

HENRY

Hydraulic Engineering Repository

Ein Service der Bundesanstalt für Wasserbau

Book, Published Version

Mahavadi, Tara; Büscher, Anette; Rasquin, Caroline; Rudolph, Elisabeth; Seiffert, Rita; Wachler, Benno; Winkel, Norbert

BAWBildatlas. Sturmflutereignisse in der Tideelbe

Eine Sensitivitätsstudie zu Meeresspiegelanstieg und Topographieänderung der Wattflächen

Verfügbar unter/Available at: <https://hdl.handle.net/20.500.11970/107318>

Vorgeschlagene Zitierweise/Suggested citation:

Bundesanstalt für Wasserbau (Hg.) (2020): BAWBildatlas. Sturmflutereignisse in der Tideelbe. Karlsruhe: Bundesanstalt für Wasserbau.

Standardnutzungsbedingungen/Terms of Use:

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

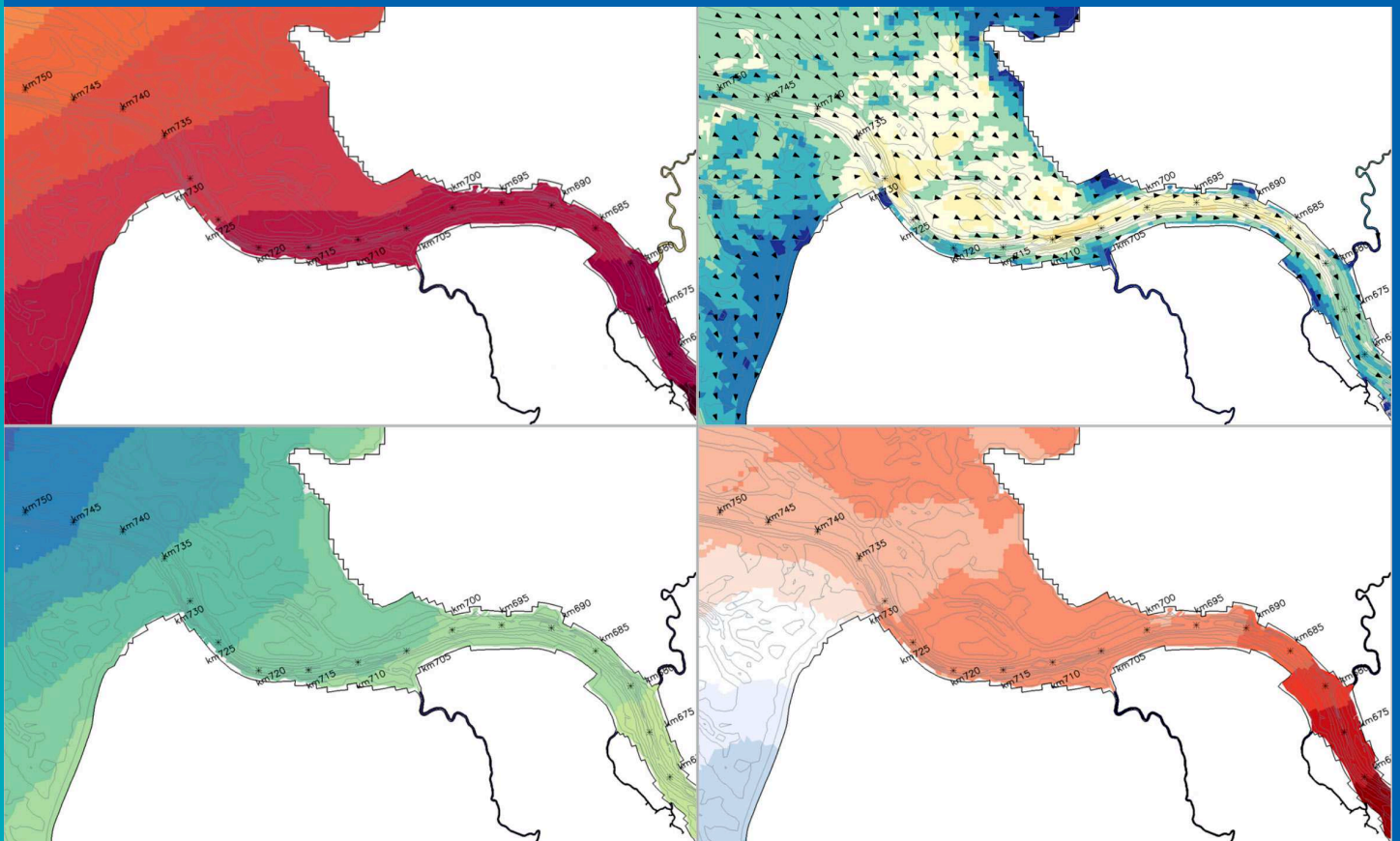
Documents in HENRY are made available under the Creative Commons License CC BY 4.0, if no other license is applicable. Under CC BY 4.0 commercial use and sharing, remixing, transforming, and building upon the material of the work is permitted. In some cases a different, more restrictive license may apply;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



BAWBildatlas

Sturmflutereignisse in der Tideelbe

Eine Sensitivitätsstudie zu Meeresspiegelanstieg und
Topographieänderung der Wattflächen



BAWBildatlas **Sturmflutereignisse in der Tideelbe**

Eine Sensitivitätsstudie zu Meeresspiegelanstieg und
Topographieänderung der Wattflächen

Die in diesem Beitrag dargestellten Fachkenntnisse und Ergebnisse basieren auf dem vom Bundesministerium für Verkehr und digitale Infrastruktur (BMVI) finanzierten BMVI-Expertennetzwerk Wissen – Können – Handeln. Dem BMVI wird für die finanzielle Unterstützung gedankt.

Impressum

Herausgeber (im Eigenverlag):
Bundesanstalt für Wasserbau (BAW)
Kußmaulstraße 17, 76187 Karlsruhe
Postfach 21 02 53, 76152 Karlsruhe
Telefon: +49 (0) 721 97 26-0
Telefax: +49 (0) 721 97 26-4540
E-Mail: info@baw.de, www.baw.de



Creative Commons BY 4.0

<https://creativecommons.org/licenses/by/4.0/>

Soweit nicht anders angegeben, liegen alle Bildrechte bei der BAW.

ISBN 978-3-939230-70-0

Karlsruhe, Oktober 2020

Bearbeitung

Tara Mahavadi, Annette Büscher, Caroline Rasquin,
Elisabeth Rudolph, Rita Seiffert, Benno Wachler,
Norbert Winkel

Inhaltsverzeichnis		Seite
1	Einleitung	1
2	Datengrundlage und Methoden	2
2.1	Das hydrodynamisch numerische Modell	2
2.1.1	UnTRIM ²	2
2.1.2	Modellgebiet und Topographie	3
2.1.3	Gitternetz	5
2.2	Szenarien zu Meeresspiegelanstieg und Wattentwicklung	5
2.3	Untersuchte Ereignisse	9
2.3.1	SF2013	9
2.3.2	SFEH	13
2.3.3	SN2013	16
2.4	Analyse der Modellergebnisse	18
2.4.1	(Tide) Kennwerte des Wasserstands	18
2.4.2	Tidekennwerte der Strömung	20
2.4.3	Aggregierte Analysegrößen	21
3	Ergebnisse	24
3.1	Zusammenfassung der Ergebnisse	24
3.2	Zeitreihen des Wasserstands und der Strömung an ausgewählten Orten	27
3.2.1	SN2013	28
3.2.2	SF2013	39
3.2.3	SFEH	50
3.3	(Tide) Kennwerte des Wasserstands	61
3.3.1	SN2013	62
3.3.2	SF2013	75
3.3.3	SFEH	82
3.4	Strömungsgeschwindigkeiten in der Elbmündung zu ausgewählten Zeitpunkten im Referenzzustand	89
3.4.1	SN2013	90
3.4.2	SF2013	92
3.4.3	SFEH	94
3.5	Tidekennwerte der Strömung	96
3.5.1	SN2013	97
3.5.2	SF2013	101
3.5.3	SFEH	105
3.6	Flutstromvolumen	109
3.6.1	SN2013	110
3.6.2	SF2013	112
3.6.3	SFEH	114
3.7	Durchflussfläche	116

3.7.1	SN2013	117
3.7.2	SF2013	119
3.7.3	SFEH	121
3.8	Intertidale Fläche	123
3.8.1	SN2013	124
3.8.2	SF2013	126
3.8.3	SFEH	128
4	Literaturverzeichnis	130
5	Glossar	133

Bildverzeichnis	Seite
Bild 1: Topographie des Deutsche Bucht Modells	4
Bild 2: Topographie des Deutsche Bucht Modells – Ausschnitt Tideelbe	4
Bild 3: Topographie entlang des Längsprofils in der Fahrrinnenmitte der Tideelbe	5
Bild 4: Topographieerhöhung der Wattflächen im Modell für die Szenarien w55 und w110	7
Bild 5: Topographieerhöhung der Wattflächen im Modell für die Szenarien w55e und w110e	7
Bild 6: Topographieerhöhung der Wattflächen für die Szenarien w55 und w110 – Ausschnitt Tideelbe	8
Bild 7: Topographieerhöhung der Wattflächen für die Szenarien w55e und w110e – Ausschnitt Tideelbe	8
Bild 8: SF2013: Windgeschwindigkeit (hellblau) und effektive Windgeschwindigkeit bezogen auf 290° (dunkelblau), sowie Windrichtung (rot) bei Scharhoern in 10 m Höhe	10
Bild 9: SF2013: astronomischer (schwarz) und gemessener Wasserstand (blau), sowie Wind staukurve (grün) bei Cuxhaven	11
Bild 10: SFEH: Windgeschwindigkeit (hellblau) und effektive Windgeschwindigkeit bezogen auf 290° (dunkelblau), sowie Windrichtung (rot) bei Scharhoern in 10 m Höhe	13
Bild 11: SFEH: astronomischer (schwarz) und gemessener Wasserstand (blau), sowie Wind staukurve (grün) bei Cuxhaven	14
Bild 12: SN2013: astronomischer (schwarz) und gemessener Wasserstand (blau) bei Cuxhaven	16
Bild 13: Tideunabhängige Kennwerte des Wasserstands (Lang 2003)	19
Bild 14: Tidekennwerte des Wasserstands (Lang 2003)	20
Bild 15: Tidekennwerte der Strömung (Lang 2003)	21
Bild 16: Polygone zur Aggregation der Simulationsergebnisse sowie das Längsprofil entlang der Tideelbe	22
Bild 17: Tidekennwerte des Durchflusses (Lang 2003)	22
Bild 18: Zeitreihen Wasserstand bei SN2013 (Ausschnitt) ref an Pegeln entlang der Elbe: Bake A (Elbe-km 755) (schwarz), Cuxhaven (Elbe-km 725) (rot), Glückstadt (Elbe-km 674) (grün), St. Pauli (Elbe-km 635N) (blau), Geesthacht (Elbe-km 586) (magenta), Bleckede (Elbe-km 550) (hellblau)	28
Bild 19: Zeitreihen Wasserstand und Strömungsgeschwindigkeit bei SN2013 (Ausschnitt) bei Bake Alpha (Elbe-km 755): ref (schwarz), f110 (rot), w55 (grün) und w110 (blau)	29

Bild 20:	Zeitreihen Wasserstand und Strömungsgeschwindigkeit bei SN2013 (Ausschnitt) bei Bake Alpha (Elbe-km 755): ref (schwarz), f110 (rot), w55e (dunkelgrün) und w110e (lila)	29
Bild 21:	Zeitreihen Wasserstand und Strömungsgeschwindigkeit bei SN2013 (Ausschnitt) bei Cuxhaven (Elbe-km 725): ref (schwarz), f110 (rot), w55 (grün) und w110 (blau)	30
Bild 22:	Zeitreihen Wasserstand und Strömungsgeschwindigkeit bei SN2013 (Ausschnitt) bei Cuxhaven (Elbe-km 725): ref (schwarz), f110 (rot), w55e (dunkelgrün) und w110e (lila)	30
Bild 23:	Zeitreihen Wasserstand und Strömungsgeschwindigkeit bei SN2013 (Ausschnitt) bei Brunsbüttel (Elbe-km 696): ref (schwarz), f110 (rot), w55 (grün) und w110 (blau)	31
Bild 24:	Zeitreihen Wasserstand und Strömungsgeschwindigkeit bei SN2013 (Ausschnitt) bei Brunsbüttel (Elbe-km 696): ref (schwarz), f110 (rot), w55e (dunkelgrün) und w110e (lila)	31
Bild 25:	Zeitreihen Wasserstand und Strömungsgeschwindigkeit bei SN2013 (Ausschnitt) bei Glückstadt (Elbe-km 674): ref (schwarz), f110 (rot), w55 (grün) und w110 (blau)	32
Bild 26:	Zeitreihen Wasserstand und Strömungsgeschwindigkeit bei SN2013 (Ausschnitt) bei Glückstadt (Elbe-km 674): ref (schwarz), f110 (rot), w55e (dunkelgrün) und w110e (lila)	32
Bild 27:	Zeitreihen Wasserstand und Strömungsgeschwindigkeit bei SN2013 (Ausschnitt) bei Stadersand (Elbe-km 655): ref (schwarz), f110 (rot), w55 (grün) und w110 (blau)	33
Bild 28:	Zeitreihen Wasserstand und Strömungsgeschwindigkeit bei SN2013 (Ausschnitt) bei Stadersand (Elbe-km 655): ref (schwarz), f110 (rot), w55e (dunkelgrün) und w110e (lila)	33
Bild 29:	Zeitreihen Wasserstand und Strömungsgeschwindigkeit bei SN2013 (Ausschnitt) bei Elbe-km 640: ref (schwarz), f110 (rot), w55 (grün) und w110 (blau)	34
Bild 30:	Zeitreihen Wasserstand und Strömungsgeschwindigkeit bei SN2013 (Ausschnitt) bei Elbe-km 640: ref (schwarz), f110 (rot), w55e (dunkelgrün) und w110e (lila)	34
Bild 31:	Zeitreihen Wasserstand und Strömungsgeschwindigkeit bei SN2013 (Ausschnitt) bei St. Pauli (Elbe-km 635N): ref (schwarz), f110 (rot), w55 (grün) und w110 (blau)	35
Bild 32:	Zeitreihen Wasserstand und Strömungsgeschwindigkeit bei SN2013 (Ausschnitt) bei St. Pauli (Elbe-km 635N): ref (schwarz), f110 (rot), w55e (dunkelgrün) und w110e (lila)	35

Bild 33:	Zeitreihen Wasserstand und Strömungsgeschwindigkeit bei SN2013 (Ausschnitt) bei Bunthaus (Elbe-km 610): ref (schwarz), f110 (rot), w55 (grün) und w110 (blau)	36
Bild 34:	Zeitreihen Wasserstand und Strömungsgeschwindigkeit bei SN2013 (Ausschnitt) bei Bunthaus (Elbe-km 610): ref (schwarz), f110 (rot), w55e (dunkelgrün) und w110e (lila)	36
Bild 35:	Zeitreihen Wasserstand und Strömungsgeschwindigkeit bei SN2013 (Ausschnitt) bei Zollenspieker (Elbe-km 598): ref (schwarz), f110 (rot), w55 (grün) und w110 (blau)	37
Bild 36:	Zeitreihen Wasserstand und Strömungsgeschwindigkeit bei SN2013 (Ausschnitt) bei Zollenspieker (Elbe-km 598): ref (schwarz), f110 (rot), w55e (dunkelgrün) und w110e (lila)	37
Bild 37:	Zeitreihen Wasserstand und Strömungsgeschwindigkeit bei SN2013 (Ausschnitt) beim Wehr Geesthacht (Elbe-km 586): ref (schwarz), f110 (rot), w55 (grün) und w110 (blau)	38
Bild 38:	Zeitreihen Wasserstand und Strömungsgeschwindigkeit bei SN2013 beim Wehr Geesthacht (Elbe-km 586): ref (schwarz), f110 (rot), w55e (dunkelgrün) und w110e (lila)	38
Bild 39:	Zeitreihen Wasserstand bei SF2013 ref an Pegeln entlang der Elbe: Bake A (Elbe-km 755) (schwarz), Cuxhaven (Elbe-km 725) (rot), Glückstadt (Elbe-km 674) (grün), St. Pauli (Elbe-km 635N) (blau), Geesthacht (Elbe-km 586) (magenta), Bleckede (Elbe-km 550) (hellblau)	39
Bild 40:	Zeitreihen Wasserstand und Strömungsgeschwindigkeit bei SF2013 bei Bake Alpha (Elbe-km 755): ref (schwarz), f110 (rot), w55 (grün) und w110 (blau)	40
Bild 41:	Zeitreihen Wasserstand und Strömungsgeschwindigkeit bei SF2013 bei Bake Alpha (Elbe-km 755): ref (schwarz), f110 (rot), w55e (dunkelgrün) und w110e (lila)	40
Bild 42:	Zeitreihen Wasserstand und Strömungsgeschwindigkeit bei SF2013 bei Cuxhaven (Elbe-km 725): ref (schwarz), f110 (rot), w55 (grün) und w110 (blau)	41
Bild 43:	Zeitreihen Wasserstand und Strömungsgeschwindigkeit bei SF2013 bei Cuxhaven (Elbe-km 725): ref (schwarz), f110 (rot), w55e (dunkelgrün) und w110e (lila)	41
Bild 44:	Zeitreihen Wasserstand und Strömungsgeschwindigkeit bei SF2013 bei Brunsbüttel (Elbe-km 696): ref (schwarz), f110 (rot), w55 (grün) und w110 (blau)	42
Bild 45:	Zeitreihen Wasserstand und Strömungsgeschwindigkeit bei SF2013 bei Brunsbüttel (Elbe-km 696): ref (schwarz), f110 (rot), w55e (dunkelgrün) und w110e (lila)	42
Bild 46:	Zeitreihen Wasserstand und Strömungsgeschwindigkeit bei SF2013 bei Glückstadt (Elbe-km 674): ref (schwarz), f110 (rot), w55 (grün) und w110 (blau)	43
Bild 47:	Zeitreihen Wasserstand und Strömungsgeschwindigkeit bei SF2013 bei Glückstadt (Elbe-km 674): ref (schwarz), f110 (rot), w55e (dunkelgrün) und w110e (lila)	43

Bild 48:	Zeitreihen Wasserstand und Strömungsgeschwindigkeit bei SF2013 bei Stadersand (Elbe-km 655): ref (schwarz), f110 (rot), w55 (grün) und w110 (blau)	44
Bild 49:	Zeitreihen Wasserstand und Strömungsgeschwindigkeit bei SF2013 bei Stadersand (Elbe-km 655): ref (schwarz), f110 (rot), w55e (dunkelgrün) und w110e (lila)	44
Bild 50:	Zeitreihen Wasserstand und Strömungsgeschwindigkeit bei SF2013 bei Elbe km 640: ref (schwarz), f110 (rot), w55 (grün) und w110 (blau)	45
Bild 51:	Zeitreihen Wasserstand und Strömungsgeschwindigkeit bei SF2013 bei Elbe-km 640: ref (schwarz), f110 (rot), w55e (dunkelgrün) und w110e (lila)	45
Bild 52:	Zeitreihen Wasserstand und Strömungsgeschwindigkeit bei SF2013 bei St. Pauli (Elbe-km 635N): ref (schwarz), f110 (rot), w55 (grün) und w110 (blau)	46
Bild 53:	Zeitreihen Wasserstand und Strömungsgeschwindigkeit bei SF2013 bei St. Pauli (Elbe-km 635N): ref (schwarz), f110 (rot), w55e (dunkelgrün) und w110e (lila)	46
Bild 54:	Zeitreihen Wasserstand und Strömungsgeschwindigkeit bei SF2013 bei Bunthaus (Elbe-km 610): ref (schwarz), f110 (rot), w55 (grün) und w110 (blau)	47
Bild 55:	Zeitreihen Wasserstand und Strömungsgeschwindigkeit bei SF2013 bei Bunthaus (Elbe-km 610): ref (schwarz), f110 (rot), w55e (dunkelgrün) und w110e (lila)	47
Bild 56:	Zeitreihen Wasserstand und Strömungsgeschwindigkeit bei SF2013 bei Zollenspieker (Elbe-km 598): ref (schwarz), f110 (rot), w55 (grün) und w110 (blau)	48
Bild 57:	Zeitreihen Wasserstand und Strömungsgeschwindigkeit bei SF2013 bei Zollenspieker (Elbe-km 598): ref (schwarz), f110 (rot), w55e (dunkelgrün) und w110e (lila)	48
Bild 58:	Zeitreihen Wasserstand und Strömungsgeschwindigkeit bei SF2013 beim Wehr Geesthacht (Elbe-km 586): ref (schwarz), f110 (rot), w55 (grün) und w110 (blau)	49
Bild 59:	Zeitreihen Wasserstand und Strömungsgeschwindigkeit bei SF2013 beim Wehr Geesthacht (Elbe-km 586): ref (schwarz), f110 (rot), w55e (dunkelgrün) und w110e (lila)	49
Bild 60:	Zeitreihen Wasserstand bei SFEH ref an Pegeln entlang der Elbe: Bake A (Elbe-km 755) (schwarz), Cuxhaven (Elbe-km 725) (rot), Glückstadt (Elbe-km 674) (grün), St. Pauli (Elbe-km 635N) (blau), Geesthacht (Elbe-km 586) (magenta), Bleckede (Elbe-km 550) (hellblau)	50
Bild 61:	Zeitreihen Wasserstand und Strömungsgeschwindigkeit bei SFEH bei Bake Alpha (Elbe-km 755): ref (schwarz), f110 (rot), w55 (grün) und w110 (blau)	51
Bild 62:	Zeitreihen Wasserstand und Strömungsgeschwindigkeit bei SFEH bei Bake Alpha (Elbe-km 755): ref (schwarz), f110 (rot), w55e (dunkelgrün) und w110e (lila)	51
Bild 63:	Zeitreihen Wasserstand und Strömungsgeschwindigkeit bei SFEH bei Cuxhaven (Elbe-km 725): ref (schwarz), f110 (rot), w55 (grün) und w110 (blau)	52

Bild 64:	Zeitreihen Wasserstand und Strömungsgeschwindigkeit bei SFEH bei Cuxhaven (Elbe-km 725): ref (schwarz), f110 (rot), w55e (dunkelgrün) und w110e (lila)	52
Bild 65:	Zeitreihen Wasserstand und Strömungsgeschwindigkeit bei SFEH bei Brunsbüttel (Elbe-km 696): ref (schwarz), f110 (rot), w55 (grün) und w110 (blau)	53
Bild 66:	Zeitreihen Wasserstand und Strömungsgeschwindigkeit bei SFEH bei Brunsbüttel (Elbe-km 696): ref (schwarz), f110 (rot), w55e (dunkelgrün) und w110e (lila)	53
Bild 67:	Zeitreihen Wasserstand und Strömungsgeschwindigkeit bei SFEH bei Glückstadt (Elbe-km 674): ref (schwarz), f110 (rot), w55 (grün) und w110 (blau)	54
Bild 68:	Zeitreihen Wasserstand und Strömungsgeschwindigkeit bei SFEH bei Glückstadt (Elbe-km 674): ref (schwarz), f110 (rot), w55e (dunkelgrün) und w110e (lila)	54
Bild 69:	Zeitreihen Wasserstand und Strömungsgeschwindigkeit bei SFEH bei Stadersand (Elbe-km 655): ref (schwarz), f110 (rot), w55 (grün) und w110 (blau)	55
Bild 70:	Zeitreihen Wasserstand und Strömungsgeschwindigkeit bei SFEH bei Stadersand (Elbe-km 655): ref (schwarz), f110 (rot), w55e (dunkelgrün) und w110e (lila)	55
Bild 71:	Zeitreihen Wasserstand und Strömungsgeschwindigkeit bei SFEH bei Stromkilometer 640: ref (schwarz), f110 (rot), w55 (grün) und w110 (blau)	56
Bild 72:	Zeitreihen Wasserstand und Strömungsgeschwindigkeit SFEH bei Stromkilometer 640: ref (schwarz), f110 (rot), w55e (dunkelgrün) und w110e (lila)	56
Bild 73:	Zeitreihen Wasserstand und Strömungsgeschwindigkeit bei SFEH bei St. Pauli (Elbe-km 635N): ref (schwarz), f110 (rot), w55 (grün) und w110 (blau)	57
Bild 74:	Zeitreihen Wasserstand und Strömungsgeschwindigkeit bei SFEH bei St. Pauli (Elbe-km 635N): ref (schwarz), f110 (rot), w55e (dunkelgrün) und w110e (lila)	57
Bild 75:	Zeitreihen Wasserstand und Strömungsgeschwindigkeit bei SFEH bei Bunthaus (Elbe-km 610): ref (schwarz), f110 (rot), w55 (grün) und w110 (blau)	58
Bild 76:	Zeitreihen Wasserstand und Strömungsgeschwindigkeit bei SFEH bei Bunthaus (Elbe-km 610): ref (schwarz), f110 (rot), w55e (dunkelgrün) und w110e (lila)	58
Bild 77:	Zeitreihen Wasserstand und Strömungsgeschwindigkeit bei SFEH bei Zollenspieker (Elbe-km 598): ref (schwarz), f110 (rot), w55 (grün) und w110 (blau)	59
Bild 78:	Zeitreihen Wasserstand und Strömungsgeschwindigkeit bei SFEH bei Zollenspieker (Elbe-km 598): ref (schwarz), f110 (rot), w55e (dunkelgrün) und w110e (lila)	59
Bild 79:	Zeitreihen Wasserstand und Strömungsgeschwindigkeit bei SFEH beim Wehr Geesthacht (Elbe-km 586): ref (schwarz), f110 (rot), w55 (grün) und w110 (blau)	60
Bild 80:	Zeitreihen Wasserstand und Strömungsgeschwindigkeit bei SFEH beim Wehr Geesthacht (Elbe-km 586): ref (schwarz), f110 (rot), w55e (dunkelgrün) und w110e (lila)	60
Bild 81:	MThw bei SN2013 entlang der Elbe in Fahrrinnenmitte: ref (schwarz), f110 (rot), w55 (grün), w110 (blau)	62

Bild 82:	Differenzen MThw bei SN2013 entlang der Elbe in Fahrrinnenmitte: f110-ref (rot), w55-ref (grün), w110-ref (blau)	62
Bild 83:	MThw bei SN2013 entlang der Elbe in Fahrrinnenmitte: ref (schwarz), f110 (rot), w55e (dunkelgrün), w110e (lila)	63
Bild 84:	Differenzen MThw bei SN2013 entlang der Elbe in Fahrrinnenmitte: f110-ref (rot), w55e-ref (dunkelgrün), w110e-ref (lila)	63
Bild 85:	MThw bei SN2013 entlang der Elbe in Fahrrinnenmitte: f110 (rot), w55 (grün), w55e (dunkelgrün), w110 (blau), w110e (lila)	64
Bild 86:	Differenzen MThw bei SN2013 entlang der Elbe in Fahrrinnenmitte: w55-f110 (grün), w55e-f110 (dunkelgrün), w110-f110(blau), w110e-f110 (lila)	64
Bild 87:	MTnw bei SN2013 entlang der Elbe in Fahrrinnenmitte: ref (schwarz), f110 (rot), w55 (grün), w110 (blau)	65
Bild 88:	Differenzen MTnw bei SN2013 entlang der Elbe in Fahrrinnenmitte: f110-ref (rot), w55-ref (grün), w110-ref (blau)	65
Bild 89:	MTnw bei SN2013 entlang der Elbe in Fahrrinnenmitte: ref (schwarz), f110 (rot), w55e (dunkelgrün), w110e (lila)	66
Bild 90:	Differenzen MTnw bei SN2013 entlang der Elbe in Fahrrinnenmitte: f110-ref (rot), w55e-ref (dunkelgrün), w110e-ref (lila)	66
Bild 91:	MTnw bei SN2013 entlang der Elbe in Fahrrinnenmitte: f110 (rot), w55 (grün), w55e (dunkelgrün), w110 (blau), w110e (lila)	67
Bild 92:	Differenzen MTnw bei SN2013 entlang der Elbe in Fahrrinnenmitte: w55-f110 (grün), w55e-f110 (dunkelgrün), w110-f110(blau), w110e-f110 (lila)	67
Bild 93:	MThb bei SN2013 entlang der Elbe in Fahrrinnenmitte: ref (schwarz), f110 (rot), w55 (grün), w110 (blau)	68
Bild 94:	Differenzen MThb bei SN2013 entlang der Elbe in Fahrrinnenmitte: f110-ref (rot), w55-ref (grün), w110-ref (blau)	68
Bild 95:	MThb bei SN2013 entlang der Elbe in Fahrrinnenmitte: ref (schwarz), f110 (rot), w55e (dunkelgrün), w110e (lila)	69
Bild 96:	Differenzen MThb bei SN2013 entlang der Elbe in Fahrrinnenmitte: f110-ref (rot), w55e-ref (dunkelgrün), w110e-ref (lila)	69
Bild 97:	MThb bei SN2013 entlang der Elbe in Fahrrinnenmitte: f110 (rot), w55 (grün), w55e (dunkelgrün), w110 (blau), w110e (lila)	70
Bild 98:	Differenzen MThb bei SN2013 entlang der Elbe in Fahrrinnenmitte: w55-f110 (grün), w55e-f110 (dunkelgrün), w110-f110(blau), w110e-f110 (lila)	70
Bild 99:	MThw bei SN2013 in der Elbmündung: ref	71
Bild 100:	MThw bei SN2013 in der Elbmündung: f110	72
Bild 101:	Differenz MThw bei SN2013 in der Elbmündung: f110-ref	72

Bild 102:	MThw bei SN2013 in der Elbmündung: w55	73
Bild 103:	Differenz MThw bei SN2013 in der Elbmündung: w55-ref	73
Bild 104:	MThw bei SN2013 in der Elbmündung: w110	74
Bild 105:	Differenz MThw bei SN2013 in der Elbmündung: w110-ref	74
Bild 106:	HW bei SF2013 entlang der Elbe in Fahrrinnenmitte: ref (schwarz), f110 (rot), w55 (grün), w110 (blau)	75
Bild 107:	Differenzen HW bei SF2013 entlang der Elbe in Fahrrinnenmitte: f110-ref (rot), w55-ref (grün), w110-ref (blau)	75
Bild 108:	HW bei SF2013 entlang der Elbe in Fahrrinnenmitte: ref (schwarz), f110 (rot), w55e (dunkelgrün), w110e (lila)	76
Bild 109:	Differenzen HW bei SF2013 entlang der Elbe in Fahrrinnenmitte: f110-ref (rot), w55e-ref (dunkelgrün), w110e-ref (lila)	76
Bild 110:	HW bei SF2013 entlang der Elbe in Fahrrinnenmitte: f110 (rot), w55 (grün), w55e (dunkelgrün), w110 (blau), w110e (lila)	77
Bild 111:	Differenzen HW bei SF2013 entlang der Elbe in Fahrrinnenmitte: w55-f110 (grün), w55e-f110 (dunkelgrün), w110-f110(blau), w110e-f110 (lila)	77
Bild 112:	HW bei SF2013 in der Elbmündung: ref	78
Bild 113:	HW bei SF2013 in der Elbmündung: f110	79
Bild 114:	Differenz HW bei SF2013 in der Elbmündung: f110-ref	79
Bild 115:	HW bei SF2013 in der Elbmündung: w55	80
Bild 116:	Differenz HW bei SF2013 in der Elbmündung: w55-ref	80
Bild 117:	HW bei SF2013 in der Elbmündung: w110	81
Bild 118:	Differenz HW bei SF2013 in der Elbmündung: w110-ref	81
Bild 119:	HW bei SFEH entlang der Elbe in Fahrrinnenmitte: ref (schwarz), f110 (rot), w55 (grün), w110 (blau)	82
Bild 120:	Differenzen HW bei SFEH entlang der Elbe in Fahrrinnenmitte: f110-ref (rot), w55-ref (grün), w110-ref (blau)	82
Bild 121:	HW bei SFEH entlang der Elbe in Fahrrinnenmitte: ref (schwarz), f110 (rot), w55e (dunkelgrün), w110e (lila)	83
Bild 122:	Differenzen HW bei SFEH entlang der Elbe in Fahrrinnenmitte: f110-ref (rot), w55e-ref (dunkelgrün), w110e-ref (lila)	83
Bild 123:	HW bei SFEH entlang der Elbe in Fahrrinnenmitte: f110 (rot), w55 (grün), w55e (dunkelgrün), w110 (blau), w110e (lila)	84
Bild 124:	Differenzen HW bei SFEH entlang der Elbe in Fahrrinnenmitte: w55-f110 (grün), w55e-f110 (dunkelgrün), w110-f110(blau), w110e-f110 (lila)	84

Bild 125:	HW bei SFEH in der Elbmündung: ref	85
Bild 126:	HW bei SFEH in der Elbmündung: f110	86
Bild 127:	Differenz HW bei SF2013 in der Elbmündung: f110-ref	86
Bild 128:	HW bei SFEH in der Elbmündung: w55	87
Bild 129:	Differenz HW bei SF2013 in der Elbmündung: w55-ref	87
Bild 130:	HW bei SFEH in der Elbmündung: w110	88
Bild 131:	Differenz HW bei SF2013 in der Elbmündung: w110-ref	88
Bild 132:	Zeitreihen Wasserstand und Strömungsgeschwindigkeit bei SFEH bei Cuxhaven (Elbe-km 725): ref (schwarz) mit eingezeichneten ausgewählten Zeitpunkten (blau)	90
Bild 133:	Tiefengemittelte Strömungsgeschwindigkeit und -richtung in der Elbmündung bei SN2013 ref an einem Zeitpunkt bei Flutstrom (Zeitpunkt 1 in Bild 132)	90
Bild 134:	Tiefengemittelte Strömungsgeschwindigkeit und -richtung in der Elbmündung bei SN2013 ref an einem Zeitpunkt bei Flutstrom nahe Thw (Zeitpunkt 2 in Bild 132)	91
Bild 135:	Tiefengemittelte Strömungsgeschwindigkeit und -richtung in der Elbmündung bei SN2013 ref an einem Zeitpunkt bei Ebbstrom (Zeitpunkt 3 in Bild 132)	91
Bild 136:	Zeitreihen Wasserstand und Strömungsgeschwindigkeit bei SF2013 bei Cuxhaven (Elbe-km 725): ref (schwarz) mit eingezeichneten ausgewählten Zeitpunkten (blau)	92
Bild 137:	Tiefengemittelte Strömungsgeschwindigkeit und -richtung in der Elbmündung bei SF2013 ref an einem Zeitpunkt bei Ebbstrom vor HW (Zeitpunkt 1 in Bild 136)	92
Bild 138:	Tiefengemittelte Strömungsgeschwindigkeit und -richtung in der Elbmündung bei SF2013 ref an einem Zeitpunkt bei Flutstrom vor HW (Zeitpunkt 2 in Bild 136)	93
Bild 139:	Tiefengemittelte Strömungsgeschwindigkeit und -richtung in der Elbmündung bei SF2013 ref an einem Zeitpunkt bei Ebbstrom nach HW (Zeitpunkt 3 in Bild 136)	93
Bild 140:	Zeitreihen Wasserstand und Strömungsgeschwindigkeit bei SFEH bei Cuxhaven (Elbe-km 725): ref (schwarz) mit eingezeichneten ausgewählten Zeitpunkten (blau)	94
Bild 141:	Tiefengemittelte Strömungsgeschwindigkeit und -richtung in der Elbmündung bei SFEH ref an einem Zeitpunkt bei Ebbstrom vor HW (Zeitpunkt 1 in Bild 140)	94
Bild 142:	Tiefengemittelte Strömungsgeschwindigkeit und -richtung in der Elbmündung bei SFEH ref an einem Zeitpunkt bei Flutstrom vor HW (Zeitpunkt 2 in Bild 140)	95
Bild 143:	Tiefengemittelte Strömungsgeschwindigkeit und -richtung in der Elbmündung bei SFEH ref an einem Zeitpunkt bei Ebbstrom nach HW (Zeitpunkt 3 in Bild 140)	95
Bild 144:	VfMtMit bei SN2013 tiefengemittelt entlang der Elbe in Fahrrinnenmitte: ref (schwarz), f110 (rot), w55 (grün), w110 (blau)	97

Bild 145:	Differenzen VfMtMit bei SN2013 tiefengemittelt entlang der Elbe in Fahrinnenmitte: f110-ref (rot), w55-ref (grün), w110-ref (blau)	97
Bild 146:	VfMtMit bei SN2013 tiefengemittelt entlang der Elbe in Fahrinnenmitte: ref (schwarz), f110 (rot), w55e (dunkelgrün), w110e (lila)	98
Bild 147:	Differenzen VfMtMit bei SN2013 tiefengemittelt entlang der Elbe in Fahrinnenmitte: f110-ref (rot), w55e-ref (dunkelgrün), w110e-ref (lila)	98
Bild 148:	VeMtMit bei SN2013 tiefengemittelt entlang der Elbe in Fahrinnenmitte: ref (schwarz), f110 (rot), w55 (grün), w110 (blau)	99
Bild 149:	Differenzen VeMtMit bei SN2013 tiefengemittelt entlang der Elbe in Fahrinnenmitte: f110-ref (rot), w55-ref (grün), w110-ref (blau)	99
Bild 150:	VeMtMit bei SN2013 tiefengemittelt entlang der Elbe in Fahrinnenmitte: ref (schwarz), f110 (rot), w55e (dunkelgrün), w110e (lila)	100
Bild 151:	Differenzen VeMtMit bei SN2013 tiefengemittelt entlang der Elbe in Fahrinnenmitte: f110-ref (rot), w55e-ref (dunkelgrün), w110e-ref (lila)	100
Bild 152:	VfMtTide bei SF2013 tiefengemittelt entlang der Elbe in Fahrinnenmitte: ref (schwarz), f110 (rot), w55 (grün), w110 (blau)	101
Bild 153:	Differenzen VfMtTide bei SF2013 tiefengemittelt entlang der Elbe in Fahrinnenmitte: f110-ref (rot), w55-ref (grün), w110-ref (blau)	101
Bild 154:	VfMtTide bei SF2013 tiefengemittelt entlang der Elbe in Fahrinnenmitte: ref (schwarz), f110 (rot), w55e (dunkelgrün), w110e (lila)	102
Bild 155:	Differenzen VfMtTide bei SF2013 tiefengemittelt entlang der Elbe in Fahrinnenmitte: f110-ref (rot), w55e-ref (dunkelgrün), w110e-ref (lila)	102
Bild 156:	VeMtTide bei SF2013 tiefengemittelt entlang der Elbe in Fahrinnenmitte: ref (schwarz), f110 (rot), w55 (grün), w110 (blau)	103
Bild 157:	Differenzen VeMtTide bei SF2013 tiefengemittelt entlang der Elbe in Fahrinnenmitte: f110-ref (rot), w55-ref (grün), w110-ref (blau)	103
Bild 158:	VeMtTide bei SF2013 tiefengemittelt entlang der Elbe in Fahrinnenmitte: ref (schwarz), f110 (rot), w55e (dunkelgrün), w110e (lila)	104
Bild 159:	Differenzen VeMtTide bei SF2013 tiefengemittelt entlang der Elbe in Fahrinnenmitte: f110-ref (rot), w55e-ref (dunkelgrün), w110e-ref (lila)	104
Bild 160:	VfMtTide bei SFEH tiefengemittelt entlang der Elbe in Fahrinnenmitte: ref (schwarz), f110 (rot), w55 (grün), w110 (blau)	105
Bild 161:	Differenzen VfMtTide bei SFEH tiefengemittelt entlang der Elbe in Fahrinnenmitte: f110-ref (rot), w55-ref (grün), w110-ref (blau)	105
Bild 162:	VfMtTide bei SFEH tiefengemittelt entlang der Elbe in Fahrinnenmitte: ref (schwarz), f110 (rot), w55e (dunkelgrün), w110e (lila)	106

Bild 163:	Differenzen VfMtTide bei SFEH tiefengemittelt entlang der Elbe in Fahrrinnenmitte: f110-ref (rot), w55e-ref (dunkelgrün), w110e-ref (lila)	106
Bild 164:	VeMtTide bei SFEH tiefengemittelt entlang der Elbe in Fahrrinnenmitte: ref (schwarz), f110 (rot), w55 (grün), w110 (blau)	107
Bild 165:	Differenzen VeMtTide bei SFEH tiefengemittelt entlang der Elbe in Fahrrinnenmitte: f110-ref (rot), w55-ref (grün), w110-ref (blau)	107
Bild 166:	VeMtTide bei SFEH tiefengemittelt entlang der Elbe in Fahrrinnenmitte: ref (schwarz), f110 (rot), w55e (dunkelgrün), w110e (lila)	108
Bild 167:	Differenzen VeMtTide bei SFEH tiefengemittelt entlang der Elbe in Fahrrinnenmitte: f110-ref (rot), w55e-ref (dunkelgrün), w110e-ref (lila)	108
Bild 168:	QfMit bei SN2013 an definierten Querschnitten entlang der Elbe: ref (schwarz), f110 (rot), w55 (grün), w110 (blau)	110
Bild 169:	Differenzen QfMit SN2013 an definierten Querschnitten entlang der Elbe: f110-ref (rot), w55-ref (grün), w110-ref (blau)	110
Bild 170:	QfMit SN2013 an definierten Querschnitten entlang der Elbe: ref (schwarz), f110 (rot), w55e (dunkelgrün), w110e (lila)	111
Bild 171:	Differenzen QfMit SN2013 an definierten Querschnitten entlang der Elbe: f110-ref (rot), w55e-ref (dunkelgrün), w110e-ref (lila)	111
Bild 172:	QfTide bei SF2013 an definierten Querschnitten entlang der Elbe: ref (schwarz), f110 (rot), w55 (grün), w110 (blau)	112
Bild 173:	Differenzen QfTide bei SF2013 an definierten Querschnitten entlang der Elbe: f110-ref (rot), w55-ref (grün), w110-ref (blau)	112
Bild 174:	QfTide bei SF2013 an definierten Querschnitten entlang der Elbe: ref (schwarz), f110 (rot), w55e (dunkelgrün), w110e	113
Bild 175:	Differenzen QfTide bei SF2013 an definierten Querschnitten entlang der Elbe: f110-ref (rot), w55e-ref (dunkelgrün), w110e-ref (lila)	113
Bild 176:	QfTide bei SFEH an definierten Querschnitten entlang der Elbe: ref (schwarz), f110 (rot), w55 (grün), w110 (blau)	114
Bild 177:	Differenzen QfTide bei SFEH an definierten Querschnitten entlang der Elbe: f110-ref (rot), w55-ref (grün), w110-ref (blau)	114
Bild 178:	QfTide bei SFEH an definierten Querschnitten entlang der Elbe: ref (schwarz), f110 (rot), w55e (dunkelgrün), w110e	115
Bild 179:	Differenzen QfTide bei SFEH an definierten Querschnitten entlang der Elbe: f110-ref (rot), w55e-ref (dunkelgrün), w110e-ref (lila)	115
Bild 180:	MHTrKa bei SN2013 an definierten Querschnitten entlang der Elbe: ref (schwarz), f110 (rot), w55 (grün), w110 (blau)	117

Bild 181:	Rel. Änderung MHTrKa bei SN2013 an definierten Querschnitten entlang der Elbe: (f110-ref)/ref (rot), (w55-ref)/ref (grün), (w110-ref)/ref (blau)	117
Bild 182:	MHTrKa bei SN2013 an definierten Querschnitten entlang der Elbe: ref (schwarz), f110 (rot), w55e (dunkelgrün), w110e (lila)	118
Bild 183:	Rel. Änderung MHTrKa bei SN2013 an definierten Querschnitten entlang der Elbe: (f110-ref)/ref (rot), (w55e-ref)/ref (dunkelgrün), (w110e-ref)/ref (lila)	118
Bild 184:	MHTrKa bei SF2013 an definierten Querschnitten entlang der Elbe: ref (schwarz), f110 (rot), w55 (grün), w110 (blau)	119
Bild 185:	Rel. Änderung MHTrKa bei SF2013 an definierten Querschnitten entlang der Elbe: (f110-ref)/ref (rot), (w55-ref)/ref (grün), (w110-ref)/ref (blau)	119
Bild 186:	MHTrKa bei SF2013 an definierten Querschnitten entlang der Elbe: ref (schwarz), f110 (rot), w55e (dunkelgrün), w110e (lila)	120
Bild 187:	Rel. Änderung MHTrKa bei SF2013 Änderung an definierten Querschnitten entlang der Elbe: (f110-ref)/ref (rot), (w55e-ref)/ref (dunkelgrün), (w110e-ref)/ref (lila)	120
Bild 188:	MHTrKa bei SFEH an definierten Querschnitten entlang der Elbe: ref (schwarz), f110 (rot), w55 (grün), w110 (blau)	121
Bild 189:	Rel. Änderung MHTrKa bei SFEH an definierten Querschnitten entlang der Elbe: (f110-ref)/ref (rot), (w55-ref)/ref (grün), (w110-ref)/ref (blau)	121
Bild 190:	MHTrKa bei SFEH an definierten Querschnitten entlang der Elbe: ref (schwarz), f110 (rot), w55e (dunkelgrün), w110e (lila)	122
Bild 191:	Rel. Änderung MHTrKa bei SFEH an definierten Querschnitten entlang der Elbe: (f110-ref)/ref (rot), (w55e-ref)/ref (dunkelgrün), (w110e-ref)/ref (lila)	122
Bild 192:	Intertidale Fläche bei SN2013 innerhalb definierter Polygone entlang der Elbe: ref (schwarz), f110 (rot), w55 (grün), w110 (blau)	124
Bild 193:	Rel. Änderung der intertidalen Fläche bei SN2013 innerhalb definierter Polygone entlang der Elbe: (f110-ref)/ref (rot), (w55-ref)/ref (grün), (w110-ref)/ref (blau)	124
Bild 194:	Intertidale Fläche bei SN2013 innerhalb definierter Polygone entlang der Elbe: ref (schwarz), f110 (rot), w55e (dunkelgrün), w110e (lila)	125
Bild 195:	Rel. Änderung der intertidalen Fläche bei SN2013 innerhalb definierter Polygone entlang der Elbe: (f110-ref)/ref (rot), (w55e-ref)/ref (grün), (w110e-ref)/ref (blau)	125
Bild 196:	Sturmflutspezifische intertidale Fläche bei SF2013 innerhalb definierter Polygone entlang der Elbe: ref (schwarz), f110 (rot), w55 (grün), w110 (blau)	126
Bild 197:	Rel. Änderung der sturmflutspezifischen intertidalen Fläche bei SF2013 innerhalb definierter Polygone entlang der Elbe: (f110-ref)/ref (rot), (w55-ref)/ref (grün), (w110-ref)/ref (blau)	126

Bild 198:	Sturmflutspezifische intertidale Fläche bei SF2013 innerhalb definierter Polygone entlang der Elbe: ref (schwarz), f110 (rot), w55e (dunkelgrün), w110e (lila)	127
Bild 199:	Rel. Änderung der sturmflutspezifischen intertidalen Fläche bei SF2013 innerhalb definierter Polygone entlang der Elbe: (f110-ref)/ref (rot), (w55e-ref)/ref (grün), (w110e-ref)/ref (blau)	127
Bild 200:	Sturmflutspezifische intertidale Fläche bei SFEH innerhalb definierter Polygone entlang der Elbe: ref (schwarz), f110 (rot), w55 (grün), w110 (blau)	128
Bild 201:	Rel. Änderung der sturmflutspezifischen intertidalen Fläche bei SFEH innerhalb definierter Polygone entlang der Elbe: (f110-ref)/ref (rot), (w55-ref)/ref (grün), (w110-ref)/ref (blau)	128
Bild 202:	Sturmflutspezifische intertidale Fläche bei SFEH innerhalb definierter Polygone entlang der Elbe: ref (schwarz), f110 (rot), w55e (dunkelgrün), w110e (lila)	129
Bild 203:	Rel. Änderung der sturmflutspezifischen intertidalen Fläche bei SFEH innerhalb definierter Polygone entlang der Elbe: (f110-ref)/ref (rot), (w55e-ref)/ref (grün), (w110e-ref)/ref (blau)	129

Tabellenverzeichnis

Seite

Tabelle 1:	Untersuchte Szenarien	6
Tabelle 2:	Volumendifferenz durch Topographieänderung	6
Tabelle 3:	Untersuchte Ereignisse	9
Tabelle 4:	Randwerte SF2013	12
Tabelle 5:	Simulationszeitraum SF2013	12
Tabelle 6:	Randwerte SFEH	15
Tabelle 7:	Simulationszeitraum SFEH	15
Tabelle 8:	Randwerte SN2013	17
Tabelle 9:	Simulationszeitraum SN2013	17
Tabelle 10:	Untersuchte Kennwerte	18
Tabelle 11:	Analysezeitraum HW	18
Tabelle 12:	Analysezeitraum für Tidekennwerte des Wasserstands	19
Tabelle 13:	Analysezeitraum VfMt und VeMt	20
Tabelle 14:	Analysezeitraum für Qf und MHTrKa	23

Abkürzungsverzeichnis

BAW	Bundesanstalt für Wasserbau
BMVI	Bundesministerium für Verkehr und digitale Infrastruktur
DB	Deutsche Bucht
f110	Szenario mit 110 cm SLR
HW	Sturmflutscheitelwasserstand
MHTrKa	Mit. hor. durchströmte Kantenfläche bei mit. Flut-Volumenstrom
MThw	Mittleres Tidehochwasser
Qf	Flutstromvolumen
QfMit	Mittleres Flutstromvolumen (Mittel mehrerer Tiden)
QfTide	Flutstromvolumen einer Tide
ref	Referenzzustand ohne SLR und ohne Topographieänderung
SF2013	Historische Sturmflut vom 06.12.2013
SFEH	Extrem hohe Sturmflut aus Klimaprojektion
SLR	Sea Level Rise (Meeresspiegelanstieg)
SN2013	Spring-Nipp-Zeitraum Juli 2013 (mit konstantem Abfluss)
VeMt	Mittlere Ebbstromgeschwindigkeit
VeMtMit	Mittlere Ebbstromgeschwindigkeit (Mittel mehrerer Tiden)
VeMtTide	Mittlere Ebbstromgeschwindigkeit einer Tide
VfMt	Mittlere Flutstromgeschwindigkeit
VfMtMit	Mittlere Flutstromgeschwindigkeit (Mittel mehrerer Tiden)
VfMtTide	Mittlere Flutstromgeschwindigkeit einer Tide
w110	Szenario mit 110 cm SLR und um 110 cm erhöhte Wattflächen in der DB bis in die Elbemündung
w110e	Szenario mit 110 cm SLR und um 110 cm erhöhte Wattflächen in der DB und der gesamten Tideelbe
w55	Szenario mit 110 cm SLR und um 55 cm erhöhte Wattflächen in der DB bis in die Elbemündung
w55e	Szenario mit 110 cm SLR und um 55 cm erhöhte Wattflächen in der DB und der gesamten Tideelbe

1 Einleitung

Im Rahmen des BMVI-Expertennetzwerks Themenfeld 1 „Verkehrs- und Infrastruktur an Klimawandel und extreme Wetterereignisse anpassen“ werden die durch den Klimawandel bedingten Betroffenheiten für Verkehr und Infrastruktur bestimmt und entsprechende Anpassungsstrategien entwickelt. Schwerpunkt der BAW Hamburg liegt dabei auf der Untersuchung möglicher Auswirkungen auf Schifffahrt und Wasserstraßen. Der vorliegende Bildatlas stellt dabei die Ergebnisse der im Schwerpunktthema 101 „Klimawandel und Extreme“ durchgeführten Untersuchungen zum Einfluss eines Meeresspiegelanstiegs (SLR) und Topographieänderungen in der Deutschen Bucht auf Sturmflutereignisse in der Tideelbe dar.

Das Sturmflutgeschehen wird beeinflusst von dem mittleren Meeresspiegel, der astronomischen Tide, der Wirkung atmosphärischer Kräfte auf die Wasseroberfläche sowie von Topographie¹, Rauigkeit und in Tideästuaren zudem vom Oberwasserzufluss aus dem Binnenbereich. Die Wattflächen, d.h. die Sedimentflächen zwischen dem mittleren Tideniedrig- und Tidehochwasser, welche im Laufe eines Tidezyklus periodisch überspült werden und trockenfallen, stellen eine wichtige Komponente des Küstenschutzes dar, da dort Tide- und Seegangsenergie dissipiert wird. Eine Veränderung des Meeresspiegels kann nicht nur die Tidedynamik, sondern auch die Topographie eines Küstengebiets stark beeinflussen, da das Küstenprofil in einem morphodynamischen Gleichgewicht mit den hydrodynamischen Kräften steht (Bosboom und Stive 2015, Friedrichs 2011). Bei einem SLR können die Wattflächen, bei ausreichender Sedimentverfügbarkeit, zu einem gewissen Anteil mit dem Meeresspiegel mitwachsen (Becherer et al. 2018, van der Wegen 2013, Dissanayake 2012, van Goor 2001, Benninghoff und Winter 2019). Inwieweit dieses Wattwachstum mit dem zukünftigen beschleunigten SLR mithalten kann, ist jedoch schwer zu quantifizieren und noch unzureichend erforscht. Dennoch sollten bei den Untersuchungen zur Auswirkung eines SLR auf Sturmfluten auch mögliche Topographieänderungen durch das Mitwachsen der Wattflächen berücksichtigt werden.

In diesem Bildatlas werden die Ergebnisse zum Einfluss eines SLR sowie topographischen Erhöhungen der Wattflächen auf Sturmfluten in der Tideelbe dargestellt. Dafür werden mit einem HN-Modell Sturmflutsimulationen in der Deutschen Bucht durchgeführt und die Simulationsergebnisse anhand verschiedener Kennwerte für die Tideelbe analysiert. Es werden eine historische Sturmflut und ein mögliches zukünftiges Sturmflutereignis aus einer Klimaprojektion simuliert. Außerdem wird ein Spring-Nipp-Zeitraum simuliert und analysiert, um die Unterschiede zwischen den Auswirkungen auf mittleren Tiden und auf Sturmfluten darzustellen. Die Simulationen werden jeweils für ein Referenzszenario, ein Szenario mit 110 cm SLR und Szenarien mit einem SLR von 110 cm und einem anteiligen sowie einem vollständigen Mitwachsen der Wattflächen in der Deutschen Bucht durchgeführt, um die Bandbreite möglicher Änderungen darzustellen. Die Simulationsergebnisse in der Tideelbe werden anschließend hinsichtlich der Sturmflutscheitelwasserstände (HW) bzw. des mittleren Tidehochwassers (MThw), Strömungsgeschwindigkeiten, querschnittintegrierter Durchflüsse und der Durchflussfläche analysiert. Durch das Untersuchungskonzept lassen sich klare Wenn-Dann Aussagen formulieren und mögliche Betroffenheiten ableiten. Die Ergebnisse stellen keine Projektionen dar, sondern vermitteln prinzipiell, welche

¹ Mit Topographie ist hier und im Folgenden das Relief der Erdoberfläche von der Gewässersohle bis zum Deich gemeint.

Auswirkungen ein Meeresspiegelanstieg und Topographieänderungen auf Sturmflutereignisse haben könnten. Die Wahl des SLR und der Watterhöhungen gibt keine Aussage darüber, ob und wann diese Gegebenheiten eintreten.

2 Datengrundlage und Methoden

2.1 Das hydrodynamisch numerische Modell

2.1.1 UnTRIM²

Für die in diesem Bildatlas vorgestellten Untersuchungen wird das hydrodynamisch-numerische Modellverfahren UnTRIM² (Casulli 2008) eingesetzt. Das auf der Methode der Finiten-Differenzen/ Finiten-Volumen basierende drei-dimensional mathematische Verfahren UnTRIM² dient der Simulation stationärer und instationärer Strömungs- und Transportprozesse in Gewässern mit freier Wasseroberfläche. UnTRIM² verwendet ein unstrukturiertes orthogonales Gitter. Eine detaillierte Beschreibung des Verfahrens findet sich im UnTRIM-Validation Document (BAW 2004). Grundlage des Verfahrens UnTRIM² sind Differentialgleichungen, die eine mathematische Formulierung der physikalischen Erhaltungssätze für das Wasservolumen und den Impuls der Strömung darstellen.

Mit diesem Berechnungsverfahren können flächendeckend für jede Gitterzelle und jeden Zeitschritt u. a. folgende physikalische Größen berechnet und ausgegeben werden:

- Wasserspiegelauslenkung (bezüglich NHN) und
- Strömungsgeschwindigkeit

Bei der Berechnung der aufgezählten physikalischen Größen berücksichtigt das mathematische Modell der Deutschen Bucht folgende, die Tidedynamik beeinflussende Prozesse:

- Gezeiten,
- Oberwasserzufluss,
- Trockenfallen und Überfluten von Wattflächen,
- Sohlreibung,
- Impulseintrag durch Wind,
- turbulente Diffusion des Strömungsimpulses,
- Corioliskraft sowie den
- advektiven Impulstransport.

Eine Besonderheit in der Anwendung des Modellverfahrens UnTRIM² liegt in der Subgrid-Technologie, mit welcher es möglich ist die Bathymetrie des Modellgebietes genauer und unabhängig von dem Berechnungsgitter wiederzugeben. Die Wassertiefe wird über eine Rechenkante gemittelt und erlaubt einen graduelleren und realistischeren Übergang von nass zu trocken, mit geringerer Energiedissipation (Sehili et al. 2014). Ein besonderer Vorteil ergibt sich somit für die naturähnliche Darstellung von Überflutungsvorgängen auf den Wattgebieten, welche für die vorliegende Fragestellung relevant ist.

