

ARGE

Flutungskonzept Mitteldeutschland

Ausbau und Nutzung des Stausees Rötha zur Eisenreduktion in der Pleiße

Vorhaben	Bewertung der Untersuchungen zur numerischen Modellierung und Simulation des Strömungs- und Sedimentationsverhaltens im Stausee Rötha einschließlich in-situ Messungen zur Schaffung der Datengrundlage des IWS der HTWK Leipzig vom 25.06.2012
Auftraggeber	Lausitzer und Mitteldeutsche Bergbau-Verwaltungsgesellschaft mbH Walter-Köhn-Straße 2, 04356 Leipzig
Veranlassung	LMBV-Aufgabenstellung zur LMBV-Flutungs-, Wasserbehandlungs- und Nachsorgekonzeption Mitteldeutschland
Auftragnehmer	Grundwasser-Zentrum Dresden (GWZ-DD) vertreten durch die ARGE Flutungskonzept Mitteldeutschland des DGFZ e. V. / GFI GmbH Dresden / GIP GmbH Dresden Meraner Straße 10/12, 01217 Dresden
Bearbeiter	Dr.-Ing. Ch. Koch Prof. Dr.-Ing. habil. L. Luckner
Datum	29.06.2012

Prof. Dr.-Ing. habil. L. Luckner
LMBV-Rahmengutachter

DGFZ e.V.
Dresdner Grundwasserforschungszentrum e.V.
Meraner Str. 10; 01217 Dresden
Tel.: 0351 / 40506-70; Fax: -79
VR210 Amtsgericht Dresden

GFI GmbH Dresden
GFI Grundwasserforschungsinstitut GmbH Dresden
Meraner Str. 10; 01217 Dresden
Tel.:0351 / 4050660; Fax: -69
HRB 10748 Amtsgericht Dresden

GIP GmbH Dresden
GIP Grundwasser-Ingénieurbau-Planung GmbH Dresden
Meraner Str. 10, 01217 Dresden
Tel.:0351 / 40506-30; Fax: -39
HRB 28040, Amtsgericht Dresden

ARGE Flutungskonzept Mitteldeutschland:
Steuernummer:203 150 10 110

Bankverbindung: Commerzbank, vormals Dresdner Bank Dresden;
BLZ: 850 800 00; Kto.Nr.: 04 202 077 00

1 Veranlassung

Die Pleiße ist durch exfiltrierendes Grundwasser Fe-belastet. Diese Belastung zu vermindern ist ein Bewirtschaftungsziel für die Pleiße als Fließgewässer 1. Ordnung. Aufgabe des Untersuchungsberichtes zur

„Numerischen Modellierung und Simulation des Strömungs- und Sedimentationsverhaltens im Stausee Rötha einschließlich in-situ-Messung zur Schaffung der Datengrundlage“

vom 25.06.2012, des Instituts für Wasserbau und Siedlungswasserwirtschaft der HTWK Leipzig war es, Grundlagen für das Fe-Rückhaltevermögen des Stausees Rötha zu erarbeiten. Die nachfolgende Bewertung bezieht sich auf die Erfüllung dieser Aufgabe aus Sicht des LMBV-Rahmengutachters für das LMBV-FWbNK-Mitteldeutschland gem. der geänderten LMBV-Bestellung Nr. 45044601 Pos. 200 (Witznitz).

2 Strömungsmodellierung und Fe-Sedimentation

Der numerischen Modellierung und Simulation der Strömungsverhältnisse im Stausee Rötha wurden die vereinfachten Navier-Stokes-Gleichungen

$$\begin{aligned}\partial u_i / \partial t &= -u_i \partial u_i / \partial x_j - (1/\rho) \partial p / \partial x_i + \nu \partial^2 u_i / \partial x_j^2 \\ \partial u_i / \partial x_i &= 0\end{aligned}$$

zugrunde gelegt. Der Wasserkörper des Stausees Rötha wurde 3-dimensional diskretisiert (ca. 2 Mio. Tetraeder). Die windinduzierte Zwangskonvektion fand durch die Berücksichtigung der Schubspannung an der Wasseroberfläche statt. Simuliert wurden stationäre Wind- und Strömungsverhältnisse.

Die Berücksichtigung der Fe-Sedimentation fand nur dergestalt statt, dass ab einer Strömungsgeschwindigkeit von $< 0,15$ m/s, die einer Schubspannung an der Seesohle von $\tau = 0,3$ N/m² entspricht, die Sedimentation erfolgt. Für Strömungsgeschwindigkeiten $> 0,15$ m/s wurde die Fe-Sedimentation dagegen ausgeschlossen. Eine Angabe, in welcher Höhe über der Seesohl diese kritische Strömungsgeschwindigkeit zu betrachten (d. h. zu messen bzw. zu berechnen) ist, fehlt.

3 Verifikation der Simulationsergebnisse mit Messungen

Gemessen wurde die Seewasserströmung mittels spezieller Schwimmkörper. Diese Messungen zeigten, dass die berechneten mit den gemessenen Werten bezüglich ihrer Größenordnung übereinstimmen. Durch die Variabilität des Windes und die stationäre Simulation konnte aber kein genaues Strömungsbild in dem sehr flachen Oberflächengewässer mit seiner mittleren Tiefe von etwa 1 m ermittelt werden.

4 Fazit

Die sorgfältigen Untersuchungen an dem sehr flachen Stausee Rötha mit erheblicher Windwirkung haben gezeigt, dass

(1) der Wind die dominante Größe für die Zwangskonvektion im Stausee darstellt

Die Zwangskonvektion infolge der Durchströmung (Einleitung von Pleißewasser und Ausleitung von Seewasser) hat sich für $\leq 4 \text{ m}^3/\text{s}$ nur als sekundäre Einflussgröße erwiesen.

(2) die Angabe einer kritischen Geschwindigkeit von 0,15 m/s für die Fe-Sedimentation unzureichend ist

Vielmehr wären folgende Prozesse zu erfassen und durch mathematische Modelle zu simulieren:

- + Bildung von $\text{Fe}(\text{OH})_3(\text{s})$ in molekularer Größe im Wasser (Formierung der molekular-dispersen Mischung mit $\varnothing 10^{-10}$ bis 10^{-9} m),
- + Bildung von $\text{Fe}(\text{OH})_3(\text{s})$ -Flocken, die einer gravitativen Entmischung (Sedimentation) unterliegen können,
- + Ableitung von Turbulenzfaktoren aus Strömungsgeschwindigkeiten die $\text{Fe}(\text{OH})_3(\text{s})$ -Flocken bestimmter Größe und Dichte gerade noch in Schwebelage halten können.

Die Schubspannung an der Sohle ist dagegen kein Maß für die Sedimentation (d. h. für das Absinken von $\text{Fe}(\text{OH})_3(\text{s})$ -Flocken auf die Sohle des Stausees) sondern für das Resuspendieren von $\text{Fe}(\text{OH})_3(\text{s})$ -Schlammablagerungen. Das Herstellen einer Entsprechung zwischen v_{krit} und v_{krit} kann dabei aber nur dann sinnvoll sein, wenn zu v_{krit} ihre exakte Höhenlage über der Sohle des Gewässers angegeben und ihre in-situ-Messbarkeit erörtert wird.

Aus dem Vorstehenden leitet sich ein noch erheblicher Untersuchungs- und Klärungsbedarf ab.

(3) der Stausee Rötha sich nur bedingt als Sedimentationsbecken für $\text{Fe}(\text{OH})_3(\text{s})$ eignet

Der Stausee ist mit seiner mittleren Wassertiefe von 1 m sehr flach und bietet dem Wind eine Streichlänge von bis zu etwa 1 km (Nord-Süd-Ausdehnung) und damit eine gute Windangriffsfläche. Die Subspannungen an der Wasseroberfläche vermögen deshalb relativ hohe Dispergierungsenergien in den Wasserkörper einzutragen, die eine Resuspendierung der $\text{Fe}(\text{OH})_3(\text{s})$ -Schlämme stark befördern.

Schon bei den relativ kleinen Sedimentationsbecken der Grubenwasserreinigungsanlagen, mit ihren etwa 10-fach kürzeren Streichlängen für den Windangriff, wurden deshalb Beckentiefen > 2 m vorgeschrieben und oftmals Windschutzanlagen (z. B. die Windschutzwand der GWRA-Rainitz in der Lausitz) angeordnet.

Die erfolgten Bilanzrechnungen unterstützen vorstehende Aussagen. Allein im Zulaufgraben vom Trachenauer Wehr bis zum Stausee, für den der Wind keine große Rolle spielt, wurden gem. dem Protokoll der Projektberatung vom 14.06.2012 32-63 % des Eisens zurückgehalten. Diese Messwerte zeigen das relativ geringe Rückhaltevermögen des Stausees auf.

(4) die 2011 vom IWS der HTKW-Leipzig durchgeführten Ablaufmessungen aus dem Stausee Rötha Fe-Konzentrationen von 0,9 bis 3,6 mg/L ergaben, was auf eine Resuspendierung des Eisen hinweist

Die Messungen der Fe-Konzentration im Ablauf des Stausees weisen deutlich auf eine Resuspendierung der bereits abgelagerten Eisenhydroxidschlämme hin. Bei einer Nutzung des Stausees für den Fe-Rückhalt wäre deshalb eine regelmäßige Schlammberäumung unerlässlich. Im Fall der Nutzung allein des Vorbeckens für den Fe-Rückhalt müsste auch das Hauptbecken - zumindest in größeren zeitlichen Abständen - vom Schlamm beräumt werden. Dies bedeutet nicht unerhebliche Kosten und erfordert deshalb eine Kosten-Nutzen-Analyse unter Beachtung, dass ohnehin nur ein Teilstrom des Wassers aus der Pleiße durch den Stausee geleitet werden kann. Mindestabfluss und Betriebswasser der Fischpassage müssen in der Pleiße verbleiben. Es gilt deshalb, bei der Kosten-Nutzen-Analyse auch die seitens der LD-Sachsen benannte Alternative einer wiederkehrenden Entschlammung des Oberwassers des Trachenauer Wehrs und des Agra-Wehrs als Sanierungsmaßnahme zu betrachten, da ohnehin die Nutzung des Stausees als Absetzbecken für die Eisenhydroxidschlämme keine Lösung der Gesamtproblematik der Fe-Fällung in der unteren Pleiße darstellen kann.

Zusammenfassend lässt sich konstatieren, dass

Mit dem Untersuchungsbericht zur numerischen Modellierung und Simulation des Strömungs- und Sedimentationsverhaltens im Stausee Rötha des IWS der HTWK Leipzig im Auftrag der LMBV wichtige Grundelemente erarbeitet worden sind, die eine Entscheidungsfindung zur Nutzung des Stausees Rötha zum Fe-Rückhalt nach

Variante 1

„Vorsperre im Stausee Rötha mit Beräumung der Eisenablagerungen in kurzen Zeitabständen“ (inkl. Beräumung des Zulaufgrabens)

Variante 2

„Hauptbecken des Stausees Rötha mit Beräumung der Eisenablagerungen in langen Zeitabständen“ (inkl. Beräumung des Zulaufgrabens)

zu unterstützen vermögen.

Im Fokus muss dabei aber bleiben, dass die Wirkungsprozesse des Staubeckens auch weiterhin mit vielen Unsicherheiten behaftet bleiben. Grundsätzlich ist der sehr flache Stausee mit seiner relativ großen Streichlänge für den Wind als Sedimentationsbecken für Eisenhydroxidablagerungen relativ ungeeignet.

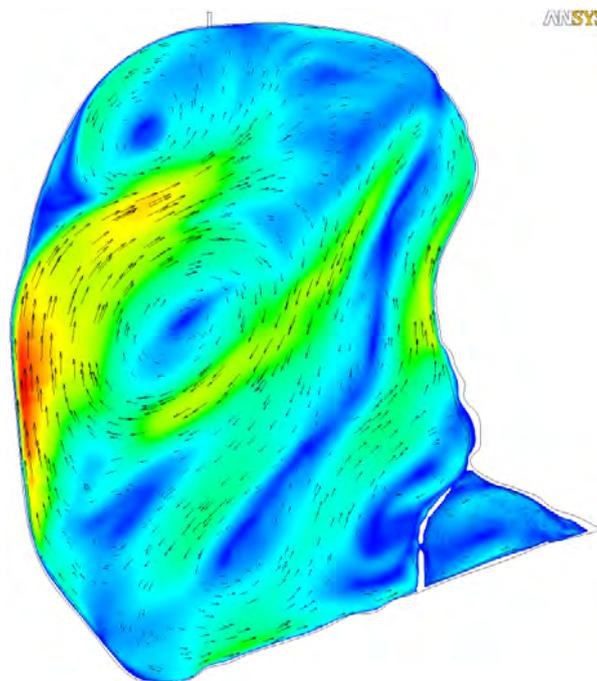
240004

Untersuchungsbericht

**Numerische Modellierung und Simulation des Strömungs-
und Sedimentationsverhaltens im Stausee Rötha einschl.
In-situ-Messung zur Schaffung der Datengrundlage**

- Numerische Simulation -

Stand:25/06/2012



Auftraggeber:



**Lausitzer und Mitteldeutsche
Bergbau-Verwaltungsgesellschaft
mbH
Betrieb Mitteldeutschland**

Walther-Köhn-Str. 2
04356 Leipzig

Auftragnehmer:

Leipzig, den 25.06.2012



**IWS - Institut für Wasserbau und
Siedlungswasserwirtschaft
an der HTWK Leipzig
Prof. Dr.-Ing. Hubertus Milke**

Karl-Liebnecht-Straße 132
04277 Leipzig

Inhaltsverzeichnis

Inhaltsverzeichnis	2
Abbildungsverzeichnis	3
Tabellenverzeichnis	4
Anhänge	4
Bearbeitungsgrundlagen	5
Abkürzungsverzeichnis	7
1 Veranlassung und Gegenstand	8
1.1 Veranlassung	8
1.2 Gegenstand des vorliegenden Berichts	10
2 Bestehende Verhältnisse am Stausee Rötha	11
3 Verwendete Software.....	13
4 Erstellung des Simulationsmodells.....	14
4.1 Vorüberlegungen	14
4.2 Modell zur Simulation des Windes	15
4.2.1 Berechnungsnetz	16
4.2.2 Randbedingungen.....	17
4.2.3 Modellkalibrierung	19
4.3 Modell zur Simulation der Strömung im See	21
4.3.1 Berechnungsnetz	21
4.3.2 Randbedingungen.....	22
4.3.3 Modellgenauigkeit	24
4.3.4 Sensitivitätsanalyse und Unsicherheiten.....	35
5 Bewertung der Sedimentationsfähigkeit.....	38

5.1	Ist-Zustand.....	38
5.2	Plan-Zustand.....	44
6	Zusammenfassung	50

Abbildungsverzeichnis

Abb. 1-1:	Übersichtslageplan Stausee Rötha	11
Abb. 3-1:	Modellgeometrie zur Simulation des Windes.....	16
Abb. 3-2:	Schubspannungen für die Kalibrierung des Windmodells	19
Abb. 3-3:	Oberflächenrauheiten für die Kalibrierung des Windmodells.....	19
Abb. 3-4:	In Windsimulation bestimmte Schubspannung auf die Wasseroberfläche bei Wind aus 205° mit $v_{10} = 4,3$ m/s.....	20
Abb. 3-5:	Positionen der Bojen vor dem 22.10.2011.....	25
Abb. 3-6:	Positionen der Bojen nach dem 22.10.2011	25
Abb. 3-7:	Windverhältnisse am 27.10.2011	26
Abb. 3-8:	Windverhältnisse am 04.11.2011	26
Abb. 3-9:	Windverhältnisse am 01.12.2011	27
Abb. 3-10:	Windverhältnisse am 06.12.2011	27
Abb. 3-11:	Simuliertes Strömungsbild im Stausee Rötha bei Wind aus 205° mit $v_2 = 2,8$ m/s; Strömungsgeschwindigkeit und Richtung 25 cm unter dem Wasserspiegel.....	28
Abb. 3-12:	Vergleich Messung (grau; 27.10.2011) und Simulation (blau; 135°; $v_2 = 1,1$ m/s \triangleq $v_{10} = 1,7$ m/s)	30
Abb. 3-13:	Vergleich Messung (grau; 04.11.2011) und Simulation (blau; 250°; $v_2 = 0,5$ m/s \triangleq $v_{10} = 0,8$ m/s)	31
Abb. 3-14:	Vergleich Messung (grau; 01.12.2011) und Simulation (blau, 205°; $v_2 = 2,8$ m/s \triangleq $v_{10} = 4,3$ m/s)	32
Abb. 3-15:	Vergleich Messung (grau; 06.12.2011) und Simulation (blau, 270°; $v_2 = 2,6$ m/s \triangleq $v_{10} = 4,0$ m/s)	33
Abb. 3-16:	Windverhältnisse am 05.12.2011	34

Abb. 3-17:	Vergleich Messung (grau; 05.12.2011) und Simulation (blau, 180°; $v_2 = 4,5 \text{ m/s} \triangleq v_{10} = 6,9 \text{ m/s}$)	34
Abb. 4-1:	Häufigkeitsverteilung der Windereignisse.....	39
Abb. 4-2:	Simuliertes Strömungsbild im Stausee Rötha bei Wind aus 225° mit 4 Bft; Strömungsgeschwindigkeit und Richtung 25 cm unter dem Wasserspiegel; Bereiche mit Strömungsgeschwindigkeiten über $v_{\text{crit}}/f_S = 0,1 \text{ m/s}$ dunkel hinterlegt (und umrandet)	42
Abb. 4-3:	Ist-Zustand bei Wind aus 225° mit 4 Bft (Durchfluss 150 l/s).....	45
Abb. 4-4:	Plan-Zustand bei Wind aus 225° mit 4 Bft (Durchfluss 150 l/s)	45
Abb. 4-5:	Simuliertes Strömungsbild des Plan-Zustandes (Durchfluss 4.000 l/s) bei Wind aus 225° mit 4 Bft; Strömungsgeschwindigkeit und Richtung 25 cm unter dem Wasserspiegel; Bereiche mit Strömungsgeschwindigkeiten über $v_{\text{crit}}/f_S = 0,1 \text{ m/s}$ dunkel hinterlegt (und umrandet)	46
Abb. 4-6:	Auftreten der Windstärke 4 Bft	48
Abb. 4-7:	Auftreten der Windstärke 5 Bft	48

Tabellenverzeichnis

Tab. 3-1:	Dynamische Rauigkeitslängen, Auszug aus [I].....	18
Tab. 3-2:	Äquivalente Sandrauheiten, Auszug aus [C]	24
Tab. 3-3:	Sensitivitätsanalyse der Randbedingungen.....	36
Tab. 4-1:	Beaufortskala nach Windgeschwindigkeiten	40
Tab. 4-2:	Simulationsergebnisse statistischer Windereignisse	41
Tab. 4-3:	Simulationsergebnisse mit 4 Bft aus allen Richtungen	41

Anhänge

Anhang 1:	Ist-Zustand mit statistischen Windereignissen
Anhang 2:	Plan-Zustand mit statistischen Windereignissen

Bearbeitungsgrundlagen

- [A] **AUFGABENSTELLUNG:** Nutzung des Stausees Rötha als Sedimentationsbecken für Eisenschlämme aus dem südlichen Einzugsgebiet der Pleiße - Numerische Modellierung und Simulation des Strömungs- und Sedimentationsverhaltens im Stausee einschließlich In-Situ-Messungen zur Schaffung der Datengrundlage. Stand 27.04.2010.
- [B] **BENGTSSON, LARS:** Wind Induced Circulation in Lakes. Nordic Hydrology, Vol 9: pp. 75-94, 1978.
- [C] **DEUTSCHER VERBAND FÜR WASSERWIRTSCHAFT UND KULTURBAU E.V.:** Merkblatt 220/1991 - Hydraulische Berechnung von Fließgewässern. 1991.
- [D] **DEUTSCHER WETTERDIENST:** Termin- und Tagesdaten der Wetterstation Leipzig/Halle (Text-Dokument aus Internet, Stand 06.01.2012).
http://www.dwd.de/bvbw/generator/DWDWWW/Content/Oeffentlichkeit/KU/KU2/KU21/klimadaten/german/download/standardformate/kl__10469__00__akt__txt,templateId=raw,property=publicationFile.txt/kl_10469_00_akt_txt.txt.
- [E] **ECOSYSTEM SAXONIA GMBH, INGENIEURBÜRO FÜR GRUNDWASSER GMBH:** Wasserbeschaffenheitsmodellierung der Pleiße unter dem Einfluss der Eisenexfiltration aus Bergbaukippen. 2011.
- [F] **INGENIEURBÜRO KLEMM UND HENSEN GMBH:** 3D-Zeichnungsdaten BStsRoetha. 2006.
- [G] **LAUSITZER UND MITTELDEUTSCHE BERGBAU-VERWALTUNGSGESELLSCHAFT MBH - BETRIEB MITTELDEUTSCHLAND:** Laser Scanning 1045-DSM-Zwenkau-TopoSys. 2001.
- [H] **PROGRAMM SERVICE WASSERWIRTSCHAFT:** Rauheitsklassen für Gewässer (PDF-Dokument aus Internet, Stand 18.01.2012). <http://www.psw-knauf.de/download/Gewaesser-Rauheiten.pdf>.

- [I] **RENEWABLE ENERGY CONCEPTS:** Rauhigkeitsklassen (Internet-Seite, Stand 16.01.2012). <http://www.renewable-energy-concepts.com/german/windenergie/wind-basiswissen/rauhigkeitsklassen.html>.
- [J] **RETTEMEIER, KATJA:** Strömungsphänomene in Standgewässern. Dissertation, RWTH Aachen, 2004.
- [K] **SPEZIAL- UND BERGBAU-SERVICEGESELLSCHAFT LAUCHHAMMER MBH:** Endbericht Sedimentation - Monitoring Fließgewässer Pleiße Kippengebiet Witznitz. 2009.
- [L] **WASSERTECHNIK LEIPZIG GMBH:** Machbarkeitsstudie - Nutzung des Stausees Rötha als Sedimentationsbecken für Eisenschlämme aus dem südlichen Einzugsgebiet der Pleiße. 2009.

Abkürzungsverzeichnis

Zeichen	Beschreibung
ADCP	Acoustic Doppler Current Profiler
Bft	Beaufort
C_D	Widerstandsbeiwert
CFD	Computational Fluid Dynamics
DVWK	Deutscher Verband für Wasserwirtschaft und Kulturbau e.V.
DWD	Deutscher Wetterdienst
f_s	Sicherheitsfaktor
IWS	Institut für Wasserbau und Siedlungswasserwirtschaft
k_s	Äquivalente Sandrauheit
LMBV	Lausitzer und Mitteldeutsche Bergbau- Verwaltungsgesellschaft mbH
SGL	Spezial- und Bergbau-Servicegesellschaft Lauchhammer GmbH
v	Strömungsgeschwindigkeit
v_{crit}	Kritische Fließgeschwindigkeit für Sedimentation
v_r	Referenzgeschwindigkeit für logarithmisches Windprofil
WTL	Wassertechnik Leipzig GmbH
x, y, z	Raumkoordinaten (mit z als vertikaler Koordinate)
z_0	Dynamische Rauheitslänge
z_r	Referenzhöhe für logarithmisches Windprofil
ρ	Stoffdichte
T	Schubspannung

1 Veranlassung und Gegenstand

1.1 Veranlassung

Infolge der Einstellung der bergbaulich bedingten Grundwasserabsenkung kommt es im Südraum Leipzig wieder zu einem großräumigen Anstieg des Grundwassers und der Ausbildung langfristiger natürlicher Grundwasserströmungsverhältnisse. Eine Folge des Grundwasseranstieges ist unter anderem, dass es nunmehr zu einer Exfiltration von saurem, eisen- und sulfathaltigem Grundwasser aus der Kippe des ehemaligen Tagebaus Witznitz in die Pleiße kommt, die zu einer auffallenden Braunfärbung des Pleißewassers führt. Durch mehrere Messungen in der Pleiße konnte nachgewiesen werden, dass der Haupteiseneintrag auf der Strecke zwischen der Wyhramündung und dem Trachenauer Wehr erfolgt, in der die Pleiße in den 60er-Jahren direkt über die Kippe verlegt wurde. Die in die Pleiße eingetragenen Stofffrachten führen neben der Verfärbung des Wasserkörpers, welche hinsichtlich einer gewässertouristischen Nutzung unerwünscht ist, auch zu einer möglichen Beeinträchtigung der aquatischen Lebensgemeinschaften.

Zur Quantifizierung und Prognose der Gefährdung für die Oberflächengewässer des Südraums Leipzig sowie zur Planung möglicher Maßnahmen wurde durch die LMBV mbH in den vergangenen Jahren das Pilotprojekt „Untersuchung der Auswirkungen des Grundwasserwiederanstiegs und der daraus folgenden Exfiltration der eisenbelasteten Grundwässer aus den Kippen des ehemaligen Tagebaues Witznitz in die Fließgewässer Pleiße und Wyhra“ aufgelegt. Das Maßnahmenprogramm zur Umsetzung des Pilotprojektes wird durch den gleichnamigen Arbeitskreis unter Einbeziehung von Vertretern der Landesdirektion Leipzig, der Landestalsperrenverwaltung, des Steuerungs- und Budgetausschusses sowie entsprechender Fachleute begleitet.

Ein Ansatz zur Problemlösung war die im Jahr 2009 bearbeitete Machbarkeitsstudie zur „Nutzung des Stausees Rötha als Sedimentationsbecken für Eisenschlämme aus dem südlichen Einzugsgebiet der Pleiße, Varianten 1 und 2“, WTL Wassertechnik Leipzig GmbH, Abschlussbericht v. 03.11.2009 [L].

In der 12. Sitzung des vorhabenbegleitenden Arbeitskreises am 09.10.2009 wurde der Abschlussbericht der Machbarkeitsstudie vom Planer präsentiert. Im Ergebnis der Bearbeitung wurde festgestellt, dass der Stausee Rötha als Sedimentationsbecken für Eisenschlämme aus dem südlichen Einzugsgebiet der Pleiße auch bei parallel betriebenen gewässertouristischen Nutzungen grundsätzlich geeignet ist. Die Eisenrückhaltung im Stausee Rötha wäre damit eine kurzfristig umsetzbare Gefahrenabwehrmaßnahme zur Minimierung der Gefährdung für die Pleiße im Rahmen des Gesamtmaßnahmenprogramms des Pilotprojektes.

Seitens des Arbeitskreises wurde daraufhin der LMBV mbH empfohlen, die Beantragung und Veranlassung einer Vorplanung vorzubereiten. Die Machbarkeitsstudie wurde des Weiteren vom Planer - wie ebenfalls in der 12. AK-Sitzung festgelegt – am 12.10.2009 Vertretern des Ref. 41 der Landesdirektion Leipzig vorgestellt (das Ergebnisprotokoll dazu liegt vor).

Im Zuge der Machbarkeitsstudie erfolgte durch den Planer bereits eine umfangreiche Daten- und Kenntnisrecherche zu dem Objekt Stausee Rötha; dazu wurde eine Vielzahl von Beteiligten kontaktiert und die Verbindung zu den „verzahnenden“ Projekten, wie Gewässertourismus und Betriebsgewässer LTV, hergestellt. Ferner wurden bereits im Rahmen dieser Studie verschiedene Varianten vorgeschlagen und kalkuliert, jedoch wurde der LMBV seitens des Arbeitskreises empfohlen, deren Aussagen durch entsprechende weiterführende Untersuchungen im Rahmen der Vorplanung zu untersetzen und so den vorgeschlagenen Maßnahmen eine größere Planungssicherheit zu geben.

Im Rahmen der weiteren Vorplanung wurde daraufhin eine Modellierung des Strömungs- und Sedimentationsverhaltens im Stausee Rötha vorgesehen, um so die Eignung des Stausees als Sedimentationsbecken auf Grundlage belastbarer Daten/ Szenarien zu belegen. Mit Hilfe der hydraulischen Modellierung sollten – unter Fortführung des Kenntnisstandes der Machbarkeitsstudie – demnach in den weiteren Planungsphasen folgende Zielstellungen verfolgt werden:

- die Sedimentationsfähigkeit des eingeleiteten Pleißewassers in den Stausee Rötha zu untersetzen,
- die genaue Lage des zukünftigen Ablaufes aus dem Stausee Rötha in die Pleiße zu definieren, da die hydraulische Leistungsfähigkeit der Kleinen Pleiße für die geplante Nutzung des Stausees Rötha nicht ausreicht,
- die örtlichen Sedimentationsbereiche in Abhängigkeit von den untersuchten Varianten zu ermitteln sowie
- die technische Machbarkeit einschließlich ggf. erforderlicher baulicher Anpassungen zu präzisieren.

1.2 Gegenstand des vorliegenden Berichts

Die vorliegende Untersuchung dient der weiteren Spezifizierung des Sedimentationsverhaltens von Eisen im Stausee Rötha. Mithilfe der dreidimensionalen numerischen Strömungssimulation wird das Strömungsverhalten im Stausee simuliert. Auf dem See im Rahmen der Hauptuntersuchung durchgeführte ADCP-Messungen der Strömung bilden die Grundlage für die Modellkalibrierung. Mit der aus der Simulation gewonnenen Geschwindigkeitsverteilung lässt sich auf das Sedimentationsverhalten schließen. Für den Zusammenhang von Strömungsgeschwindigkeit und Sedimentation wird das Pleißemonitoring der Spezial- und Bergbau-Servicegesellschaft Lauchhammer mbH (SGL) [K] herangezogen.

Als treibende Kraft der Strömung in dem flachen See kann der Wind angesehen werden. Verschiedene Wetterlagen im Hinblick auf Windrichtung und -stärke wurden untersucht, um die Sedimentationsfähigkeit über die sich einstellenden Strömungsgeschwindigkeiten zu bewerten. Bei einer Nutzung des Stausees Rötha als Sedimentationsbecken ist zudem ein deutlich höherer Anteil an Pleißewasser durch den See zu leiten, als dies gegenwärtig der Fall ist. Als Plan-Zustand wird darum ein Szenario mit höherem Durchfluss simuliert. Damit verbunden wäre auch der Bau eines neuen Auslaufbauwerkes, da der vorhandene Grundablass im Norden des Sees in die Kleine Pleiße mündet und diese nicht dafür geeignet ist. Ein alternatives Auslaufbauwerk am Westufer des Sees, das das Wasser direkt zurück in die Pleiße ableiten würde, findet ebenfalls Eingang in die Simulation.

2 Bestehende Verhältnisse am Stausee Rötha

Der Stausee Rötha befindet sich inmitten eines Landschaftsschutzgebietes am Stadtrand der ca. 15 km südlich von Leipzig gelegenen Stadt Rötha. Er wird im Nebenfluss der Pleiße betrieben und ist Teil eines Systems von Stauanlagen im Unterlauf des Gewässers.

