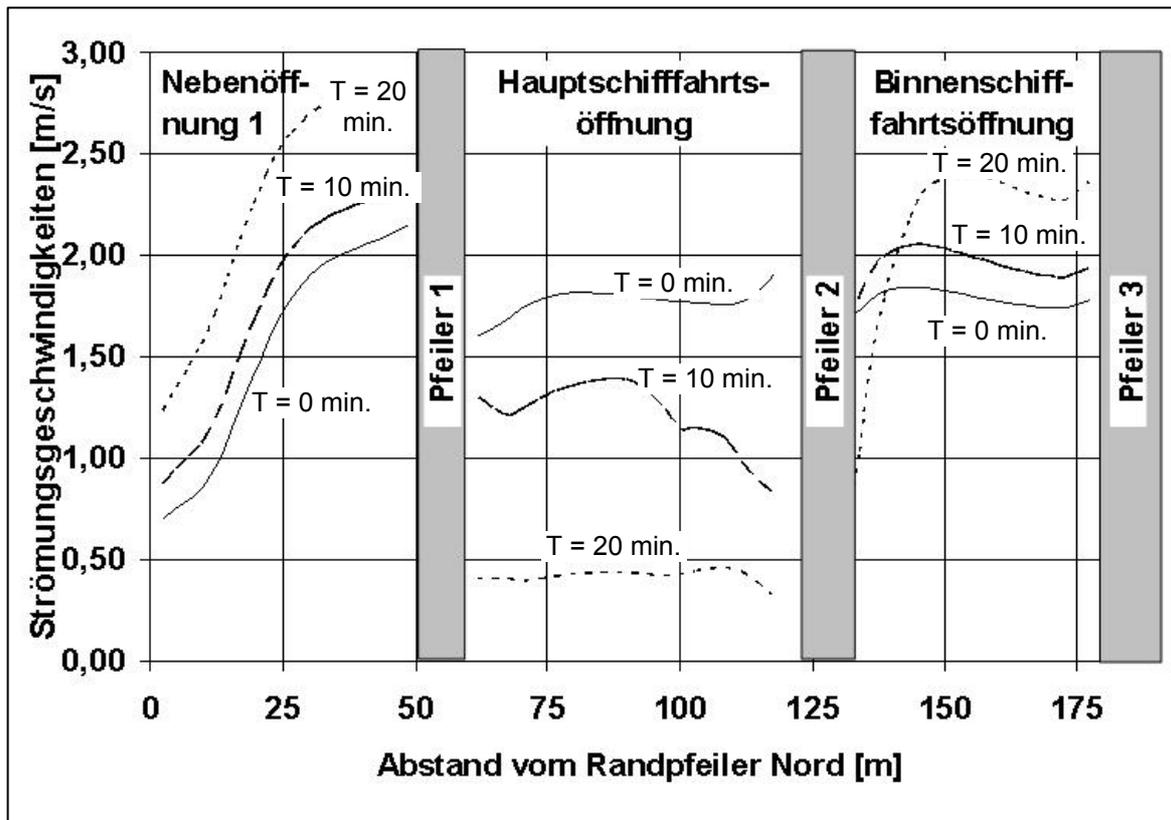


Abb. 5-18 : Berechnete Strömungsgeschwindigkeiten während des Schließens der Hauptschiffahrtsöffnung (0 bis 20 min.)

Zum Zeitpunkt  $t = 0$  min sind die Strömungsgeschwindigkeiten in den drei beobachteten Öffnungen des Sperrwerkes gleich groß. Die Strömungsverteilung in der Nebenöffnung resultiert aus einer Ablösezone, die sich aufgrund der Lage des Sperrwerkes im Fluss an dieser Stelle ergibt. Nach  $t = 10$  min. ist die Hauptschiffahrtsöffnung zur Hälfte geschlossen und die Strömungsgeschwindigkeit nimmt infolgedessen an der Wasserspiegeloberfläche ab. Aufgrund des insgesamt verkleinerten Durchflusses in der Hauptschiffahrtsöffnung nehmen die Strömungsgeschwindigkeiten in der Nebenöffnung 1 und der Binnenschiffahrtsöffnung zu. Dieser Effekt verstärkt sich bis zum vollständigen Schließen des Tores. Die Strömungsgeschwindigkeiten in der Hauptschiffahrtsöffnung fallen aufgrund einer sich ausbildenden Walze nicht auf null ab. Diese Walze ist auch für die in der Binnenschiffahrtsöffnung am Pfeiler zwei stark zurückgehenden Strömungsgeschwindigkeiten verantwortlich.

Die Simulation zeigt, dass es mit dem vorhandenen Programmsystem auch möglich ist den Übergang zwischen einzelnen Lastfällen darzustellen.

## 6 Zusammenfassung

Übergeordnetes Ziel des Vorhabens war es, ein stationäres 3D-Strömungsmesssystem, bestehend aus Particle-Image-Velocimeter (PIV-System), mechanischem Strömungsmesssystem und Trägersystem, für hochturbulente Strömungszustände zu entwickeln, aufzubauen, im Wasserlabor zu testen und anhand eines ausgewählten Fallbeispiels zu erproben.

Die im physikalischen Modell gemessenen Strömungsgeschwindigkeiten wurden zur Verifikation eines numerischen Modells für das gewählte Fallbeispiel genutzt werden. Für die numerischen Simulationen wurde das Programmsystem STAR-CD eingesetzt, um die Leistungsfähigkeit bei der Berechnung von Strömungen mit freier Oberfläche und der Berücksichtigung von beweglichen Strukturen zu bestimmen.

Als Fallbeispiel wurde das Sturmflutsperrwerk in der Ems bei Gandersum ausgewählt, da hier für die Entwicklung der Messsysteme maßgebliche Randbedingungen, nämlich variierende Wasserstände, variierende Salz- und Sedimentkonzentrationen, Tideeinfluss, sowie verschiedene Lastfälle infolge des Schließens und Öffnens der Sperrwerksverschlüsse, vorhanden sind.

Für dieses Fallbeispiel liegen am FRANZIUS-INSTITUT aus umfassenden Untersuchungen in physikalischen Modellen Ergebnisse zu verschiedenen Bauteilen und Fragestellungen des Emssperrwerkes vor, die für die Modellierung der einzelnen Simulationen genutzt wurden.

Zunächst wurden an einem unbeweglichen Hubtormodell die Strömungsgeschwindigkeiten unter Berücksichtigung der freien Oberfläche betrachtet. Ein Vergleich mit Messungen im physikalischen Modell zeigte sehr gute Übereinstimmungen.

Messungen der Strömungsgeschwindigkeiten wurden mit einer ADV-Sonde und dem in der Entwicklung befindlichen PIV-System durchgeführt. Die Übereinstimmung im strömenden Bereich oberhalb eines Hubtores war zwischen den Messungen der ADV-Sonde, des PIV-Systems und den Ergebnissen der numerischen Simulationen sehr gut.

Unterhalb des Hubtores, wo ein hoher Luftblaseneintrag zu verzeichnen war und die ADV-Sonde nicht mit der geforderten Genauigkeit messen konnte, zeigten sich die Vorteile der numerischen Simulation. In diesen Bereichen wurden von der Simulation Strömungsgeschwindigkeiten bestimmt, wie sie aufgrund des sich unterhalb des Hubtores entwickelnden Schussstrahles zu erwarten waren.

Aufbauend auf diesen Ergebnissen wurde das Modell eines beweglichen Hubtores unter Berücksichtigung der freien Oberfläche aufgebaut und die Entwicklung der Strömungsgeschwindigkeiten unterstrom während eines Schließ- und Öffnungsvorgangs betrachtet. Im Vergleich mit den Messungen der ADV-Sonde zeigte sich eine ebenfalls sehr gute Übereinstimmung bei der Entwicklung der Strömungsgeschwindigkeiten. Auch im Schussstrahl und knapp ( $< 10$  cm) unterhalb der freien Wasserspiegeloberfläche zeigten sich physikalisch richtige Ergebnisse.

Anschließend wurde ein Modell des Emssperrwerkes bestehend aus einem insgesamt ca. 2500 m langen Ausschnitts der Ems aufgebaut.

Der Vergleich der Strömungsgeschwindigkeiten im numerischen Modell mit Schwimmaufnahmen aus einem hydraulischen Tidemodell des Emssperrwerks zeigte im Zustrom (jeweils

bei Ebb- und Flutstrom) Abweichungen unter 15%. Im Abstrom des Bauwerkes lagen die Abweichungen meist unterhalb von 15%. An dieser Stelle sei auf die teils schwierige Zuordnung Schwimmerpositionen hingewiesen. In den einzelnen Öffnungen des Sperrwerkes lagen die Abweichungen ebenfalls im Bereich von 15 bis 30%. Hier war die Datenlage aufgrund der wenigen oder gar nicht vorhandenen Schwimmer schlecht. Ein Vergleich im Fernfeld zeigt jedoch, dass die Strukturen des Zu- und Abflusses richtig simuliert wurden. Daher kann mit sehr hoher Wahrscheinlichkeit davon ausgegangen werden, dass die Strömungsgeschwindigkeiten zwischen den Sperrwerkspfählen qualitativ und quantitativ richtig sind.

Am Beispiel der sich schließenden Hauptschiffahrtsöffnung wurde gezeigt, dass dynamische Lastfälle und die sich hieraus ergebenden instationären Strömungszustände mit Hilfe der numerischen Simulation darstellen lassen.

Die Anwendbarkeit des CFD-Programms STAR-CD kann hinsichtlich der Stabilität und der zu erreichenden Genauigkeit für kleinräumige Simulationen mit freier Oberfläche im Nahbereich von Strukturen als geeignet angesehen werden. Die hierbei mögliche räumliche und zeitliche Diskretisierung und die damit einhergehende Informationsdichte sind ausreichend. Bei der Simulation von großräumigen Strukturen mit freier Oberfläche ist diese Dichte auch gegeben, jedoch steigt mit der Ausdehnung des Modellgebietes die notwendige Rechenzeit stark an.

Weitere Simulationen für andere Anwendungsfälle (Eidersperrwerk, Schleusen, Wehranlagen, etc.) sollten die Anwendbarkeit der gewählten Methodik weiter absichern.

## 7 Schrifttum

- BREUER, M. Large-Eddy-Simulation, LTSM Erlangen, 1995
- COMPUTATIONAL FLUID DYNAMICS Methodology, 2004
- MALCHAREK, A. Numerische Methoden, DVWK-Workshop, Hannover, 1996
- MALCHAREK, A. Numerische Methoden für Strömungen, Stoff- und Wärmetransport, Institut für Strömungsmechanik, Universität Hannover, 1998
- MARKOFSKY, M. Strömungsmechanische Aspekte der Wasserwirtschaft, Institut für Strömungsmechanik der Universität Hannover, Oldenbourg Verlag, 1980
- OERTEL H. ; LAURIEN, E. Numerische Strömungsmechanik, Springer-Verlag Berlin, 1995
- SCHRÖDER, F.; FORKEL, F. Mathematische Beschreibung der physikalischen Prozesse, DVWK-Workshop, Hannover, 1996
- FERZIGER, J. H.; PERIC, M. Computational Methods for Fluid Dynamics, Springer Verlag, 2001
- DANTEC MEASUREMENT TECHNOLOGY Firmenschrift "FlowMap 3D-PIV-System", Dantec Measurement Technology A/S (DK), 2000
- RAFFEL M.; WILBERT C.E.; KOMPENHANS J. Particle image velocimetry – a practical guide; Springer Verlag, Berlin (D), 1998
- FINCHAM, A.; SPEDDING, G. Low cost, high resolution DPIV for measurement of turbulent fluid flow., Experiments in Fluids, 23, S. 449-462, 1997
- FINCHAM A.; DELERCE G. Advanced optimization of correlation imaging velocimetry algorithms, Experiments in Fluids, 29, S. 13-22, 2000

## **Anlage D-1**

### **Ergebnisse für das bewegliche Hubtor (Vergleich der Strömungsgeschwindigkeiten zwischen physikalischem Modell und numerischer Simulation)**

Abschlussbericht des Verbundprojektes „Stationäres 3D-Strömungsmesssystem für hochturbulente Strömungszustände unter Tide-, Strömungs- und Welleneinfluss“ - Teil D: „Numerische Simulationen und physikalische Versuche“

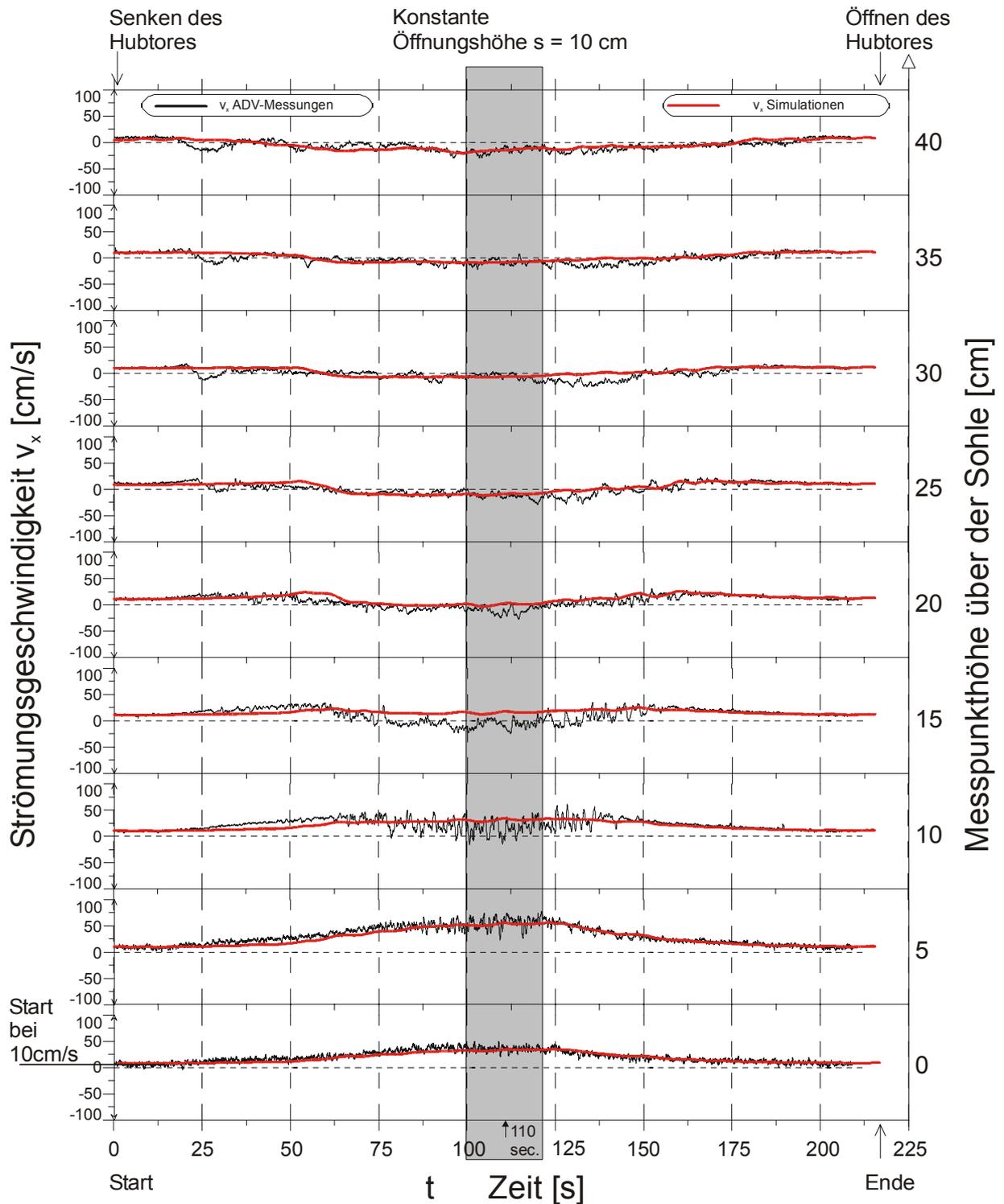


Abb. D1-1: Vergleich der berechneten und gemessenen Strömungsgeschwindigkeiten unterstrom des beweglichen Hubtores im Abstand von 40 cm

Abschlussbericht des Verbundprojektes „Stationäres 3D-Strömungsmesssystem für hochturbulente Strömungszustände unter Tide-, Strömungs- und Welleneinfluss“ - Teil D: „Numerische Simulationen und physikalische Versuche“