Der Einfluss des Windes auf Wasserstand und Strömung ist bei einer Sturmflut von besonderer Bedeutung. Der Impulseintrag aus der Atmosphäre wird parametrisiert und durch die Windschubspannung beschrieben:

$$\vec{\tau}_{wind} = \rho_{luft} C_D \vec{v}_{rel} |\vec{v}_{rel}| \quad (2.1-1)$$

mit: ρ_{luft} := Dichte (*Luft*); C_D := Impulsaustauschkoeffizient;
 \vec{v}_{rel} := Differenzgeschwindigkeit;

Hierbei ist ρ_{luft} die Luftdichte, \vec{v}_{rel} die Differenzgeschwindigkeit zwischen $\vec{v}_{10m,wind}$ der Windgeschwindigkeit in 10m Höhe und der Strömungsgeschwindigkeit \vec{v} . (BAW 2004)

$$\vec{v}_{rel} = \vec{v}_{10m,wind} - \vec{v} \quad (2.1-2)$$

mit: $\vec{v}_{10m,wind}$:= Windgeschwindigkeit; \vec{v} := *Strömungsgeschwindigkeit*

C_D ist der Windschubspannungskoeffizient (Impulsaustauschkoeffizient) und ein indirektes Maß für die Oberflächenrauigkeit. Es gibt für diesen Koeffizienten verschiedene empirische Ansätze. Für diese Untersuchungen wird C_D nach S. D. Smith und E. G. Banke (1975) wie folgt berechnet:

$$C_D = (0.63 + 0.066 |\vec{v}_{10m,wind}|) 10^{-3} \quad (2.1-3)$$

mit: $\vec{v}_{10m,wind}$:= Windgeschwindigkeit

Dieser Ansatz von S. D. Smith und E. G. Banke (1975) beruht auf gemessenen Daten im Bereich von 3 bis 22 m/s. In diesem Bereich wächst der Windschubspannungskoeffizient an, da sich die Oberflächenrauigkeit der Wasseroberfläche durch zunehmende Wellenhöhe vergrößert. Die Verwendung des Ansatzes von Smith und Banke ist für Windgeschwindigkeiten bis 26 m/s akzeptiert, hat sich für die Nordsee bewährt und ist auch für extreme Sturmfluten geeignet (Jensen et al. 2006).

2.1.2 Modellgebiet und Topographie

Das Modellgebiet des für diese Untersuchungen verwendeten hydrodynamisch numerischen Modells (HN-Modell) umfasst das Gebiet der gesamten Deutschen Bucht von Terschelling in den Niederlanden bis Hvide Sande in Dänemark sowie die Ästuarie Ems, Weser und Elbe (siehe Bild 1). Das Modellgebiet umfasst alle bei Sturmflut überflutbaren Gebiete. Die landseitige Grenze des Modells ist der heutige Verlauf der Deichlinie, welche im Modell nicht überflutet werden kann. Da bei Sturmfluten die Wehre in Geesthacht, Hemelingen, Herbrum und Böllingerfähr gelegt werden, liegt die landseitige Modellgrenze der Ästuarie in der Ems beim Küstenkanal, in der Weser bei Intschede und in der Elbe bei Bleckede. Fokusgebiet der Untersuchungen dieses Bildatlases ist die Tideelbe. Für die Simulation der Sturmflutereignisse werden im Modell das Wehr in Geesthacht gelegt und die Sperrwerke der Nebenflüsse geschlossen.

Die Topographie-Daten stammen aus Peildaten der WSV, die in dem Projekt EasyGSH-DB (Hagen et al. 2019) bzw. dem Funktionalen Bodenmodell (Milbradt et al. 2015) zusammengetragen wurden. Diese digitalen Geländemodelle (DGMs) beinhalten die Topographie der Deutschen Bucht aus dem Jahr 2010. Die Tiefeninformation aus den DGMs wird auf die SubGrid-Zellen des Modells übertragen.

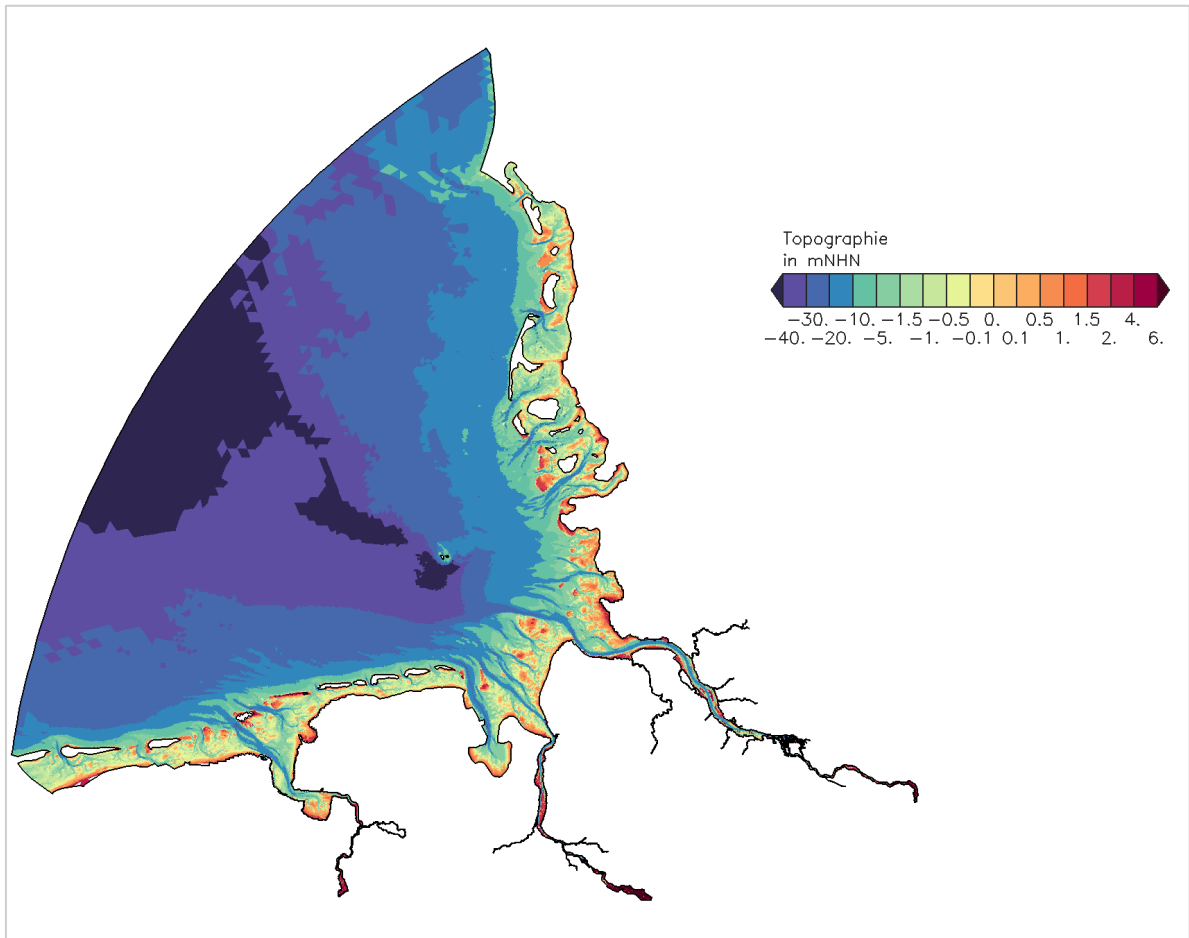


Bild 1: Topographie des Deutsche Bucht Modells

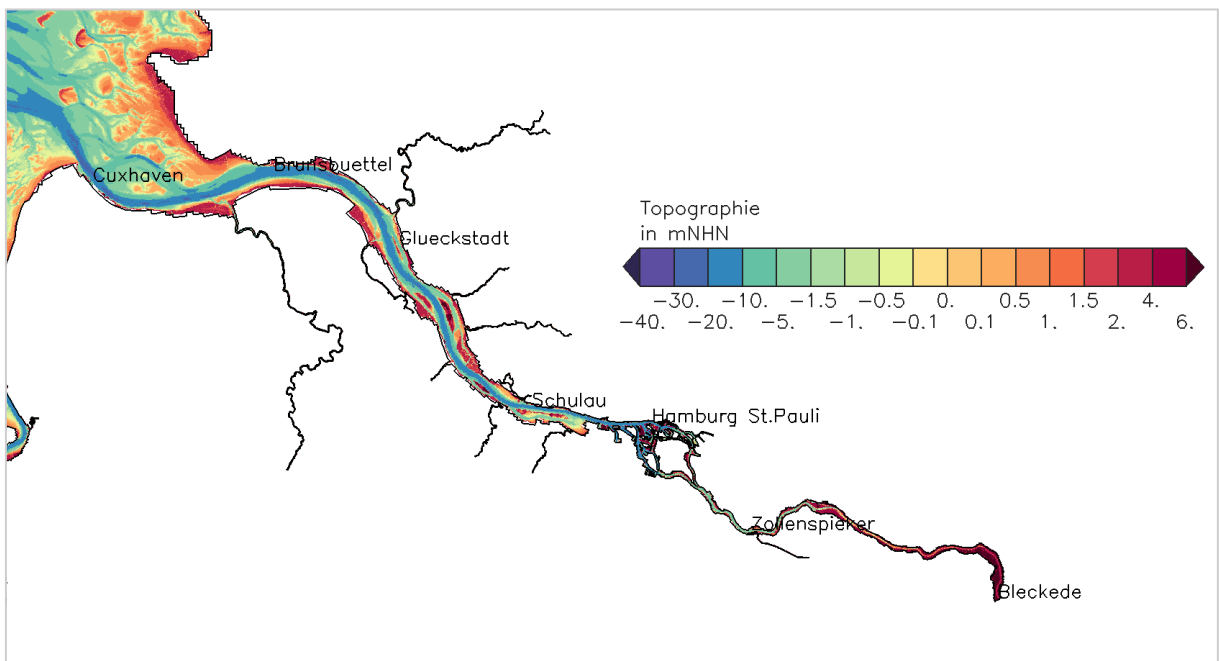


Bild 2: Topographie des Deutsche Bucht Modells – Ausschnitt Tideelbe

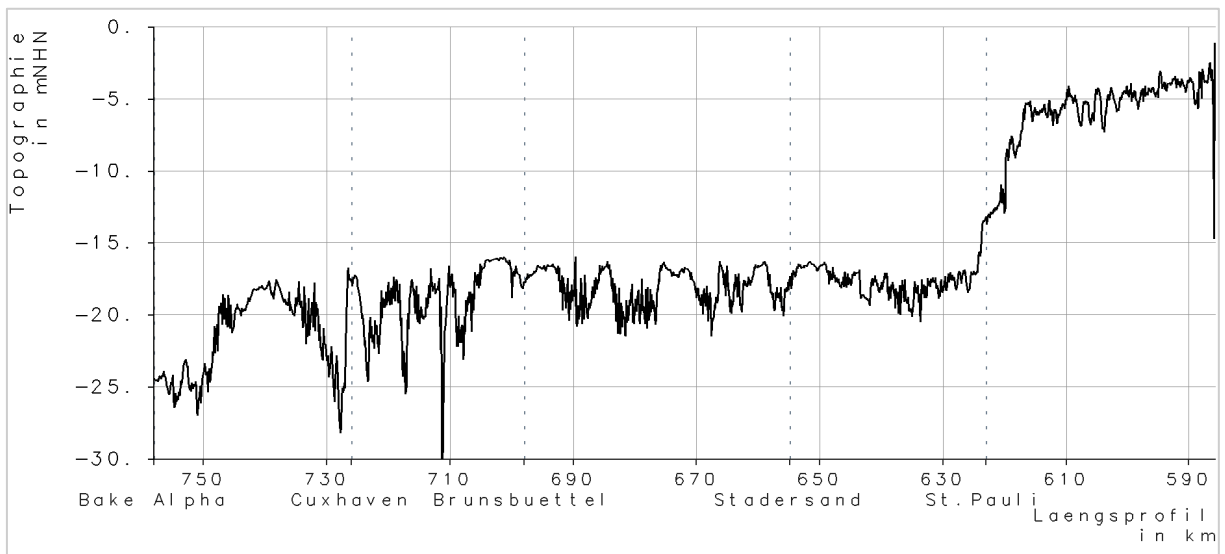


Bild 3: Topographie entlang des Längsprofils in der Fahrrinnenmitte der Tideelbe

2.1.3 Gitternetz

Das verwendete unstrukturiert orthogonale Gitternetz besteht aus dreieckigen und viereckigen Gitterelementen. Das Rechengitternetz besteht aus 87.345 Elementen, 70.211 Knoten und 157622 Kanten. Die Diskretisierung der Rechenzellen ist räumlich variabel. Die Kantenlänge liegt dabei zwischen 5 km am seeseitigen Rand und reduziert sich auf bis zu 20 m im Küstenbereich und den Ästuaren. In der Elbe beträgt die Kantenlänge etwa 500 m im Mündungsbereich und etwa 50 m im Bereich des Hafens. Die vertikale Auflösung des Gitters liegt im gesamten Modell bis zu einer Tiefe von 27,5 m bei 1 m und vergrößert sich darunter auf bis zu 10 m. Die Anzahl der Sub-Grid-Zellen pro Rechenzelle ist variabel gewählt, mit einer hohen Auflösung im Küstenbereich und den Ästuaren. Das gesamte Modell umfasst 4.814.264 Subgridelemente.

2.2 Szenarien zu Meeresspiegelanstieg und Wattentwicklung

Es werden sechs verschiedene Szenarien simuliert und ausgewertet. Diese sind in Tabelle 1 zusammengestellt. In dem Referenzszenario (ref) werden die Topographie und der Meeresspiegel unverändert belassen, es repräsentiert den Ist-Zustand. Im Szenario f110 wird die Topographie unverändert belassen und der Meeresspiegel um 110 cm erhöht. Der SLR von 110 cm entspricht dabei dem 83. Perzentil der Projektionen des RCP-8.5 Szenarios („weiter-wie-bisher“-Szenario) für das Jahr 2100 (IPCC 2019). Der SLR wird auf die Wasserstandsrandwerte am Modellrand des Deutschen Bucht Modells addiert. Um eine Bandbreite möglicher Topographieentwicklungen der Watten bei einem SLR abzudecken, werden zusätzlich zwei unterschiedliche Topographieszenarien erstellt: Im Szenario w55 werden bei einem SLR von 110 cm die Wattflächen um 55 cm erhöht. Dies entspricht einem anteiligen Mitwachsen der Wattflächen mit dem Meeresspiegel um 50%. Im Szenario w110 werden bei einem SLR von 110 cm die Watten um 110 cm erhöht, welches einem vollständigen Mitwachsen der Wattflächen mit dem Meeresspiegel entspricht. Zusätzlich werden diese unterschiedlichen Watterhöhungen in der Tideelbe auch regional differenziert, indem diese Topographieerhöhung zum einen nur bis in die Elbemündung (w55, w110) (siehe

Bild 4) sowie zum anderen in der gesamten Tideelbe (w55e, w110e) (siehe Bild 5) angenommen werden (siehe Tabelle 1). Die Auswahl der zu erhöhenden Gebiete erfolgt visuell anhand der Tiefeninformation der DGMS. Die Grenze der zu erhöhenden Wattgebiete wird so an dem Übergang von starkem Gefälle zu geringem Gefälle gezogen (zwischen Wattflächen und Rinnen bzw. an den Wattkanten). Dementsprechend bleibt die Topographie der Rinnen in den Tidebecken und der Fahrrinne der Elbe unverändert.

Tabelle 1: Untersuchte Szenarien

Szenario	Meeresspiegelanstieg	Wattenerhöhung
ref	-	-
f110	+110 cm	-
w55	+110 cm	+55 cm in der DB bis in die Elbmündung
w110	+110 cm	+110 cm in der DB bis in die Elbmündung
w55e	+110 cm	+55 cm in der DB sowie der gesamten Tideelbe
w110e	+110 cm	+110 cm in der DB sowie der gesamten Tideelbe

Tabelle 2: Volumendifferenz durch Topographieänderung

Volumendifferenz	Elbmündung	Gesamte Tideelbe	Gesamte Deutsche Bucht
55 cm Erhöhung	94.544.913 m ³	141.212.503 m ³	2.410.561.810 m ³
110 cm Erhöhung	188.917.319 m ³	282.421.671 m ³	4.821.179.410 m ³

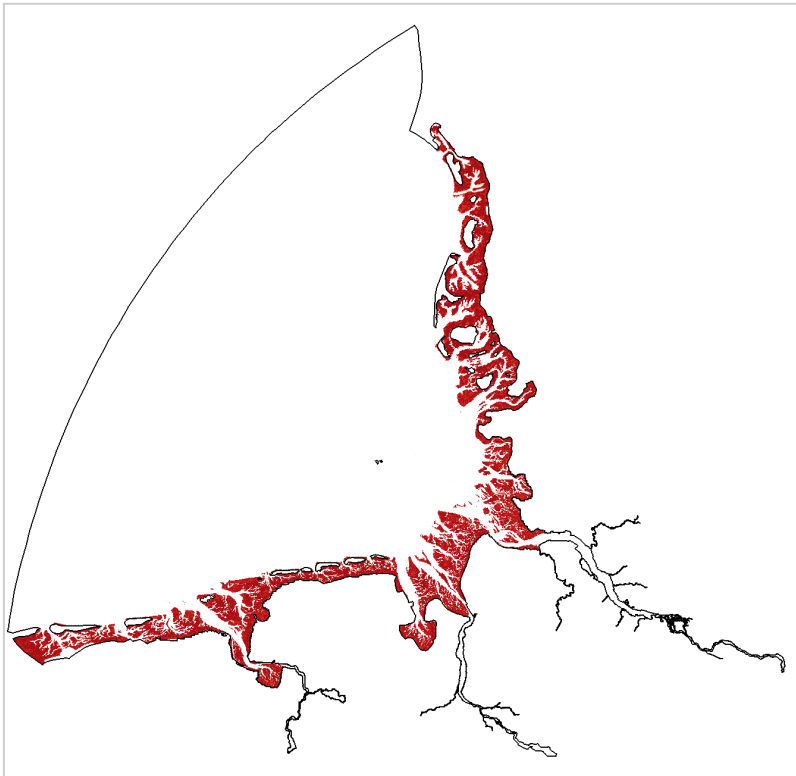


Bild 4: Topographieerhöhung der Wattflächen im Modell für die Szenarien w55 und w110

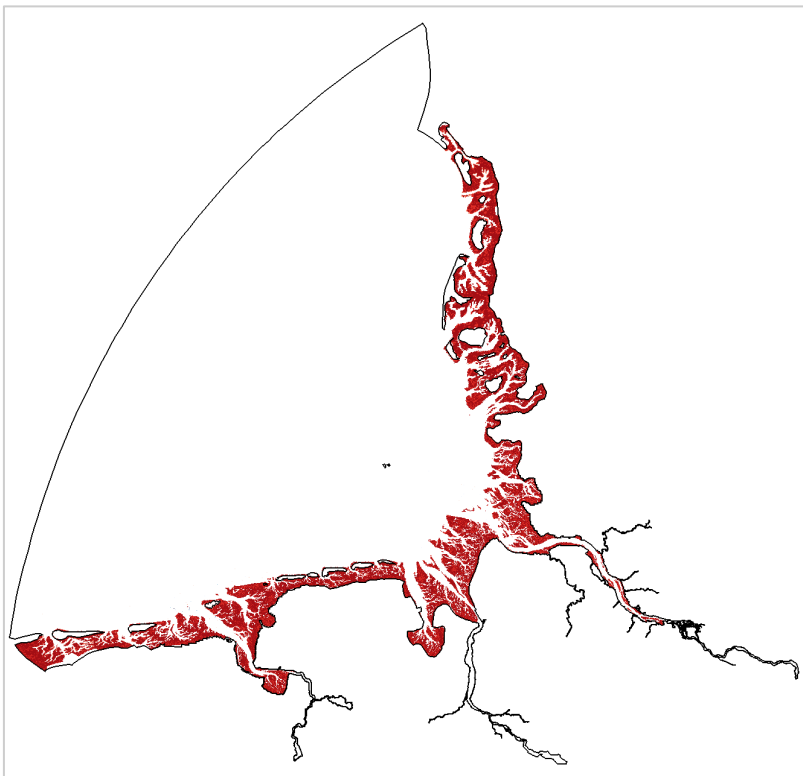


Bild 5: Topographieerhöhung der Wattflächen im Modell für die Szenarien w55e und w110e

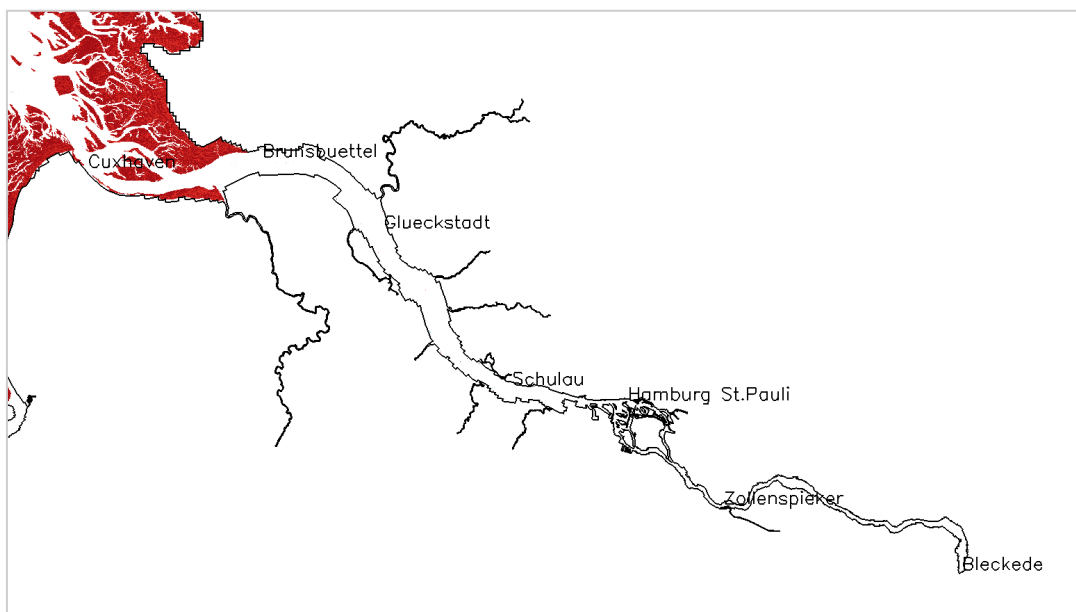


Bild 6: Topographieerhöhung der Wattflächen für die Szenarien w55 und w110 – Ausschnitt Tideelbe

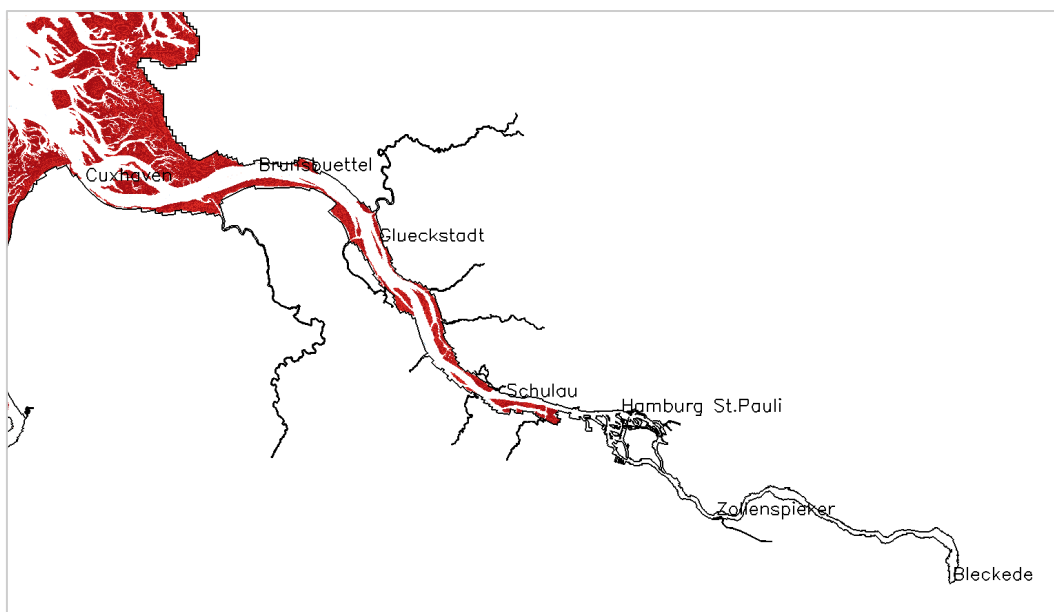


Bild 7: Topographieerhöhung der Wattflächen für die Szenarien w55e und w110e – Ausschnitt Tideelbe

2.3 Untersuchte Ereignisse

Bei den untersuchten Sturmflutereignissen handelt es sich um die historische Sturmflut vom 06.12.2013 (SF2013) und eine Sturmflut aus einer Klimaprojektion (siehe Abschnitt 2.3.2), welche zu einem besonders hohen Sturmflutscheitel führt (SFEH). Zusätzlich zu den beiden Sturmflutereignissen wird ein Spring-Nipp-Zeitraum im Juli 2013 (SN2013) untersucht, um die Unterschiede zwischen mittleren Tiden und Sturmflutereignissen zu analysieren. Die untersuchten Ereignisse sind in Tabelle 3 aufgelistet.

Tabelle 3: *Untersuchte Ereignisse*

Ereignis	Beschreibung
SF2013	hist. Sturmflut vom 06.12.2013
SFEH	Extrem hohe Sturmflut aus Klimaprojektion
SN2013	Spring-Nipp-Zeitraum Juli 2013

Für eine Sturmflutsimulation werden die zeitlich variierende Windgeschwindigkeit und Windrichtung sowie der atmosphärische Druck für das gesamte Modellgebiet benötigt. An den offenen Modellrändern müssen der zeitlich variierende Wasserstand, der Salzgehalt und der Oberwasserzufluss in die Ästuare eingesteuert werden. Die Herkunft und Details zu den Randwerten werden nachfolgend erläutert.

2.3.1 SF2013

Die Sturmflut vom 6. Dezember 2013 war mit einem Scheitel von NN +6,08m bei St. Pauli die zweithöchste Sturmflut in Hamburg seit Beginn der Aufzeichnung 1750 und wird gemäß der Definition des BSH (BSH 2020) als sehr schwere Sturmflut klassifiziert. Sie wurde durch ein Tiefdruckgebiet erzeugt, welches sich südlich von Grönland entwickelte und sich zum Orkantief Xaver verstärkte. Die Sturmflut entspricht hinsichtlich der Zugbahn ihres verursachenden Tiefdruckgebiets nach der Klassifikation von Gerber et al. (2016) dem NW-Typ. Der durch Xaver verursachte Wind hatte über 19 h lang eine Windgeschwindigkeit über 20 m/s mit einer Windrichtung von 270° bis 300° an der Messstation Scharhoern. Diese Windmessstation bildet durch ihre Lage in der Ästuar­mündung den für die Elbe relevanten Wind besonders gut ab (LSBG 2012). Die Windgeschwindigkeit und Windrichtung und die daraus berechnete effektive Windgeschwindigkeit bezogen auf die für die Elbe stauwirksamste Richtung von 290° (Siefert 1998) bei Scharhoern in 10 m Höhe sind in Bild 8 dargestellt.

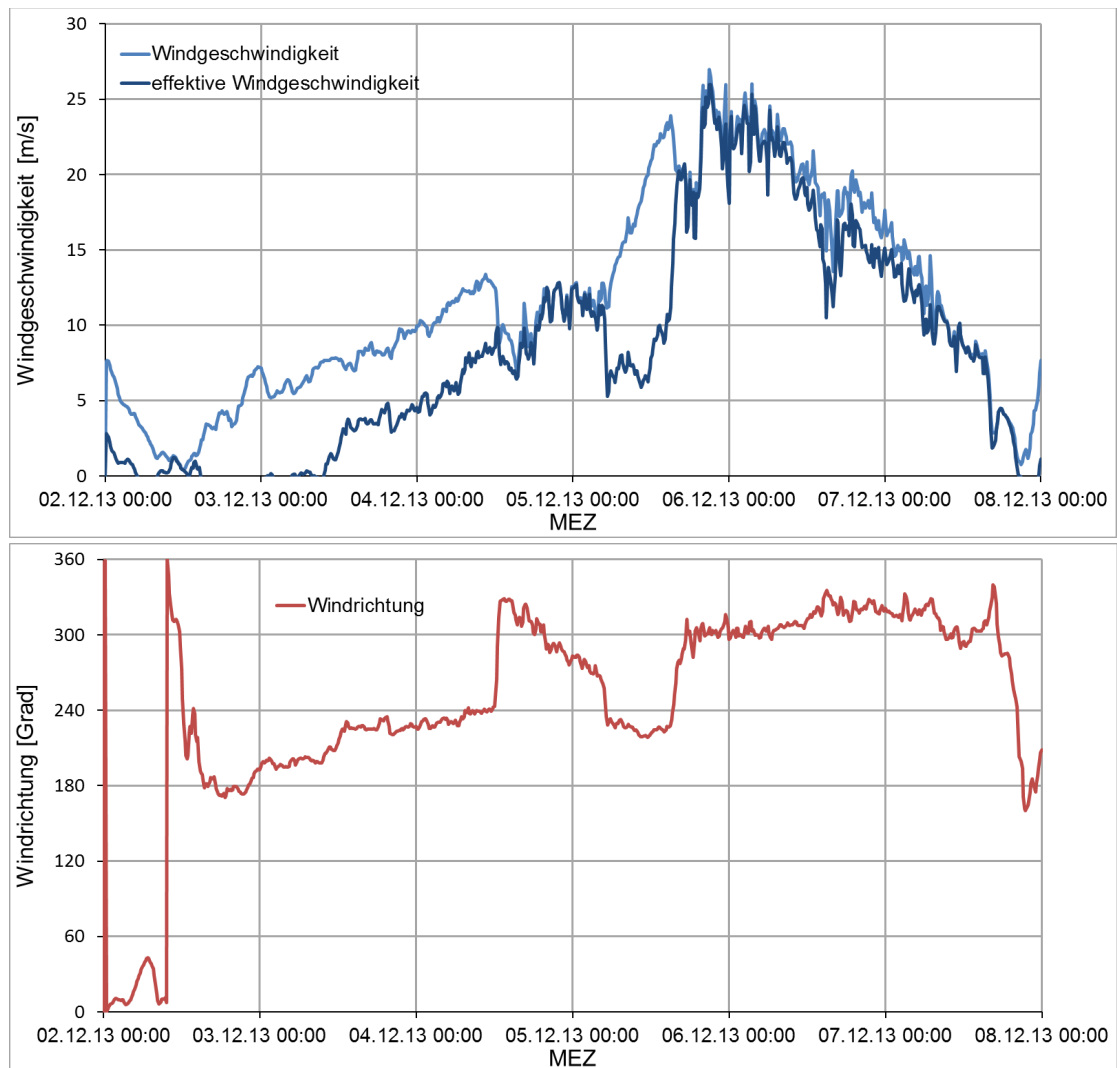


Bild 8: SF2013: Windgeschwindigkeit (hellblau) und effektive Windgeschwindigkeit bezogen auf 290° (dunkelblau), sowie Windrichtung (rot) bei Scharhoern in 10 m Höhe

Die Windstaukurve ist die Differenz aus tatsächlich eingetretenem Wasserstand und astronomischer Tide. In Bild 9 ist die aus den Messungen am Pegel Cuxhaven und der astronomischen Tide bei Cuxhaven berechnete Windstaukurve dargestellt.

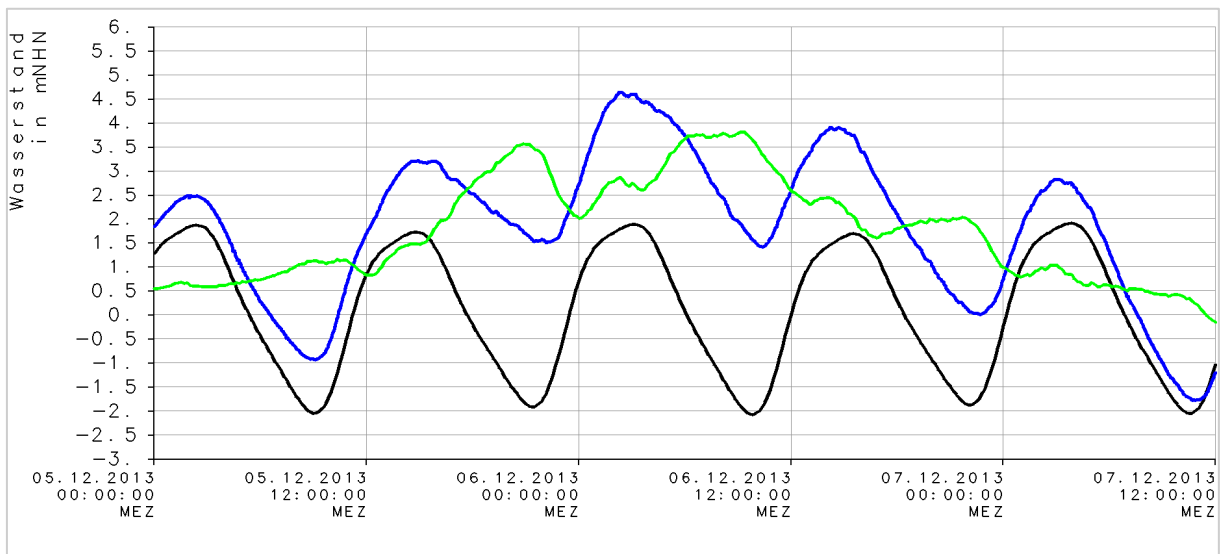


Bild 9: SF2013: astronomischer (schwarz) und gemessener Wasserstand (blau), sowie Windstaukurve (grün) bei Cuxhaven

Für die Simulation der historischen Sturmflut 2013 werden Randwerte des Wasserstands aus dem Kontinentalschelfmodell DCSMv6-FM verwendet, welches auf dem Vorgängermodell Dutch Continental Shelf Model Version 6 (DCSMv6-FM) (Zijl et al. 2013, Zijl et al. 2015) basiert und den gesamten nordwesteuropäischen Kontinentalschelf umfasst. Der Meeresspiegelanstieg wird im Deutsche Bucht Modell auf die am seeseitigen Rand eingesteuerten Randwerte des Wasserstands addiert. Die Winddaten, die in dem Schelfmodell (DCSMv6-FM) für die Simulation der Sturmflut 2013 verwendet werden, stammen aus dem Reanalyse-System COSMO-REA6 (Hans-Ertel-Zentrum für Wetterforschung)(Bollmeyer et al. 2015). Der im Deutsche Bucht Modell verwendete Wind ist ein Reanalysedatensatz aus dem Reanalyse-System COSMO-REA2 (Wahl et al. 2017), welches atmosphärische Prozesse mit einer Auflösung von 2 km simuliert. Da ein Vergleich der Winddaten aus dem Reanalysedatensatz mit Messdaten an einigen Orten im Modellgebiet (u.a. Messtation Scharhoern) deutlich zu niedrige Windgeschwindigkeiten im Zeitraum vom 05.12.13 19:00 bis zum 06.12.13 12:00 ergibt, wird die Windgeschwindigkeit in dem Datensatz in diesem Zeitraum um 15% erhöht. Für den Oberwasserzufluss der Ästuarie werden gemessene Zeitreihen des Abflusses im Zeitraum der Sturmflut 2013 (SF2013) bei Versen für die Ems, bei Intschede für die Weser und bei Neu Darchau für die Elbe verwendet. Das Wehr in Geesthacht wird im Modell für den gesamten Simulationszeitraum gelegt und die Sperrwerke der Nebenflüsse der Elbe geschlossen.

Tabelle 4: Randwerte SF2013

Randwerte	Herkunft
Oberwasserzufluss Elbe-Ästuar	569 – 621 m ³ /s (gemessen in Neu Darchau)
Seeseitiger Wasserstand Zusätzlich mit SLR von	Schelfmodell DCsMv6-FM + 110 cm
Windfeld über dem gesamten Modellgebiet +15% im Zeitraum:	COSMO-REA2 05.12.13 19:00 bis 06.12.13 12:00
Salz	
Seeseitig	33 PSU
Elbeästuar landseitig	0,4 PSU
Nebenflüsse der Elbe landseitig	0,3 PSU

Tabelle 5: Simulationszeitraum SF2013

Simulationszeitraum	02.12.2013-00:00 bis 08.12.2013-00:00
Simulationszeitschritt	30 s
Ausgabezeitschritt	10 min

2.3.2 SFEH

Die meteorologischen Daten für das Ereignis SFEH stammen aus einer Klimaprojektion. Dieses Ereignis kann anhand der Zugbahn seines verursachenden Tiefdruckgebiets auch als NW-Typ (Gerber et al. 2016) klassifiziert werden. Die Windgeschwindigkeit und Windrichtung während des Ereignisses SFEH und die daraus berechnete effektive Windgeschwindigkeit bezogen auf die für die Elbe relevante Richtung von 290° bei Scharhoern in 10 m Höhe ist in Bild 10 dargestellt.

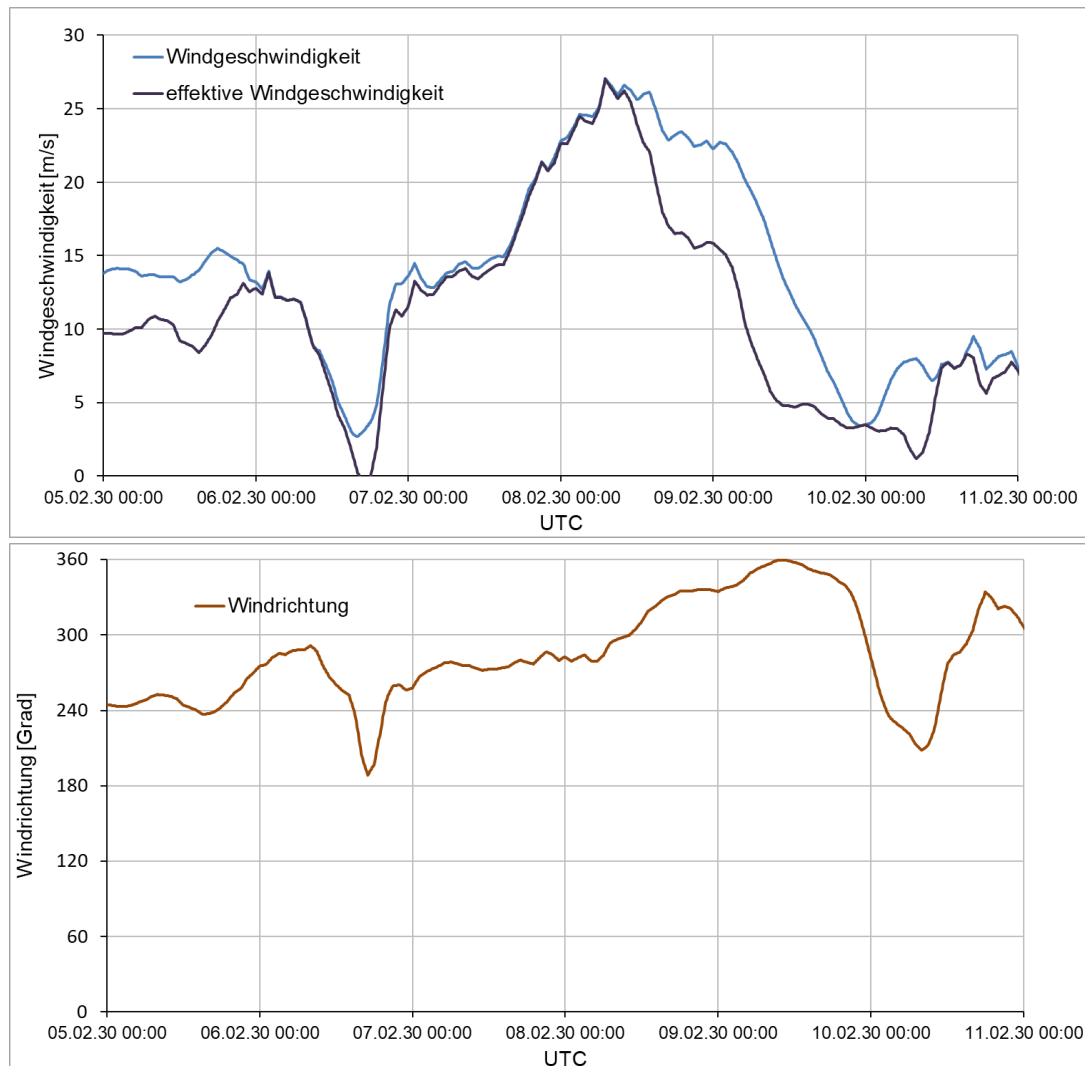


Bild 10: SFEH: Windgeschwindigkeit (hellblau) und effektive Windgeschwindigkeit bezogen auf 290° (dunkelblau), sowie Windrichtung (rot) bei Scharhoern in 10 m Höhe

In Bild 11 ist die Windstaukurve als Differenz aus dem Wasserstandsverlauf der Simulationsergebnisse und der astronomischen Tide bei Cuxhaven dargestellt. Die beiden hohen Wasserstände in dem dargestellten Zeitraum können als sehr schwere Sturmflut klassifiziert werden (BSH 2020). Analysiert wird im Folgenden nur der zweite, höhere Scheitel.

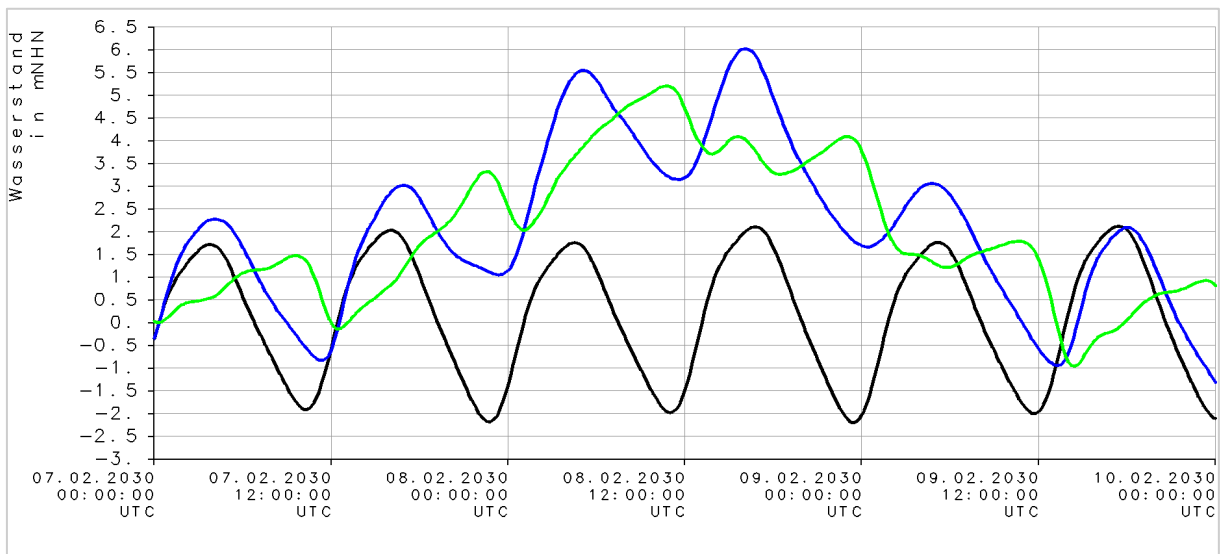


Bild 11: SFEH: astronomischer (schwarz) und gemessener Wasserstand (blau), sowie Windstaukurve (grün) bei Cuxhaven

Die meteorologischen Daten für das Ereignis SFEH stammen aus Klimaprojektionen des globalen Modells ECHAM5/MPIOM (Röckner et al. 2003). Das Ereignis EH wurde in einer der Klimaprojektionen basierend auf dem Emissionsszenario B1 im Februar 2030 gefunden (Gaslikova et al. 2013). Die Zeitreihen der jährlichen Hochwassermaxima der Projektionen zeigen dekadische und multi-dekadische Schwankungen, aber keinen signifikanten Trend in dem Zeitraum von 1961 bis 2100, weshalb angenommen werden kann, dass diese Ereignisse auch schon im heutigen Klima stattfinden könnten (Rudolph et al. submitted).

Die Winddaten aus dem globalen Modell ECHAM5/MPIOM wurden als Randwerte für das Regionalmodell COSMO-CLM (Rockel et al. 2008) verwendet. Die Daten aus COSMO-CLM werden für das hier verwendete Deutsche Bucht Modell verwendet. Der eingesteuerte Wind ist identisch mit dem Wind, der auch für das übergeordnete Nordseemodell TRIM-NP (Kapitza und Eppel 2000) verwendet wurde, welches die Wasserstandsrandwerte für das Deutsche Bucht Modell bereitgestellt hat (Rudolph et al. submitted).

Für den Oberwasserzufluss der Ästuarie wird für eine bessere Vergleichbarkeit das Mittel der gemessenen Abflusswerte für den Zeitraum der Sturmflut 2013 verwendet. Auch hier wird das Wehr in Geesthacht im Modell für den gesamten Simulationszeitraum gelegt und die Sperrwerke der Nebenflüsse der Elbe geschlossen.

Tabelle 6: Randwerte SFEH

Randwerte	Herkunft
Oberwasserzufluss Elbe-Ästuar	600 m ³ /s
Seeseitiger Wasserstand Zusätzlich mit SLR von	Nordseemodell Trim-NP + 110 cm
Windfeld über dem gesamten Modellgebiet	COSMO-CLM
Salz	
Seeseitig	33 PSU
Elbeästuar landseitig	0,4 PSU
Nebenflüsse der Elbe landseitig	0,3 PSU

Tabelle 7: Simulationszeitraum SFEH

Simulationszeitraum	01.02.2030-00:00 bis 12.02.2030-23:40
Simulationszeitschritt	30 s
Ausgabezeitschritt	10 min

2.3.3 SN2013

Zusätzlich zu den beiden Sturmflutereignissen wird ein Spring-Nipp-Zeitraum bestehend aus 28 Tiden simuliert und analysiert. Dieser Zeitraum befindet sich im Juli 2013, also im selben Jahr wie die SF2013. Der Wind spielt in diesem Zeitraum eine untergeordnete Rolle, daher stimmt der Wasserstand der astronomischen Tide und der gemessenen Tide fast überein (siehe Bild 12).

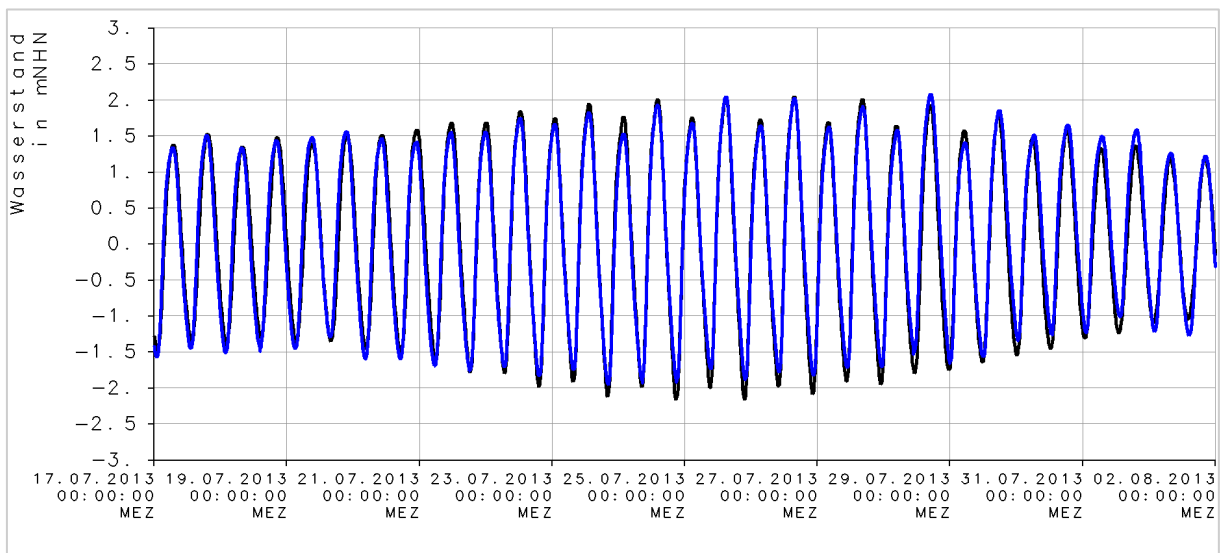


Bild 12: SN2013: astronomischer (schwarz) und gemessener Wasserstand (blau) bei Cuxhaven

Die Randwerte des Wasserstands und das Windfeld für die Simulation des Spring-Nipp-Zeitraums im Juli 2013 stammen aus denselben Datensätzen, wie für die Sturmflut 2013. Um die Analyseergebnisse des Spring-Nipp-Zeitraums besser mit denen der Sturmflutereignisse vergleichen zu können, wird auch hier über den Simulationszeitraum konstant der Mittelwert des Abflusses während des Sturmflutereignisses 2013 eingesteuert und im Modell das Wehr in Geesthacht gelegt. Nach Untersuchungen von Kremp et al. (2012) führt ein gelegtes Wehr, im Vergleich zu Simulationen mit dem Wehr als landseitige Modellgrenze, bei einem Abfluss von $400\text{m}^3/\text{s}$ in dem Modell nur stromauf von Bunthaus zu Unterschieden von ca. 1cm im Thw und bis zu 5 cm im Tnw. Die Sperrwerke der Nebenflüsse bleiben bei der Simulation der mittleren Tiden, anders als bei den Sturmflutereignissen im Modell geöffnet.

Tabelle 8: Randwerte SN2013

Randwerte	Herkunft
Oberwasserzufluss Elbe-Ästuar	600 m ³ /s
Seeseitiger Wasserstand Zusätzlich mit SLR von	Schelfmodell DCsMv6-FM + 110 cm
Windfeld über dem gesamten Modellgebiet	COSMO-REA2
Salz	
Seeseitig	33 PSU
Elbeästuar landseitig	0,4 PSU
Nebenflüsse der Elbe landseitig	0,3 PSU

Tabelle 9: Simulationszeitraum SN2013

Simulationszeitraum	01.07.2013-00:00 bis 15.08.2013-00:00
Simulationszeitschritt	30 s
Ausgabezeitschritt	10 min

2.4 Analyse der Modellergebnisse

Die Berechnungsergebnisse der hydrodynamisch-numerischen Simulation mit UnTrim² liegen für jeden Berechnungspunkt als synoptische Daten des Wasserstands und der Strömung in Ausgabezeitschritten von 10 Minuten vor. Im Rahmen einer sich an die Modellrechnung anschließenden Auswertung der Modellergebnisse werden die in Tabelle 10 aufgelisteten Kennwerte des Wasserstands, der tiefengemittelten Strömung und des Durchflusses analysiert und visualisiert.

Tabelle 10: Untersuchte Kennwerte

Tideunabhängige Kennwerte des Wasserstands	Bezeichnung
Sturmflutscheitelwasserstand	HW
Tidekennwerte des Wasserstands	
Mittleres Tidehochwasser	MThw
Mittleres Tideniedrigwasser	MTnw
Mittlerer Tidehub	MThb
Intertidale Fläche	Intertidale Fläche
Tidekennwerte der Strömung	
Mittlere Flutstromgeschwindigkeit einer Tide	VfMtTide
Mittlere Flutstromgeschwindigkeit Mittelwert mehrerer Tiden	VfMtMit
Mittlere Ebbstromgeschwindigkeit einer Tide	VeMtTide
Mittlere Ebbstromgeschwindigkeit Mittelwert mehrerer Tiden	VeMtMit
Flutstromvolumen einer Tide	QfTide
Flutstromvolumen Mittelwert mehrerer Tiden	QfTMit
Mittlere hor. durchströmte Kantenfläche	MHTrKa

2.4.1 (Tide) Kennwerte des Wasserstands

Sturmflutscheitelwasserstand

Der Sturmflutscheitelwasserstand, oder auch Hochwasserstand (HW) ist der höchste Wasserstand im Analysezeitraum. Diese Analysegröße gehört zu den Tideunabhängigen Kennwerten des Wasserstands (siehe Bild 13). Diese Größe wird im Folgenden auf einem Längsprofil entlang der Fahrrinnenmitte sowie in der Fläche für den Bereich der Elbmündung dargestellt. Die Analysezeiträume für die untersuchten Sturmflutereignisse sind in Tabelle 11 genannt.

Tabelle 11: Analysezeitraum HW

Analysezeitraum	SF2013	SFEH
Von	05.12.2013-12:00	07.02.2030-12:00
Bis	07.12.2013-00:00	09.02.2030-19:00

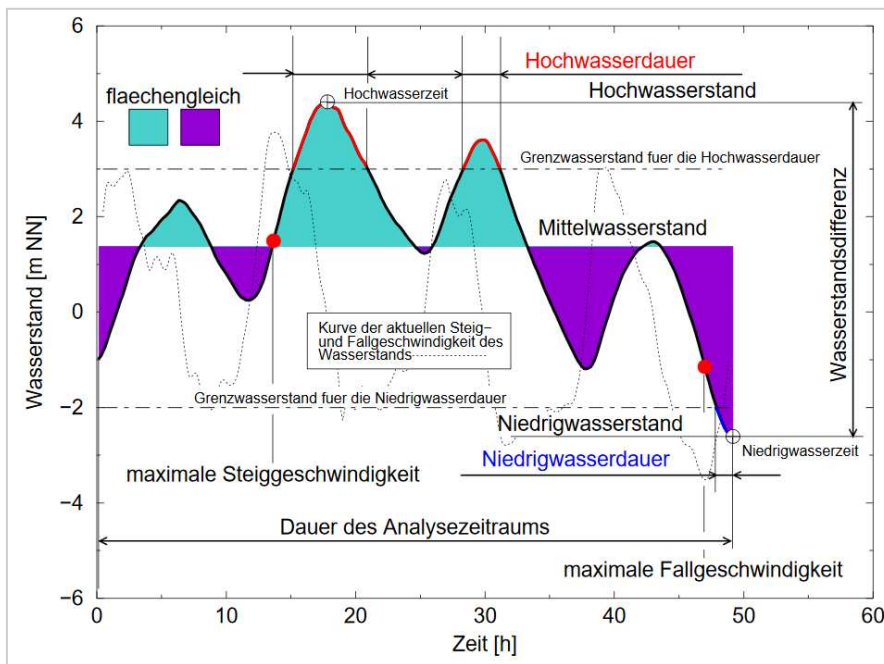


Bild 13: Tideunabhängige Kennwerte des Wasserstands (Lang 2003)

Mittleres Tidehochwasser, mittleres Tideniedrigwasser und mittlerer Tidehub

Durch eine Tidekennwertanalyse des Wasserstands wird das mittlere Tidehochwasser (MThw), das mittlere Tideniedrigwasser (MTnw), sowie der mittlere Tidehub (MThb) der 28 Tiden des simulierten Spring-Nipp-Zeitraums (SN2013) ermittelt. Diese drei Analysegrößen sind in Bild 14 dargestellt. Auch diese Größen werden im Folgenden auf einem Längsprofil entlang der Fahrrinnenmitte dargestellt. Das MThw wird außerdem für den Bereich der Elbmündung in der Fläche dargestellt. Der Analysezeitraum ist in Tabelle 12 genannt.

Tabelle 12: Analysezeitraum für Tidekennwerte des Wasserstands

Analysezeitraum	SN2013
Von	17.07.2013-09:00
Bis	01.08.2013-04:00

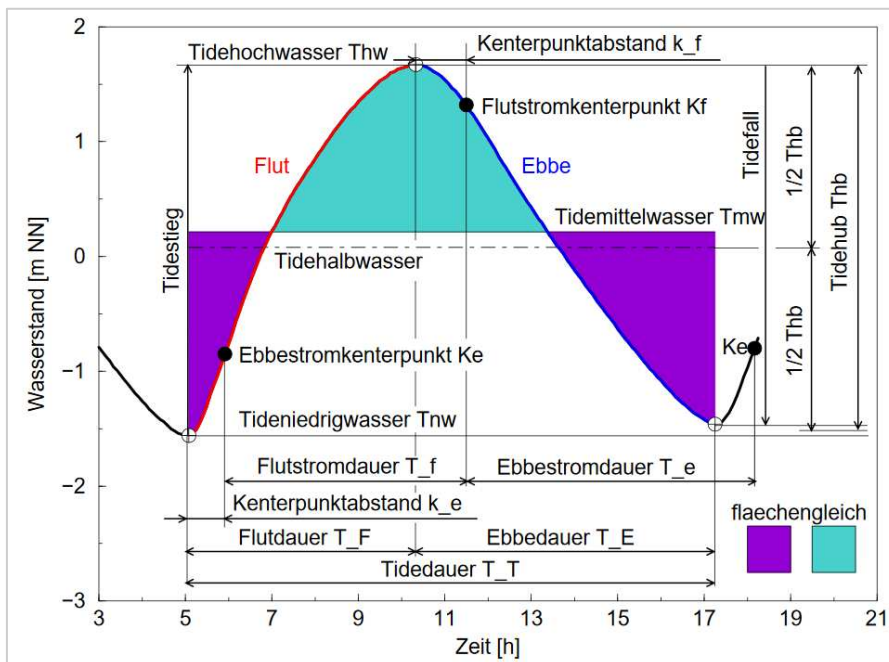


Bild 14: Tidenennwerte des Wasserstands (Lang 2003)

2.4.2 Tidenennwerte der Strömung

Mittlere Flut- und Ebbestromgeschwindigkeit

Die mittlere Flutstromgeschwindigkeit ($V_{fMtTide}$) ist die mittlere Strömungsgeschwindigkeit während des Flutstroms einer Tide und die mittlere Ebbestromgeschwindigkeit ($V_{eMtTide}$) die mittlere Strömungsgeschwindigkeit während des Ebbestroms einer Tide. Über mehrere Tiden wird der Mittelwert der mittleren Flutstromgeschwindigkeiten (V_{fMtMit}) und der mittleren Ebbestromgeschwindigkeiten (V_{eMtMit}) gebildet. Die mittlere Flut- und Ebbestromgeschwindigkeit wird entlang des Profils der Elbe tiefengemittelt in der Fahrrinnenmitte analysiert und dargestellt. Es wird für SN2013 der gesamte Spring-Nipp-Zeitraum und für die Sturmflutereignisse SF2013 und SFEH nur die höchste Tide analysiert (siehe Tabelle 13).