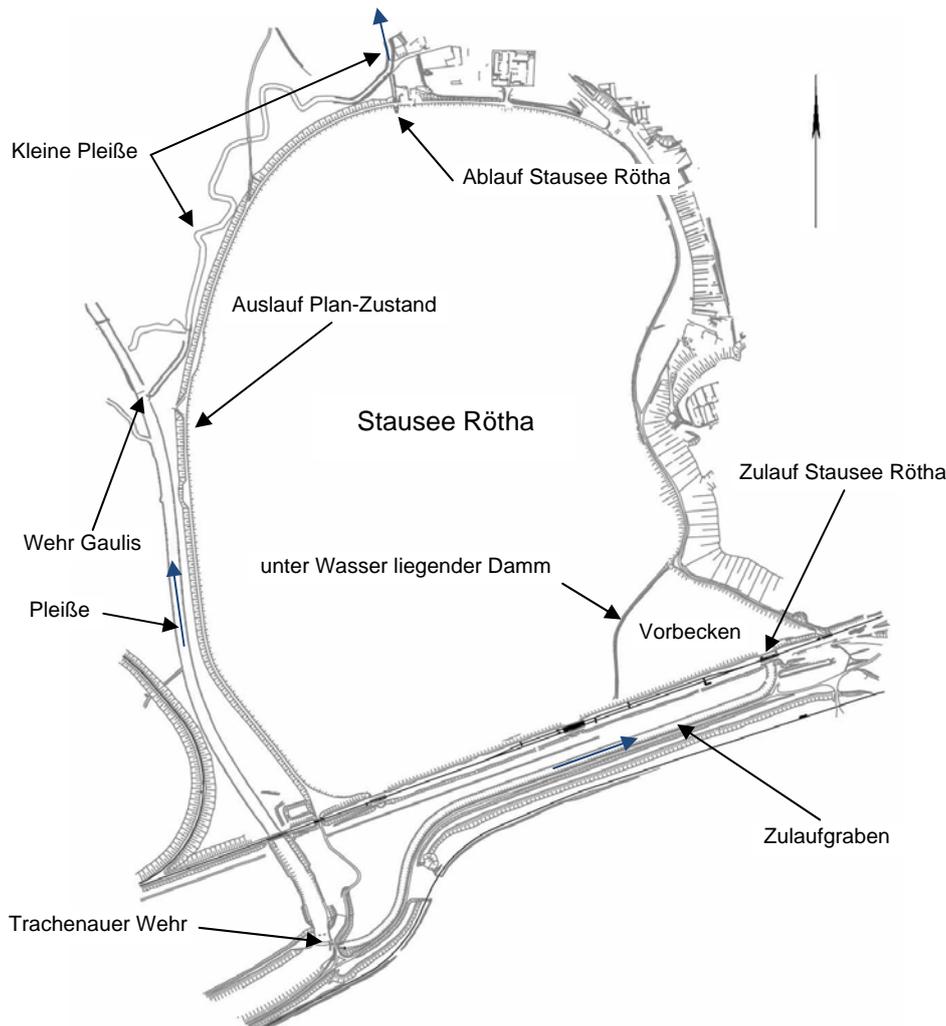


Abb. 2-1: Übersichtslageplan Stausee Rötha

Der Stausee wurde bereits Anfang der 40er-Jahre durch den Weiße-Elster-Verband in einer von Obstplantagen und Wiesen geprägten Talaue erbaut. Erst mit Fortschreitung des Tagebaus Witznitz Mitte der 60er Jahre wurde der Stausee durch Trockenlegung des südlichen Teils auf seine heutige Größe von ca. 0,70 km² verkleinert. Seither wird der Stausee im Süden durch den ehemaligen Werksbahndamm einer

Kohlebahn begrenzt und die Speisung des Sees aus der Pleiße erfolgt durch das oberstrom gelegene Wehr Trachenau und einen 900 m langen Zulaufgraben. Der Zulaufgraben verläuft entlang des ehemaligen Bahndamms und mündet in der östlichen von drei ca. 10 m breiten Öffnungen in das Vorbecken des Stausees Rötha. Ein Steinschüttdamm, dessen Krone dicht unter der Wasseroberfläche liegt, trennt das Vorbecken vom Rest des Sees ab. Der Grundablass des Stausees befindet sich im Nordteil eines 1.670 m langen Absperrdamms und mündet in die nördlich des Stausees Rötha verlaufende Kleine Pleiße. Der Damm selbst besteht aus bindigen Erdstoffen und verläuft entlang des West- und Nordufers.

Bewirtschaftungsdaten nach Angaben der Landestalsperren Verwaltung des Freistaates Sachsen (LTV):

- Maximale Zulaufleistung: 4,00 m³/s
- Mindestabgabe: 0,15 m³/s
- Maximalabgabe: 2,00 m³/s, dieser Wert ist mit Blick auf die hydraulische Leistungsfähigkeit der Kleine Pleiße als kritisch anzusehen (siehe Abschn. 4.6 der Hauptuntersuchung)
- Wasseroberfläche: 708.367 m²
- Vollstau: 128,00 mNHN - entspricht 1,330 Mio. m³ Inhalt
- Stauziel: 127,85 mNHN - entspricht 1,223 Mio. m³ Inhalt
- Absenkziel: 127,50 mNHN - entspricht 0,976 Mio. m³ Inhalt
- Tiefstes Absenkziel: 127,00 mNHN - entspricht 0,623 Mio. m³ Inhalt

Neben der Funktion als Naherholungsgebiet wird der Stausee Rötha unter anderem von dem ansässigen Kanuverein und von Anglern genutzt. Seitens der LTV wird der Stausee als Betriebsgewässer u.a. zur Steuerung der Durchflussmenge der Kleinen Pleiße genutzt.

3 Verwendete Software

Das Verhalten von Fluiden wird durch die Kontinuitätsgleichung und die Navier-Stokes-Gleichung vollständig beschrieben. Eine analytische Lösung dieser Erhaltungsgleichungen ist jedoch nur in wenigen, sehr einfachen Fällen möglich. Um das Strömungsverhalten von Fluiden in und um beliebige Geometrien bestimmen zu können, ist daher die Methode der dreidimensionalen numerischen Strömungssimulation (CFD, engl.: Computational Fluid Dynamics) nötig. Dadurch können Strömungsvorgänge für ein breites Anwendungsspektrum simuliert und detaillierte Einblicke in die Strömung gewährt werden.

Bei der CFD wird das Strömungsgebiet in eine Vielzahl von diskreten Teilgebieten einfacher Geometrie (Elemente) zerlegt. Unter Berücksichtigung geeigneter Rand- und Übergangsbedingungen werden die Erhaltungsgleichungen für die einzelnen Elemente gelöst. Die relevanten Zustandsgrößen des Fluides, wie Strömungsgeschwindigkeit, -richtung und Druck, liegen damit in diskreter Form für die einzelnen Elemente vor. Eine Verfeinerung des Rechennetzes würde damit eine höhere Auflösung der Strömungsvorgänge ermöglichen, ist aber auch mit einer maßgeblichen Steigerung der erforderlichen Rechnerressourcen verbunden. Zudem stehen verschiedene Berechnungsmodelle mit unterschiedlichen Lösungseigenschaften und Leistungsanforderungen zur Verfügung. Der Erstellung und Validierung des Modells kommt also eine herausragende Bedeutung zu.

In der vorliegenden Untersuchung wird ANSYS CFX 13.0 für die Konfiguration des Berechnungsmodells und zur Lösung der Erhaltungsgleichungen verwendet. Die Auswertung, Verarbeitung und Visualisierung der Ergebnisse erfolgt mithilfe von ANSYS CFD Post 13.0. Zur Geometrie- und Rechennetzerstellung kommt ANSYS ICEM CFD 13.0 zum Einsatz. Alle Programme gehören zur ANSYS Inc.

4 Erstellung des Simulationsmodells

Erste Arbeiten zur Modellerstellung und Simulation wurden basierend auf der Seemorphologie aus den Daten der Ingenieurdienstleistungen Klemm und Hensen GmbH [F] von 2006 durchgeführt. Im Zuge der aktuellen Untersuchung des IWS wurde der Stausee Rötha erneut vermessen. Der See wurde mit einer ADCP-Messsonde in einem 50 m Linienraster abgefahren und dabei die Gewässersohle per Ultraschall aufgezeichnet. Die Krone des überströmten Dammes vom Vorbecken wurde in 5 m-Abständen mit einer Messlatte abgetastet. Wegen der sehr geringen Tiefe der Dammkrone war ein Überfahren mit der ADCP-Sonde hier nicht möglich.

Infolge der Vermessung durch das IWS wurde ein neues numerisches Modell auf der Grundlage der aktuellen Seemorphologie erstellt. Alle in dem vorliegenden Bericht präsentierten Verfahren und Ergebnisse beziehen sich auf das neue Modell.

4.1 Vorüberlegungen

Das Sedimentationsverhalten von partikulären Stoffen hängt maßgeblich von der Turbulenz des strömenden Gewässers und der Partikeldichte und -größe ab. Partikeldichte und -größe sind dabei ausschlaggebend für die Sinkgeschwindigkeit der Partikel in einer stehenden Wassersäule. Turbulenzen sind hingegen ungerichtete Strömungen, die der Hauptströmung überlagert sind und deren aufwärtsgerichtete Komponente der Sedimentation entgegenwirkt. Sie entstehen durch Scher- und Grenzschichten und sind bei höheren Strömungsgeschwindigkeiten und ansonsten gleichen Bedingungen in der Regel größer als bei niedrigeren.

Damit besteht ein Zusammenhang zwischen Strömungsgeschwindigkeit und Sedimentationsverhalten. Im Pleißemonitoring der SGL [K] ist dieser Zusammenhang untersucht worden. Die kritische Fließgeschwindigkeit, bis zu der Eisen sedimentiert, wurde darin im Mittel zu $v_{\text{crit}} = 0,15 \text{ m/s}$ festgestellt.

Da in dem Pleißemonitoring speziell das in der Pleiße auftretende suspendierte partikuläre Eisen untersucht wurde, können die Ergebnisse auch auf das durch den Stausee Rötha geleitete Pleißewasser übertragen werden. In der vorliegenden Arbeit wird

damit die Annahme zu Grunde gelegt, dass das im Wasser suspendierte partikuläre Eisen bis zu der kritischen Fließgeschwindigkeit $v_{\text{crit}} = 0,15 \text{ m/s}$ sedimentiert. Infolgedessen ist die reine Simulation der Strömungsverhältnisse im See ausreichend und das Sedimentationsverhalten kann anhand der Fließgeschwindigkeiten bewertet werden.

Bereits in einem frühen Stadium der Untersuchung zeigte sich, dass der Wind einen entscheidenden Einfluss auf das Strömungs- und damit auch das Sedimentationsverhalten im Stausee Rötha hat. Durch die innere Reibung an der Grenzfläche zwischen Luft und Wasser überträgt die bewegte Luft einen Teil ihres Impulses auf das Wasser. Auf die oberflächennahe Wasserschicht wirkt also eine durch den Wind verursachte Kraft oder, bezogen auf die Fläche, eine Schubspannung, die das Wasser beschleunigt. Die durch den Wind verursachten Strömungsgeschwindigkeiten im See übersteigen die durch den Durchfluss verursachten, je nach Windstärke, um mehrere Größenordnungen. Zurückzuführen ist der starke Windeinfluss u.a. auf die Seetopographie. Länge und Breite liegen in der Größenordnung von 1.000 m, womit der See eine Wasseroberfläche von rund 700.000 m² hat. Ausgehend von einem Wasserstand von 127,65 m NHN, beträgt die mittlere Tiefe jedoch kaum mehr als einen Meter bei einer maximalen Tiefe von 2 m. Damit hat der Wind eine große Angriffsfläche, um ein vergleichsweise kleines Wasservolumen in Bewegung zu setzen.

Um die dominierenden Auswirkungen des Windes möglichst gut zu erfassen, wird ein separates Modell zur Simulation des Windes erstellt. In diesem Modell wird die direkt an den See grenzende Landschaftstopographie und Bewaldung berücksichtigt, womit Windschattenbereiche abgebildet werden. Die in der Windsimulation berechnete Schubspannung auf der Wasseroberfläche dient als Randbedingung für die Simulation des Strömungsverhaltens im See.

4.2 Modell zur Simulation des Windes

Die Windsimulation dient ausschließlich der Bestimmung der auf die Wasseroberfläche wirkenden Schubspannung. Da eine stationäre Rechnung erfolgt, werden Verwirbelungen nicht simuliert, sondern es wird ein mittleres Strömungsbild berech-

net. Es gelten die Stoffeigenschaften von Luft, wie sie in der Datenbank von ANSYS CFX hinterlegt sind. Die Lufttemperatur wird als konstant mit 20 °C angenommen. Gravitationskräfte wirken nicht. Als Turbulenzmodell wird das k- ϵ -Standardmodell gewählt.

4.2.1 Berechnungsnetz

Grundlage für die Geometrie des Windmodells, die in Abb. 4-1 zu sehen ist, ist das von der LMBV bereitgestellte Laser Scanning [G], in dem die Topografie der Landschaft und von Gebäuden in der direkten Umgebung des Stausees vermessen wurde. Die Wasseroberfläche wird als ebene Fläche in der Höhe 127,65 m NHN modelliert, die durch die Wasserlinie aus den Daten von Klemm und Hensen [F] begrenzt ist. Aus Luftbildern wird die Lage von ufernaher Bewaldung rekonstruiert, die im Modell als Block mit einer Höhe von etwa 10 m über Gelände abgebildet wird.

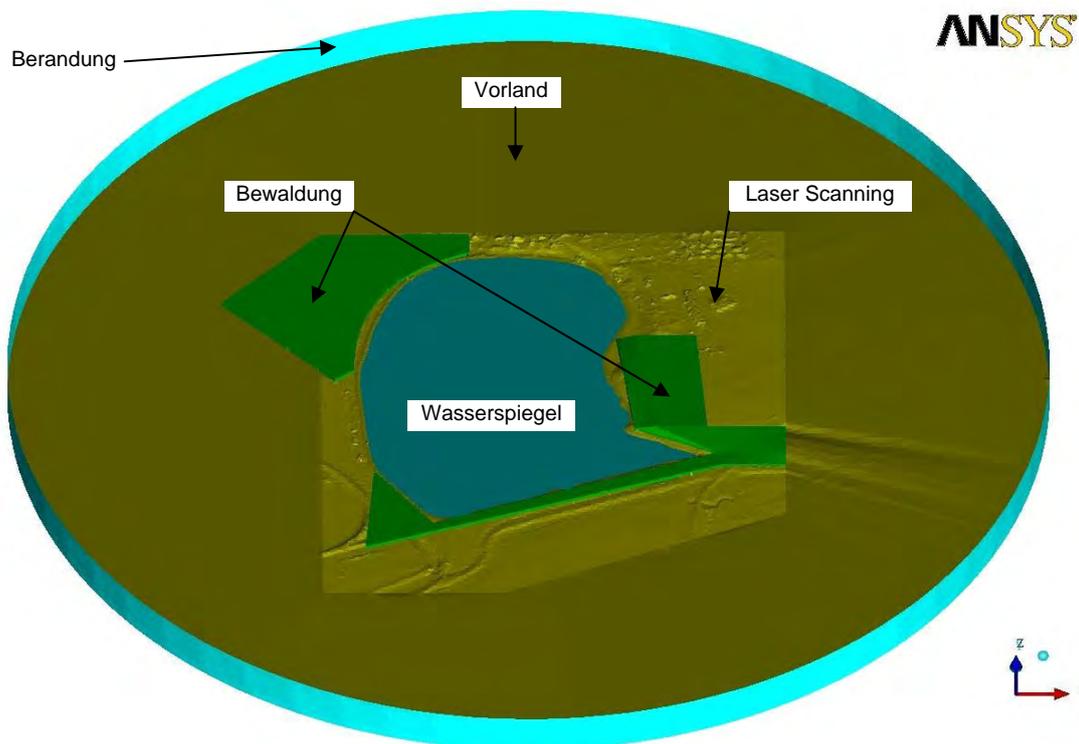


Abb. 4-1: Modellgeometrie zur Simulation des Windes

Die Berandung des Rechengebietes bildet ein Zylinder mit einem Durchmesser von 1.500 m, dessen Achse senkrecht durch die Mitte des Stausees verläuft. Ein- und

Auslass der Strömung sind damit jeweils ein Halbzylinder und können einfach an die zu simulierende Windrichtung angepasst werden. Aus dem Durchmesser ergibt sich ein Vorlauf bis zum Seeufer von gut 1.000 m aus jeder Richtung, womit eine Beeinflussung durch die Randbedingungen ausgeschlossen ist. Oben ist das Gebiet durch eine ebene Fläche in der Höhe 250 m NHN abgeschlossen. Der Abstand zwischen Boden und oberer Begrenzung beträgt damit im gesamten Rechengebiet mindestens 100 m.

Aufgrund des großen Rechengebietes erfolgt die Netzerstellung mit einer groben Auflösung. Ohnehin ist nur die Verteilung der durch den Wind verursachten Schubspannung auf der Wasseroberfläche von Interesse. Die Netzerstellung erfolgt vollständig mit Tetraedern und ergibt ein Rechengetz mit ca. 1 Mio. Elementen. An der oberen Begrenzung ist die Auflösung mit einer Elementgröße von 40 m am größten und wird zum Gelände hin feiner. Die Elementgröße auf dem Vorland beträgt 20 m, auf der Bewaldung beträgt sie 15 m und auf Laser Scanning und Wasserspiegel ist sie mit 10 m am kleinsten.

4.2.2 Randbedingungen

Als Einlaufrandbedingung werden die Strömungsgeschwindigkeit und die zu simulierende Windrichtung vorgegeben. Die Geschwindigkeit ist dabei nach dem logarithmischen Windprofil nach Prandtl nach Gleichung (1) verteilt.

$$v(z) = v_r \frac{\ln(z/z_0)}{\ln(z_r/z_0)} \quad (1)$$

$v(z)$ ist darin die Windgeschwindigkeit in Abhängigkeit von der Höhe z über dem Gelände, v_r die Referenzgeschwindigkeit in der Referenzhöhe z_r und z_0 die dynamische Rauigkeitslänge. z_0 ist die Höhe über Grund, in der das logarithmische Windprofil zu Null wird und ist ein Maß für die Oberflächenbeschaffenheit des Bodens. Einige dynamische Rauigkeitslängen sind in Tab. 4-1 zu sehen. Für das Windprofil der Einlaufrandbedingung wird eine Rauigkeitslänge von $z_0 = 0,1$ mm gewählt, was einer Kulturlandschaft mit geschlossenem Erscheinungsbild entspricht. Die Referenzwerte v_r und z_r werden entsprechend der zu simulierenden Windstärke eingestellt.

Am Auslass des Rechengebietes wird ein konstanter statischer Druck vorgegeben, der dem Referenzdruck von einer Atmosphäre entspricht, wodurch eine ungehinderte Abströmung gewährleistet ist. Die Obere Begrenzung ist als feste Wand mit glatter Oberfläche modelliert, die sich in Windrichtung mit der Geschwindigkeit aus dem logarithmischen Windprofil in der entsprechenden Höhe bewegt. Sie stellt die darüber liegende Luftschicht dar, in der sich die Windgeschwindigkeit kaum noch ändern sollte, da sich der Gebietsrand deutlich mehr als 100 m über Gelände befindet.

Tab. 4-1: Dynamische Rauigkeitslängen, Auszug aus [I]

Rauheitsklasse	Rauheitslänge z_0 [mm]	Landschaft
Klasse 0	0,0002	Wasserflächen
Klasse 1	0,03	Keine Zäune und Hecken, einzelne Gebäude
Klasse 2	0,1	einige Häuser und Hecken
Klasse 3	0,4	Dörfer, kleine Städte, Wälder

Sämtliche Flächen am Boden sind feste Wände mit rauer Oberfläche. Die Rauheiten richten sich nach dem DVWK Merkblatt [C], von dem Auszüge in Tab. 4-2 aufgeführt sind. Im Vorland und auf der Fläche des Laser Scannings wird danach eine äquivalente Sandrauheit von 300 mm angesetzt, auf der Bewaldung 1.000 mm. Die Rauheit des Wasserspiegels wird nach Gleichung (2) als Funktion der Windgeschwindigkeit beschrieben, um die Wellenbildung durch den Wind zu berücksichtigen.

$$\begin{aligned}
 k_{s,Wasser} &= 0,12 v_{10}^2 + 0,038 v_{10}^2 + 1,67 \quad \} v_{10} < 10 \text{ m/s} \\
 k_{s,Wasser} &= 14 \text{ mm} \quad \} v_{10} \geq 10 \text{ m/s}
 \end{aligned}
 \tag{2}$$

Die Windgeschwindigkeit v_{10} in 10 m Höhe ist darin in m/s einzusetzen, womit sich $k_{s,Wasser}$ in mm ergibt. Im folgenden Abschnitt ist dieser empirische Zusammenhang erläutert.

4.2.3 Modellkalibrierung

Da die Rauheit der Wasseroberfläche entscheidend für die vom Wind verursachte Schubspannung ist, wird deren Bestimmung besondere Aufmerksamkeit geschenkt. Grundlage dafür ist die Beziehung zwischen Windgeschwindigkeit und Schubspannung nach Gleichung (3) mit den von Bengtsson [B] vorgeschlagenen Beiwerten für kleine Seen.

$$\tau = C_D * \rho_{Luft} * v_{10}^2 \quad (3)$$

Darin ist $\rho_{Luft} = 1,184 \text{ kg/m}^3$ die Luftdichte und C_D der Widerstandsbeiwert mit $C_D = 0,9 \cdot 10^{-3}$ für $v_{10} \leq 4,5 \text{ m/s}$ und $C_D = 1,2 \cdot 10^{-3}$ für $v_{10} > 4,5 \text{ m/s}$ (vgl. [B]).

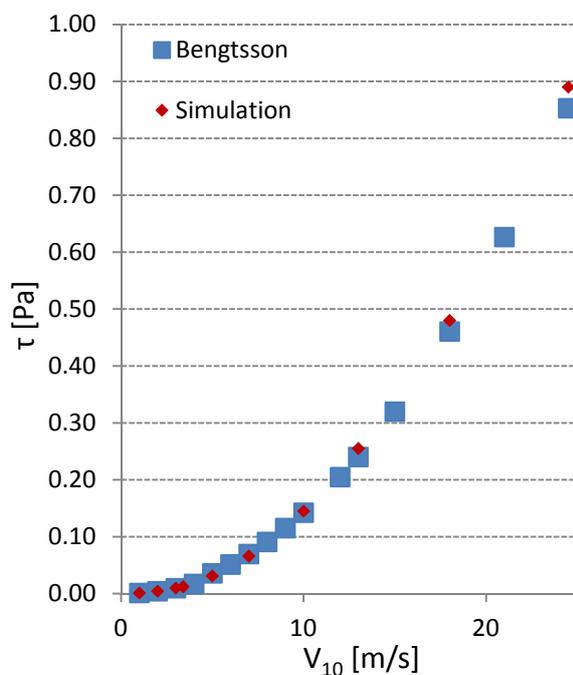


Abb. 4-2: Schubspannungen für die Kalibrierung des Windmodells

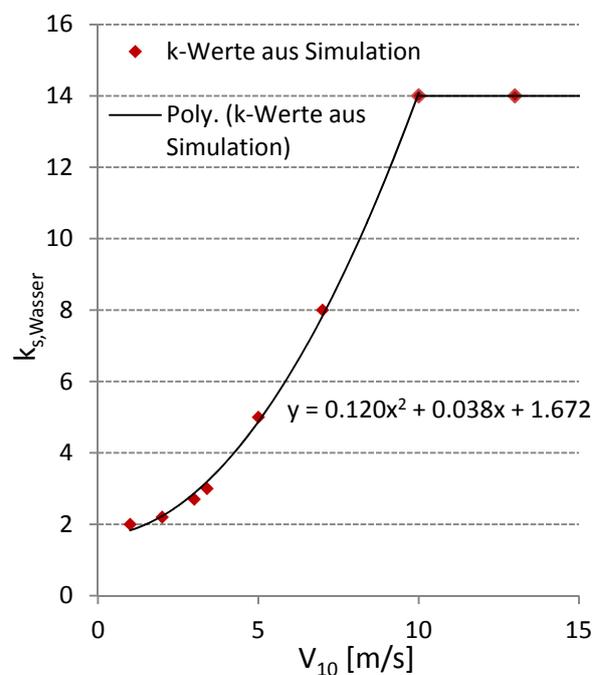


Abb. 4-3: Oberflächenrauheiten für die Kalibrierung des Windmodells

Für verschiedene Windstärken zwischen 1 m/s und 25 m/s werden die Schubspannungen nach Gleichung (3) berechnet, die als Richtwert für die Kalibrierung dienen. Im Modell werden die gleichen Windstärken simuliert und die Schubspannungen auf dem Wasserspiegel in Bereichen mit ungestörter Anströmung, d.h. ohne Windschatten, bewertet. Die Oberflächenrauheit des Wasserspiegels $k_{s,Wasser}$ wird so lange vari-

iert, bis die Schubspannung aus der Simulation mit der nach Gleichung (3) übereinstimmt (siehe Abb. 4-2). Die gefundenen $k_{s,Wasser}$ werden über der Windgeschwindigkeit v_{10} aufgetragen und durch ein Polynom zweiter Ordnung approximiert (siehe Abb. 4-3), woraus sich Gleichung (2) ergibt. Für Windgeschwindigkeiten über $v_{10} = 10$ m/s wurde eine konstante Rauheit von $k_{s,Wasser} = 14$ mm ermittelt, womit dieser Wert die maximale Wellengröße repräsentiert. Die Wellengröße ist vornehmlich durch die Gewässerausdehnung begrenzt (die zu Grunde liegende Untersuchung von Bengtsson [B] gilt für kleine Standgewässer mit Ausdehnungen unter 10 km).

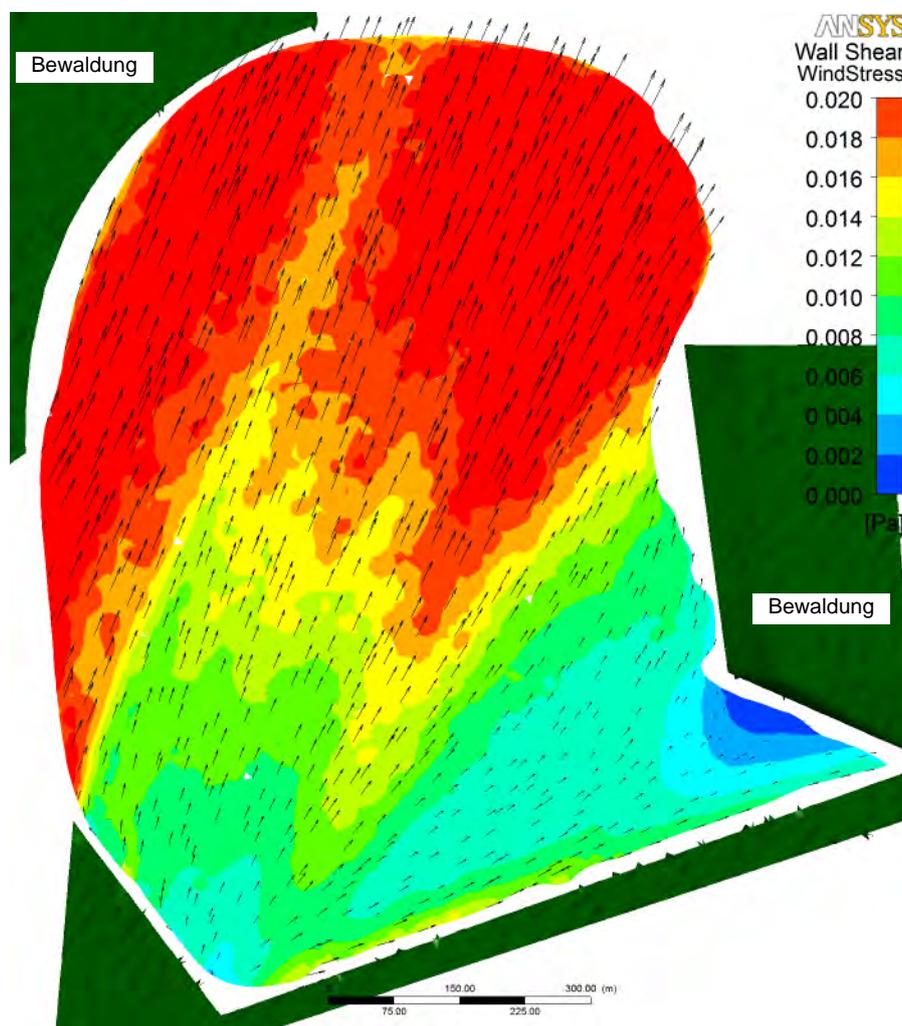


Abb. 4-4: In Windsimulation bestimmte Schubspannung auf die Wasseroberfläche bei Wind aus 205° mit $v_{10} = 4,3$ m/s

Abb. 4-4 zeigt exemplarisch die in der Windsimulation ermittelten Schubspannungen auf die Wasseroberfläche bei einer Windgeschwindigkeit von $v_{10} = 4,3$ m/s aus 205° . Die Windschattenwirkung der ufernahen Bewaldung ist darin deutlich zu erkennen.

4.3 Modell zur Simulation der Strömung im See

Die Strömungen im See werden ebenfalls durch eine stationäre Rechnung simuliert. Aufgrund der geringen Tiefe des Stausees besteht keine Temperaturschichtung, wie auch Messungen des IWS bestätigen. Die Wassertemperatur wird im Modell als konstant bei 16°C angesetzt und die Stoffeigenschaften der CFX-Datenbank verwendet. Gravitations- und andere Volumenkräfte werden vernachlässigt. Zur Modellierung von Turbulenzen erwies sich das $k\text{-}\omega$ -basierte Shear Stress Transport (SST) Modell als das robusteste.

4.3.1 Berechnungsnetz

Die Geometrie des Modells des Stausees Rötha basiert auf den vom IWS durchgeführten ADCP-Messungen der Gewässersohle und der Dammvermessung. Die Wasserspiegellinie wird den Daten der Ingenieurbüro Klemm und Hensen GmbH [F] entnommen und liegt entsprechend dem Wasserstand im Zeitraum der vorliegenden Untersuchung bei $127,65$ m NHN. Der Wasserspiegel bildet die obere Begrenzung des Rechengebietes zur Simulation der Strömung im Stausee. Ebenfalls aus dieser Messung stammen die Lagekoordinaten des Ein- und Auslaufes des Stausees.

Der Grundablass am nördlichen Ufer wird vereinfacht modelliert. Dabei handelt es sich um ein unterströmtes Schütz in Sohlnähe, das Wasser fließt also tatsächlich nur durch einen schmalen Spalt ab. Im Modell ist der Auslauf jedoch über die halbe Tiefe des Sees, etwa 1 m hoch, in Sohlnähe abgebildet, da die Rechennetzerstellung an einem so schmalen Spalt, wie an einem unterströmten Schütz, nur mit sehr kleinen Elementen möglich wäre. Strömungen in unmittelbarer Nähe des Auslaufes werden daher nicht der Realität entsprechend simuliert. Ohnehin ist die Netzfeinheit nicht fein genug, um detaillierte Strömungsphänomene zu simulieren, was auch nicht Ziel der Untersuchung war. Von Interesse ist vielmehr das großskalige Strömungsverhalten im See und nicht lokale Effekte, wie die Strömung in Auslaufnähe.