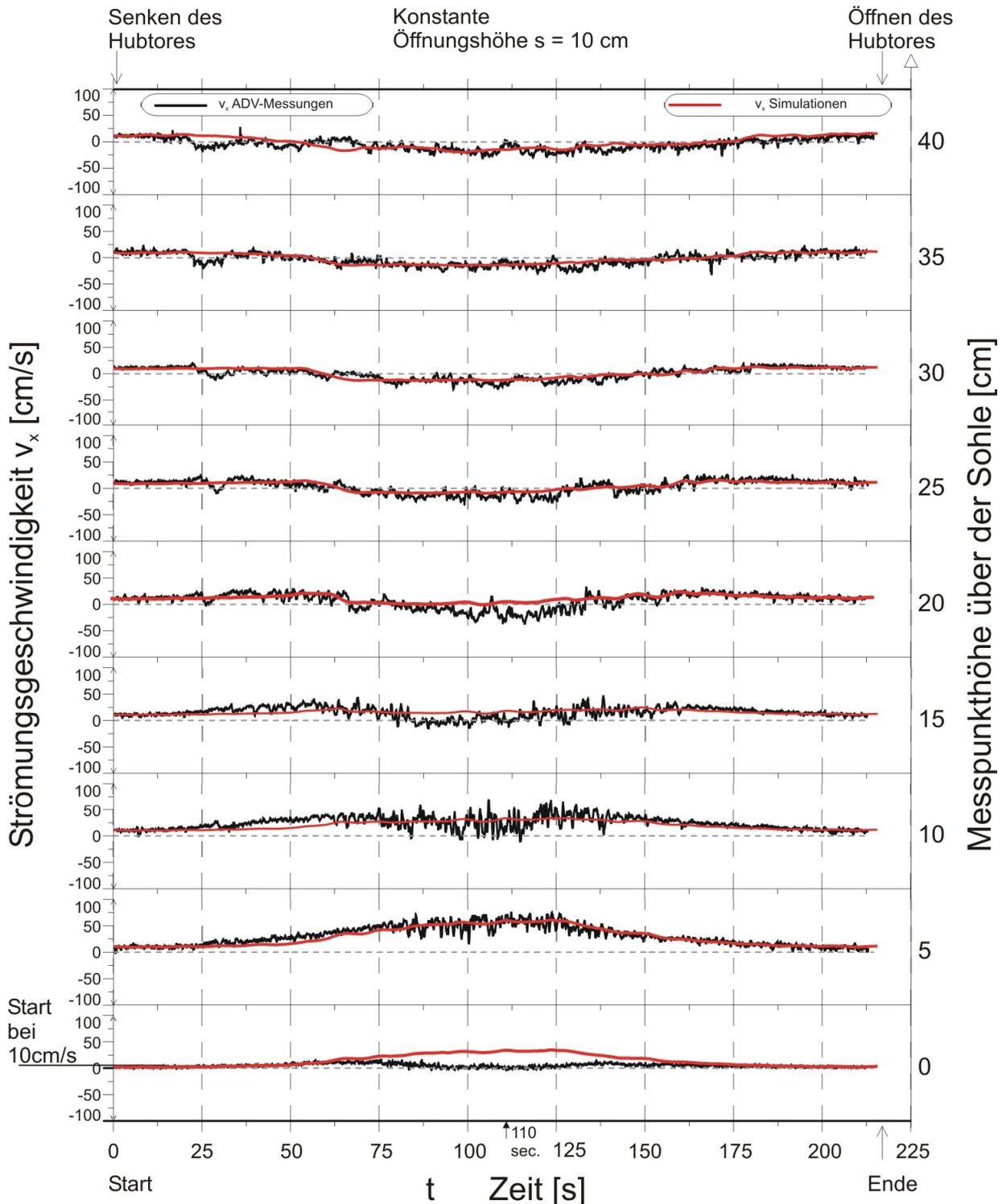


Abb. D1-2: Vergleich der berechneten und gemessenen Strömungsgeschwindigkeiten unterstrom des beweglichen Hubtores im Abstand von 50 cm

Abschlussbericht des Verbundprojektes „Stationäres 3D-Strömungsmesssystem für hochturbulente Strömungszustände unter Tide-, Strömungs- und Welleneinfluss“ - Teil D: „Numerische Simulationen und physikalische Versuche“

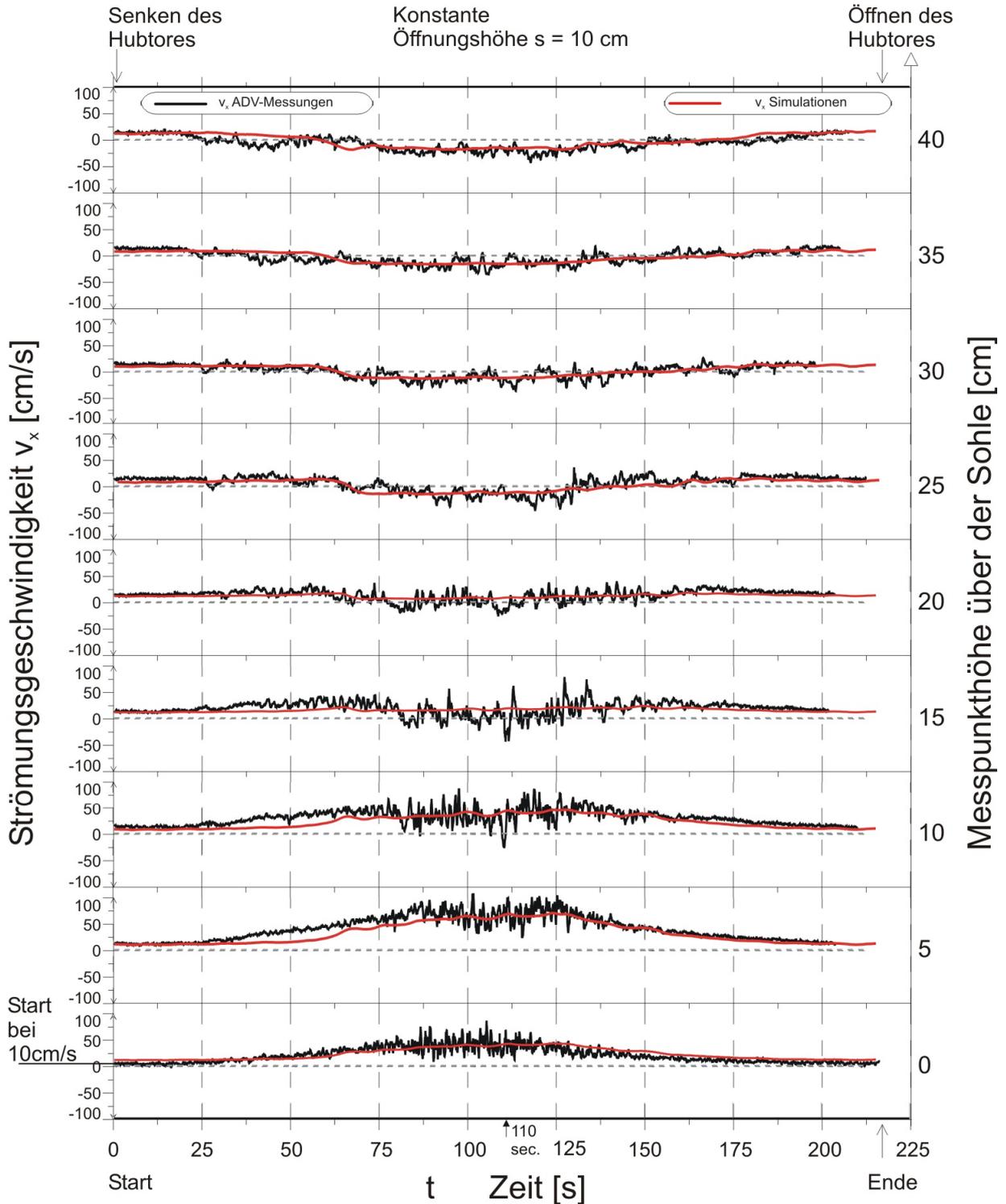


Abb. D1-3: Vergleich der berechneten und gemessenen Strömungsgeschwindigkeiten unterstrom des beweglichen Hubtores im Abstand von 75 cm

Abschlussbericht des Verbundprojektes „Stationäres 3D-Strömungsmesssystem für hochturbulente Strömungszustände unter Tide-, Strömungs- und Welleneinfluss“ - Teil D: „Numerische Simulationen und physikalische Versuche“

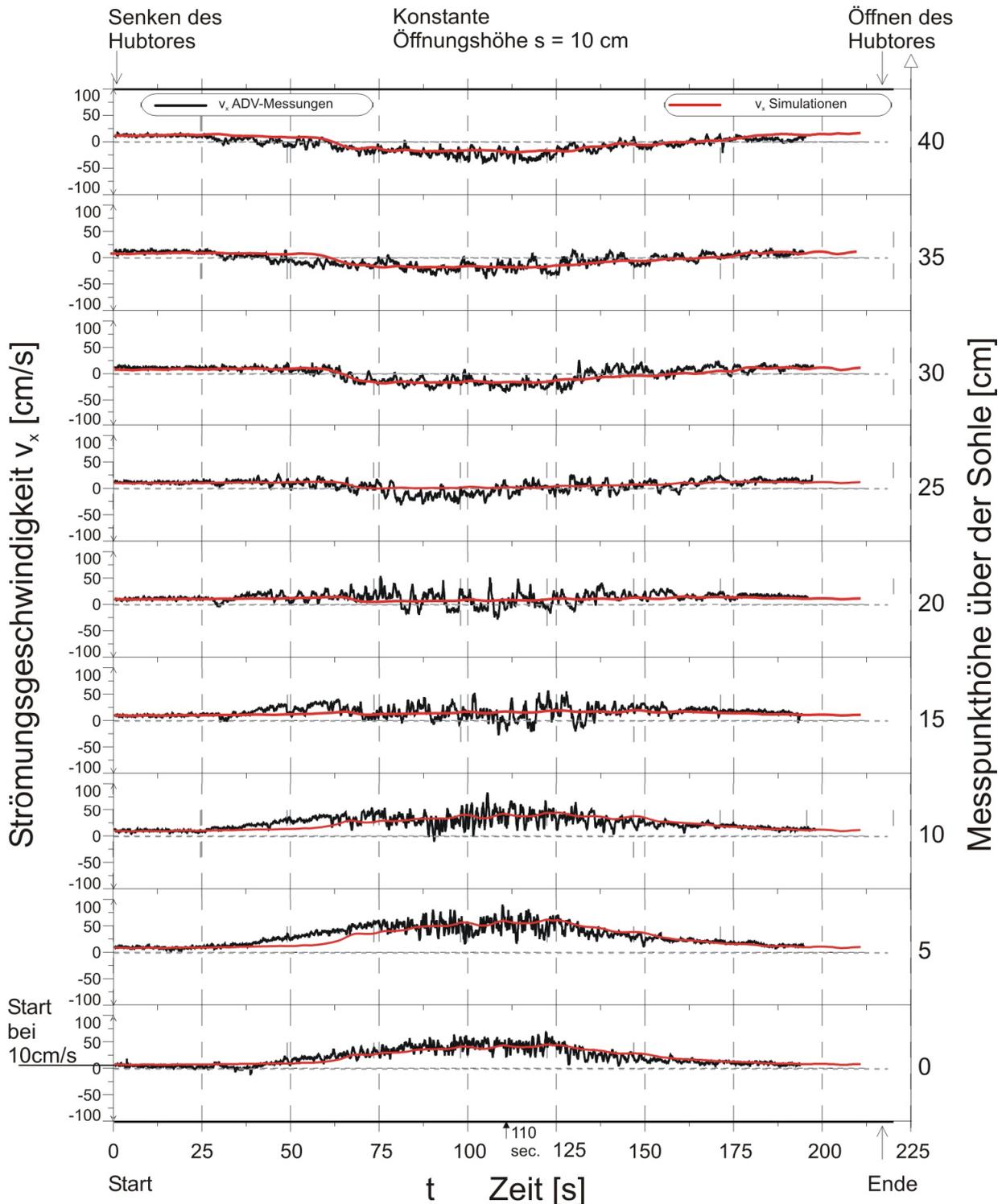


Abb. D1-4: Vergleich der berechneten und gemessenen Strömungsgeschwindigkeiten unterstrom des beweglichen Hubtores im Abstand von 100 cm

Abschlussbericht des Verbundprojektes „Stationäres 3D-Strömungsmesssystem für hochturbulente Strömungszustände unter Tide-, Strömungs- und Welleneinfluss“ - Teil D: „Numerische Simulationen und physikalische Versuche“

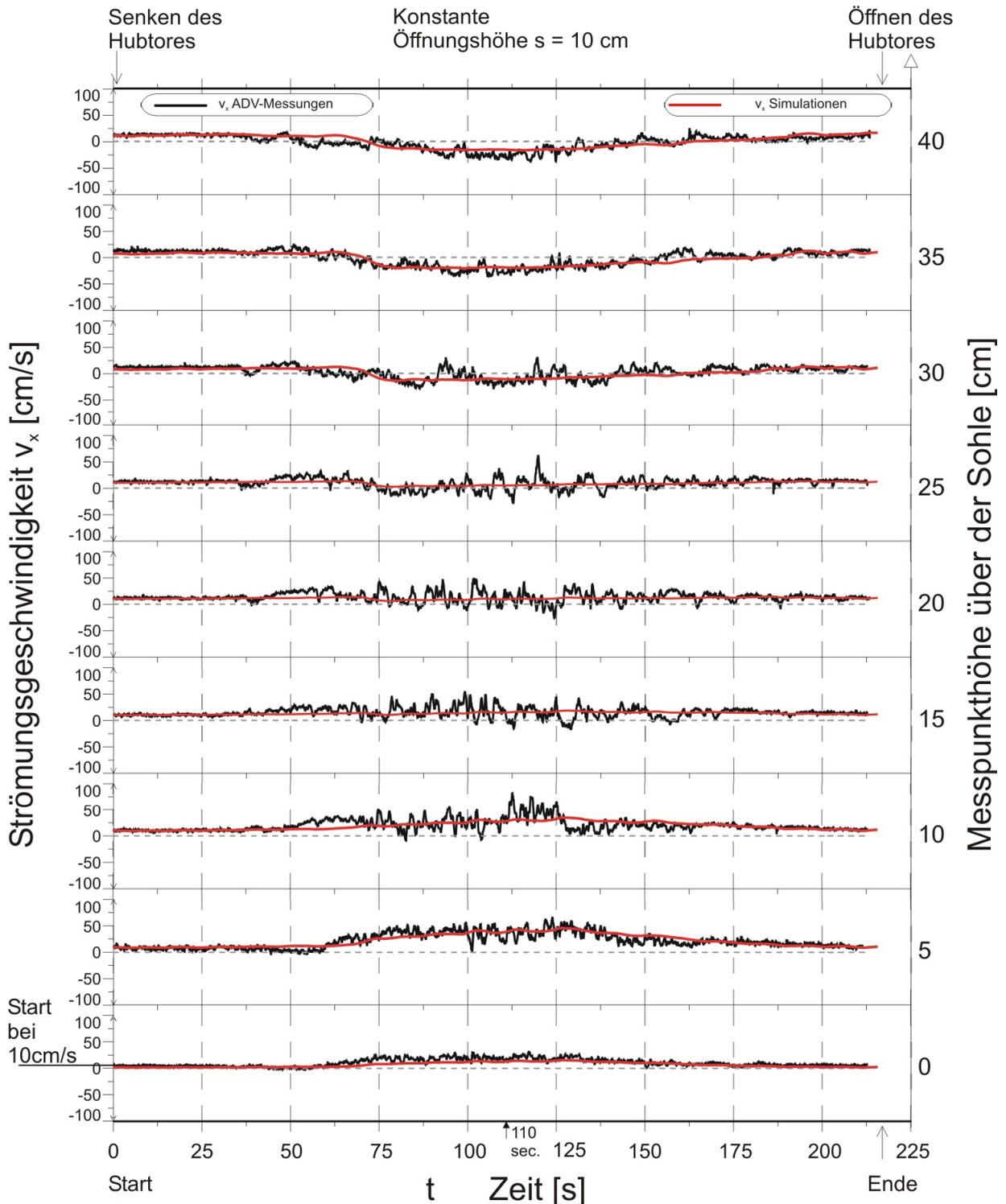


Abb. D1-5: Vergleich der berechneten und gemessenen Strömungsgeschwindigkeiten unterstrom des beweglichen Hubtores im Abstand von 150 cm

Abschlussbericht des Verbundprojektes „Stationäres 3D-Strömungsmesssystem für hochturbulente Strömungszustände unter Tide-, Strömungs- und Welleneinfluss“ - Teil D: „Numerische Simulationen und physikalische Versuche“