Tabelle 13: Analysezeitraum V_{fMt} und V_{eMt}

Analysezeitraum	SN2013	SF2013	SFEH
Von	17.07.2013-09:00	05.12.2013-18:00	08.02.2030-09:00
Bis	01.08.2013-04:00	06.12.2013-12:00	09.02.2030-03:00

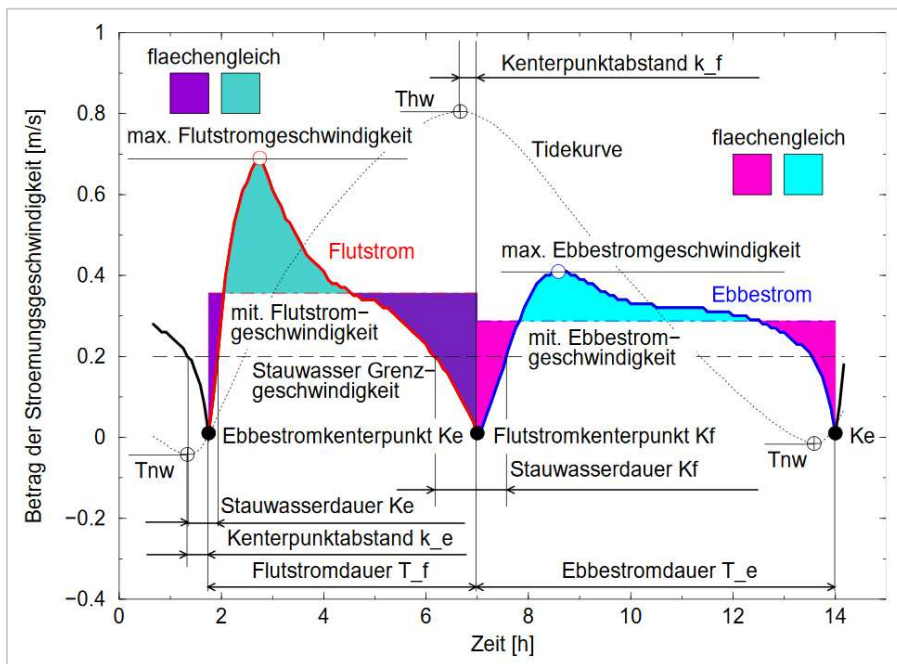


Bild 15: Tidekennwerte der Strömung (Lang 2003)

2.4.3 Aggregierte Analysegrößen

Zur Analyse des Flutstromvolumens und der Durchflussfläche werden die Simulationsergebnisse zunächst innerhalb von zuvor definierten Kontrollvolumen (siehe Bild 16) aggregiert und anschließend analysiert. Zur Analyse der intertidalen Fläche werden die Simulationsergebnisse zunächst analysiert und anschließend innerhalb der definierten Kontrollvolumen aggregiert. Die Ergebnisse des Flutstromvolumens und der Durchflussfläche beziehen sich auf die Kantenflächen der aneinander angrenzenden Kontrollvolumen. Die intertidale Fläche bezieht sich auf die Fläche innerhalb der definierten Kontrollvolumen. Die zur Definition der Kontrollvolumen verwendeten Polygone sind in Bild 16 dargestellt. Da weiter seeseitig keine eindeutigen Kontrollvolumen mehr definiert werden können, werden diese beiden Größen erst ab Elbe-km 730 analysiert und visualisiert. Die Visualisierung erfolgt auch als Liniendiagramm entlang des Längsprofils der Tideelbe (siehe Bild 16). Dabei ist jedoch zu beachten, dass die Daten nicht auf Punkten auf dem Längsprofil liegen, sondern auf den Polygonen bzw. den Kantenflächen der Polygone.

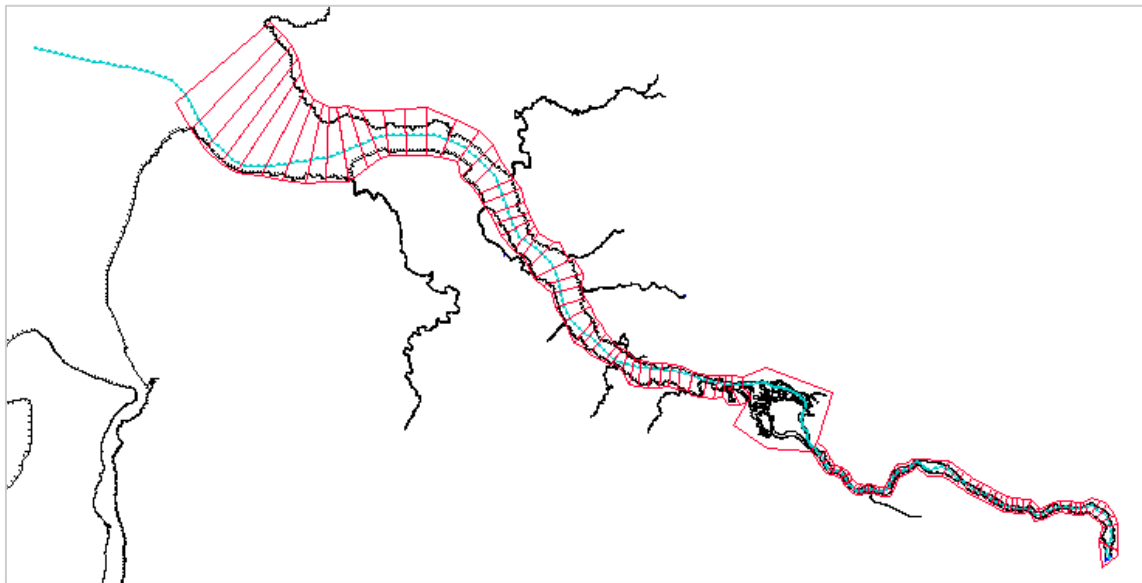


Bild 16: Polygone zur Aggregation der Simulationsergebnisse sowie das Längsprofil entlang der Tideelbe

Flutstromvolumen

Das Flutstromvolumen (Q_f Tide) ist ein Tidekennwert des Durchflusses (s. Bild 17). Es ist das Wasservolumen, welches während des Flutstroms einer Tide durch eine definierte Kantenfläche (siehe Bild 16) fließt. Es wird das Flutstromvolumen an den definierten Kantenflächen entlang der Tideelbe ermittelt und anschließend entlang des Profils der Tideelbe dargestellt. Für SN2013 wird das mittlere Flutstromvolumen der 28 Tiden (Q_f Mit) ermittelt und dargestellt, während für SF2013 und SFEH nur die höchste Tide analysiert wird (Tabelle 14).

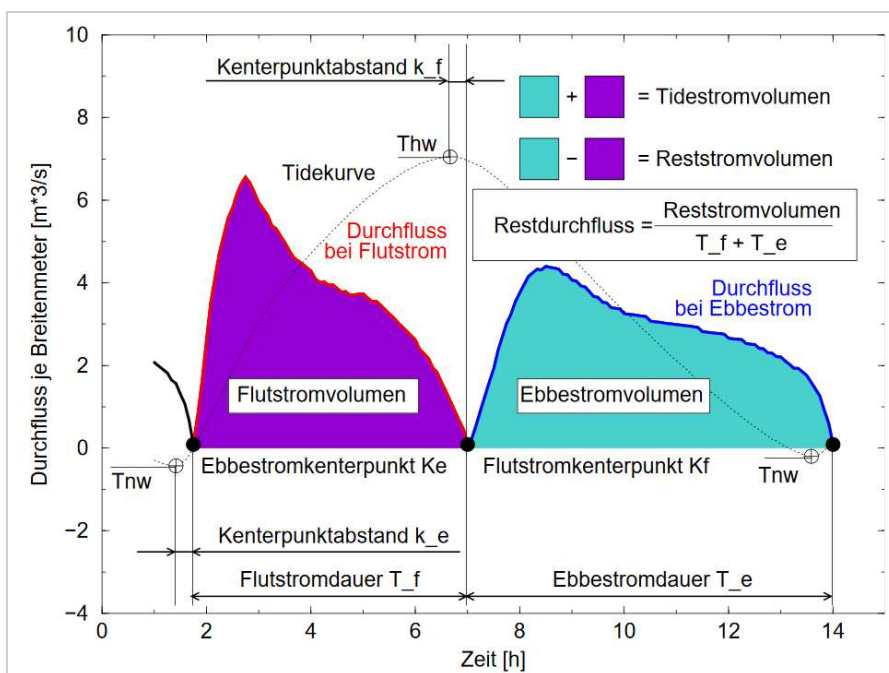


Bild 17: Tidekennwerte des Durchflusses (Lang 2003)

Mit. hor. durchströmte Kantenfläche bzw. Durchflussfläche

Die mittlere horizontal durchströmte Kantenfläche (MHTrKa) beschreibt die Größe der Fläche, welche bei mittlerem Flut-Volumenstrom an den definierten Kantenflächen (Bild 16) durchströmt wird, und wird im nachfolgenden auch Durchflussfläche genannt. Auch diese Größe wird entlang des Längsprofils der Tideelbe dargestellt und für SN2013 als Mittelwert aller Tiden und für SF2013 und SFEH für die höchste Tide analysiert und visualisiert (Tabelle 14).

Tabelle 14: Analysezeitraum für Qf und MHTrKa

Analysezeitraum	SN2013	SF2013	SFEH
Von	17.07.2013-09:00	05.12.2013-18:00	08.02.2030-09:00
Bis	01.08.2013-04:00	06.12.2013-12:00	09.02.2030-03:00

Intertidale Fläche

Die Differenz der Wasseroberfläche bei MThw und der Wasseroberfläche bei MTnw wird im Nachfolgenden als intertidale Fläche bezeichnet. Diese intertidale Fläche entspricht in etwa den Wattflächen, welche zwischen MTnw und MThw liegen. Diese Größe in den Analyseergebnissen beschreibt die Fläche zwischen MTnw und MThw innerhalb jedes definierten Polygons (Bild 16). Die Größe der intertidalen Fläche innerhalb der Polygone wird auch entlang des Längsprofils der Tideelbe dargestellt. Da sich diese Größe auf das MTnw und das MThw bezieht, wird sie mithilfe einer Tidekennwertanalyse des Wasserstandes für die mittleren Tiden im Spring-Nipp-Zeitraum (SN2013) ermittelt. Der Analysezeitraum ist in Tabelle 12 dargestellt. Für die Sturmflutereignisse wird die Fläche zwischen dem Sturmflutscheitelwasserstand (HW) und dem vorangehenden Tnw analysiert und dargestellt. Es handelt sich dabei um eine ereignisspezifische Größe, die im Folgenden als sturmflutspezifische intertidale Fläche bezeichnet wird.

3 Ergebnisse

3.1 Zusammenfassung der Ergebnisse

Sturmflutscheitelwasserstand und mittleres Tidehochwasser

Die in diesem Bildatlas vorgestellten Sensitivitätsuntersuchungen zeigen, dass eine Erhöhung des Meeresspiegels (SLR) um 110 cm in der Tideelbe zu einer Erhöhung des Sturmflutscheitelwasserstands (HW) und des mittleren Tidehochwassers (MThw) in der Größenordnung des SLR führt (siehe auch Rudolph 2014). Dabei liegen jedoch sowohl der Anstieg des HW der beiden untersuchten Sturmflutereignisse als auch des MThw des untersuchten Spring-Nipp-Zeitraums von der Mündung (Elbe-km 755) bis etwa Elbe-km 610 fast immer über dem eingesteuerten SLR (siehe Abschnitt 3.3.). In den untersuchten Ereignissen liegt das HW dabei schon in der Elbmündung (Bake A, Elbe-km 755) etwa 4 cm über dem am Rand des Deutsche Bucht Modells eingesteuerten SLR und erhöht sich im mittleren Ästuar auf bis zu 15 cm über den eingesteuerten SLR von 110 cm (siehe Bild 120).

Eine Erhöhung der Wattflächen in der Deutschen Bucht und der Elbmündung bei gleichem SLR (w55 und w110) wirkt dieser Entwicklung entgegen und senkt das HW und das MThw wieder um bis zu 14 cm (siehe Bild 111). Bei vollständig mit dem SLR mitgewachsenen Wattflächen (w110) ist dieser Effekt deutlich stärker als bei anteilig mitgewachsenen Wattflächen (w55) (Bild 111 und Bild 124). Eine Erhöhung der Wattflächen in der DB sowie der gesamten Tideelbe (w55e und w110e) führt bei den beiden untersuchten Sturmflutereignissen ebenfalls zu einem Absinken des Sturmflutscheitels. Die Unterschiede zwischen den Szenarien w55, w110 und w55e, w110e liegen bei beiden Sturmflutereignissen im Bereich von 2-3 cm. Dagegen zeigt sich in dem Spring-Nipp-Zeitraum SN2013 eine entgegengesetzte Wirkung. Hier kommt es bei einer Erhöhung der Wattflächen in der gesamten Tideelbe (w55e und w110e) stromauf von Elbe-km 690 zu einem Anstieg des MThw um bis zu 6 cm gegenüber dem Szenario mit alleinigem SLR (f110) (siehe Bild 86). Die erhöhten Wattflächen führen hier also nicht zu einem Absinken, sondern zu einem zusätzlichen Anstieg des MThw. Der Tidehub (MThb) bei SN2013 vergrößert sich durch den SLR (f110) (Bild 94 und Bild 96). Eine Erhöhung der Wattflächen bis in die Mündung (w55 und w110) wirkt dem entgegen (Bild 94), wobei eine Erhöhung der Wattflächen in der gesamten Tideelbe (w55e und w110e) den Tidehub noch stärker vergrößert (Bild 96), da bezogen auf den alleinigen SLR (f110) das MThw ansteigt und das MThw deutlich absinkt.

Strömungsgeschwindigkeiten zu ausgewählten Zeitpunkten im Referenzzustand

Ein Vergleich der tiefengemittelten Strömungsgeschwindigkeit und -richtung an bestimmten Zeitpunkten in der Elbmündung im Referenzzustand zeigt unter anderem, dass die stromaufgerichtete Geschwindigkeit auf den Wattflächen während des Flutstroms bei den mittleren Tiden (SN2013) gering (<0,5 m/s) ist (siehe Bild 133 und Bild 134). Zu deutlich höheren stromaufgerichteten Geschwindigkeiten kommt es bei den mittleren Tiden (SN2013) in den Rinnen, insbesondere der Fahrrinne. Bei den Sturmflutereignissen SF2013 und SFEH ist dagegen eine höhere (>0,5 m/s) stromaufgerichtete Flutstromgeschwindigkeit (Flutstrom vor dem HW) nicht nur in der Fahrrinne, sondern auch auf den Wattflächen zu erkennen (siehe Bild 138 und Bild 142).

Mittlere Flut- und Ebbstromgeschwindigkeit

Die Analyse der Simulationsergebnisse zeigt für die tiefengemittelte mittleren Flutstromgeschwindigkeit (V_{fMt}) entlang der Fahrrinnenmitte bei den beiden Sturmflutereignissen SF2013 und SFEH durch den SLR (f110) eine Reduktion im Bereich der Elbmündung und eine Erhöhung stromauf der Elbmündung (etwa ab Elbe-km 705) (Bild 153 und Bild 161). Eine Erhöhung der Wattflächen wirkt diesen Veränderungen entgegen, wobei ein vollständiges Mitwachsen der Wattflächen (w110) einen größeren Einfluss hat, als ein anteiliges Mitwachsen (w55). Im untersuchten Spring-Nipp-Zeitraum (SN2013) kommt es durch den SLR (f110) von der Mündung bis etwa Elbe-km 590 fast durchgehend zu einer Erhöhung der V_{fMt} in der Fahrrinne (Bild 145). Die erhöhten Wattflächen (w55 und w110) reduzieren die V_{fMt} in der Fahrrinne bei SN2013 in der Mündung bis Cuxhaven deutlich, haben jedoch stromauf nur einen geringen Einfluss. Eine Wattenerhöhung in der gesamten Tideelbe (w55e und w110e) kann die V_{fMt} in der Fahrrinne auch stromauf der Mündung deutlicher reduzieren, führt jedoch ab etwa Elbe-km 640 zu einer zusätzlich erhöhten V_{fMt} (Bild 147). Die tiefengemittelte mittlere Ebbstromgeschwindigkeit (V_{eMt}) entlang der Fahrrinnenmitte verringert sich bei den Sturmflutereignissen durch den SLR in der Elbmündung bis etwa Brunsbüttel und ändert sich stromauf nur sehr geringfügig (Bild 157 und Bild 159). Die erhöhten Wattflächen können auch dieser Änderung etwas entgegenwirken.

Flutstromvolumen

Durch den SLR ist eine Vergrößerung des Flutstromvolumens (Q_f) entlang des Elbe-Längsprofils zu erkennen (siehe Abschnitt 3.6). Die in der DB und der Elbmündung erhöhten Wattflächen (w55 und w110) führen bei den mittleren Tiden (SN2013) nur zu einer lokalen Reduktion des Q_f (siehe Bild 169), wogegen sie bei den Sturmfluten (SF2013 und SFEH) das Q_f auch stromauf der Mündung deutlich reduzieren und dem Effekt des SLR entgegenwirken können (Bild 173 und Bild 177). Auch hier ist der Effekt der erhöhten Watten bei einem vollständigen Mitwachsen der Wattflächen deutlich größer, als bei einem anteiligen Mitwachsen. Werden die Wattflächen in der gesamten Tideelbe erhöht (w55e und w110e), führt dies bei allen Ereignissen zunächst zu einem noch stärker reduzierten Flutstromvolumen entlang des Profils, bei SF2013 und SN2013 stromauf von Elbe-km 650 jedoch zu einem leicht vergrößerten Q_f (Bild 175, Bild 179 und Bild 171).

Durchflussfläche bzw. mit. hor. durchströmte Kantenfläche

Die Durchflussfläche bzw. die mittlere horizontal durchströmte Kantenfläche bei mittlerem Flutvolumenstrom (MHTrKa) entlang der Tideelbe nimmt in allen Szenarien stromauf ab (siehe 3.7). Dies ist durch die Ästuar-typische Trichterform der Tideelbe begründet. Die stärkste Abnahme ist dabei im Mündungstrichter von der Mündung bis etwa Brunsbüttel zu erkennen. Die Abnahme der Durchflussfläche stromauf des Ästuars wird im Folgenden als Konvergenz bezeichnet. Bei den Sturmflutereignissen (SF2013 und SFEH) ist eine größere Durchflussfläche und eine stärkere Konvergenz der Durchflussfläche im Vergleich zu den mittleren Tiden (SN2013) zu erkennen. Die Durchflussfläche vergrößerte sich durch den SLR (f110) bei allen untersuchten Ereignissen. Die rel. Änderung zum Referenzzustand deutet darauf hin, dass sich die Durchflussfläche durch den SLR stärker vergrößert, je größer der Anteil an flachen Wattgebieten im Querschnitt der Tideelbe ist. Die relative Vergrößerung der Durchflussfläche zum Referenzzustand durch den SLR ist im Mündungstrichter seeseitig am größten und nimmt stromauf ab (siehe Bild 185, Bild 189 und Bild 181). Dies deutet darauf hin, dass sich die Konvergenz der Durchflussfläche im Mündungstrichter

durch den SLR verstärkt. Die bis in den Mündungstrichter erhöhten Wattflächen (w55 und w110) wirken dem Effekt des SLR entgegen, da sie dort die Durchflussfläche verringern und die Konvergenz der Durchflussfläche im Mündungstrichter wieder reduzieren. Werden die Wattflächen in der gesamten Tideelbe erhöht (w55e und w110e), so verkleinert sich die Durchflussfläche auch stromauf des Mündungstrichters deutlich (Bild 187, Bild 191 und Bild 183).

Intertidale Fläche

Die intertidale Fläche, bzw. die Wasseroberfläche zwischen MTnw und MThw kann sich bei SLR durch einen veränderten Tidehub und je nach Steigung der Topographie vergrößern, verkleinern, oder unverändert bleiben. Da sich diese Fläche auf das MThw und das MTnw bezieht, kann diese Größe nur für die untersuchten mittleren Tiden im Spring-Nipp-Zeitraum (SN2013) ausgewertet werden. Da das Tnw vor dem HW bei den untersuchten Sturmfluten stark erhöht ist, ist die Differenz zwischen der Wasseroberfläche bei Thw und Tnw bei diesen Ereignissen deutlich kleiner. Diese Wasseroberfläche zwischen dem Sturmflutscheitelwasserstand (HW) und dem vorangehenden Tnw wird hier als sturmflutspezifische intertidale Fläche bezeichnet. Die Analyse der Simulationsergebnisse von SN2013 in der Tideelbe zeigt in der Elbemündung zwischen Cuxhaven und Elbe-km 710 eine Abnahme der intertidalen Fläche durch den SLR (f110) (siehe Bild 193). Stromauf von Elbe-km 710 bis Elbe-km 645 ist dagegen eine starke Vergrößerung der intertidalen Fläche durch den SLR zu erkennen. Im Referenzzustand (ref) supratidale Flächen (über dem MThw) werden dort bei SLR (f110) zu intertidalen Flächen (unterhalb des MThw). Die relative Änderung zum Referenzzustand zeigt, dass sich in diesem Bereich der unteren Tideelbe die intertidale Fläche durch den SLR, je nach Abschnitt um bis zu deutlich über 100% vergrößert. Durch die dort erhöhten Wattflächen (w55e und w110e) wird dieser Änderung entgegengewirkt und die Größe der intertidalen Fläche relativ zu einem alleinigen SLR stark reduziert (Bild 195). Bei SF2013 ist die sturmflutspezifische intertidale Fläche insbesondere in der Mündung (von Cuxhaven bis Brunsbüttel) deutlich kleiner als die intertidale Fläche, hat stromauf von Brunsbüttel jedoch die gleiche Größenordnung (Bild 196). Durch den SLR von 110 cm nimmt die sturmflutspezifische intertidale Fläche, anders als die intertidale Fläche der mittleren Tiden, fast im gesamten dargestellten Abschnitt der Tideelbe stark ab. Die erhöhten Wattflächen sowohl in der Mündung (w55 und w110) als auch stromauf (w55e und w110e) wirken dieser Änderung entgegen und vergrößern die sturmflutspezifische intertidale Fläche relativ zum alleinigen SLR (Bild 197 und Bild 199). Bei dem Sturmflutereignis SFEH ist die sturmflutspezifische intertidale Fläche im gesamten dargestellten Abschnitt der Tideelbe deutlich kleiner als bei SF2013 und als die intertidale Fläche der mittleren Tiden. Auch hier kommt es durch den SLR fast überall zu einer Abnahme der sturmflutspezifischen intertidalen Fläche in der Tideelbe, der die erhöhten Wattflächen entgegenwirken (Bild 201 und Bild 203).

3.2 Zeitreihen des Wasserstands und der Strömung an ausgewählten Orten

In diesem Abschnitt sind Zeitreihen des Wasserstands und des Betrags der tiefengemittelten Strömungsgeschwindigkeit an ausgewählten Orten entlang der Elbe für die Sturmfluten SF2013 und SFEH sowie für einen Ausschnitt von SN2013 dargestellt. Das jeweils erste Bild (Bild 39, Bild 60 und Bild 18) zeigt die Entwicklung des Wasserstands entlang der Elbe im Referenzzustand. Die weiteren Bilder zeigen Zeitreihen des Wasserstands und des Betrags der tiefengemittelten Strömungsgeschwindigkeit an einzelnen Orten für alle untersuchten Szenarien. Die Szenarien sind in Tabelle 1 aufgelistet.

3.2.1 SN2013

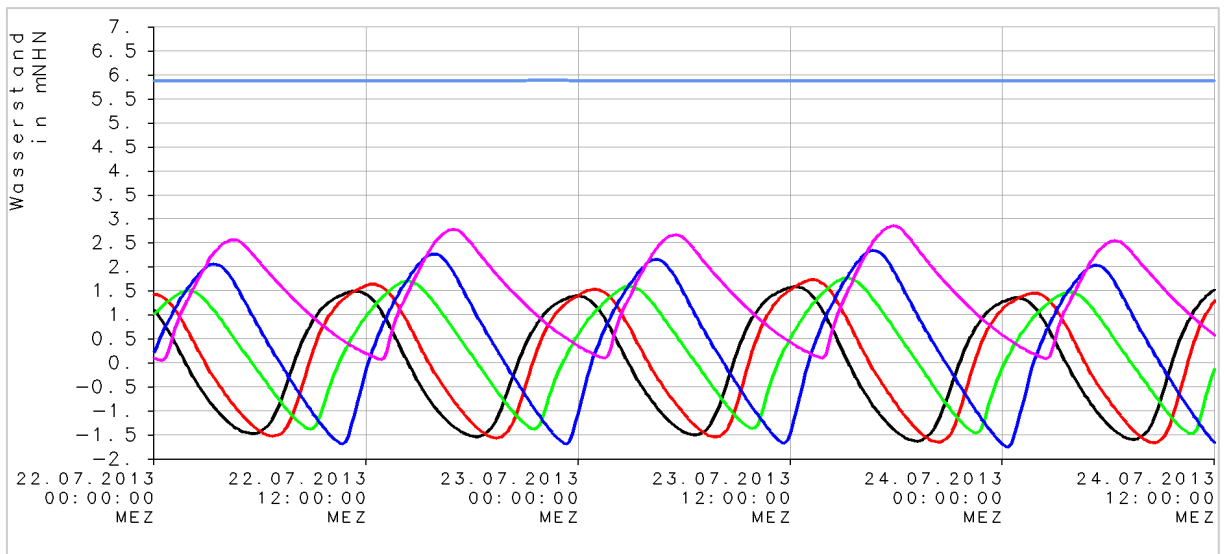


Bild 18: Zeitreihen Wasserstand bei SN2013 (Ausschnitt) ref an Pegeln entlang der Elbe: Bake A (Elbe-km 755) (schwarz), Cuxhaven (Elbe-km 725) (rot), Glückstadt (Elbe-km 674) (grün), St. Pauli (Elbe-km 635N) (blau), Geesthacht (Elbe-km 586) (magenta), Bleckede (Elbe-km 550) (hellblau)

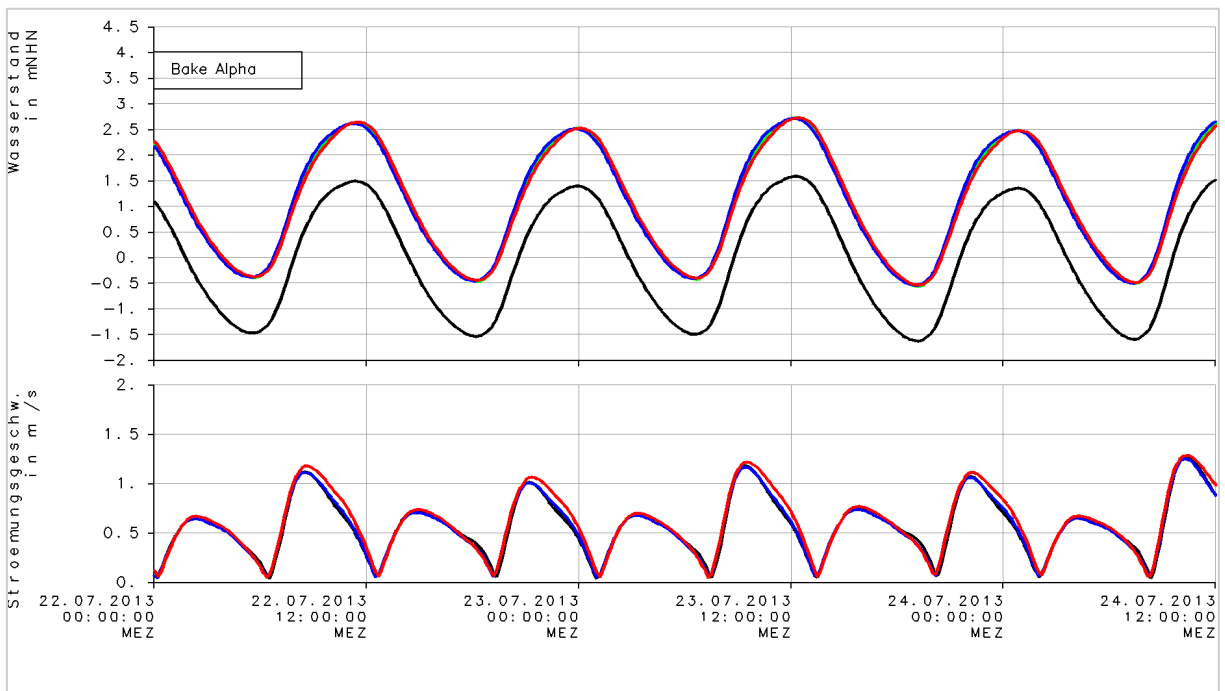


Bild 19: Zeitreihen Wasserstand und Strömungsgeschwindigkeit bei SN2013 (Ausschnitt) bei Bake Alpha (Elbe-km 755): ref (schwarz), f110 (rot), w55 (grün) und w110 (blau)

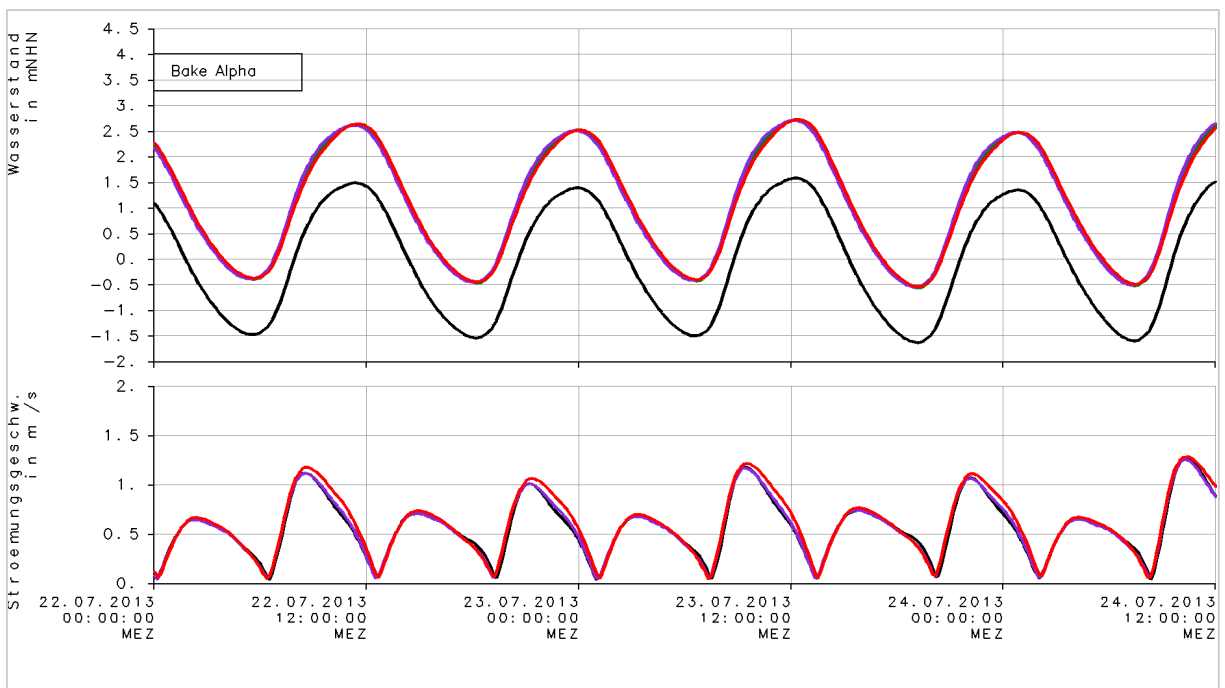


Bild 20: Zeitreihen Wasserstand und Strömungsgeschwindigkeit bei SN2013 (Ausschnitt) bei Bake Alpha (Elbe-km 755): ref (schwarz), f110 (rot), w55e (dunkelgrün) und w110e (lila)

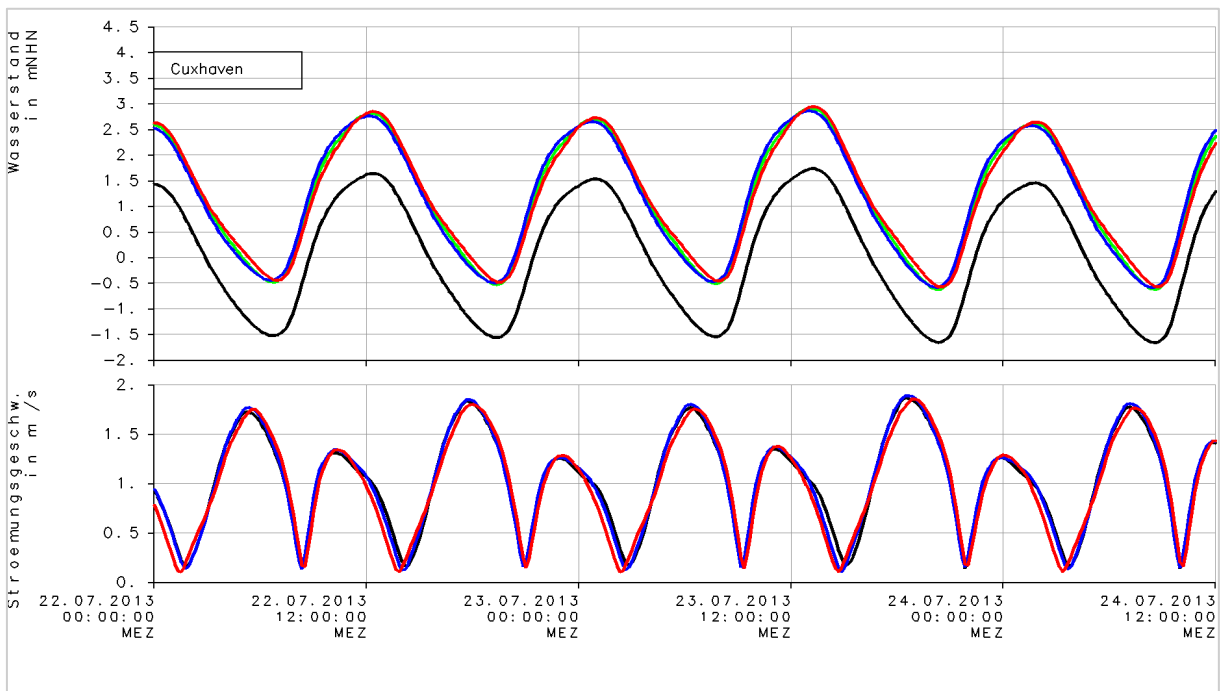


Bild 21: Zeitreihen Wasserstand und Strömungsgeschwindigkeit bei SN2013 (Ausschnitt) bei Cuxhaven (Elbe-km 725): ref (schwarz), f110 (rot), w55 (grün) und w110 (blau)

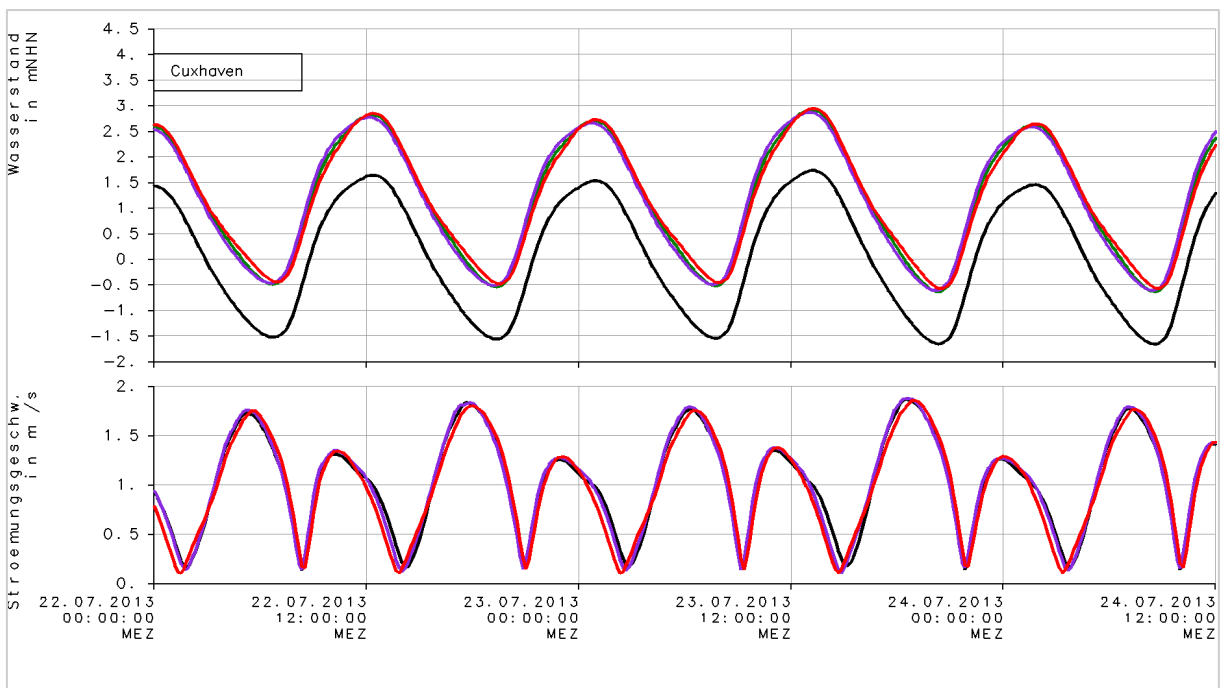


Bild 22: Zeitreihen Wasserstand und Strömungsgeschwindigkeit bei SN2013 (Ausschnitt) bei Cuxhaven (Elbe-km 725): ref (schwarz), f110 (rot), w55e (dunkelgrün) und w110e (lila)

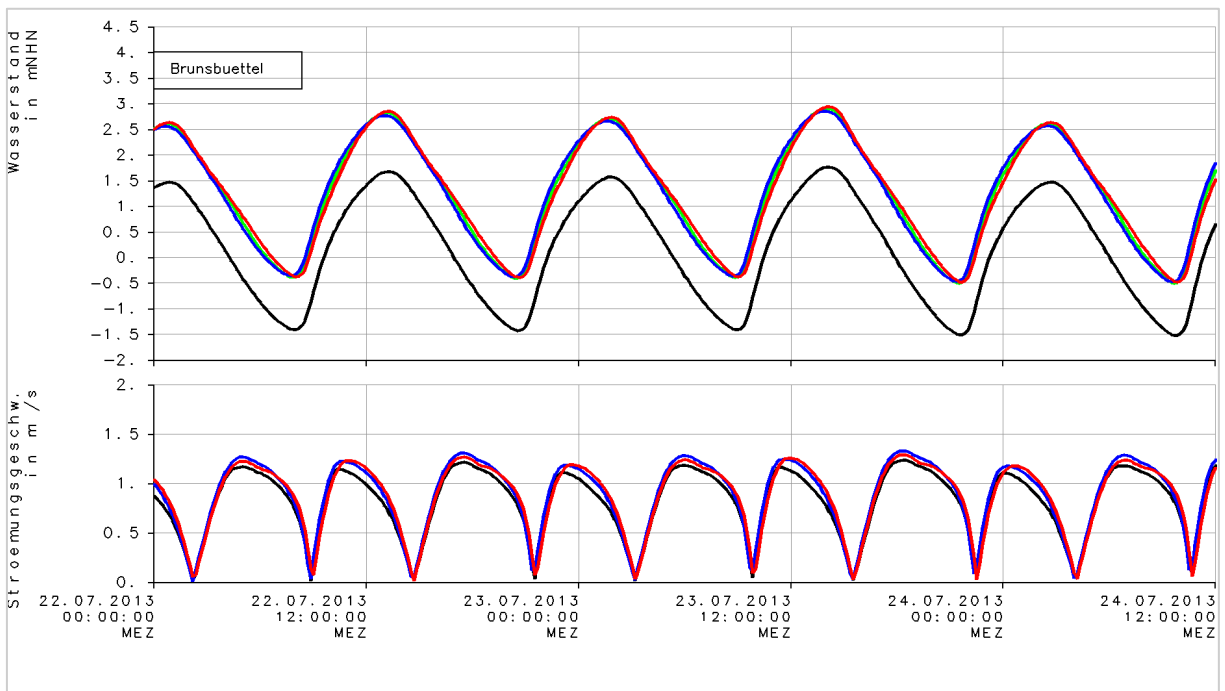


Bild 23: Zeitreihen Wasserstand und Strömungsgeschwindigkeit bei SN2013 (Ausschnitt) bei Brunsbüttel (Elbe-km 696): ref (schwarz), f110 (rot), w55 (grün) und w110 (blau)

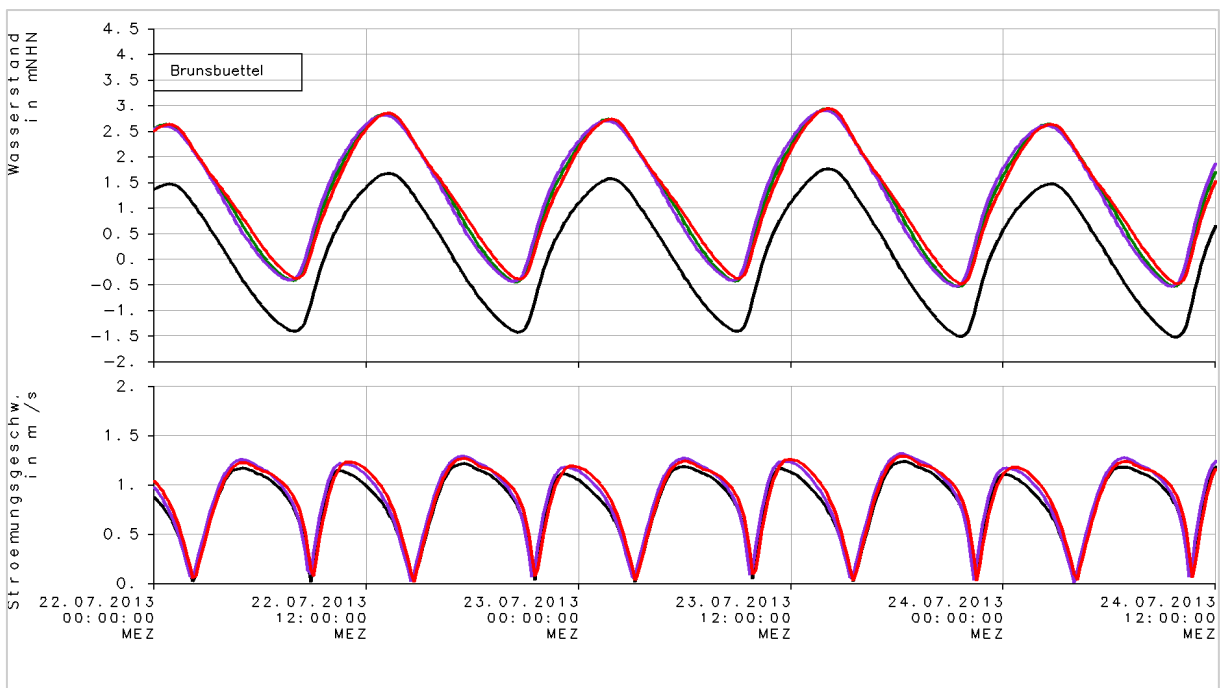


Bild 24: Zeitreihen Wasserstand und Strömungsgeschwindigkeit bei SN2013 (Ausschnitt) bei Brunsbüttel (Elbe-km 696): ref (schwarz), f110 (rot), w55e (dunkelgrün) und w110e (lila)

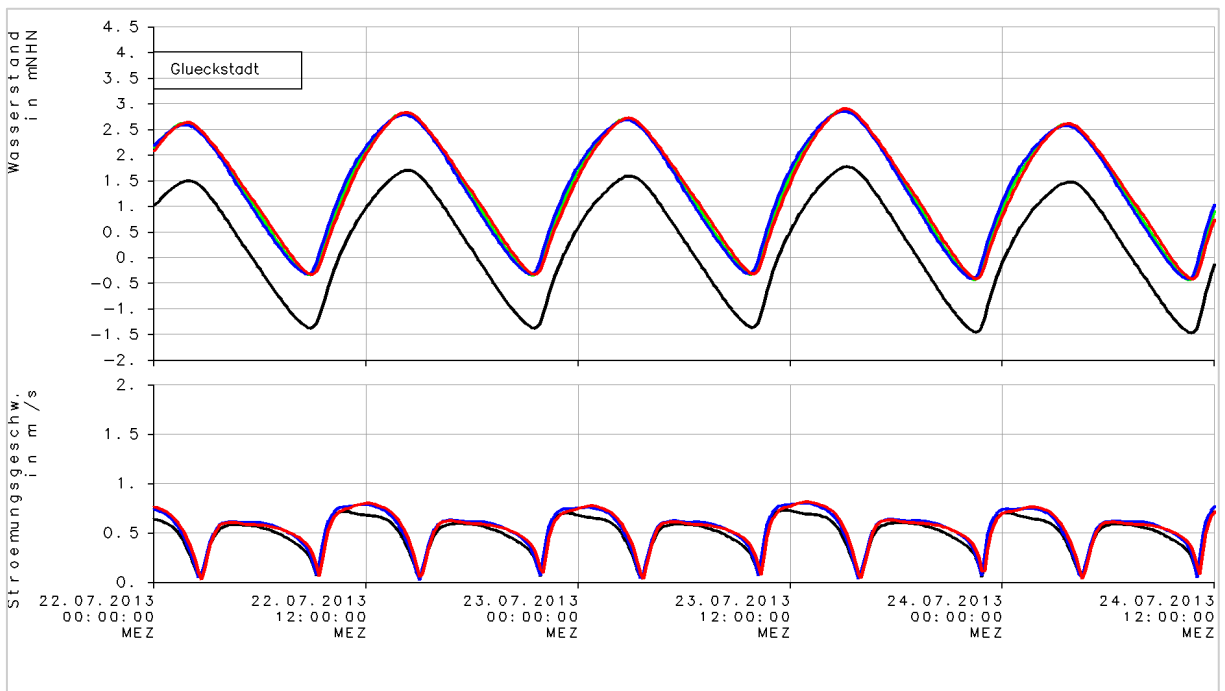


Bild 25: Zeitreihen Wasserstand und Strömungsgeschwindigkeit bei SN2013 (Ausschnitt) bei Glückstadt (Elbe-km 674): ref (schwarz), f110 (rot), w55 (grün) und w110 (blau)

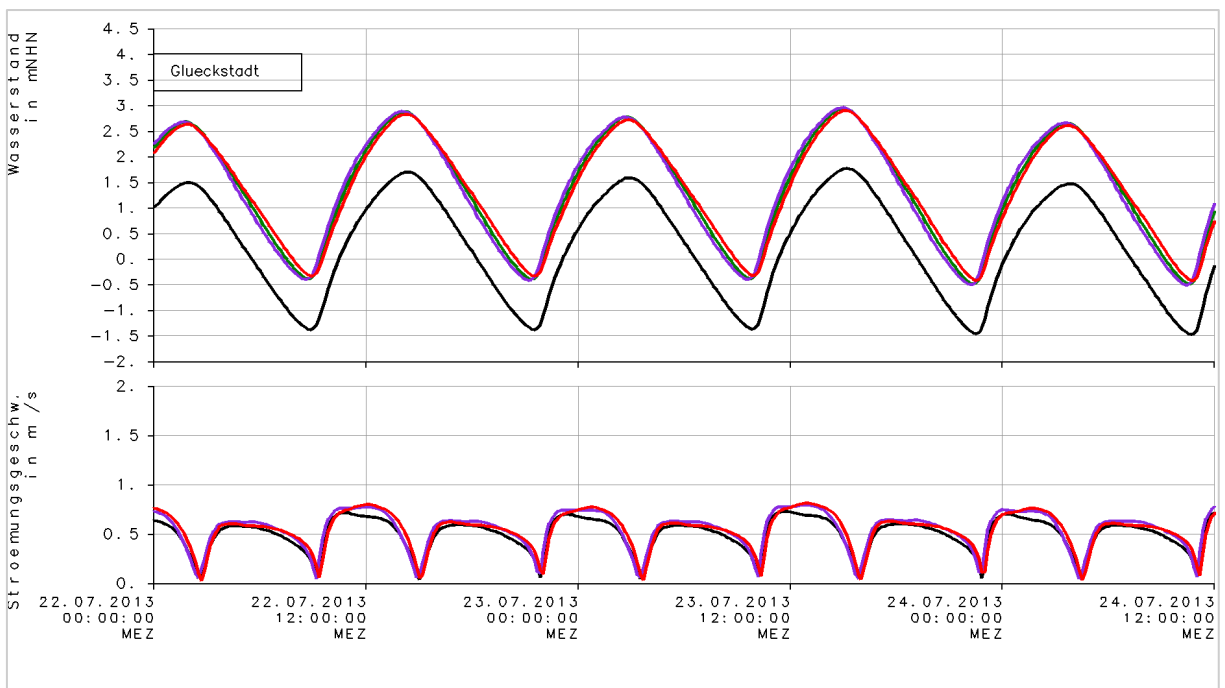


Bild 26: Zeitreihen Wasserstand und Strömungsgeschwindigkeit bei SN2013 (Ausschnitt) bei Glückstadt (Elbe-km 674): ref (schwarz), f110 (rot), w55e (dunkelgrün) und w110e (lila)

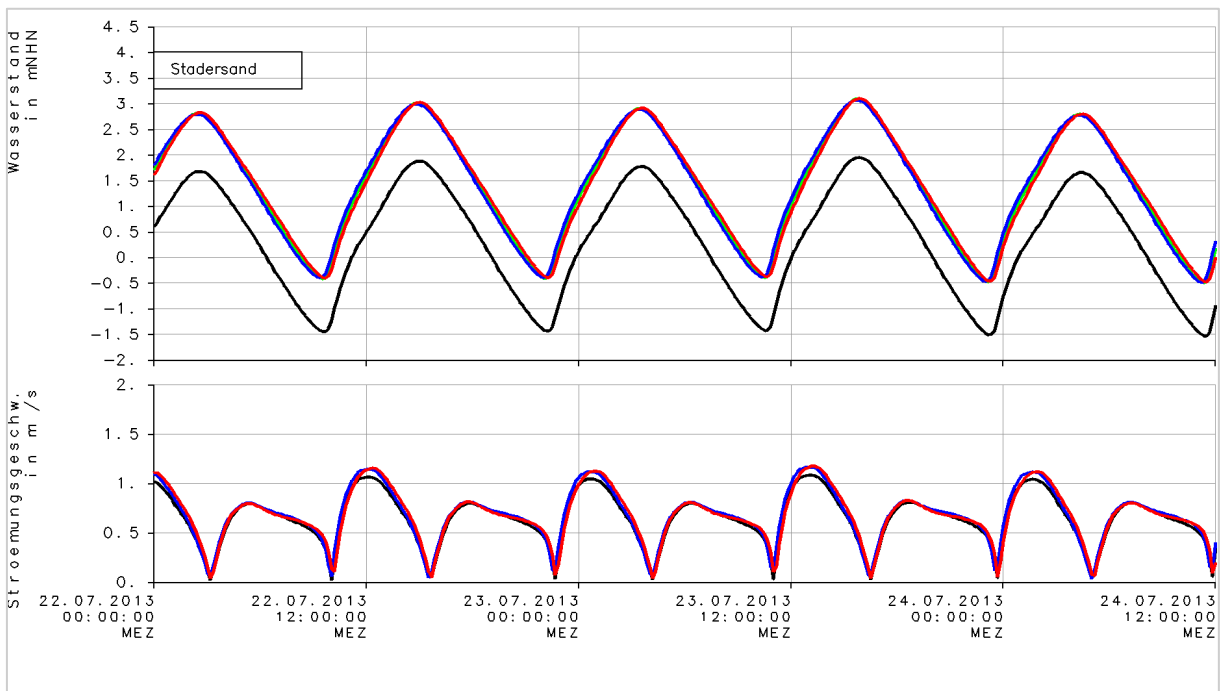


Bild 27: Zeitreihen Wasserstand und Strömungsgeschwindigkeit bei SN2013 (Ausschnitt) bei Stadersand (Elbe-km 655): ref (schwarz), f110 (rot), w55 (grün) und w110 (blau)

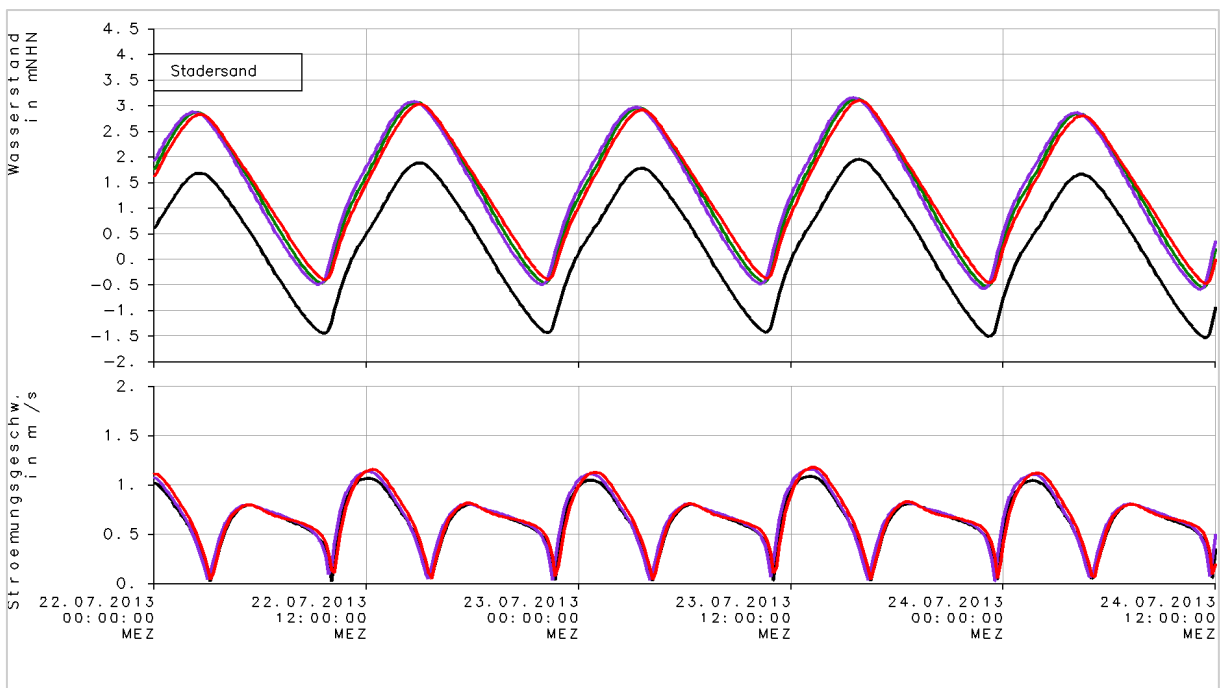


Bild 28: Zeitreihen Wasserstand und Strömungsgeschwindigkeit bei SN2013 (Ausschnitt) bei Stadersand (Elbe-km 655): ref (schwarz), f110 (rot), w55e (dunkelgrün) und w110e (lila)

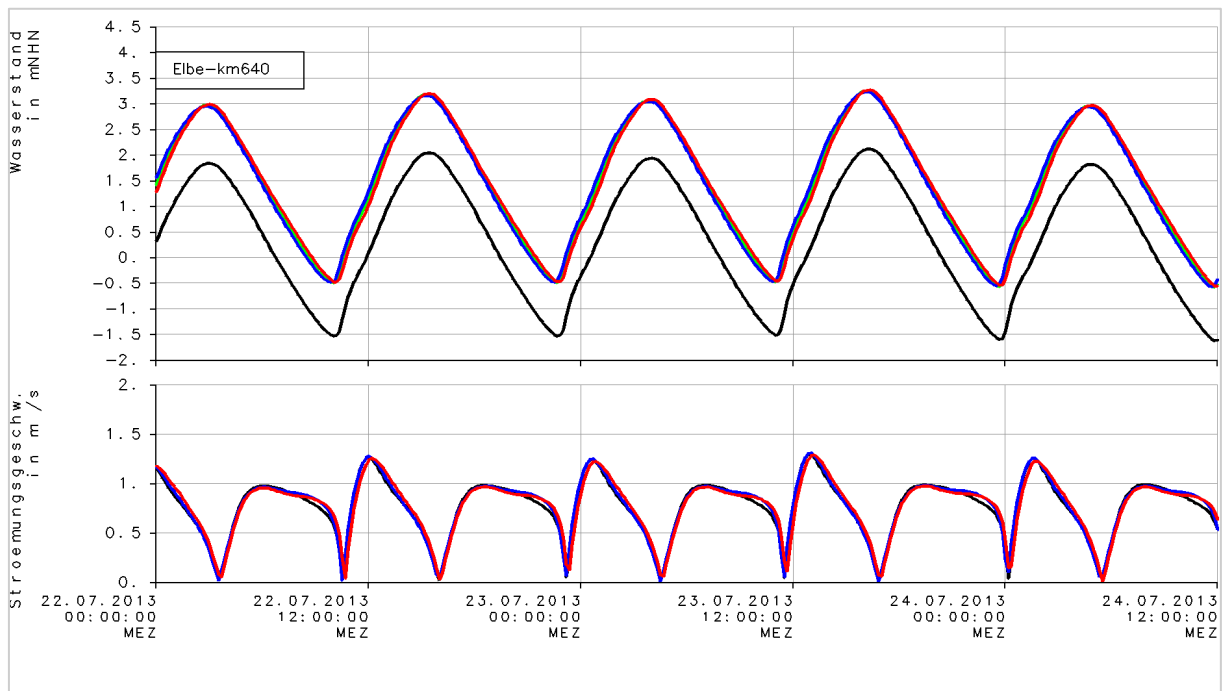


Bild 29: Zeitreihen Wasserstand und Strömungsgeschwindigkeit bei SN2013 (Ausschnitt) bei Elbe-km 640: ref (schwarz), f110 (rot), w55 (grün) und w110 (blau)