Die Netzerstellung erfolgt mit Tetraedern mit einer Kantenlänge von 3 m. Im Hinblick auf die Netzqualität erweist sich die Morphologie des Stausees Rötha, aufgrund seiner im Vergleich zur Fläche geringen Tiefe, als problematisch. Mit der gewählten Elementgröße von 3 m werden ca. 190.000 Elemente benötigt, um allein die Fläche des Wasserspiegels als Rechennetz abzubilden. Allerdings übersteigt die Elementkantenlänge von 3 m die maximale Tiefe des Sees von 2 m deutlich. Um über der Tiefe trotzdem eine ausreichende Auflösung zu erreichen, wird die Seegeometrie um den Faktor 10 überhöht, dann das Rechennetz erstellt und anschließend wieder in den Originalmaßstab zurück skaliert. Die Morphologie des Stausees bleibt damit unverändert, die Elemente werden jedoch in ihrer vertikalen Ausdehnung gestaucht, womit eine Auflösung über der Tiefe von mehreren Elementschichten erreicht wird. Die Gesamtanzahl der Elemente des beschriebenen Netzes beträgt etwas mehr als 2 Mio. Elemente.

Allerdings hat die Stauchung der Elemente negative Auswirkungen auf die Qualität des Netzes, was zu Diskretisierungs- und Rundungsfehlern im Lösungsprozess und damit zu Problemen bei der Konvergenz der Lösung führen kann. Um eine ausreichende Netzauflösung über der Tiefe des Sees mit ungestauchten Elementen zu erreichen, wären jedoch sehr kleine Elemente nötig. Die Gesamtzahl der Elemente würde sich wegen der großen flächenmäßigen Ausdehnung des Stausees inakzeptabel stark erhöhen, wodurch enorm hohe Rechnerressourcen notwendig wären. In Abschnitt 4.3.4 ist diese Problematik näher untersucht.

4.3.2 Randbedingungen

Die maßgebende Kraft für die Strömungsbildung im Stausee Rötha ist der Wind. Berücksichtigt wird dieser indem die in der Windsimulation (Abschnitt 4.2) ermittelten Schubspannungen auf die Wasseroberfläche als Randbedingung in die Simulation der Strömung im See eingehen. Diese Schubspannungen werden direkt auf den als feste Wand mit glatter Oberfläche modellierten Wasserspiegel aufgebracht.

Am Ein- und Auslauf des Stausees wird ein konstanter Zu- bzw. Abfluss angesetzt, der im Ist-Zustand 150 l/s beträgt, Zu- und Abflüsse durch Niederschlag und Ver-

dunstung werden damit vernachlässigt. Diese Kombination von Ein- und Auslauf-
randbedingung ist normalerweise nicht üblich, da sich der Durchfluss damit nicht aus
der Simulation ergibt und sie als instabil gilt. In diesem Fall stellte sie sich jedoch als
die robusteste heraus. Wird am Auslass ein statischer Druck vorgegeben, pendeln
sich Zu- und Abfluss nicht in einem Gleichgewicht ein und die Lösung bricht ab. Ver-
mutlich liegt die Ursache in den geringen Durchflüssen, die gegenüber den windin-
duzierten Strömungen sehr gering sind und durch diese überlagert werden, so dass
sich kein Gleichgewicht einstellt.

Versuchsweise wurde eine Simulation durchgeführt, in der zusätzlich zu dem vorge-
gebenen Zu- und Abfluss eine Öffnung, die einen Zu- und Abstrom in den See er-
laubt, eingebracht wurde. Dabei zeigte sich, dass sich der Durchfluss durch die zu-
sätzliche Öffnung schnell bei null einpendelt und sich nicht mehr ändert. Auch auf
Ergebnis und Konvergenz der Simulation hatte diese Modifikation keine Auswirkung.
Es werden also keine eventuellen Veränderungen im Zu- und Abfluss unterdrückt.

Die Sohle des Stausees wird als feste Wand mit rauer Oberfläche modelliert. Die
Uferböschungen und der Damm zur Abgrenzung des Vorbeckens bestehen vorwie-
gend aus äußerst groben geschütteten Steinen und sind teilweise bewachsen. In
diesen Bereichen wird im Modell eine äquivalente Sandrauheit von 400 mm ange-
setzt. Die eigentliche Sohle des Sees ist mit einem sehr weichen Schlamm bedeckt
und der Übergang zwischen Wasser und Schlamm ist nahezu kontinuierlich, ohne
eine klar definierte Grenze. Hier eine passende Sandrauheit zuzuordnen ist schwie-
rig, sie wird mit 10 mm als relativ glatt gewählt. Tab. 4-2 zeigt einen Auszug der
Rauheiten naturnaher Fließgewässer aus dem DVWK Merkblatt [C]. Programm Ser-
vice Wasserwirtschaft [H] schlägt für grobe Steinschüttungen Rauheiten über
500 mm und für schlammige Sohlen eine äquivalente Sandrauheit von 8 mm vor.

Tab. 4-2: Äquivalente Sandrauheiten, Auszug aus [C]

Oberflächenbeschaffenheit	äquiv. Sandrauheit k_s [mm]
Beton, glatt	1 - 6
Beton, rau	6 - 20
Feinsand (gemessen in Aller bei Gifhorn)	10
Gras und Stauden	130 - 400
schwere Steinschüttungen	200 - 300
Ackerboden mit Kulturen	250 - 800

4.3.3 Modellgenauigkeit

Die Validierung des Modells zur Simulation der Strömung im See erfolgt durch den Vergleich mit vom IWS durchgeführten Strömungsmessungen. Mithilfe der ADCP-Messtechnik wurden Strömungsrichtung und -geschwindigkeit als Profile über der Tiefe des Sees an mehreren fixen Punkten gemessen. Die Messungen fanden an mehreren Tagen zwischen Mai und Dezember 2011 statt, wobei bei jeder Einzelmessung über einige Minuten gemessen und gemittelt wurde. Während der Mittelung war die ADCP-Messsonde an Bojen befestigt, deren Positionen im Laufe der Messkampagne zur Verbesserung der Kalibriermöglichkeiten einmalig verändert wurden.

In Abb. 4-5 und Abb. 4-6 sind die Positionen der Bojen dargestellt. Zusätzlich wurden durch eine Wetterstation am Trachenauer Wehr kontinuierlich die Windverhältnisse aufgezeichnet.

Eine Validierung des Modells ist schwierig, da kein Vergleichswert mit konstanten Randbedingungen vorhanden ist. In der Realität variieren Windrichtung und -stärke erheblich, hinzu kommen kurzzeitige Effekte wie Böen. Diese Variabilität des Windes ist im Modell jedoch nicht nachzubilden. In der Simulation werden sowohl Wind als auch Strömung im See stationär berechnet, d.h. es wird eine mittlere Strömung ausgehend von einer konstanten Windrandbedingung berechnet. Um die Variabilität tatsächlich zu erfassen, müssten sowohl der zeitliche Verlauf als auch die örtliche Verteilung des Windes bekannt sein und Eingang in das Modell finden. Ein solcher Auf-

wand ist kaum gerechtfertigt und auch nicht nötig. Ausschlaggebend für die Sedimentation ist die Fließgeschwindigkeit und somit ist es entscheidend, dass die Strömungsgeschwindigkeiten im See - vorwiegend durch den Wind verursacht - in der richtigen Größenordnung abgebildet werden.

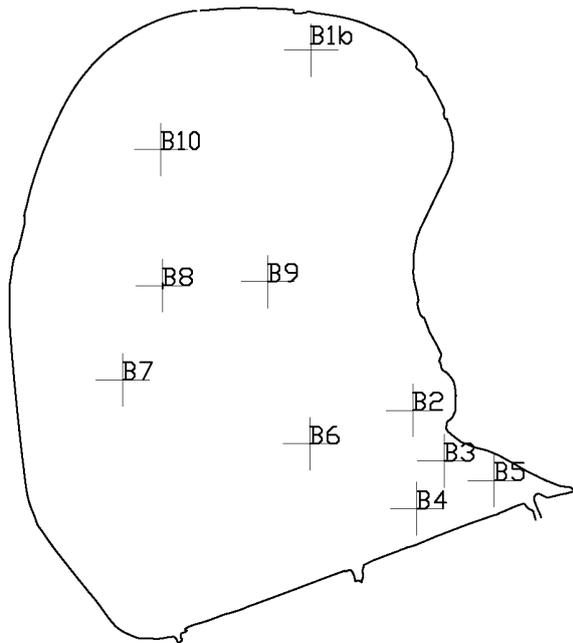


Abb. 4-5: Positionen der Bojen vor dem 22.10.2011

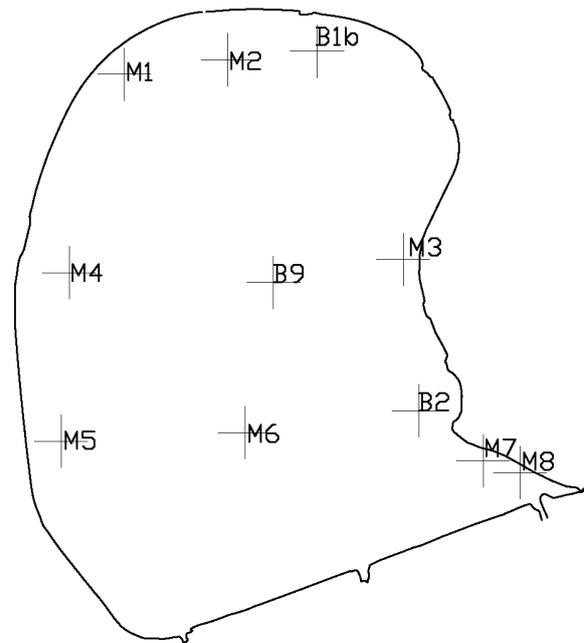


Abb. 4-6: Positionen der Bojen nach dem 22.10.2011

Zusätzlich besteht zwischen Messung und Simulation die Diskrepanz zwischen den ausgewerteten Zeiträumen. Die Simulation ist stationär, was einer Mittelung, bis keine Schwankungen mehr auftreten, entspricht. In der Messung geschieht die Mittelung jedoch über einen Zeitraum von wenigen Minuten und stellt damit eher eine Momentaufnahme der Strömung dar. Für die Validierung des Modells werden aus den Messtagen die ausgewählt, an denen über einen möglichst langen Zeitraum vor und während der Messungen relativ konstante Windverhältnisse herrschten, was die Voraussetzung für ein stationäres Strömungsverhalten ist. Die ausgewählten Windverhältnisse sind die Eingangsgrößen für die Windsimulation, die wiederum die Oberflächenschubspannung für die Simulation der Strömung im See liefert.

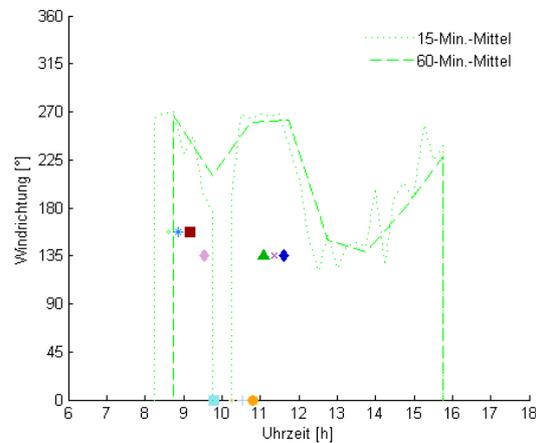
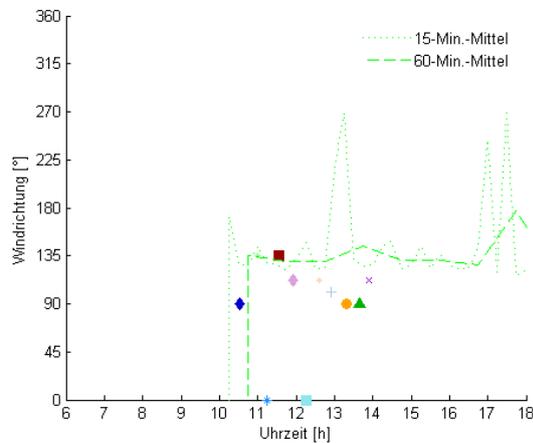
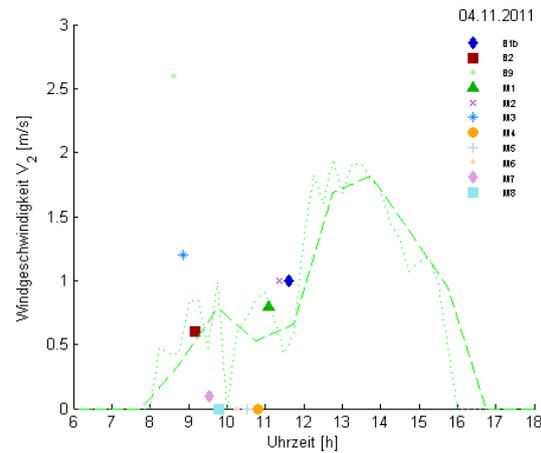
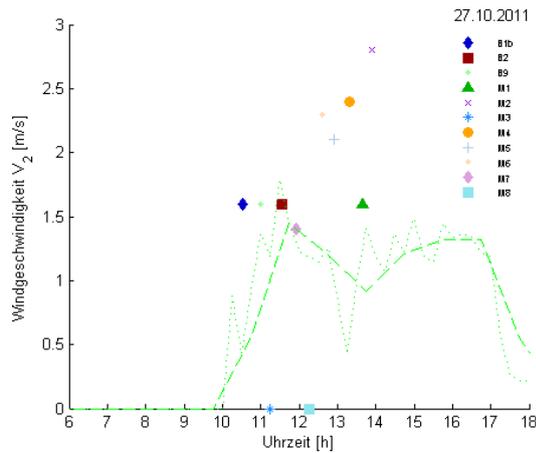


Abb. 4-7: Windverhältnisse am 27.10.2011

Abb. 4-8: Windverhältnisse am 04.11.2011

In Abb. 4-7 bis Abb. 4-10 sind die Windverhältnisse an den vier ausgewählten Tagen dargestellt. Die grünen Linien sind die an der Wetterstation am Trachenauer Wehr aufgezeichneten Daten (gemessen 2 m über Gelände, daher v_2) und die Punkte sind die während der Strömungsmessung an den einzelnen Bojen gemessenen Winddaten (gemessen etwa 1 m über dem Wasserspiegel). In den Abbildungen ist zu sehen, dass die Bedingung konstanter Windverhältnisse selbst an den ausgewählten Tagen nur mäßig erfüllt ist. Besonders die über 15 Minuten gemittelten Werte zeigen erhebliche Schwankungen in Windrichtung und -stärke. Die nicht dargestellten Einzelwerte schwanken noch deutlich stärker.

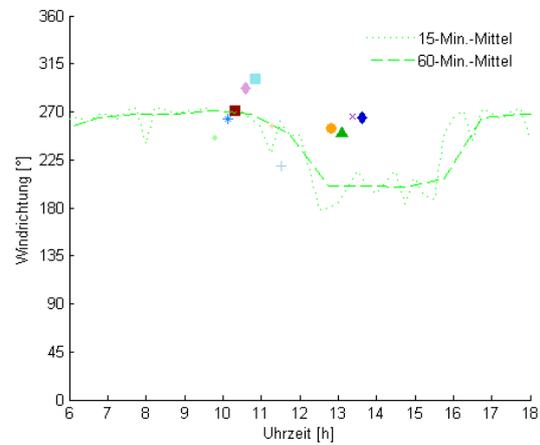
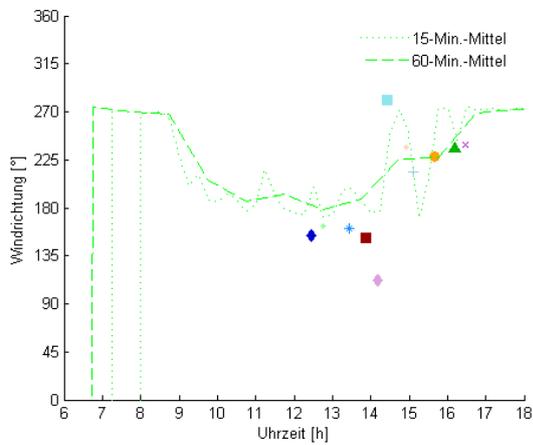
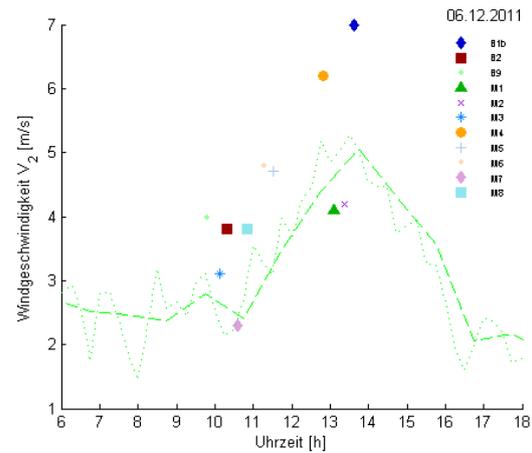
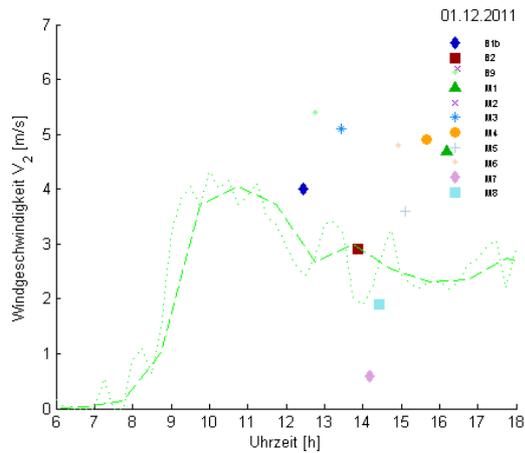


Abb. 4-9: Windverhältnisse am 01.12.2011

Abb. 4-10: Windverhältnisse am 06.12.2011

Abb. 4-12 bis Abb. 4-15 zeigen die dazugehörigen Vergleiche zwischen ADCP-Messung und der entsprechenden Simulation. Grundsätzlich lässt sich sagen, dass die Größenordnung der Strömungsgeschwindigkeit in der Simulation gut nachgebildet wird. In der Strömungsrichtung ergeben sich hingegen teilweise starke Abweichungen. Eine Ursache sind, wie bereits erläutert, die un stetigen Windbedingungen. Ein zweiter Grund für die Abweichungen ist das komplexe, primär windinduzierte Strömungsbild, das sich im Stausee Rötha einstellt.

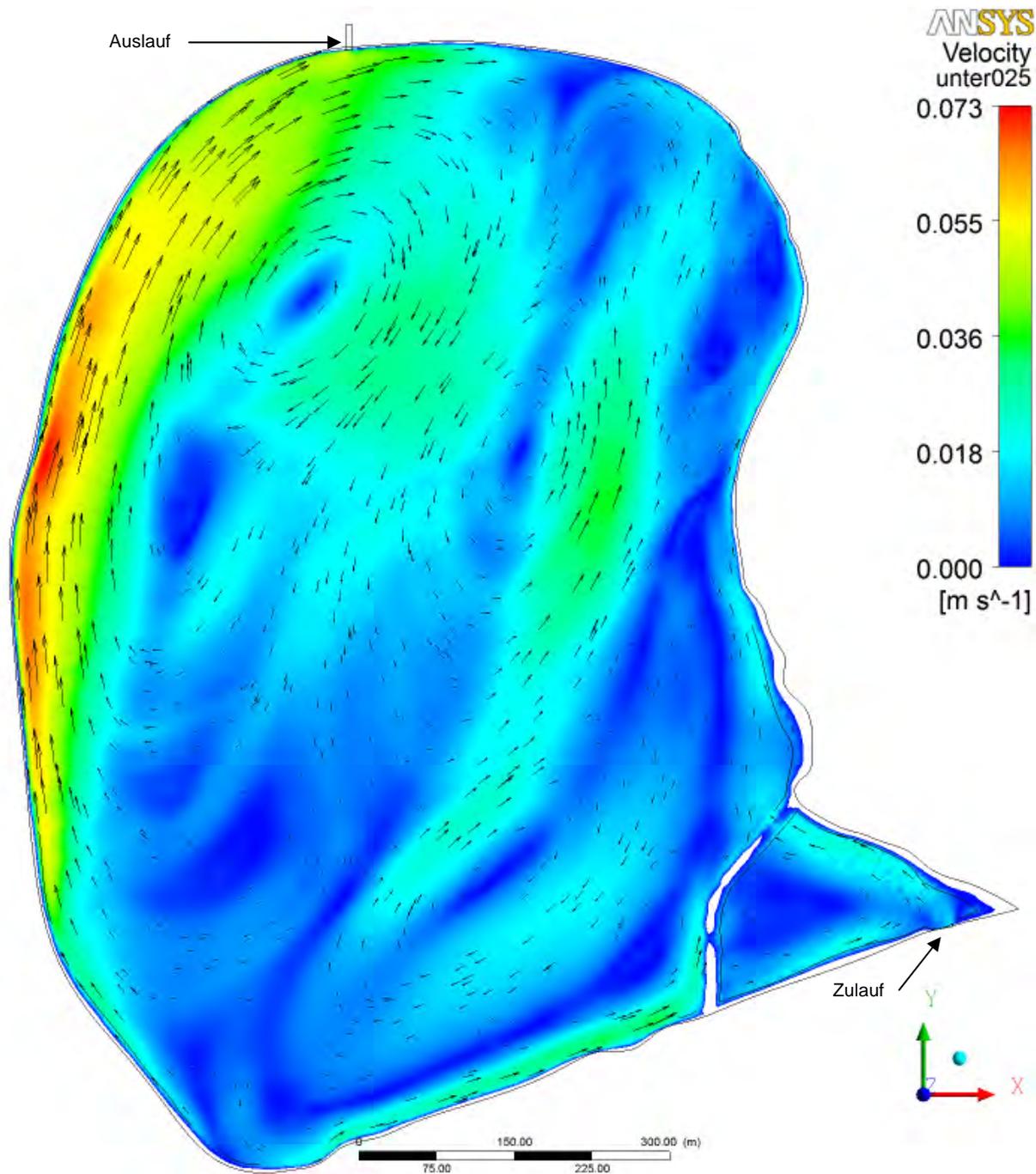


Abb. 4-11: Simuliertes Strömungsbild im Stausee Rötha bei Wind aus 205° mit $v_2 = 2,8$ m/s; Strömungsgeschwindigkeit und Richtung 25 cm unter dem Wasserspiegel

Zur Verdeutlichung ist in Abb. 4-11 das Strömungsbild im Stausee wie es sich aus der Simulation mit einer Windgeschwindigkeit von $v_2 = 2,8$ m/s aus 205° (Oberflächenschubspannungen aus Abb. 4-4) ergibt abgebildet, was den Windverhältnissen am 01.12.2011 entspricht (Abb. 4-9). Im See bilden sich eine Vielzahl verschiedener

Zirkulationsgebiete und Strömungsröhren. Der Vergleich zwischen Simulation und Messung kann jedoch nur an den Bojen vorgenommen werden, an denen gemessen wurde, womit es sich um Punktaufnahmen handelt. Wird die genaue Lage einer Strömungsröhre oder Zirkulation in der Simulation aufgrund einer ungenauen Windrandbedingung oder Seemorphologie nur geringfügig verschätzt, kann dies dazu führen, dass das Strömungsprofil nicht mehr in, sondern neben einer solchen Röhre liegt. Messung und Simulation können in diesem Fall erhebliche Unterschiede in Geschwindigkeit und Richtung aufweisen.

Weiterhin sind in den gemessenen Strömungsprofilen häufig starke Richtungs- und Geschwindigkeitsänderungen festzustellen (z.B. Abb. 4-12, Bojen B1b, B9, M3, M7), die so in der Simulation nicht auftreten. In einer versuchsweise durchgeführten instationären Simulation mit plötzlich wechselnder Windrandbedingung ist dieses Verhalten gut nachzubilden. Vor dem Wechsel der Windrichtung ist die Strömung über der Tiefe weitgehend konstant. Sobald der Wind wechselt ändert sich erwartungsgemäß zunächst die oberflächennahe Strömung bis sich nach und nach auch die Strömung in größerer Tiefe ändert. Je nach Position im See und Windrandbedingungen wirkt sich diese Änderung innerhalb einiger Minuten bis mehrerer Stunden bis auf den Grund aus. In den vorgestellten stationären Simulationen werden diese Effekte nicht berücksichtigt. Wie bereits erläutert ist eine genaue Erfassung der Variabilität des Windes kaum möglich und für eine qualitative Aussage zu den Strömungsgeschwindigkeiten im Stausee Rötha auch nicht nötig.

Einige Ursachen für die Abweichungen sind damit benannt, weiterführend wird dieses Thema in Abschnitt 4.3.4 behandelt. Im Folgenden werden die Vergleiche zwischen Messung und Simulation an ausgewählten Tagen mit In-Situ Messungen besonders im Hinblick auf die Strömungsgeschwindigkeit noch genauer betrachtet.

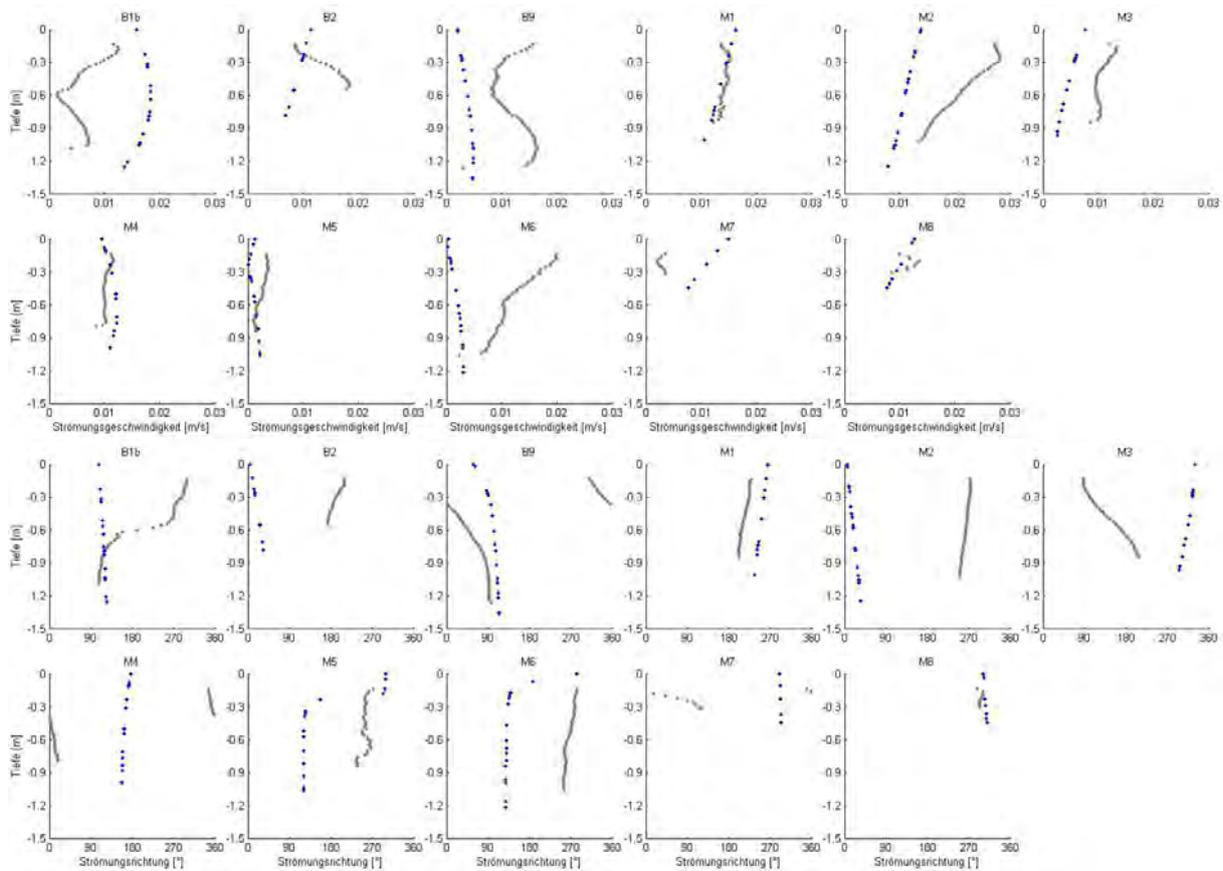


Abb. 4-12: Vergleich Messung (grau; 27.10.2011) und Simulation (blau; 135°; $v_2 = 1,1 \text{ m/s} \triangleq v_{10} = 1,7 \text{ m/s}$)

In der Simulation der Verhältnisse am 27.10.2011 mit geringer Windgeschwindigkeit zeigt sich eine qualitative Übereinstimmung mit den gemessenen Strömungsgeschwindigkeiten im See (siehe Abb. 4-12). Die gemessenen Geschwindigkeiten liegen größtenteils unter 0,02 m/s, nur an Boje M2 wurden bis zu 0,03 m/s gemessen. In der Simulation ergeben sich an den Bojen ebenfalls Geschwindigkeiten bis 0,02 m/s. Die maximale simulierte Geschwindigkeit im gesamten See beträgt 0,035 m/s.