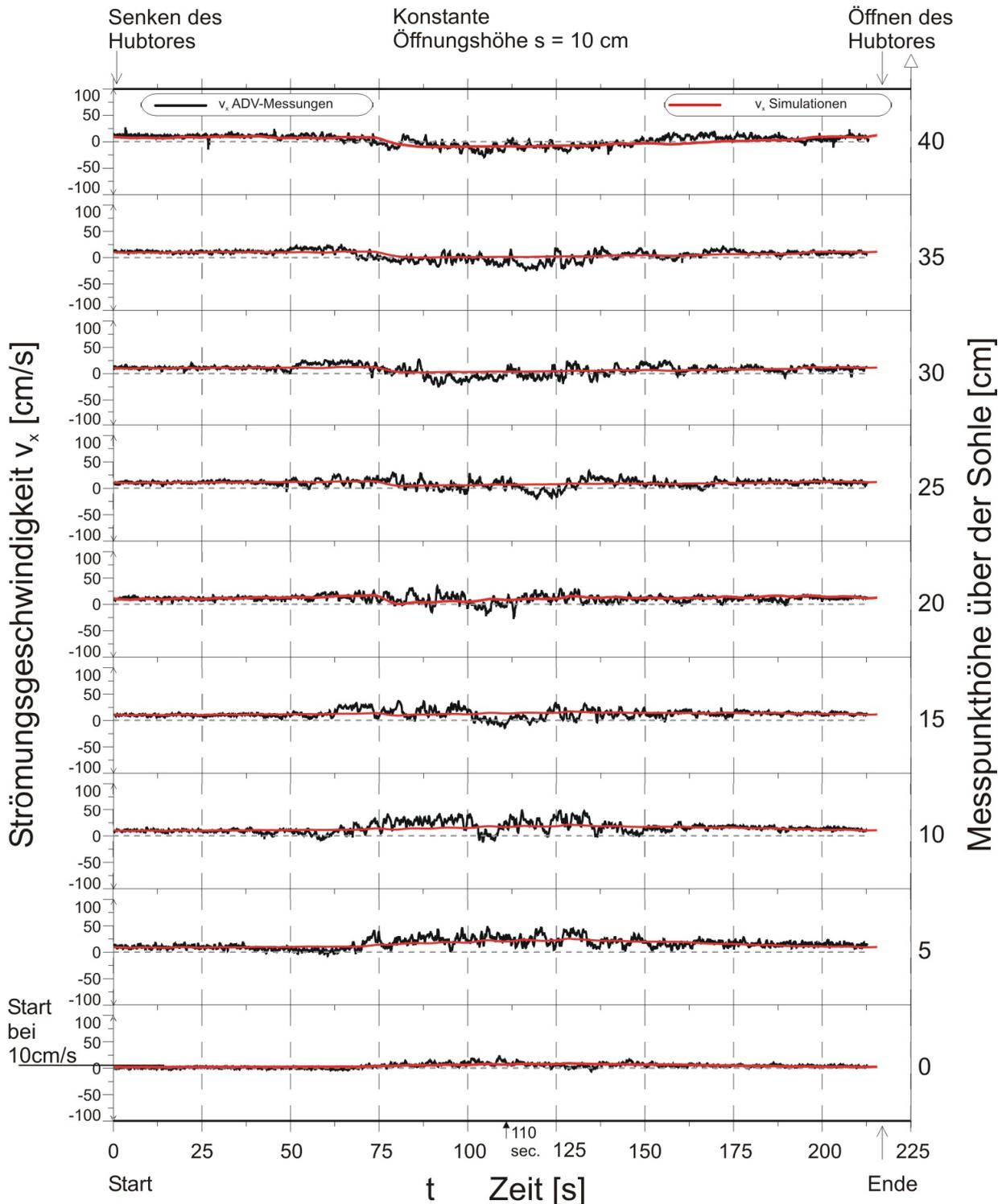


Abb. D1-6: Vergleich der berechneten und gemessenen Strömungsgeschwindigkeiten unterstrom des beweglichen Hubtores im Abstand von 200 cm

Abschlussbericht des Verbundprojektes „Stationäres 3D-Strömungsmesssystem für hochturbulente Strömungszustände unter Tide-, Strömungs- und Welleneinfluss“ - Teil D: „Numerische Simulationen und physikalische Versuche“

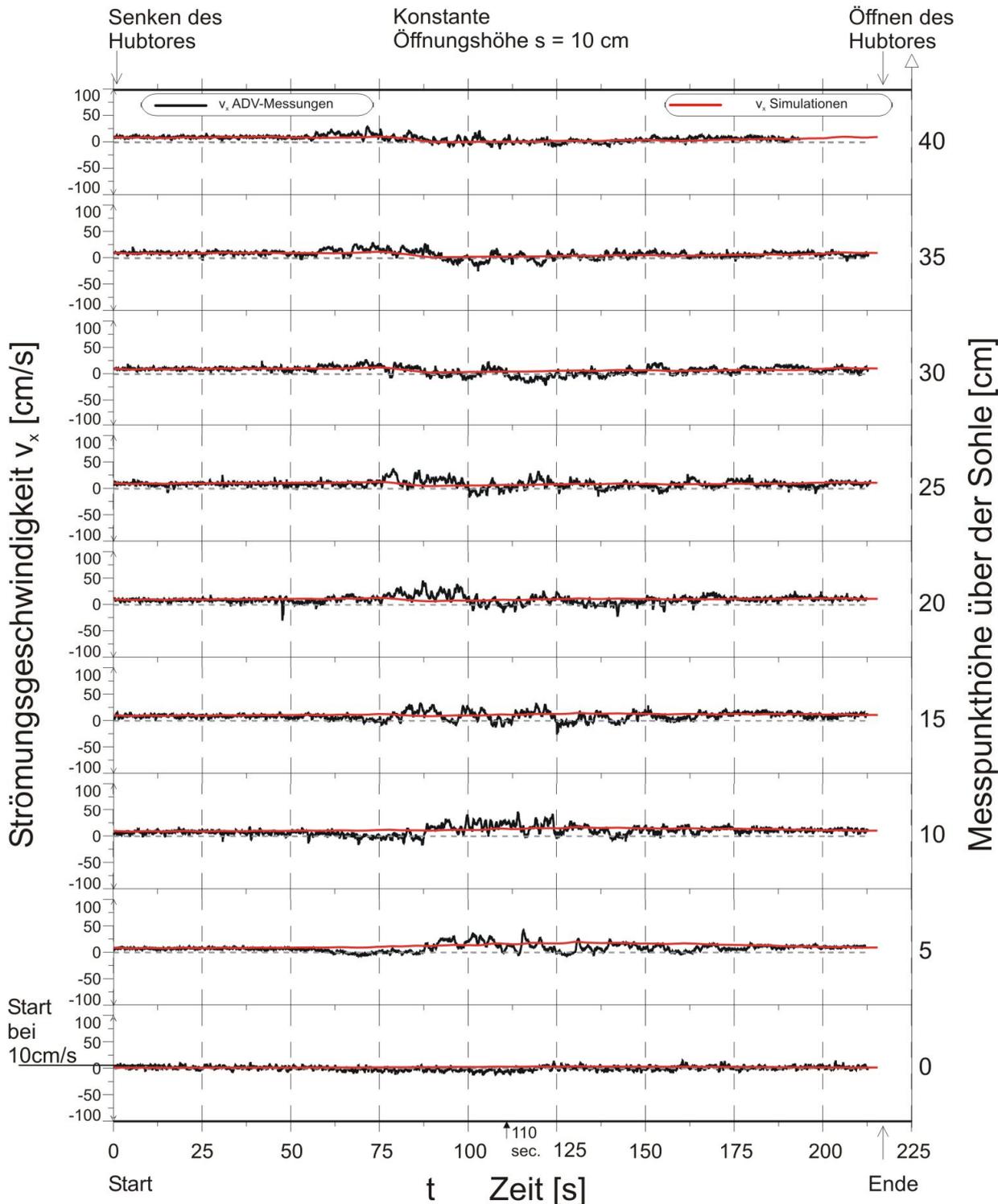


Abb. D1-7: Vergleich der berechneten und gemessenen Strömungsgeschwindigkeiten unterstrom des beweglichen Hubtores im Abstand von 250 cm

## **Anlage D-2**

### **Ergebnisse für das Emssperrwerk – unbewegliche Geometrie (Vergleich der Strömungsgeschwindigkeiten zwischen physikalischem Modell und numerischer Simulation)**

Abschlussbericht des Verbundprojektes „Stationäres 3D-Strömungsmesssystem für hochturbulente Strömungszustände unter Tide-, Strömungs- und Welleneinfluss“ - Teil D: „Numerische Simulationen und physikalische Versuche“

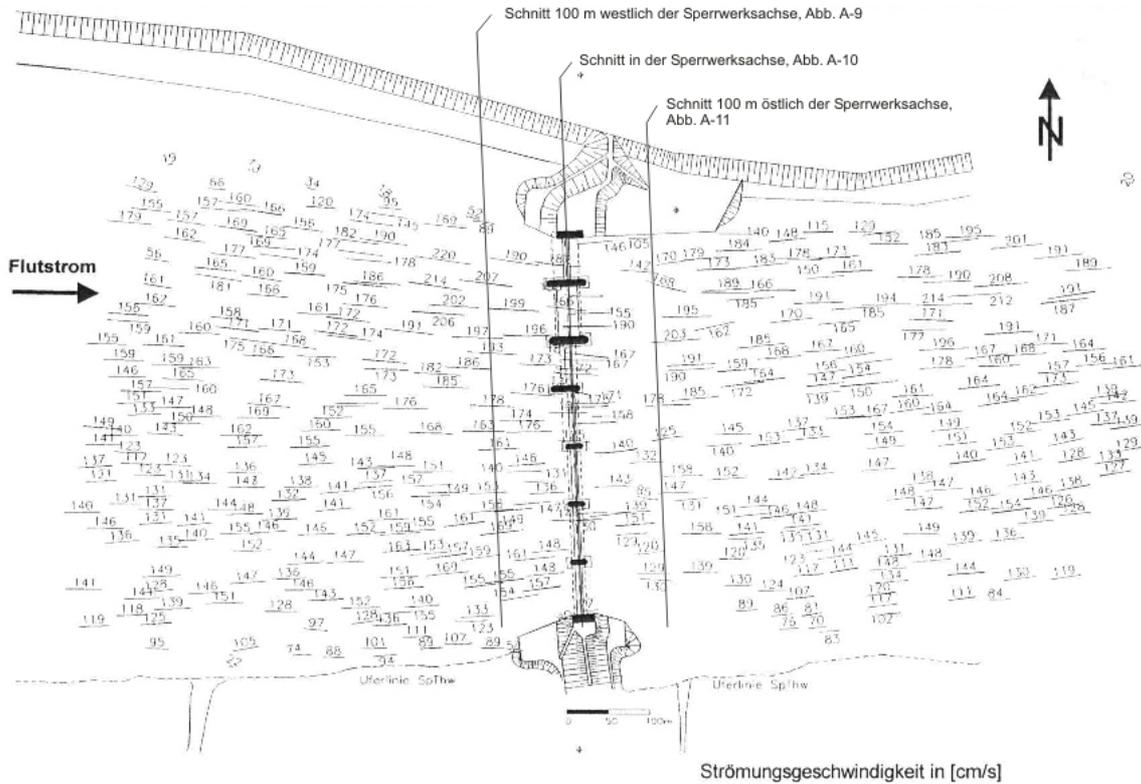


Abb. D2-8: Strömungsgeschwindigkeiten aus Schwimmerbahnen im hydraulischen Tidemodell (alle Sperwerkstore geöffnet, Flut, Tidezeit 90)

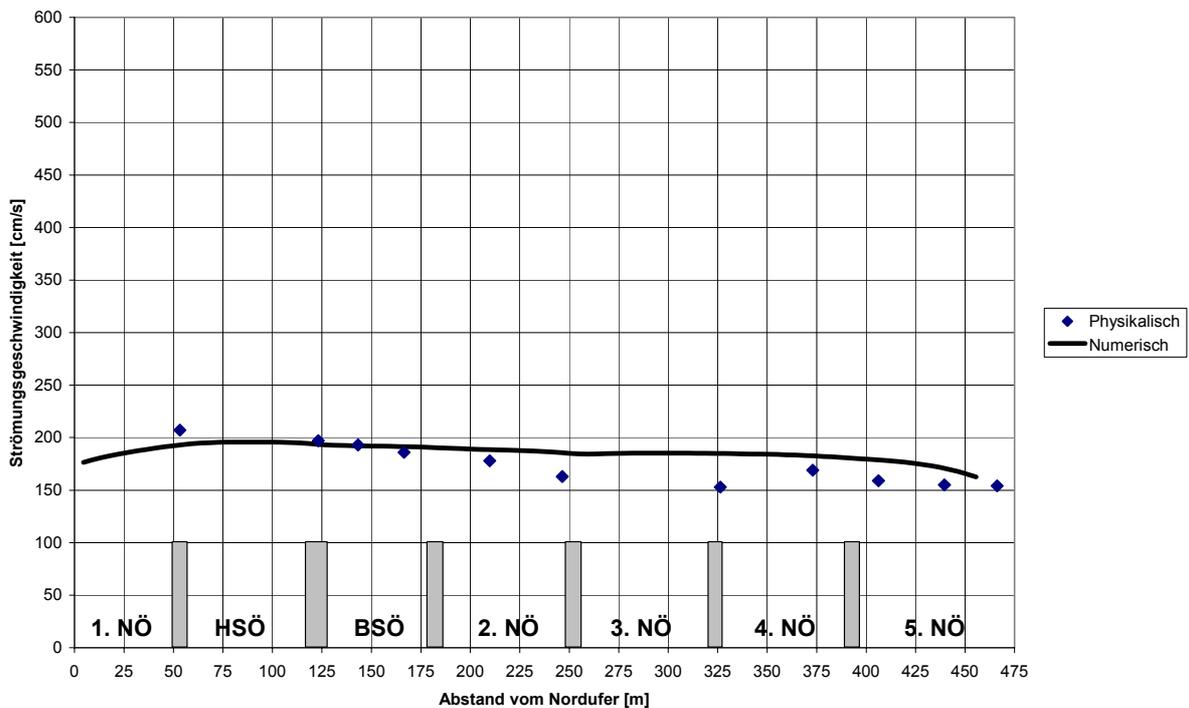


Abb. D2-9: Vergleich der berechneten und gemessenen Strömungsgeschwindigkeiten auf einer Achse 100 m westlich des Sperwerkes (alle Sperwerkstore geöffnet)

Abschlussbericht des Verbundprojektes „Stationäres 3D-Strömungsmesssystem für hochturbulente Strömungszustände unter Tide-, Strömungs- und Welleneinfluss“ - Teil D: „Numerische Simulationen und physikalische Versuche“

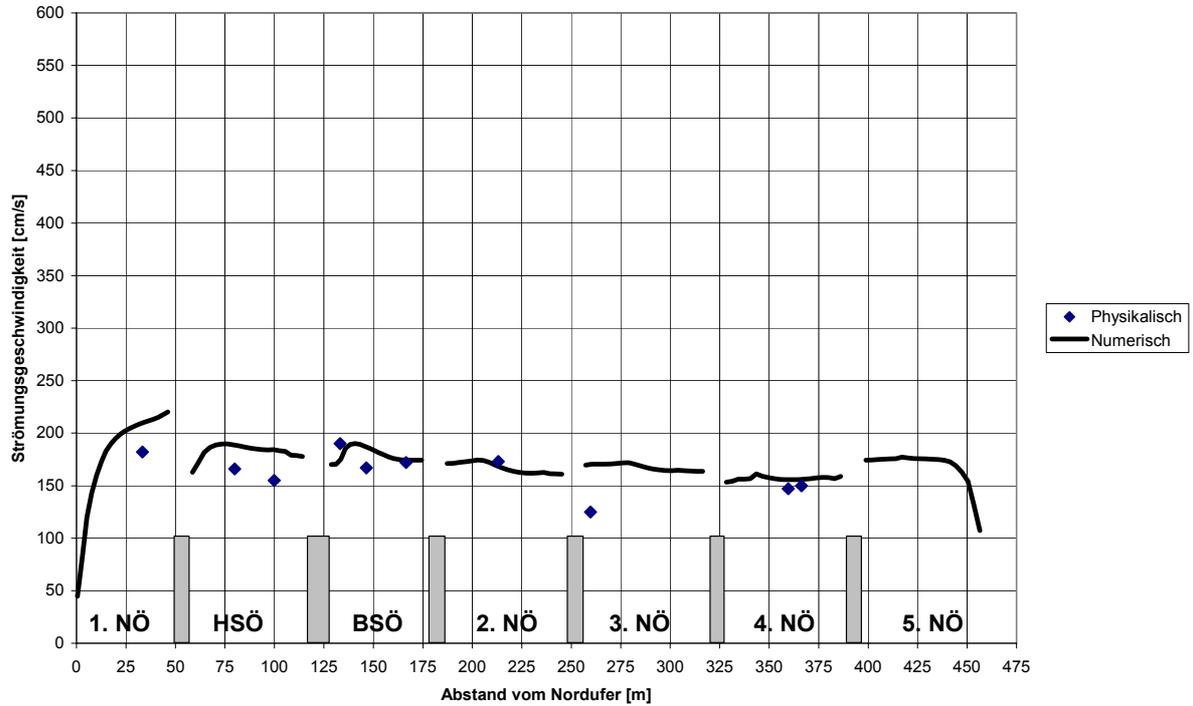


Abb. D2-10: Vergleich der berechneten und gemessenen Strömungsgeschwindigkeiten in der Sperrwerksachse (alle Sperrwerkstore geöffnet)

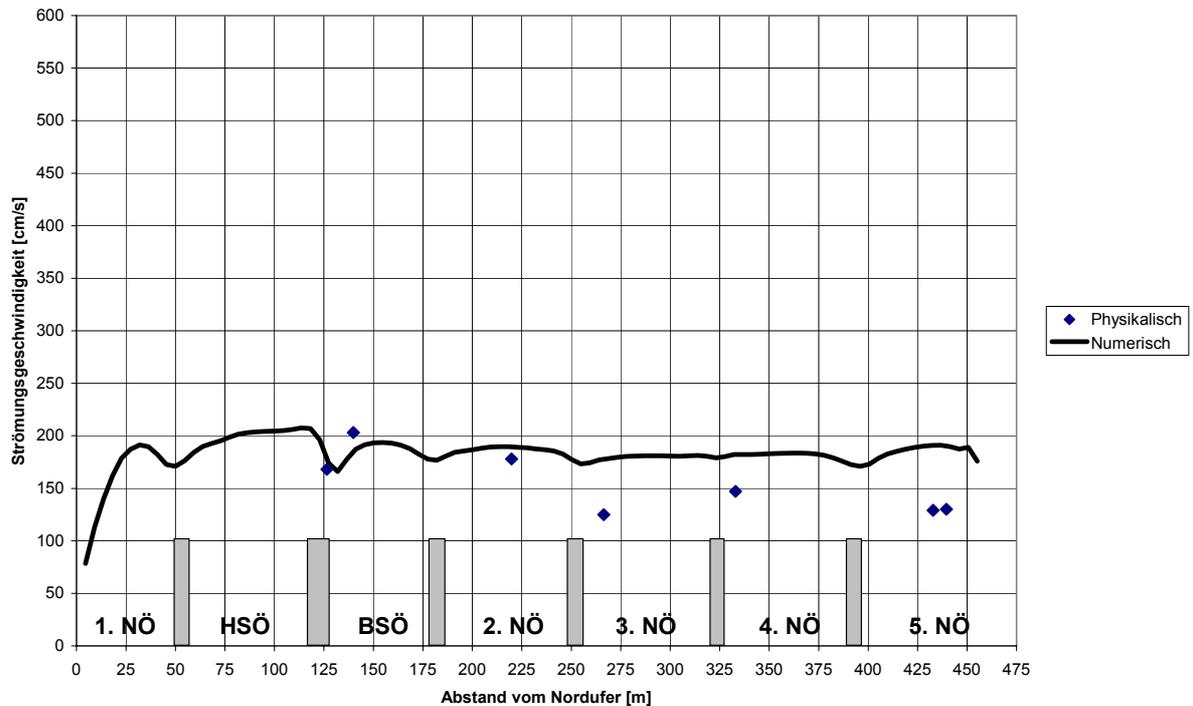


Abb. D2-11: Vergleich der berechneten und gemessenen Strömungsgeschwindigkeiten auf einer Achse 100 m östlich des Sperrwerkes (alle Sperrwerkstore geöffnet)