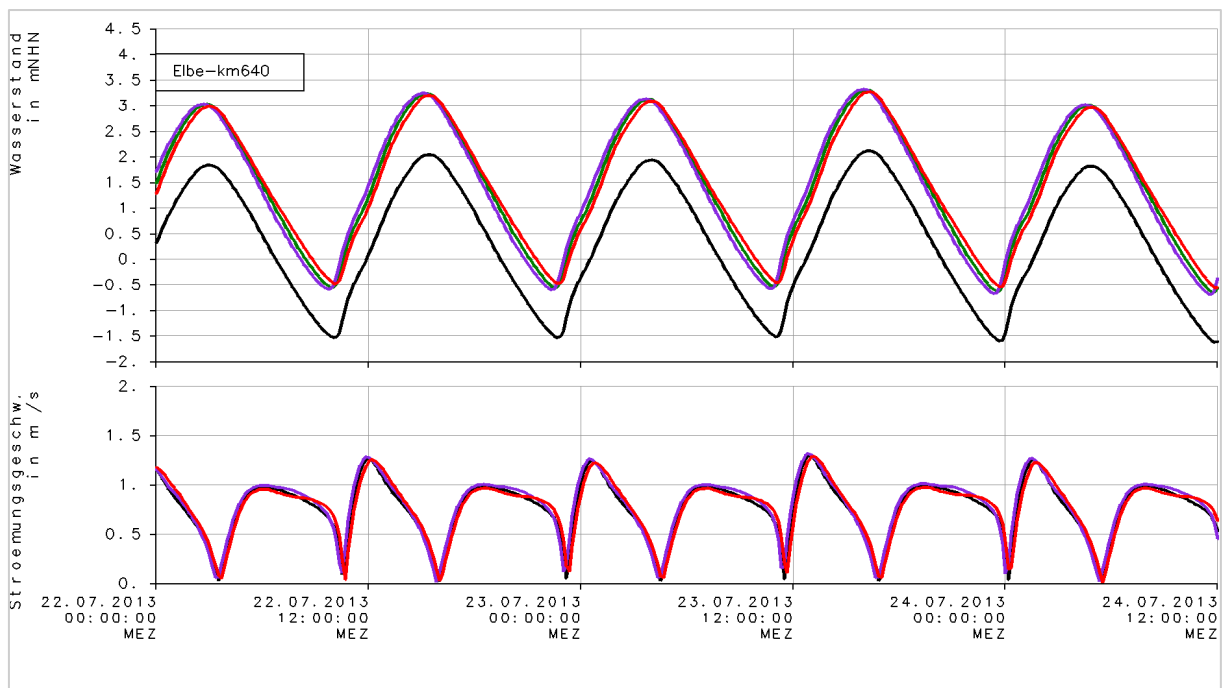


Bild 30: Zeitreihen Wasserstand und Strömungsgeschwindigkeit bei SN2013 (Ausschnitt) bei Elbe-km 640: ref (schwarz), f110 (rot), w55e (dunkelgrün) und w110e (lila)

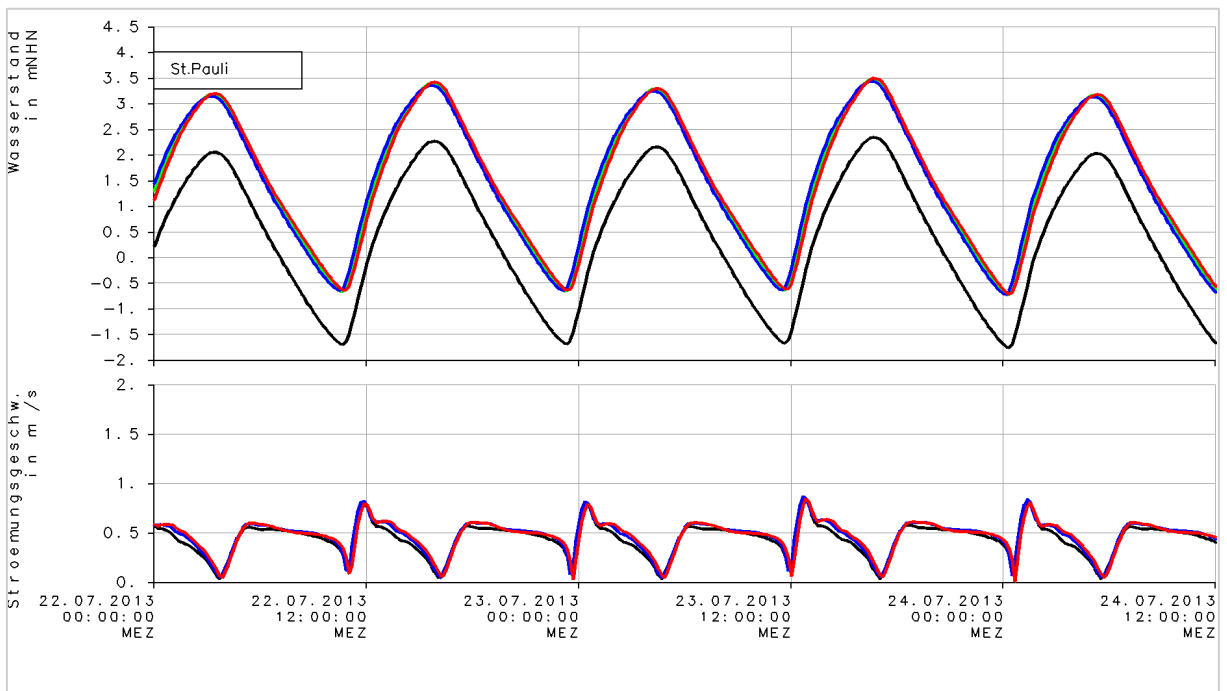


Bild 31: Zeitreihen Wasserstand und Strömungsgeschwindigkeit bei SN2013 (Ausschnitt) bei St. Pauli (Elbe-km 635N): ref (schwarz), f110 (rot), w55 (grün) und w110 (blau)

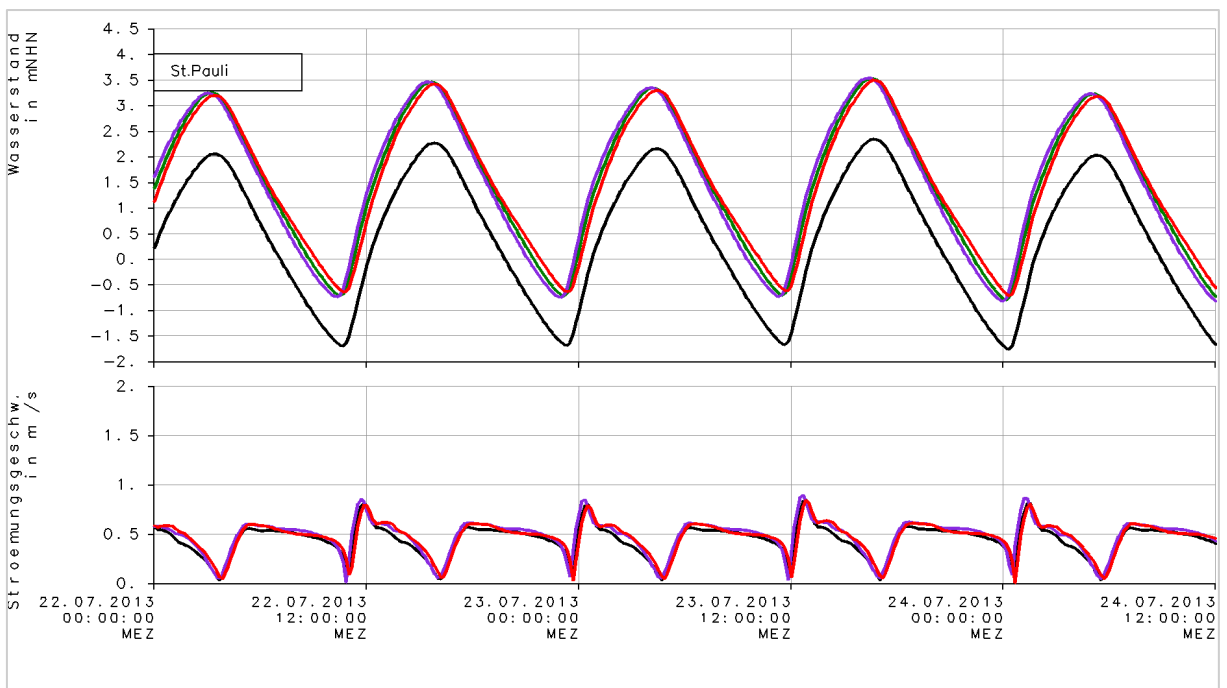


Bild 32: Zeitreihen Wasserstand und Strömungsgeschwindigkeit bei SN2013 (Ausschnitt) bei St. Pauli (Elbe-km 635N): ref (schwarz), f110 (rot), w55e (dunkelgrün) und w110e (lila)

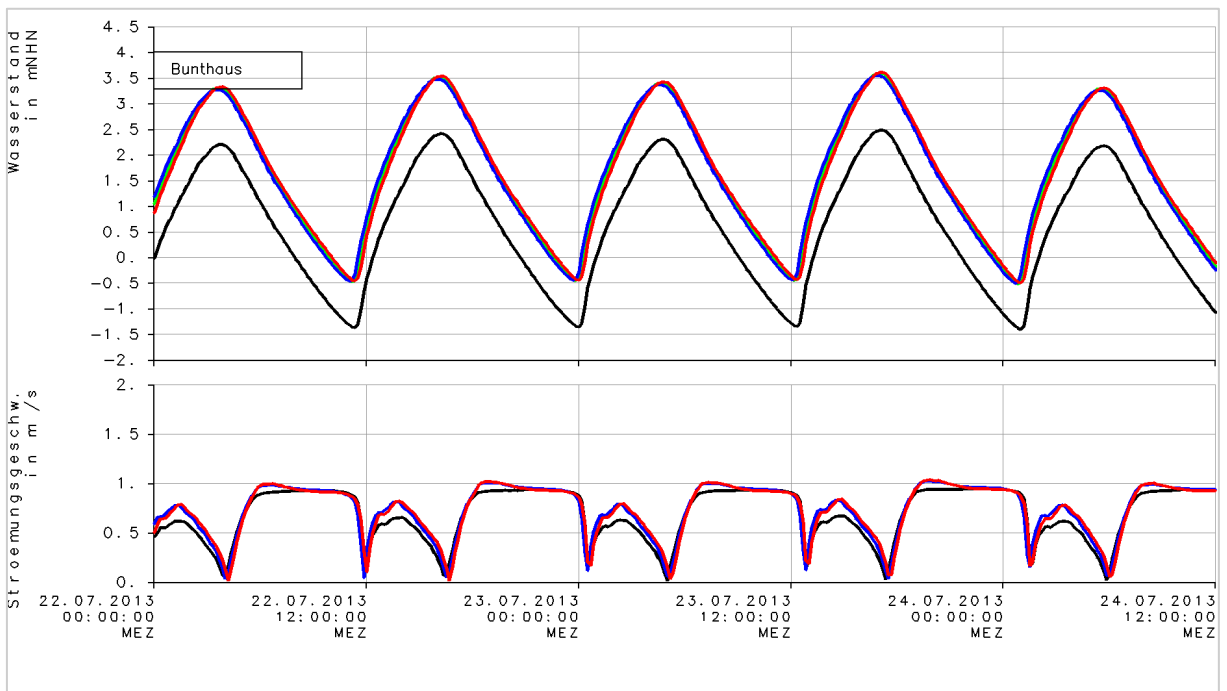


Bild 33: Zeitreihen Wasserstand und Strömungsgeschwindigkeit bei SN2013 (Ausschnitt) bei Bunthaus (Elbe-km 610): ref (schwarz), f110 (rot), w55 (grün) und w110 (blau)

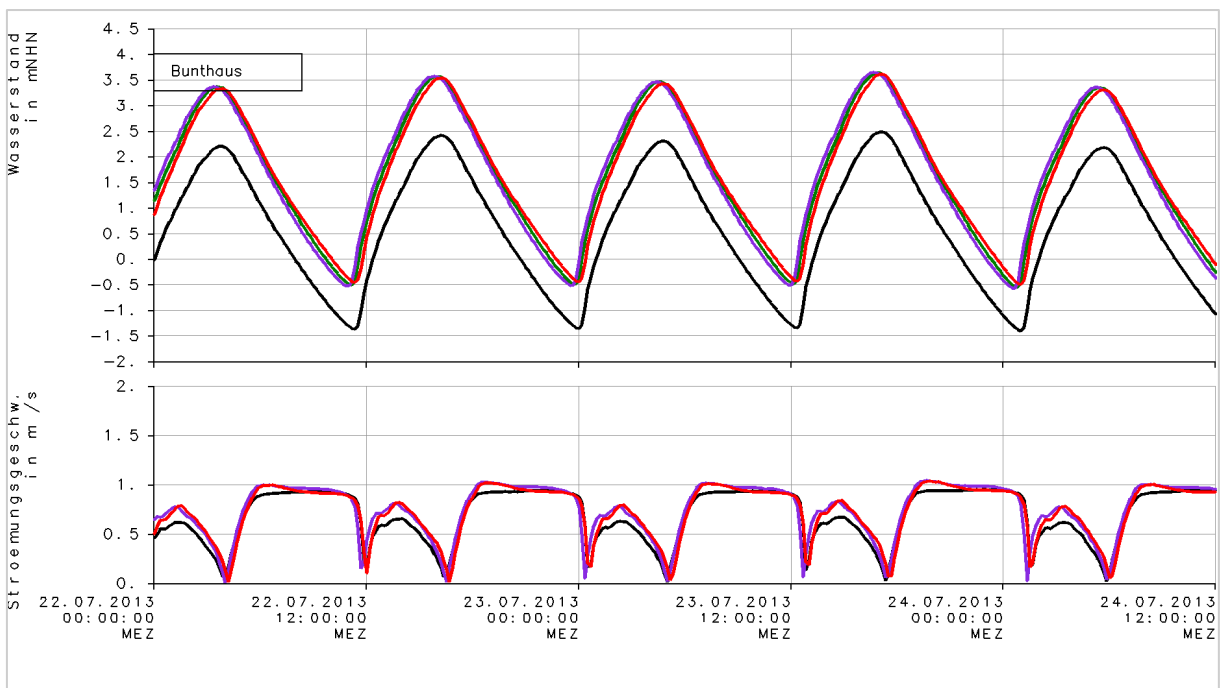


Bild 34: Zeitreihen Wasserstand und Strömungsgeschwindigkeit bei SN2013 (Ausschnitt) bei Bunthaus (Elbe-km 610): ref (schwarz), f110 (rot), w55e (dunkelgrün) und w110e (lila)

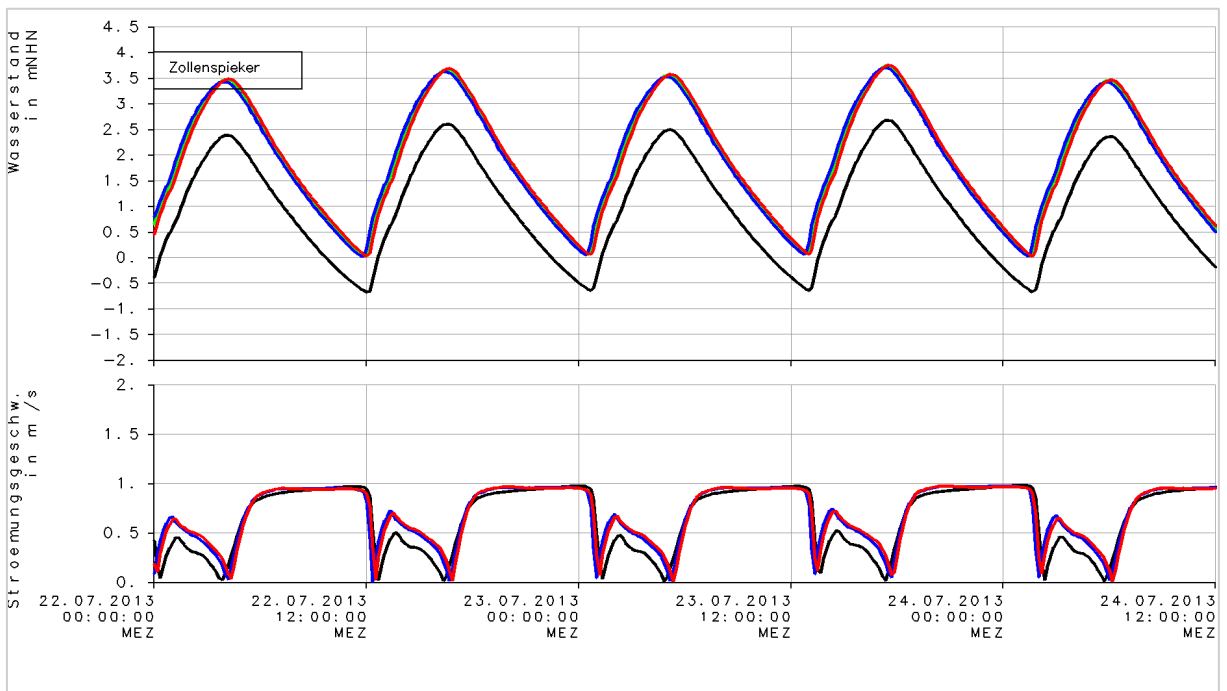


Bild 35: Zeitreihen Wasserstand und Strömungsgeschwindigkeit bei SN2013 (Ausschnitt) bei Zollenspieker (Elbe-km 598): ref (schwarz), f110 (rot), w55 (grün) und w110 (blau)

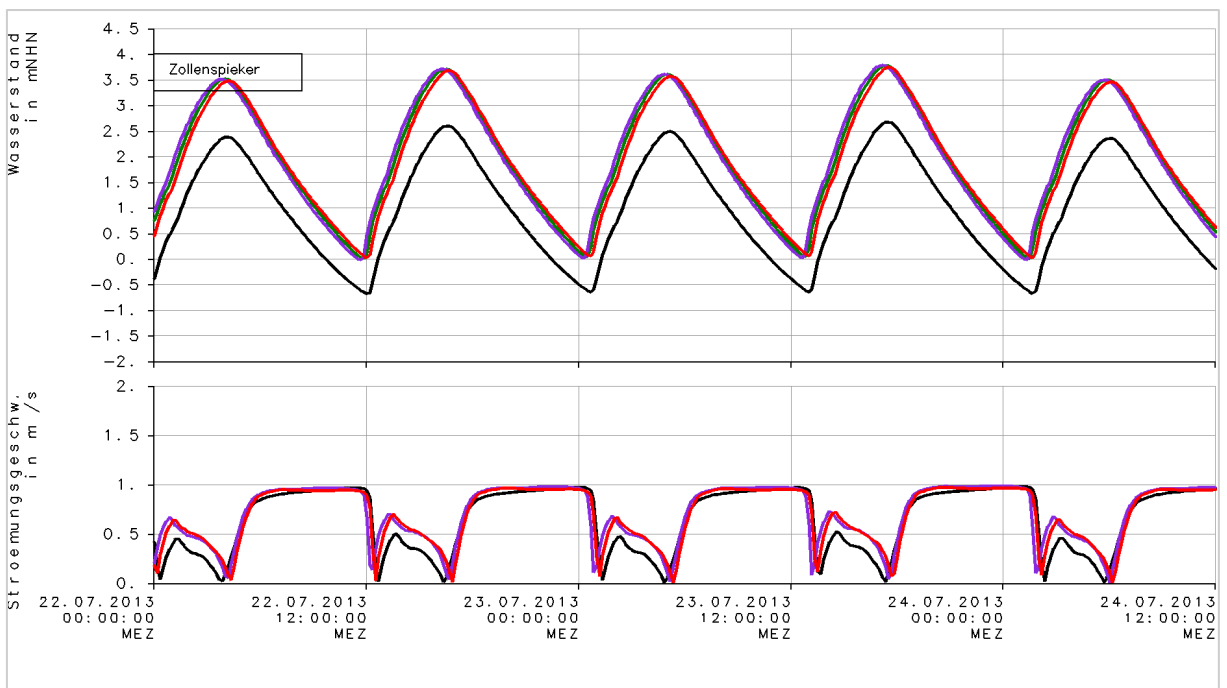


Bild 36: Zeitreihen Wasserstand und Strömungsgeschwindigkeit bei SN2013 (Ausschnitt) bei Zollenspieker (Elbe-km 598): ref (schwarz), f110 (rot), w55e (dunkelgrün) und w110e (lila)

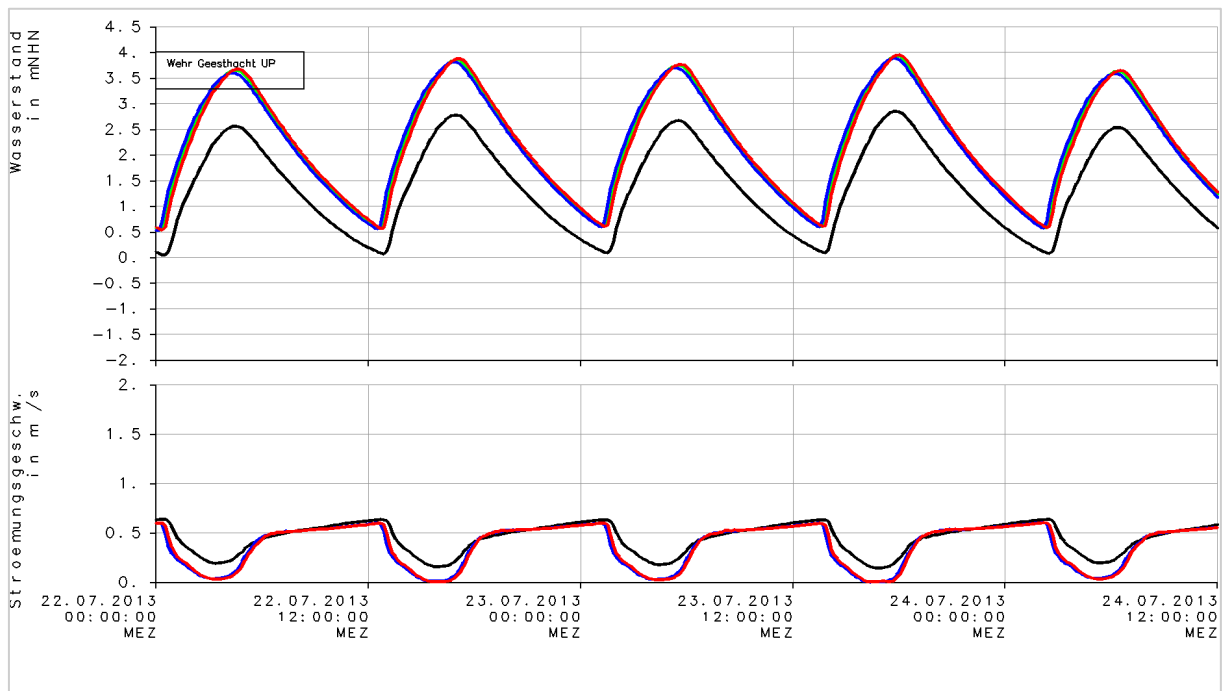


Bild 37: Zeitreihen Wasserstand und Strömungsgeschwindigkeit bei SN2013 (Ausschnitt) beim Wehr Geesthacht (Elbe-km 586): ref (schwarz), f110 (rot), w55 (grün) und w110 (blau)

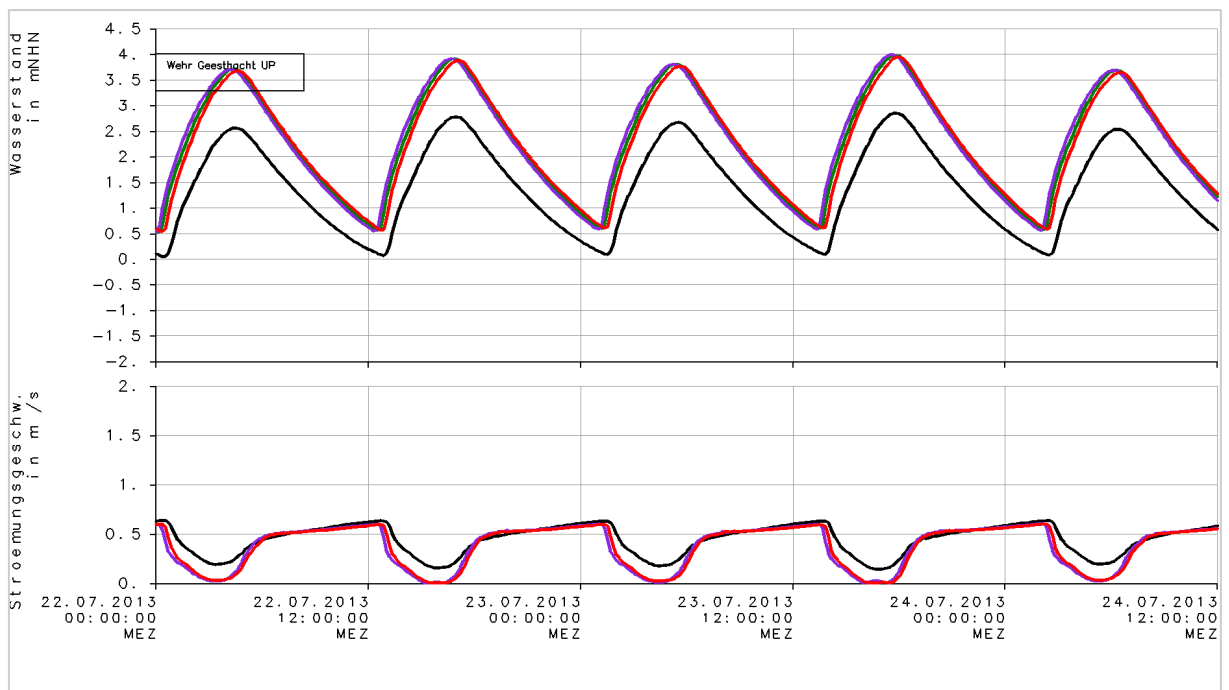


Bild 38: Zeitreihen Wasserstand und Strömungsgeschwindigkeit bei SN2013 beim Wehr Geesthacht (Elbe-km 586): ref (schwarz), f110 (rot), w55e (dunkelgrün) und w110e (lila)

3.2.2 SF2013

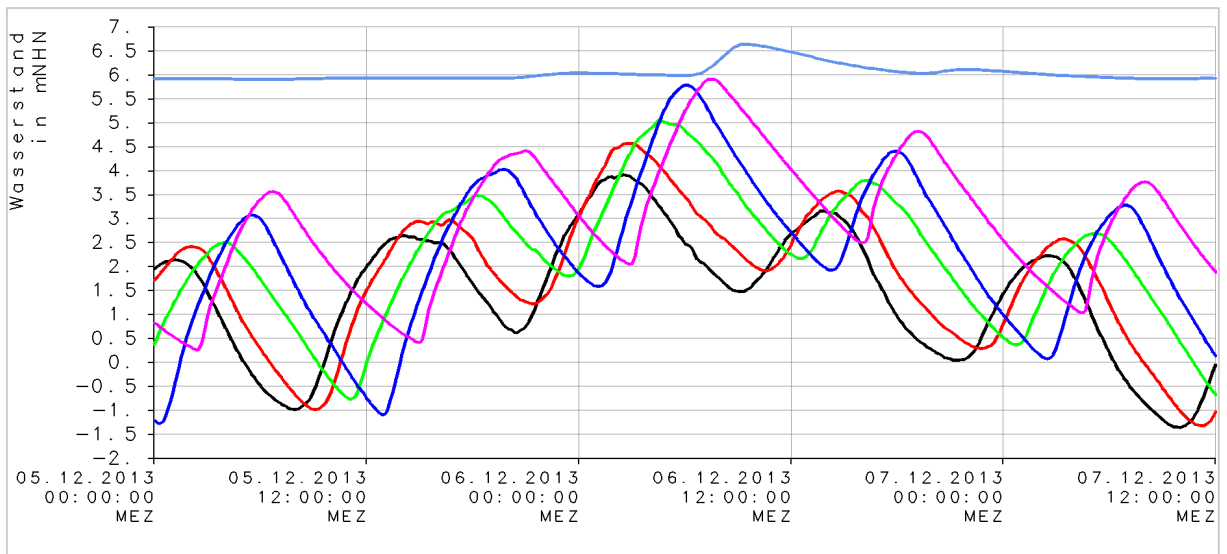


Bild 39: Zeitreihen Wasserstand bei SF2013 ref an Pegeln entlang der Elbe: Bake A (Elbe-km 755) (schwarz), Cuxhaven (Elbe-km 725) (rot), Glückstadt (Elbe-km 674) (grün), St. Pauli (Elbe-km 635N) (blau), Geesthacht (Elbe-km 586) (magenta), Bleckede (Elbe-km 550) (hellblau)

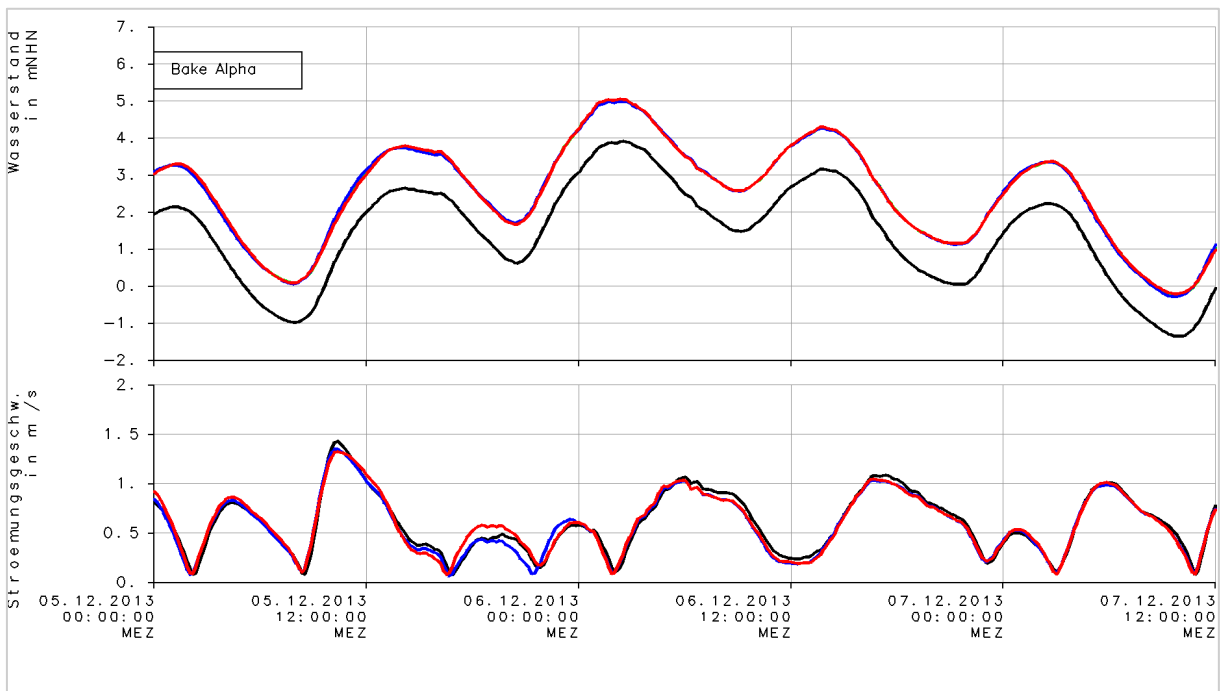


Bild 40: Zeitreihen Wasserstand und Strömungsgeschwindigkeit bei SF2013 bei Bake Alpha (Elbe-km 755): ref (schwarz), f110 (rot), w55 (grün) und w110 (blau)

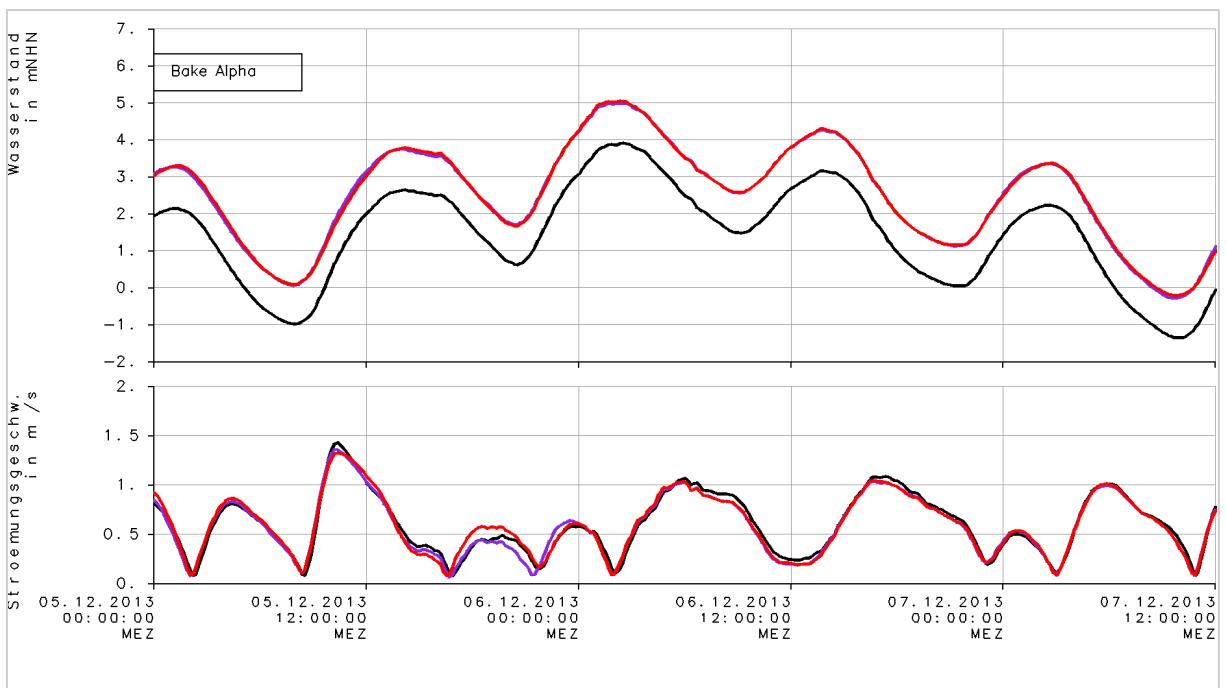


Bild 41: Zeitreihen Wasserstand und Strömungsgeschwindigkeit bei SF2013 bei Bake Alpha (Elbe-km 755): ref (schwarz), f110 (rot), w55e (dunkelgrün) und w110e (lila)

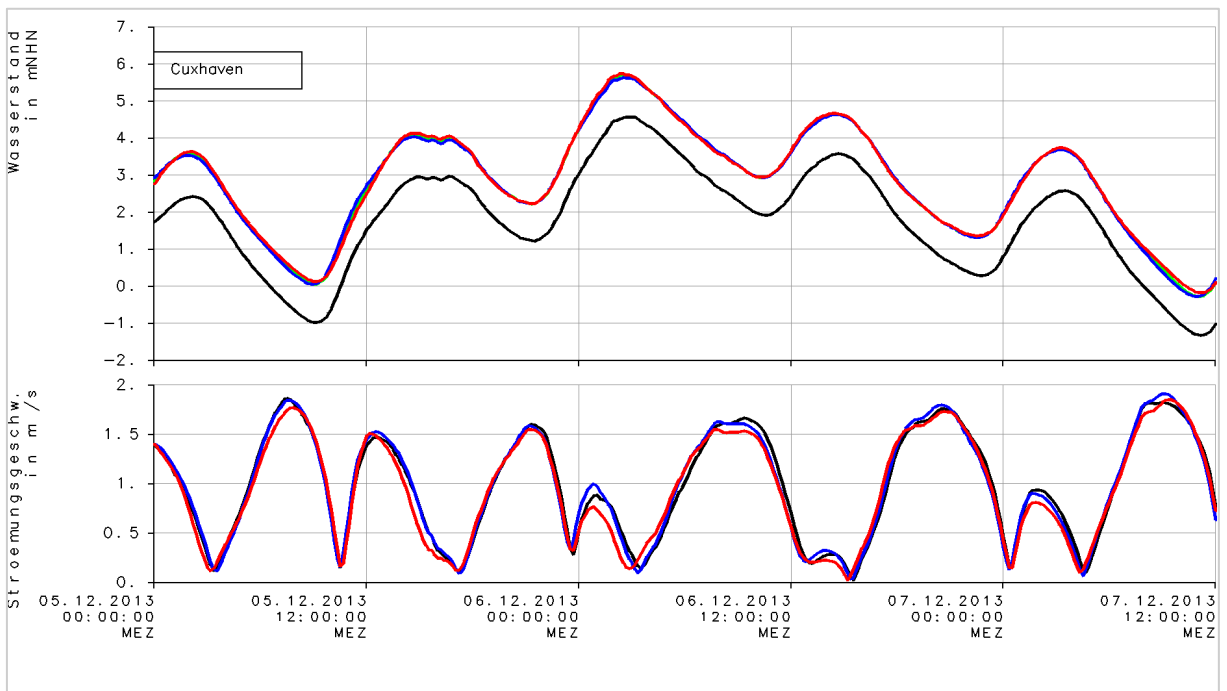


Bild 42: Zeitreihen Wasserstand und Strömungsgeschwindigkeit bei SF2013 bei Cuxhaven (Elbe-km 725): ref (schwarz), f110 (rot), w55 (grün) und w110 (blau)

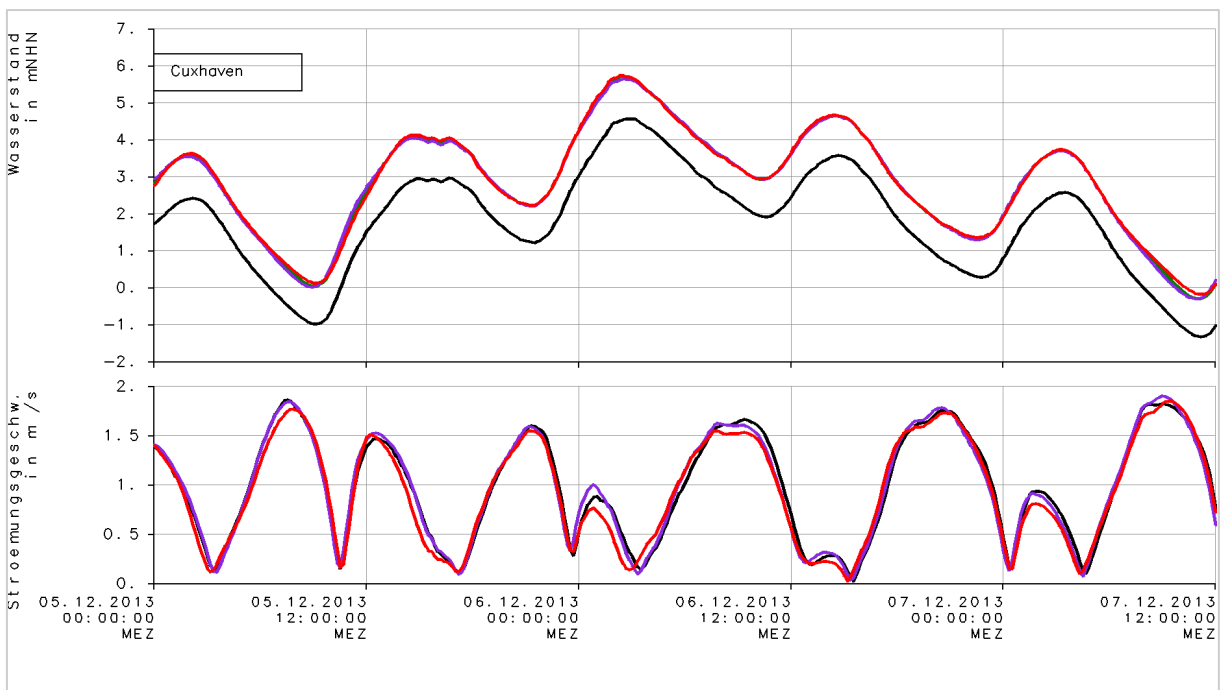


Bild 43: Zeitreihen Wasserstand und Strömungsgeschwindigkeit bei SF2013 bei Cuxhaven (Elbe-km 725): ref (schwarz), f110 (rot), w55e (dunkelgrün) und w110e (lila)

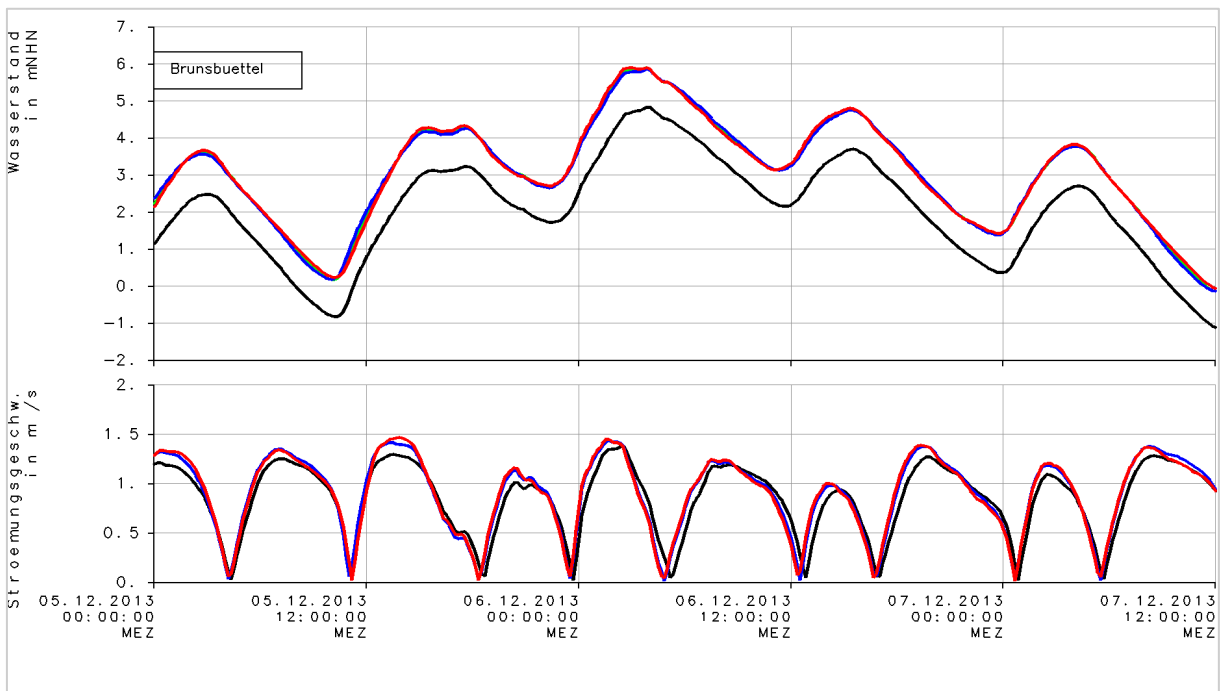


Bild 44: Zeitreihen Wasserstand und Strömungsgeschwindigkeit bei SF2013 bei Brunsbüttel (Elbe-km 696): ref (schwarz), f110 (rot), w55 (grün) und w110 (blau)

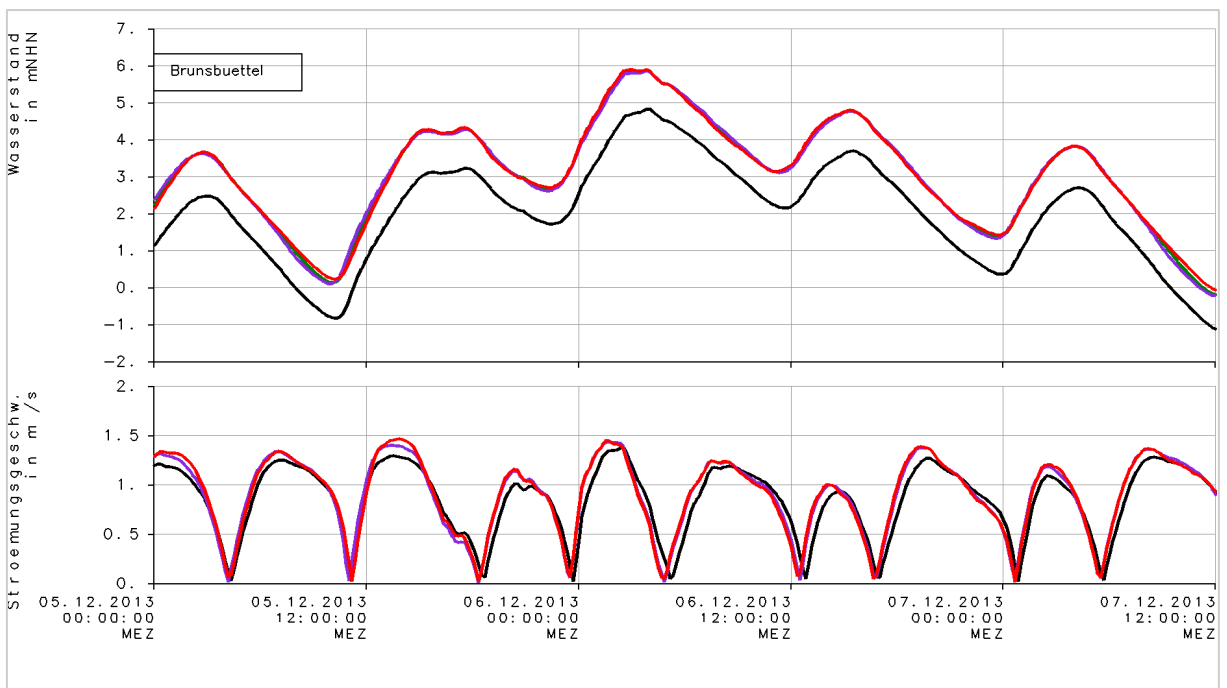


Bild 45: Zeitreihen Wasserstand und Strömungsgeschwindigkeit bei SF2013 bei Brunsbüttel (Elbe-km 696): ref (schwarz), f110 (rot), w55e (dunkelgrün) und w110e (lila)

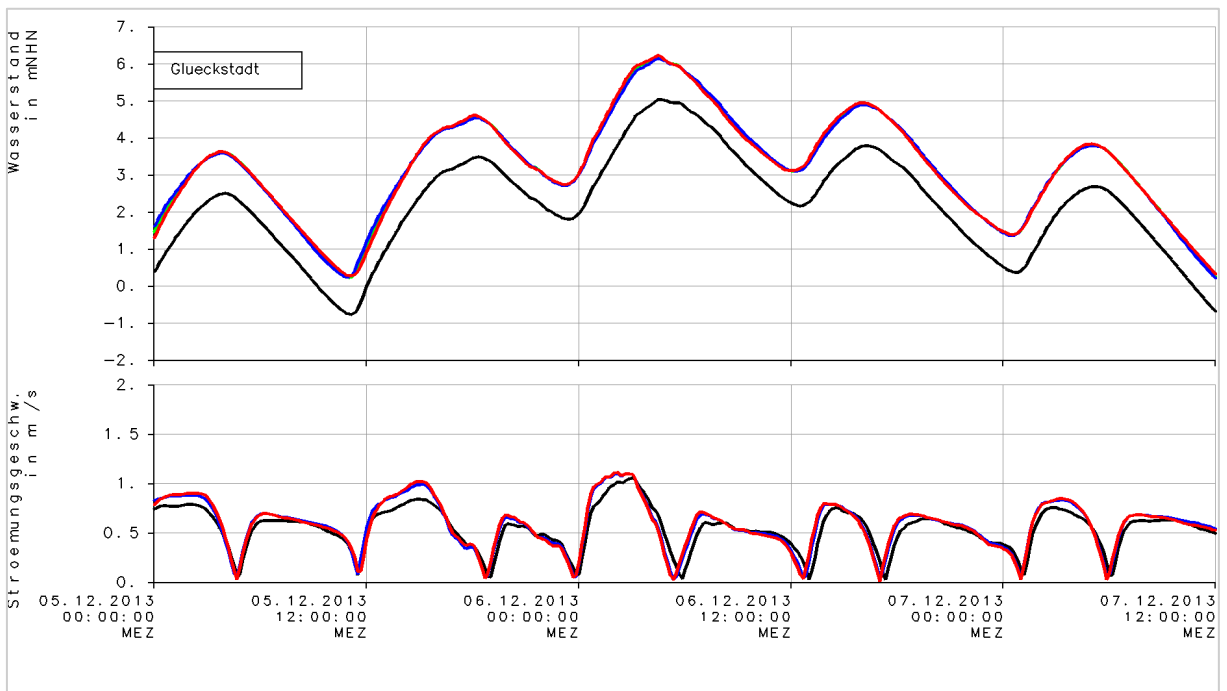


Bild 46: Zeitreihen Wasserstand und Strömungsgeschwindigkeit bei SF2013 bei Glückstadt (Elbe-km 674): ref (schwarz), f110 (rot), w55 (grün) und w110 (blau)

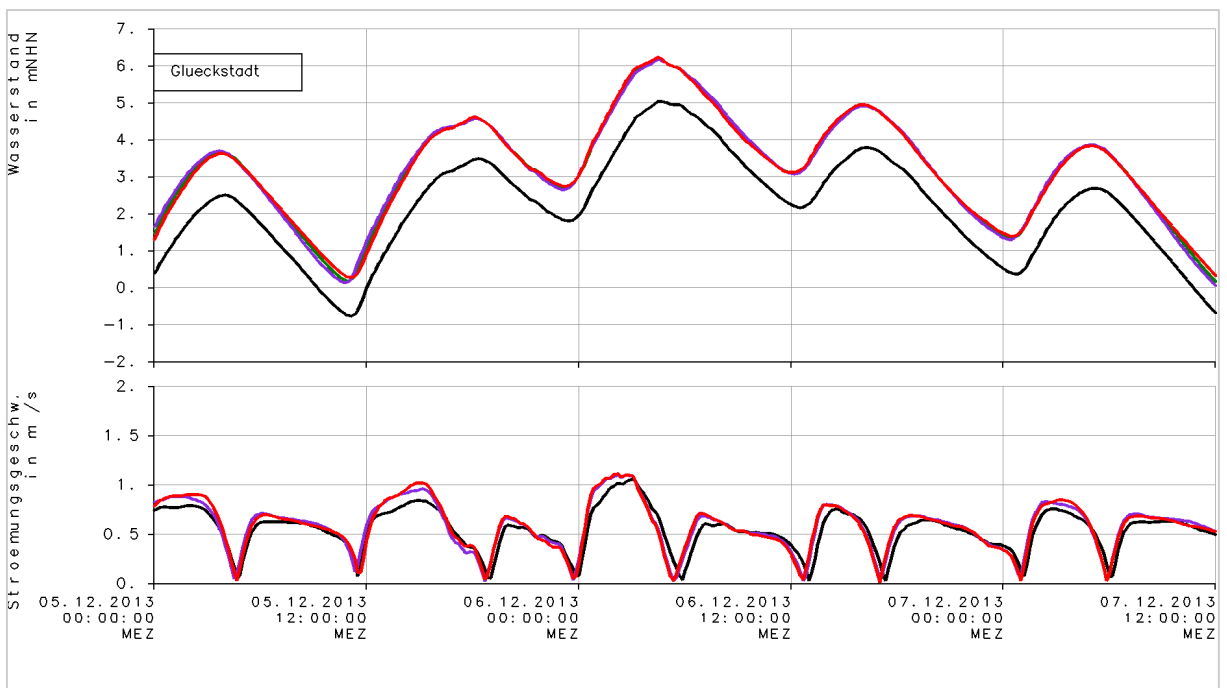


Bild 47: Zeitreihen Wasserstand und Strömungsgeschwindigkeit bei SF2013 bei Glückstadt (Elbe-km 674): ref (schwarz), f110 (rot), w55e (dunkelgrün) und w110e (lila)

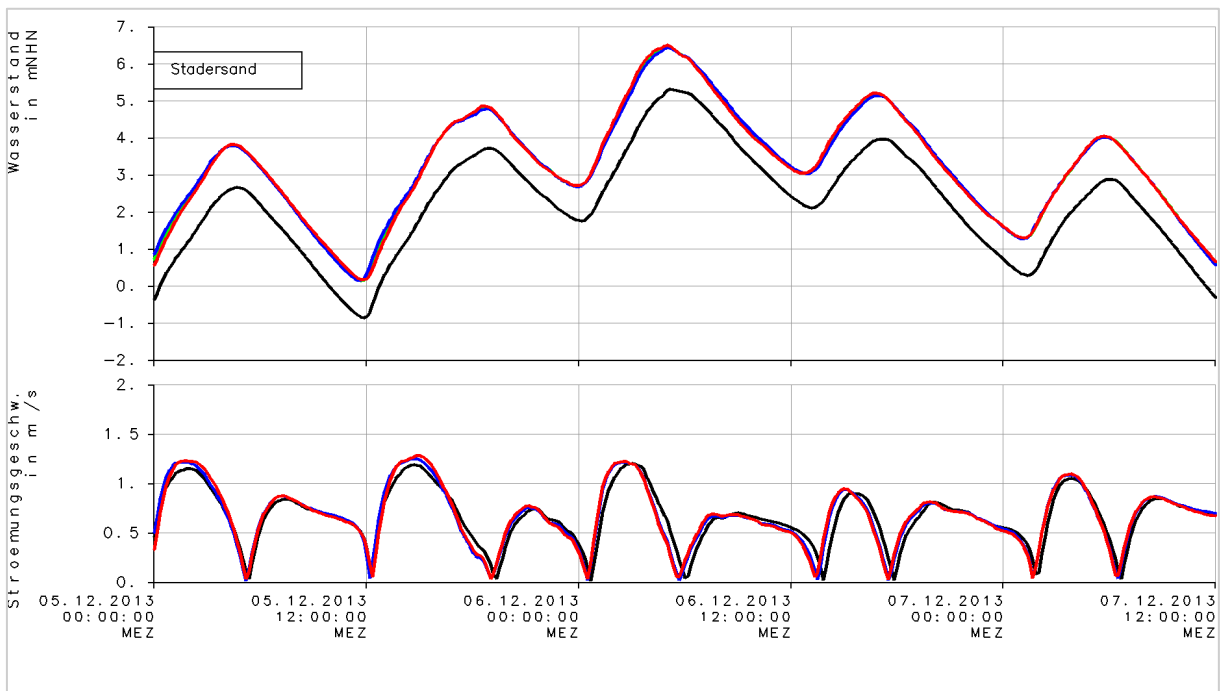


Bild 48: Zeitreihen Wasserstand und Strömungsgeschwindigkeit bei SF2013 bei Stadersand (Elbe-km 655): ref (schwarz), f110 (rot), w55 (grün) und w110 (blau)

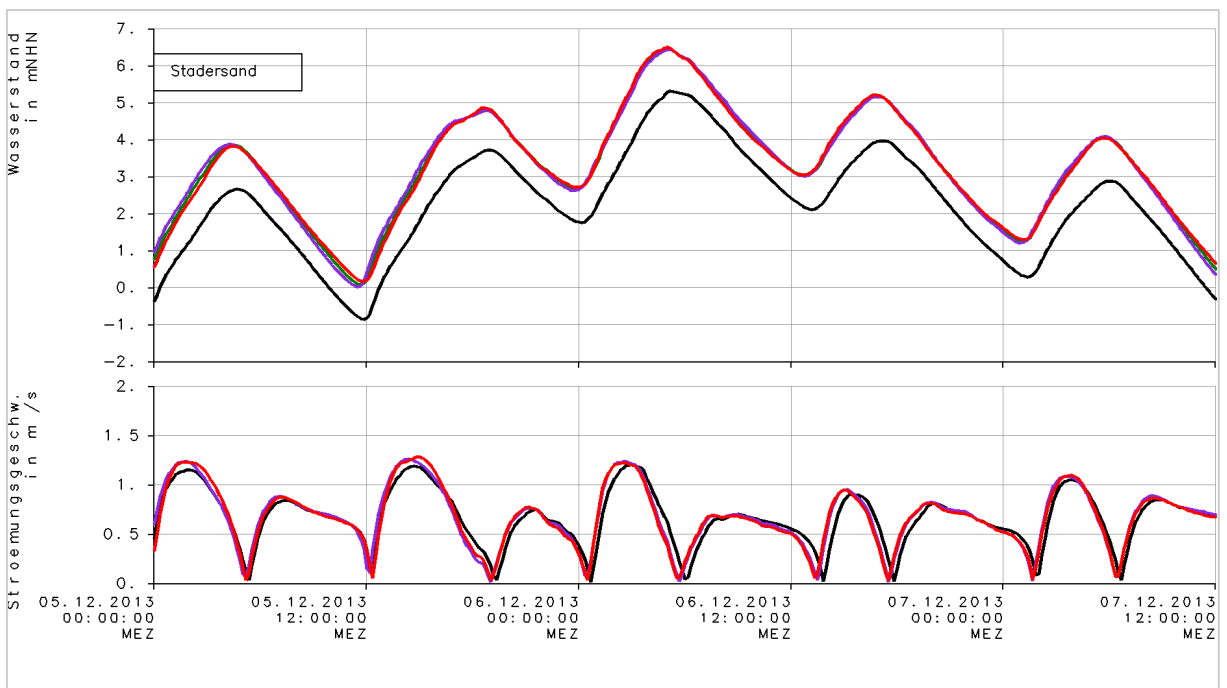


Bild 49: Zeitreihen Wasserstand und Strömungsgeschwindigkeit bei SF2013 bei Stadersand (Elbe-km 655): ref (schwarz), f110 (rot), w55e (dunkelgrün) und w110e (lila)