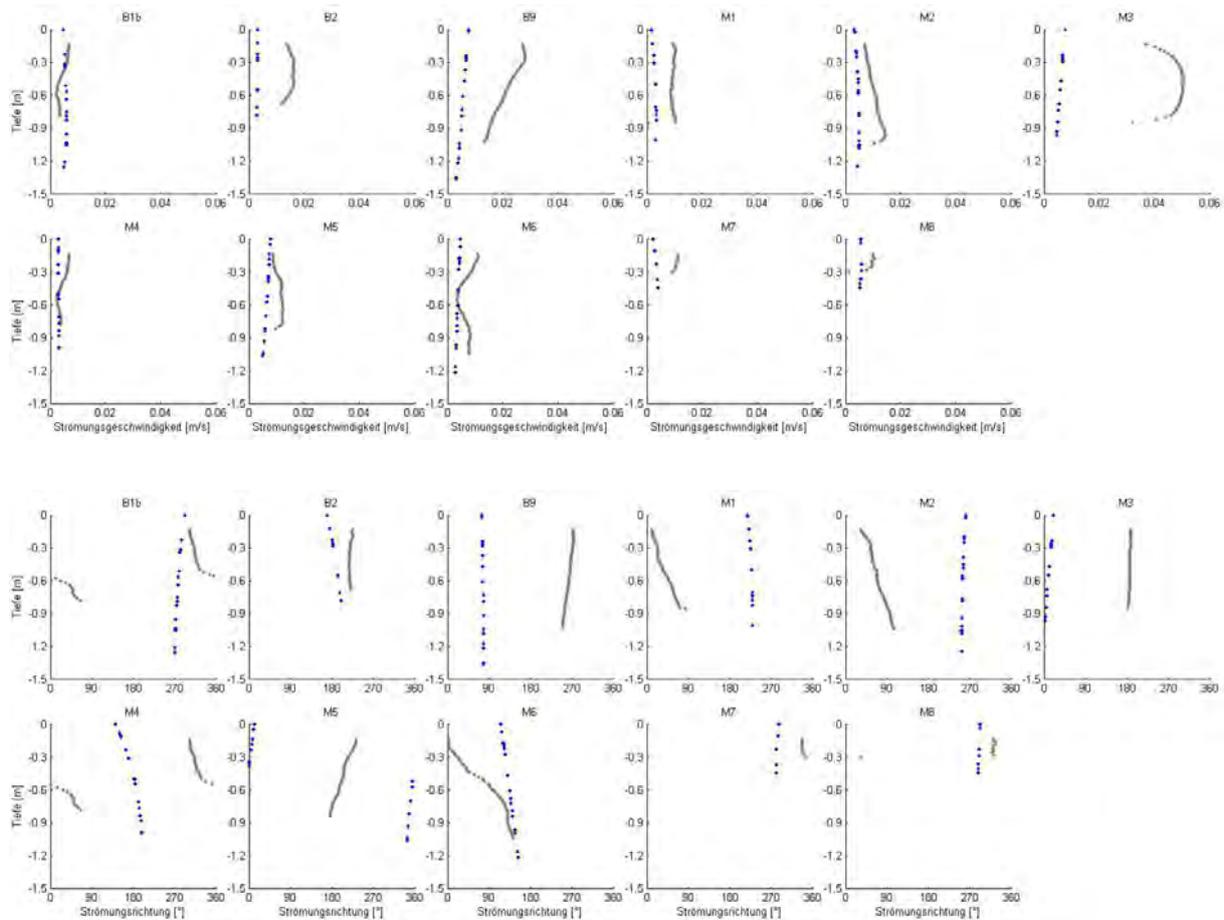


Abb. 4-13: Vergleich Messung (grau; 04.11.2011) und Simulation (blau; 250°; $v_2 = 0,5 \text{ m/s} \triangleq v_{10} = 0,8 \text{ m/s}$)

Am 04.11.2011 wurden bei sehr schwachem Wind hauptsächlich Fließgeschwindigkeiten bis etwas über 0,01 m/s gemessen (siehe Abb. 4-13). In der Simulation sind die Strömungsgeschwindigkeiten eher etwas geringer, hier beträgt sowohl an den Bojen als auch im gesamten See das Maximum $v_{\text{See,max}} = 0,01 \text{ m/s}$. In Abb. 4-3 auf Seite 19 ist zu sehen, dass die Oberflächenrauheit des Wasserspiegels bei niedrigen Windgeschwindigkeiten durch die Näherung nach Gleichung (2) leicht unterschätzt wird. Die Schubspannung auf der Oberfläche, als treibende Kraft der Strömung, fällt damit zu klein aus. Höhere Geschwindigkeiten wurden an den Bojen B9 und M3 gemessen. Ein Blick auf die Windverhältnisse in Abb. 4-8 zeigt, dass während der Messung dieser Bojen erhöhte Windgeschwindigkeiten gemessen wurden, was die höheren Fließgeschwindigkeiten verursacht haben könnte.

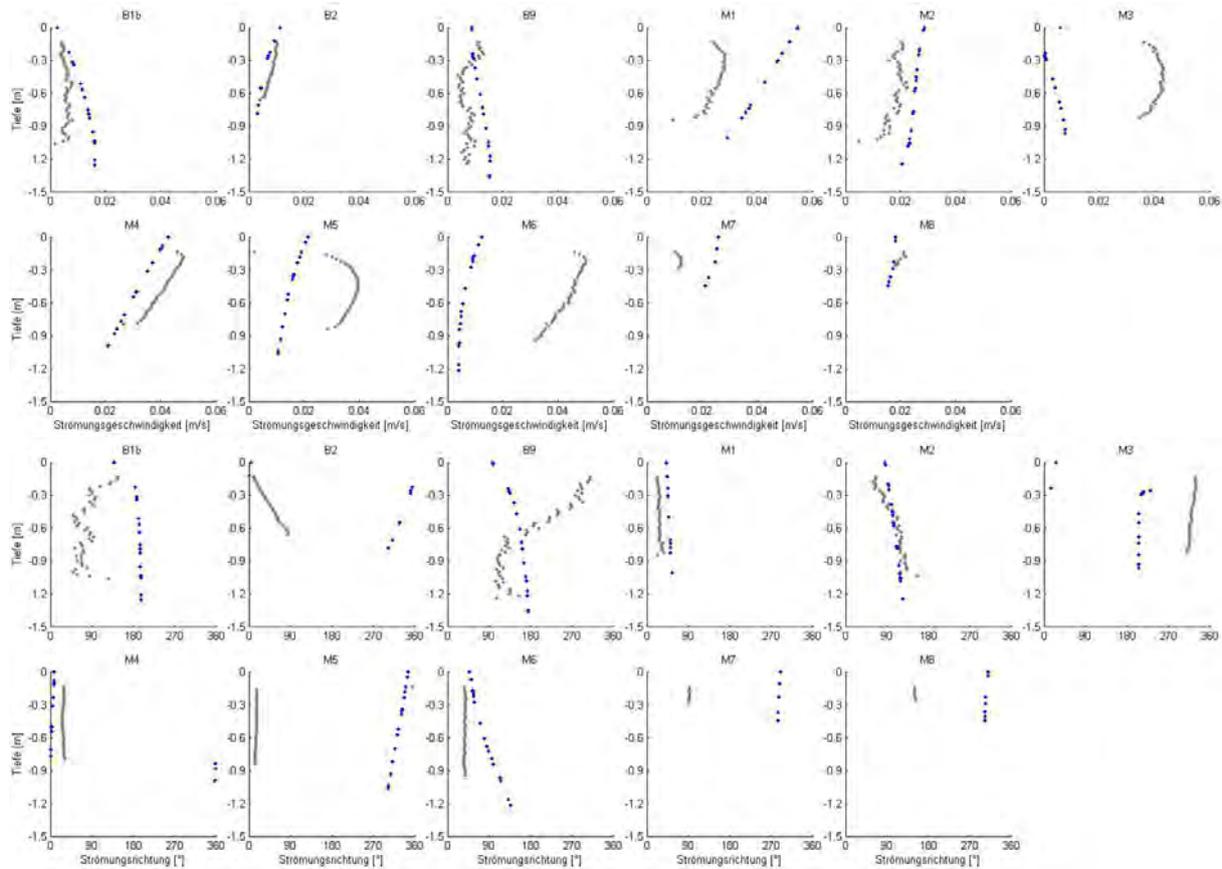


Abb. 4-14: Vergleich Messung (grau; 01.12.2011) und Simulation (blau, 205°; $v_2 = 2,8 \text{ m/s} \triangleq v_{10} = 4,3 \text{ m/s}$)

Die maximalen Strömungsgeschwindigkeiten an den Bojen am 01.12.2011 liegen in Messung und Simulation bei 0,05 m/s (siehe Abb. 4-14). Im gesamten See ergibt die Simulation ein Maximum von 0,08 m/s. Solche Geschwindigkeiten treten jedoch nur in einem schmalen Streifen am Westufer des Sees auf, so dass sie an den Bojen nicht gemessen wurden.

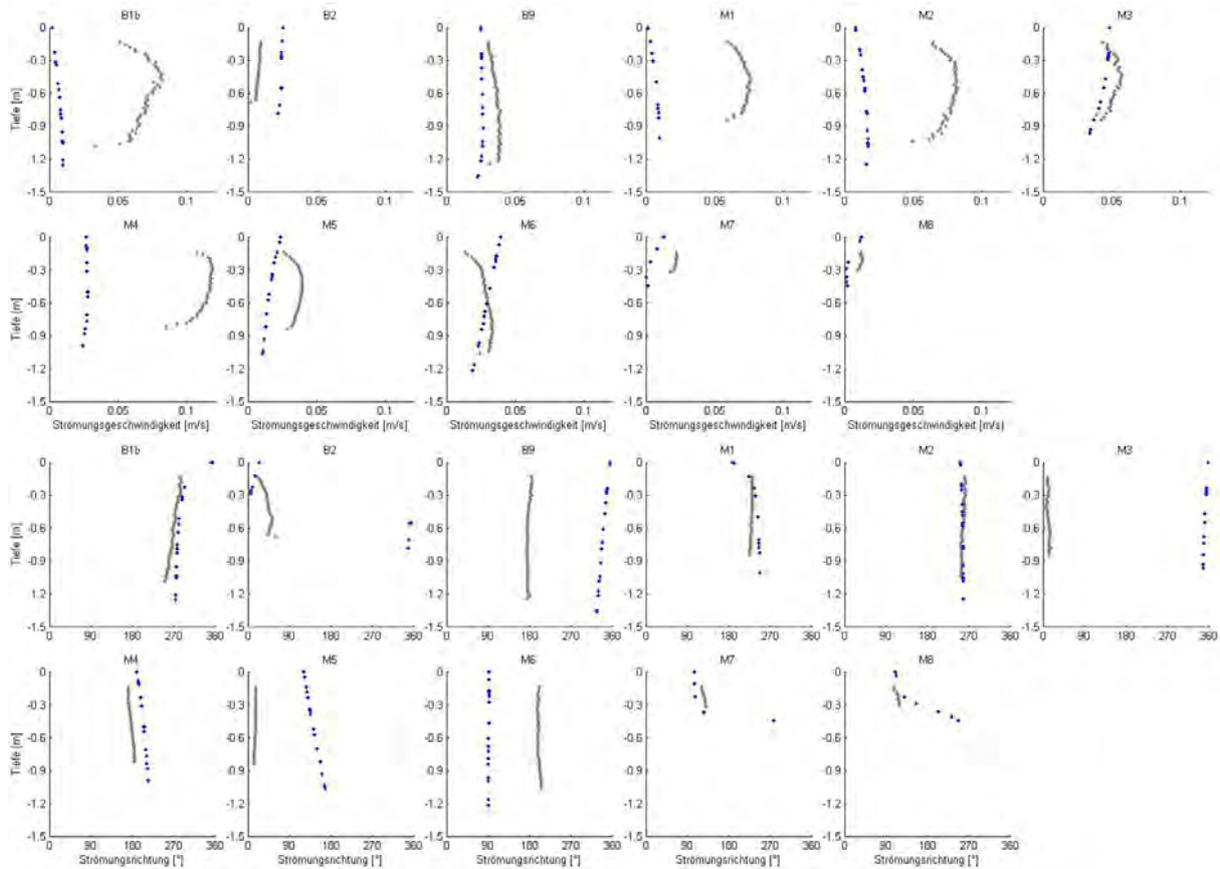


Abb. 4-15: Vergleich Messung (grau; 06.12.2011) und Simulation (blau, 270°; $v_2 = 2,6 \text{ m/s} \triangleq v_{10} = 4,0 \text{ m/s}$)

Eine sehr gute Übereinstimmung ist am 06.12.2011 an den zuerst gemessenen Bojen festzustellen (siehe Abb. 4-15). Abb. 4-10 zeigt, dass während der Messung der Bojen B9, M3, B2, M7 und M8 und mehrere Stunden davor Windrichtung und -stärke konstant waren. An diesen Bojen stimmen Simulation und Messung in Strömungsgeschwindigkeit und - bis auf Boje B9 - auch der Richtung sehr gut überein. Danach änderte sich die Windrichtung und der Wind nahm langsam zu. Die Bojen M5 und M6 sind davon noch wenig betroffen. Die Bojen M4, M1, M2 und B1b, während deren Messung der Wind schon mit $v_2 > 4,5 \text{ m/s}$ blies, zeigen jedoch schon deutlich höhere Strömungsgeschwindigkeiten als in der Simulation und an den anderen Bojen. Ohne diese Bojen zeigt sich in Simulation und Messung eine maximale Strömungsgeschwindigkeit von 0,04 - 0,05 m/s und im gesamten See ein simuliertes Maximum von 0,055 m/s.

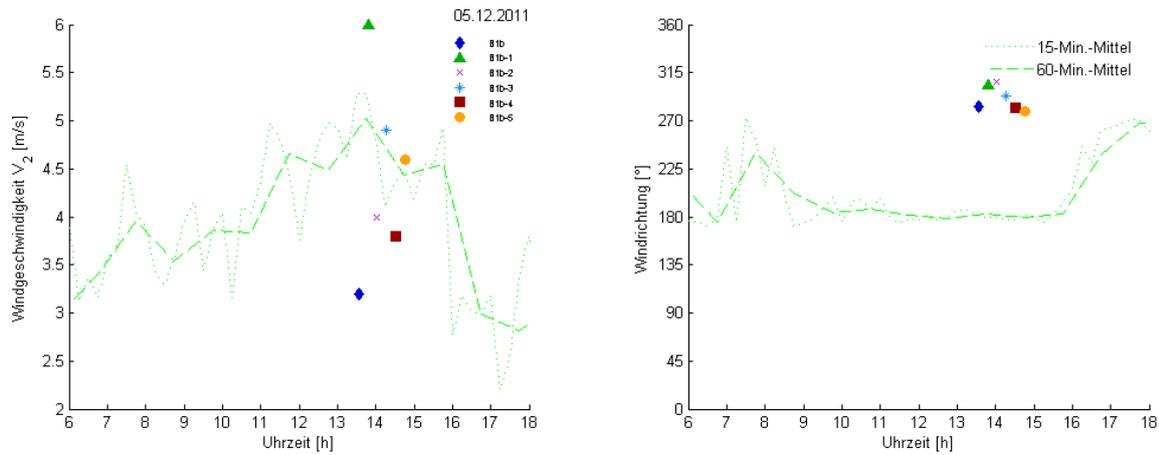


Abb. 4-16: Windverhältnisse am 05.12.2011

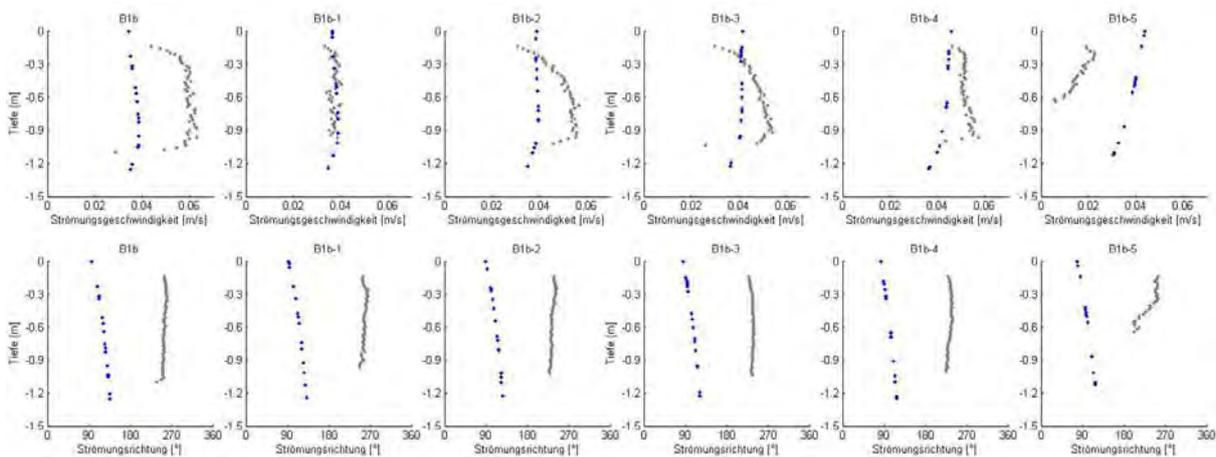


Abb. 4-17: Vergleich Messung (grau; 05.12.2011) und Simulation (blau, 180°; $v_2 = 4,5 \text{ m/s} \triangleq v_{10} = 6,9 \text{ m/s}$)

Um den gesicherten Bereich des Modells zu erweitern, wird noch die ADCP-Messung vom 05.12.2011 heran gezogen, wo ein kräftiger Wind herrschte (siehe Abb. 4-16). Allerdings wurden an diesem Tag nicht alle Bojen vermessen, sondern es wurden zwischen der Boje B1b und dem Ufer fünf Strömungsprofile (B1b-1 bis B1b-5) in etwa gleichen Abständen aufgezeichnet. Der Vergleich zwischen Messung und Simulation in Abb. 4-17 zeigt gut übereinstimmende Strömungsgeschwindigkeiten. An der Boje B1b-5 wurde die Messung vermutlich näher am Ufer aufgenommen als in der Simulation (exakte Koordinaten der Messungen liegen nicht vor). Darauf weist die geringe Tiefe des gemessenen Profils hin. Der bremsende Einfluss der Bö-

schung wirkt sich in der Simulation darum nicht so stark aus wie in der Messung, was die unterschiedlichen Geschwindigkeiten erklärt. Auffallend groß ist die Abweichung in der Strömungsrichtung. Wahrscheinlich ist dafür die lokale Windrichtung in der Nähe der Boje B1b im Norden des Stausees verantwortlich, die erheblich von der am Trachenauer Wehr im Süden-Westen abweicht (siehe Abb. 4-16, rechts).

Als Fazit lässt sich feststellen, dass die Größenordnung der Strömungsgeschwindigkeiten im Stausee Rötha mit dem vorhandenen Modell korrekt abgebildet werden können. Da die Strömungsgeschwindigkeit das entscheidende Kriterium für die Sedimentation ist, lässt sich damit auch das Sedimentationsverhalten im See bewerten. Aufgrund der im vorangegangenen betrachteten unterschiedlichen Windrichtungen und -geschwindigkeiten kann das Modell für Windverhältnisse bis $v_2 \leq 2,8 \text{ m/s} \triangleq v_{10} \leq 4,3 \text{ m/s}$ als validiert angesehen werden. Auch bei $v_{10} = 6,9 \text{ m/s}$ liegen noch qualitativ übereinstimmende Vergleichsmessungen vor, allerdings nur lokal und nicht im ganzen See verteilt. Bei sehr niedrigen Windgeschwindigkeiten ($v_{10} < 1,5 \text{ m/s}$) wird die Fließgeschwindigkeit in der Simulation eher leicht unterschätzt.

Das exakte Strömungsbild im Stausee kann mit dem Modell allerdings nicht reproduziert werden. Die Hauptgründe sind die Variabilität des Windes, die in der Simulation nicht vollständig berücksichtigt werden kann und die hohe Komplexität der Strömungen im See.

4.3.4 Sensitivitätsanalyse und Unsicherheiten

Die größte Unsicherheit des Modells ist, wie im vorherigen Abschnitt dargestellt, die Variabilität des Windes. Wind und Strömung im See werden in der Simulation als stationär berechnet. In der Realität ist der Wind jedoch zeitlich und örtlich stark veränderlich, was im Modell nicht berücksichtigt werden kann. Da der Wind die treibende Kraft der Strömung im See ist, wirken sich Änderungen des Windes auch auf die Strömungen im See aus. Das genaue Strömungsbild im See, welches ständigen Schwankungen unterworfen ist, kann somit nicht abgebildet werden. Verwendet man in der Simulation mittlere Windverhältnisse, lassen sich die Strömungsgeschwindigkeiten im Stausee Rötha jedoch gut abschätzen (siehe vorheriger Abschnitt).

Ein weiterer vernachlässigter Faktor ist die Corioliskraft. Laut Rettemeier [J] sind die dadurch verursachten Rotationseffekte in kleinen Standgewässern jedoch gering. Gerade in dem flachen Stausee Rötha ist der Wind die dominierende Kraft.

Zur Bewertung der Netzfeinheit werden weitere Netze mit anderer Auflösung generiert und die Simulationsergebnisse der unterschiedlichen Netze verglichen. Neben dem im Abschnitt 4.3.1 beschriebenen Netz mit einer Elementgröße von 3 m werden auf die gleiche Weise eines mit einer Elementgröße von 4 m und eines mit 2 m erstellt. Wesentlich feinere Netze sind aufgrund der dafür benötigten Rechnerressourcen kaum noch möglich. Alle drei Netze weisen in Konvergenzverhalten, Strömungsbild und maximaler Strömungsgeschwindigkeit nur leichte Unterschiede von unter 5 % auf. Das Netz mit der Elementgröße von 3 m wird letztlich gewählt, da hier ein guter Kompromiss zwischen Performance und Auflösung über der Tiefe besteht.

Weiterhin wird eine Sensitivitätsanalyse hinsichtlich der Windschubspannung durchgeführt. Die in einer Windsimulation für $v_{10} = 3,8 \text{ m/s}$ aus 200° bestimmte Schubspannung auf der Wasseroberfläche wird dafür um 20 % gesenkt bzw. erhöht. Dies hat eine Veränderung der Strömungsgeschwindigkeit im See von $\pm 10 \%$ zur Folge, wie in Tab. 4-3 zu sehen ist.

Tab. 4-3: Sensitivitätsanalyse der Randbedingungen

	Windschubspannung auf Wasseroberfläche			äquiv. Sandrauigkeit der Sohle		
	$\tau^* 0,8$	$\tau^* 1,0$	$\tau^* 1,2$	$k_s = 5 \text{ mm}$	$k_s = 10 \text{ mm}$	$k_s = 20 \text{ mm}$
V_{See,max} [m/s]	0,063	0,070	0,077	0,074	0,070	0,066
V_{See,mittel} [m/s]	0,013	0,015	0,016	0,015	0,015	0,014

Wie schon in Abschnitt 4.2.2 festgestellt, wird bei niedrigen Windgeschwindigkeiten die Rauigkeit der Wasseroberfläche durch Gleichung (2) leicht unterschätzt. Damit fallen die Windschubspannungen und infolgedessen auch die Strömungsgeschwindigkeiten im See etwas kleiner aus. Die bei diesen Bedingungen auftretenden gerin-

gen Strömungsgeschwindigkeiten liegen jedoch weit unter der kritischen Fließgeschwindigkeit $v_{\text{crit}} = 0,15 \text{ m/s}$, weshalb Aussagen zum Sedimentationsverhalten trotzdem möglich sind.

Um abzuschätzen, welchen Einfluss eine falsch angenommene Rauigkeit der Sohle hätte, wird die aufgrund von Tab. 4-2 gewählte Rauigkeit der Sohle von 10 mm halbiert bzw. verdoppelt. Durch die gesenkte bzw. erhöhte Bremswirkung verändert sich die maximale Strömungsgeschwindigkeit um etwa $\pm 5 \%$ (siehe Tab. 4-3). Die Rauigkeit an der Böschung und dem Damm wird nicht genauer untersucht, da sie sich nur in Ufer- und Dammnähe auswirkt.

Unter Umständen können sich die behandelten Unsicherheiten in lokalen Bereichen des Sees addieren und somit zu nicht vernachlässigbaren Abweichungen führen. In Abschnitt 4.3.3 konnte im Vergleich mit den ADCP-Messungen jedoch gezeigt werden, dass das Modell mit den gewählten Parametern die Größenordnung der Strömungsgeschwindigkeiten im Stausee Rötha gut nachbilden kann.

5 Bewertung der Sedimentationsfähigkeit

Die Bewertung der Sedimentationsprozesse im Stausee Rötha erfolgt über die kritische Fließgeschwindigkeit v_{crit} . Dabei wird angenommen, dass unterhalb dieser kritischen Geschwindigkeit Sedimentation stattfindet, oberhalb jedoch nicht mehr. Im Pleißemonitoring der SGL [K] wurden für die Pleiße Werte zwischen 0,12 m/s und 0,2 m/s ermittelt, im Mittel $v_{crit} = 0,15$ m/s. Zur Beurteilung der Remobilisierung bereits abgesetzter Eisensedimente liegen keine gesicherten Untersuchungen vor. Es wird daher davon ausgegangen, dass es bereits oberhalb der kritischen Fließgeschwindigkeit der Sedimentation zur Remobilisierung kommen kann.

Aufgrund der Schwankungen der empirischen Werte des Pleißemonitorings und der in Abschnitt 4.3.4 beschriebenen Unsicherheiten wird die kritische Fließgeschwindigkeit durch einen Sicherheitsfaktor von $f_S = 1,5$ dividiert. Als Grenzwert für die Sedimentation ergibt sich daraus $v_{crit}/f_S = 0,1$ m/s. Dieser Wert wird zur Beurteilung der Sedimentation auf die in der Simulation ermittelten Strömungsgeschwindigkeiten angewendet.

5.1 Ist-Zustand

Der Ist-Zustand des Stausees Rötha ist in dem Übersichtslageplan in Abb. 2-1 dargestellt. Gespeist wird der See durch Pleißewasser über einen Zulaufgraben (nicht Bestandteil des Modells) der am süd-östlichen Ende in den Stausee mündet. Am nördlichen Ufer befindet sich der Grundablass über den das Wasser in die Kleine Pleiße entlassen wird. Die hydraulische Belastung im Ist-Zustand beträgt 150 l/s.

Es wurden bereits einige Simulationsergebnisse zum Vergleich mit den ADCP-Messungen diskutiert. Dabei wurden nur Windereignisse an Tagen berücksichtigt, an denen Strömungsmessungen vorliegen. In all diesen Fällen liegen die maximalen Fließgeschwindigkeiten unter $v_{crit}/f_S = 0,1$ m/s, das heißt im gesamten Stausee findet Sedimentation statt. Diese Erkenntnis deckt sich auch mit vom IWS durchgeführten Konzentrationsmessungen im Herbst 2011, in denen Eisenrückhalteraten zwischen Trachenauer Wehr und Grundablass (also im Zulaufgraben und im See) von 50 % und mehr festgestellt wurden, der Großteil davon im See.

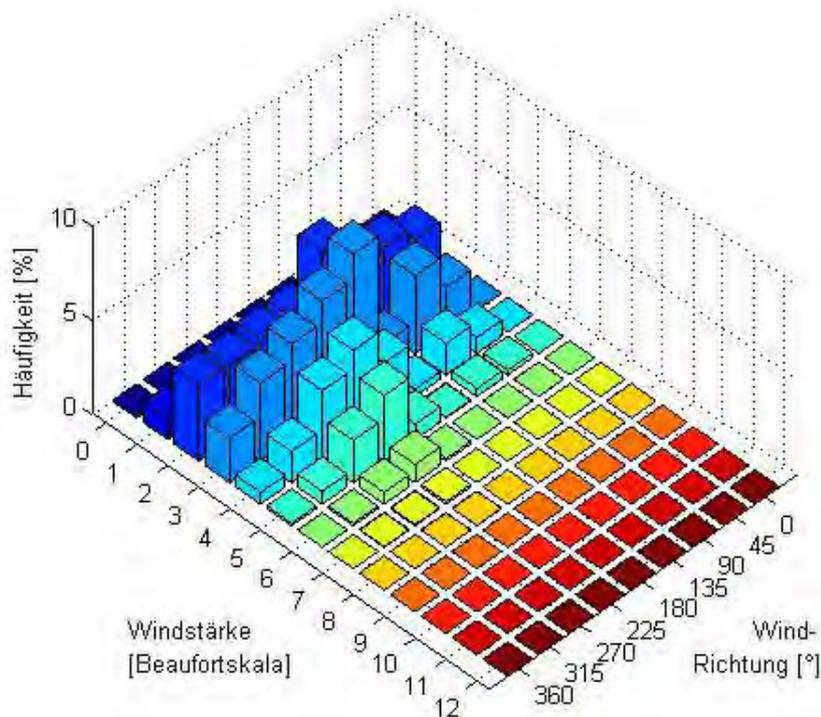


Abb. 5-1: Häufigkeitsverteilung der Windereignisse

Im Folgenden sollen jedoch allgemeingültige Aussagen zur Sedimentationsfähigkeit im Stausee Rötha getroffen werden. Dafür werden die Wetterdaten des Deutschen Wetterdienstes (DWD) an der Messstation "Leipzig/Halle" [D] aus dem Zeitraum 01.01.2000 bis 05.01.2012 zu Grunde gelegt. Aus den Wetterdaten werden Windrichtung und -stärke der drei täglichen Terminmessungen um 6:50 Uhr, 12:50 Uhr und 18:50 Uhr entnommen. Die Tagesmittelwerte der Windstärke sind nicht von Bedeutung, da wenige Stunden reichen, das Seewasser in Bewegung zu setzen. Ebenso werden die gemessenen Maximalböen nicht berücksichtigt, da Böen nur kurzzeitig das Oberflächenwasser beeinflussen ohne sich bis auf den Grund des Sees auszuwirken. Die Häufigkeit der Windereignisse ist in Abb. 5-1 nach Windstärke und -richtung dargestellt. Darin ist die Windstärke nach Beaufort angegeben, die entsprechenden Windgeschwindigkeiten sind Tab. 5-1 zu entnehmen. 90 % aller Windereignisse haben danach eine Windstärke von 4 Bft oder kleiner. Auf die Windstärke 5 Bft entfallen jedoch noch 8 %, weshalb diese noch durchaus häufig auftritt. Das stärkste gemessene Windereignis hatte die Stärke 9 Bft und trat im ausgewerteten Zeitraum einmalig aus 270° auf.

Ein Vergleich der Daten der Wetterstation "Leipzig/Halle" mit Daten von der Wetterstation Witznitz zeigt ähnliche Windverhältnisse. Zwar liegt die Wetterstation Witznitz näher am Stausee Rötha, jedoch stehen hierfür nur Wetterdaten aus dem Zeitraum 01.04. bis 31.12.2011 zur Verfügung. Da von der Wetterstation "Leipzig/Halle" Daten aus den Jahren 2000 bis 2011 vorliegen, werden diese für die statistische Auswertung herangezogen.

Tab. 5-1: Beaufortskala nach Windgeschwindigkeiten

Stärke in Bft	v_{10} in m/s	Bezeichnung
0	0 - < 0,3	Windstille
1	0,3 - < 1,6	Leiser Zug
2	1,6 - < 3,4	Leichter Wind
3	3,4 - < 5,5	Schwacher Wind
4	5,5 - < 8,0	Mäßiger Wind
5	8,0 - < 10,8	Frischer Wind
6	10,8 - < 13,9	Starker Wind
7	13,9 - < 17,2	Steifer Wind
8	17,2 - < 20,9	Stürmischer Wind
9	20,9 - < 24,5	Sturm
10	24,5 - < 28,5	Schwerer Sturm
11	28,5 - < 32,7	Orkanartiger Sturm
12	$\geq 32,7$	Orkan

Von den statistischen Windereignissen werden die Windstärken 2 Bft bis 6 Bft und das Maximalereignis von 9 Bft aus den jeweils häufigsten Richtungen simuliert. Außerdem wird die Windstärke 4 Bft aus allen Richtungen in 45°-Schritten simuliert, um eine Aussage zur Windrichtung mit der größten Auswirkung treffen zu können. Im Windmodell wird dabei die Obergrenze des Geschwindigkeitsbereichs v_{10} der jeweiligen Windstärke verwendet (z.B. 4 Bft \rightarrow 8,0 m/s, siehe Tab. 5-1). Die berechnete Schubspannung auf die Wasseroberfläche liefert die Randbedingung für das Strömungsmodell.

mungsmodell des Sees. In Tab. 5-2 und Tab. 5-3 sind die darin bestimmte maximale und mittlere Strömungsgeschwindigkeit $v_{\text{See,max}}$ und $v_{\text{See,mittel}}$ aufgelistet.