Abschlussbericht des Verbundprojektes „Stationäres 3D-Strömungsmesssystem für hochturbulente Strömungszustände unter Tide-, Strömungs- und Welleneinfluss“ - Teil D: „Numerische Simulationen und physikalische Versuche“

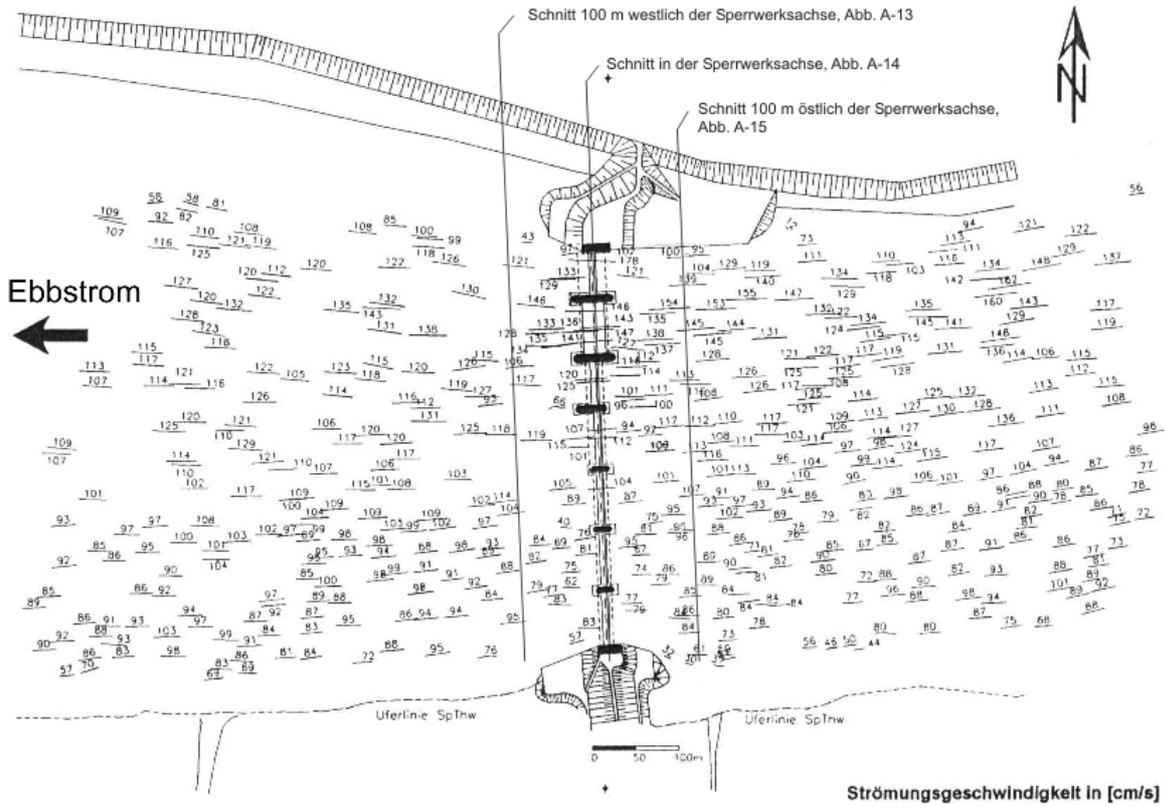


Abb. D2-12: Strömungsgeschwindigkeiten aus Schwimmerbahnen im hydraulischen Tidemodell (alle Sperwerkstore geöffnet, Ebbe, Tidezeit 330)

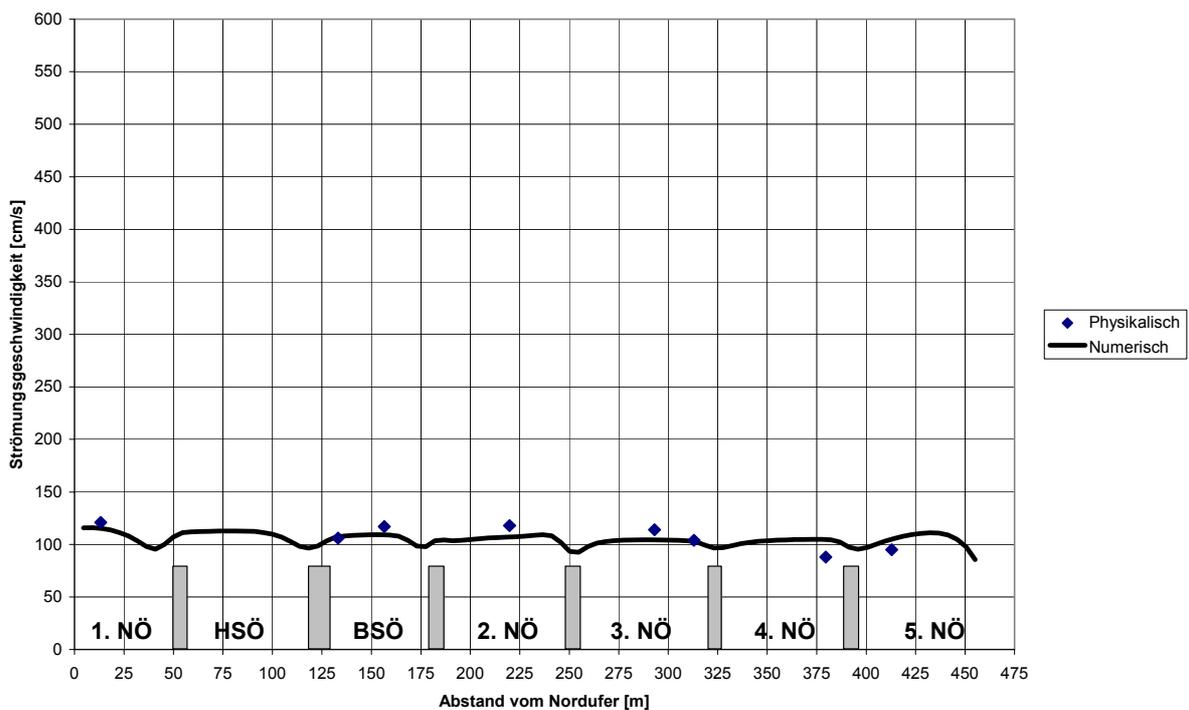


Abb. D2-13: Vergleich der berechneten und gemessenen Strömungsgeschwindigkeiten auf einer Achse 100 m westlich des Sperwerkes (alle Sperwerkstore geöffnet)

Abschlussbericht des Verbundprojektes „Stationäres 3D-Strömungsmesssystem für hochturbulente Strömungszustände unter Tide-, Strömungs- und Welleneinfluss“ - Teil D: „Numerische Simulationen und physikalische Versuche“

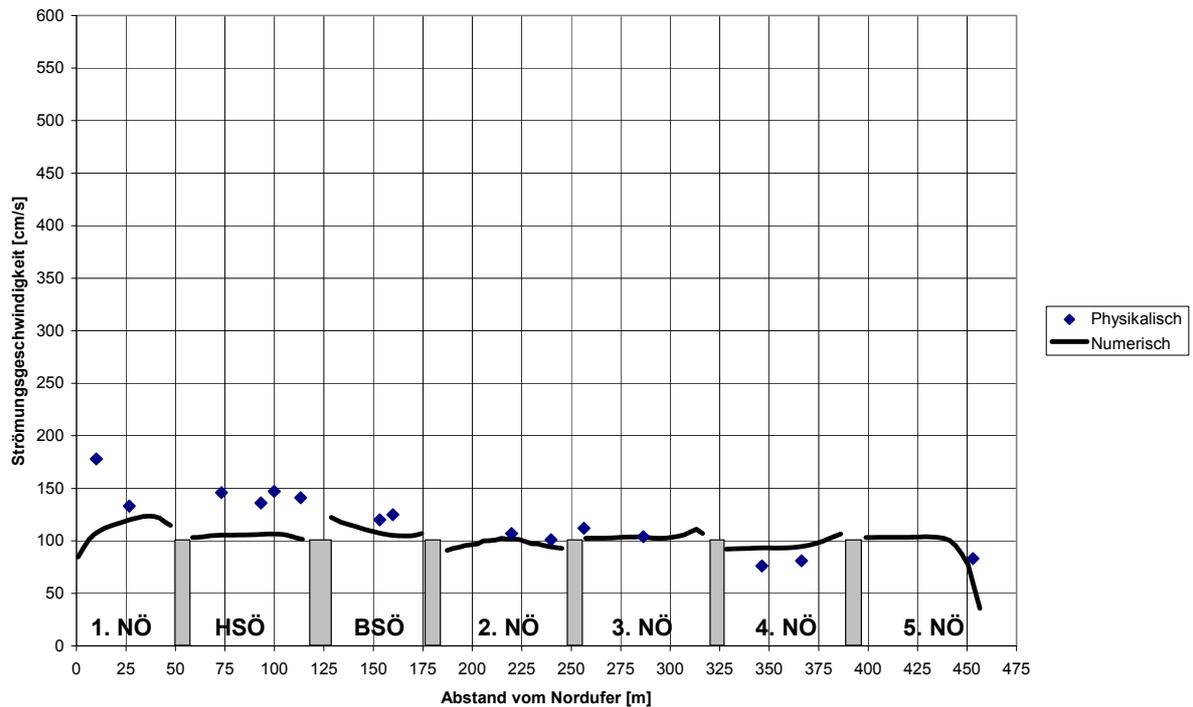


Abb. D2-14: Vergleich der berechneten und gemessenen Strömungsgeschwindigkeiten in der Sperrwerksachse (alle Sperrwerkstore geöffnet)

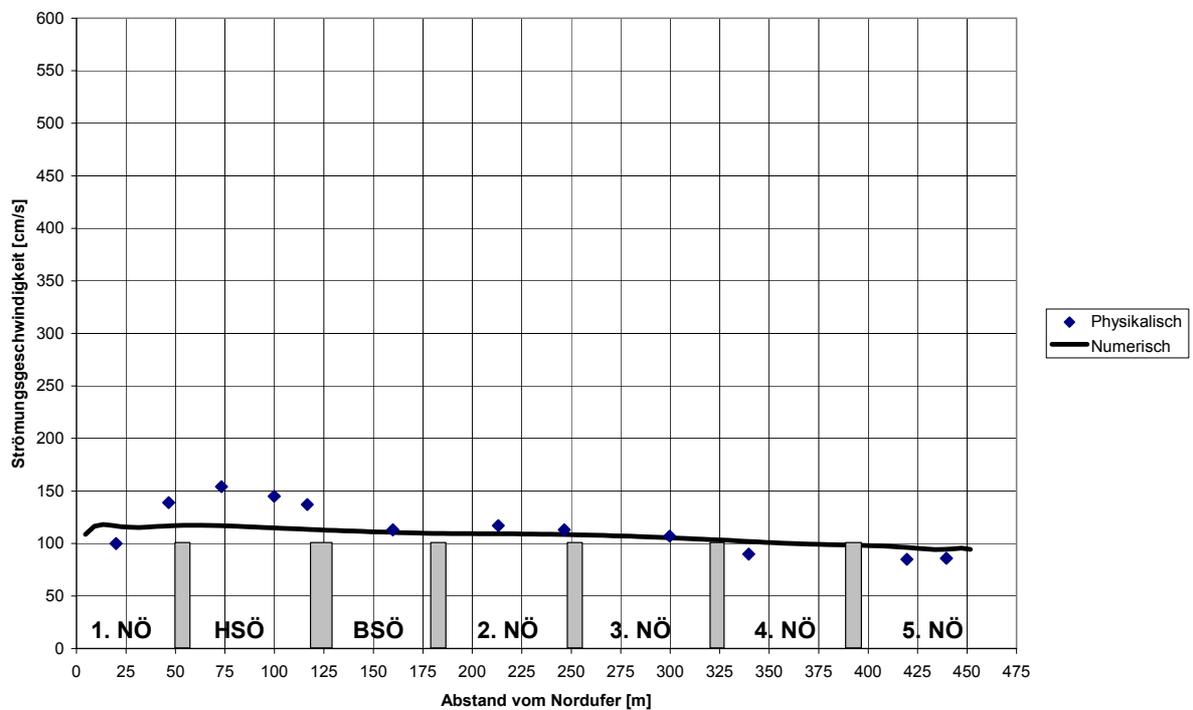


Abb. D2-15: Vergleich der berechneten und gemessenen Strömungsgeschwindigkeiten auf einer Achse 100 m östlich des Sperrwerkes (alle Sperrwerkstore geöffnet)

Abschlussbericht des Verbundprojektes „Stationäres 3D-Strömungsmesssystem für hochturbulente Strömungszustände unter Tide-, Strömungs- und Welleneinfluss“ - Teil D: „Numerische Simulationen und physikalische Versuche“

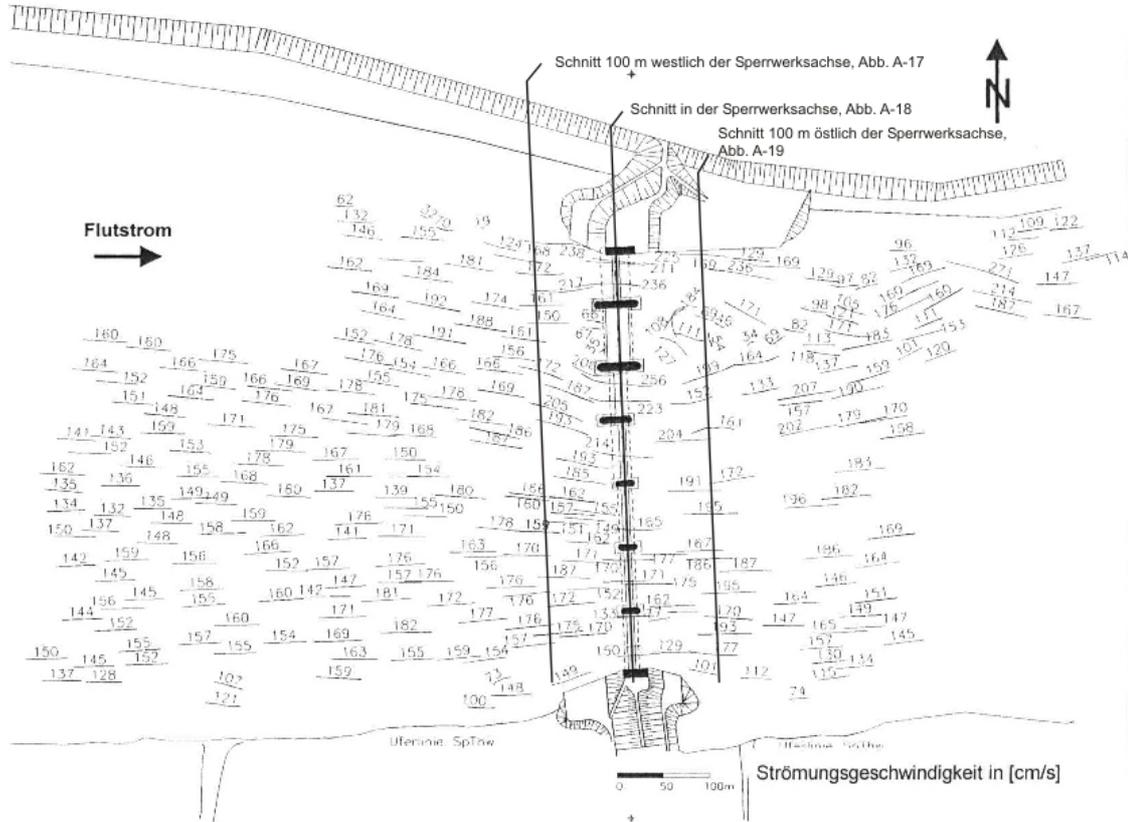


Abb. D2-16: Strömungsgeschwindigkeiten aus Schwimmerbahnen im hydraulischen Tidemodell (HSÖ geschlossen, Flut, Tidezeit 90)