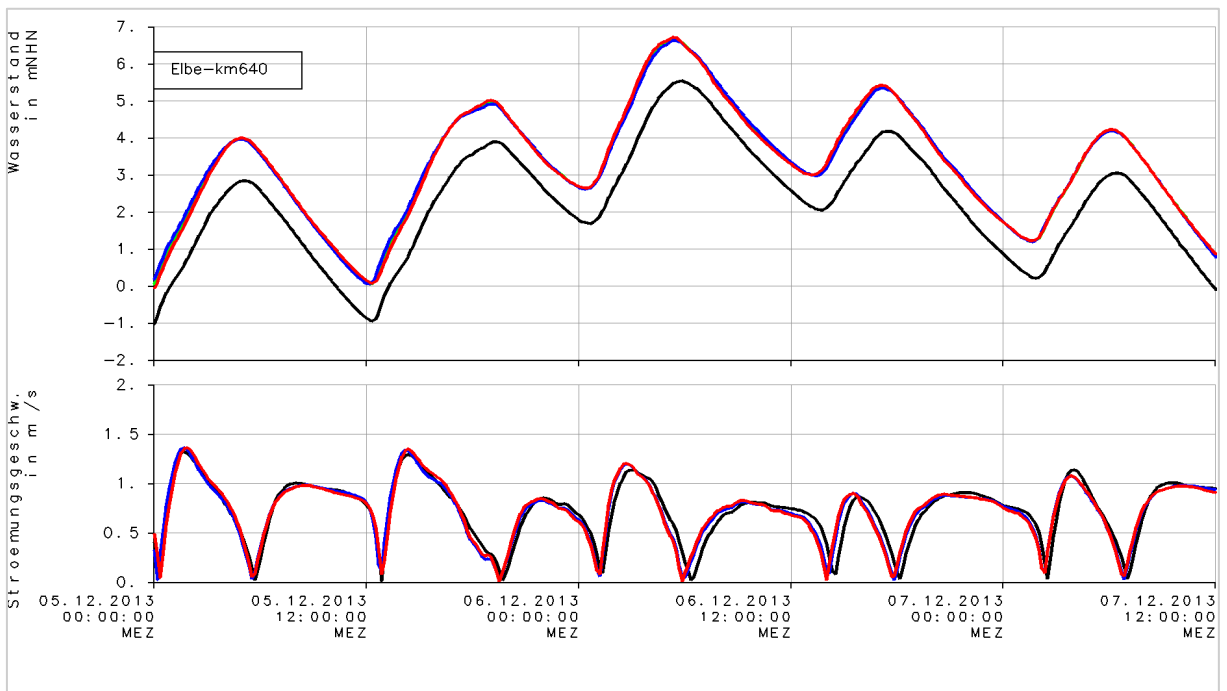


Bild 50: Zeitreihen Wasserstand und Strömungsgeschwindigkeit bei SF2013 bei Elbe km 640: ref (schwarz), f110 (rot), w55 (grün) und w110 (blau)

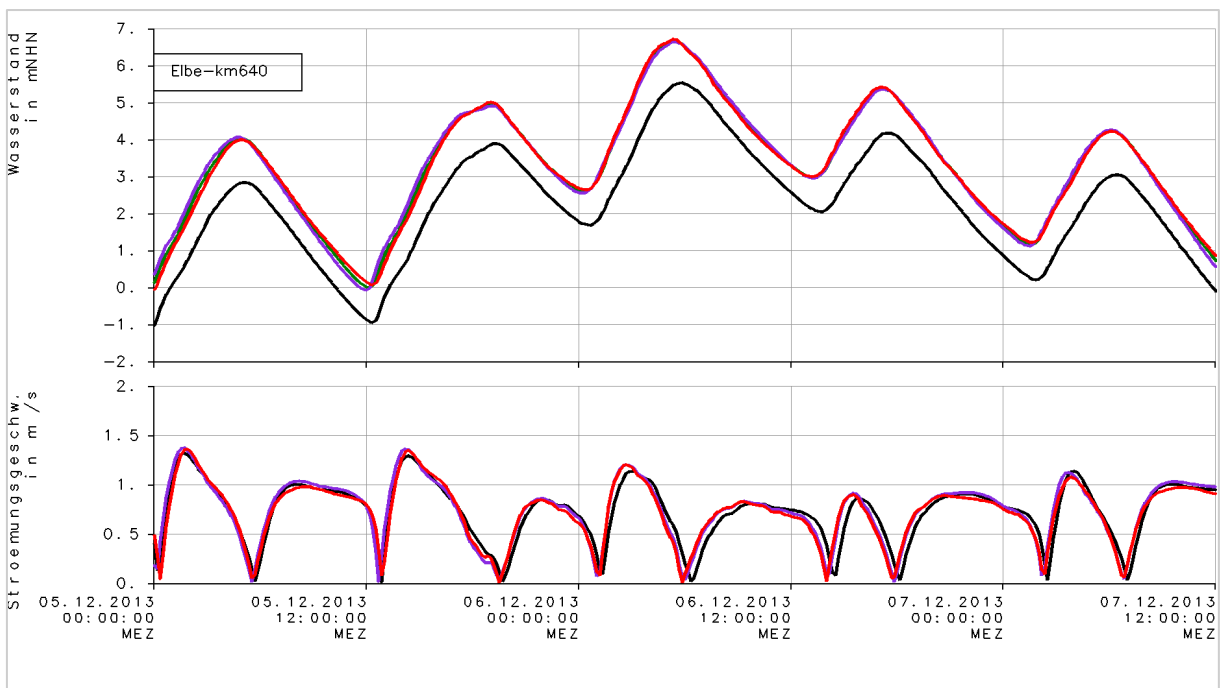


Bild 51: Zeitreihen Wasserstand und Strömungsgeschwindigkeit bei SF2013 bei Elbe-km 640: ref (schwarz), f110 (rot), w55e (dunkelgrün) und w110e (lila)

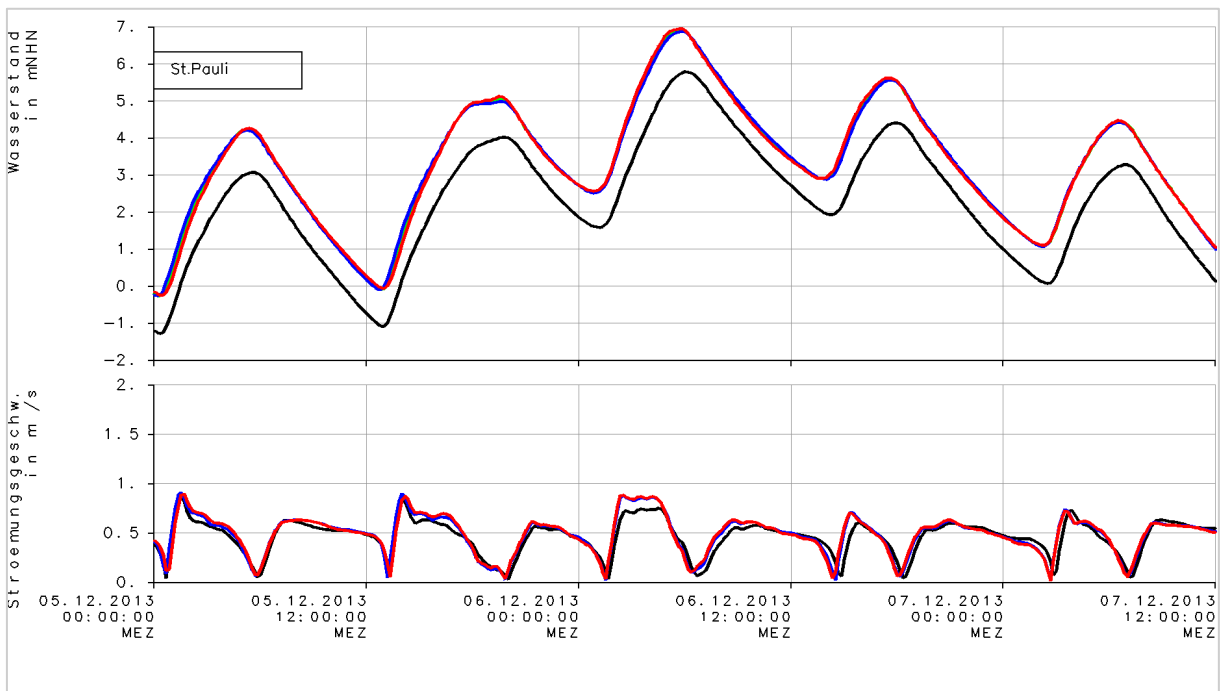


Bild 52: Zeitreihen Wasserstand und Strömungsgeschwindigkeit bei SF2013 bei St. Pauli (Elbe-km 635N): ref (schwarz), f110 (rot), w55 (grün) und w110 (blau)

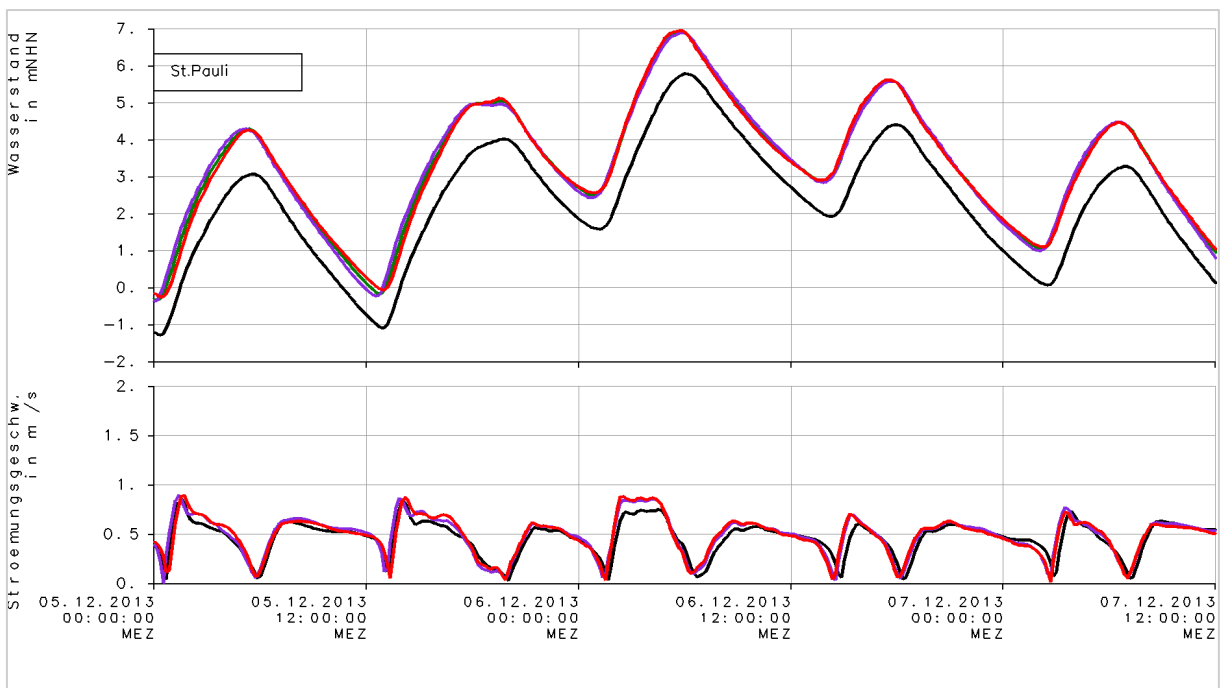


Bild 53: Zeitreihen Wasserstand und Strömungsgeschwindigkeit bei SF2013 bei St. Pauli (Elbe-km 635N): ref (schwarz), f110 (rot), w55e (dunkelgrün) und w110e (lila)

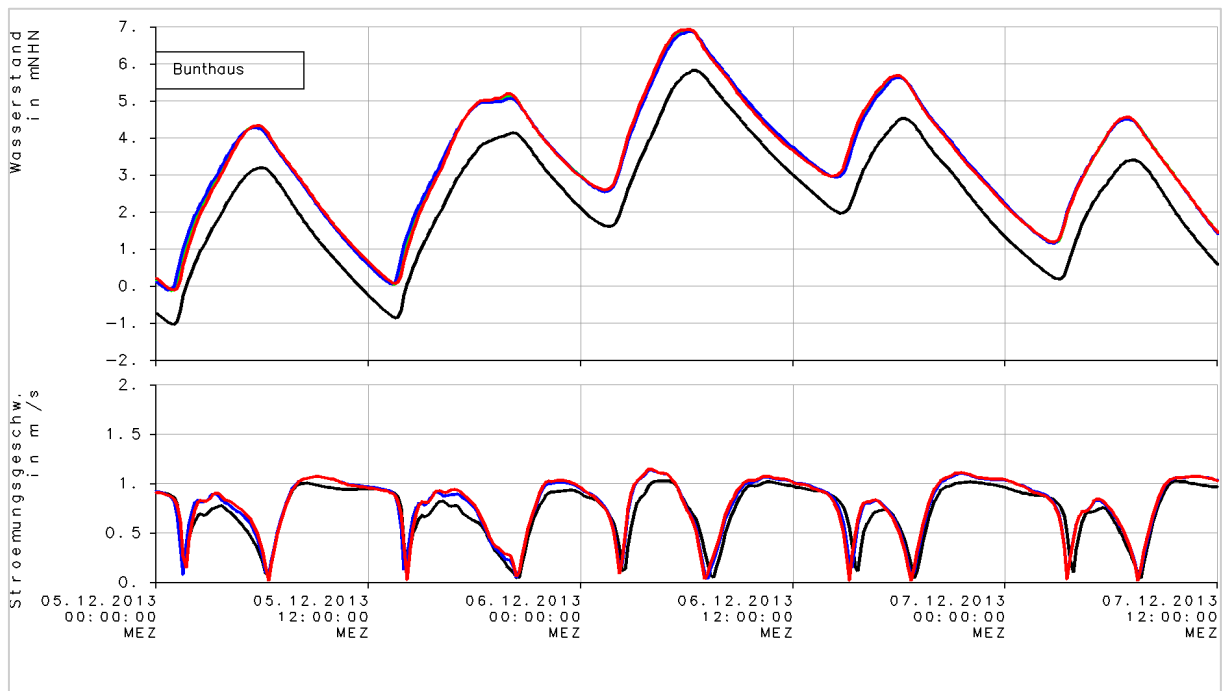


Bild 54: Zeitreihen Wasserstand und Strömungsgeschwindigkeit bei SF2013 bei Bunthaus (Elbe-km 610): ref (schwarz), f110 (rot), w55 (grün) und w110 (blau)

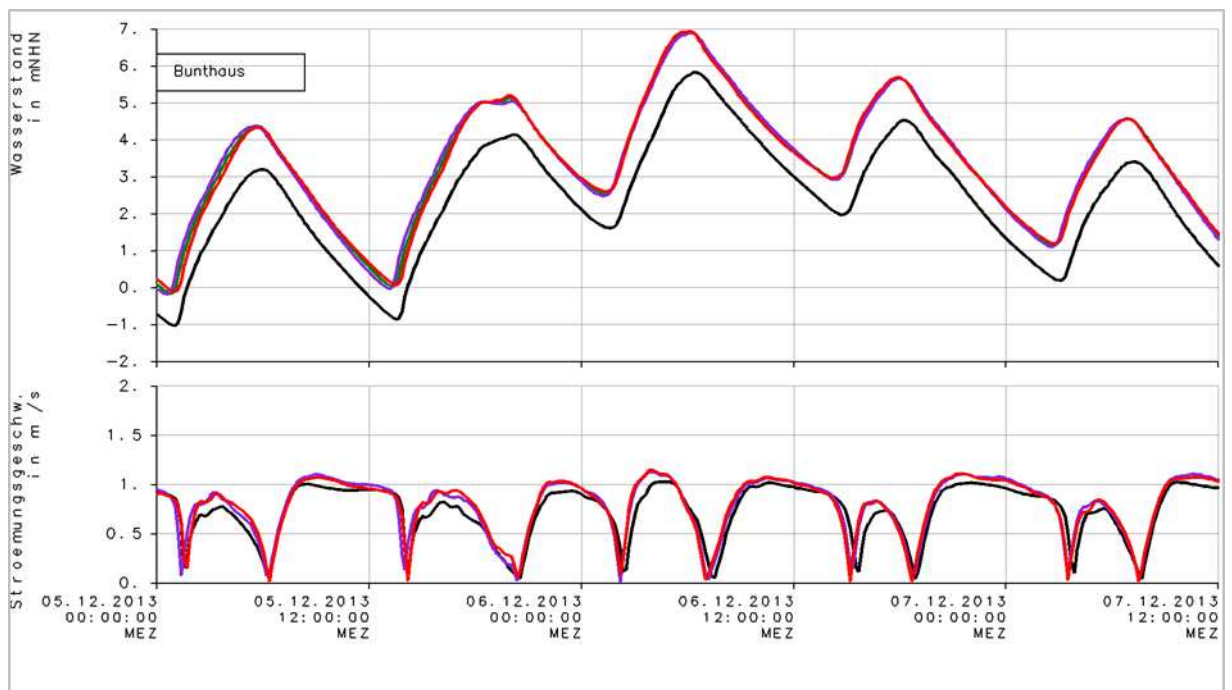


Bild 55: Zeitreihen Wasserstand und Strömungsgeschwindigkeit bei SF2013 bei Bunthaus (Elbe-km 610): ref (schwarz), f110 (rot), w55e (dunkelgrün) und w110e (lila)

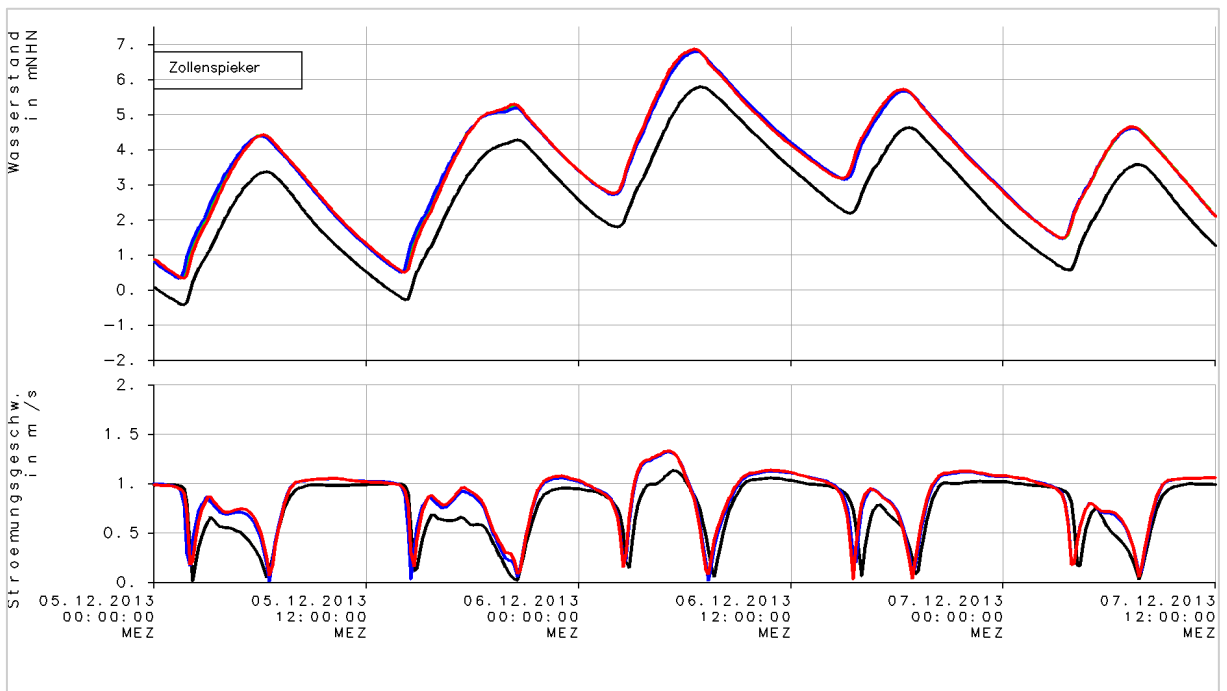


Bild 56: Zeitreihen Wasserstand und Strömungsgeschwindigkeit bei SF2013 bei Zollenspieker (Elbe-km 598): ref (schwarz), f110 (rot), w55 (grün) und w110 (blau)

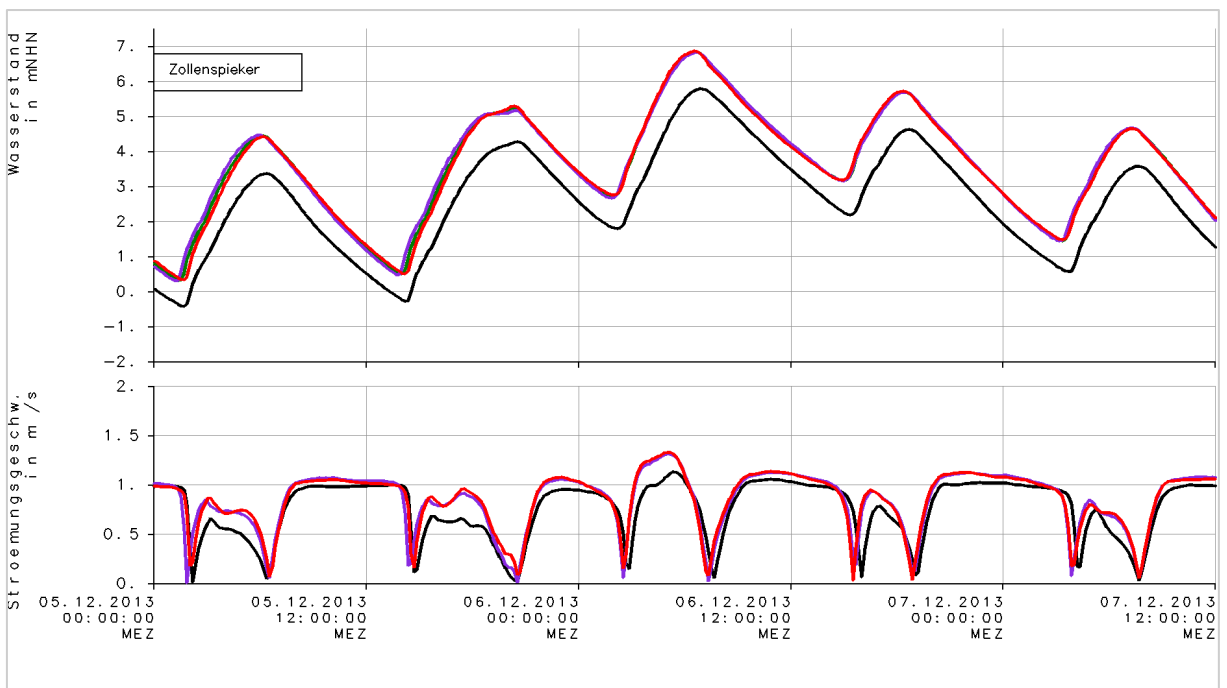


Bild 57: Zeitreihen Wasserstand und Strömungsgeschwindigkeit bei SF2013 bei Zollenspieker (Elbe-km 598): ref (schwarz), f110 (rot), w55e (dunkelgrün) und w110e (lila)

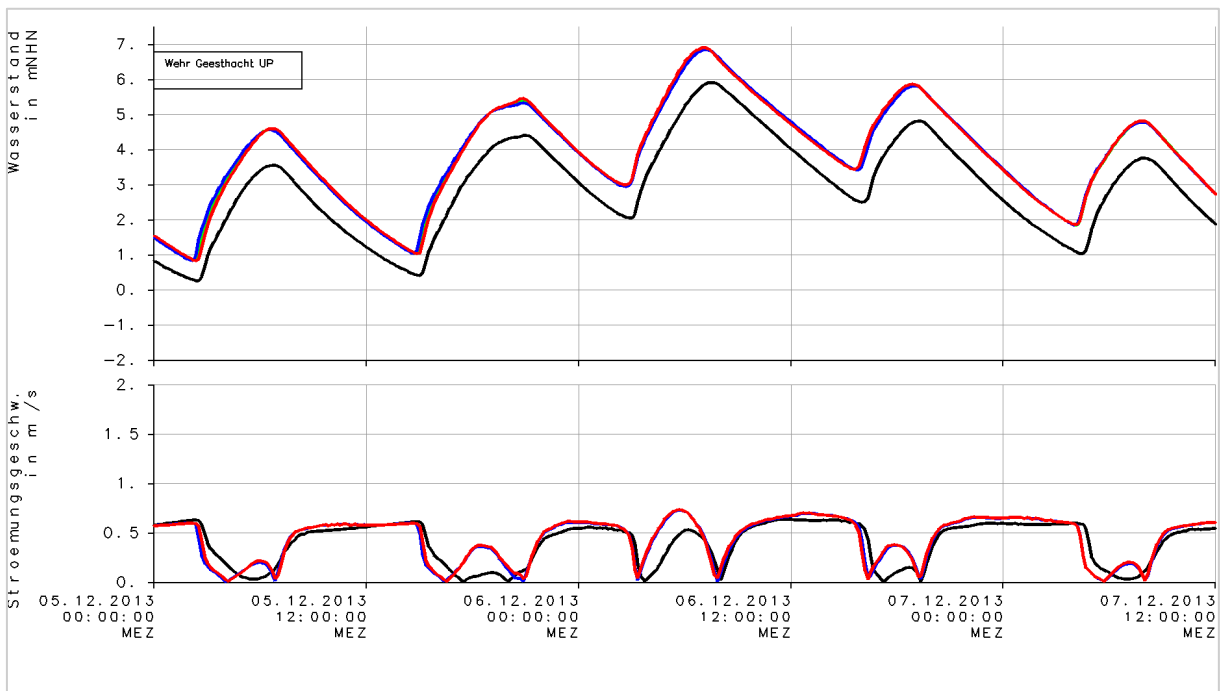


Bild 58: Zeitreihen Wasserstand und Strömungsgeschwindigkeit bei SF2013 beim Wehr Geesthacht (Elbe-km 586): ref (schwarz), f110 (rot), w55 (grün) und w110 (blau)

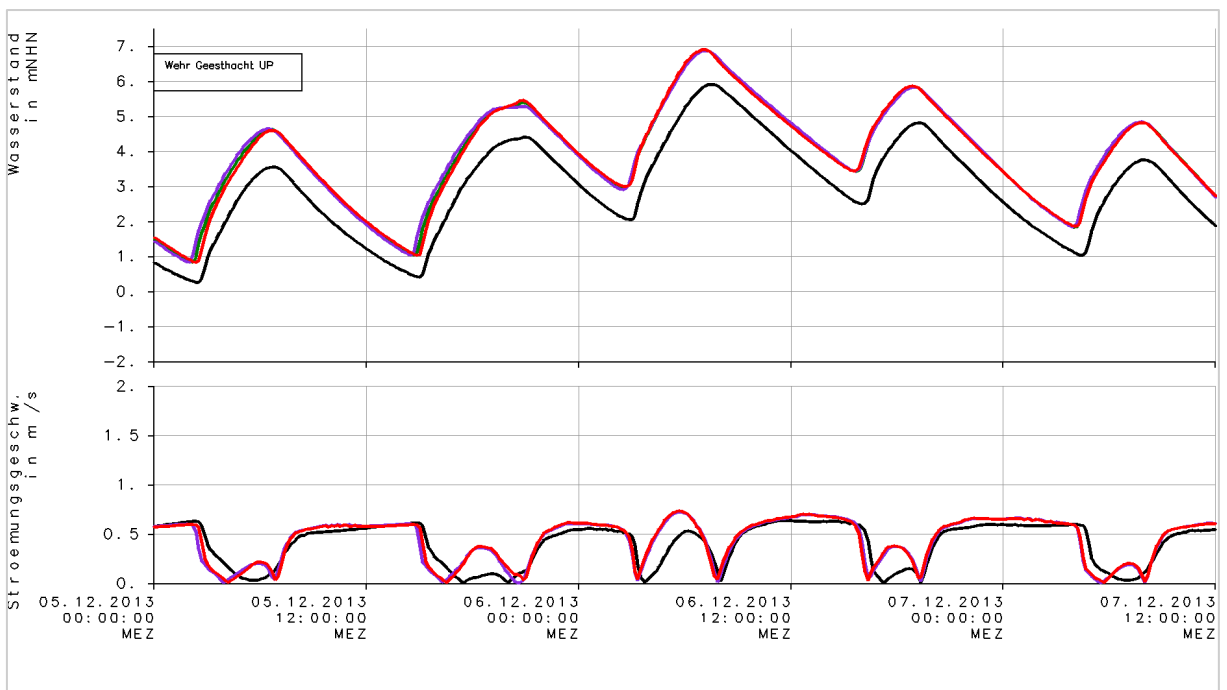


Bild 59: Zeitreihen Wasserstand und Strömungsgeschwindigkeit bei SF2013 beim Wehr Geesthacht (Elbe-km 586): ref (schwarz), f110 (rot), w55e (dunkelgrün) und w110e (lila)

3.2.3 SFEH

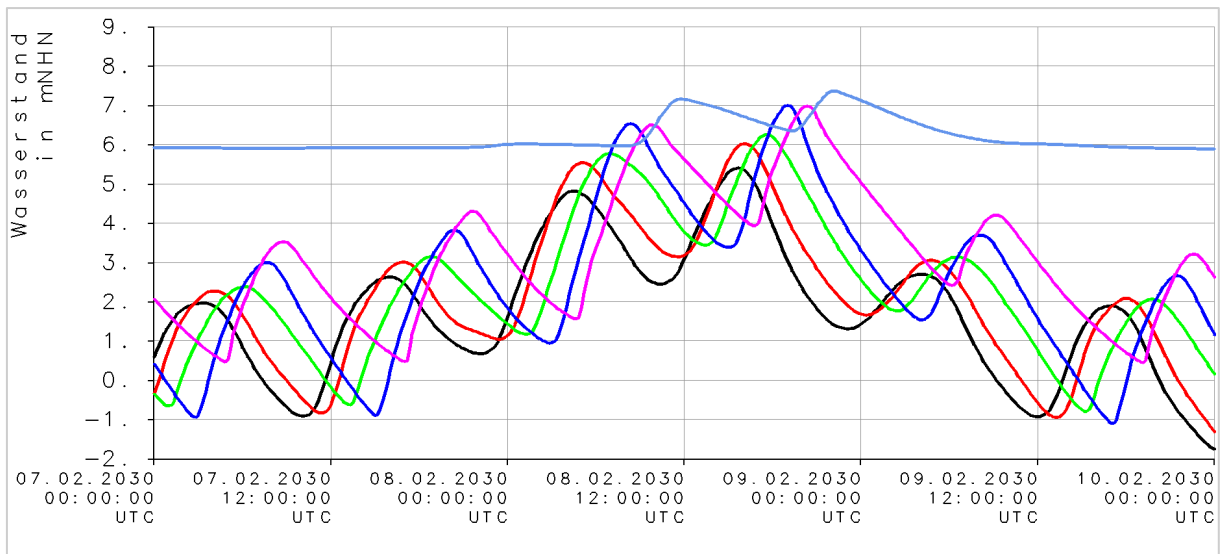


Bild 60: Zeitreihen Wasserstand bei SFEH ref an Pegeln entlang der Elbe: Bake A (Elbe-km 755) (schwarz), Cuxhaven (Elbe-km 725) (rot), Glückstadt (Elbe-km 674) (grün), St. Pauli (Elbe-km 635N) (blau), Geesthacht (Elbe-km 586) (magenta), Bleckede (Elbe-km 550) (hellblau)

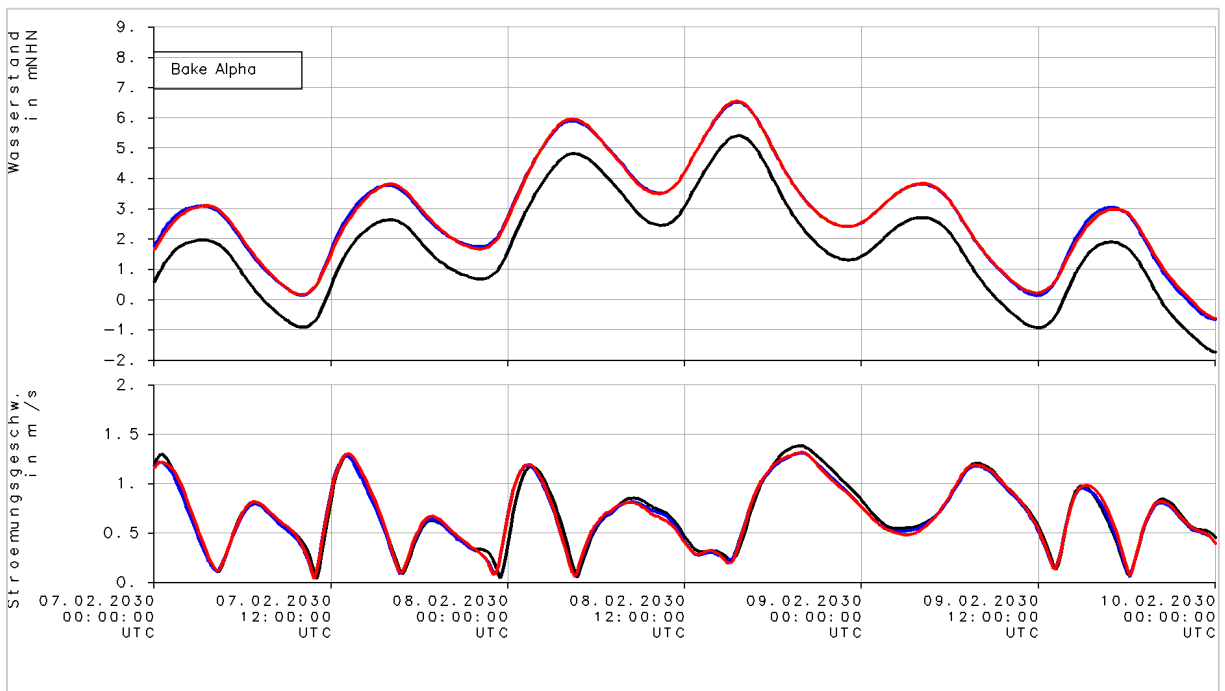


Bild 61: Zeitreihen Wasserstand und Strömungsgeschwindigkeit bei SFEH bei Bake Alpha (Elbe-km 755): ref (schwarz), f110 (rot), w55 (grün) und w110 (blau)

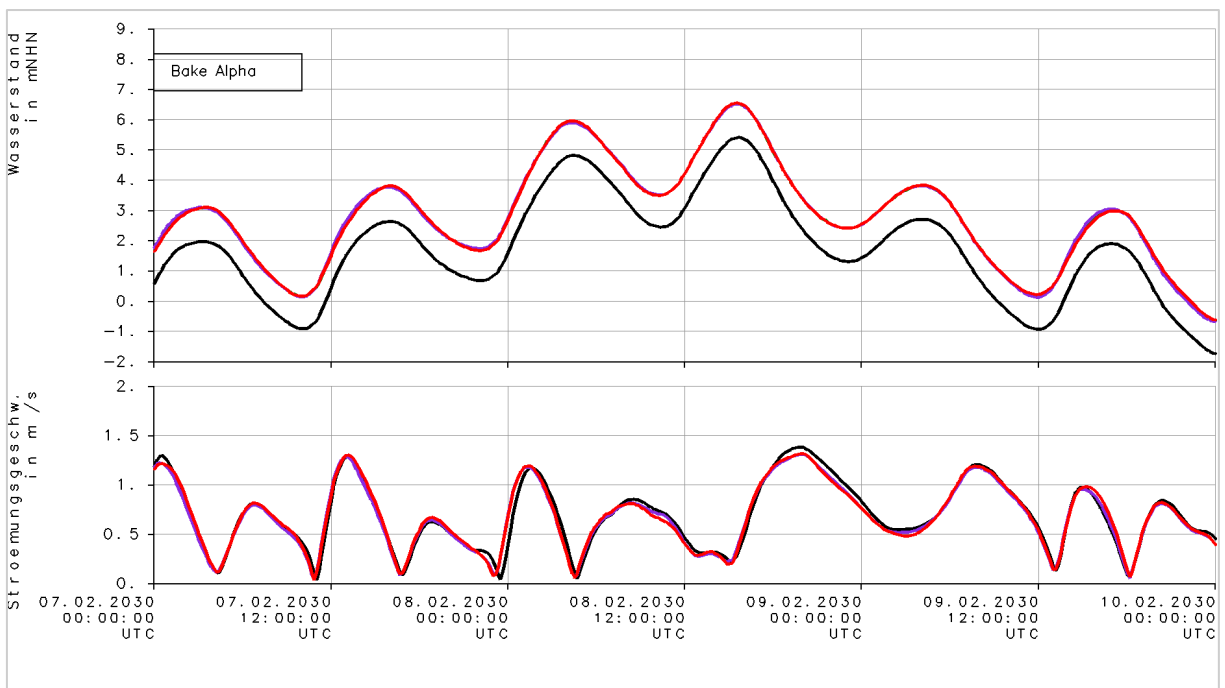


Bild 62: Zeitreihen Wasserstand und Strömungsgeschwindigkeit bei SFEH bei Bake Alpha (Elbe-km 755): ref (schwarz), f110 (rot), w55e (dunkelgrün) und w110e (lila)

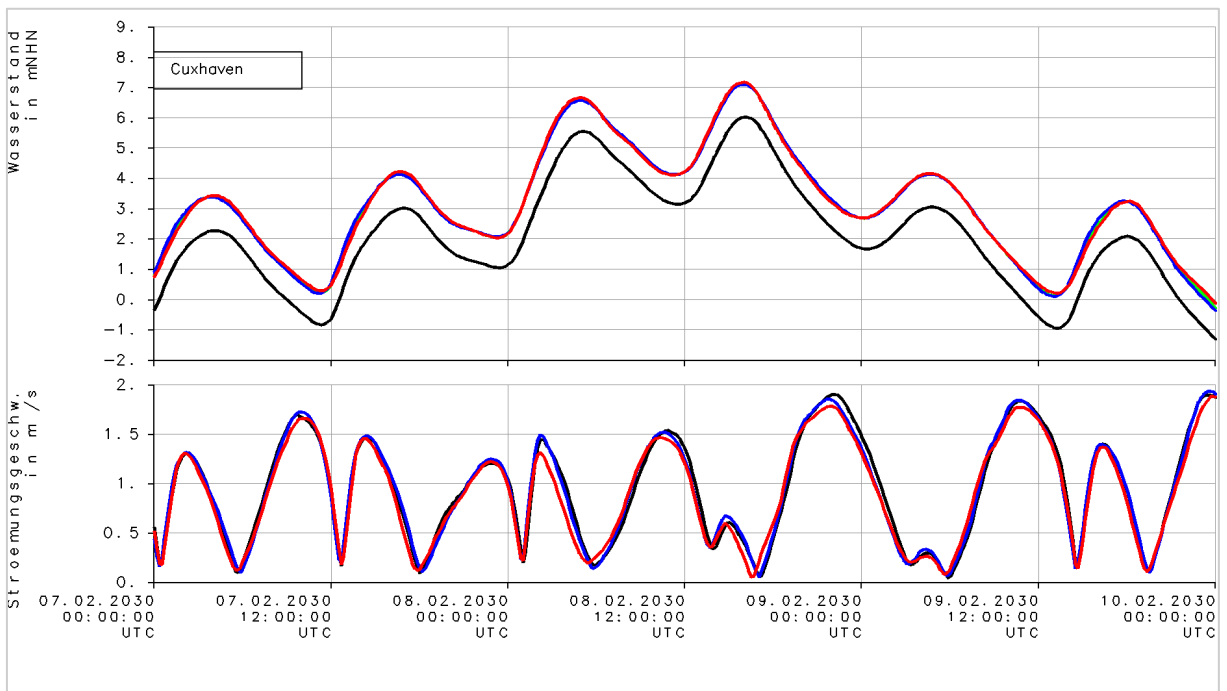


Bild 63: Zeitreihen Wasserstand und Strömungsgeschwindigkeit bei SFEH bei Cuxhaven (Elbe-km 725): ref (schwarz), f110 (rot), w55 (grün) und w110 (blau)

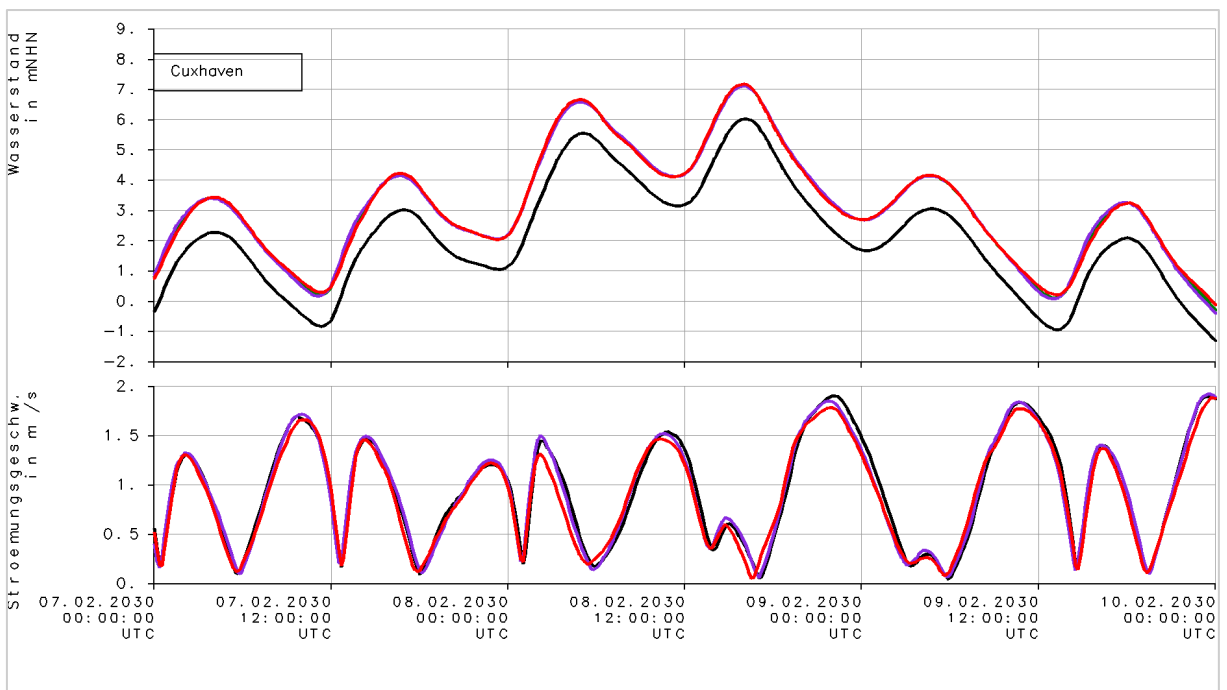


Bild 64: Zeitreihen Wasserstand und Strömungsgeschwindigkeit bei SFEH bei Cuxhaven (Elbe-km 725): ref (schwarz), f110 (rot), w55e (dunkelgrün) und w110e (lila)

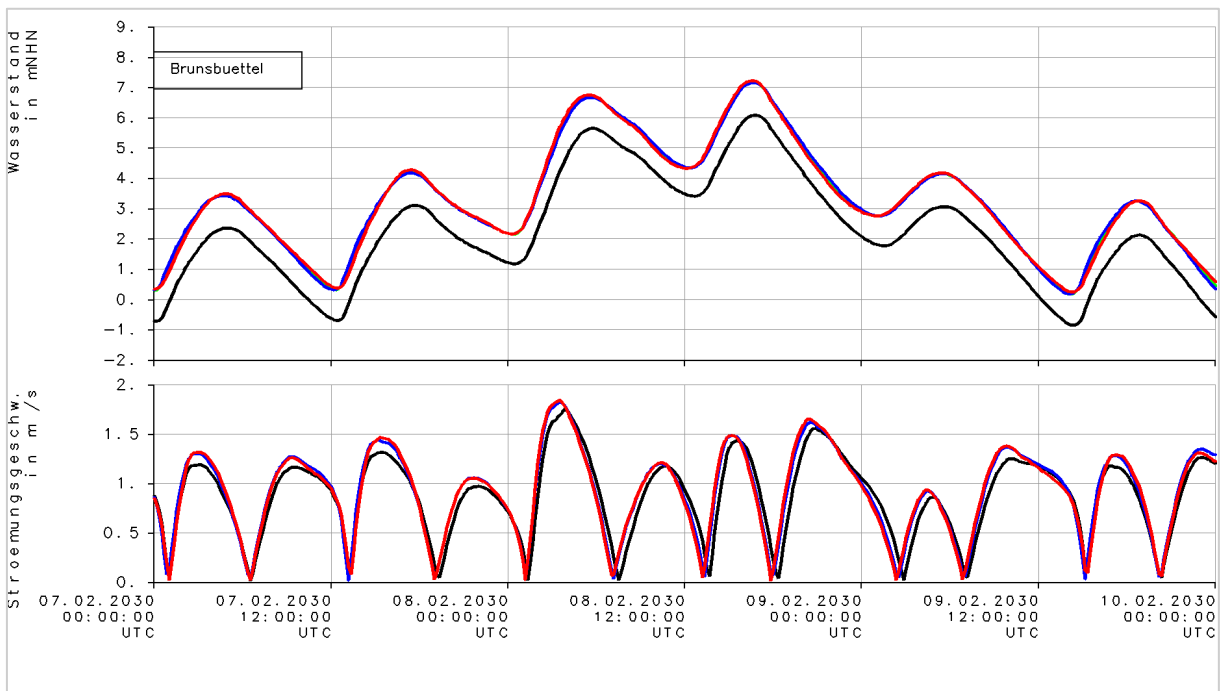


Bild 65: Zeitreihen Wasserstand und Strömungsgeschwindigkeit bei SFEH bei Brunsbüttel (Elbe-km 696): ref (schwarz), f110 (rot), w55 (grün) und w110 (blau)

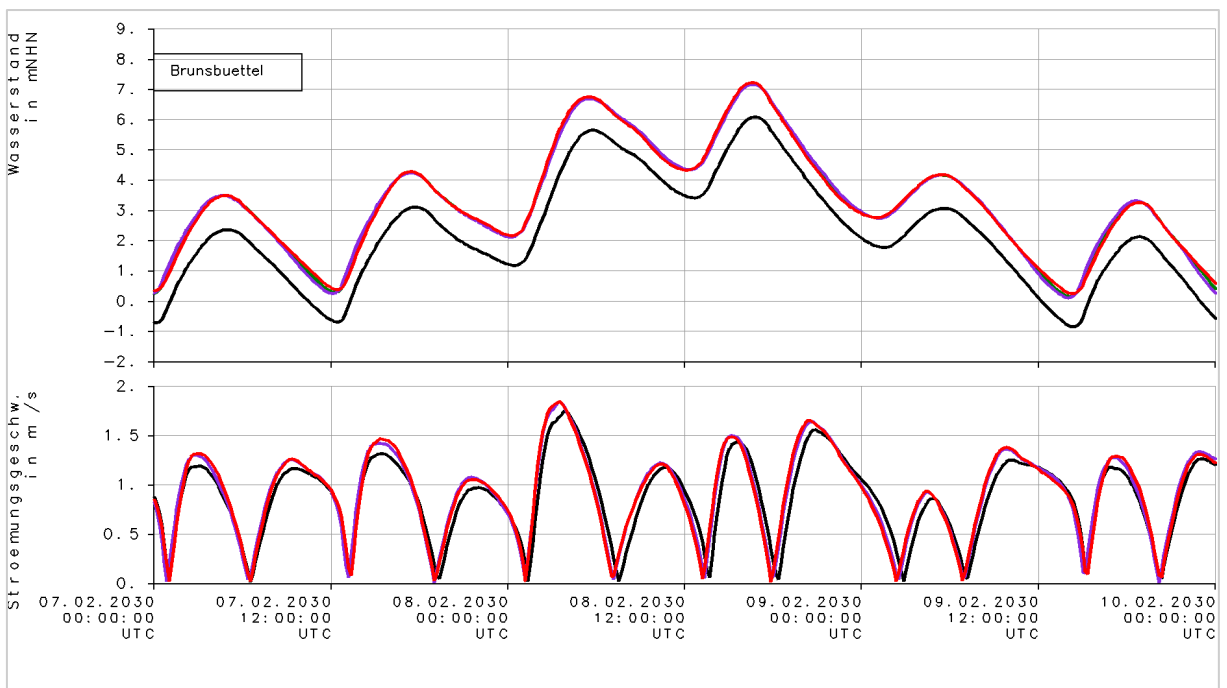


Bild 66: Zeitreihen Wasserstand und Strömungsgeschwindigkeit bei SFEH bei Brunsbüttel (Elbe-km 696): ref (schwarz), f110 (rot), w55e (dunkelgrün) und w110e (lila)

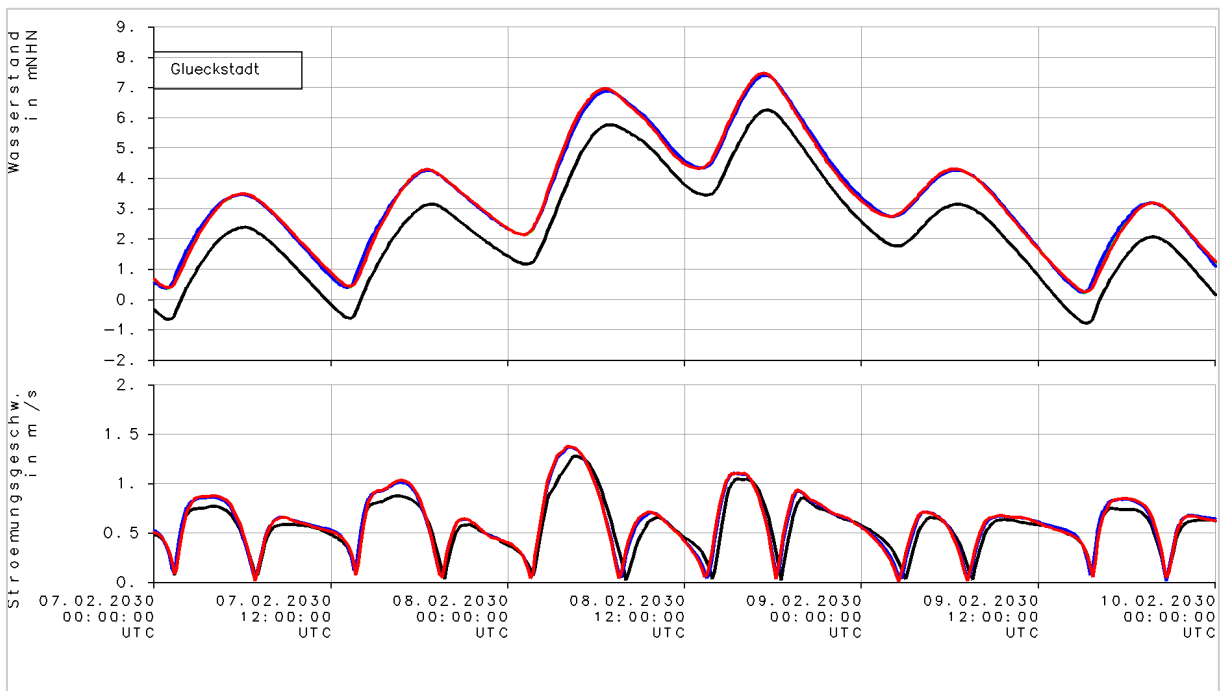


Bild 67: Zeitreihen Wasserstand und Strömungsgeschwindigkeit bei SFEH bei Glückstadt (Elbe-km 674): ref (schwarz), f110 (rot), w55 (grün) und w110 (blau)

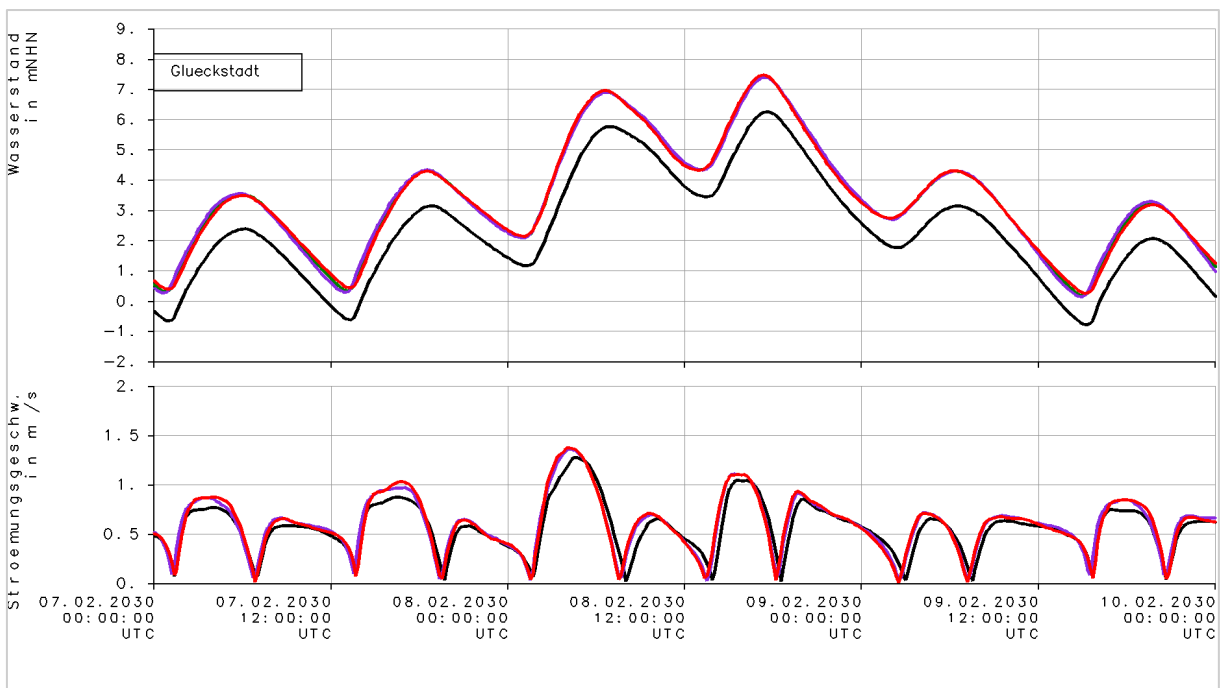


Bild 68: Zeitreihen Wasserstand und Strömungsgeschwindigkeit bei SFEH bei Glückstadt (Elbe-km 674): ref (schwarz), f110 (rot), w55e (dunkelgrün) und w110e (lila)

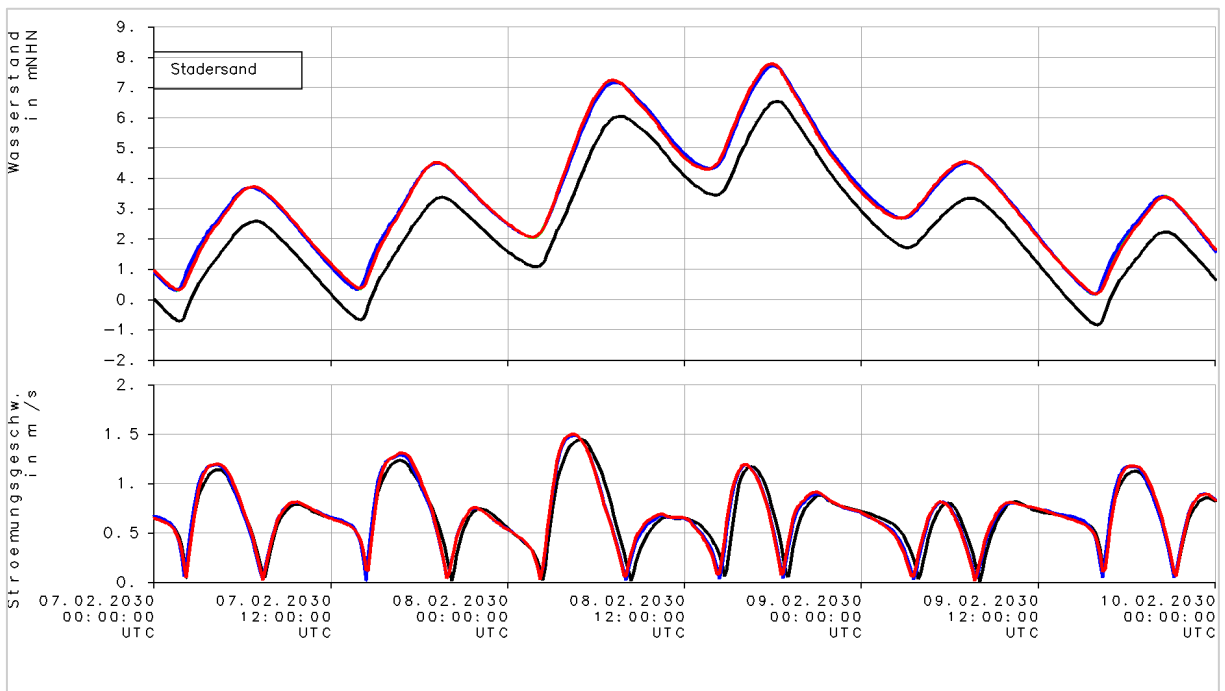


Bild 69: Zeitreihen Wasserstand und Strömungsgeschwindigkeit bei SFEH bei Stadersand (Elbe-km 655): ref (schwarz), f110 (rot), w55 (grün) und w110 (blau)

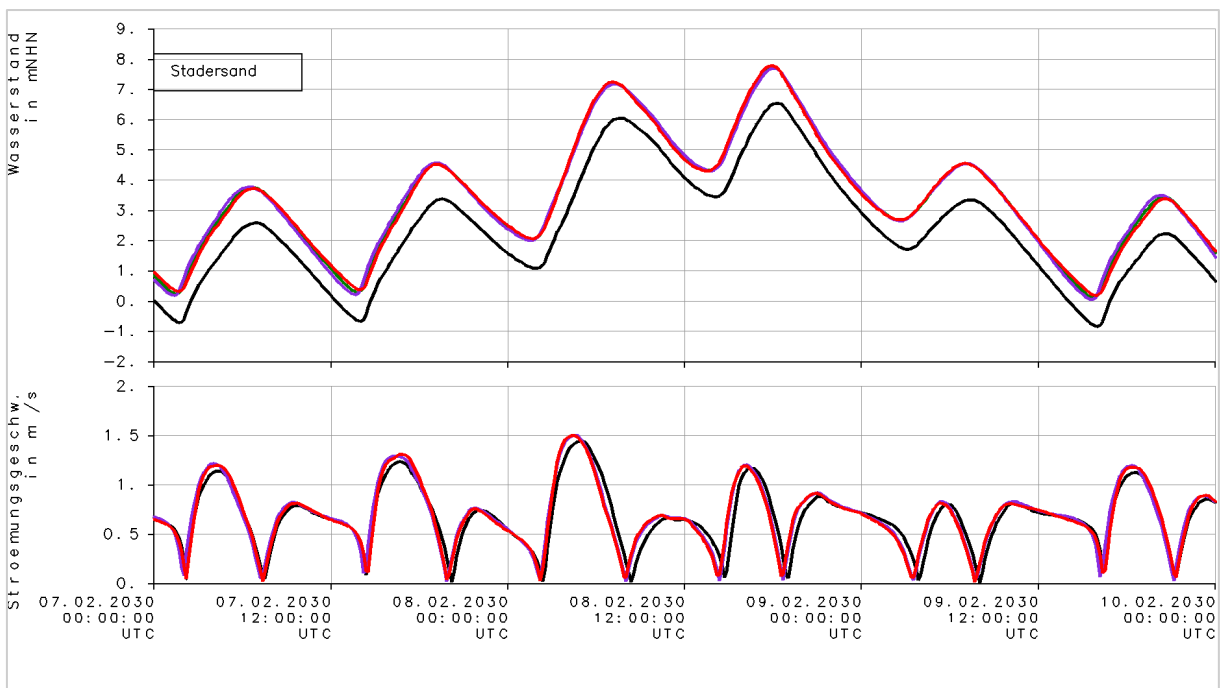


Bild 70: Zeitreihen Wasserstand und Strömungsgeschwindigkeit bei SFEH bei Stadersand (Elbe-km 655): ref (schwarz), f110 (rot), w55e (dunkelgrün) und w110e (lila)