Tab. 5-2: Simulationsergebnisse statistischer Windereignisse

Stärke [Bft], Richtung [°]	$v_{\text{See,max}}$ [m/s]	$v_{\text{See,mittel}}$ [m/s]
2, 180	0,044	0,015
3, 180	0,076	0,025
4, 225	0,155	0,042
5, 225	0,216	0,060
6, 225	0,296	0,084
9, 270	0,404	0,165

Tab. 5-3: Simulationsergebnisse mit 4 Bft aus allen Richtungen

Stärke [Bft], Richtung [°]	$v_{\text{See,max}}$ [m/s]	$v_{\text{See,mittel}}$ [m/s]
4, 0	0,170	0,049
4, 45	0,122	0,045
4, 90	0,151	0,059
4, 135	0,197	0,047
4, 180	0,119	0,039
4, 225	0,155	0,042
4, 270	0,124	0,051
4, 315	0,162	0,037

In Tab. 5-2 ist zu sehen, dass ab einer Windstärke von 4 Bft im Stausee Rötha lokal Strömungsgeschwindigkeiten über $v_{\text{crit}}/f_S = 0,1$ m/s auftreten. Das Strömungsbild aus dieser Simulation ist in Abb. 5-2 dargestellt, die Bereiche mit $v_{\text{See}} > 0,1$ m/s sind darin dunkel hinterlegt¹. Obwohl es sich dabei um lokale Gebiete am Westufer des Stausees handelt, besteht schon bei 4 Bft die Gefahr erhöhter Eisenkonzentrationen im aus dem See ablaufenden Wasser. In der Realität bildet sich kein stationäres Strömungsbild wie in Abb. 5-2 zu sehen aus, vielmehr ist die Strömung, bedingt durch die Variabilität des Windes, ständigen Veränderungen unterworfen. Damit ist auch anzunehmen, dass Bereiche mit besonders hohen Strömungsgeschwindigkeiten, ihre Lage verändern können. Liegen diese nun in der Nähe des Auslaufes des Sees und führen die hohen Strömungsgeschwindigkeiten zur Remobilisierung von Eisen-schlamm, fließt das remobilisierte Eisen aus dem See ab.

¹ Alle Strömungsbilder sind 25 cm unter der Wasseroberfläche dargestellt, signifikante Änderungen über der Tiefe gibt es nicht. Die dunkel hinterlegten Bereiche mit Strömungsgeschwindigkeiten über $v_{\text{crit}}/f_S = 0,1$ m/s berücksichtigen die Strömungsgeschwindigkeiten über der gesamten Tiefe.

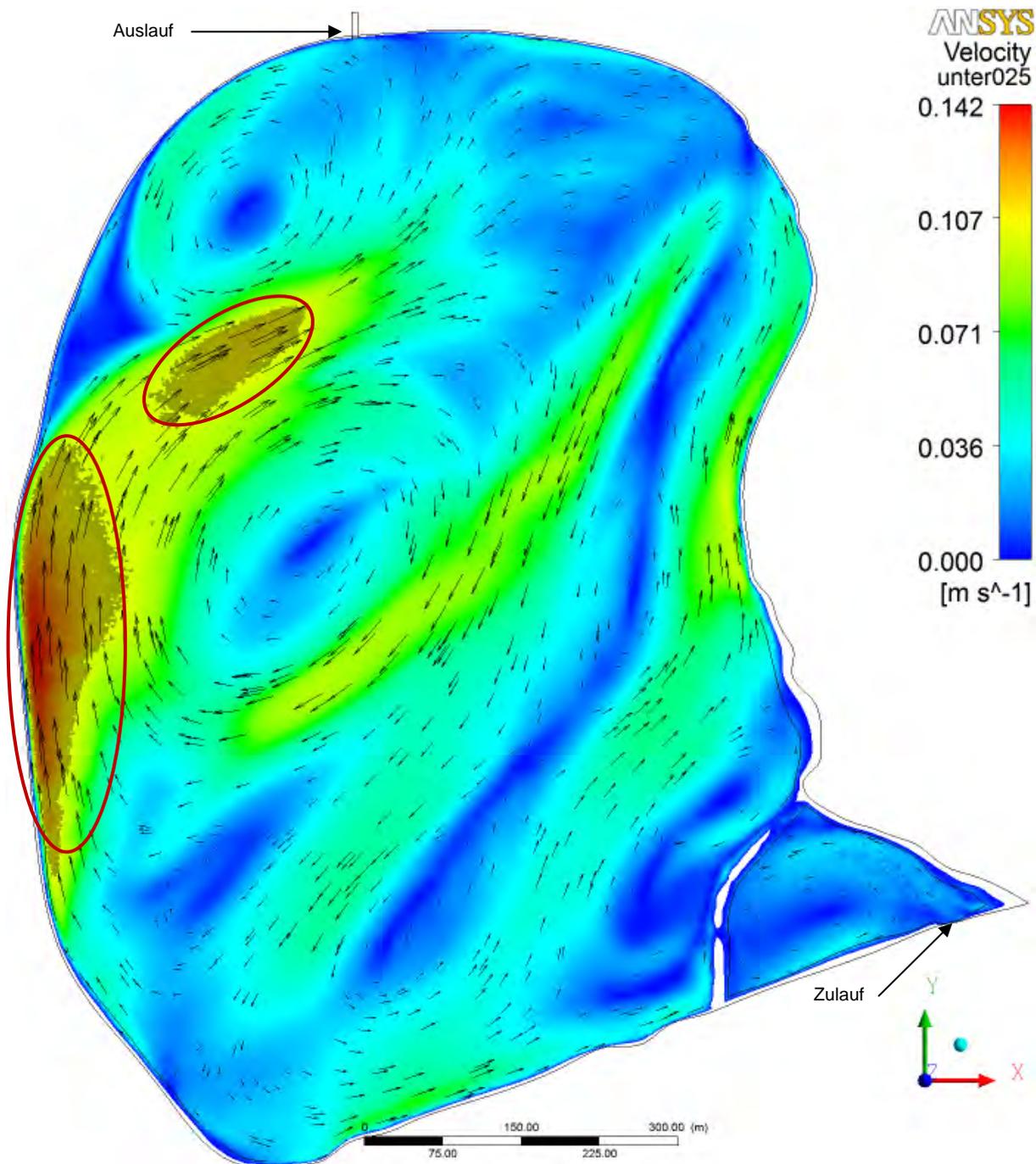


Abb. 5-2: Simuliertes Strömungsbild im Stausee Rötha bei Wind aus 225° mit 4 Bft; Strömungsgeschwindigkeit und Richtung 25 cm unter dem Wasserspiegel; Bereiche mit Strömungsgeschwindigkeiten über $v_{crit}/f_S = 0,1$ m/s dunkel hinterlegt (und umrandet)

Allerdings ist anzumerken, dass die hier präsentierten Ergebnisse eher konservativ interpretiert werden. Im größten Teil des Sees liegen die Strömungsgeschwindigkei-

ten deutlich unter 0,1 m/s. Wegen der geringen Fließgeschwindigkeit sind lange Verweilzeiten zu erwarten, so dass auch bei 4 Bft noch großflächig Sedimentation stattfindet. Außerdem bestehen durch den Sicherheitsfaktor $f_s = 1,5$ und die Verwendung der höchsten Windgeschwindigkeit der jeweiligen Windstärke zusätzliche Sicherheiten. Für die genauere Bestimmung und Absicherung einer kritischen Windgeschwindigkeit wären weitere langfristige Messungen erforderlich, besonders bei Windstärken ab 4 Bft.

Im Anhang sind auch die Strömungsbilder der anderen in Tab. 5-2 aufgelisteten Fälle zu sehen. Anhand der Simulationen mit gleicher Windrichtung, aber anderer -stärke ist zu erkennen, dass das Strömungsbild prinzipiell gleich ist und sich nur die Geschwindigkeitsbeträge unterscheiden. Die Betrachtung verschiedener Windrichtungen bei 4 Bft lässt sich also auch auf die anderen Windstärken übertragen.

Diesbezüglich ist Tab. 5-3 zu entnehmen, dass bei Wind aus 135° die größten lokalen Strömungsgeschwindigkeiten im Stausee Rötha auftreten. Dies ist bedingt durch eine ausgeprägte Strömungsröhre im Norden des Sees, durch die fast das gesamte durch den Wind getriebene Wasser fließt. Die größten mittleren Geschwindigkeiten im See treten bei Wind aus 90° und 270° auf. Bei diesen Richtungen fährt der Wind ungebremst durch die unbewaldeten Uferbereiche im Nord-Osten und Westen (siehe Abb. 4-1) und treibt das Wasser stark an. Diese beiden Windrichtungen stellen damit die kritischsten Fälle dar. Zwar sind die mittleren Strömungsgeschwindigkeiten bei Wind aus 0° und 135° ähnlich hoch, in Abb. 5-1 ist jedoch zu sehen, dass diese Richtungen bei Windstärken größer 2 Bft kaum auftreten. Die Strömungsbilder aller in Tab. 5-3 aufgelisteten Fälle sind im Anhang enthalten.

Den Abbildungen im Anhang ist auch zu entnehmen, dass die Strömungsgeschwindigkeiten im Vorbecken in fast allen Fällen deutlich unterhalb der im Rest des Sees auftretenden liegen. Hier wirkt der Damm als eine Art Barriere, der Strömungsbewegungen aus dem See ins Vorbecken reduziert. Außerdem ist das Vorbecken an seinen Ufern vollständig bewaldet (siehe Abb. 4-1), so dass der Wind hier nicht direkt angreifen kann. Zudem macht die Simulation deutlich, dass mit dem geringen Durch-

fluss im Ist-Zustand von 150 l/s allein im Vorbecken Verweilzeiten von mindestens 2 bis 3 Stunden auftreten und das auch noch bei Windstärken von 6 Bft. Zusammen mit den niedrigen Strömungsgeschwindigkeiten ist daher bereits im Vorbecken mit erheblicher Sedimentation zu rechnen. Dies deckt sich auch mit Beobachtungen vor Ort. Das Wasser im Vorbecken weist, im Gegensatz zu dem im Rest des Sees, eine starke Braunfärbung auf, was darauf schließen lässt, dass ein Großteil des Eisens bereits im Vorbecken sedimentiert.

Abschießend ist festzustellen, dass die auftretenden Strömungsgeschwindigkeiten bis zu einer Windstärke von 3 Bft (entspricht $V_{10} \leq 5,5$ m/s) im gesamten Stausee Rötha Sedimentation zulassen. Bereits ab Windstärken von 4 Bft ist jedoch mit eingeschränkter Sedimentation, evtl. sogar mit Remobilisierung, im Hauptteil des Sees zu rechnen. Die Überschreitungen der kritischen Fließgeschwindigkeit $V_{crit}/f_S = 0,1$ m/s sind bei 4 Bft jedoch moderat und treten zudem nur sehr lokal auf. Außerdem entfällt im Ist-Zustand ein großer Teil der Sedimentation auf das Vorbecken (und den Zulaufgraben), in dem Sedimentation auch bei höheren Windstärken noch stattfindet.

5.2 Plan-Zustand

Der in der vorliegenden Untersuchung betrachtete Plan-Zustand richtet sich nach den Vorschlägen in der Machbarkeitsstudie der WTL [L]. Um eine signifikante Verringerung des Eisengehaltes in der Pleiße zu erreichen, soll ein großer Teil des Pleißewassers zur Sedimentation durch den Stausee Rötha geleitet werden. Ohne bauliche Veränderungen ist der Zulaufgraben für eine maximale hydraulische Belastung von 4.000 l/s ausgelegt, womit dieser Wert als Höchstdurchfluss für den Plan-Zustand angesetzt wird. Der Grundablass im Norden des Stausees hat jedoch nur eine maximale Kapazität von 2.000 l/s und selbst dabei ist im Unterlauf der Kleinen Pleiße mit Überflutungen zu rechnen (Kapazität der Kleinen Pleiße beträgt etwa 250 l/s). Zur Realisierung eines Durchflusses von 4.000 l/s durch den Stausee Rötha ist also ein alternatives Abschlagbauwerk erforderlich.

Die WTL schlägt dafür ein ca. 8 m breites Überfallwehr am westlichen Ufer südlich des Wehres Gaulis vor, über das das Wasser direkt zurück in die Pleiße entlassen wird. Die Position des alternativen Auslaufbauwerkes ist in Abb. 2-1 auf Seite 11 zu sehen. Bei der Rechennetzerstellung gelten die gleichen Einschränkungen wie auch schon beim Auslauf im Ist-Zustand (vgl. Abschnitt 4.3.1). Im Modell wird der Auslauf darum als 8 m breiter vom Wasserspiegel aus knapp 1 m tiefer Abfluss abgebildet.

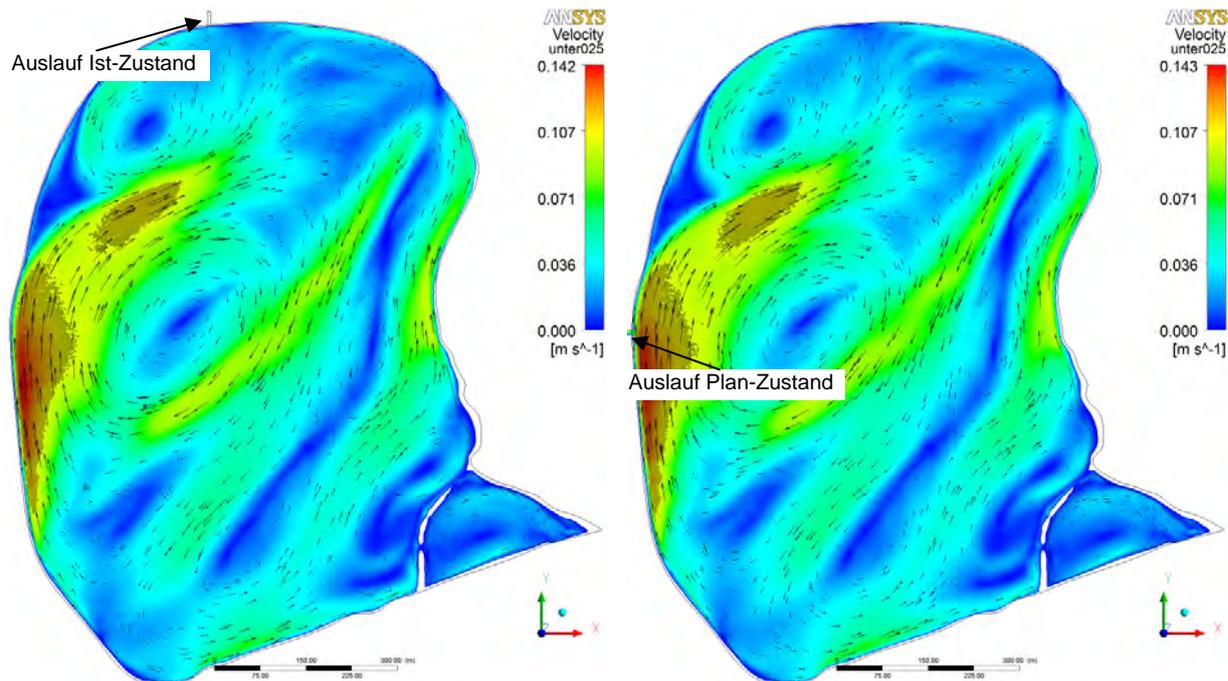


Abb. 5-3: Ist-Zustand bei Wind aus 225° mit 4 Bft (Durchfluss 150 l/s)

Abb. 5-4: Plan-Zustand bei Wind aus 225° mit 4 Bft (Durchfluss 150 l/s)

In Abb. 5-3 und Abb. 5-4 sind die Simulationsergebnisse von Ist- und Plan-Zustand bei einem Durchfluss von 150 l/s und gleichen Windrandbedingungen einander gegenüber gestellt (beide Strömungsbilder sind größer auch im Anhang enthalten). Trotz der unterschiedlichen Lage des Auslaufbauwerkes ist das Strömungsbild im See das Gleiche. Wegen der Dominanz des Windes spielt die Position des Auslaufbauwerkes für das Strömungsverhalten im See keine Rolle, sondern wirkt sich lediglich in unmittelbarer Auslaufnähe aus.

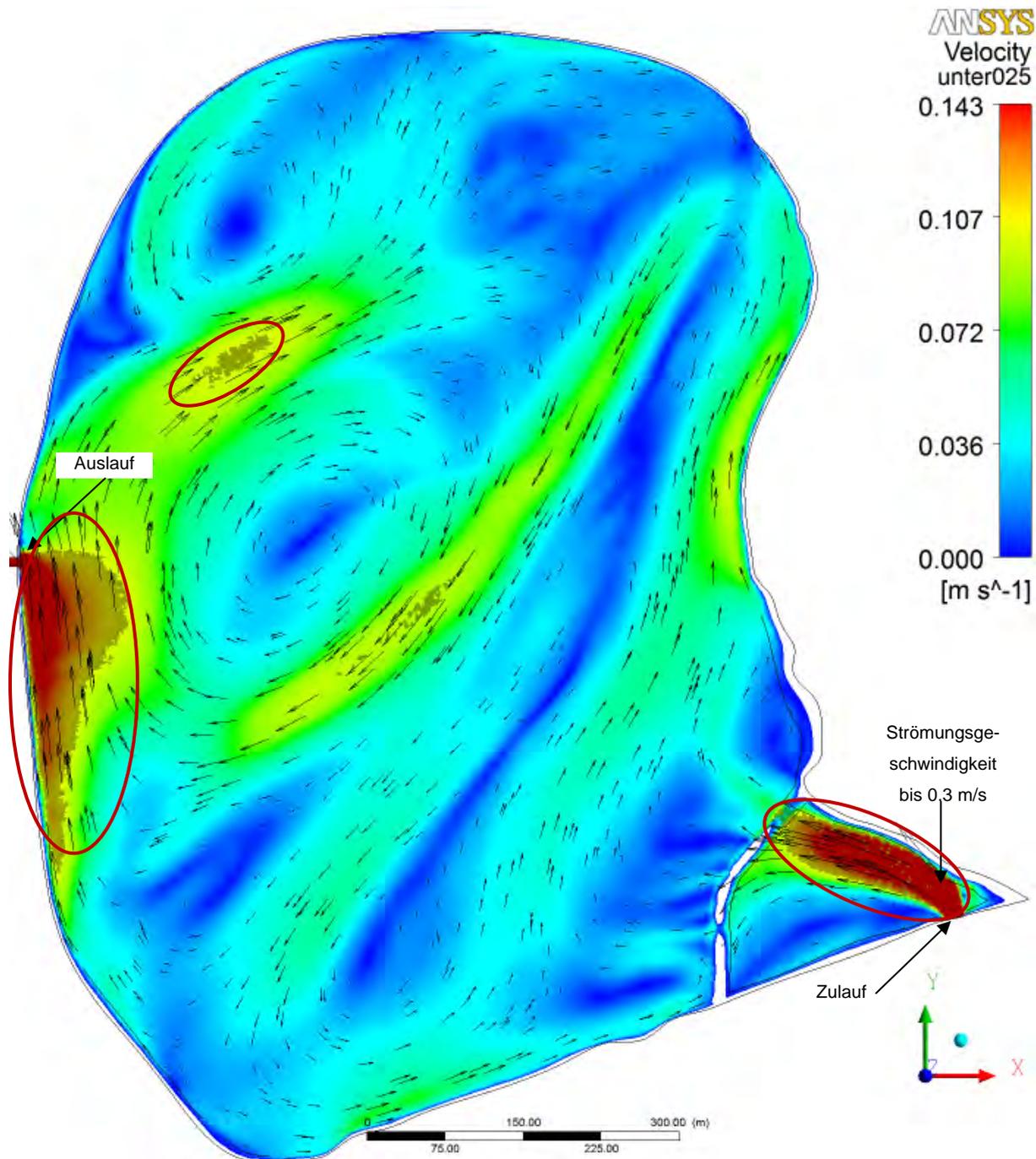


Abb. 5-5: Simuliertes Strömungsbild des Plan-Zustandes (Durchfluss 4.000 l/s) bei Wind aus 225° mit 4 Bft; Strömungsgeschwindigkeit und Richtung 25 cm unter dem Wasserspiegel; Bereiche mit Strömungsgeschwindigkeiten über $v_{crit}/f_s = 0,1$ m/s dunkel hinterlegt (und umrandet)

Eine signifikante Steigerung des Durchflusses auf 4.000 l/s führt hingegen zu lokalen Veränderungen im Strömungsbild (siehe Abb. 5-5). Zum einen entstehen in unmittel-

barer Nähe von Zu- und Auslauf durch die Konzentration der Strömung stark erhöhte Strömungsgeschwindigkeiten. Zum anderen führt der hohe Durchfluss zu einem veränderten Strömungsbild im Vorbecken. Hier ist nicht mehr die windinduzierte, sondern die durchflussinduzierte Strömung dominierend. Die Folge sind Strömungsgeschwindigkeiten im Vorbecken, die die kritische Fließgeschwindigkeit der Sedimentation $v_{crit}/f_S = 0,1$ m/s großräumig und deutlich übersteigen. Im Hauptteil des Sees ist die Strömung jedoch nach wie vor von der Wirkung des Windes dominiert. Der Durchfluss verteilt sich hier über einen großen Querschnitt und verliert sich in der windinduzierten Strömung. Das Strömungsbild entspricht dem bei einem Durchfluss von 150 l/s (siehe Abb. 5-2) ohne erhöhte Fließgeschwindigkeiten und der gleichen durchschnittlichen Strömungsgeschwindigkeit im See von 0,042 m/s (vgl. Tab. 5-2).

Im Anhang ist zusätzlich das Strömungsbild bei einem Durchfluss von 2.000 l/s abgebildet. Dafür gelten die gleichen Erkenntnisse wie für 4.000 l/s. Die Auswirkungen im Vorbecken sind zwar weniger stark, dennoch dominiert auch hier der Durchfluss mit Fließgeschwindigkeiten über $v_{crit}/f_S = 0,1$ m/s.

Da auch bei einem Durchfluss von 4.000 l/s im Hauptteil des Sees immer noch der Wind dominiert und Strömungsbild und -geschwindigkeiten denen bei 150 l/s entsprechen, gilt auch für den Plan-Zustand die kritische Windstärke des Ist-Zustandes von 4 Bft bis 5 Bft. Im Plan-Zustand ist die Windrichtung 225° besonders kritisch, da dabei die größten Fließgeschwindigkeiten der windinduzierten Strömung im Bereich des Auslaufbauwerkes auftreten. Somit besteht die erhöhte Gefahr, dass remobilisierter Eisenschlamm über das Überfallwehr zurück in die Pleiße gelangt. Bei Windstärken bis 3 Bft findet Sedimentation auch im Plan-Zustand im gesamten Hauptteil des Stausees statt (siehe Anhang).

Allerdings fällt bei hohen Durchflüssen das Vorbecken als geschützter Sedimentationsbereich weg. Im Ist-Zustand ist das Vorbecken durch den Damm und die ufernahe Bewaldung vor windinduzierter Strömung weitgehend geschützt, so dass hier Sedimentation auch noch bei Windgeschwindigkeiten von 6 Bft stattfindet. Bei Durchflüssen von 2.000 l/s oder 4.000 l/s ist hier jedoch nicht mehr mit Sedimentation

zu rechnen, da die durchflussinduzierte Strömung die kritische Fließgeschwindigkeit übersteigt und die Verweildauer drastisch reduziert wird. Bei Wind aus 225° mit 4 Bft und 150 l/s Durchfluss beträgt die Verweildauer im Vorbecken 3 h, bei 2.000 l/s nur 30 min und bei 4.000 l/s nur noch 15 min.

In Abb. 5-6 bzw. Abb. 5-7 ist für die kritischen Windgeschwindigkeiten 4 Bft bzw. 5 Bft dargestellt, an wie viel Tagen im Monat die betreffende Windstärke im Mittel auftritt. Darin ist zu erkennen, dass mit beiden Windstärken das gesamte Jahr über zu rechnen ist. Zwar tritt Windstärke 5 Bft gehäuft in den Monaten Dezember bis März auf. Doch auch in den restlichen Monaten sind 5 Bft noch drei bis sechs Mal im Monat zu erwarten. Eine Festlegung von Zeiträumen, in denen Sedimentation ungehindert stattfindet, kann also nicht erfolgen, da kritische Windgeschwindigkeiten das gesamte Jahr über auftreten.

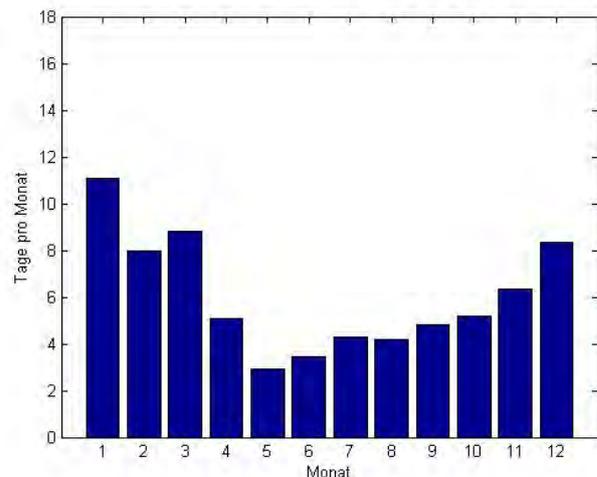
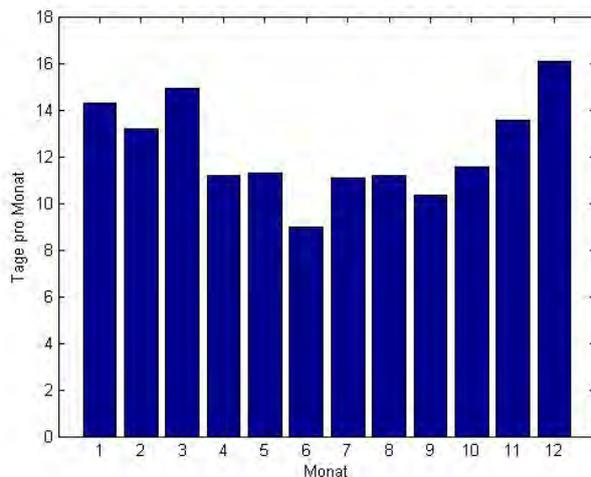


Abb. 5-6: Auftreten der Windstärke 4 Bft

Abb. 5-7: Auftreten der Windstärke 5 Bft

Eine Vorhersage von Sedimentationsbereichen im Stausee Rötha ist nicht möglich. Je nach Windrichtung, stellen sich im See sehr unterschiedliche Strömungsbilder ein, was dazu führt, dass sich das Sediment gleichmäßig im See verteilt. Bei sehr geringen Durchflüssen wie im Ist-Zustand von 150 l/s kann mit einem Großteil der Sedimentation im Vorbecken gerechnet werden. Bei höheren Durchflüssen bis 4.000 l/s wie im Plan-Zustand fällt das Vorbecken als Sedimentationsbereich jedoch weg. Hier und in Auslaufnähe ist wegen der hohen Strömungsgeschwindigkeiten sogar die

Remobilisierung von Eisenschlamm zu erwarten. Bei einer Erhöhung des Durchflusses auf 4.000 l/s, ist daher zu empfehlen das Vorbecken zusammen mit dem Zulaufgraben im Vorfeld auszubaggern, um übermäßige Remobilisierung von Eisenschlamm und dessen Ausspülung in den Hauptteil des Sees zu vermeiden.

Die gleichmäßige Verteilung von Sediment im Hauptteil des Sees macht ein regelmäßiges ausbaggern des gesamten Sees erforderlich. Zur Abschätzung der Menge abgesetzter Sedimente und der Frequenz der Sedimentberäumung sind weitere langfristige Konzentrationsmessungen zu empfehlen, um auch jahreszeitliche Schwankungen in der Sedimentationsrate zu erfassen.

6 Zusammenfassung

In der vorliegenden Arbeit wurde die Sedimentationsfähigkeit von im Pleißewasser enthaltenem Eisen im Stausee Rötha mithilfe der dreidimensionalen numerischen Strömungssimulation untersucht. Neben dem Ist-Zustand mit einer hydraulischen Belastung von 150 l/s wurde als Plan-Zustand ein Durchfluss von 2.000 l/s bzw. 4.000 l/s betrachtet. Alle Simulationen des Plan-Zustandes gehen von einem neu zu errichtenden Auslaufbauwerk am Westufer des Stausees Rötha aus.

Zur Simulation der Strömungsvorgänge im Stausee Rötha wurde ein numerisches Modell unter Berücksichtigung des Windes erstellt. Vom IWS durchgeführte ADCP-Messungen der Strömungsgeschwindigkeit im See dienten der Kalibrierung und Validierung des Modells. Die Bewertung der Sedimentation erfolgt indirekt über die simulierten Strömungsgeschwindigkeiten auf Grundlage des Pleißemonitorings der SGL von 2009 [K]. Darin wurde für Eisen im Pleißewasser eine mittlere kritische Fließgeschwindigkeit, unter der Sedimentation stattfindet, von $v_{\text{crit}} = 0,15 \text{ m/s}$ festgestellt. Aufgrund von Schwankungen der Werte des Pleißemonitorings und Unsicherheiten im numerischen Modell wird in der vorliegenden Untersuchung ein Sicherheitsfaktor $f_S = 1,5$ verwendet, woraus sich als kritischer Wert für die Sedimentation $v_{\text{crit}}/f_S = 0,1 \text{ m/s}$ ergibt. Weitere experimentelle Versuche unter Laborbedingungen wären zur Absicherung der kritischen Fließgeschwindigkeit v_{crit} erforderlich. Unter definierten Bedingungen könnte dieser Wert mit einem wesentlich kleineren Schwankungsbereich unter Verwendung von Konzentrationsmessungen bestimmt werden.

Im numerischen Modell konnte eine gute qualitative Übereinstimmung mit den ADCP-Messungen der Strömungsgeschwindigkeit erreicht werden. Aufgrund der stark instationären Windverhältnisse ist eine Simulation des genauen Strömungsbildes im Stausee Rötha jedoch nicht möglich, da die ständigen Änderungen der Strömung mit dem stationären Modell nicht abgebildet werden. Über die Fließgeschwindigkeiten kann die Sedimentation dennoch bewertet werden. In der Simulation ergab sich ein Strömungsverhalten, das die Sedimentation von Eisen im Stausee großflächig zulässt, was sich mit Konzentrationsmessungen des IWS deckt, in denen im Ist-Zustand gute Eisenrückhalteraten bestimmt wurden.