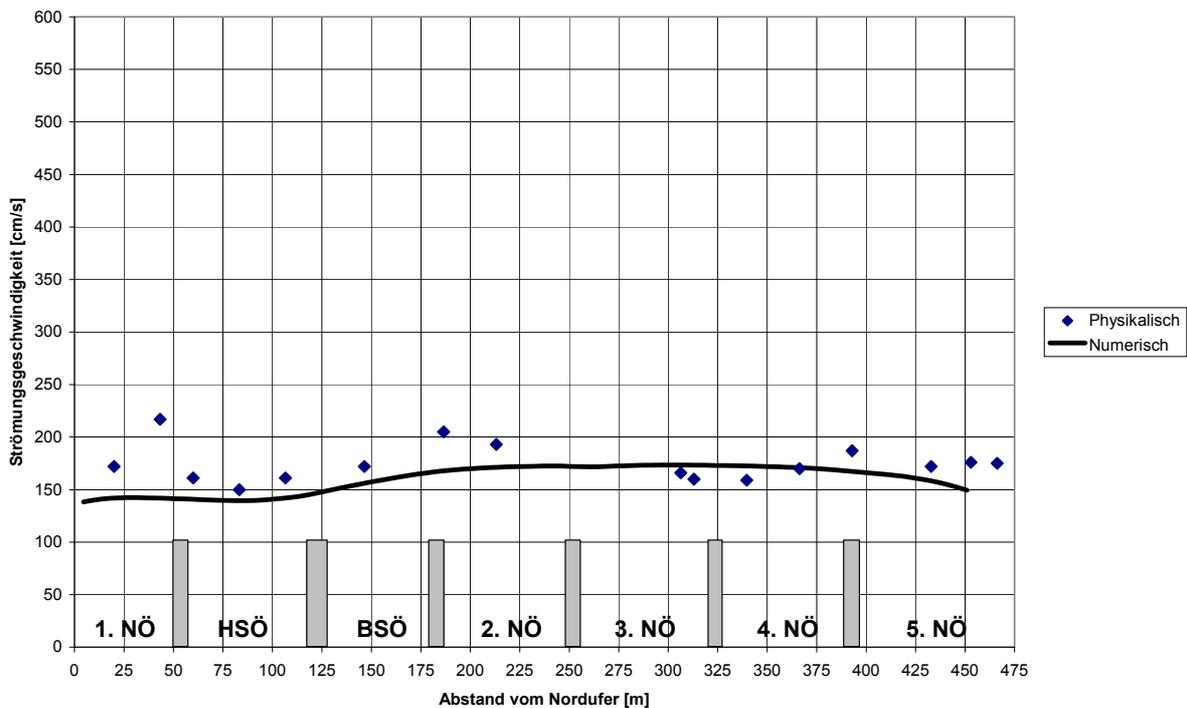


Abb. D2-17: Vergleich der berechneten und gemessenen Strömungsgeschwindigkeiten auf einer Achse 100 m westlich des Sperrwerkes (HSÖ geschlossen), Tidezeit 90

Abschlussbericht des Verbundprojektes „Stationäres 3D-Strömungsmesssystem für hochturbulente Strömungszustände unter Tide-, Strömungs- und Welleneinfluss“ - Teil D: „Numerische Simulationen und physikalische Versuche“

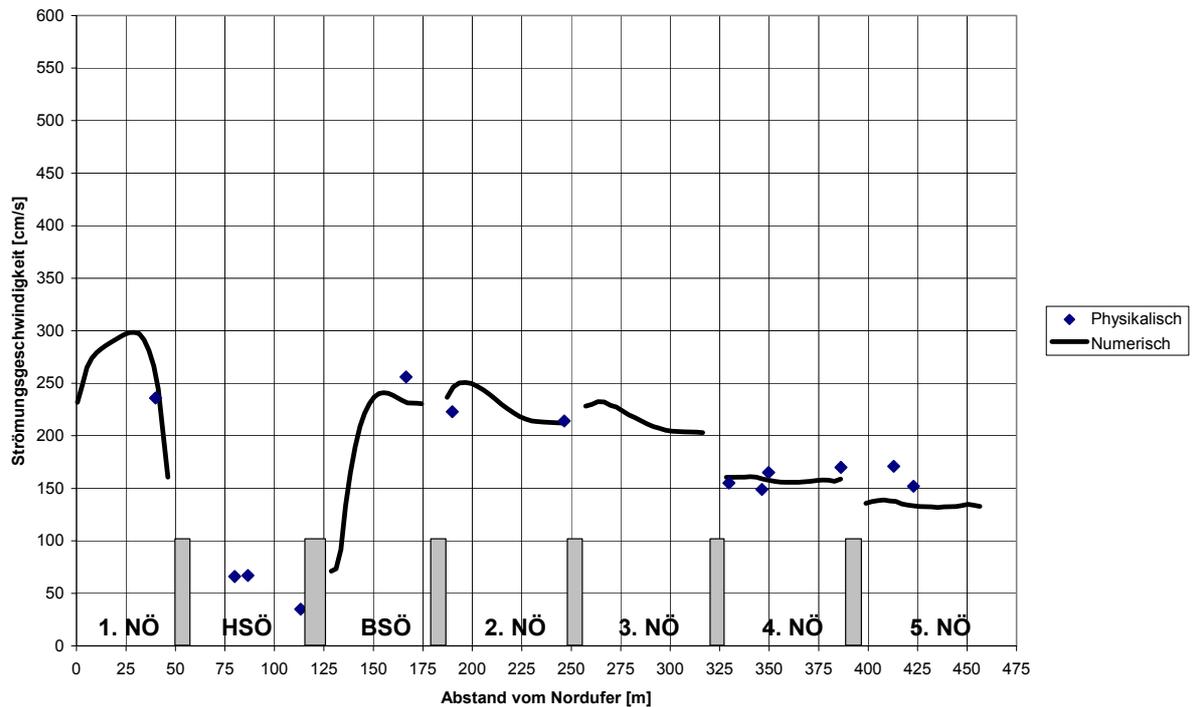


Abb. D2-18: Vergleich der berechneten und gemessenen Strömungsgeschwindigkeiten in der Sperrwerksachse (HSÖ geschlossen), Tidezeit 90

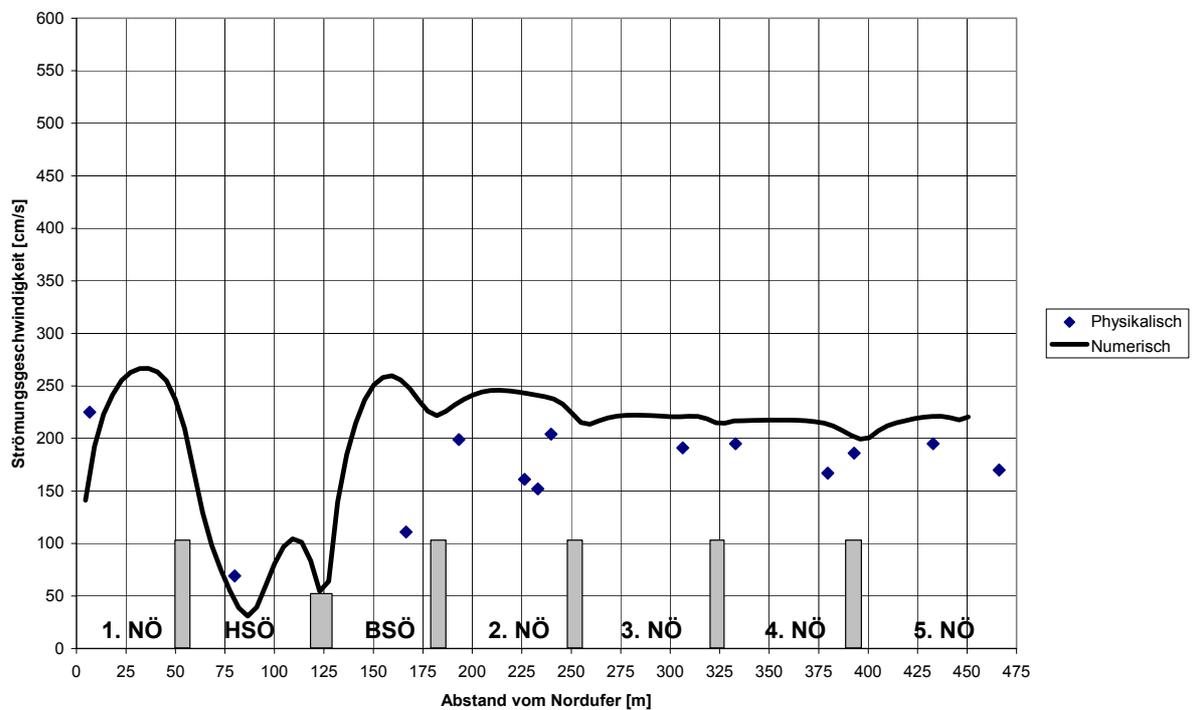


Abb. D2-19: Vergleich der berechneten und gemessenen Strömungsgeschwindigkeiten auf einer Achse 100 m östlich des Sperrwerkes (HSÖ geschlossen), Tidezeit 90

Abschlussbericht des Verbundprojektes „Stationäres 3D-Strömungsmesssystem für hochturbulente Strömungszustände unter Tide-, Strömungs- und Welleneinfluss“ - Teil D: „Numerische Simulationen und physikalische Versuche“

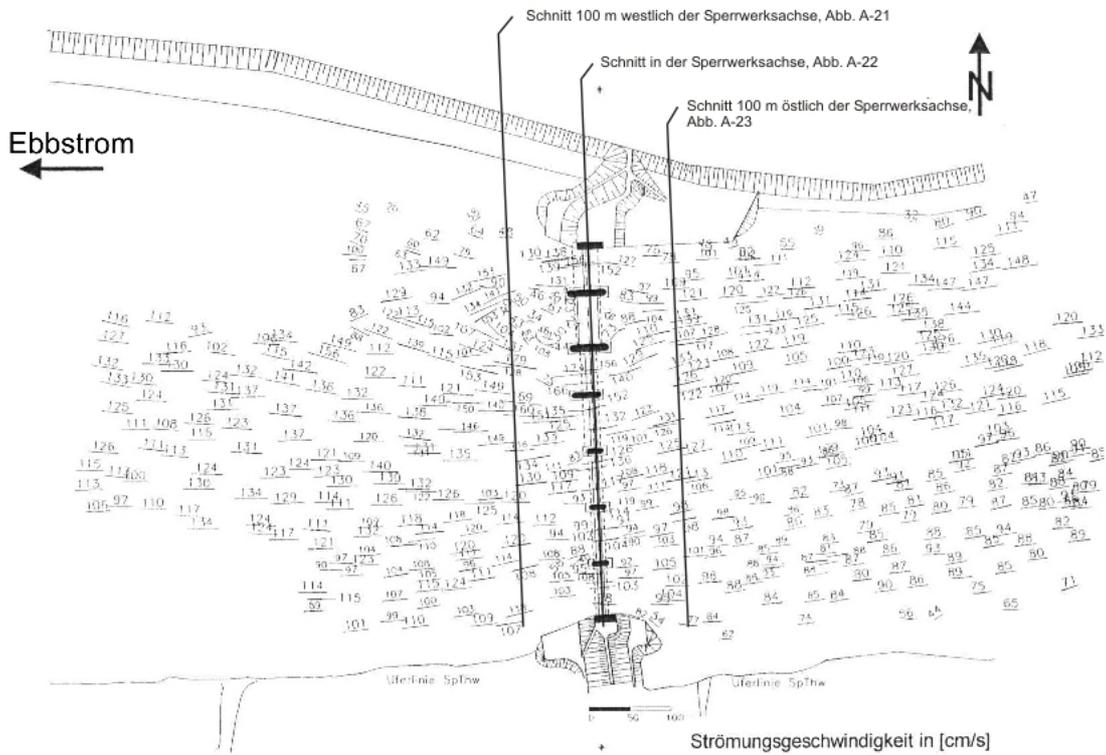


Abb. D2-20: Strömungsgeschwindigkeiten aus Schwimmerbahnen im hydraulischen Tidemodell (HSÖ geschlossen, Ebbe, Tidezeit 330)

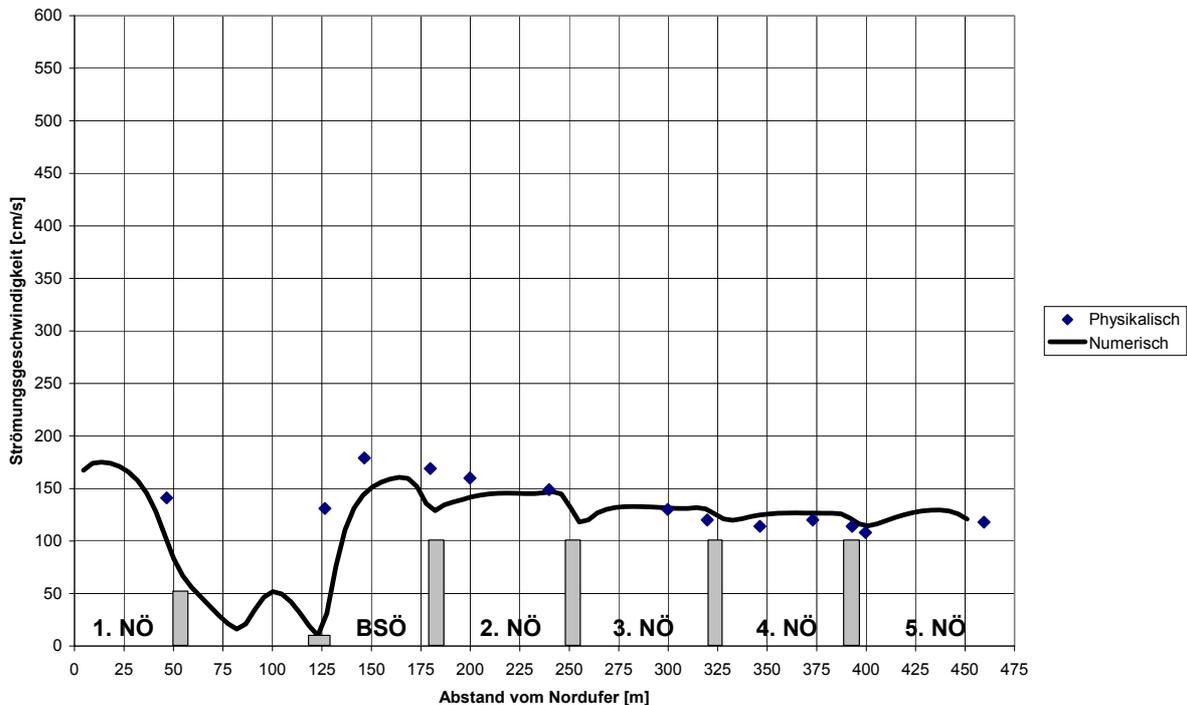


Abb. D2-21: Vergleich der berechneten und gemessenen Strömungsgeschwindigkeiten auf einer Achse 100 m westlich des Sperrwerkes (HSÖ geschlossen), Tidezeit 330

Abschlussbericht des Verbundprojektes „Stationäres 3D-Strömungsmesssystem für hochturbulente Strömungszustände unter Tide-, Strömungs- und Welleneinfluss“ - Teil D: „Numerische Simulationen und physikalische Versuche“

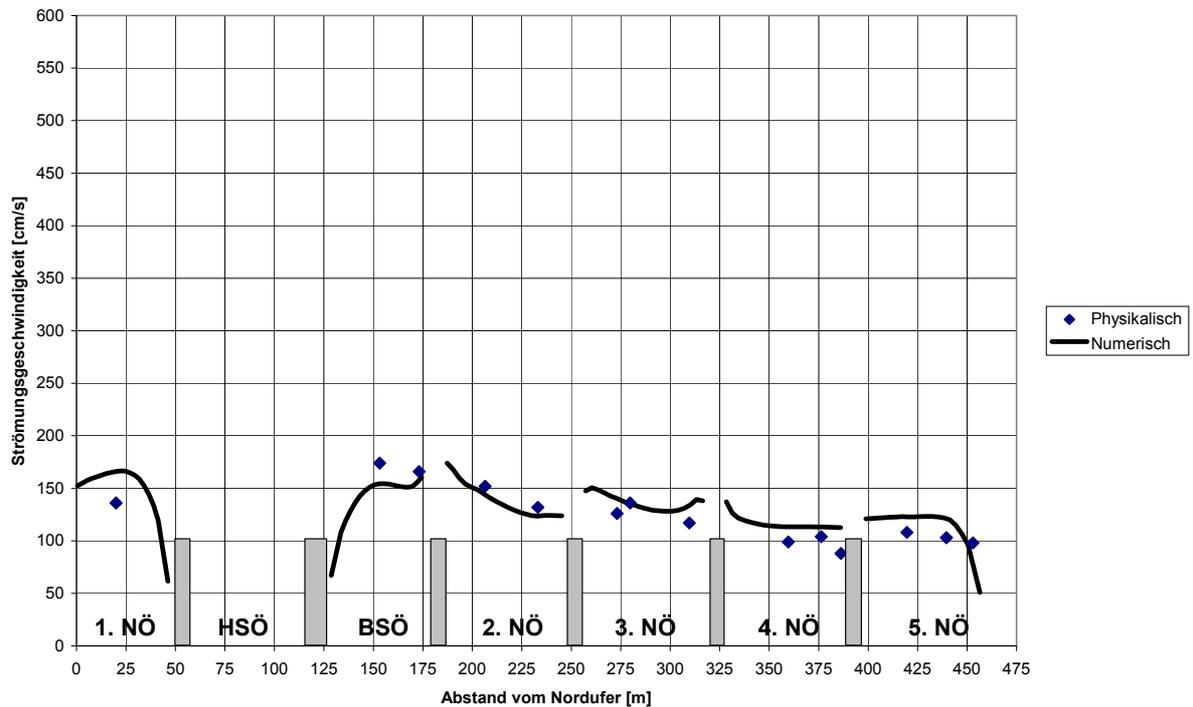


Abb. D2-22: Vergleich der berechneten und gemessenen Strömungsgeschwindigkeiten in der Sperrwerksachse (HSÖ geschlossen), Tidezeit 330