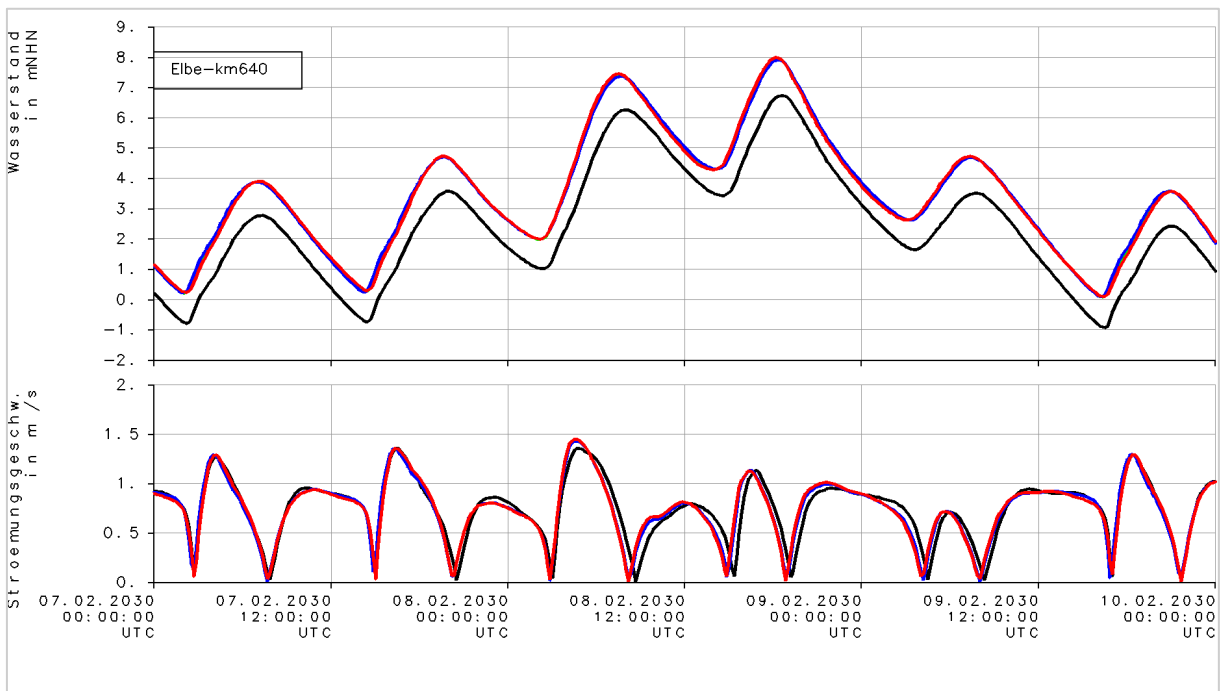


Bild 71: Zeitreihen Wasserstand und Strömungsgeschwindigkeit bei SFEH bei Stromkilometer 640: ref (schwarz), f110 (rot), w55 (grün) und w110 (blau)

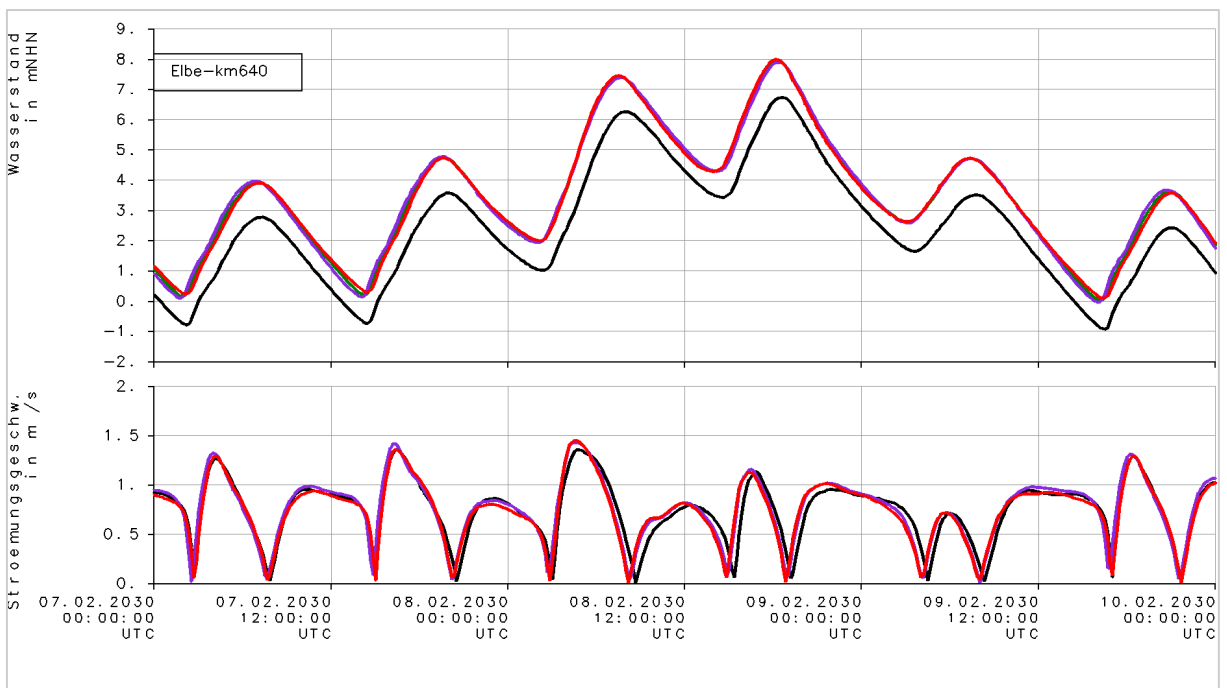


Bild 72: Zeitreihen Wasserstand und Strömungsgeschwindigkeit SFEH bei Stromkilometer 640: ref (schwarz), f110 (rot), w55e (dunkelgrün) und w110e (lila)

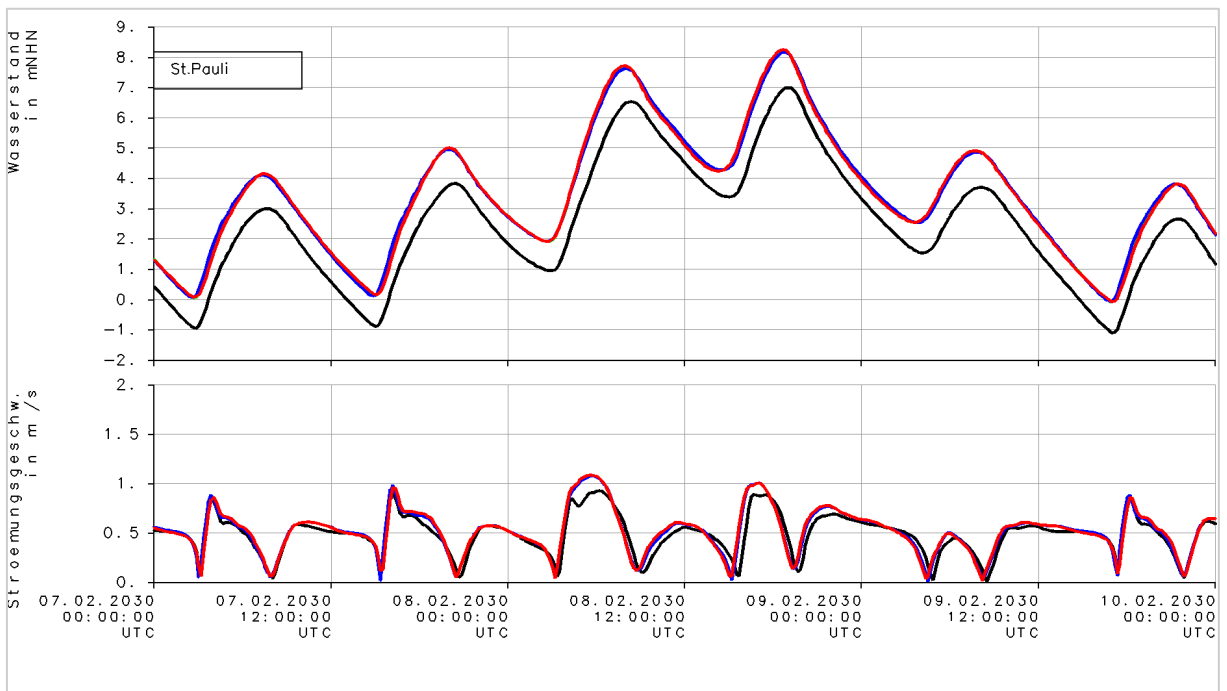


Bild 73: Zeitreihen Wasserstand und Strömungsgeschwindigkeit bei SFEH bei St. Pauli (Elbe-km 635N): ref (schwarz), f110 (rot), w55 (grün) und w110 (blau)

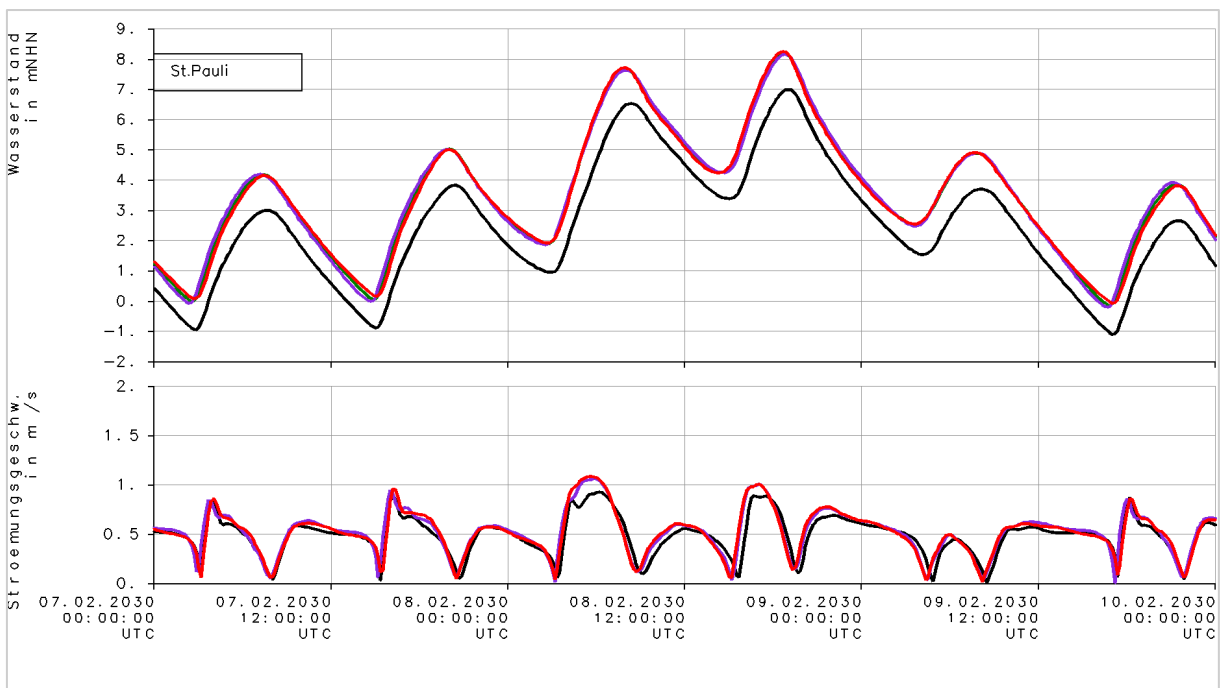


Bild 74: Zeitreihen Wasserstand und Strömungsgeschwindigkeit bei SFEH bei St. Pauli (Elbe-km 635N): ref (schwarz), f110 (rot), w55e (dunkelgrün) und w110e (lila)

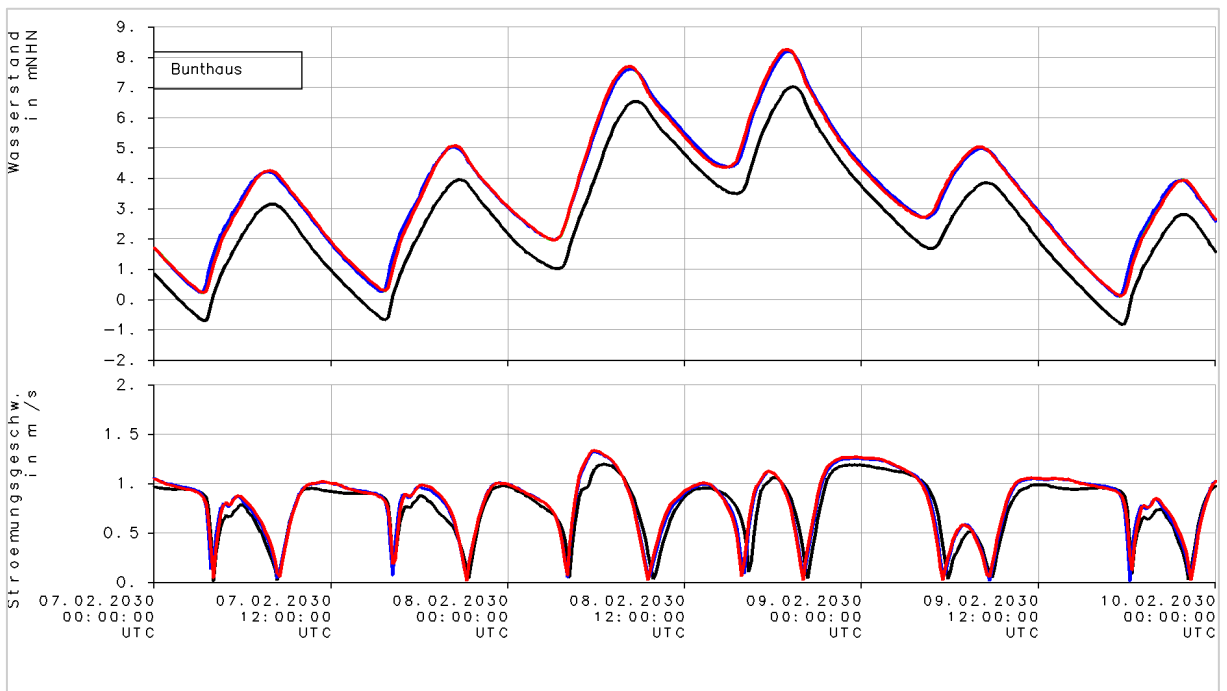


Bild 75: Zeitreihen Wasserstand und Strömungsgeschwindigkeit bei SFEH bei Bunthaus (Elbe-km 610): ref (schwarz), f110 (rot), w55 (grün) und w110 (blau)

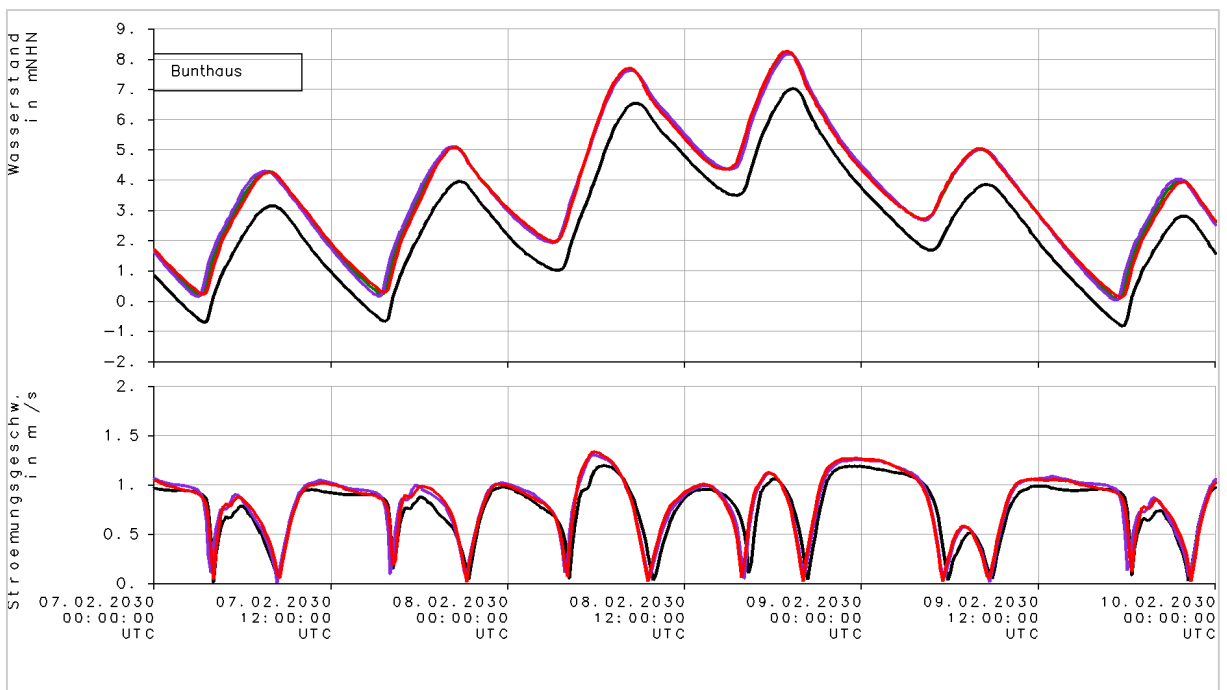


Bild 76: Zeitreihen Wasserstand und Strömungsgeschwindigkeit bei SFEH bei Bunthaus (Elbe-km 610): ref (schwarz), f110 (rot), w55e (dunkelgrün) und w110e (lila)

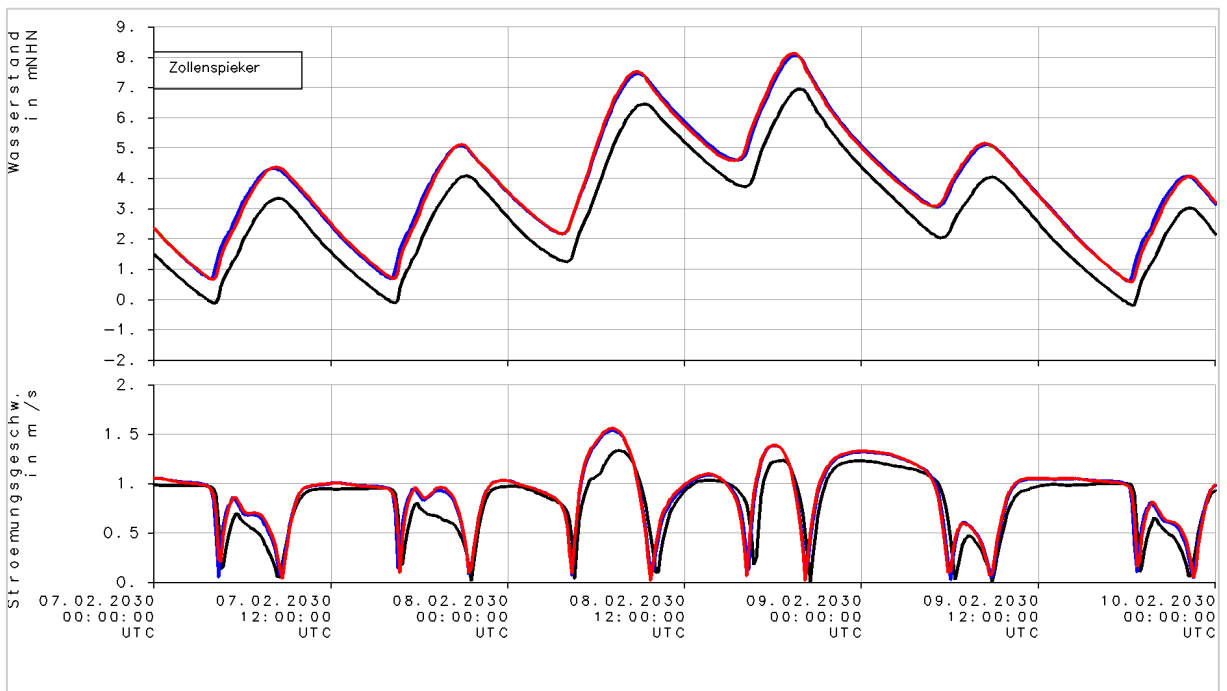


Bild 77: Zeitreihen Wasserstand und Strömungsgeschwindigkeit bei SFEH bei Zollenspieker (Elbe-km 598): ref (schwarz), f110 (rot), w55 (grün) und w110 (blau)

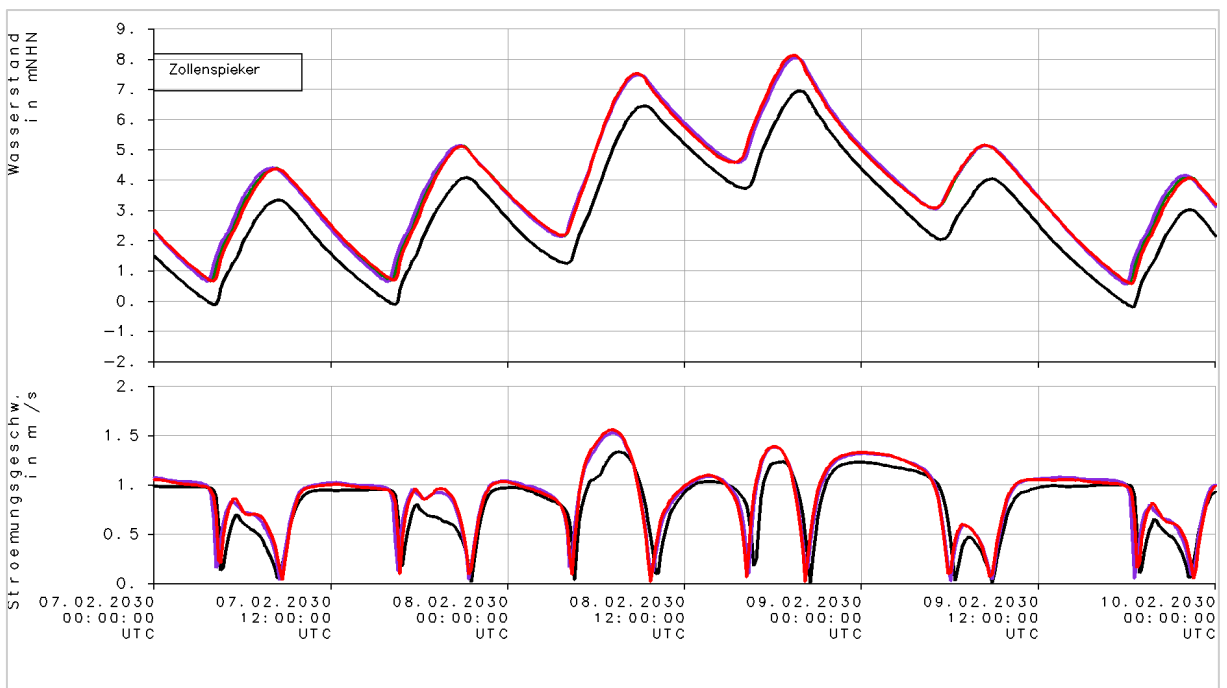


Bild 78: Zeitreihen Wasserstand und Strömungsgeschwindigkeit bei SFEH bei Zollenspieker (Elbe-km 598): ref (schwarz), f110 (rot), w55e (dunkelgrün) und w110e (lila)

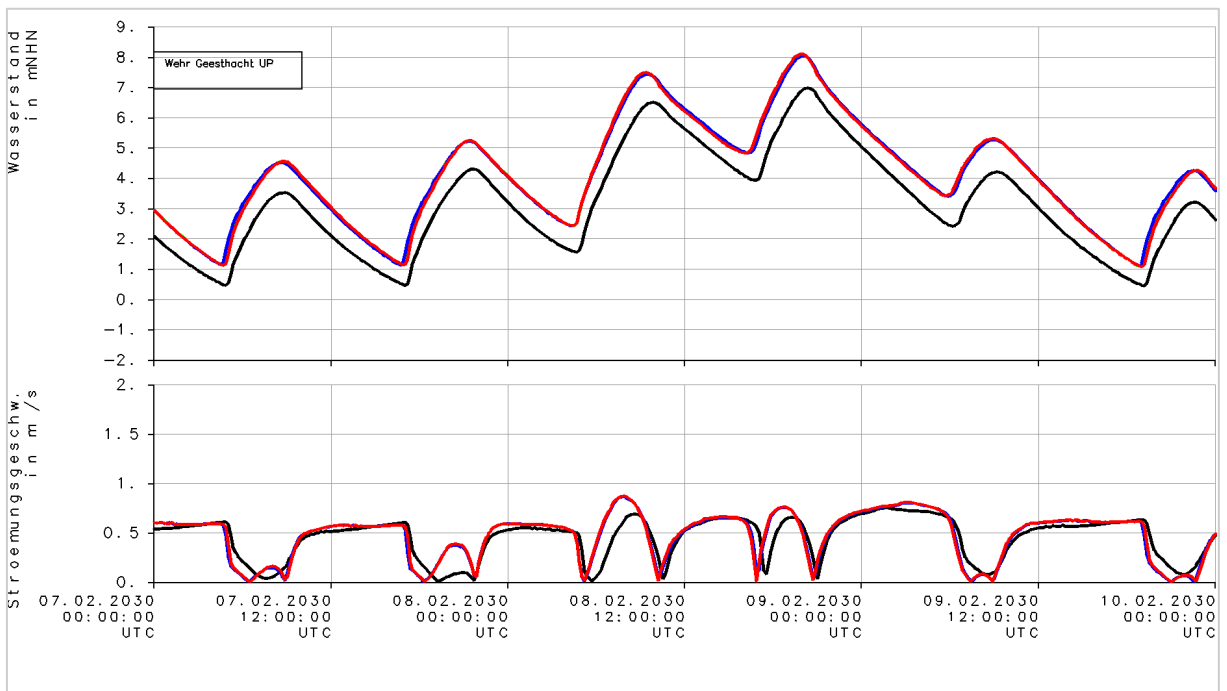


Bild 79: Zeitreihen Wasserstand und Strömungsgeschwindigkeit bei SFEH beim Wehr Geesthacht (Elbe-km 586): ref (schwarz), f110 (rot), w55 (grün) und w110 (blau)

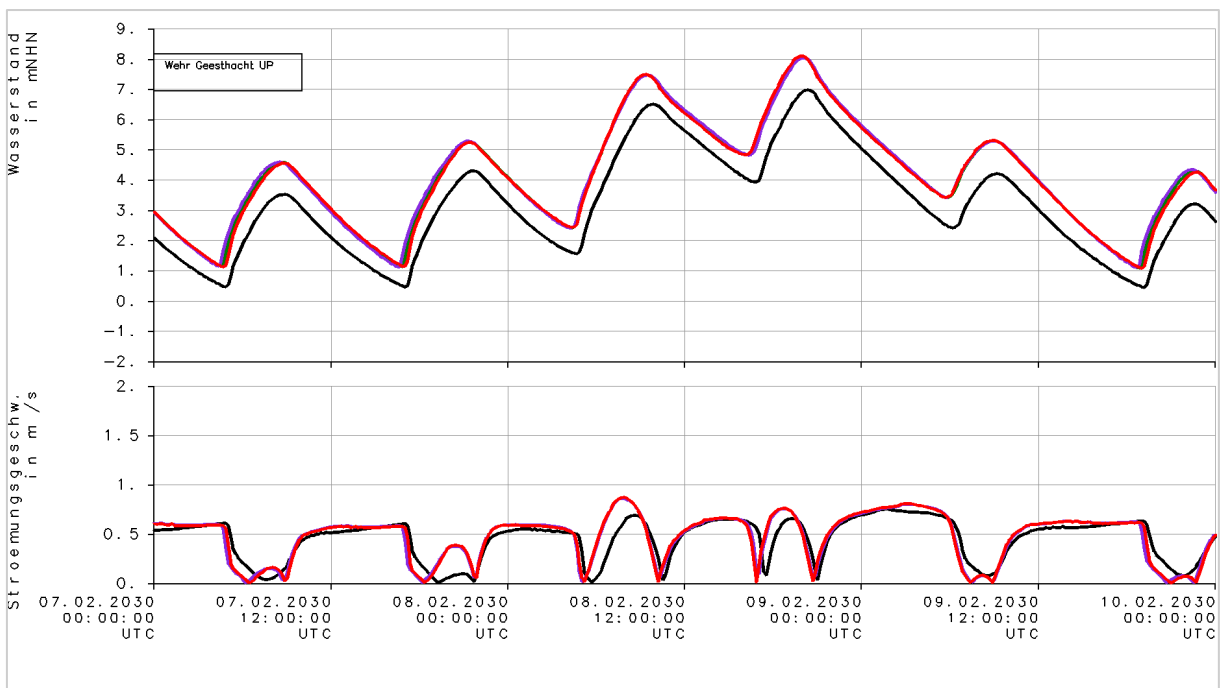


Bild 80: Zeitreihen Wasserstand und Strömungsgeschwindigkeit bei SFEH beim Wehr Geesthacht (Elbe-km 586): ref (schwarz), f110 (rot), w55e (dunkelgrün) und w110e (lila)

3.3 (Tide) Kennwerte des Wasserstands

Der Sturmflutscheitelwasserstand (HW) der untersuchten Sturmflutereignisse, das mittlere Tidehochwasser (MThw), das mittlere Tideniedrigwasser (MTnw) sowie der mittlere Tidehub (MThb) des untersuchten Spring-Nipp-Zeitraums werden für alle untersuchten Szenarien entlang der Fahrrinnenmitte des Elbe-Längsprofils dargestellt. Es werden die absoluten Werte, sowie die Änderungen zum Referenzzustand (ref) bzw. zu einem alleinigen SLR (f110) gezeigt. Dadurch wird deutlich, wie sich HW und MThw durch den SLR und die Topographieerhöhungen verändern. Anschließend sind das HW und MThw für eine Auswahl von Szenarien im Bereich der Elbmündung flächig dargestellt. In der flächigen Darstellung in der Elbmündung sollten die Wasserstände in den Nebenflüssen nicht interpretiert werden.

3.3.1 SN2013

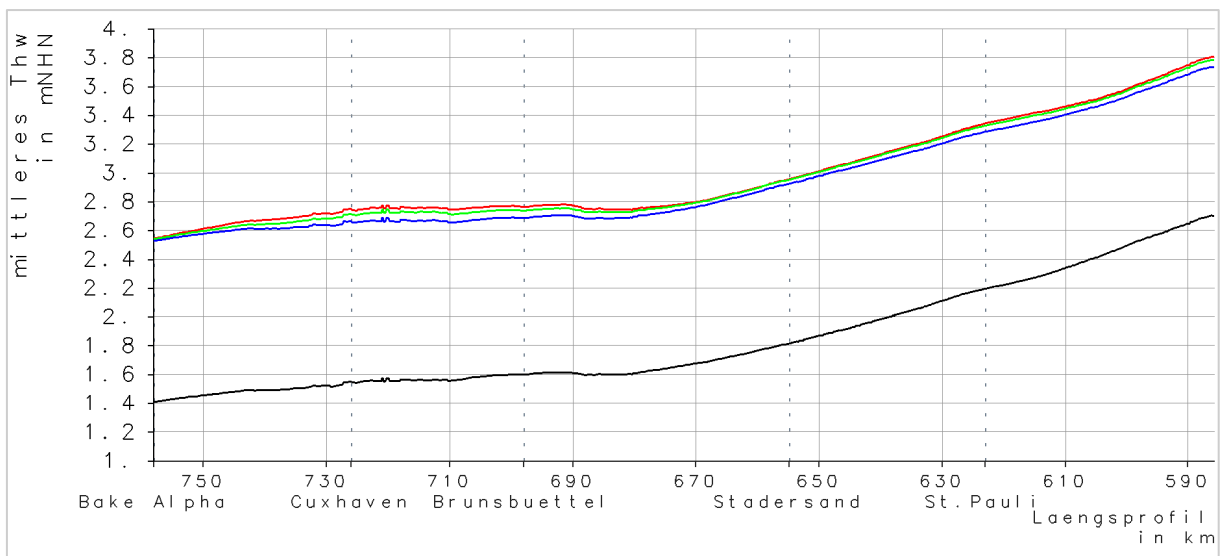


Bild 81: MThw bei SN2013 entlang der Elbe in Fahrrinnenmitte: ref (schwarz), f110 (rot), w55 (grün), w110 (blau)

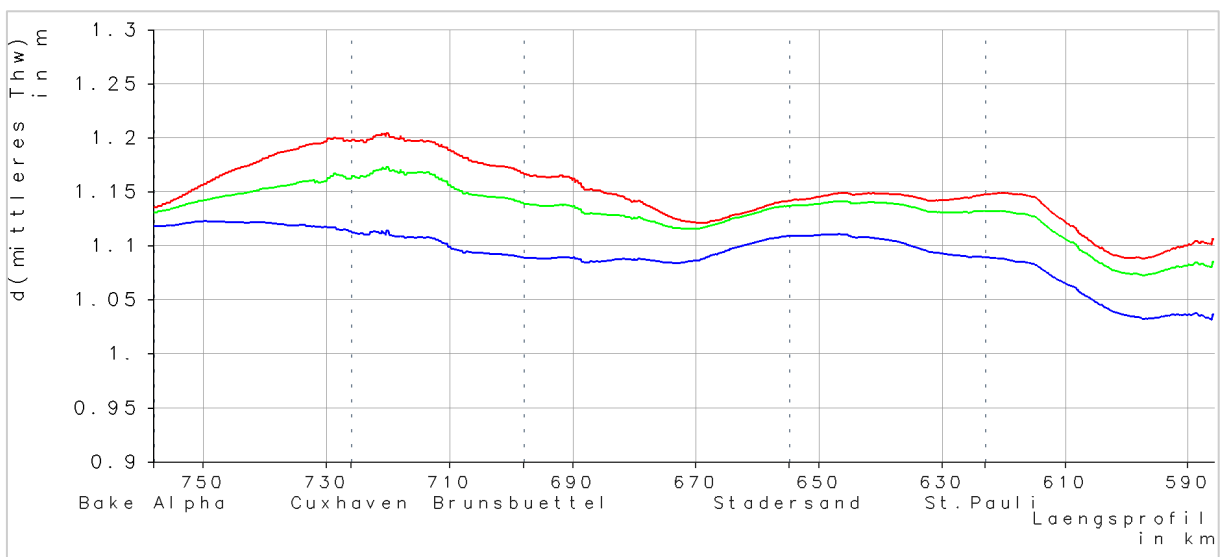


Bild 82: Differenzen MThw bei SN2013 entlang der Elbe in Fahrrinnenmitte: f110-ref (rot), w55-ref (grün), w110-ref (blau)

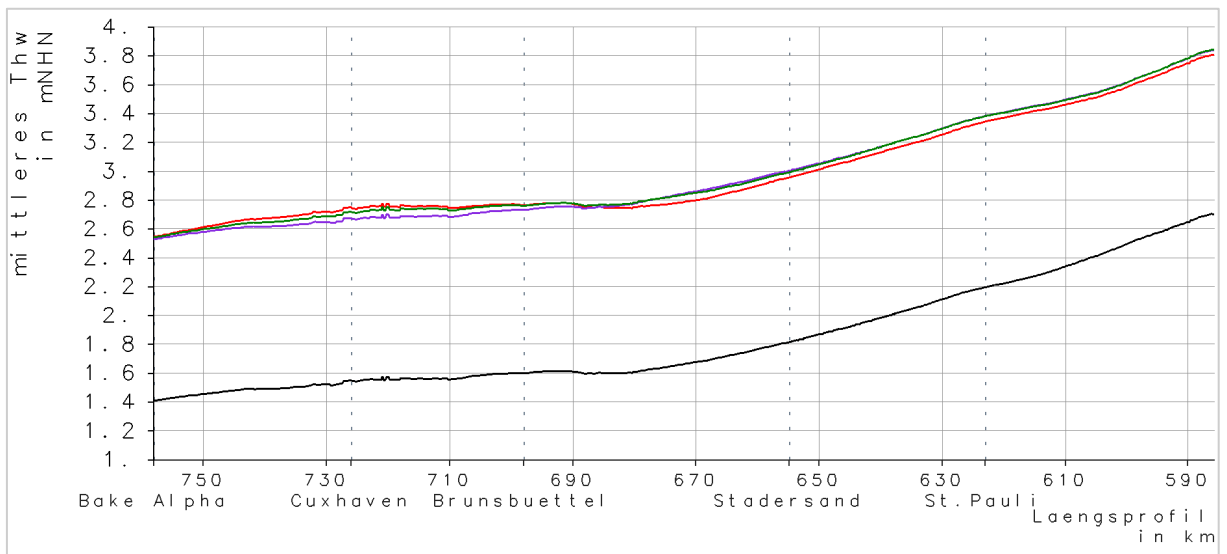


Bild 83: *MThw bei SN2013 entlang der Elbe in Fahrrinnenmitte: ref (schwarz), f110 (rot), w55e (dunkelgrün), w110e (lila)*

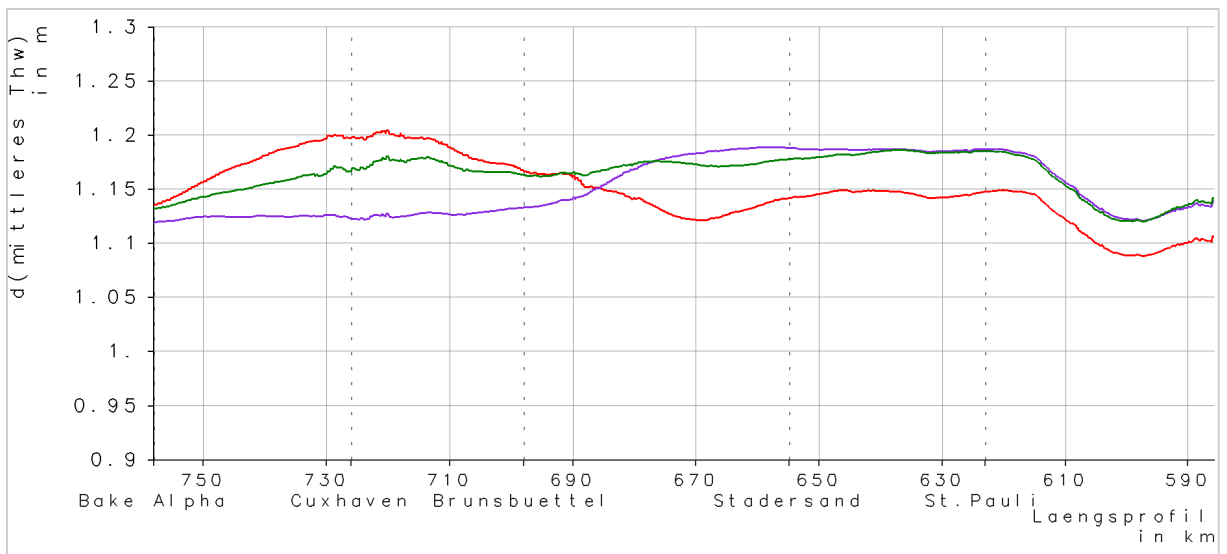


Bild 84: *Differenzen MThw bei SN2013 entlang der Elbe in Fahrrinnenmitte: f110-ref (rot), w55e-ref (dunkelgrün), w110e-ref (lila)*

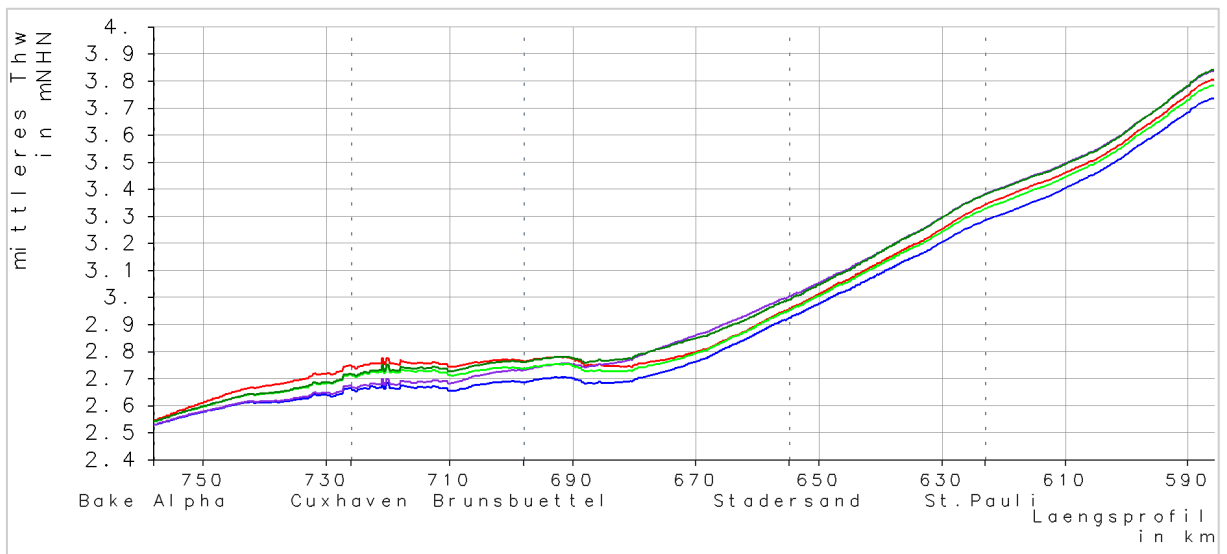


Bild 85: MThw bei SN2013 entlang der Elbe in Fahrrinnenmitte: f110 (rot), w55 (grün), w55e (dunkelgrün), w110 (blau), w110e (lila)

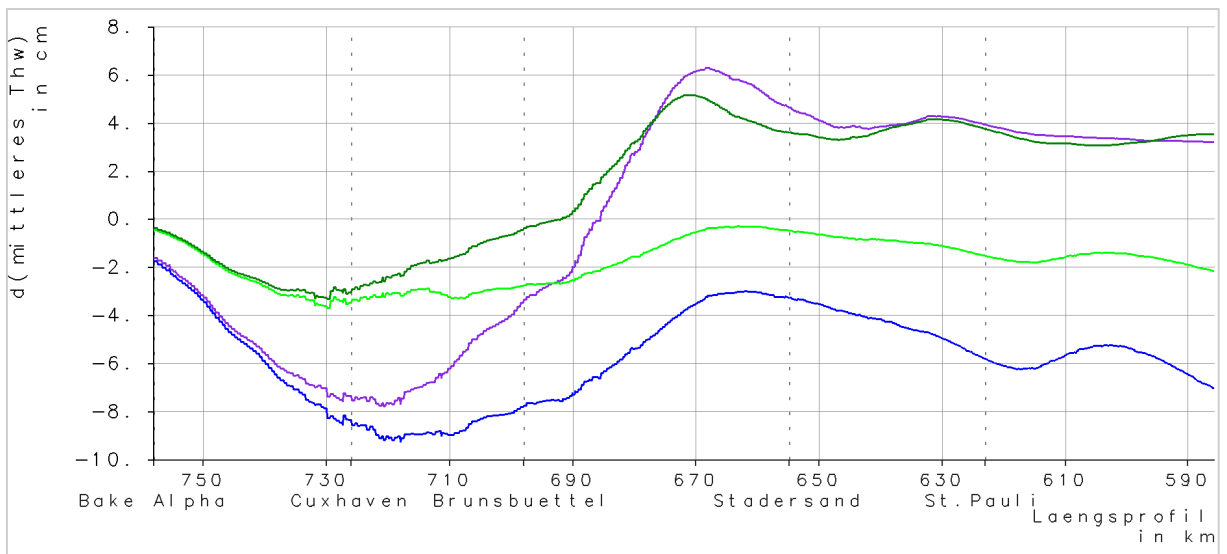


Bild 86: Differenzen MThw bei SN2013 entlang der Elbe in Fahrrinnenmitte: w55-f110 (grün), w55e-f110 (dunkelgrün), w110-f110(blau), w110e-f110 (lila)

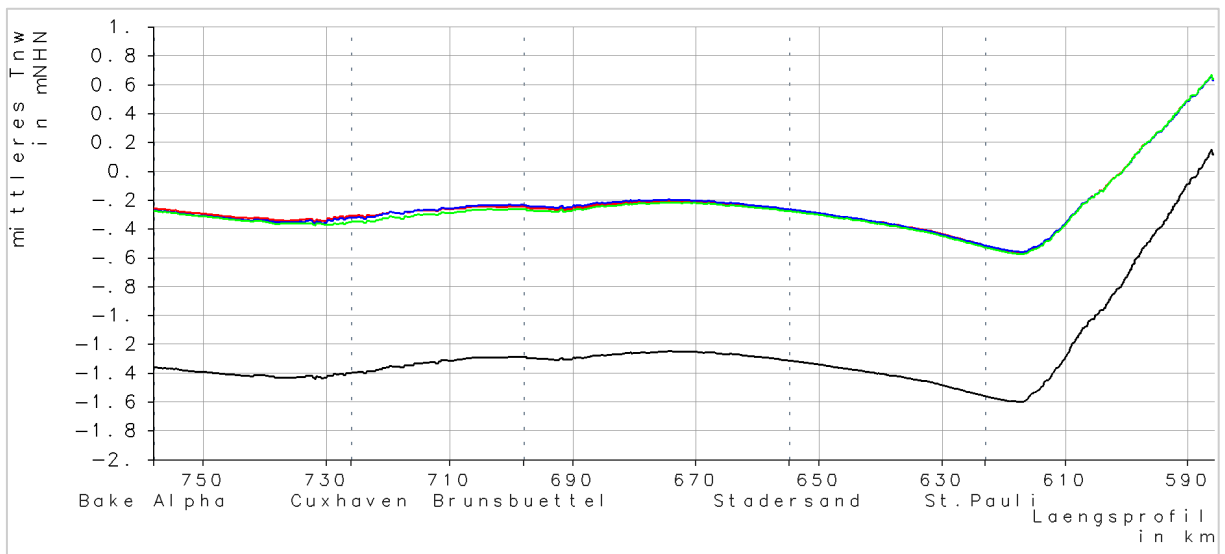


Bild 87: *MTnw bei SN2013 entlang der Elbe in Fahrrinnenmitte: ref (schwarz), f110 (rot), w55 (grün), w110 (blau)*

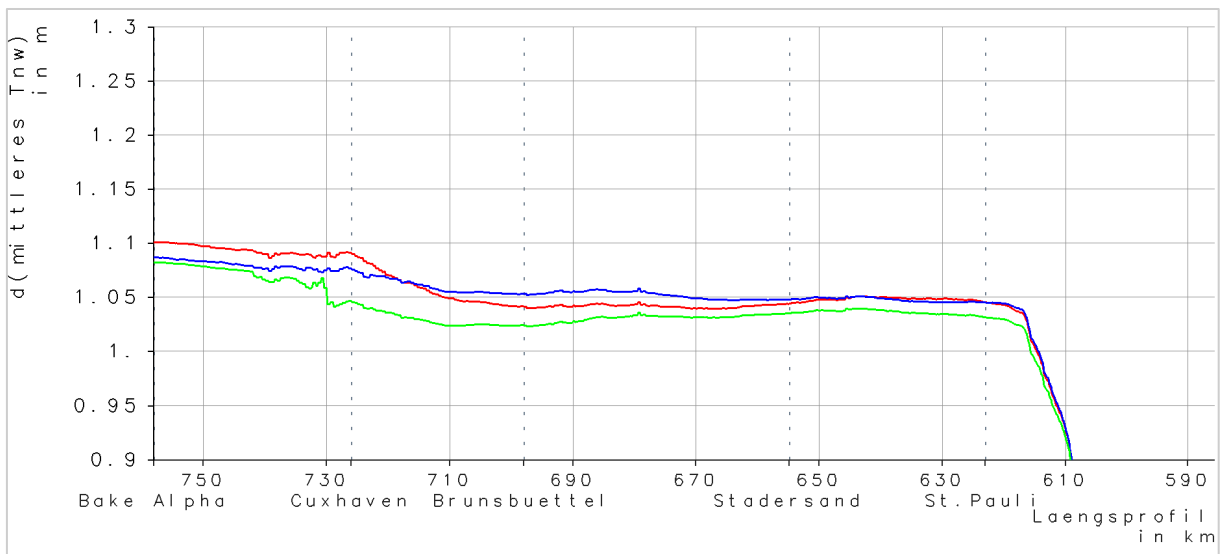


Bild 88: *Differenzen MTnw bei SN2013 entlang der Elbe in Fahrrinnenmitte: f110-ref (rot), w55-ref (grün), w110-ref (blau)*

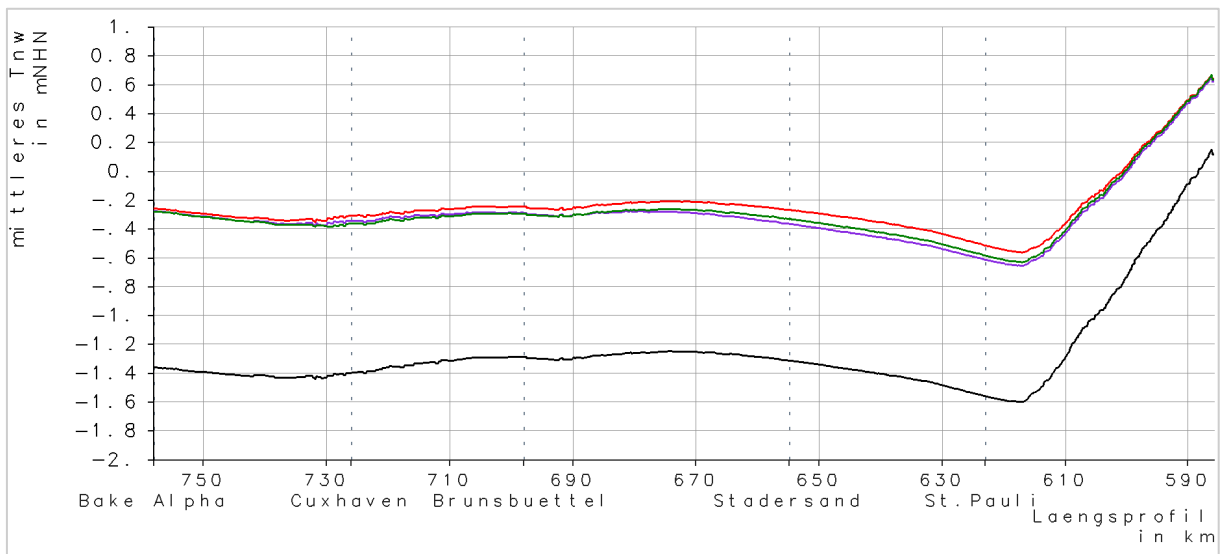


Bild 89: *MTnw bei SN2013 entlang der Elbe in Fahrrinnenmitte: ref (schwarz), f110 (rot), w55e (dunkelgrün), w110e (lila)*

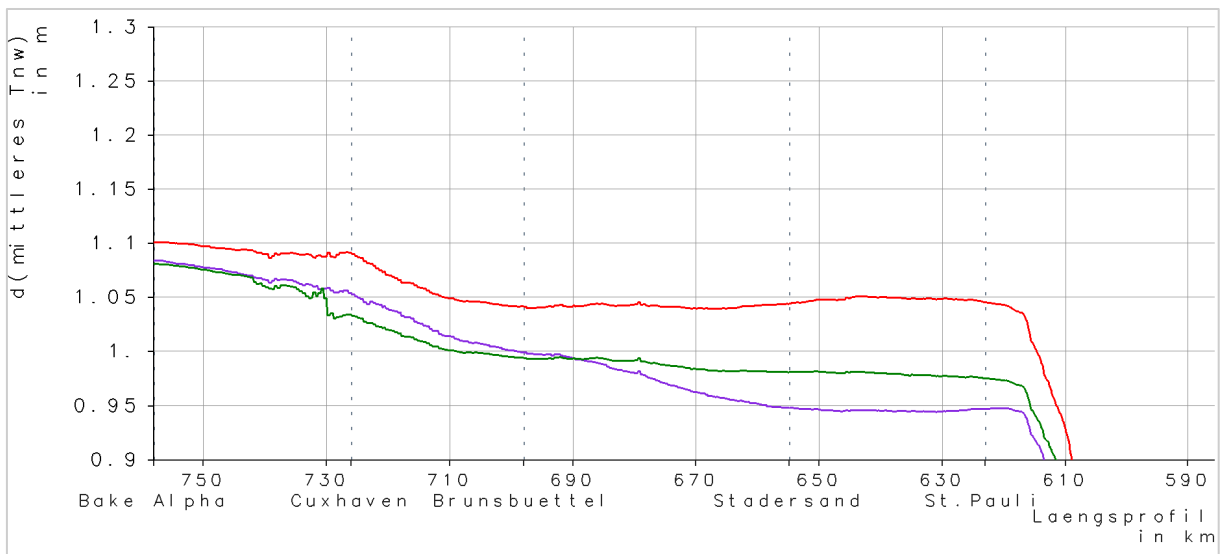


Bild 90: *Differenzen MTnw bei SN2013 entlang der Elbe in Fahrrinnenmitte: f110-ref (rot), w55e-ref (dunkelgrün), w110e-ref (lila)*

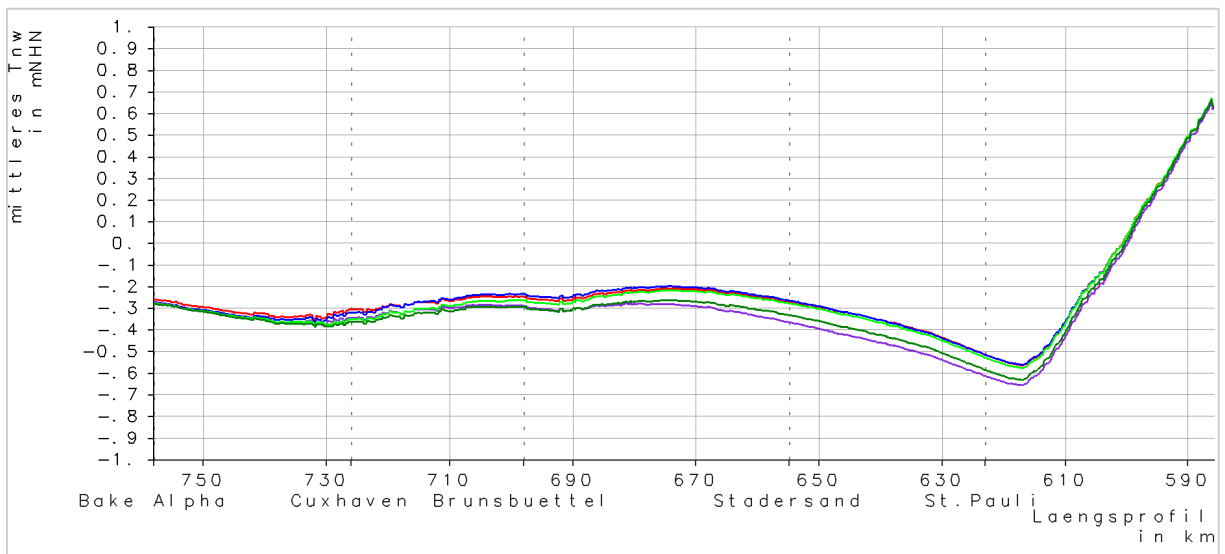


Bild 91: *MTnw bei SN2013 entlang der Elbe in Fahrrinnenmitte: f110 (rot), w55 (grün), w55e (dunkelgrün), w110 (blau), w110e (lila)*

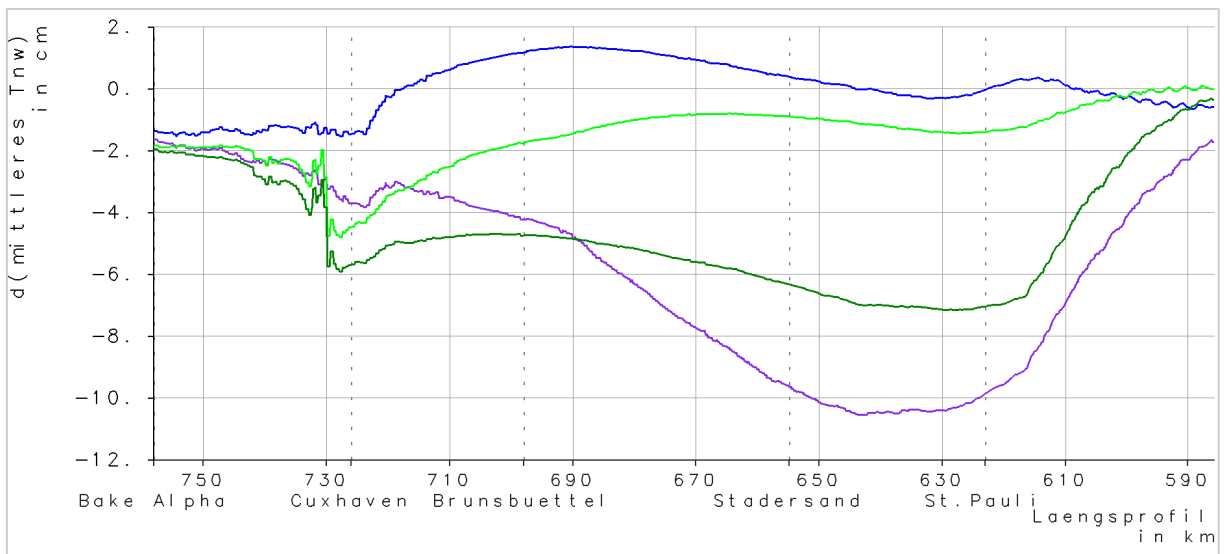


Bild 92: *Differenzen MTnw bei SN2013 entlang der Elbe in Fahrrinnenmitte: w55-f110 (grün), w55e-f110 (dunkelgrün), w110-f110(blau), w110e-f110 (lila)*