Die vorliegende Untersuchung zeigte, dass der Wind die dominierende strömungsinduzierende Kraft im Stausee Rötha ist. Strömungsgeschwindigkeiten über $v_{crit}/f_S = 0,1$ m/s treten erstmals bei Windstärken von 4 Bft auf, die Überschreitungen sind jedoch gering und nur auf kleine Bereiche beschränkt, so dass hier noch nicht mit einer Beeinträchtigung der Sedimentation zu rechnen ist. Bei 5 Bft treten im See lokal Strömungsgeschwindigkeiten deutlich über der kritischen Fließgeschwindigkeit $v_{crit}/f_S = 0,1$ m/s auf. Dies führt jedoch nicht gezwungenermaßen zu einer Erhöhung der Abflusskonzentration von Eisen aus dem See, dies ist nur dann der Fall, wenn sich ein Bereich erhöhter Strömungsgeschwindigkeit in der Nähe des Auslaufes befindet. Mit Windstärken von 5 Bft ist an durchschnittlich 7,4 Tagen im Monat zu rechnen, stärkere Winde kommen nur selten vor (< 3 %).

Wegen der Dominanz des Windeinflusses hat eine Verlegung des Auslaufbauwerkes vom Nord- zum Westufer des Sees ausschließlich eine Auswirkung auf die Strömung in unmittelbarer Auslaufnähe. Auch eine Steigerung der hydraulischen Belastung auf 4.000 l/s wirkt sich lediglich auf die Strömung im Vorbecken und die in Auslaufnähe aus. Allerdings führt eine Erhöhung des Durchflusses zu einer Verlagerung des Sedimentationsbereichs von Vorbecken und Zulaufgraben im Ist-Zustand zum Hauptteil des Sees im Plan-Zustand. Eine Kurzschlussströmung vom Ein- zum Auslauf ist weder im Ist- noch im Plan-Zustand zu erwarten. Damit ist die Sedimentationsfähigkeit auch im Plan-Zustand gegeben, so dass mit ähnlichen Eisenrückhalteraten wie im Ist-Zustand zu rechnen ist. Diese wurden vom IWS für die Herbstmonate zu 48 % bis 93 % Eisenrückhalt (Ablaufkonzentration 0,3 mg/l bis 3,2 mg/l Gesamteisen) und für die Sommermonate zu 13 % bis 50 % (Ablaufkonzentration 1,7 mg/l bis 3,6 mg/l Gesamteisen) ermittelt. Es verbleibt also in jedem Fall eine – zeitweise auch stark reduzierte - Restkonzentration an Eisen im Pleißewasser, die nicht absetzbar ist.

In weiteren numerischen Untersuchungen könnten Baumaßnahmen zur Beeinflussung der Strömung im Vorbecken untersucht werden. Durch eine gezielte Zwangsführung der Strömung am Zulauf und eine Vergrößerung des Vorbeckens ist es denkbar die Strömung so zu beeinflussen, dass auch bei einem Durchfluss von 4.000 l/s ein Großteil der Sedimentation im Vorbecken stattfindet. Voraussetzung

dafür wären jedoch genauere Kenntnisse zum Flockulations-, Sedimentations- und Remobilisierungsverhalten des Eisens im Stausee Rötha, um diese komplizierten Prozesse ausreichend zu berücksichtigen zu können. Diese Kenntnisse können nur in experimentellen Untersuchungen gewonnen werden.

Zur Nutzung des Stausees Rötha im Plan-Zustand (neu zu errichtendes Auslaufbauwerk am Westufer, Durchfluss bis 4.000 l/s) als Sedimentationsbecken für eisenhaltiges Pleißewasser ergeben sich damit zwei Möglichkeiten:

- a) Keine weiteren baulichen Maßnahmen. Damit gelangt das Eisen bis in den Hauptteil des Sees, wo es sedimentiert. Die regelmäßige Schlammberäumung im gesamten Stausee in großen Zeitabständen wäre dabei nötig.
- b) Bauliche Maßnahmen im Vorbecken, um die Strömung so zu beeinflussen, dass der Großteil der Eisensedimentation im Vorbecken stattfindet und nur wenig Eisen in den Hauptteil des Sees gelangt. Voraussetzung dafür sind weitere experimentelle und numerische Untersuchungen. Die regelmäßige Schlammberäumung im Vorbecken in wesentlich geringeren Zeitabständen als in a) wäre dabei nötig.

Vor jeglichen Maßnahmen zur Herstellung des Plan-Zustandes ist bei beiden Varianten die einmalige Schlammberäumung des gesamten Stausees zur Beseitigung der vorhandenen Eisenschlammbelastung erforderlich.

Projektleiter: M.Sc. Dipl.-Ing. (FH) Tilo Sahlbach

Projektbearbeiter: Dipl.-Ing. Felix Marlow

Leipzig, den 25.06.2012

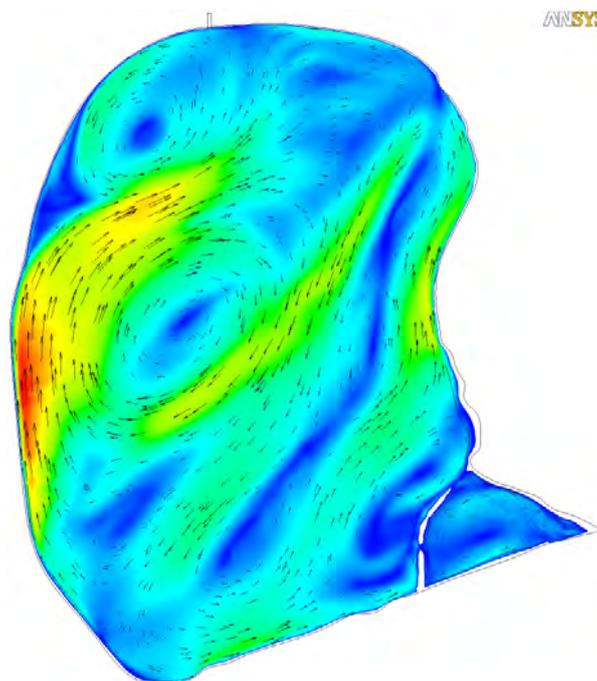
Prof. Dr.-Ing. Hubertus Milke
Wissenschaftlicher Direktor

240004

**Numerische Modellierung und Simulation des Strömungs-
und Sedimentationsverhaltens im Stausee Rötha einschl.
In-situ-Messung zur Schaffung der Datenbrundlage**

- Numerische Simulation -

Stand: 03/04/2012



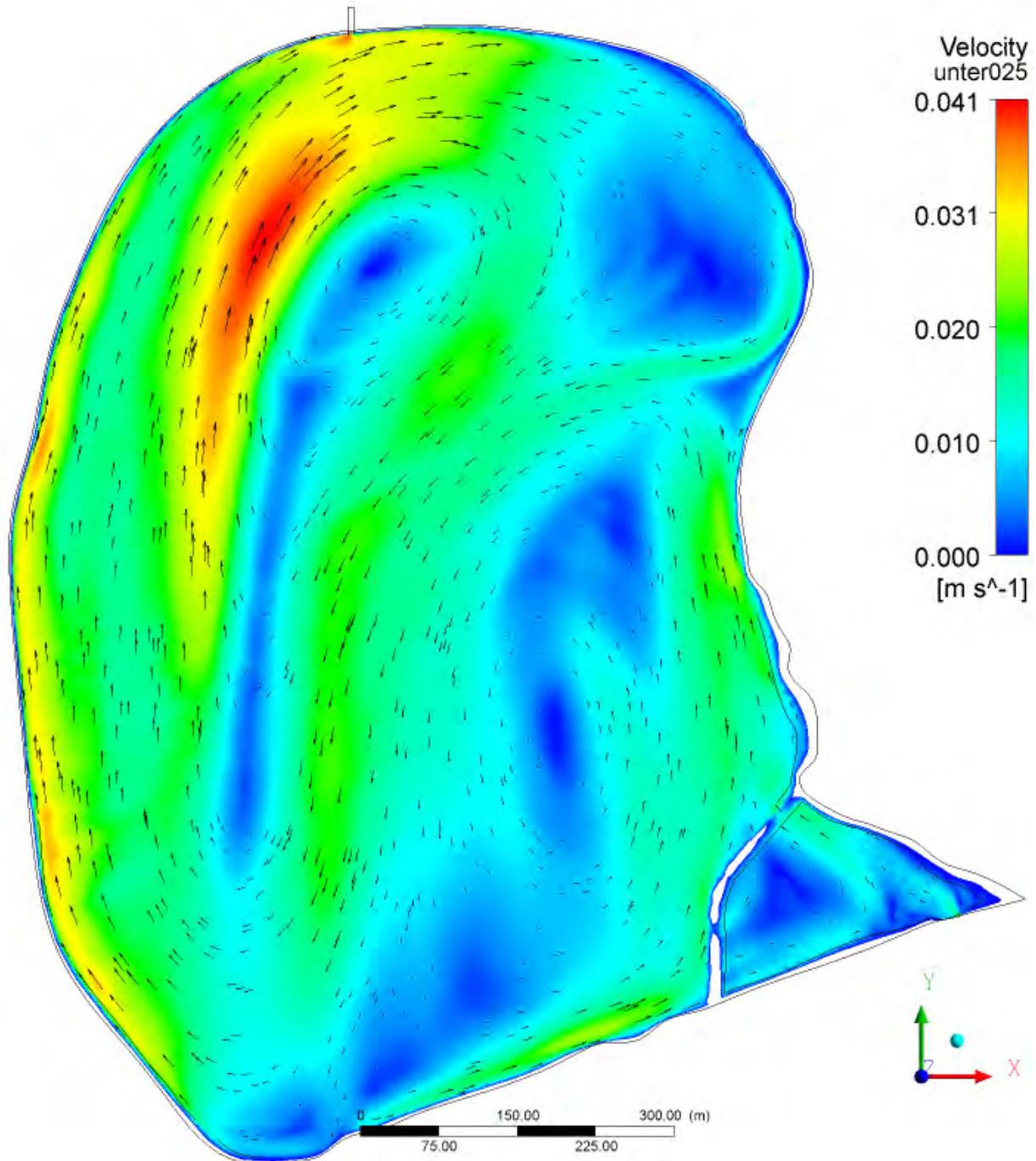
Anhang 1

Ist-Zustand mit statistischen Windereignissen

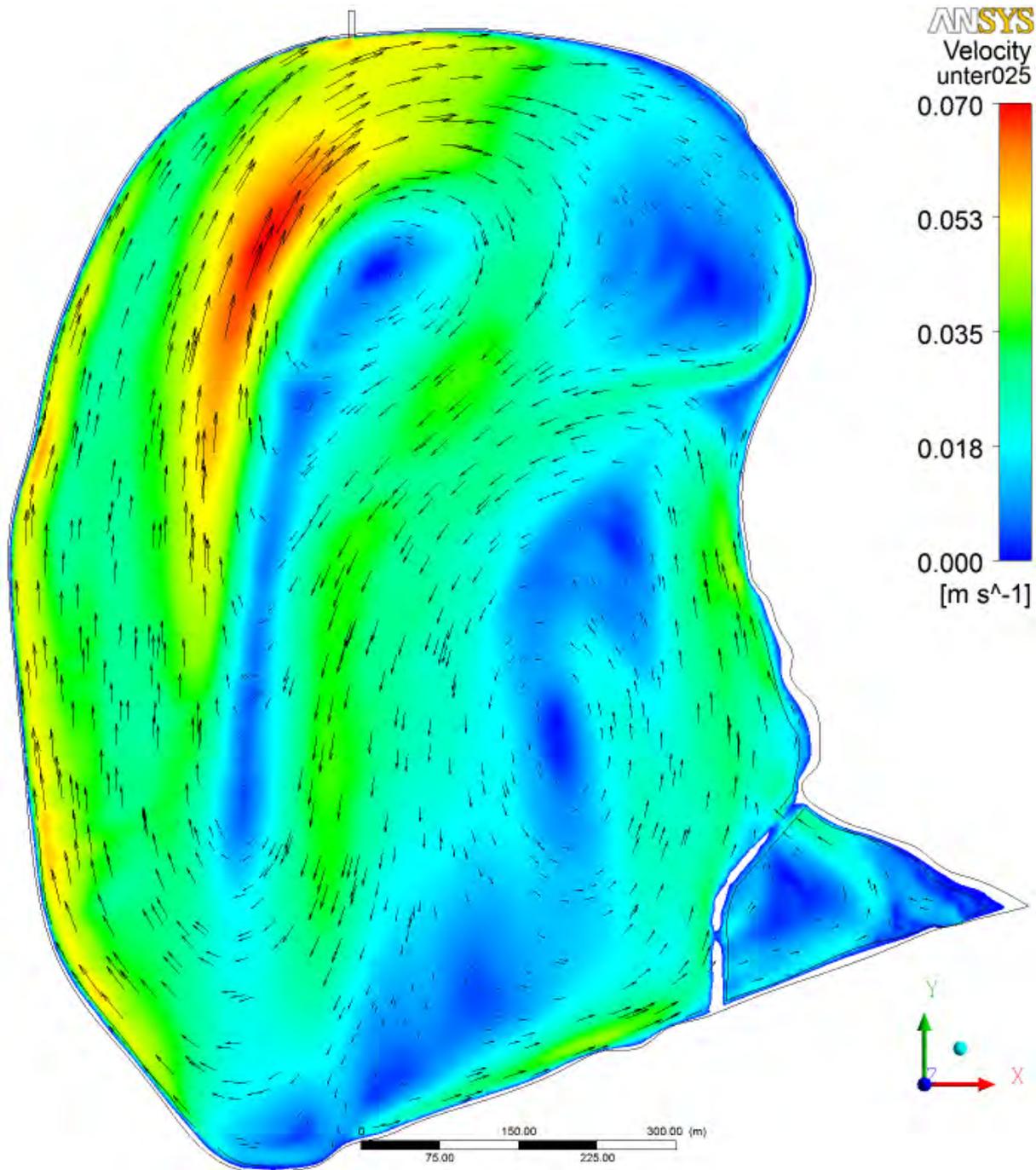
Anhangsverzeichnis

Anhang 1 - 1:	Simuliertes Strömungsbild im Stausee Rötha bei Wind aus 180° mit 2 Bft; Strömungsgeschwindigkeit und Richtung 25 cm unter dem Wasserspiegel.....	4
Anhang 1 - 2:	Simuliertes Strömungsbild im Stausee Rötha bei Wind aus 180° mit 3 Bft; Strömungsgeschwindigkeit und Richtung 25 cm unter dem Wasserspiegel.....	5
Anhang 1 - 3:	Simuliertes Strömungsbild im Stausee Rötha bei Wind aus 225° mit 4 Bft; Strömungsgeschwindigkeit und Richtung 25 cm unter dem Wasserspiegel; Bereiche mit Strömungsgeschwindigkeiten über $V_{crit}/f_S = 0,1$ m/s dunkel hinterlegt.....	6
Anhang 1 - 4:	Simuliertes Strömungsbild im Stausee Rötha bei Wind aus 225° mit 5 Bft; Strömungsgeschwindigkeit und Richtung 25 cm unter dem Wasserspiegel; Bereiche mit Strömungsgeschwindigkeiten über $V_{crit}/f_S = 0,1$ m/s dunkel hinterlegt.....	7
Anhang 1 - 5:	Simuliertes Strömungsbild im Stausee Rötha bei Wind aus 225° mit 6 Bft; Strömungsgeschwindigkeit und Richtung 25 cm unter dem Wasserspiegel; Bereiche mit Strömungsgeschwindigkeiten über $V_{crit}/f_S = 0,1$ m/s dunkel hinterlegt.....	8
Anhang 1 - 6:	Simuliertes Strömungsbild im Stausee Rötha bei Wind aus 270° mit 9 Bft; Strömungsgeschwindigkeit und Richtung 25 cm unter dem Wasserspiegel; Bereiche mit Strömungsgeschwindigkeiten über $V_{crit}/f_S = 0,1$ m/s dunkel hinterlegt.....	9
Anhang 1 - 7:	Simuliertes Strömungsbild im Stausee Rötha bei Wind aus 0° mit 4 Bft; Strömungsgeschwindigkeit und Richtung 25 cm unter dem Wasserspiegel; Bereiche mit Strömungsgeschwindigkeiten über $V_{crit}/f_S = 0,1$ m/s dunkel hinterlegt.....	10
Anhang 1 - 8:	Simuliertes Strömungsbild im Stausee Rötha bei Wind aus 45° mit 4 Bft; Strömungsgeschwindigkeit und Richtung 25 cm unter dem Wasserspiegel; Bereiche mit Strömungsgeschwindigkeiten über $V_{crit}/f_S = 0,1$ m/s dunkel hinterlegt.....	11

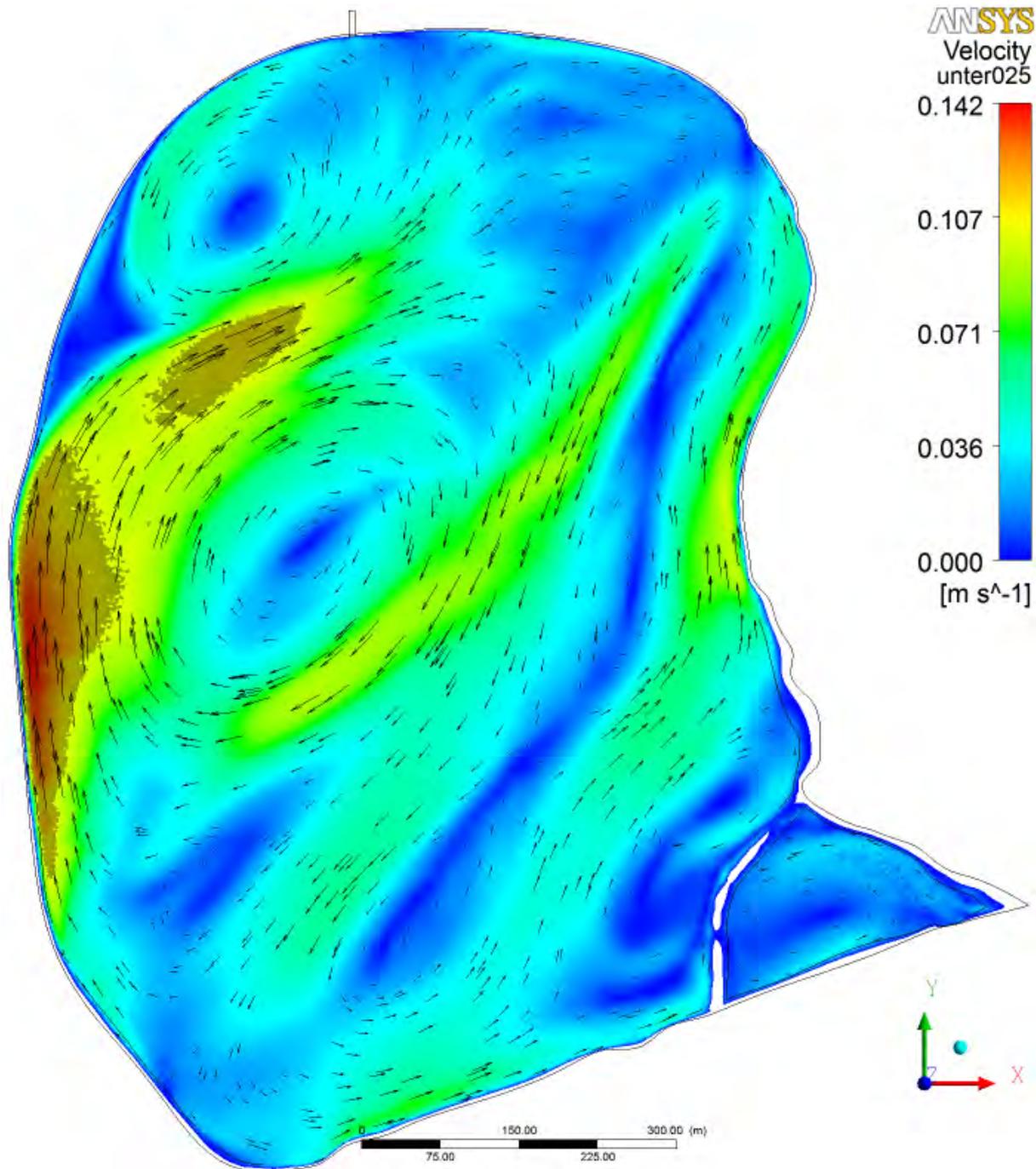
Anhang 1 - 9:	Simuliertes Strömungsbild im Stausee Rötha bei Wind aus 90° mit 4 Bft; Strömungsgeschwindigkeit und Richtung 25 cm unter dem Wasserspiegel; Bereiche mit Strömungsgeschwindigkeiten über $V_{crit}/f_S = 0,1$ m/s dunkel hinterlegt.....	12
Anhang 1 - 10:	Simuliertes Strömungsbild im Stausee Rötha bei Wind aus 135° mit 4 Bft; Strömungsgeschwindigkeit und Richtung 25 cm unter dem Wasserspiegel; Bereiche mit Strömungsgeschwindigkeiten über $V_{crit}/f_S = 0,1$ m/s dunkel hinterlegt.....	13
Anhang 1 - 11:	Simuliertes Strömungsbild im Stausee Rötha bei Wind aus 180° mit 4 Bft; Strömungsgeschwindigkeit und Richtung 25 cm unter dem Wasserspiegel; Bereiche mit Strömungsgeschwindigkeiten über $V_{crit}/f_S = 0,1$ m/s dunkel hinterlegt.....	14
Anhang 1 - 12:	Simuliertes Strömungsbild im Stausee Rötha bei Wind aus 270° mit 4 Bft; Strömungsgeschwindigkeit und Richtung 25 cm unter dem Wasserspiegel; Bereiche mit Strömungsgeschwindigkeiten über $V_{crit}/f_S = 0,1$ m/s dunkel hinterlegt.....	15
Anhang 1 - 13:	Simuliertes Strömungsbild im Stausee Rötha bei Wind aus 315° mit 4 Bft; Strömungsgeschwindigkeit und Richtung 25 cm unter dem Wasserspiegel; Bereiche mit Strömungsgeschwindigkeiten über $V_{crit}/f_S = 0,1$ m/s dunkel hinterlegt.....	16



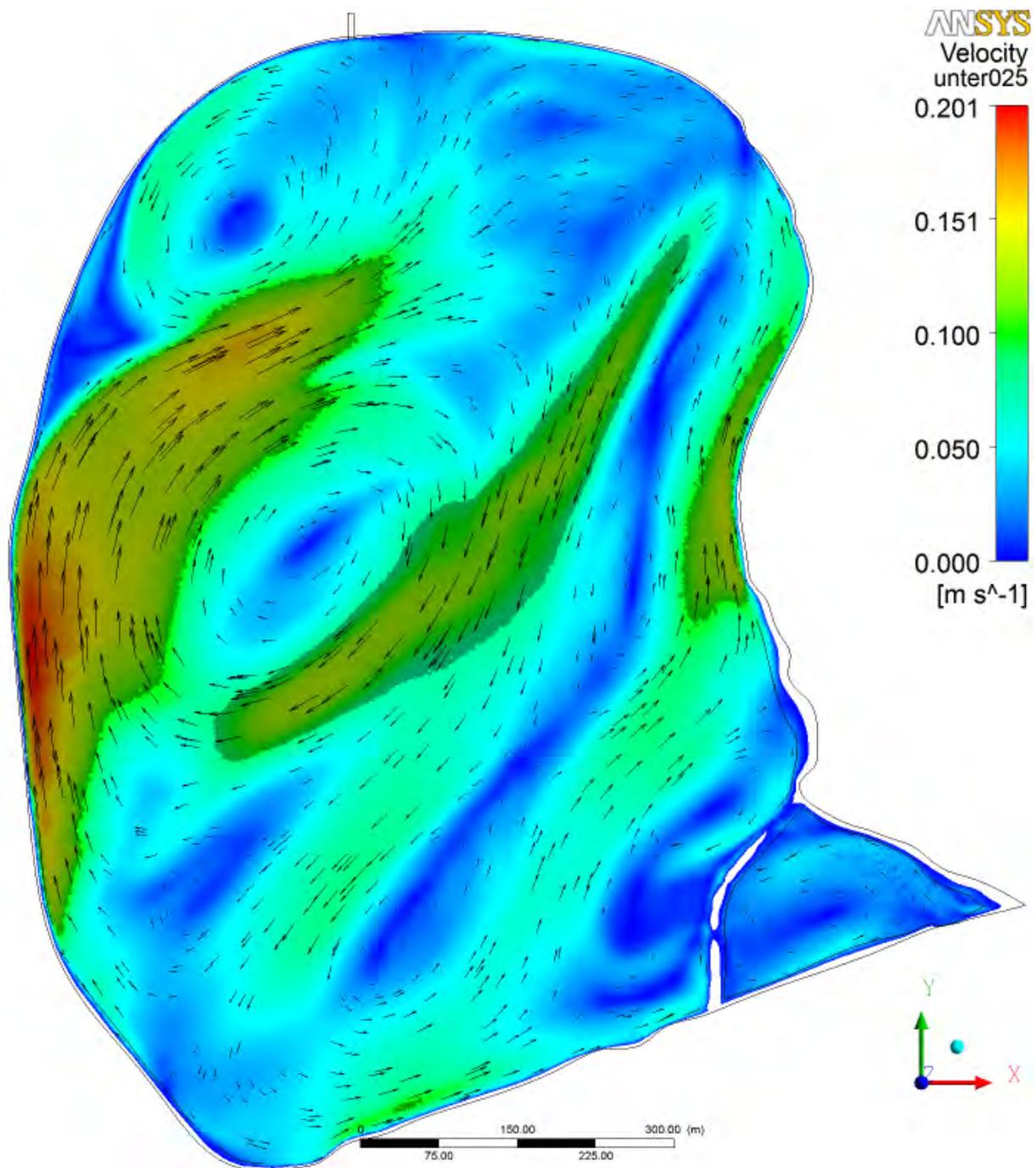
Anhang 1 - 1: Simuliertes Strömungsbild im Stausee Rötha bei Wind aus 180° mit 2 Bft; Strömungsgeschwindigkeit und Richtung 25 cm unter dem Wasserspiegel



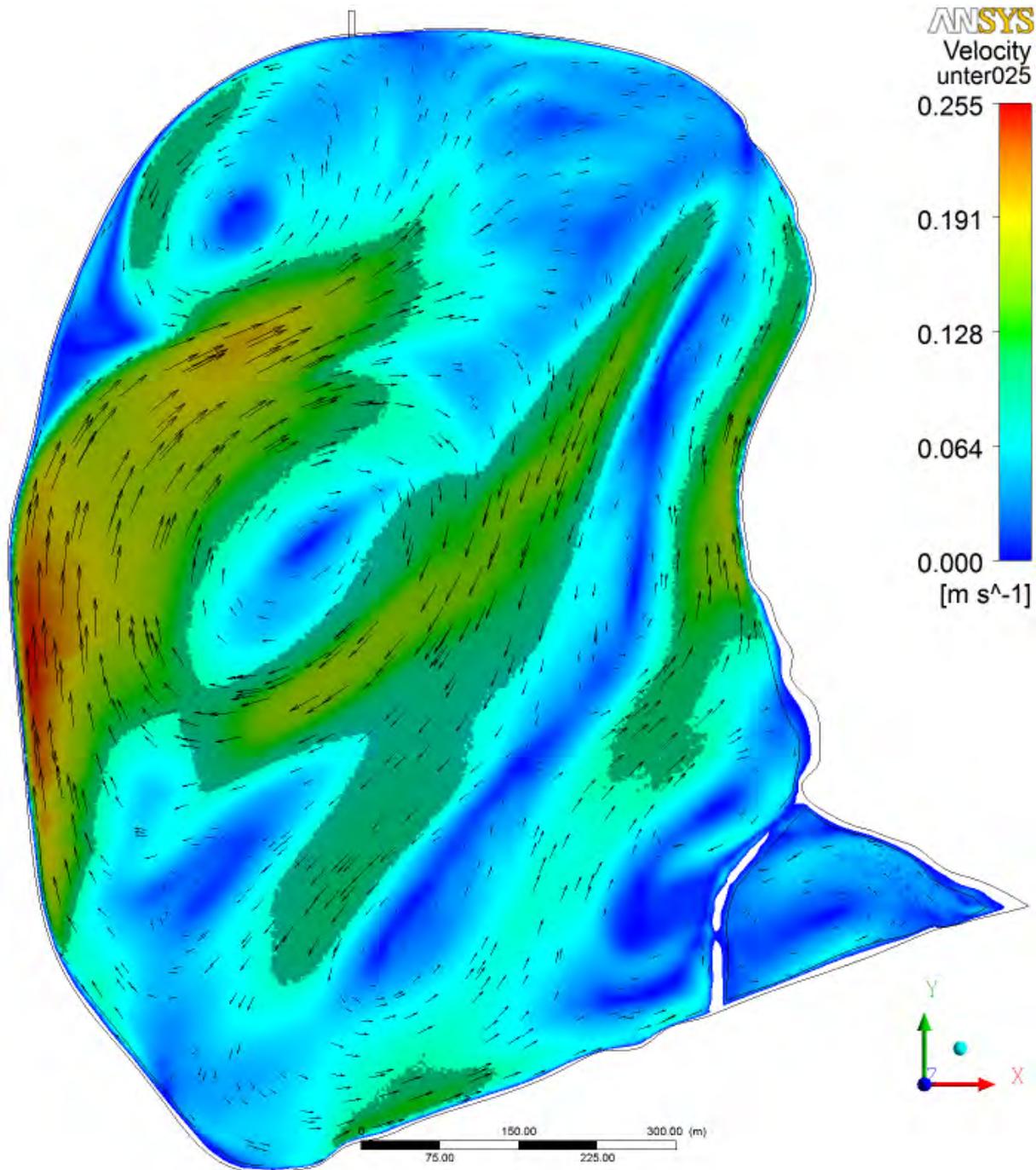
Anhang 1 - 2: Simuliertes Strömungsbild im Stausee Rötha bei Wind aus 180° mit 3 Bft; Strömungsgeschwindigkeit und Richtung 25 cm unter dem Wasserspiegel