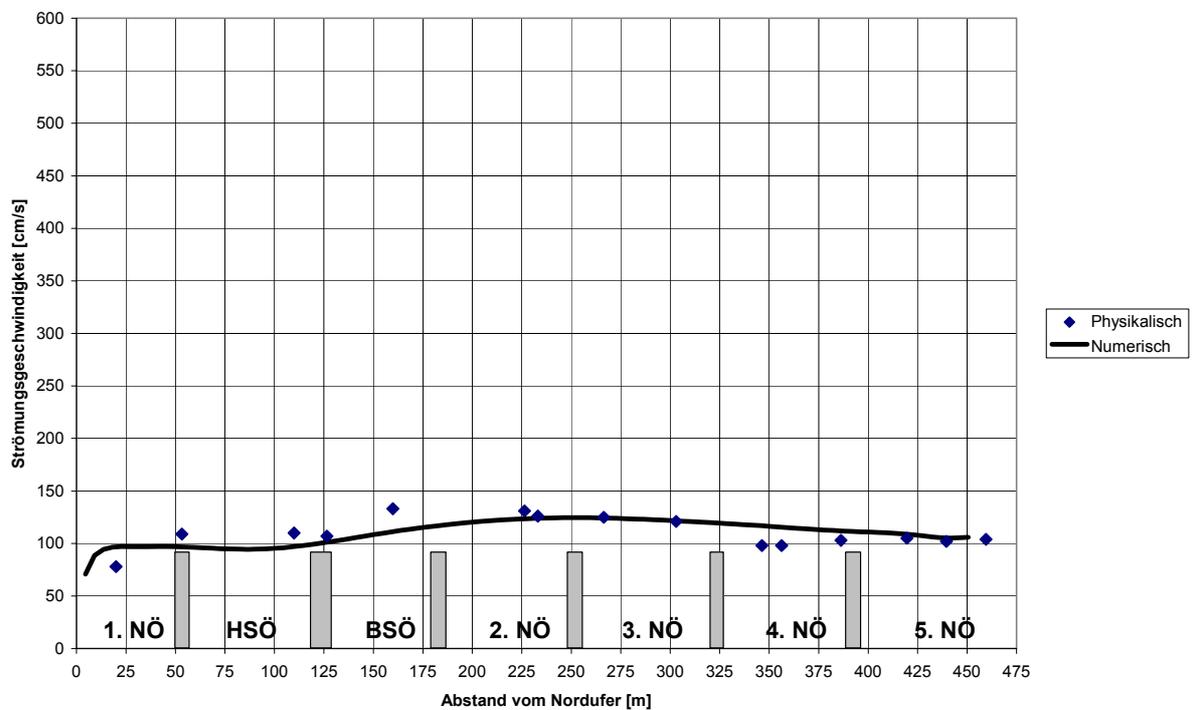


Abb. D2-23: Vergleich der berechneten und gemessenen Strömungsgeschwindigkeiten auf einer Achse 100 m östlich des Sperrwerkes (HSÖ geschlossen), Tidezeit 330

Abschlussbericht des Verbundprojektes „Stationäres 3D-Strömungsmesssystem für hochturbulente Strömungszustände unter Tide-, Strömungs- und Welleneinfluss“ - Teil D: „Numerische Simulationen und physikalische Versuche“

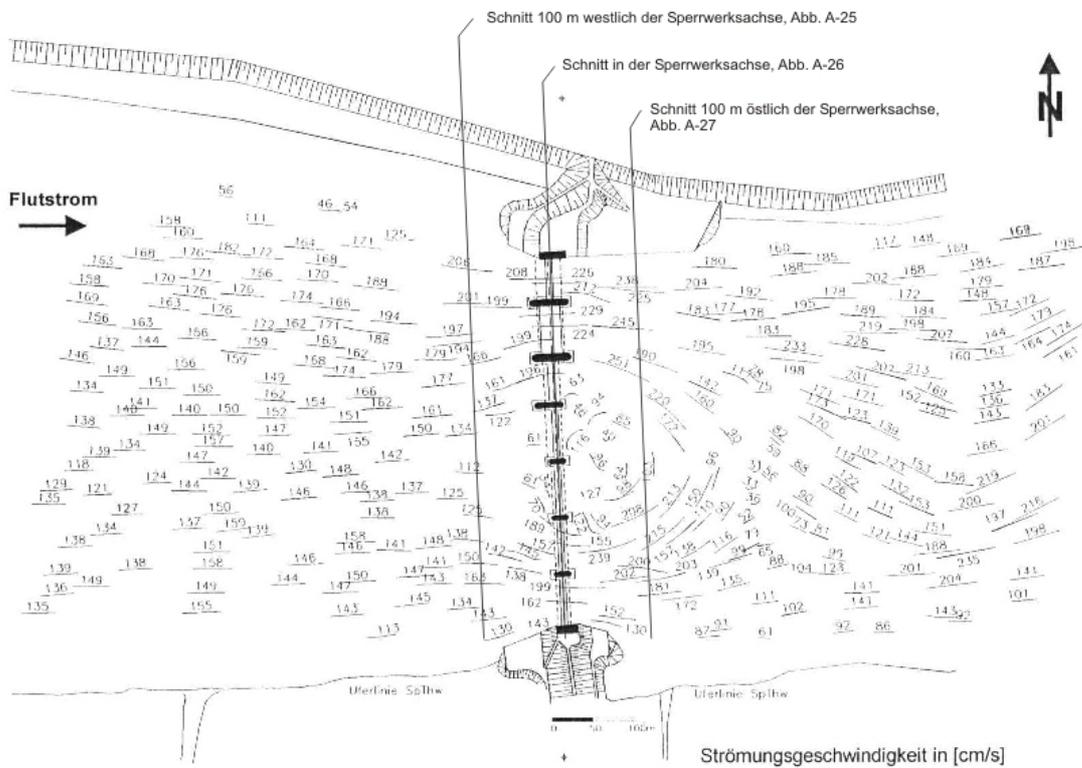


Abb. D2-24: Strömungsgeschwindigkeiten aus Schwimmerbahnen im hydraulischen Tidemodell (2. NÖ und 3. NÖ geschlossen, Flut, Tidezeit 90)

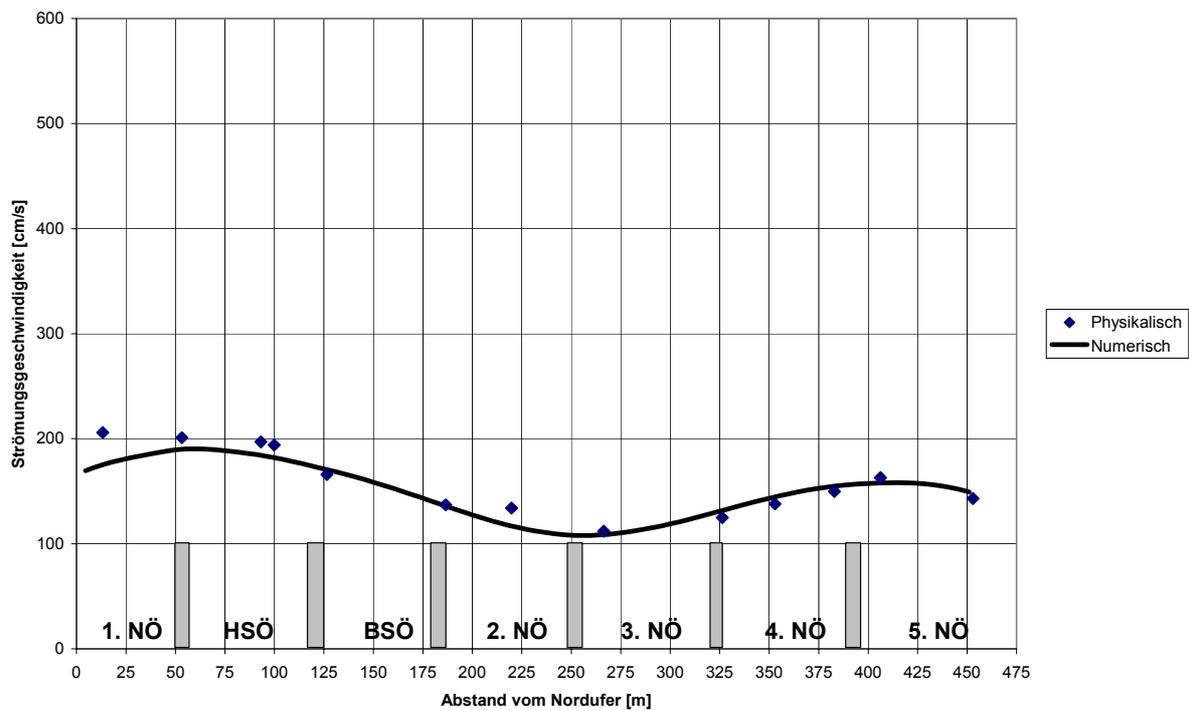


Abb. D2-25: Vergleich der berechneten und gemessenen Strömungsgeschwindigkeiten auf einer Achse 100 m westlich des Sperrwerkes (2. NÖ und 3. NÖ geschlossen), Tidezeit 90

Abschlussbericht des Verbundprojektes „Stationäres 3D-Strömungsmesssystem für hochturbulente Strömungszustände unter Tide-, Strömungs- und Welleneinfluss“ - Teil D: „Numerische Simulationen und physikalische Versuche“

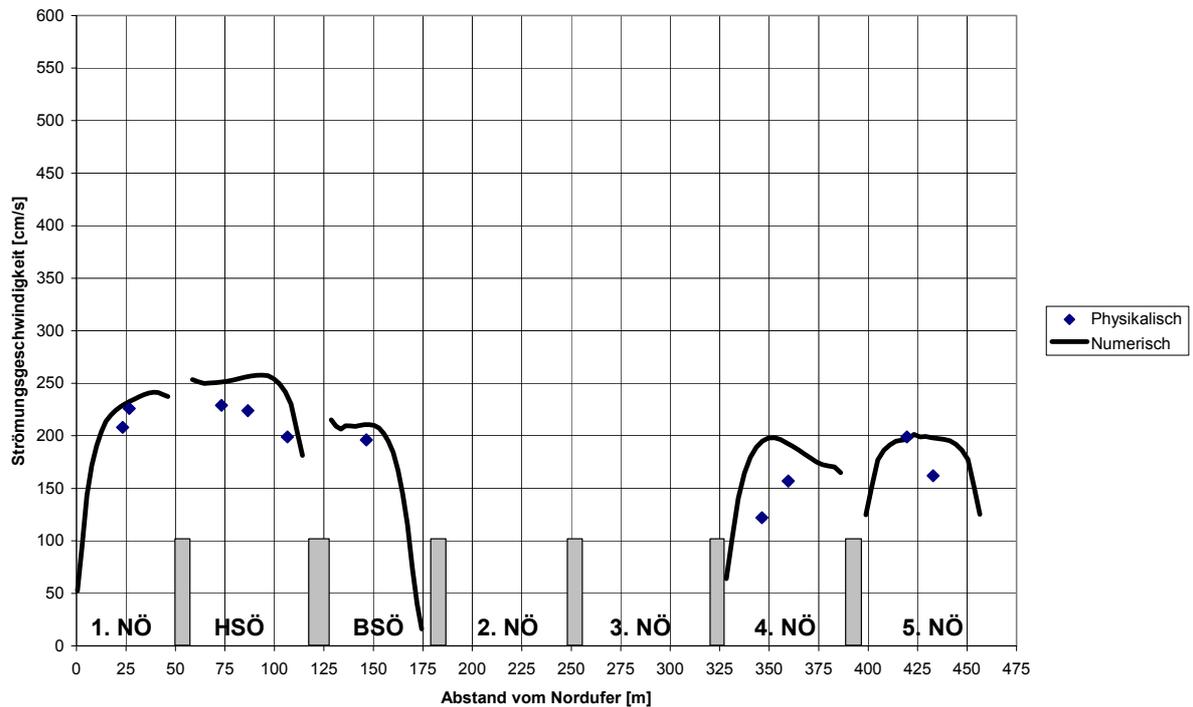


Abb. D2-26: Vergleich der berechneten und gemessenen Strömungsgeschwindigkeiten in der Sperwerksachse (2. NÖ und 3. NÖ geschlossen), Tidezeit 90

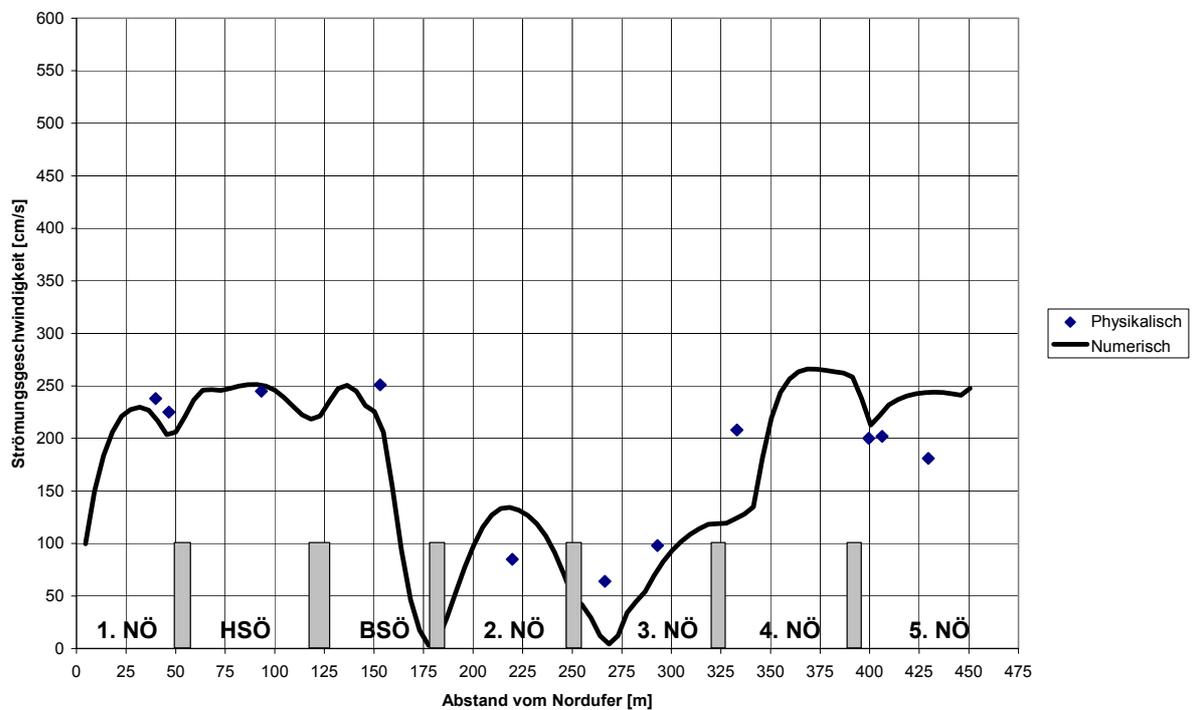


Abb. D2-27: Vergleich der berechneten und gemessenen Strömungsgeschwindigkeiten auf einer Achse 100 m östlich des Sperwerkes (2. NÖ und 3. NÖ geschlossen), Tidezeit 90

Abschlussbericht des Verbundprojektes „Stationäres 3D-Strömungsmesssystem für hochturbulente Strömungszustände unter Tide-, Strömungs- und Welleneinfluss“ - Teil D: „Numerische Simulationen und physikalische Versuche“

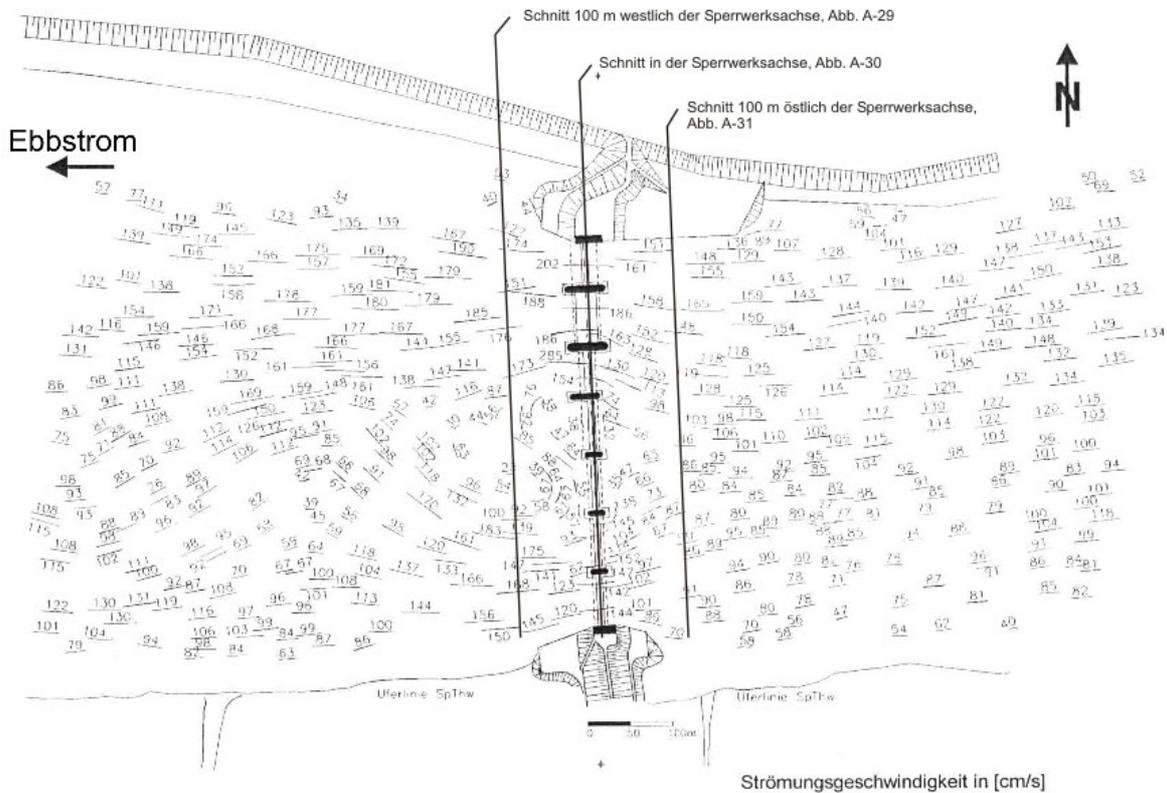


Abb. D2-28: Strömungsgeschwindigkeiten aus Schwimmerbahnen im hydraulischen Tidemodell (2. NÖ und 3. NÖ geschlossen, Ebbe, Tidezeit 330)