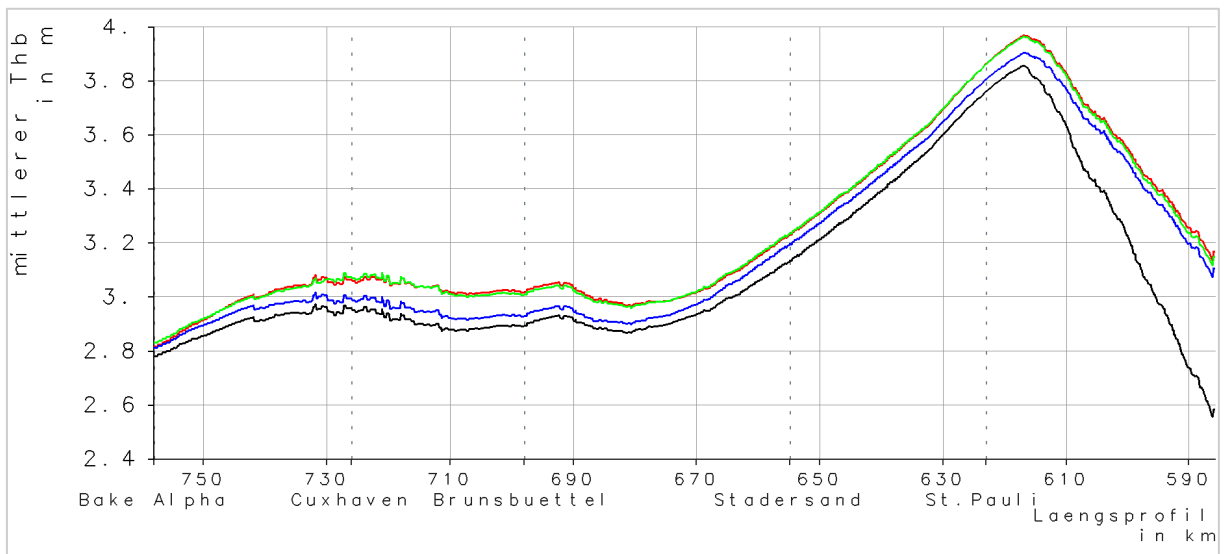


Bild 93: *MThb bei SN2013 entlang der Elbe in Fahrrinnenmitte: ref (schwarz), f110 (rot), w55 (grün), w110 (blau)*

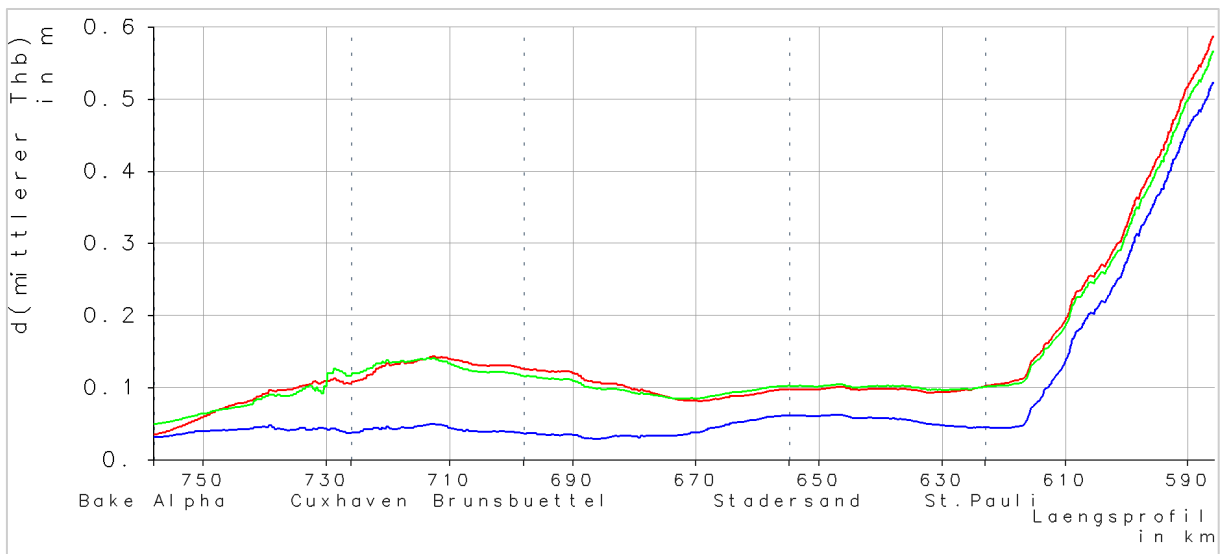


Bild 94: *Differenzen MThb bei SN2013 entlang der Elbe in Fahrrinnenmitte: f110-ref (rot), w55-ref (grün), w110-ref (blau)*

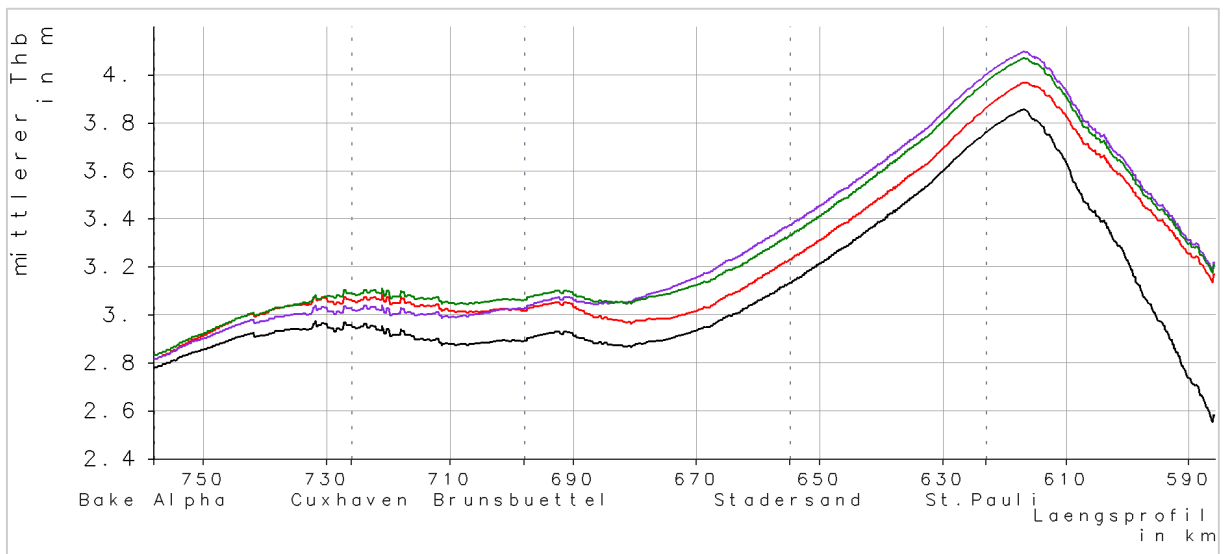


Bild 95: *MThb bei SN2013 entlang der Elbe in Fahrrinnenmitte: ref (schwarz), f110 (rot), w55e (dunkelgrün), w110e (lila)*

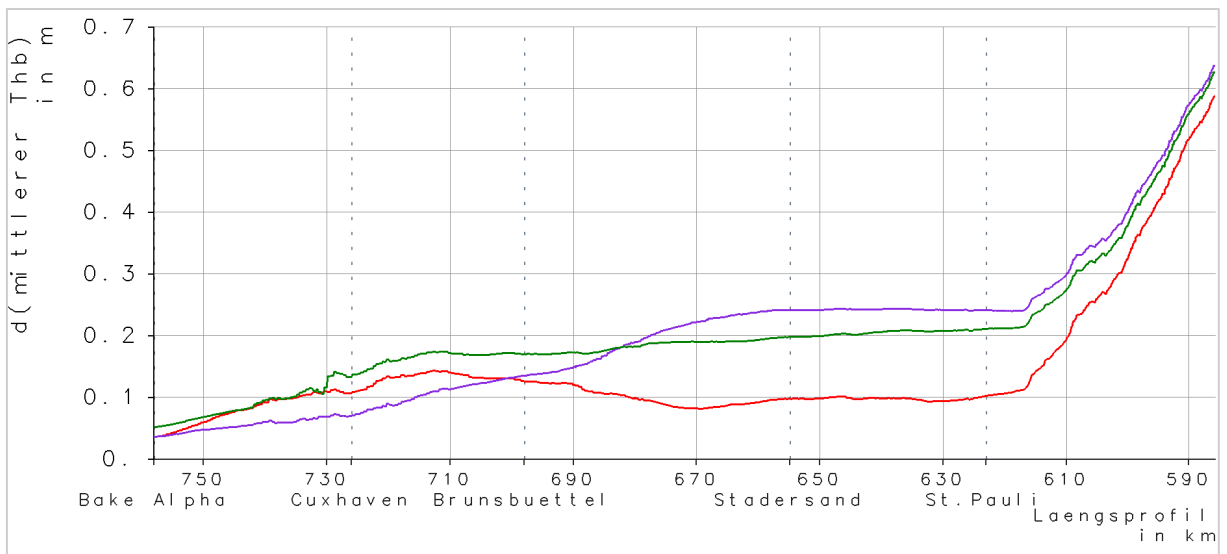


Bild 96: *Differenzen MThb bei SN2013 entlang der Elbe in Fahrrinnenmitte: f110-ref (rot), w55e-ref (dunkelgrün), w110e-ref (lila)*

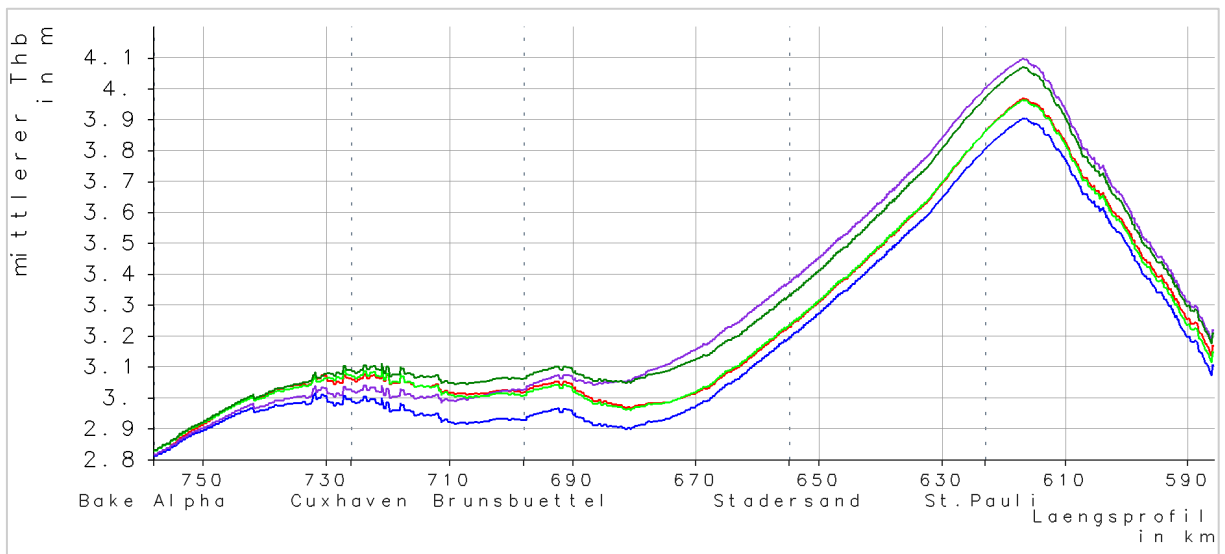


Bild 97: *MThb bei SN2013 entlang der Elbe in Fahrrinnenmitte: f110 (rot), w55 (grün), w55e (dunkelgrün), w110 (blau), w110e (lila)*

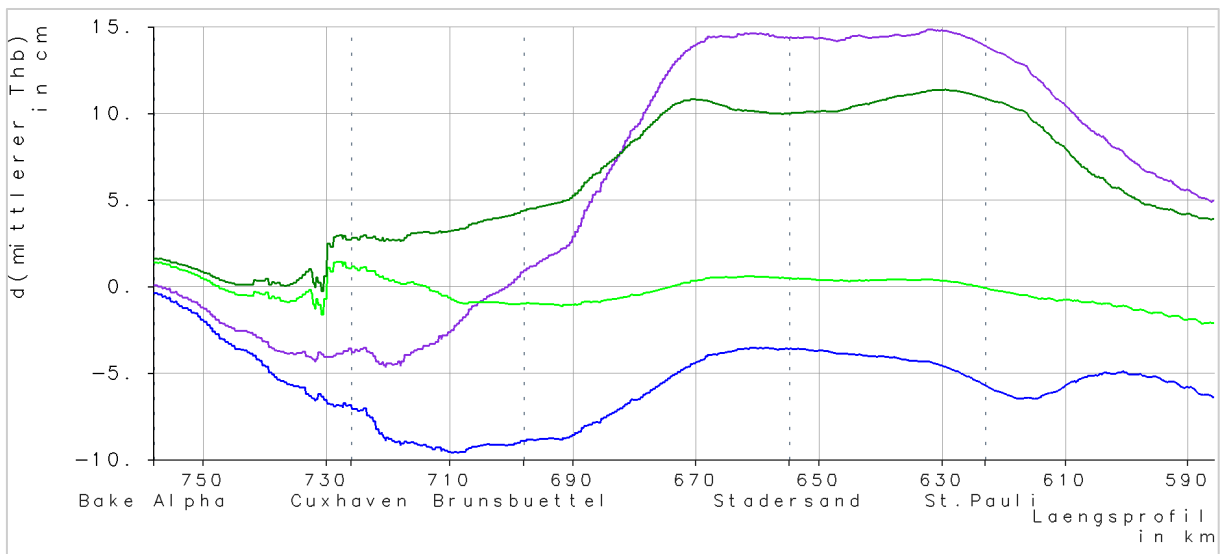


Bild 98: *Differenzen MThb bei SN2013 entlang der Elbe in Fahrrinnenmitte: w55-f110 (grün), w55e-f110 (dunkelgrün), w110-f110(blau), w110e-f110 (lila)*

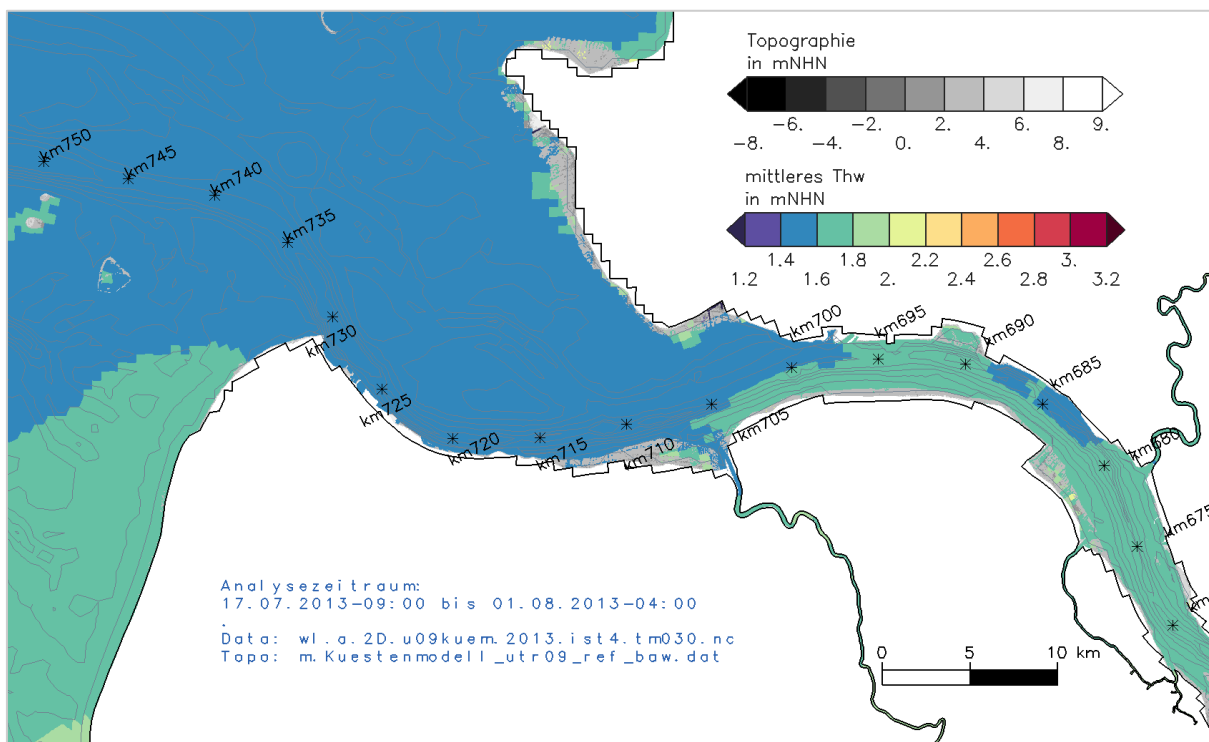


Bild 99: MThw bei SN2013 in der Elbmündung: ref

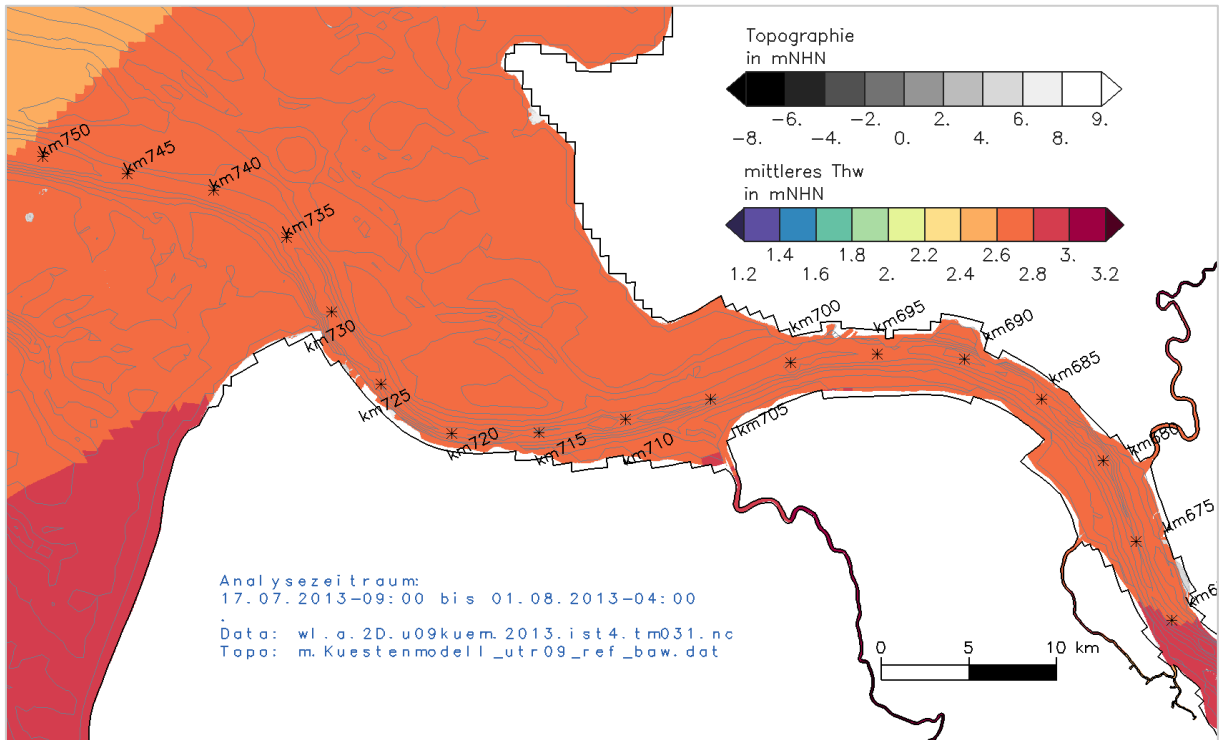


Bild 100: MThw bei SN2013 in der Elbmündung: f110

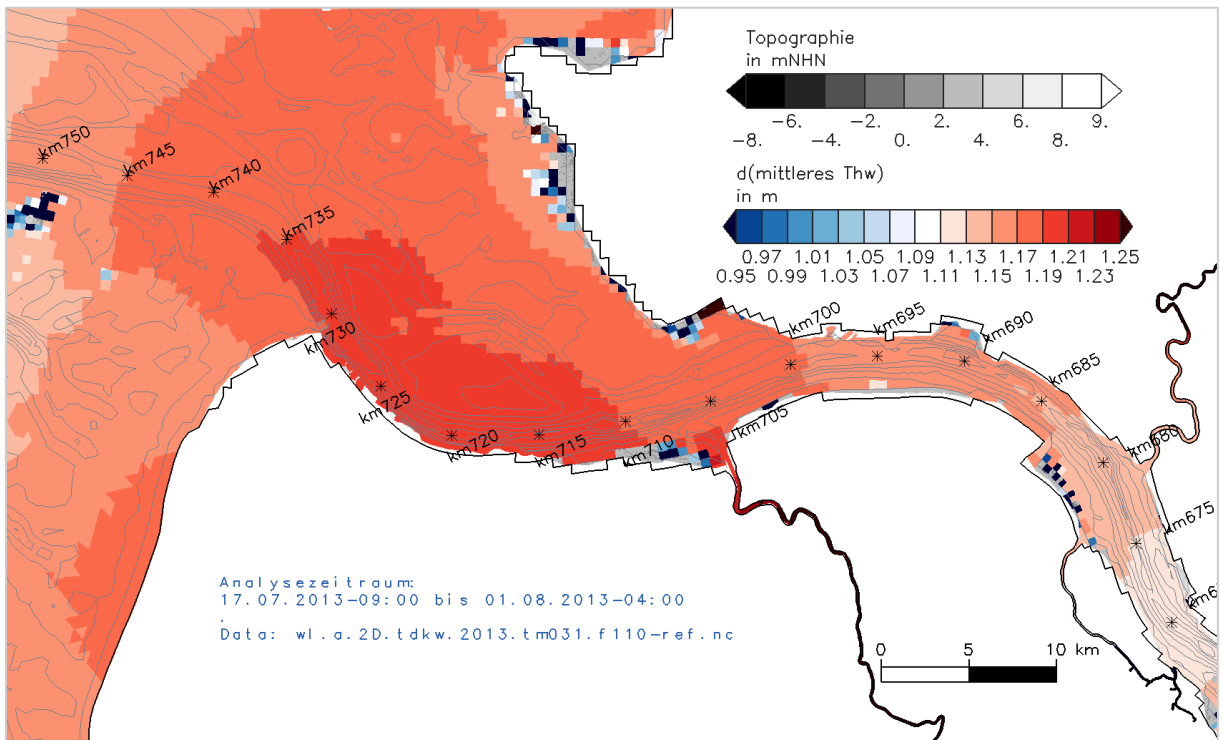


Bild 101: Differenz MThw bei SN2013 in der Elbmündung: f110-ref

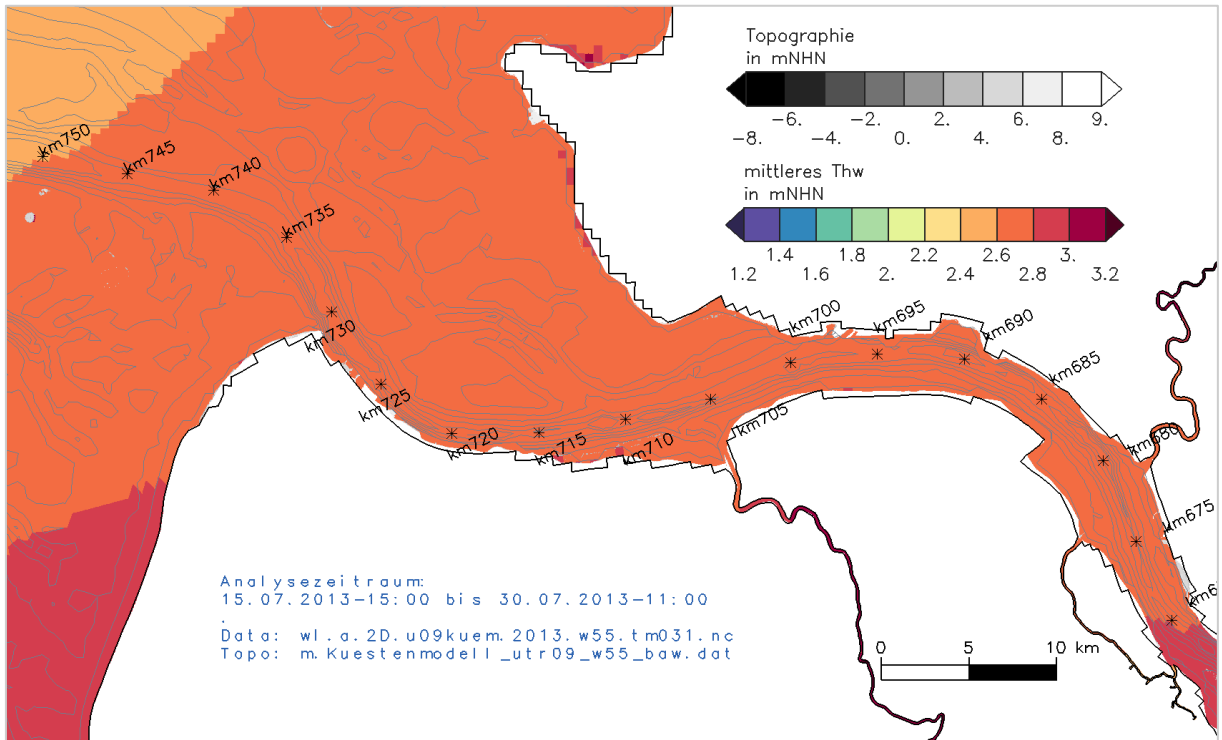


Bild 102: MThw bei SN2013 in der Elbmündung: w55

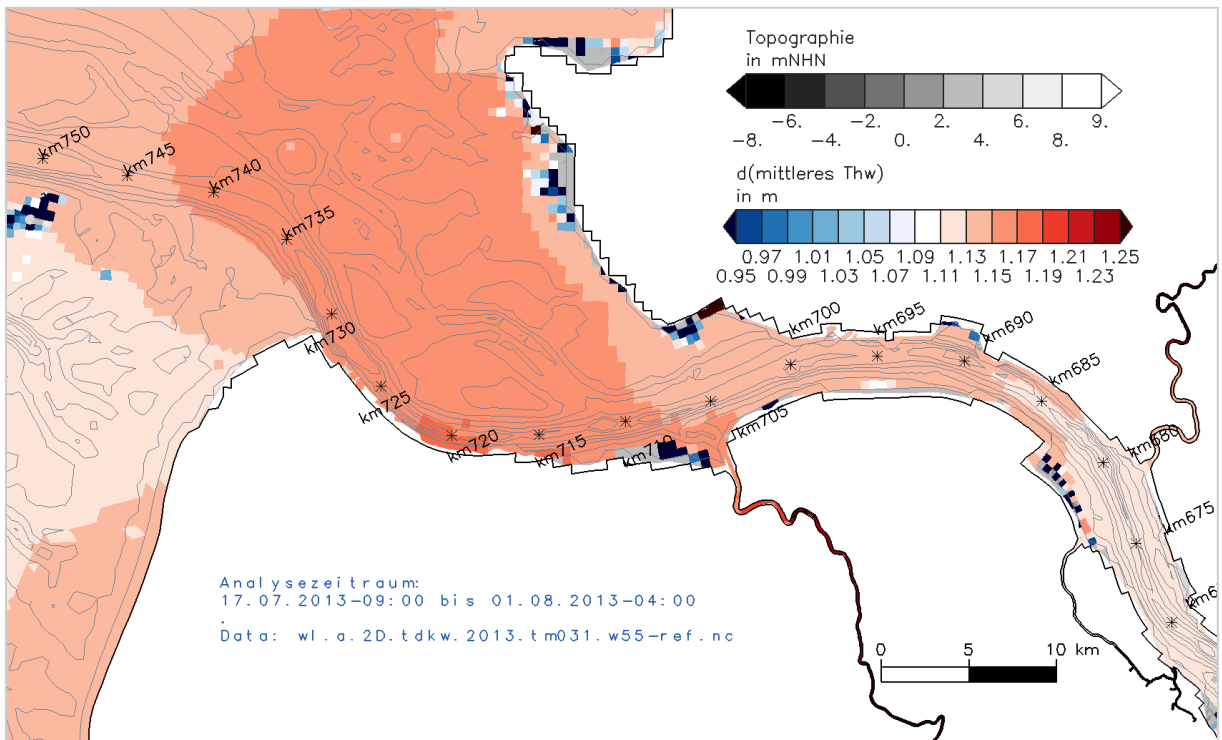


Bild 103: Differenz MThw bei SN2013 in der Elbmündung: w55-ref

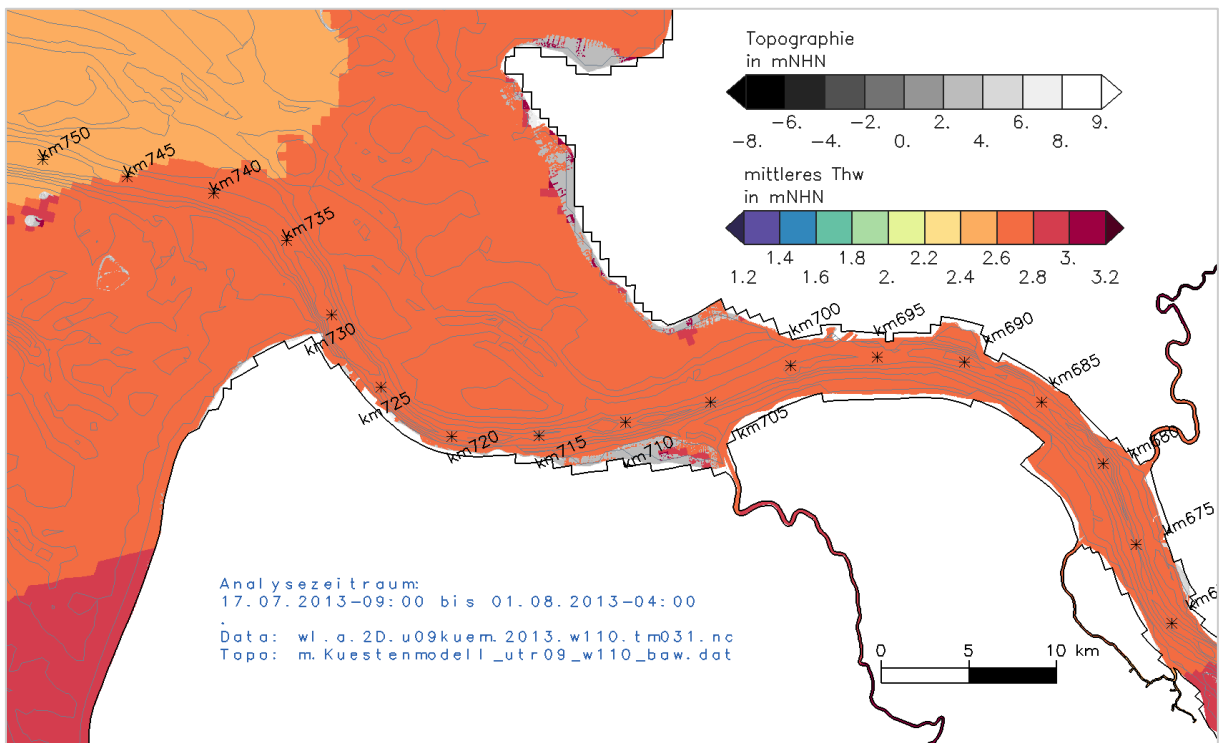


Bild 104: MThw bei SN2013 in der Elbmündung: w110

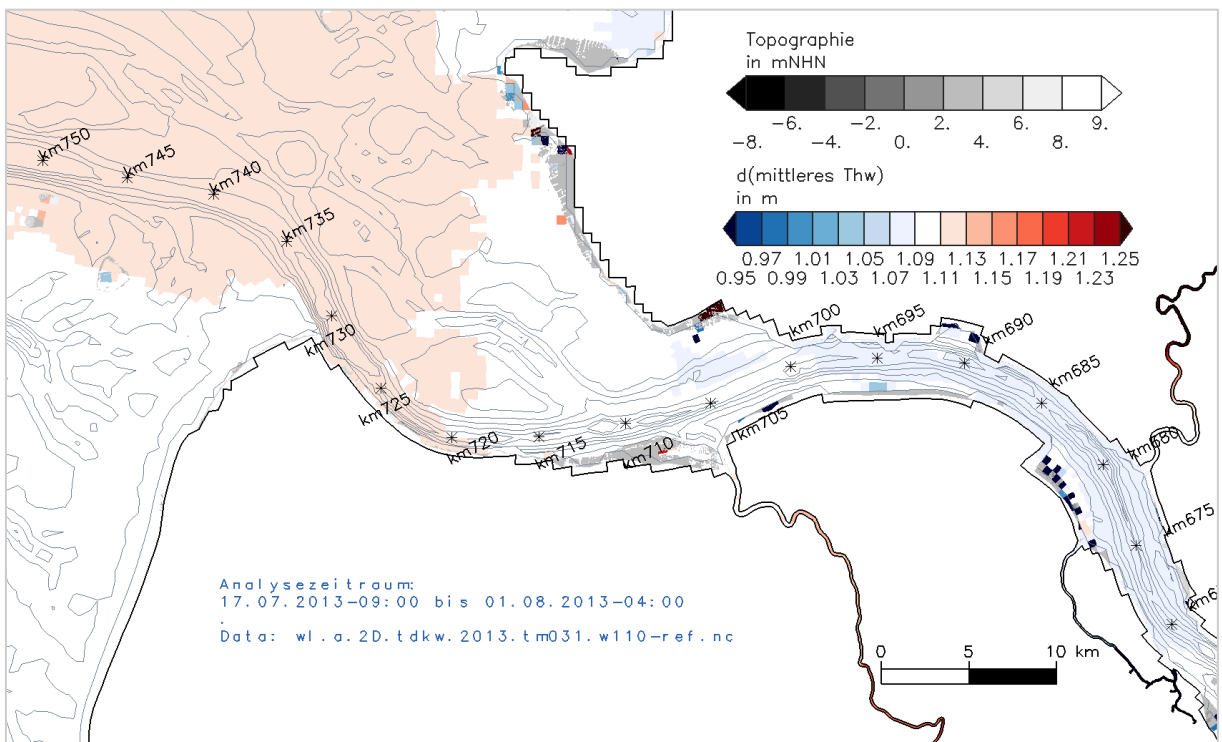


Bild 105: Differenz MThw bei SN2013 in der Elbmündung: w110-ref

3.3.2 SF2013

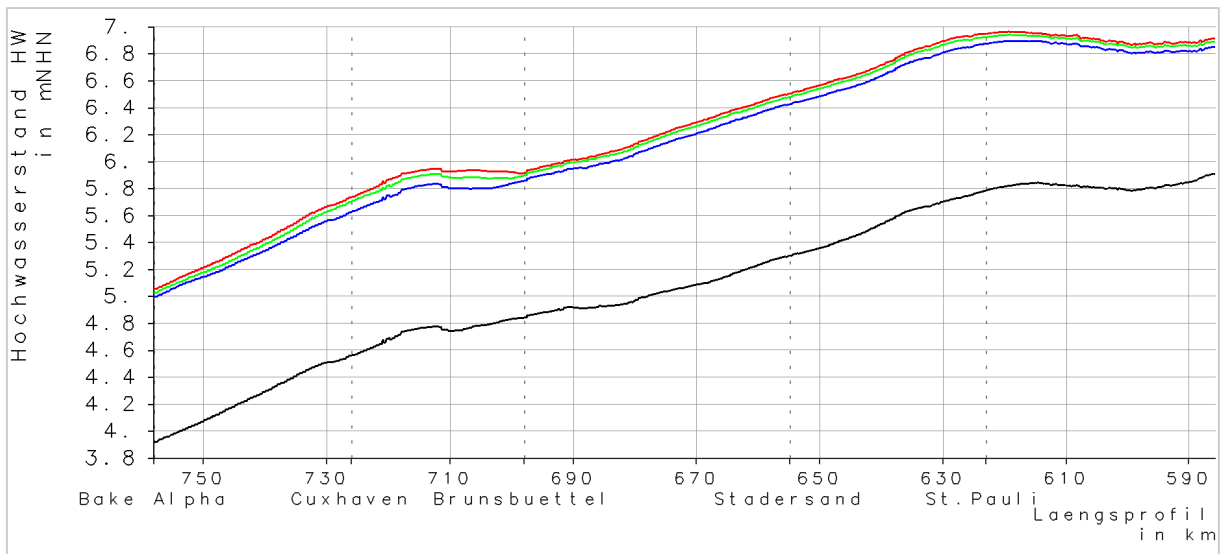


Bild 106: HW bei SF2013 entlang der Elbe in Fahrrinnenmitte: ref (schwarz), f110 (rot), w55 (grün), w110 (blau)

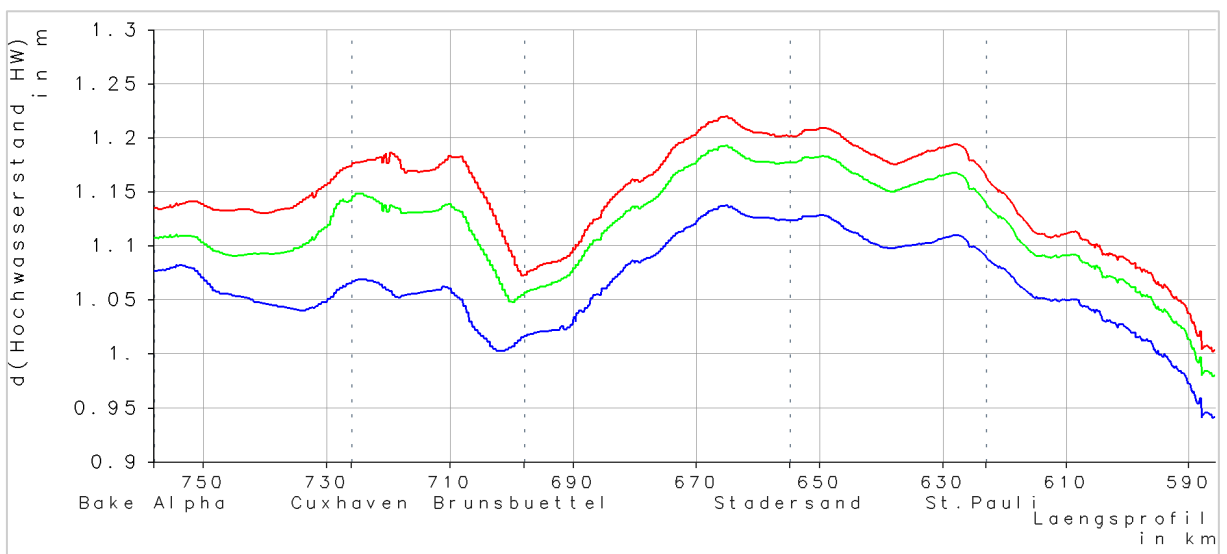


Bild 107: Differenzen HW bei SF2013 entlang der Elbe in Fahrrinnenmitte: f110-ref (rot), w55-ref (grün), w110-ref (blau)

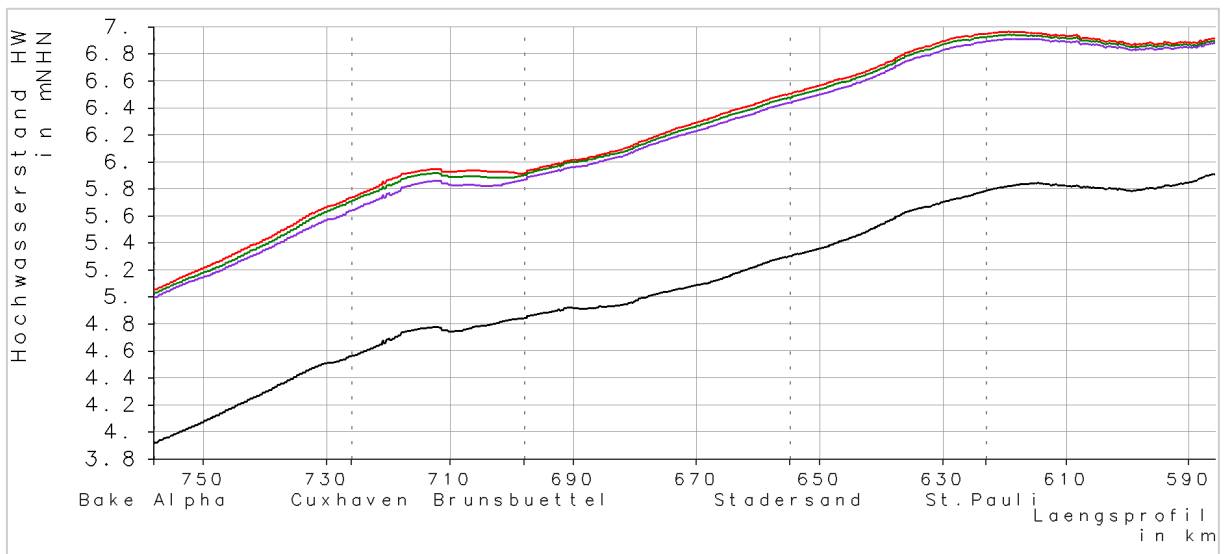


Bild 108: HW bei SF2013 entlang der Elbe in Fahrrinnenmitte: ref (schwarz), f110 (rot), w55e (dunkelgrün), w110e (lila)

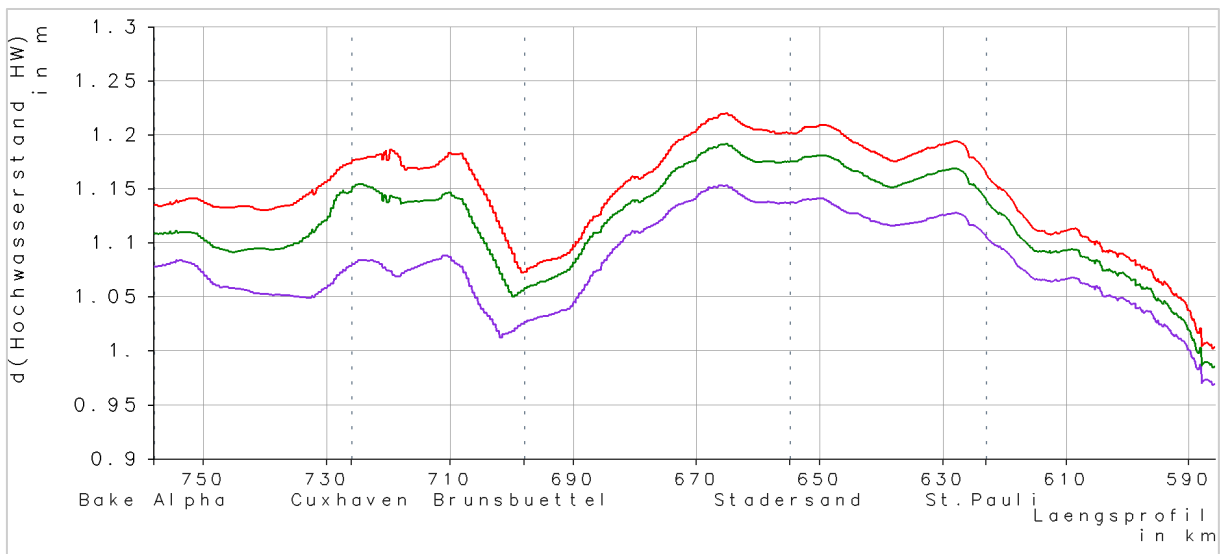


Bild 109: Differenzen HW bei SF2013 entlang der Elbe in Fahrrinnenmitte: f110-ref (rot), w55e-ref (dunkelgrün), w110e-ref (lila)

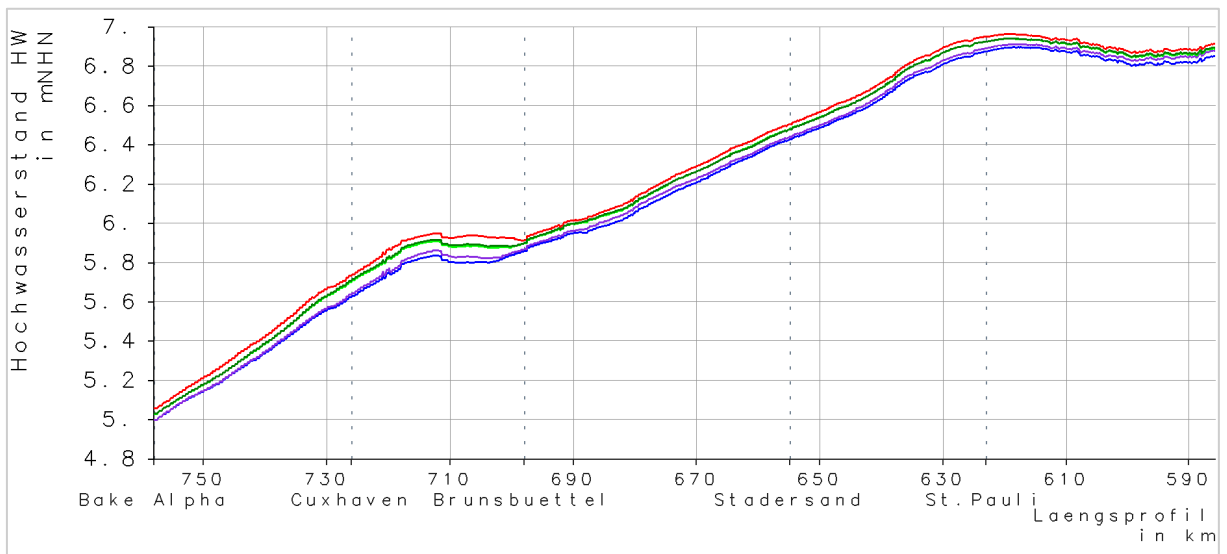


Bild 110: HW bei SF2013 entlang der Elbe in Fahrrinnenmitte: f110 (rot), w55 (grün), w55e (dunkelgrün), w110 (blau), w110e (lila)

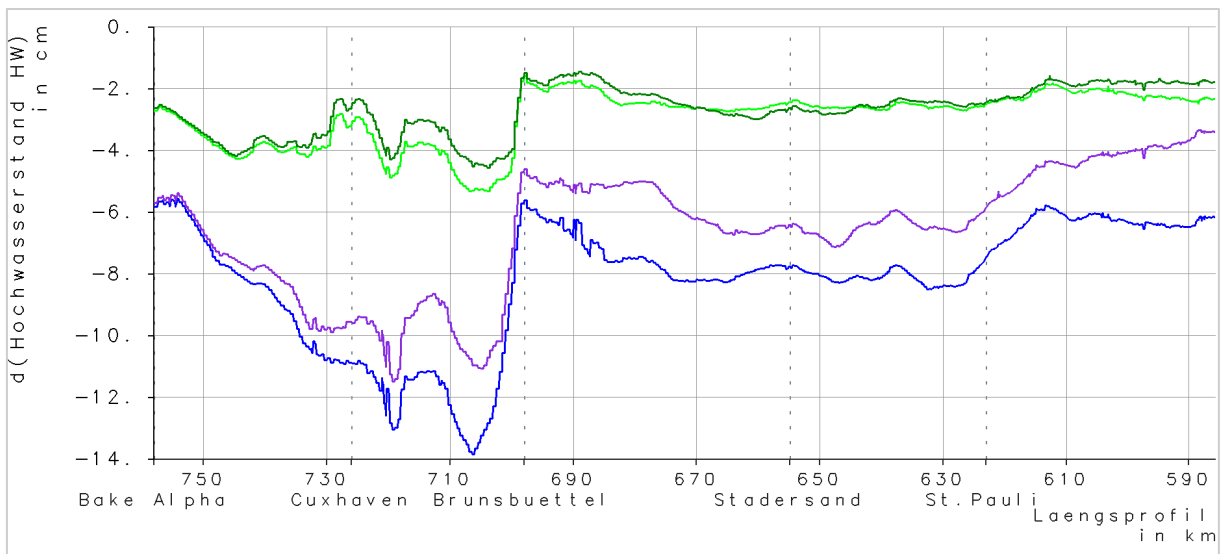


Bild 111: Differenzen HW bei SF2013 entlang der Elbe in Fahrrinnenmitte: w55-f110 (grün), w55e-f110 (dunkelgrün), w110-f110(blau), w110e-f110 (lila)