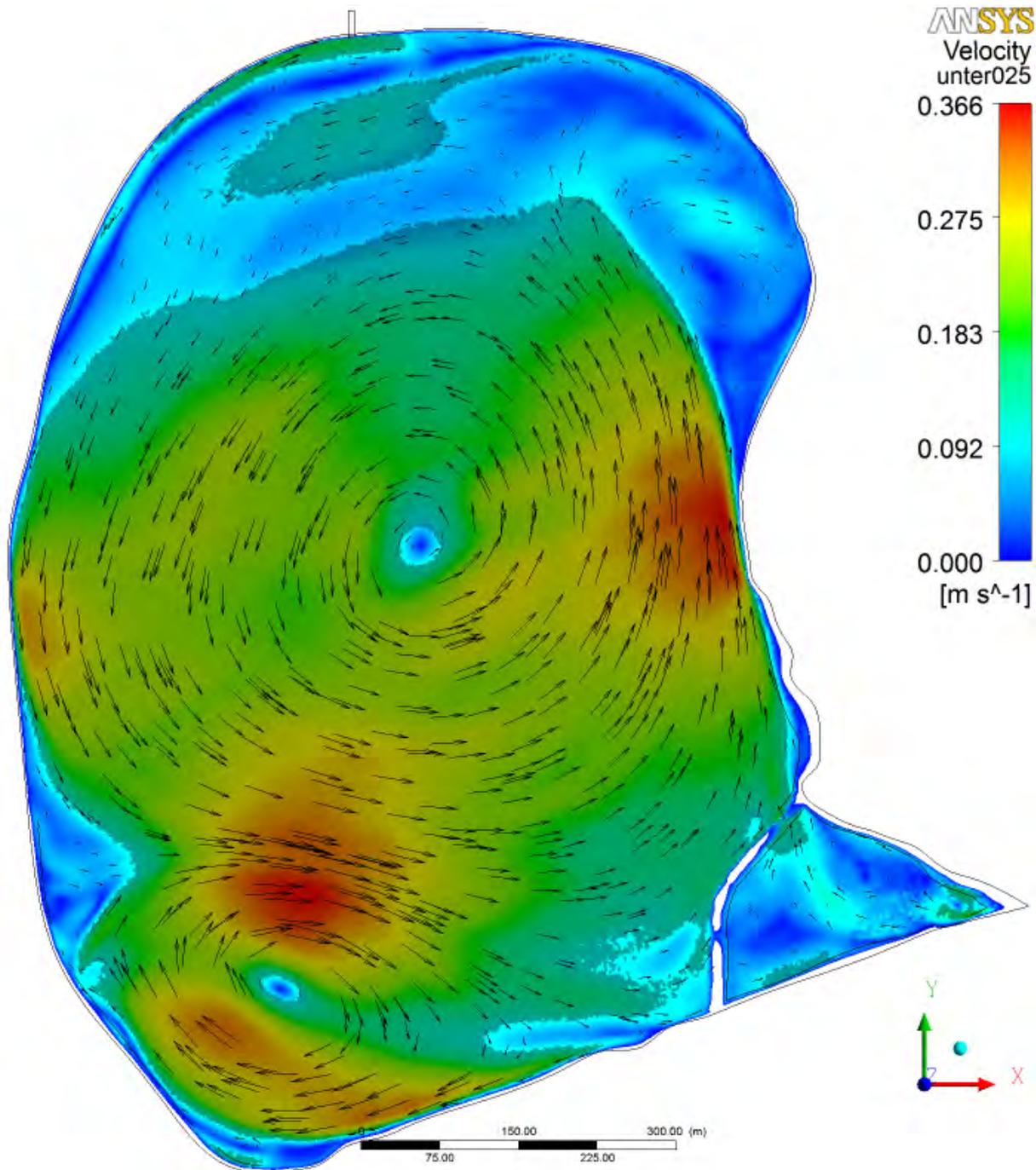
Anhang 1 - 3: Simuliertes Strömungsbild im Stausee Rötha bei Wind aus 225° mit 4 Bft; Strömungsgeschwindigkeit und Richtung 25 cm unter dem Wasserspiegel; Bereiche mit Strömungsgeschwindigkeiten über $V_{crit}/f_S = 0,1$ m/s dunkel hinterlegt



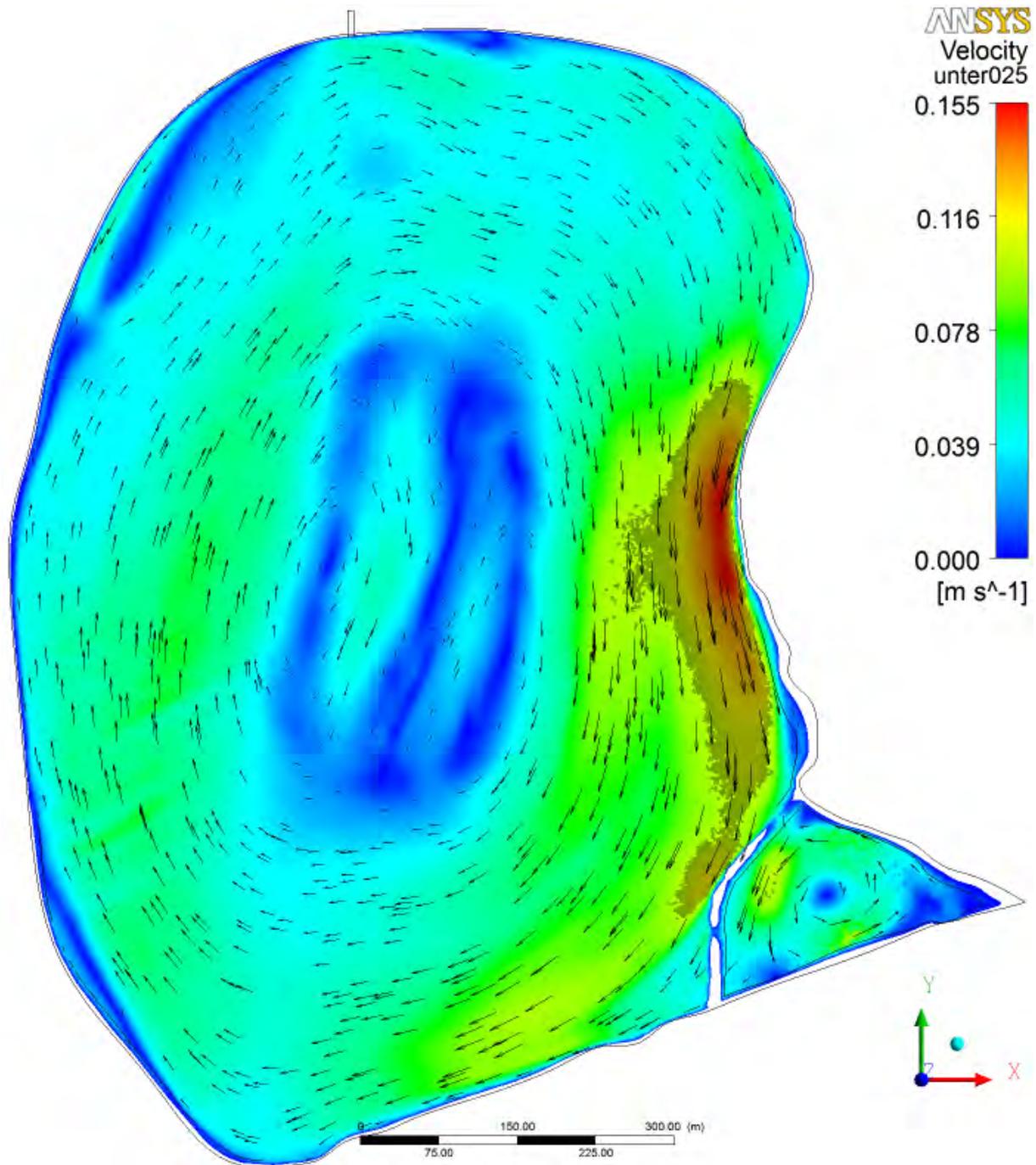
Anhang 1 - 4: Simuliertes Strömungsbild im Stausee Rötha bei Wind aus 225° mit 5 Bft; Strömungsgeschwindigkeit und Richtung 25 cm unter dem Wasserspiegel; Bereiche mit Strömungsgeschwindigkeiten über $V_{crit}/f_s = 0,1$ m/s dunkel hinterlegt



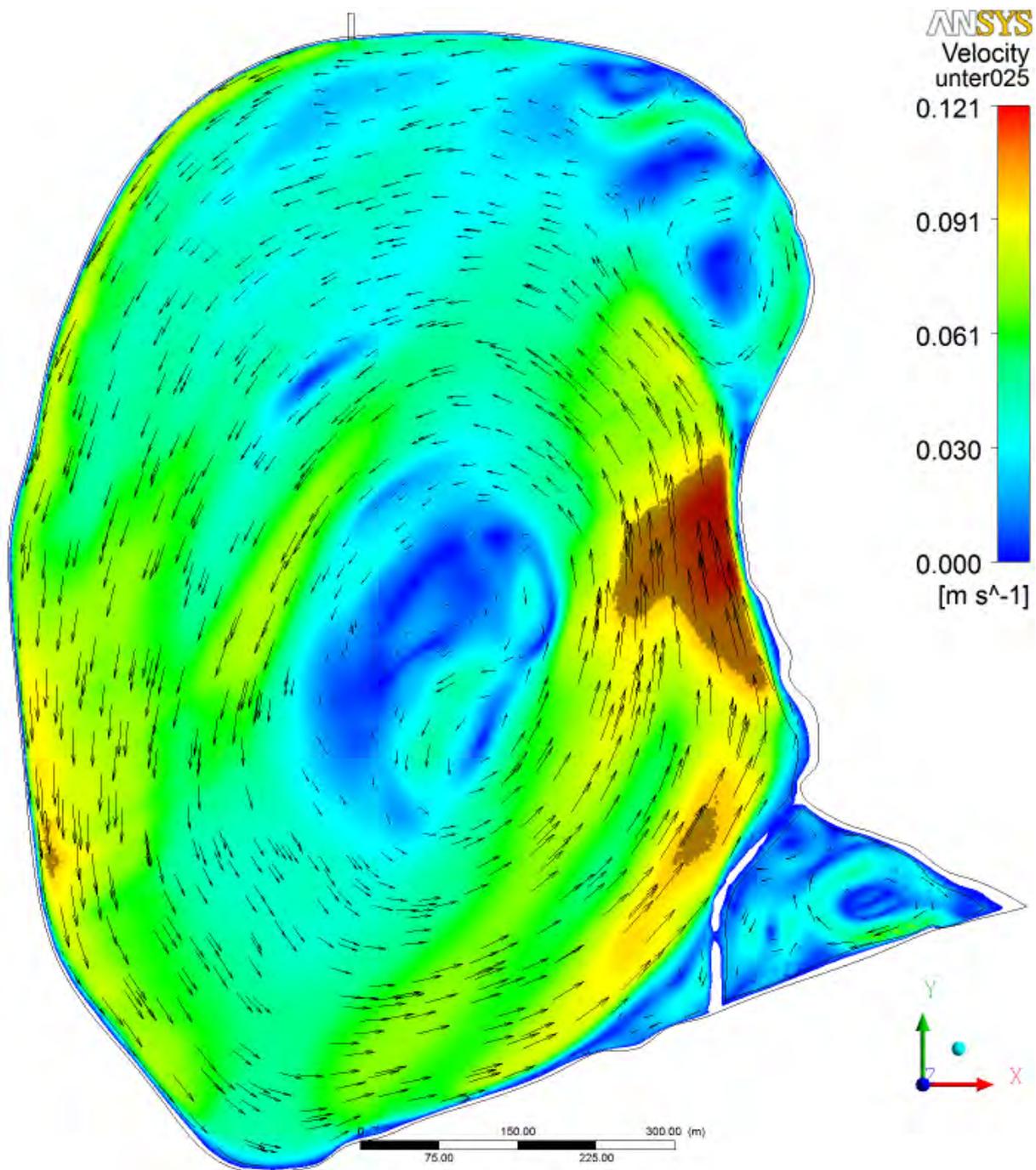
Anhang 1 - 5: Simuliertes Strömungsbild im Stausee Rötha bei Wind aus 225° mit 6 Bft; Strömungsgeschwindigkeit und Richtung 25 cm unter dem Wasserspiegel; Bereiche mit Strömungsgeschwindigkeiten über $V_{crit}/f_s = 0,1$ m/s dunkel hinterlegt



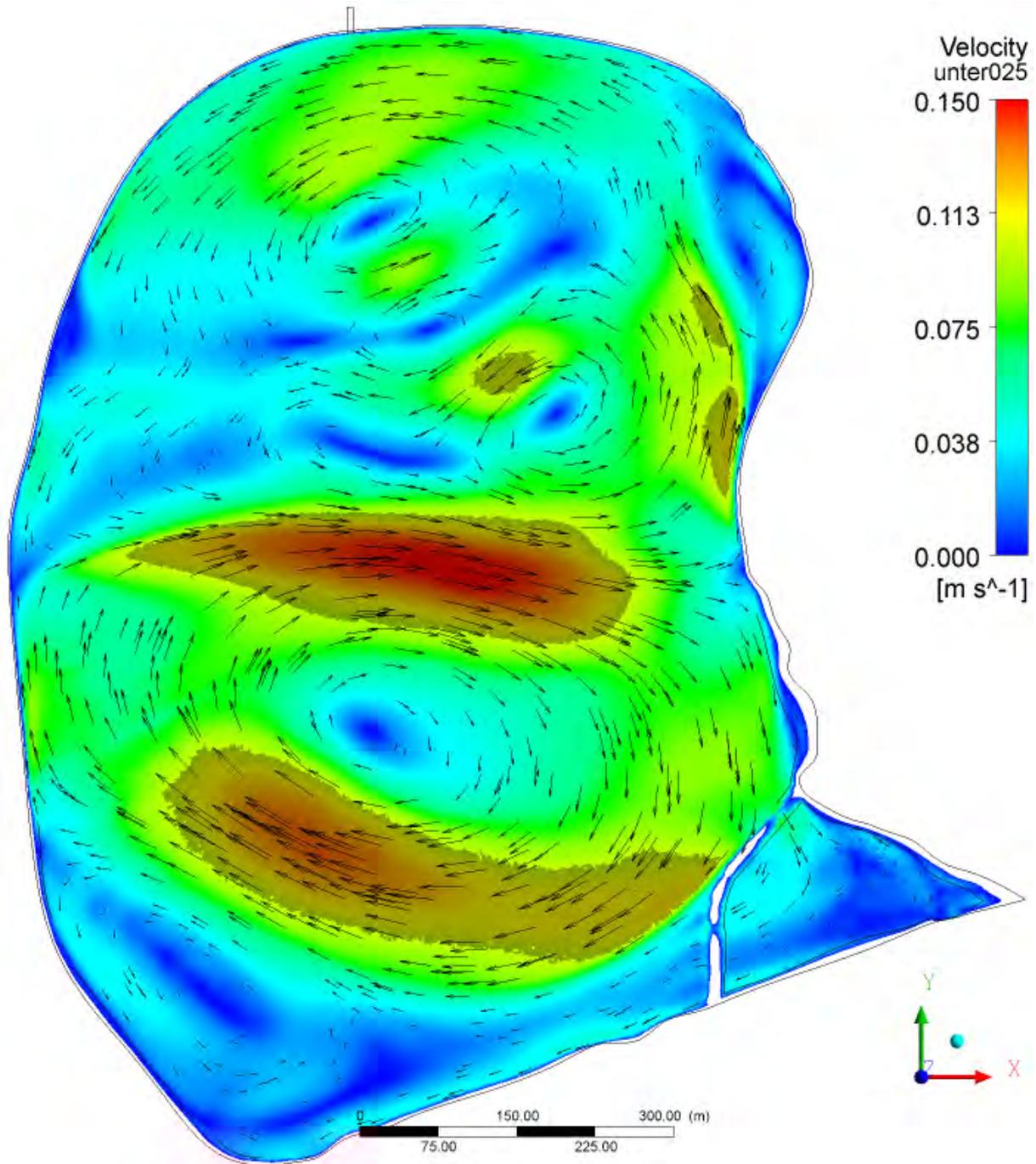
Anhang 1 - 6: Simuliertes Strömungsbild im Stausee Rötha bei Wind aus 270° mit 9 Bft; Strömungsgeschwindigkeit und Richtung 25 cm unter dem Wasserspiegel; Bereiche mit Strömungsgeschwindigkeiten über $V_{\text{crit}}/f_s = 0,1 \text{ m/s}$ dunkel hinterlegt



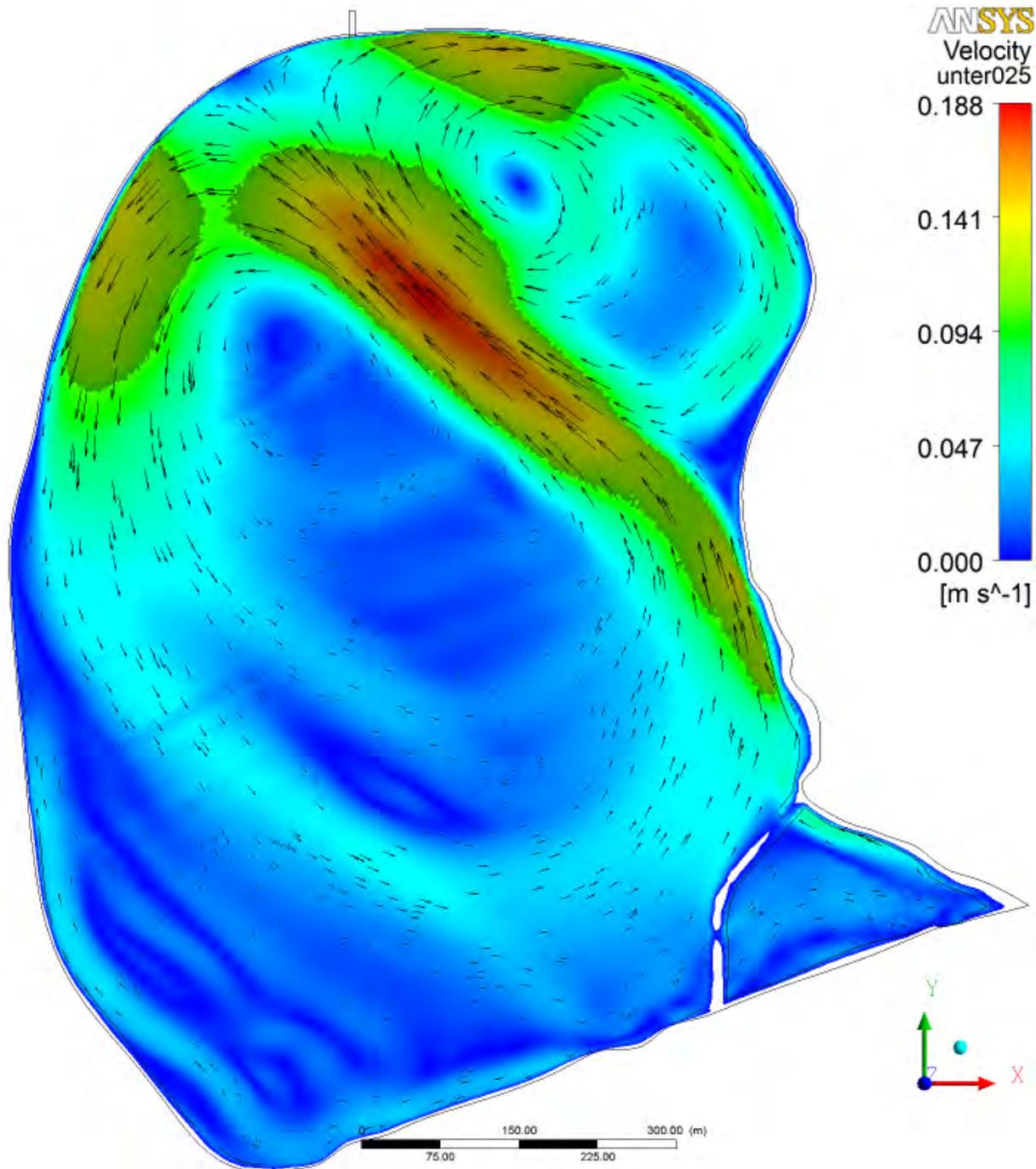
Anhang 1 - 7: Simuliertes Strömungsbild im Stausee Rötha bei Wind aus 0° mit 4 Bft; Strömungsgeschwindigkeit und Richtung 25 cm unter dem Wasserspiegel; Bereiche mit Strömungsgeschwindigkeiten über $V_{crit}/f_s = 0,1$ m/s dunkel hinterlegt



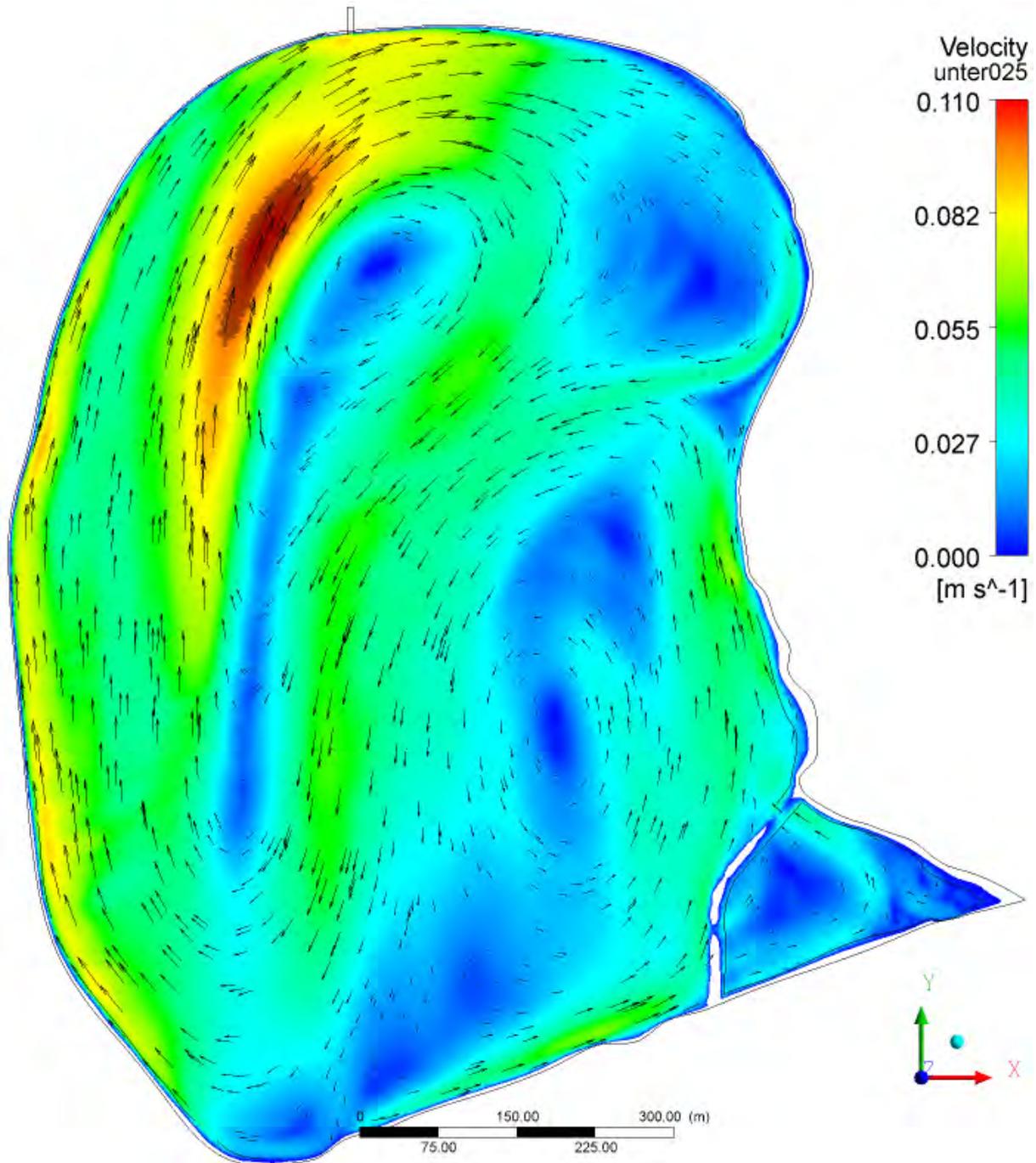
Anhang 1 - 8: Simuliertes Strömungsbild im Stausee Rötha bei Wind aus 45° mit 4 Bft; Strömungsgeschwindigkeit und Richtung 25 cm unter dem Wasserspiegel; Bereiche mit Strömungsgeschwindigkeiten über $V_{crit}/f_s = 0,1$ m/s dunkel hinterlegt



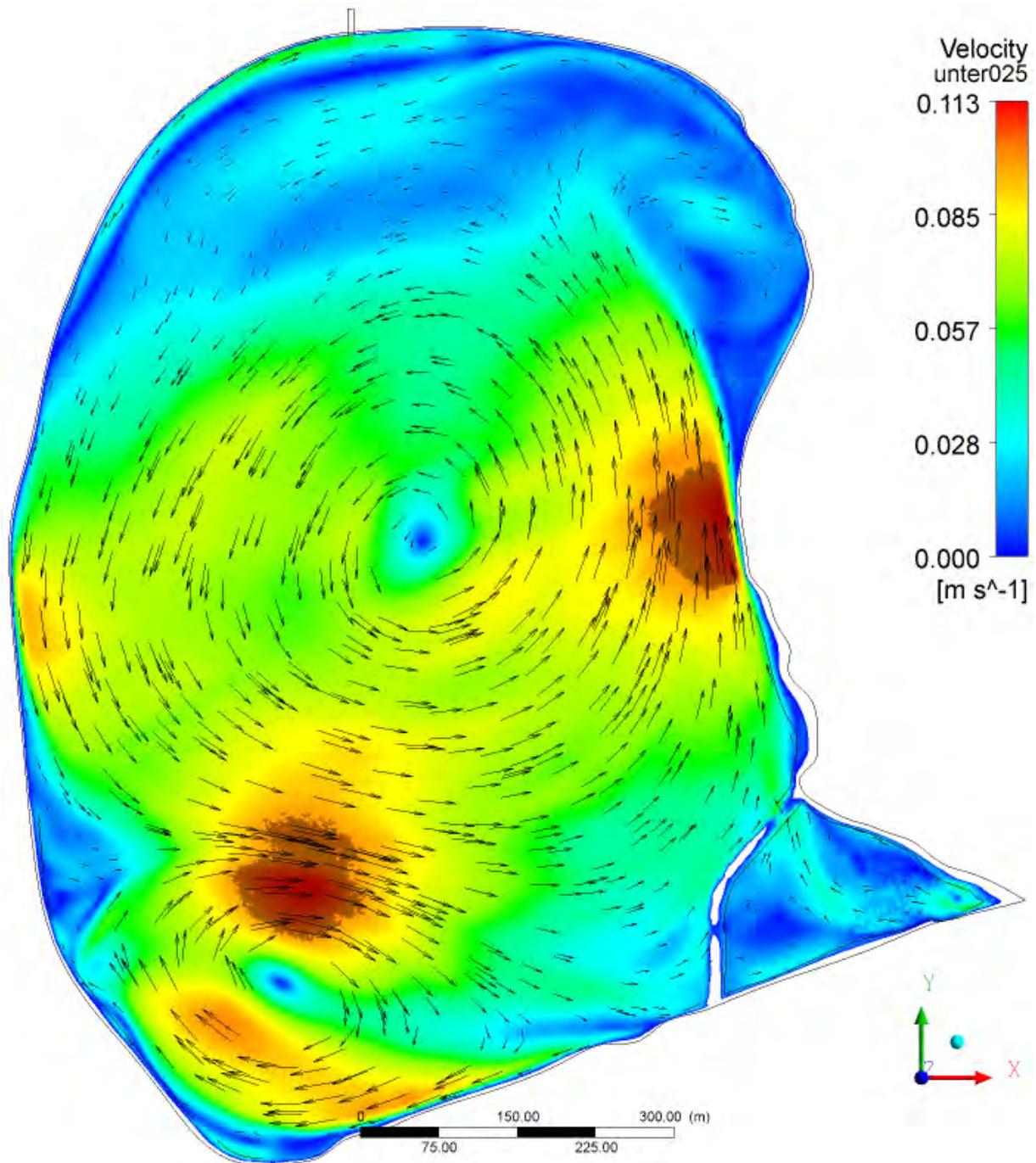
Anhang 1 - 9: Simuliertes Strömungsbild im Stausee Rötha bei Wind aus 90° mit 4 Bft; Strömungsgeschwindigkeit und Richtung 25 cm unter dem Wasserspiegel; Bereiche mit Strömungsgeschwindigkeiten über $V_{crit}/f_S = 0,1$ m/s dunkel hinterlegt



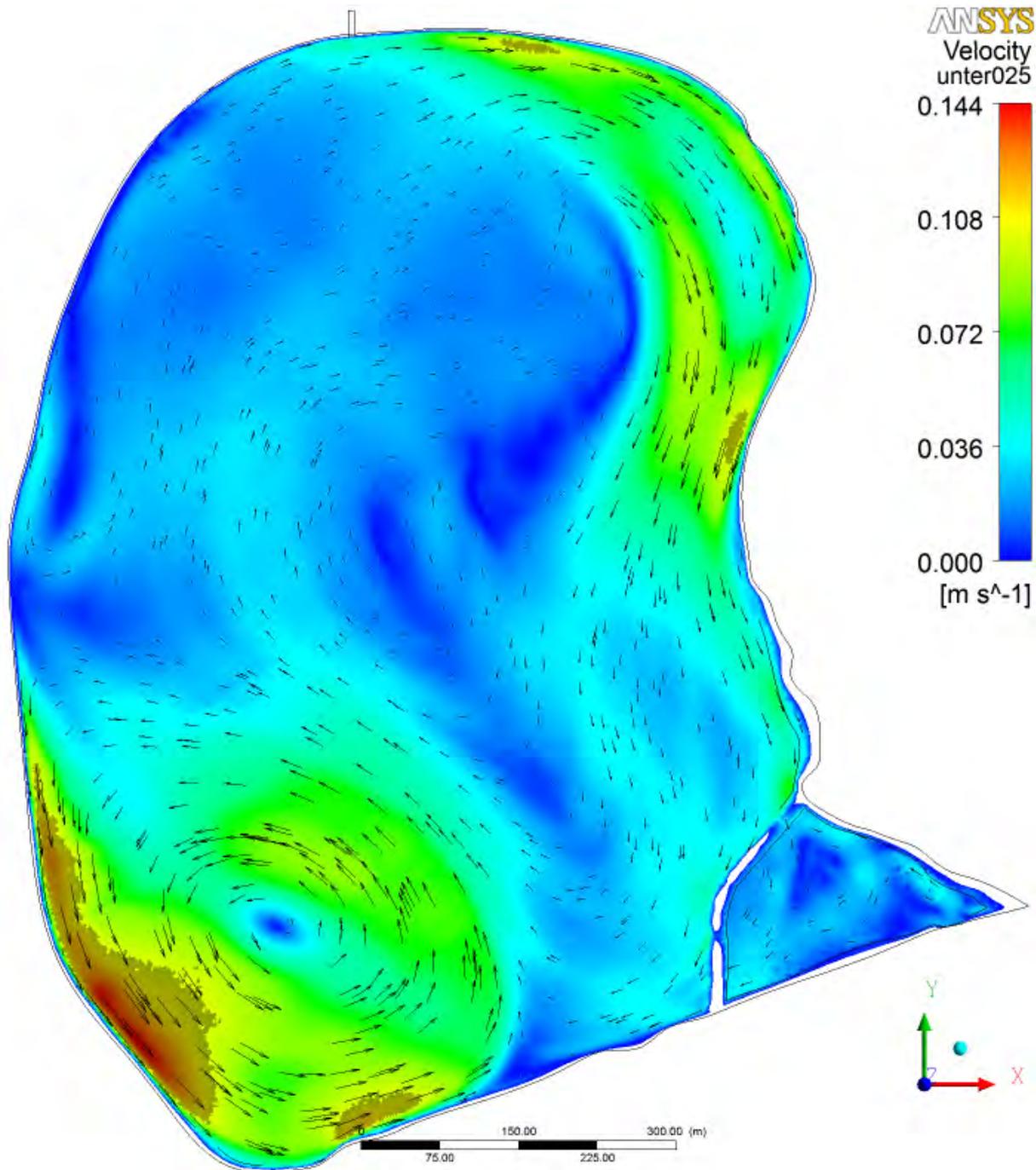
Anhang 1 - 10: Simuliertes Strömungsbild im Stausee Rötha bei Wind aus 135° mit 4 Bft; Strömungsgeschwindigkeit und Richtung 25 cm unter dem Wasserspiegel; Bereiche mit Strömungsgeschwindigkeiten über $V_{crit}/f_s = 0,1$ m/s dunkel hinterlegt