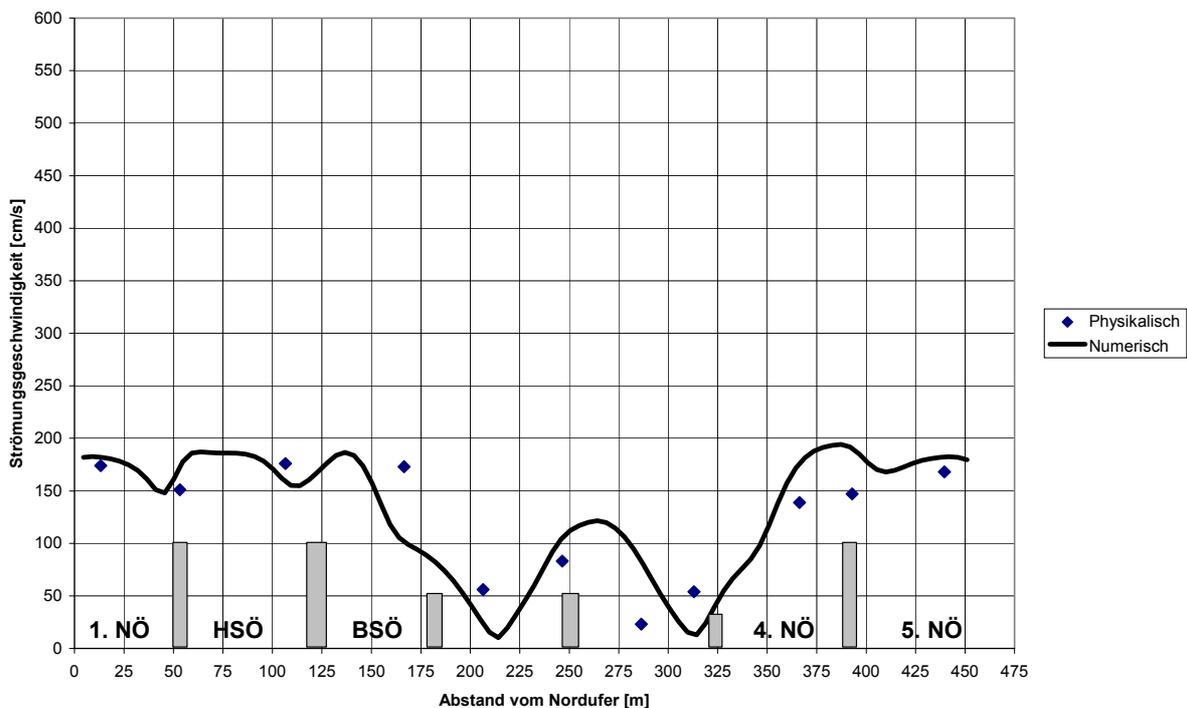


Abb. D2-29: Vergleich der berechneten und gemessenen Strömungsgeschwindigkeiten auf einer Achse 100 m westlich des Sperwerkes (2. NÖ und 3. NÖ geschlossen), Tidezeit 330

Abschlussbericht des Verbundprojektes „Stationäres 3D-Strömungsmesssystem für hochturbulente Strömungszustände unter Tide-, Strömungs- und Welleneinfluss“ - Teil D: „Numerische Simulationen und physikalische Versuche“

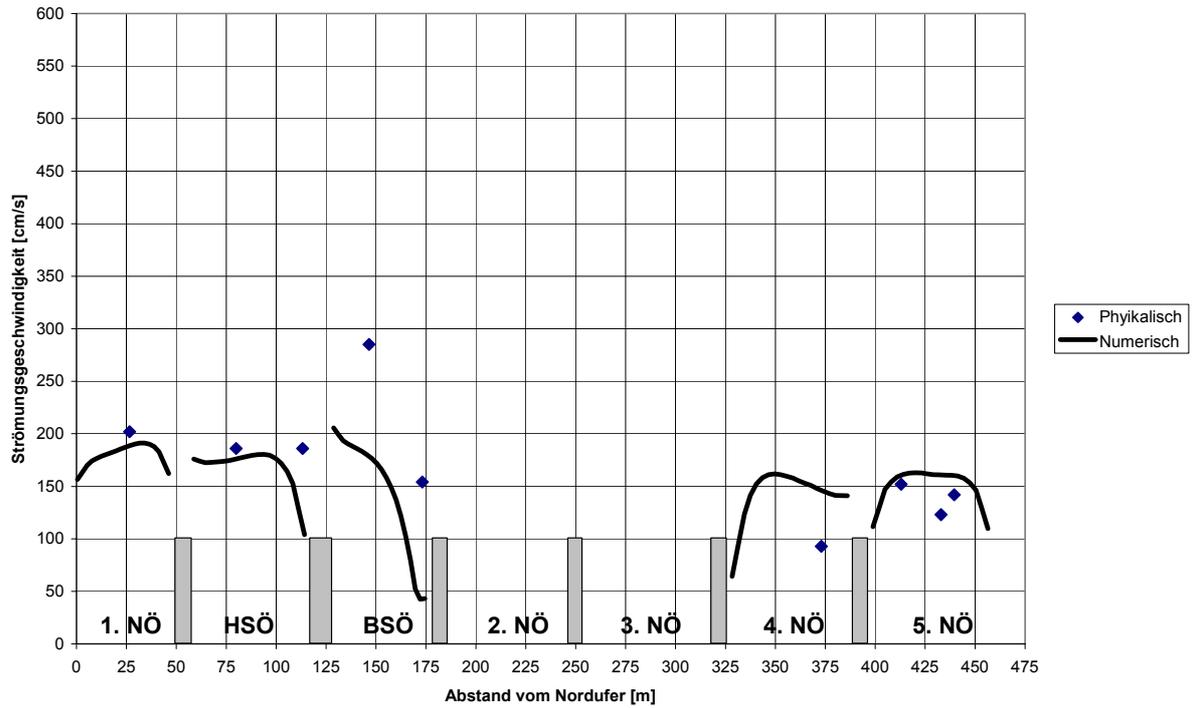


Abb. D2-30: Vergleich der berechneten und gemessenen Strömungsgeschwindigkeiten in der Sperwerksachse (2. NÖ und 3. NÖ geschlossen), Tidezeit 330

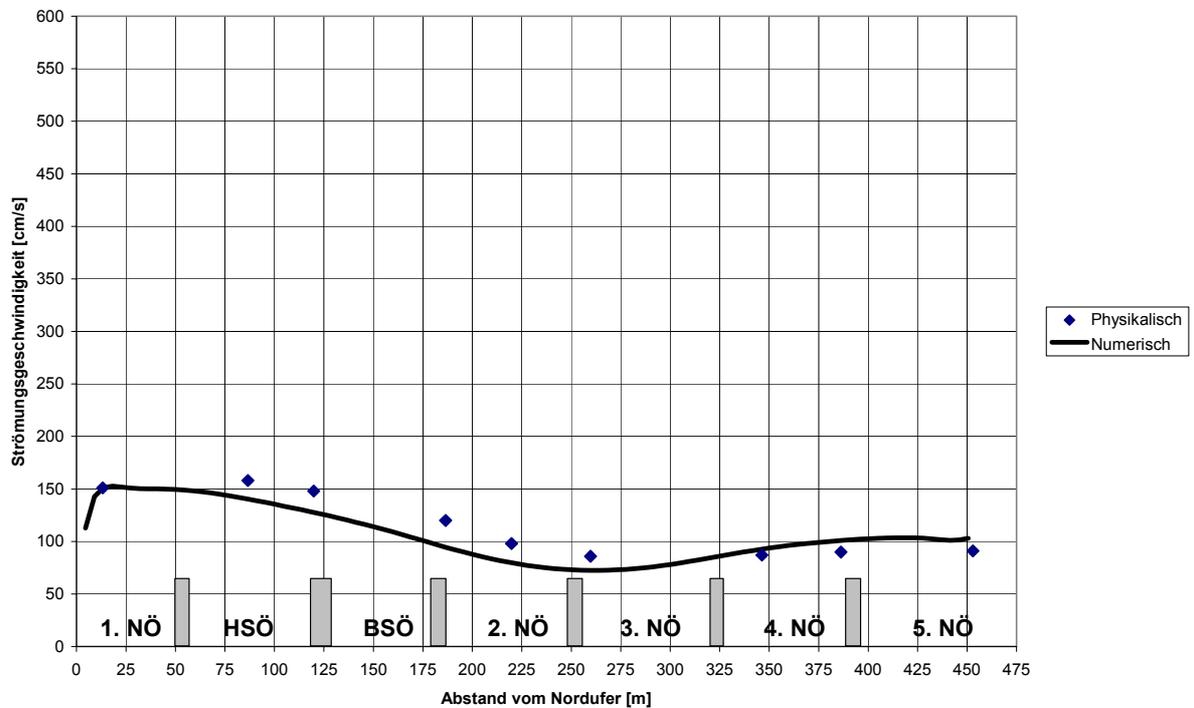


Abb. D2-31: Vergleich der berechneten und gemessenen Strömungsgeschwindigkeiten auf einer Achse 100 m östlich des Sperwerkes (2. NÖ und 3. NÖ geschlossen), Tidezeit 330

Abschlussbericht des Verbundprojektes „Stationäres 3D-Strömungsmesssystem für hochturbulente Strömungszustände unter Tide-, Strömungs- und Welleneinfluss“ - Teil D: „Numerische Simulationen und physikalische Versuche“

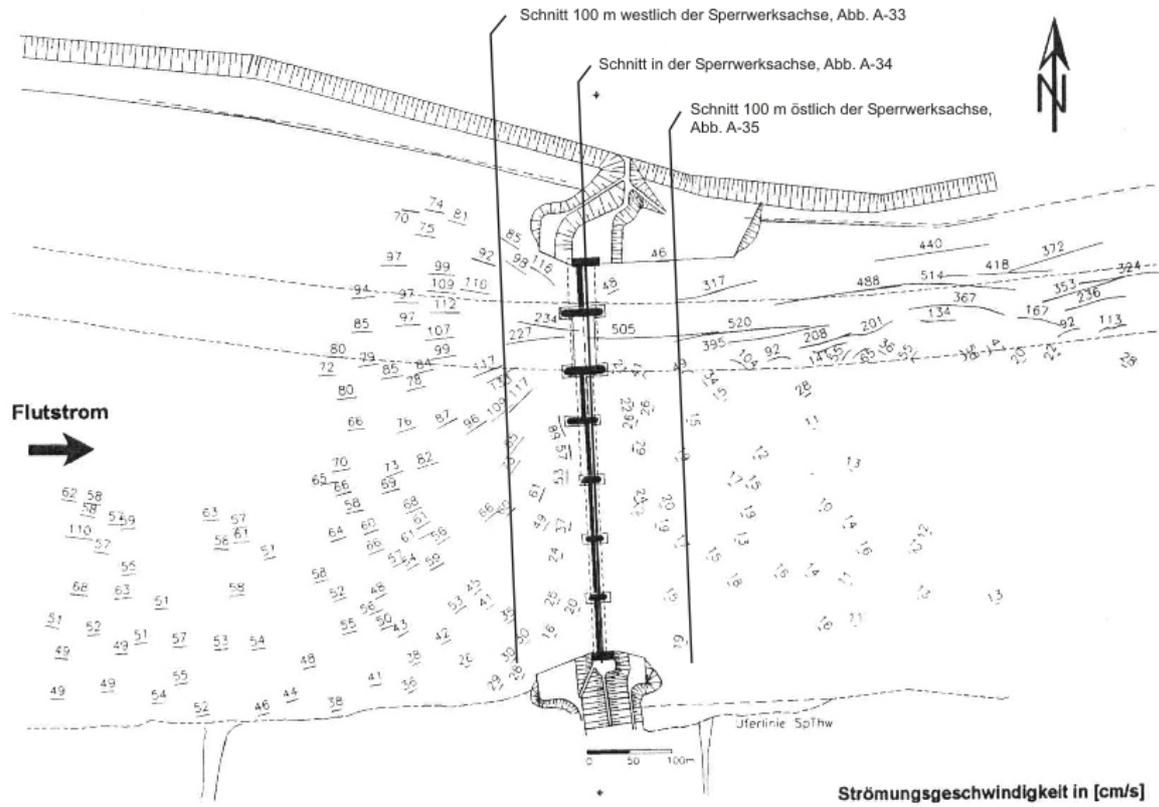


Abb. D2-32: Strömungsgeschwindigkeiten aus Schwimmerbahnen im hydraulischen Tidemodell (Sturmflutkehrung, HSÖ bleibt offen)

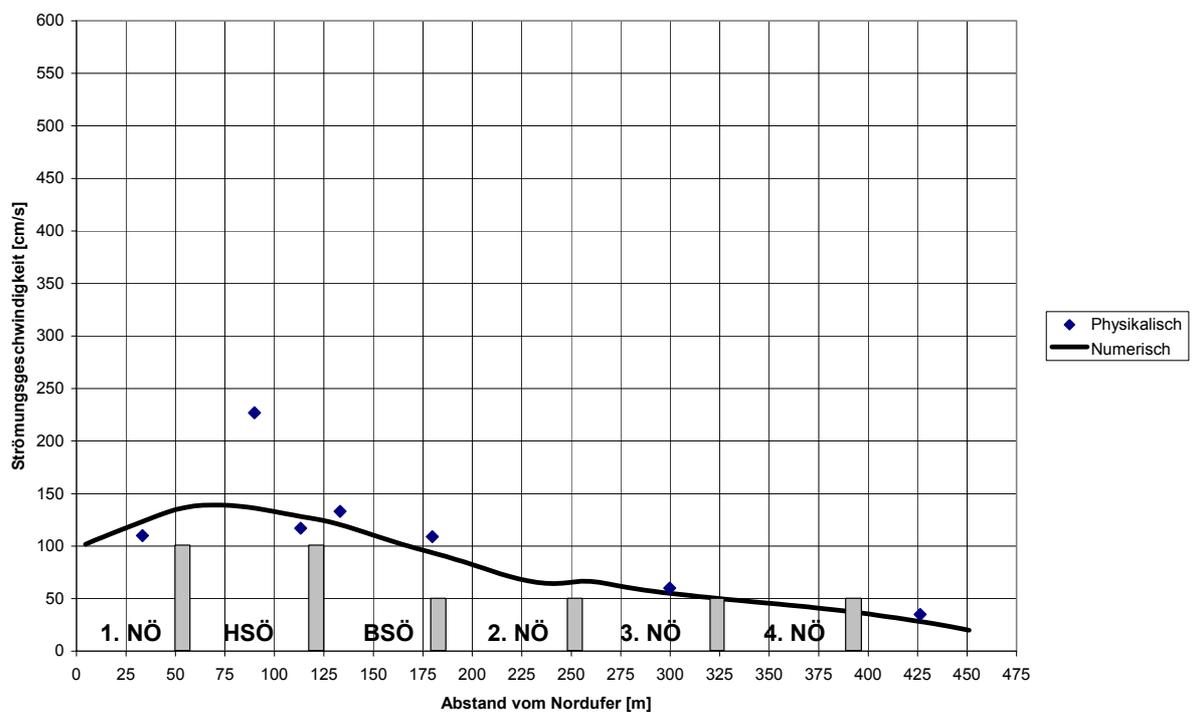


Abb. D2-33: Vergleich der berechneten und gemessenen Strömungsgeschwindigkeiten auf einer Achse 100 m westlich des Sperrwerkes (Sturmflutkehrung, HSÖ bleibt offen)

Abschlussbericht des Verbundprojektes „Stationäres 3D-Strömungsmesssystem für hochturbulente Strömungszustände unter Tide-, Strömungs- und Welleneinfluss“ - Teil D: „Numerische Simulationen und physikalische Versuche“

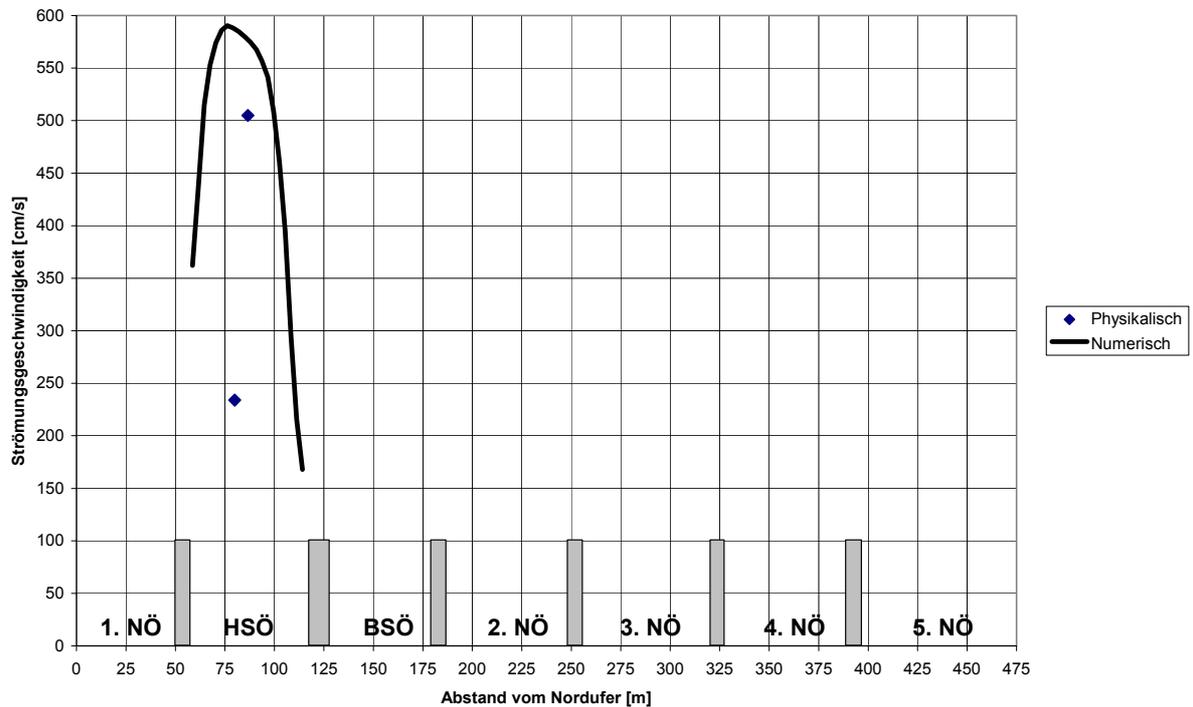


Abb. D2-34: Vergleich der berechneten und gemessenen Strömungsgeschwindigkeiten in der Sperrwerksachse (Sturmflutkehrung, HSÖ bleibt offen)

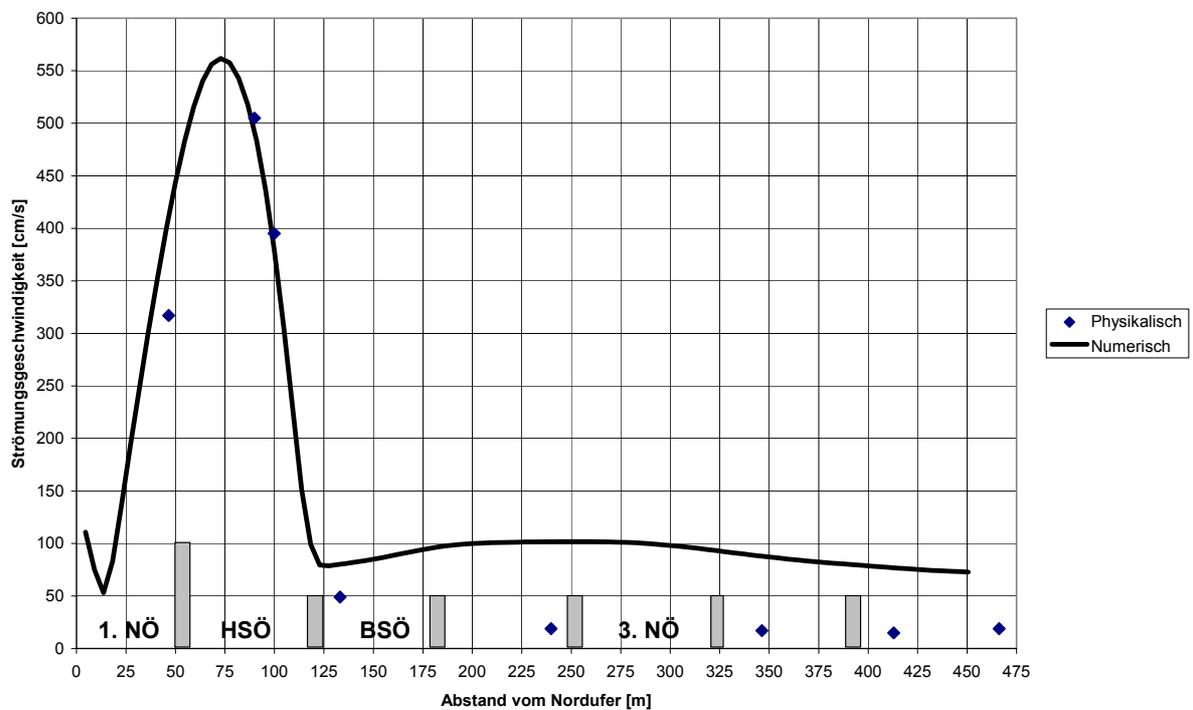


Abb. D2-35: Vergleich der berechneten und gemessenen Strömungsgeschwindigkeiten auf einer Achse 100 m östlich des Sperrwerkes (Sturmflutkehrung, HSÖ bleibt offen)

Abschlussbericht des Verbundprojektes „Stationäres 3D-Strömungsmesssystem für hochturbulente Strömungszustände unter Tide-, Strömungs- und Welleneinfluss“ - Teil D: „Numerische Simulationen und physikalische Versuche“

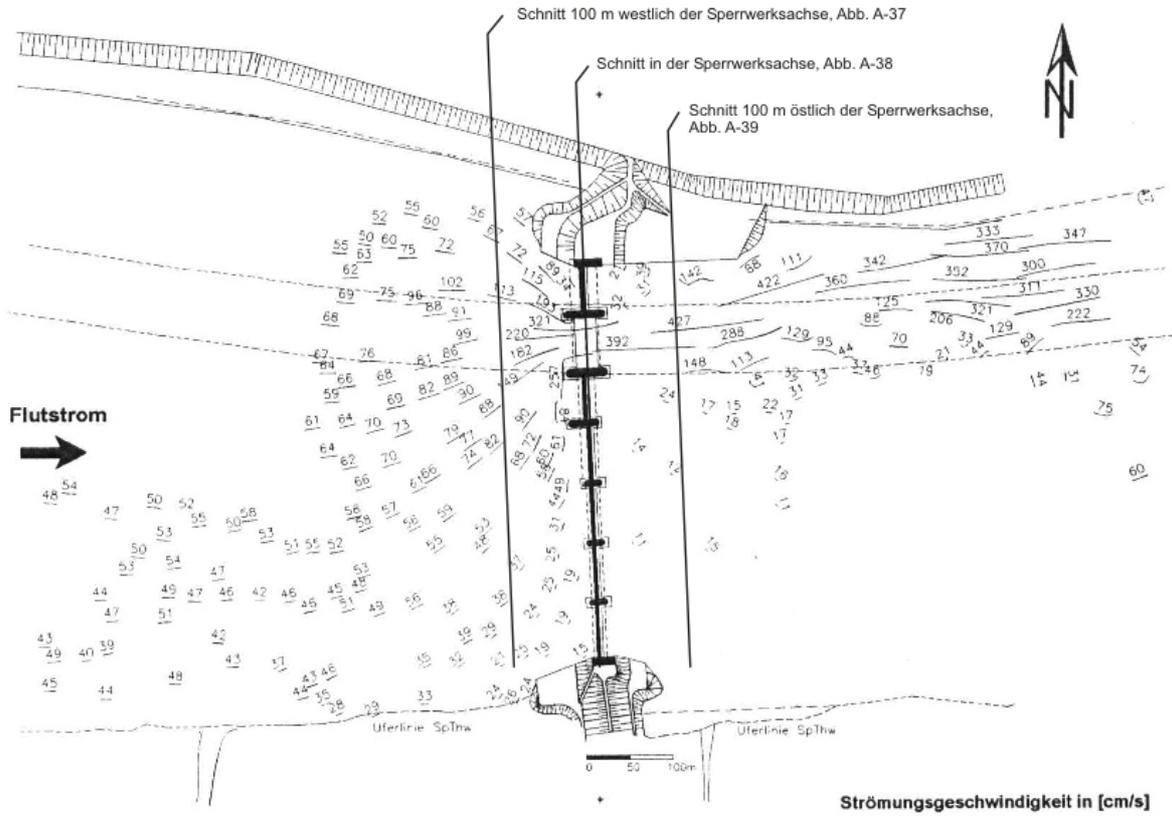


Abb. D2-36: Strömungsgeschwindigkeiten aus Schwimmerbahnen im hydraulischen Tidemodell (Sturmflutkehrung, HSÖ und BSÖ bleiben offen)

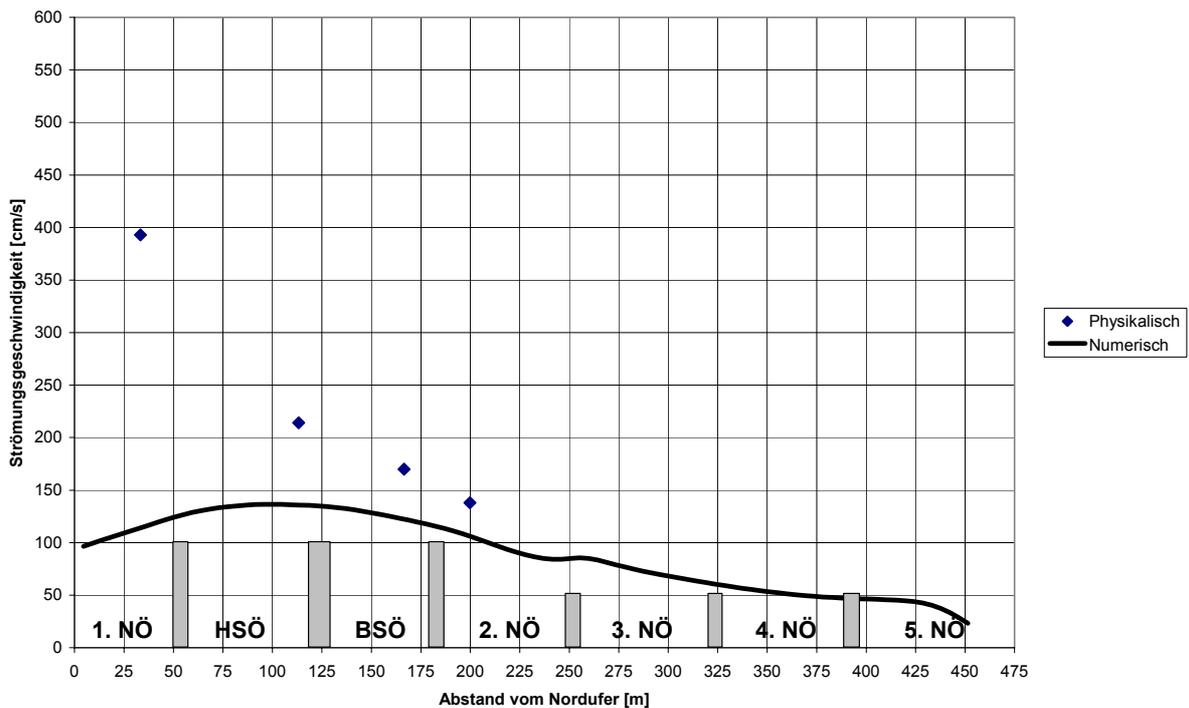


Abb. D2-37: Vergleich der berechneten und gemessenen Strömungsgeschwindigkeiten auf einer Achse 100 m westlich des Sperrwerkes (Sturmflutkehrung, HSÖ und BSÖ offen)

Abschlussbericht des Verbundprojektes „Stationäres 3D-Strömungsmesssystem für hochturbulente Strömungszustände unter Tide-, Strömungs- und Welleneinfluss“ - Teil D: „Numerische Simulationen und physikalische Versuche“

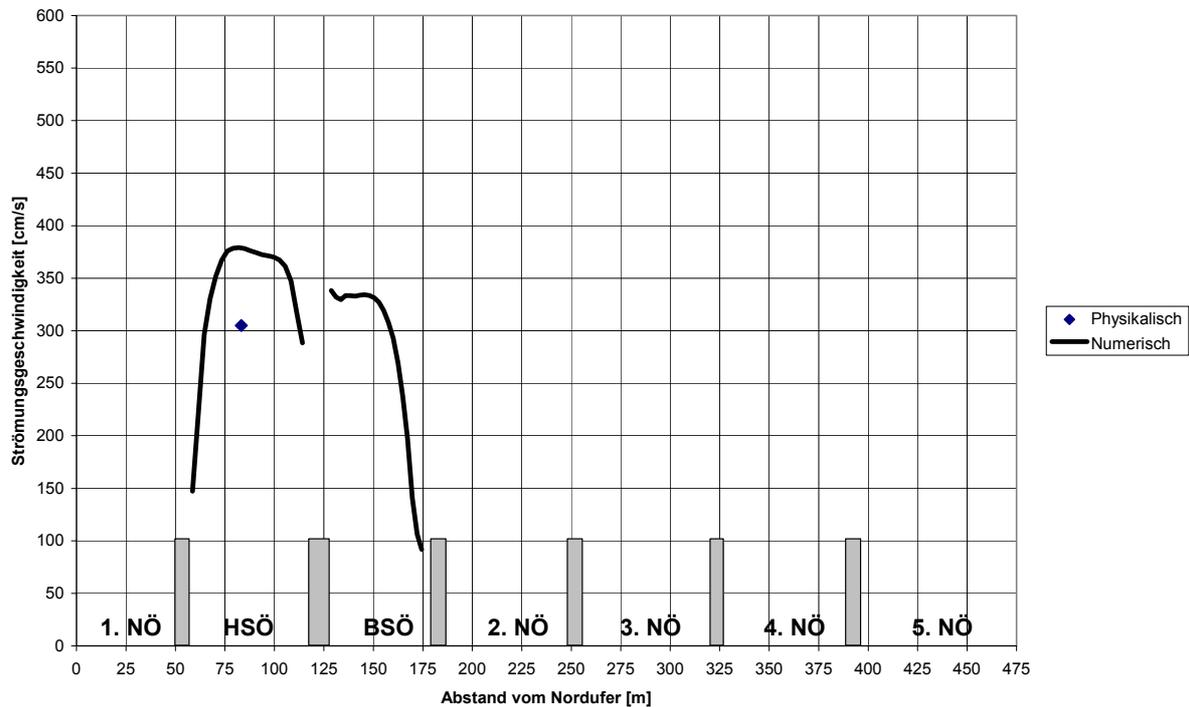


Abb. D2-38: Vergleich der berechneten und gemessenen Strömungsgeschwindigkeiten in der Sperrwerksachse (Sturmflutkehrung, HSÖ und BSÖ offen)

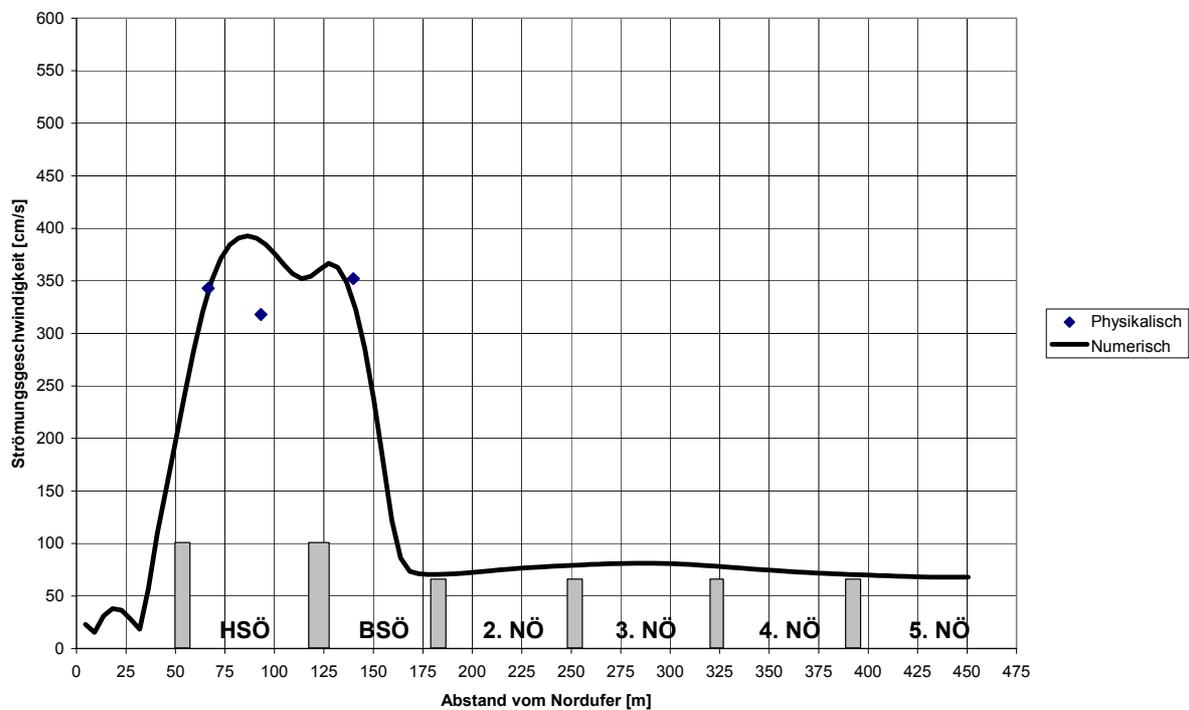


Abb. D2-39: Vergleich der berechneten und gemessenen Strömungsgeschwindigkeiten auf einer Achse 100 m östlich des Sperrwerkes (Sturmflutkehrung, HSÖ und BSÖ offen)