Anhang 1 - 11: Simuliertes Strömungsbild im Stausee Rötha bei Wind aus 180° mit 4 Bft; Strömungsgeschwindigkeit und Richtung 25 cm unter dem Wasserspiegel; Bereiche mit Strömungsgeschwindigkeiten über $V_{crit}/f_s = 0,1$ m/s dunkel hinterlegt



Anhang 1 - 12: Simuliertes Strömungsbild im Stausee Rötha bei Wind aus 270° mit 4 Bft; Strömungsgeschwindigkeit und Richtung 25 cm unter dem Wasserspiegel; Bereiche mit Strömungsgeschwindigkeiten über $V_{crit}/f_s = 0,1$ m/s dunkel hinterlegt



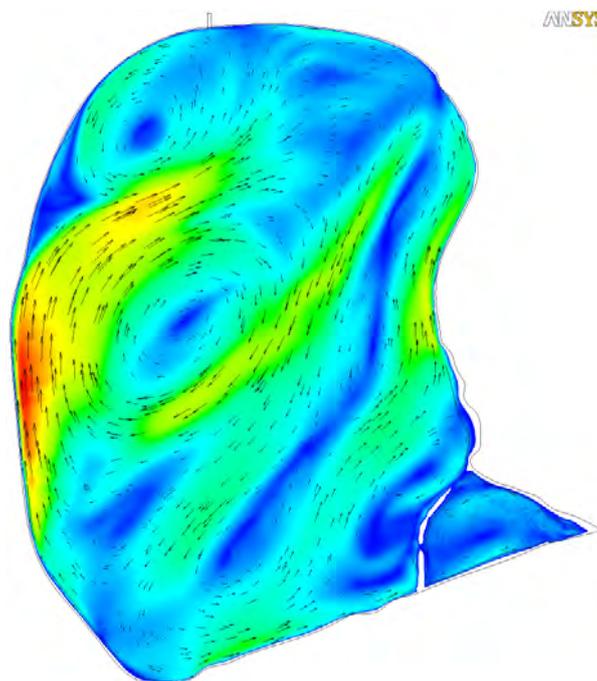
Anhang 1 - 13: Simuliertes Strömungsbild im Stausee Rötha bei Wind aus 315° mit 4 Bft; Strömungsgeschwindigkeit und Richtung 25 cm unter dem Wasserspiegel; Bereiche mit Strömungsgeschwindigkeiten über $V_{crit}/f_S = 0,1$ m/s dunkel hinterlegt

240004

**Numerische Modellierung und Simulation des Strömungs-
und Sedimentationsverhaltens im Stausee Rötha einschl.
In-situ-Messung zur Schaffung der Datenbrundlage**

- Numerische Simulation -

Stand: 03/04/2012

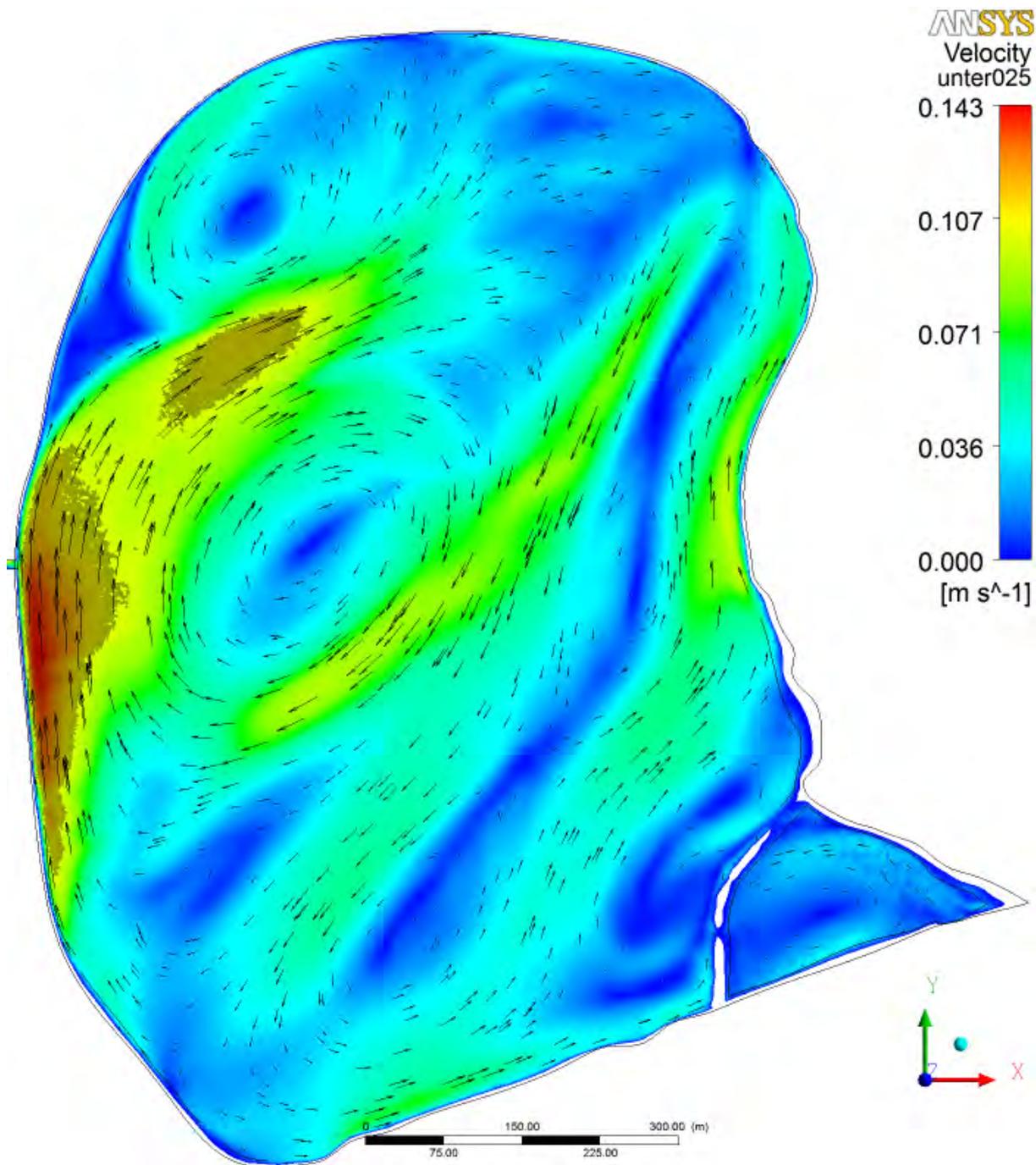


Anhang 2

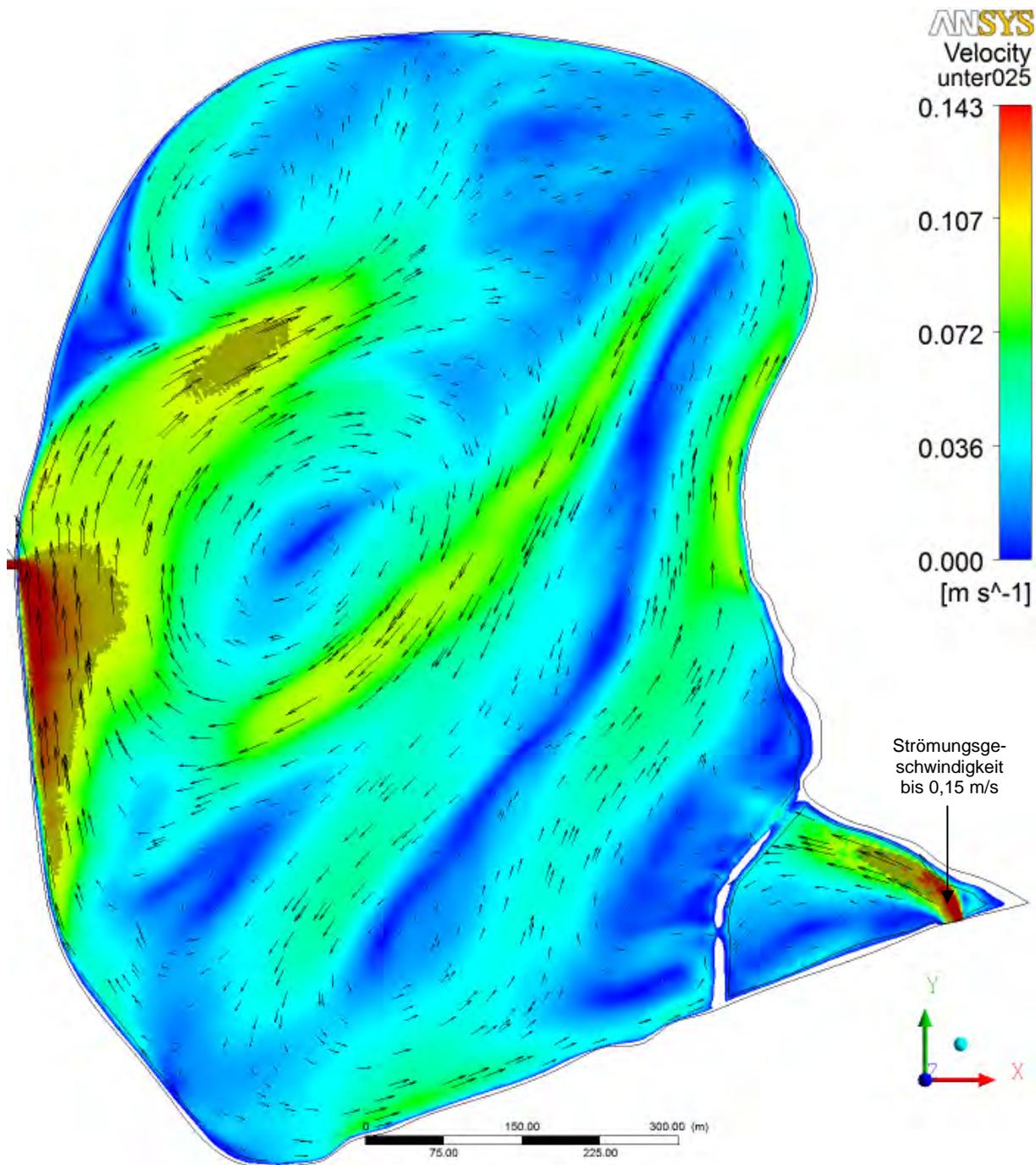
Plan-Zustand mit statistischen Windereignissen

Anhangsverzeichnis

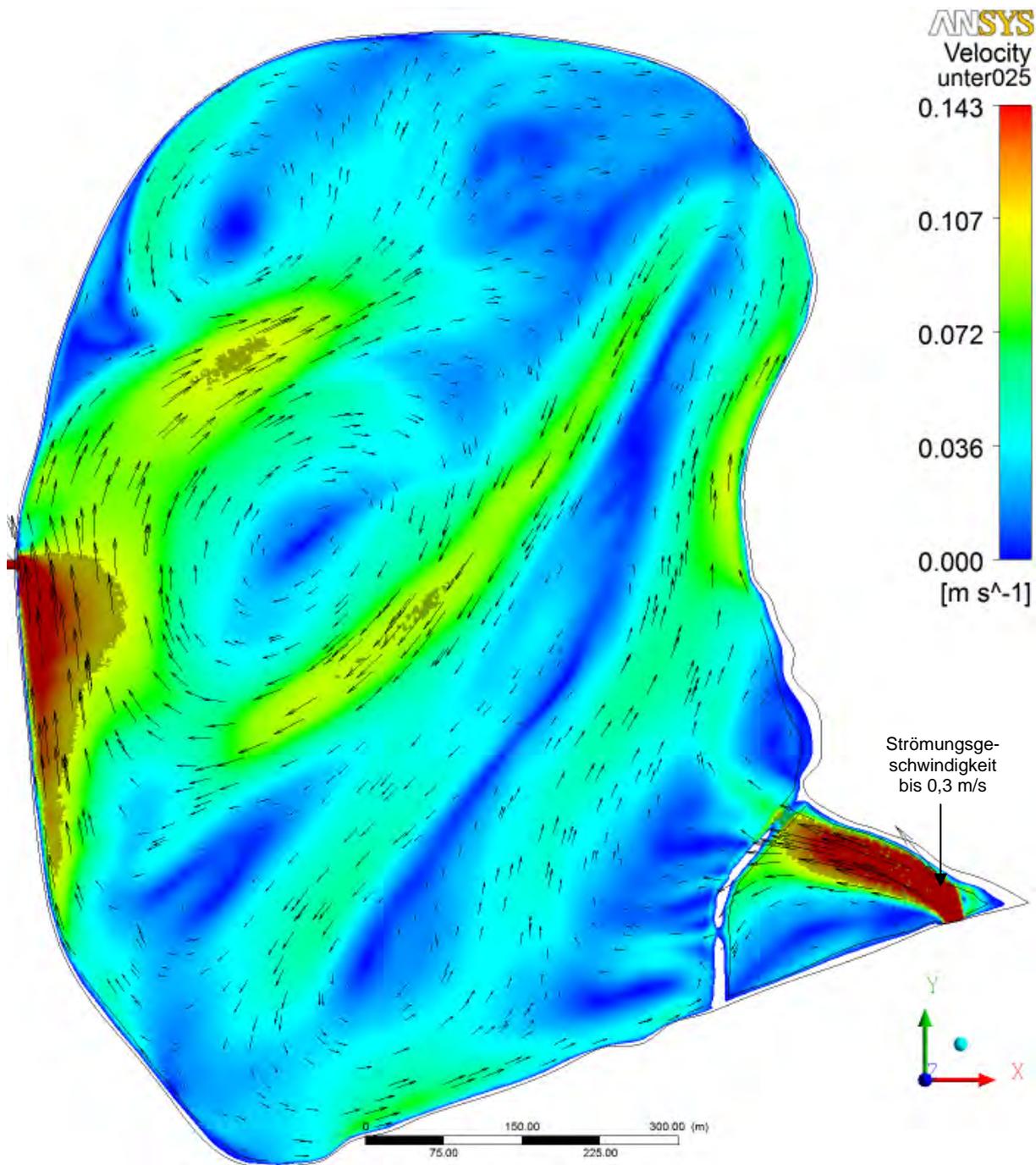
Anhang 2 - 1:	Simuliertes Strömungsbild des Plan-Zustandes (Durchfluss 150 l/s) bei Wind aus 225° mit 4 Bft; Strömungsgeschwindigkeit und Richtung 25 cm unter dem Wasserspiegel; Bereiche mit Strömungsgeschwindigkeiten über $V_{crit}/f_S = 0,1$ m/s dunkel hinterlegt	3
Anhang 2 - 2:	Simuliertes Strömungsbild des Plan-Zustandes (Durchfluss 2000 l/s) bei Wind aus 225° mit 4 Bft; Strömungsgeschwindigkeit und Richtung 25 cm unter dem Wasserspiegel; Bereiche mit Strömungsgeschwindigkeiten über $V_{crit}/f_S = 0,1$ m/s dunkel hinterlegt	4
Anhang 2 - 3:	Simuliertes Strömungsbild des Plan-Zustandes (Durchfluss 4000 l/s) bei Wind aus 225° mit 4 Bft; Strömungsgeschwindigkeit und Richtung 25 cm unter dem Wasserspiegel; Bereiche mit Strömungsgeschwindigkeiten über $V_{crit}/f_S = 0,1$ m/s dunkel hinterlegt	5
Anhang 2 - 4:	Simuliertes Strömungsbild des Plan-Zustandes (Durchfluss 150 l/s) bei Wind aus 180° mit 3 Bft; Strömungsgeschwindigkeit und Richtung 25 cm unter dem Wasserspiegel	6
Anhang 2 - 5:	Simuliertes Strömungsbild des Plan-Zustandes (Durchfluss 2000 l/s) bei Wind aus 180° mit 3 Bft; Strömungsgeschwindigkeit und Richtung 25 cm unter dem Wasserspiegel; Bereiche mit Strömungsgeschwindigkeiten über $V_{crit}/f_S = 0,1$ m/s dunkel hinterlegt	7
Anhang 2 - 6:	Simuliertes Strömungsbild des Plan-Zustandes (Durchfluss 4000 l/s) bei Wind aus 180° mit 3 Bft; Strömungsgeschwindigkeit und Richtung 25 cm unter dem Wasserspiegel; Bereiche mit Strömungsgeschwindigkeiten über $V_{crit}/f_S = 0,1$ m/s dunkel hinterlegt	8



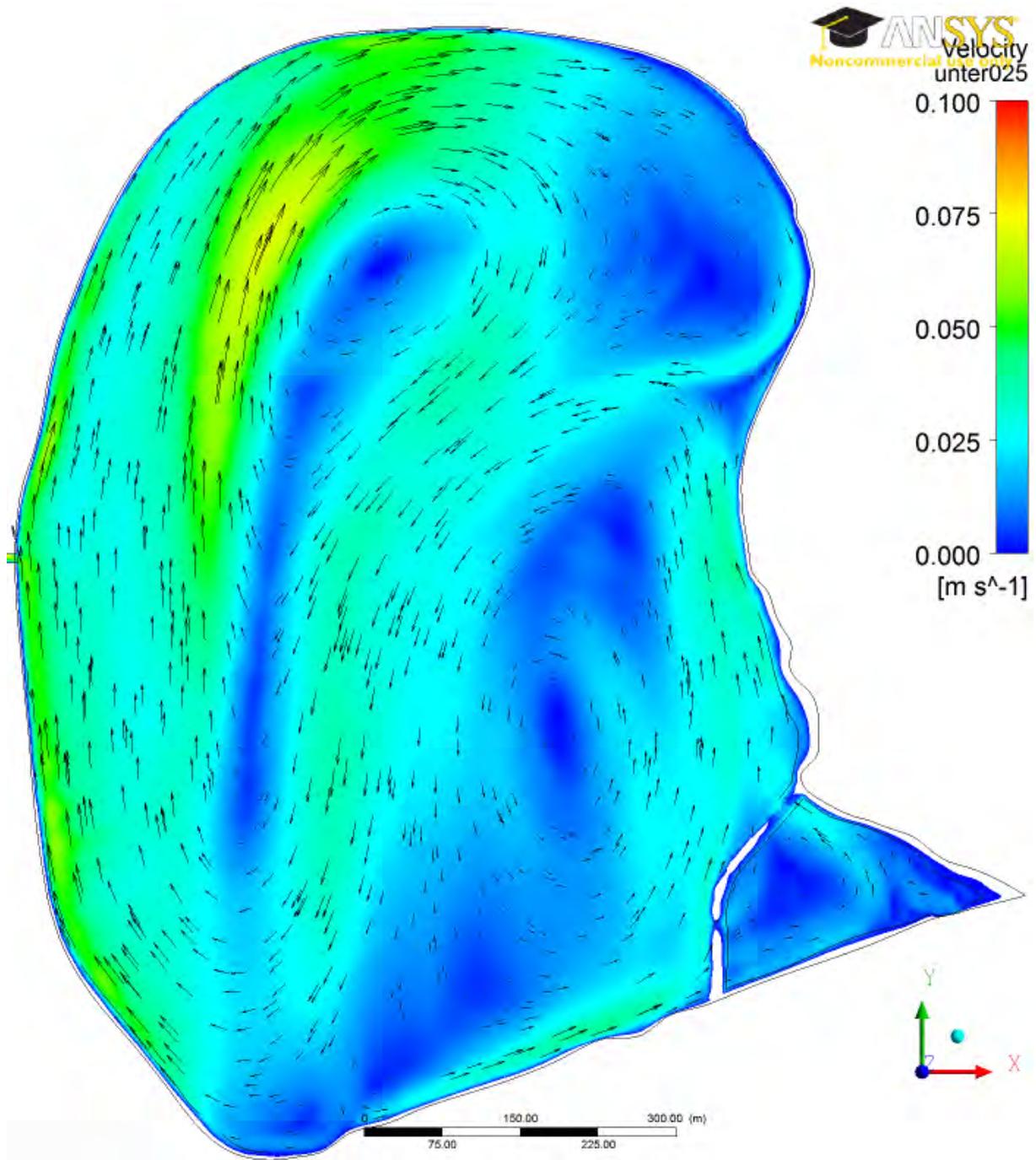
Anhang 2 - 1: Simuliertes Strömungsbild des Plan-Zustandes (Durchfluss 150 l/s) bei Wind aus 225° mit 4 Bft; Strömungsgeschwindigkeit und Richtung 25 cm unter dem Wasserspiegel; Bereiche mit Strömungsgeschwindigkeiten über $V_{crit}/f_s = 0,1$ m/s dunkel hinterlegt



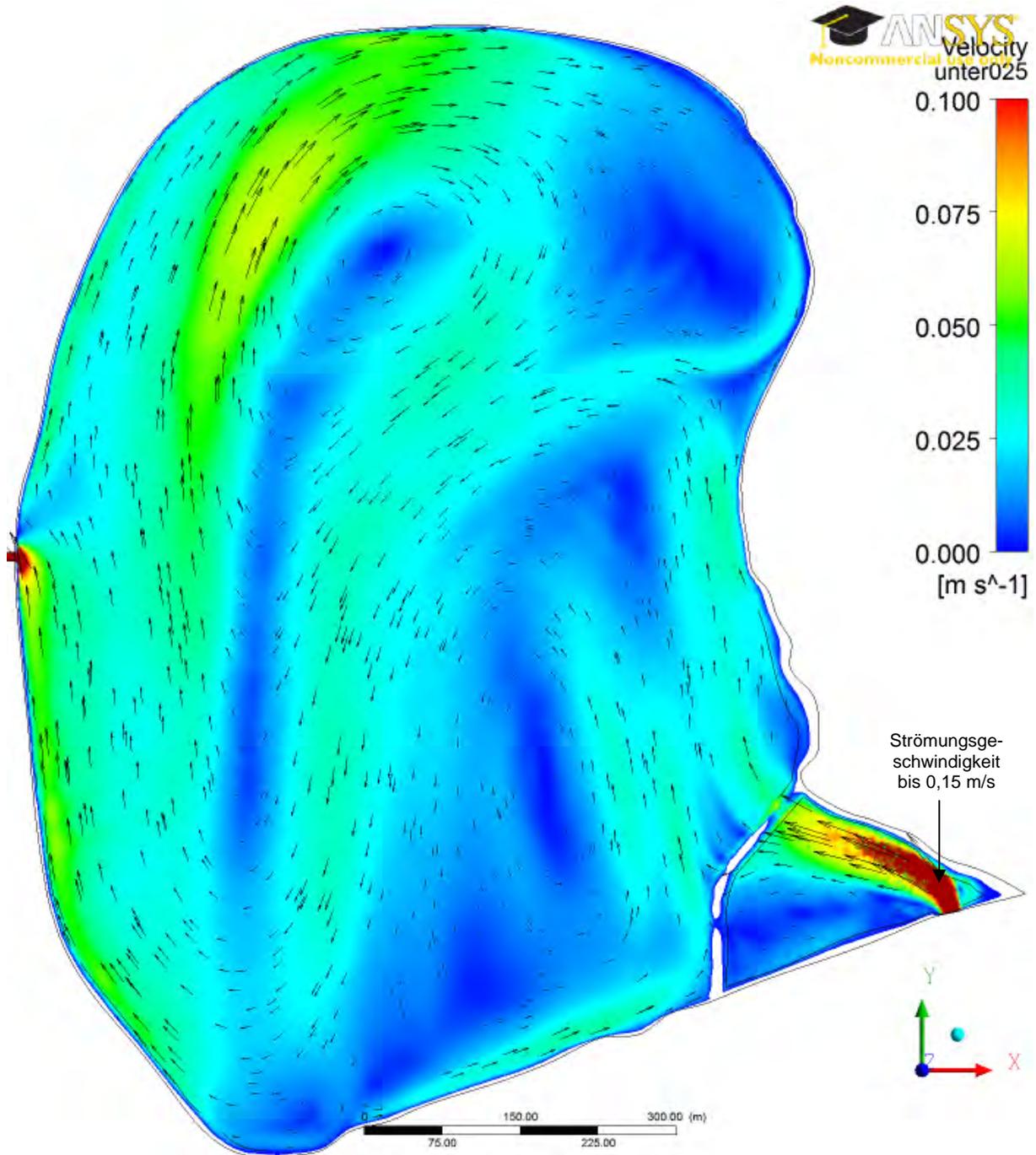
Anhang 2 - 2: Simuliertes Strömungsbild des Plan-Zustandes (Durchfluss 2000 l/s) bei Wind aus 225° mit 4 Bft; Strömungsgeschwindigkeit und Richtung 25 cm unter dem Wasserspiegel; Bereiche mit Strömungsgeschwindigkeiten über $V_{crit}/f_s = 0,1$ m/s dunkel hinterlegt



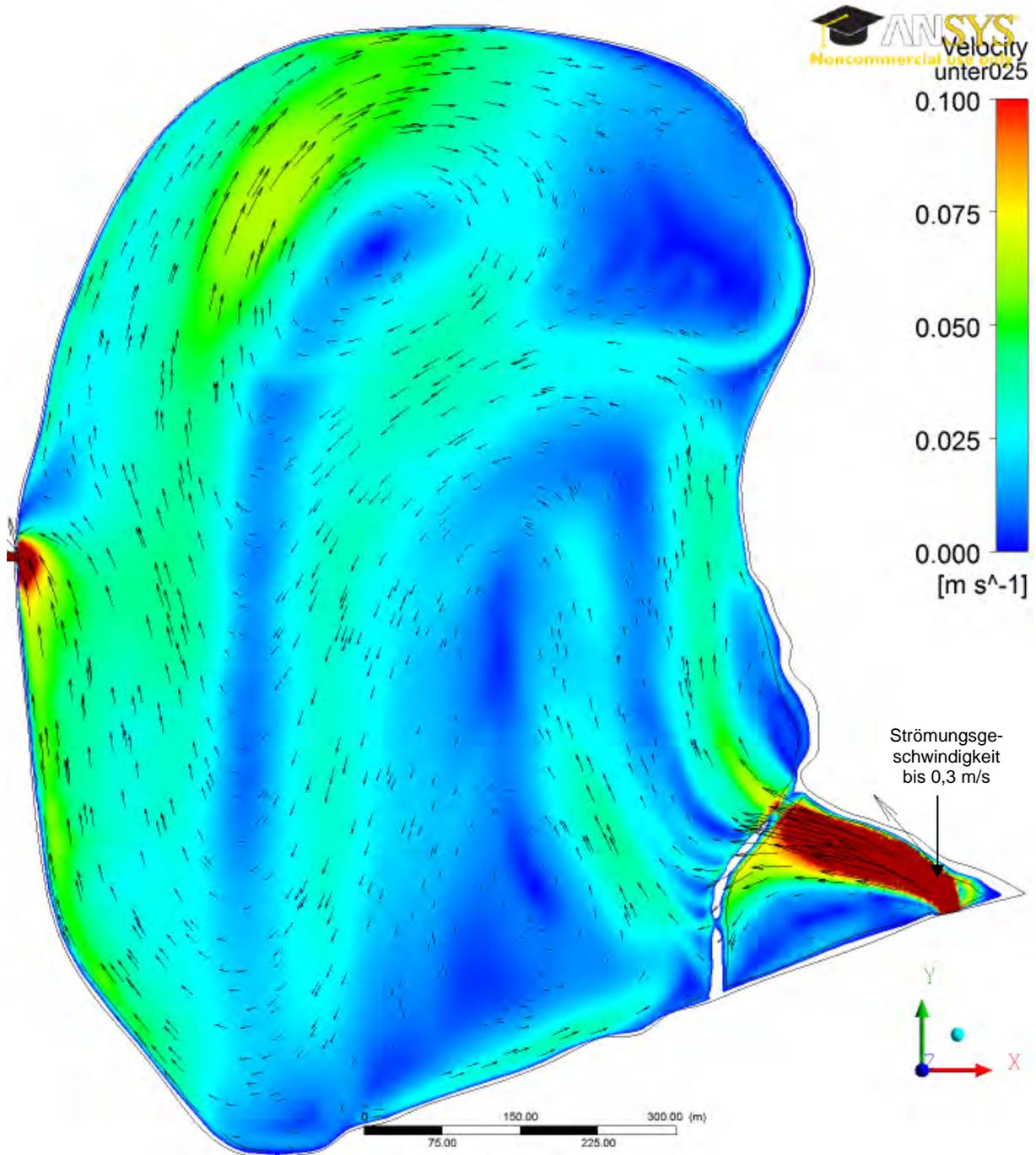
Anhang 2 - 3: Simuliertes Strömungsbild des Plan-Zustandes (Durchfluss 4000 l/s) bei Wind aus 225° mit 4 Bft; Strömungsgeschwindigkeit und Richtung 25 cm unter dem Wasserspiegel; Bereiche mit Strömungsgeschwindigkeiten über $V_{crit}/f_s = 0,1$ m/s dunkel hinterlegt



Anhang 2 - 4: Simuliertes Strömungsbild des Plan-Zustandes (Durchfluss 150 l/s) bei Wind aus 180° mit 3 Bft; Strömungsgeschwindigkeit und Richtung 25 cm unter dem Wasserspiegel



Anhang 2 - 5: Simuliertes Strömungsbild des Plan-Zustandes (Durchfluss 2000 l/s) bei Wind aus 180° mit 3 Bft; Strömungsgeschwindigkeit und Richtung 25 cm unter dem Wasserspiegel; Bereiche mit Strömungsgeschwindigkeiten über $V_{crit}/f_s = 0,1$ m/s dunkel hinterlegt



Anhang 2 - 6: Simuliertes Strömungsbild des Plan-Zustandes (Durchfluss 4000 l/s) bei Wind aus 180° mit 3 Bft; Strömungsgeschwindigkeit und Richtung 25 cm unter dem Wasserspiegel; Bereiche mit Strömungsgeschwindigkeiten über $V_{crit}/f_s = 0,1$ m/s dunkel hinterlegt