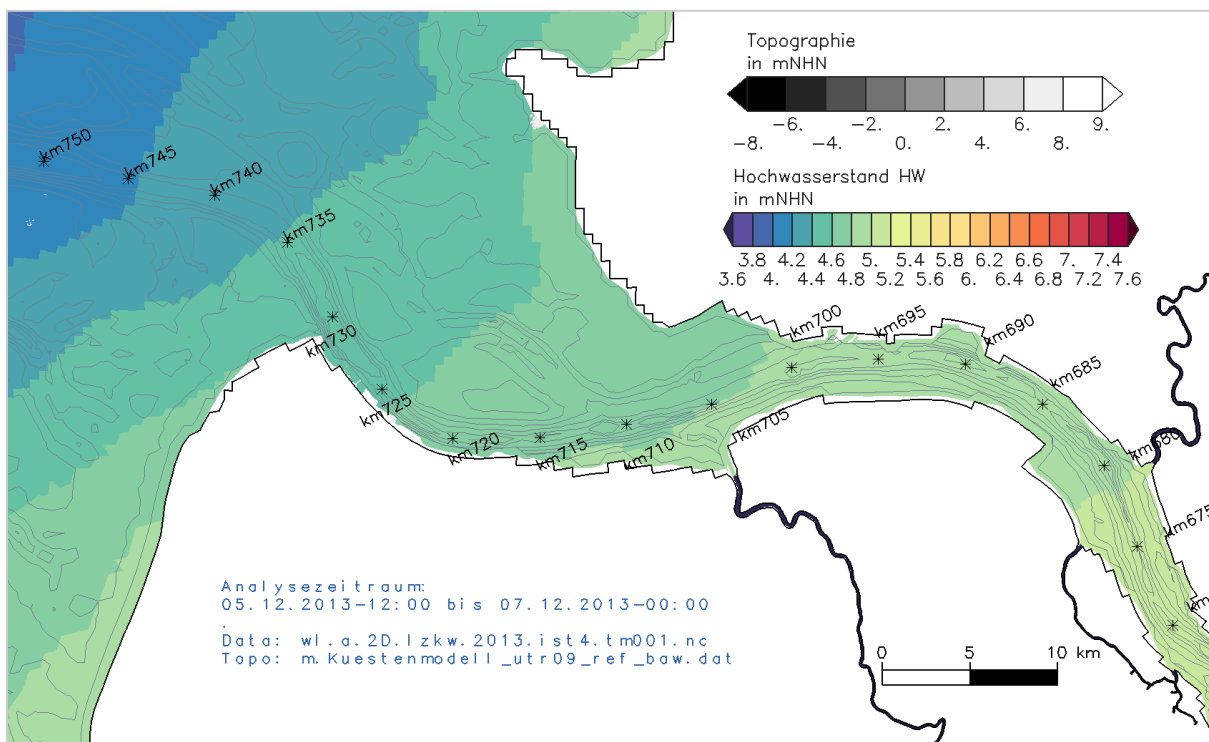


Bild 112: HW bei SF2013 in der Elbmündung; ref

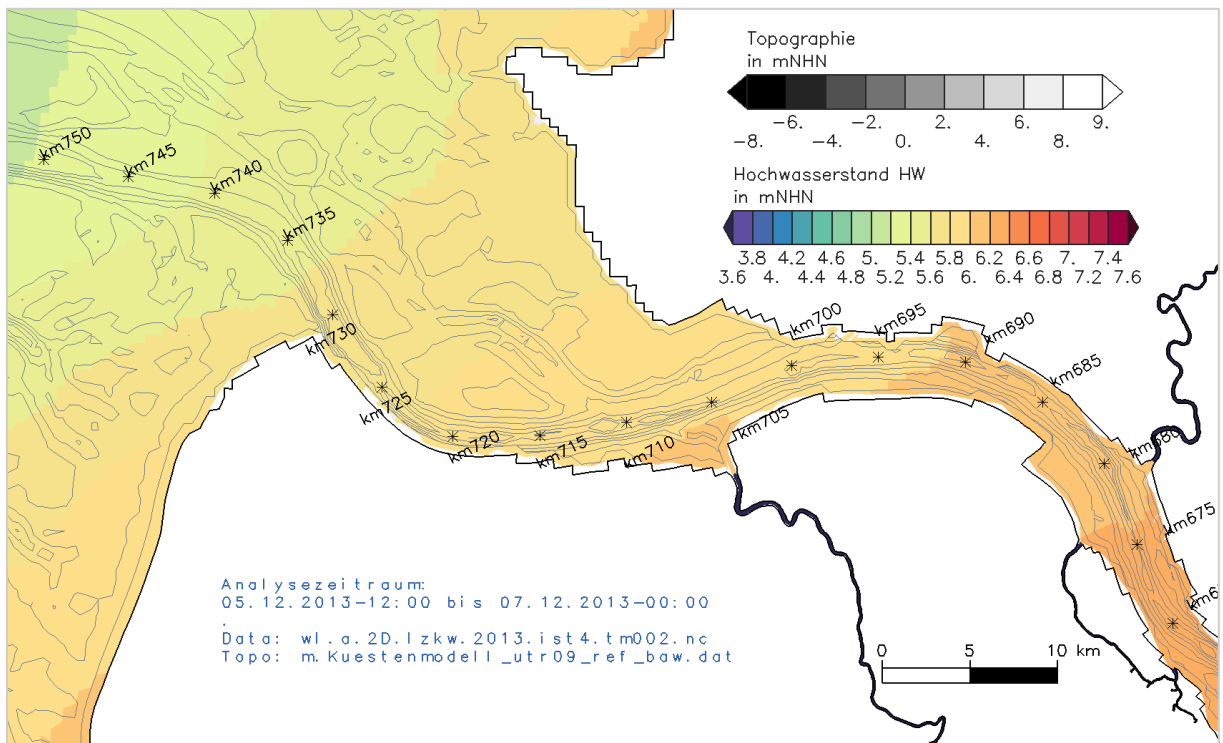


Bild 113: HW bei SF2013 in der Elbmündung: f110

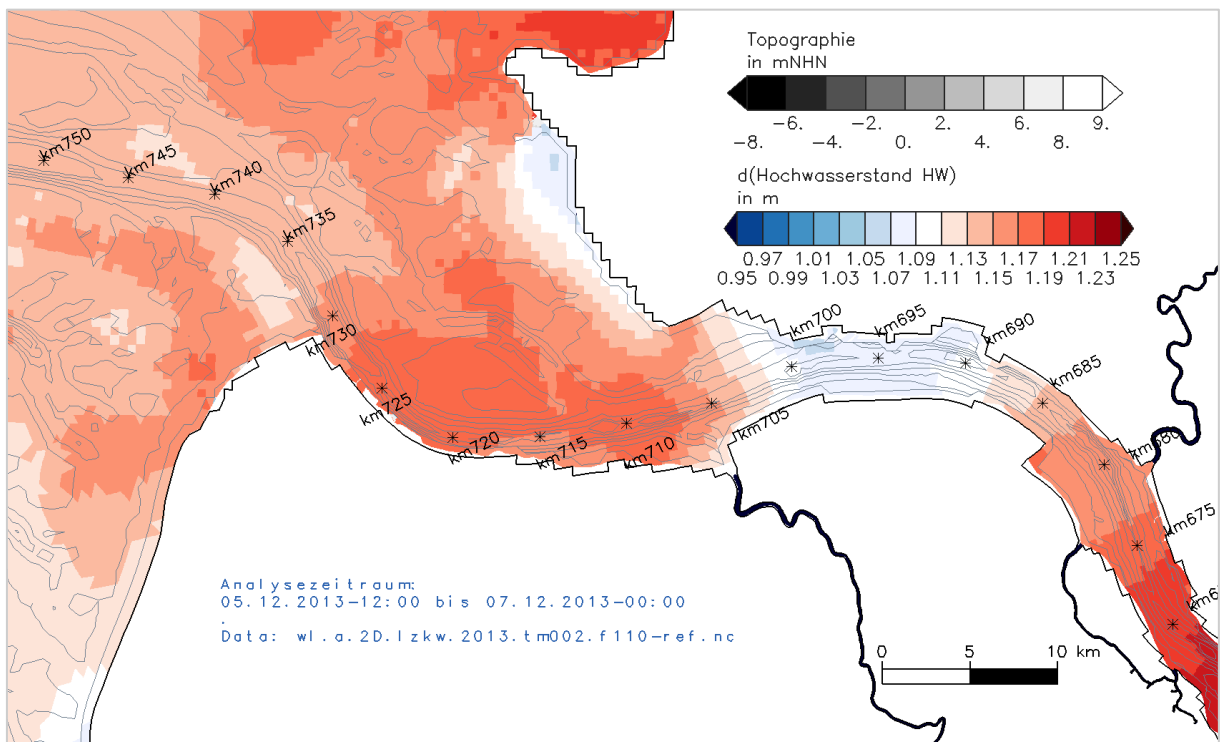


Bild 114: Differenz HW bei SF2013 in der Elbmündung: f110-ref

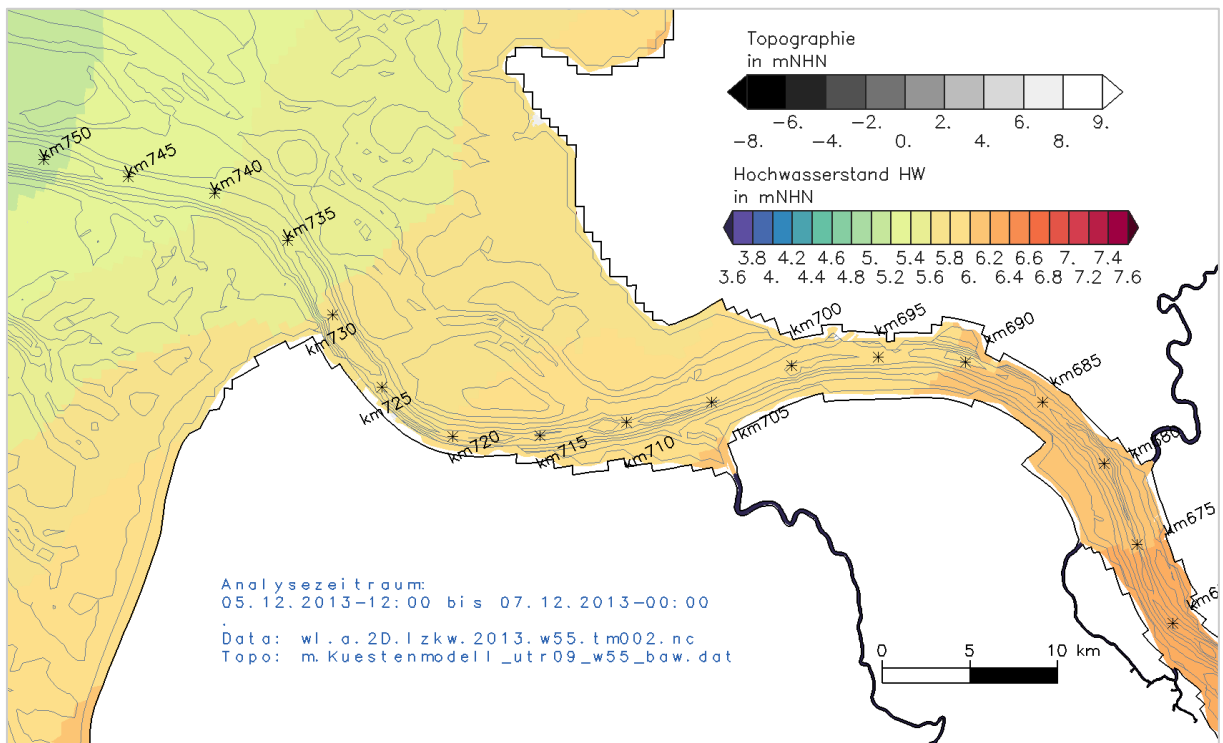


Bild 115: HW bei SF2013 in der Elbmündung: w55

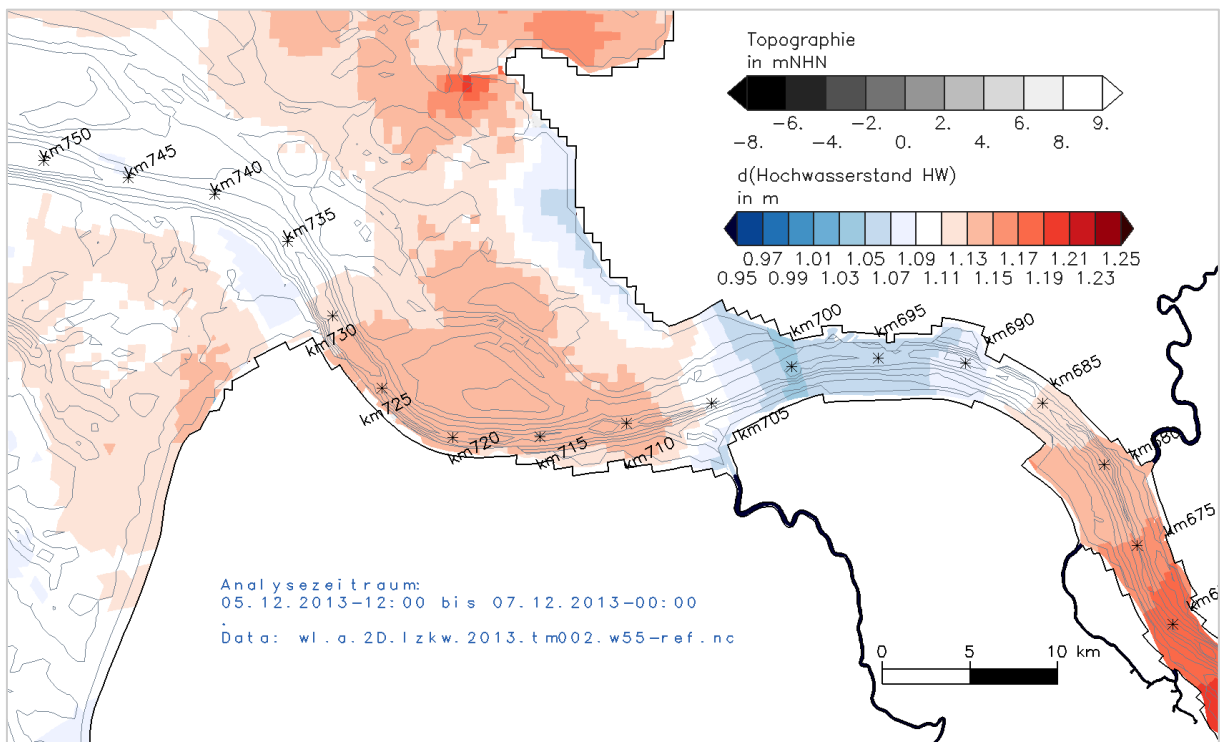


Bild 116: Differenz HW bei SF2013 in der Elbmündung: w55-ref

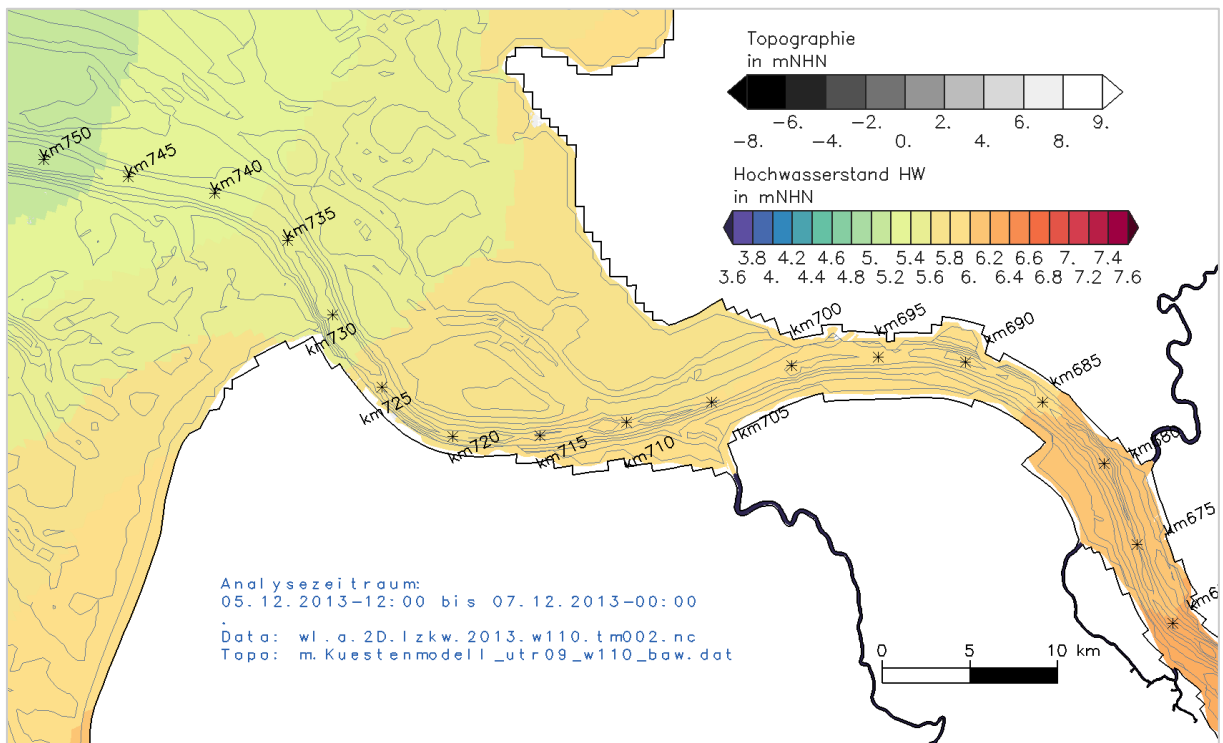


Bild 117: HW bei SF2013 in der Elbmündung: w110

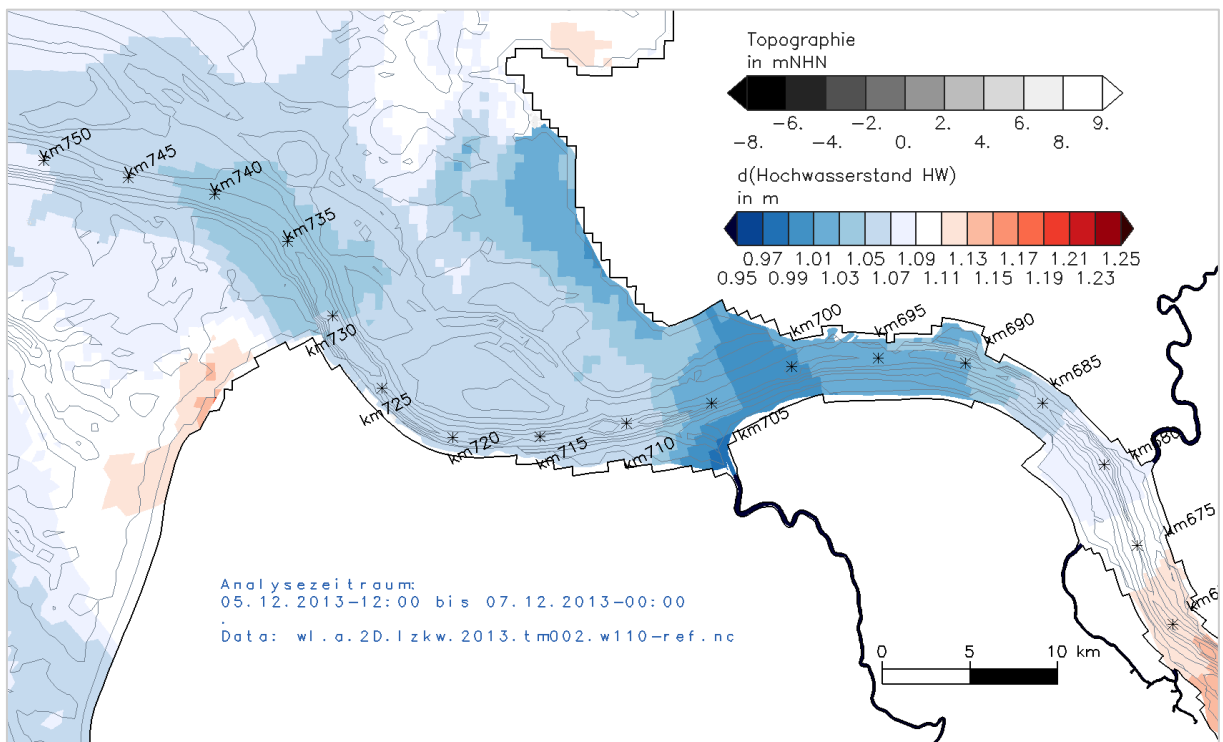


Bild 118: Differenz HW bei SF2013 in der Elbmündung: w110-ref

3.3.3 SFEH

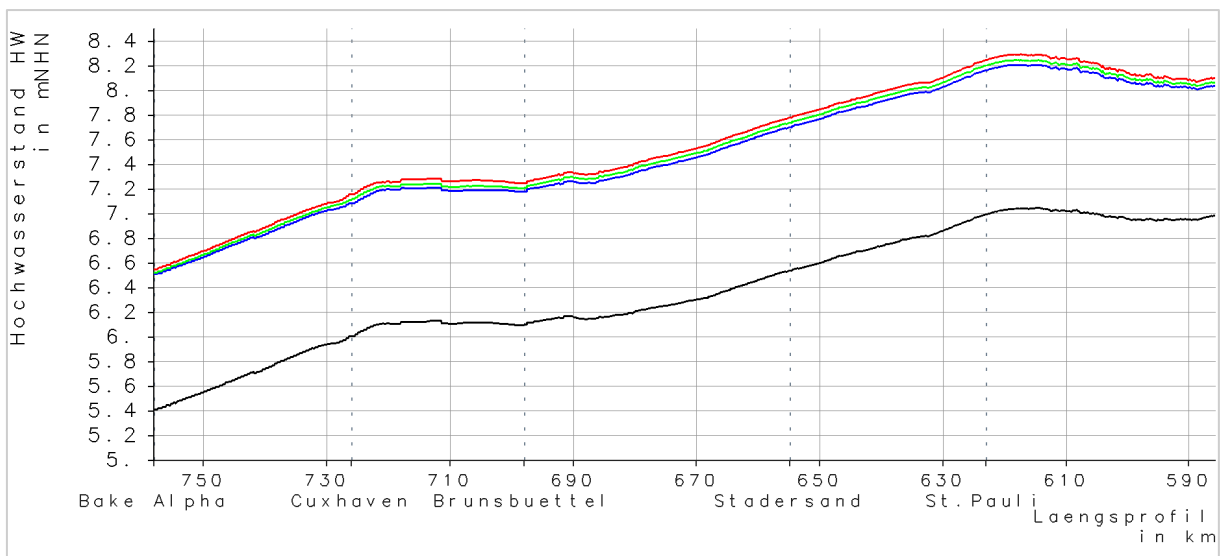


Bild 119: HW bei SFEH entlang der Elbe in Fahrrinnenmitte: ref (schwarz), f110 (rot), w55 (grün), w110 (blau)

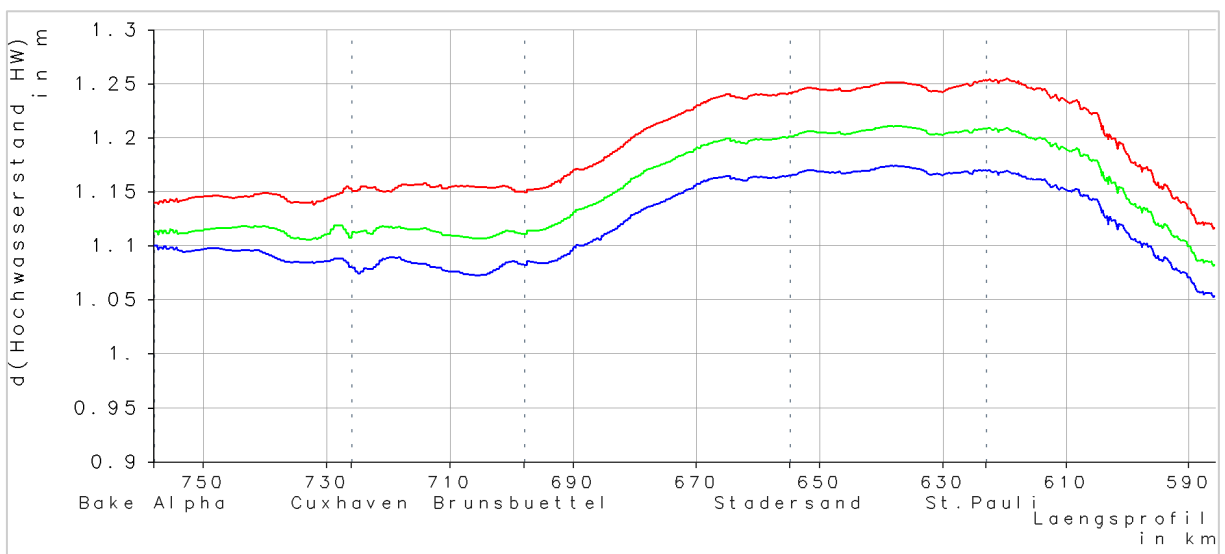


Bild 120: Differenzen HW bei SFEH entlang der Elbe in Fahrrinnenmitte: f110-ref (rot), w55-ref (grün), w110-ref (blau)

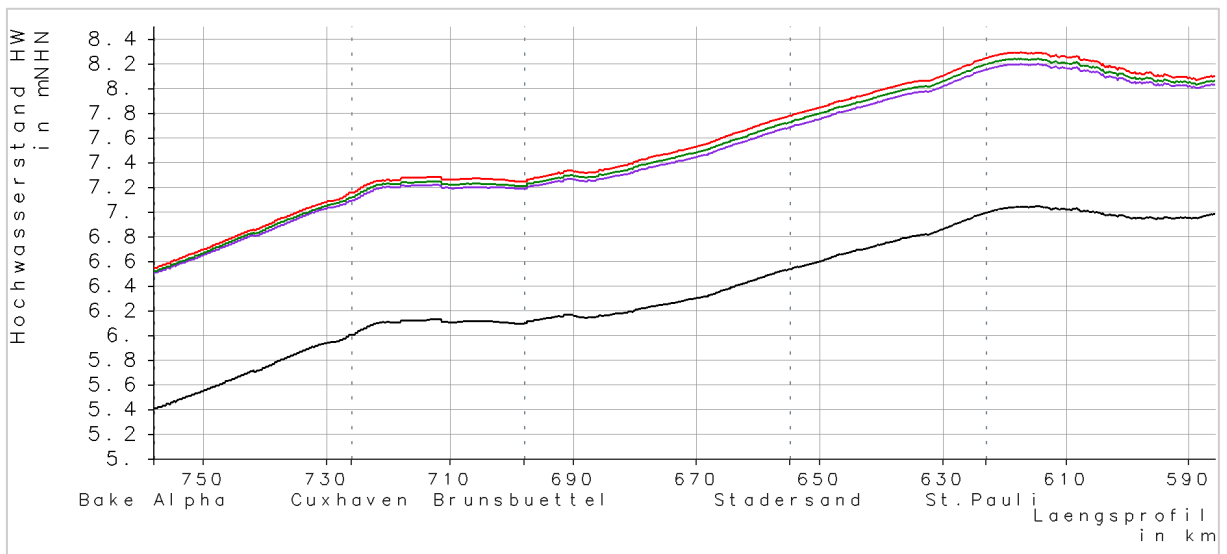


Bild 121: HW bei SFEH entlang der Elbe in Fahrrinnenmitte: ref (schwarz), f110 (rot), w55e (dunkelgrün), w110e (lila)

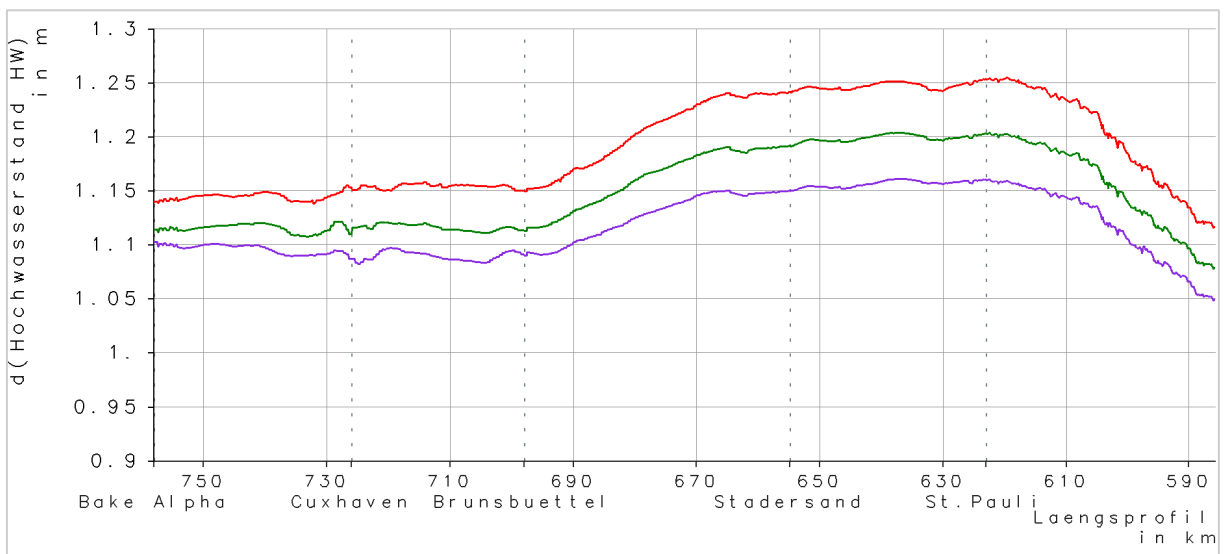


Bild 122: Differenzen HW bei SFEH entlang der Elbe in Fahrrinnenmitte: f110-ref (rot), w55e-ref (dunkelgrün), w110e-ref (lila)

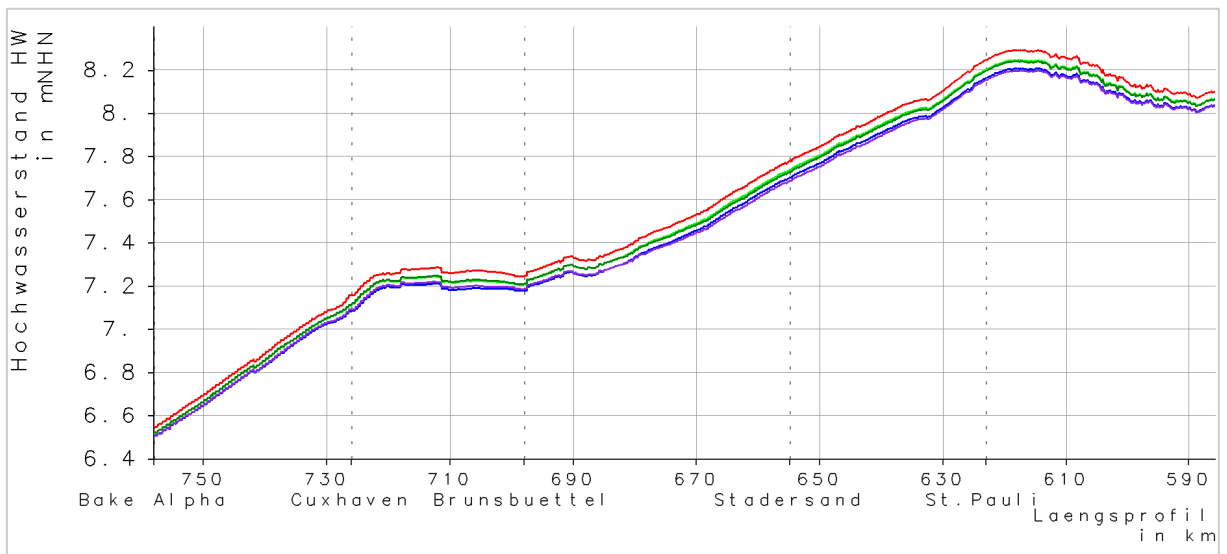


Bild 123: HW bei SFEH entlang der Elbe in Fahrrinnenmitte: f110 (rot), w55 (grün), w55e (dunkelgrün), w110 (blau), w110e (lila)

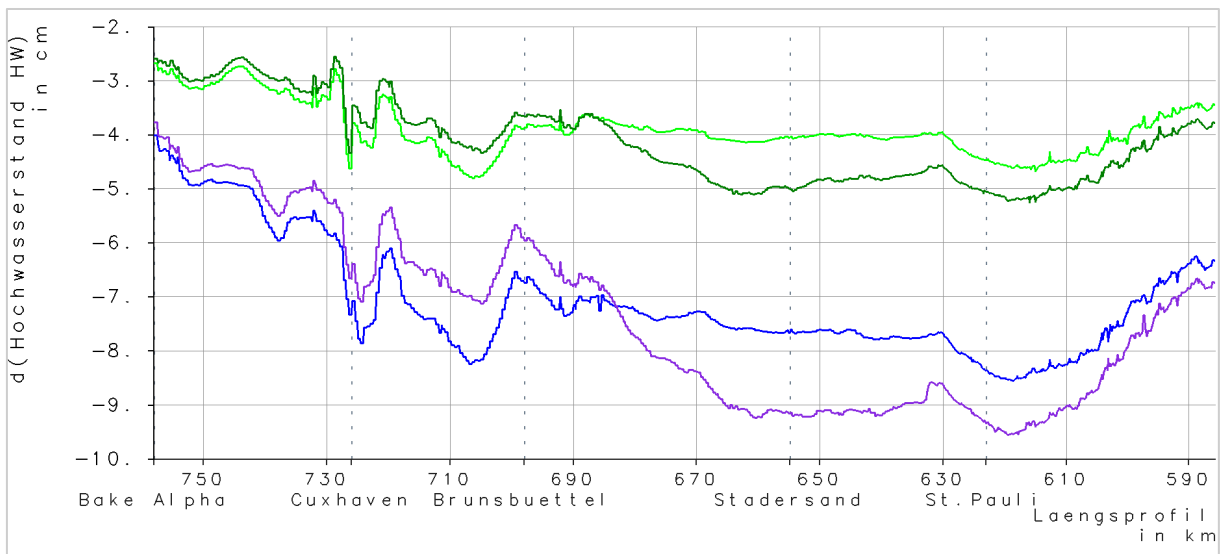


Bild 124: Differenzen HW bei SFEH entlang der Elbe in Fahrrinnenmitte: w55-f110 (grün), w55e-f110 (dunkelgrün), w110-f110(blau), w110e-f110 (lila)

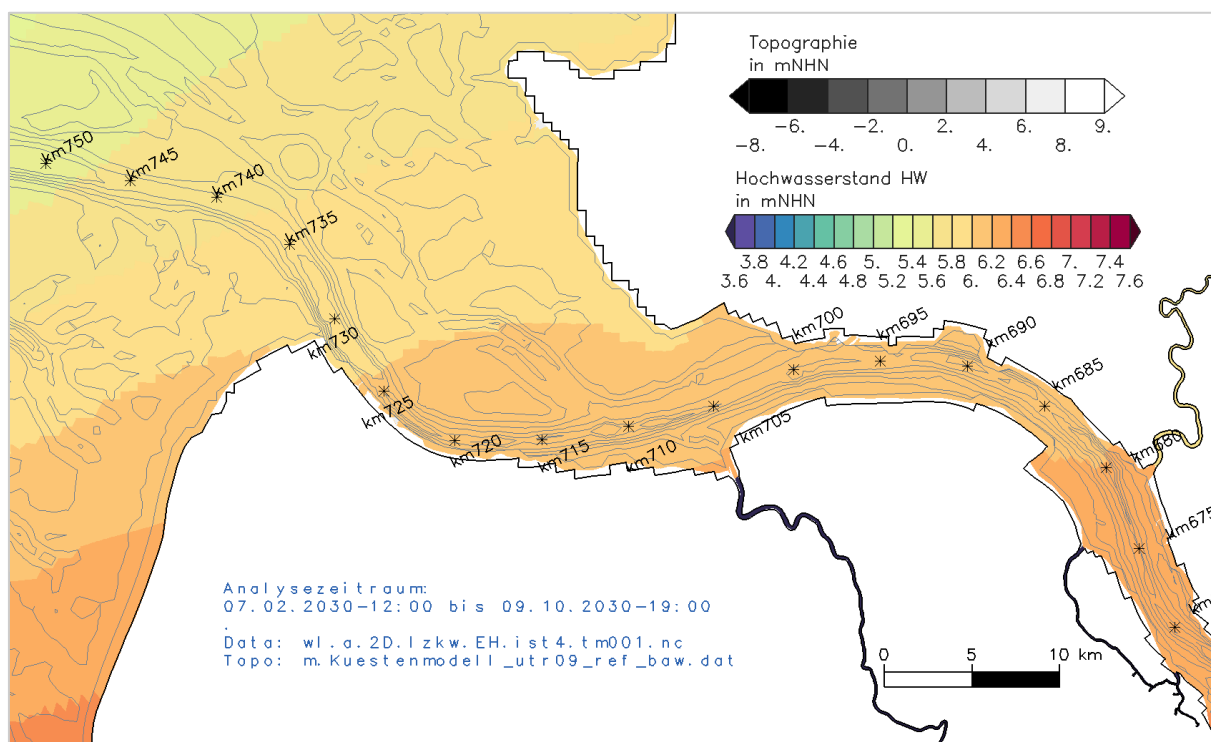


Bild 125: HW bei SFEH in der Elbmündung: ref

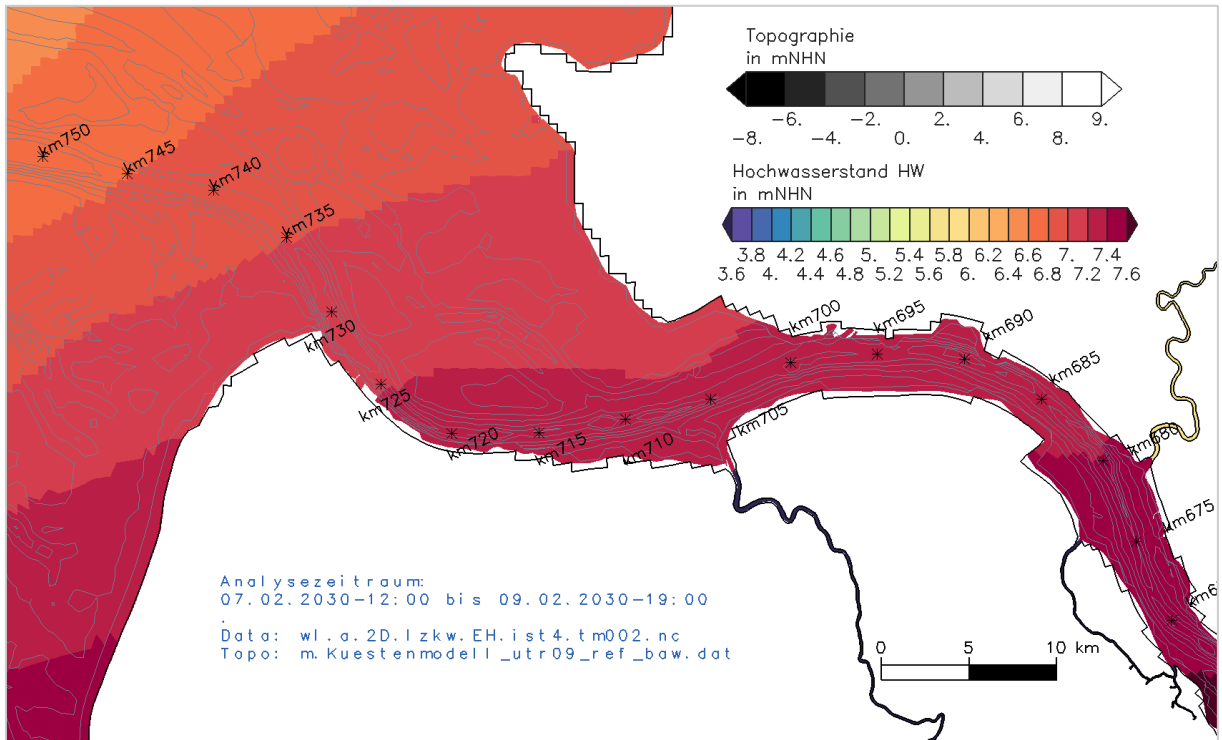


Bild 126: HW bei SFEH in der Elbmündung: f110

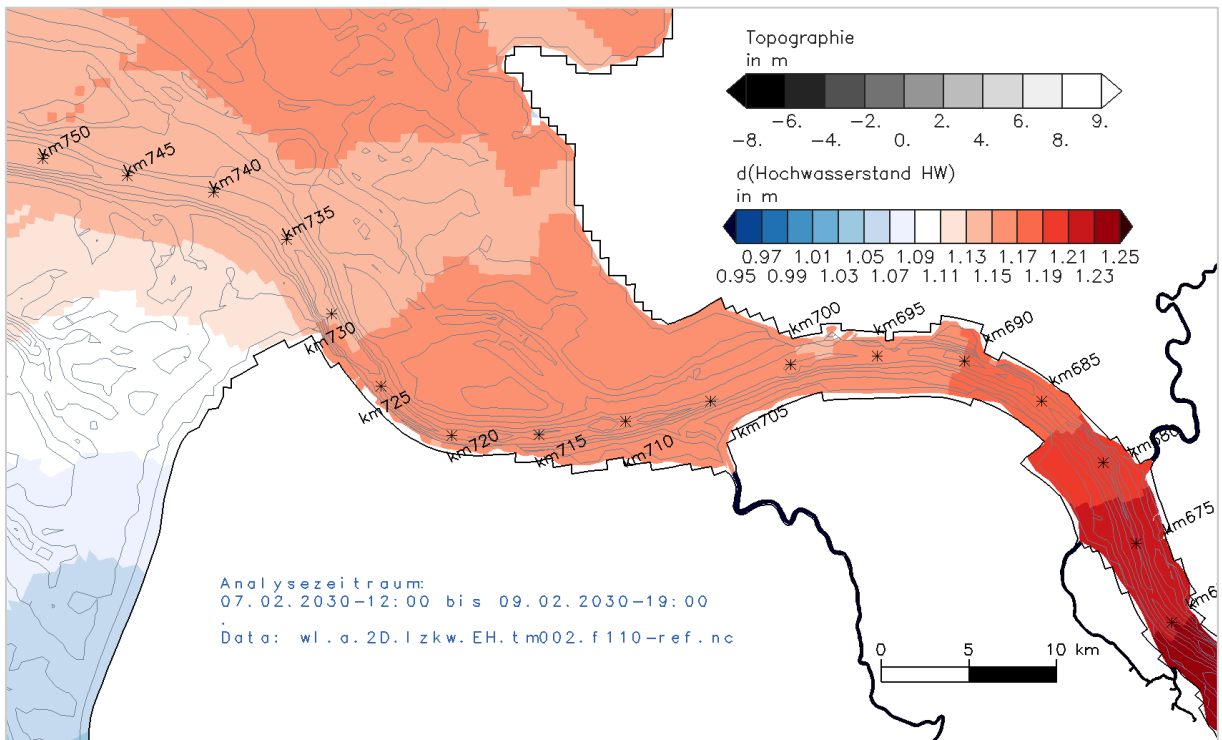


Bild 127: Differenz HW bei SF2013 in der Elbmündung: f110-ref

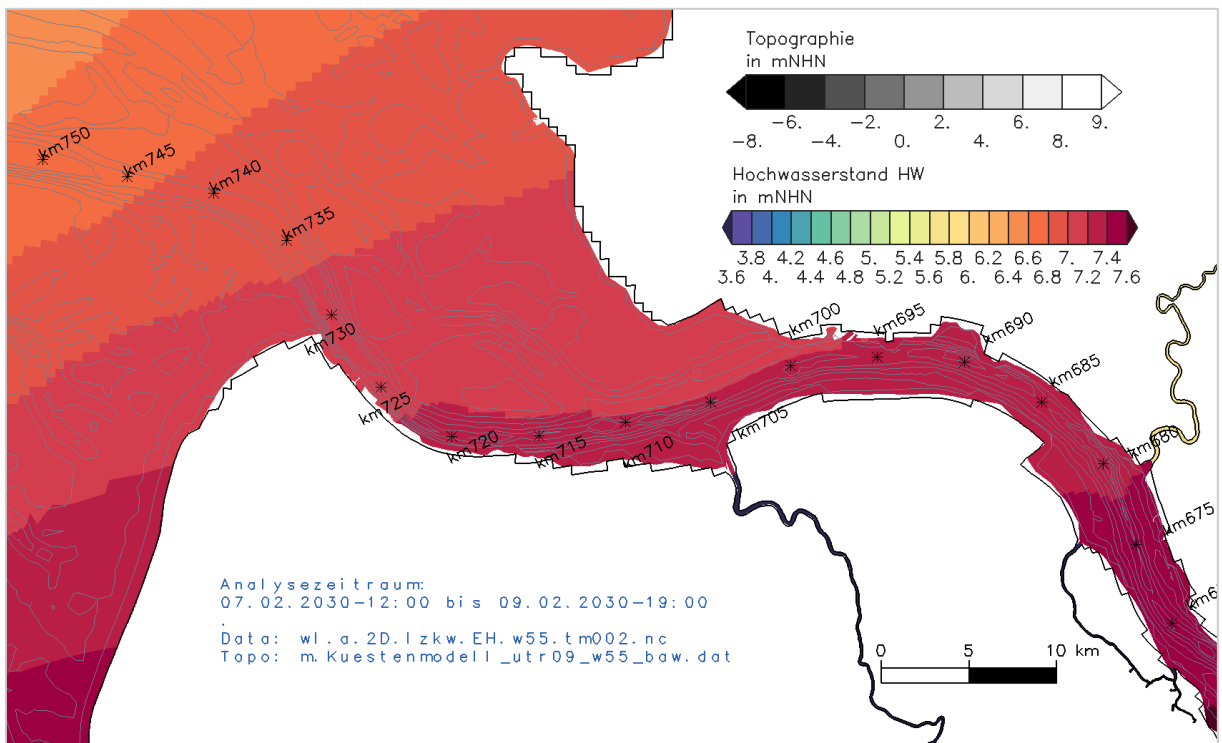


Bild 128: HW bei SFEH in der Elbmündung: w55

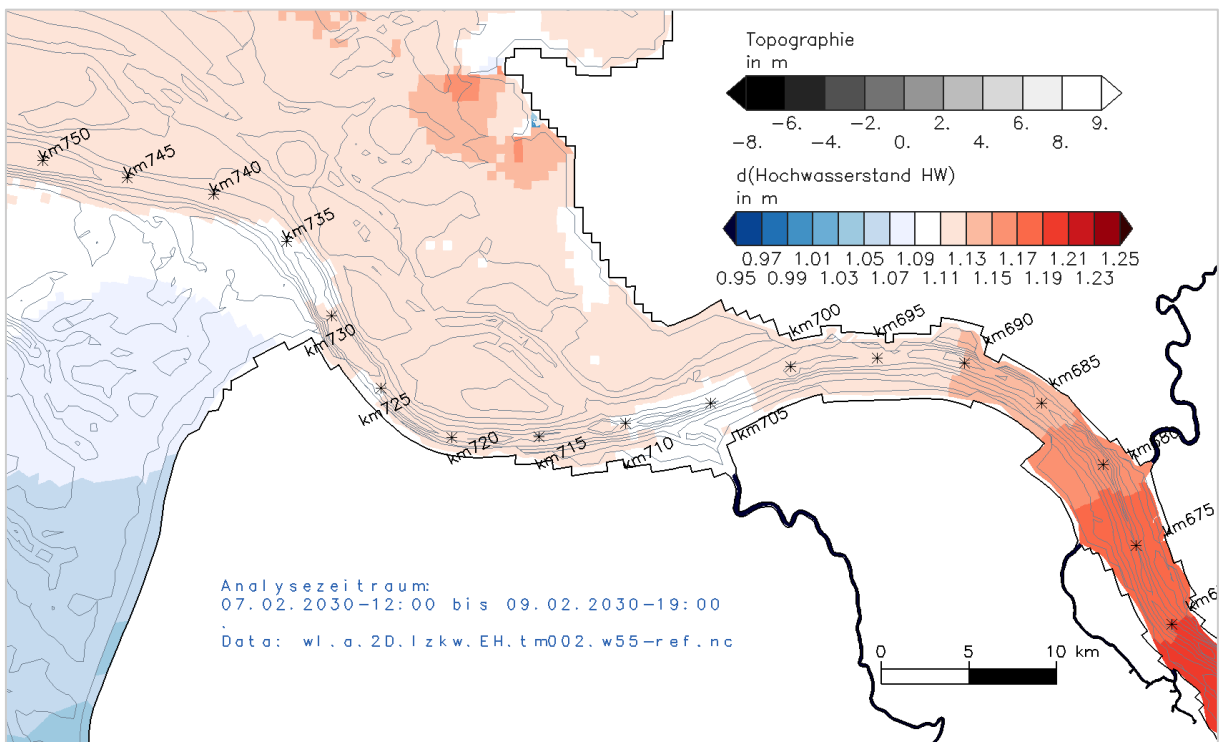


Bild 129: Differenz HW bei SF2013 in der Elbmündung: w55-ref

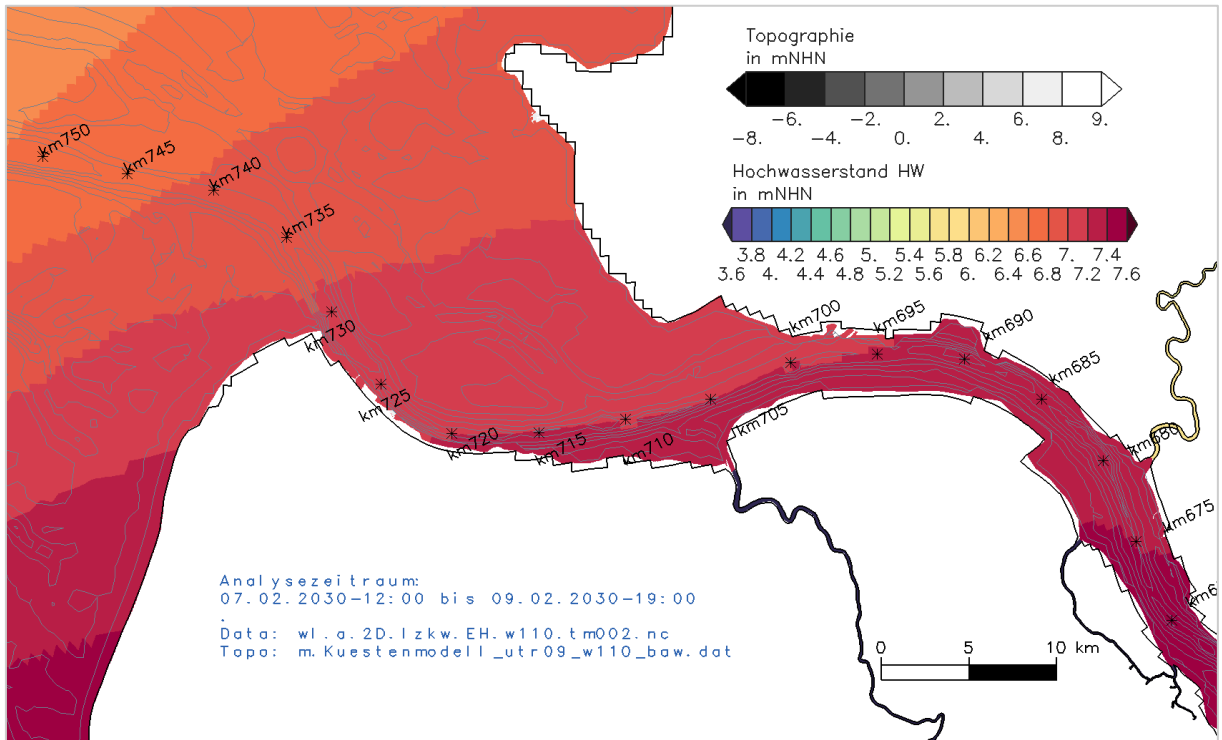


Bild 130: HW bei SFEH in der Elbmündung: w110

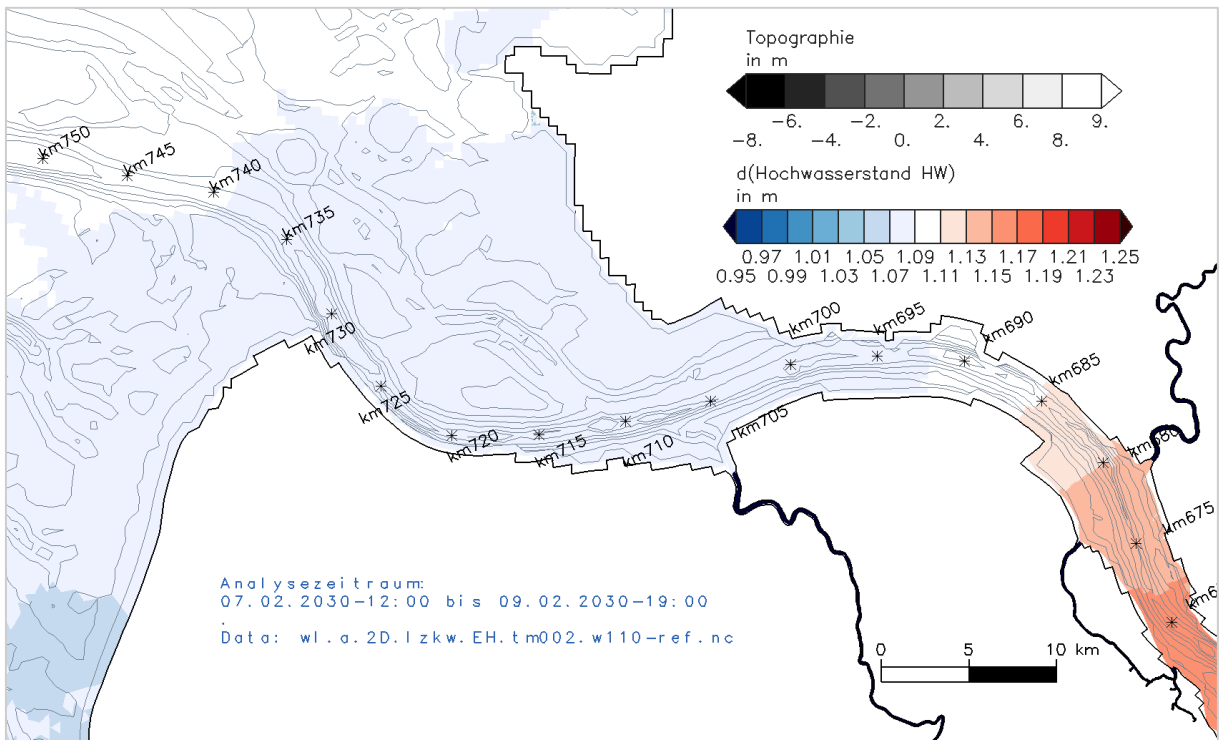


Bild 131: Differenz HW bei SF2013 in der Elbmündung: w110-ref

3.4 Strömungsgeschwindigkeiten in der Elbmündung zu ausgewählten Zeitpunkten im Referenzzustand

Die nachfolgenden Abbildungen zeigen die tiefengemittelte Strömungsgeschwindigkeit und -Richtung an ausgewählten Zeitpunkten in der Elbmündung. So soll insbesondere der Unterschied im Strömungsverlauf zwischen den Sturmfluten und den mittleren Tiden verdeutlicht werden. Die ausgewählten Zeitpunkte sind in den Zeitreihen des Wasserstands und des Betrags der Strömungsgeschwindigkeit bei Cuxhaven (Bild 136, Bild 140 und Bild 132) markiert.

3.4.1 SN2013

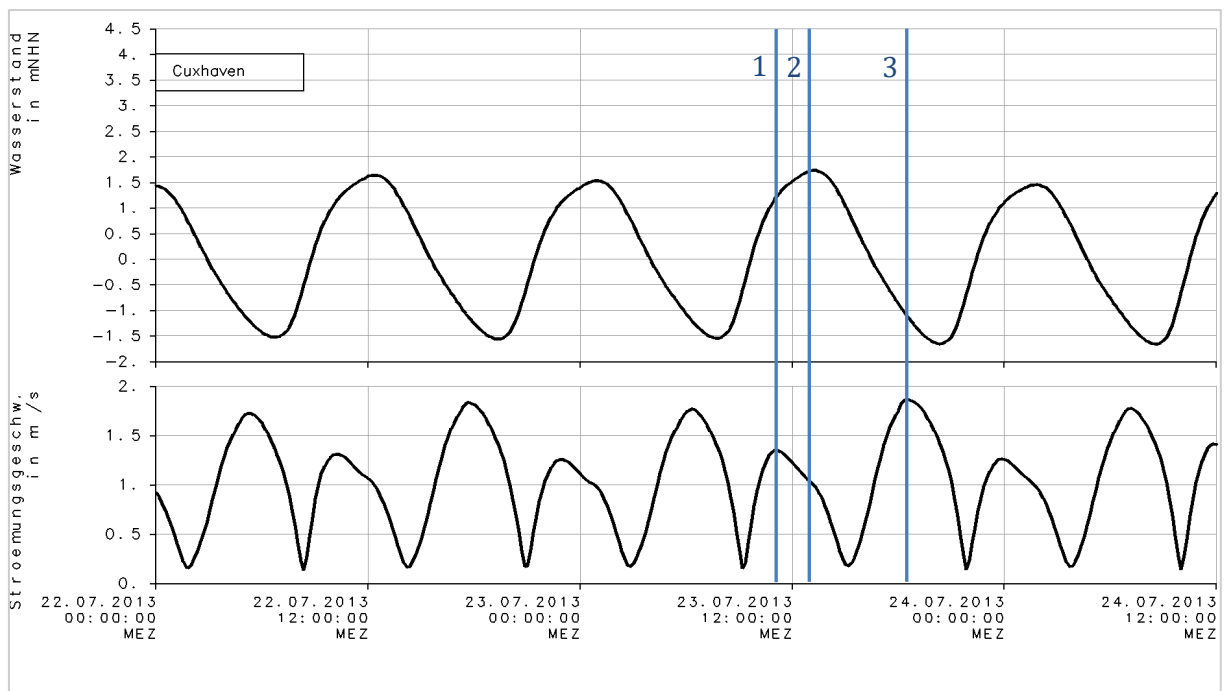


Bild 132: Zeitreihen Wasserstand und Strömungsgeschwindigkeit bei SFEH bei Cuxhaven (Elbe-km 725): ref (schwarz) mit eingezeichneten ausgewählten Zeitpunkten (blau)

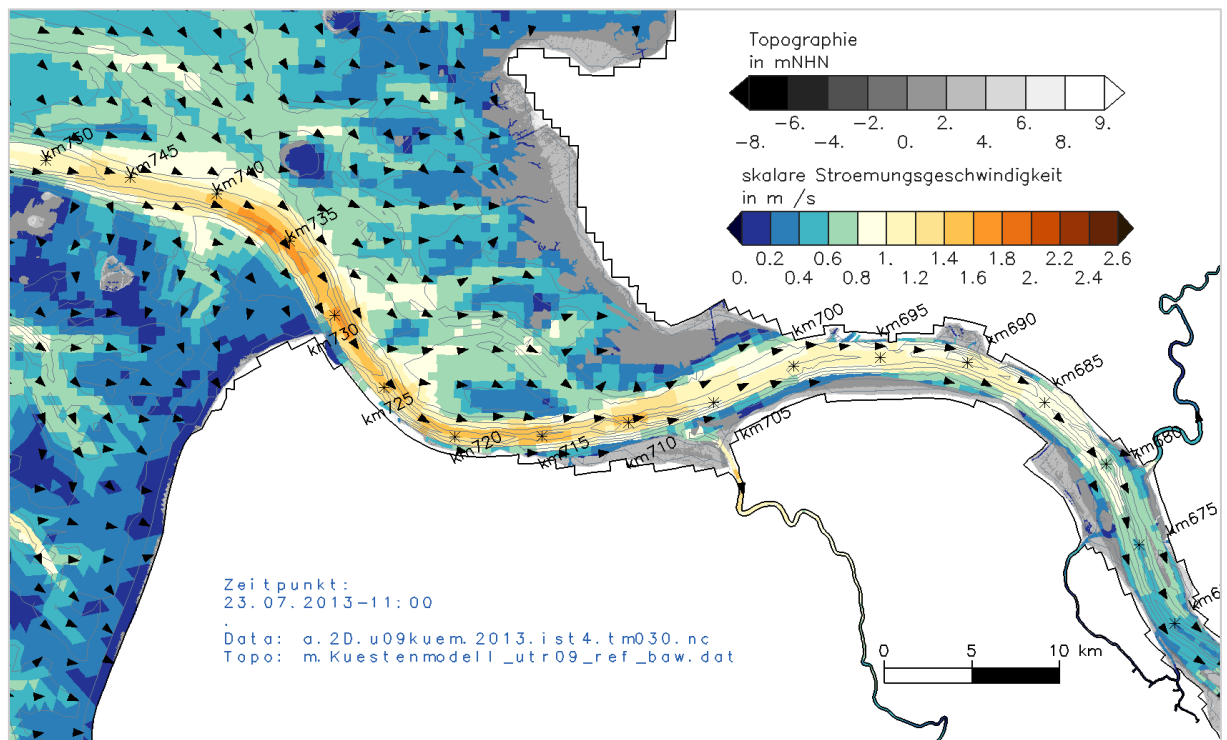


Bild 133: Tiefengemittelte Strömungsgeschwindigkeit und -richtung in der Elbmündung bei SN2013 ref an einem Zeitpunkt bei Flutstrom (Zeitpunkt 1 in Bild 132)

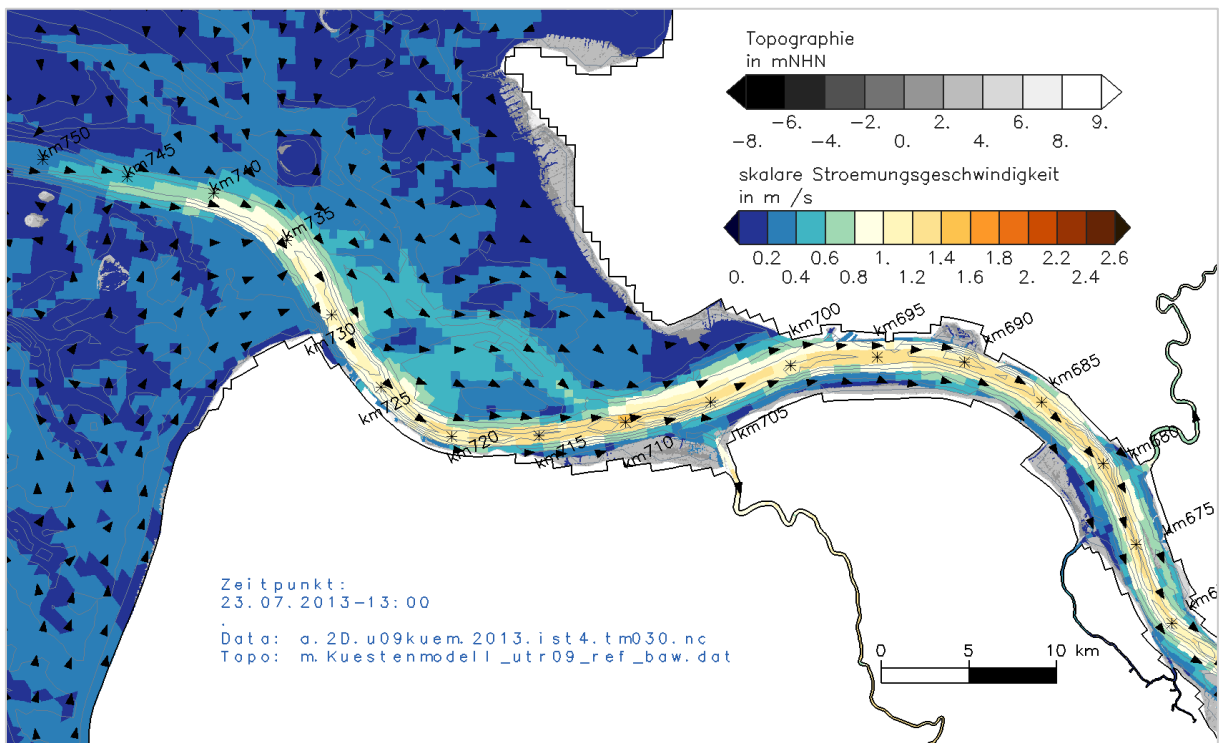


Bild 134: Tiefengemittelte Strömungsgeschwindigkeit und -richtung in der Elbmündung bei SN2013 ref an einem Zeitpunkt bei Flutstrom nahe Thw (Zeitpunkt 2 in Bild 132)

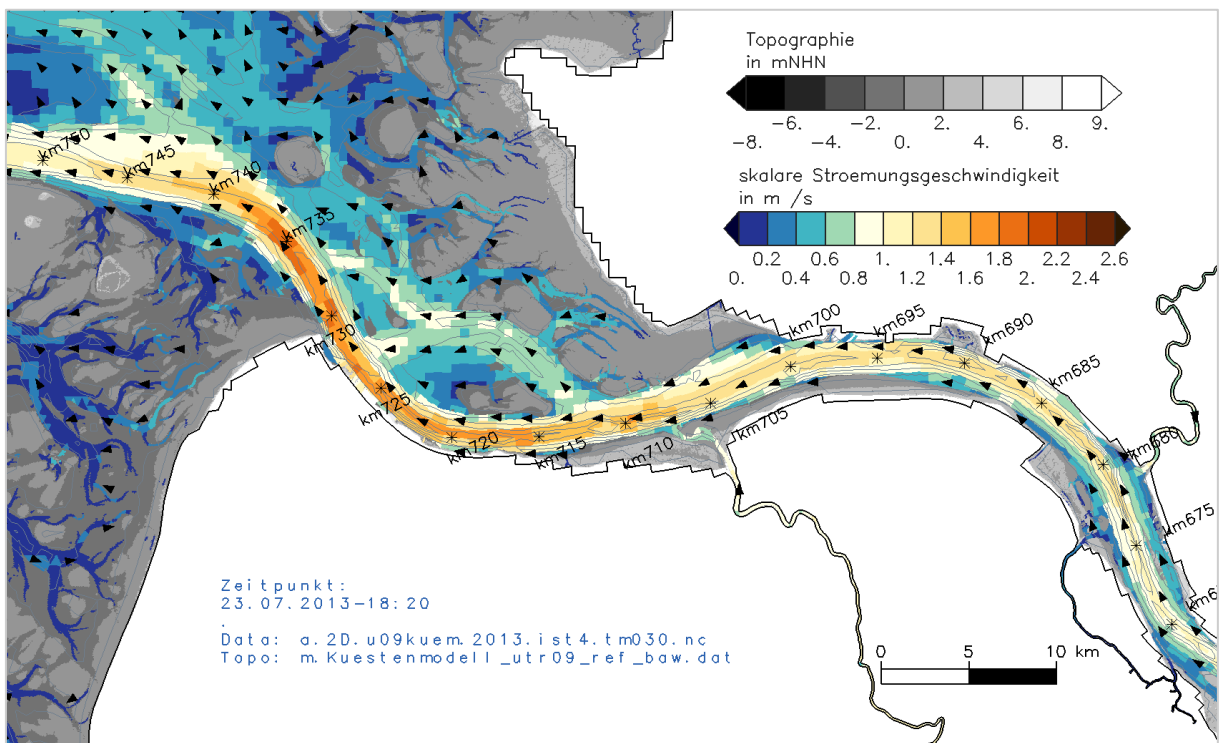


Bild 135: Tiefengemittelte Strömungsgeschwindigkeit und -richtung in der Elbmündung bei SN2013 ref an einem Zeitpunkt bei Ebbstrom (Zeitpunkt 3 in Bild 132)

3.4.2 SF2013

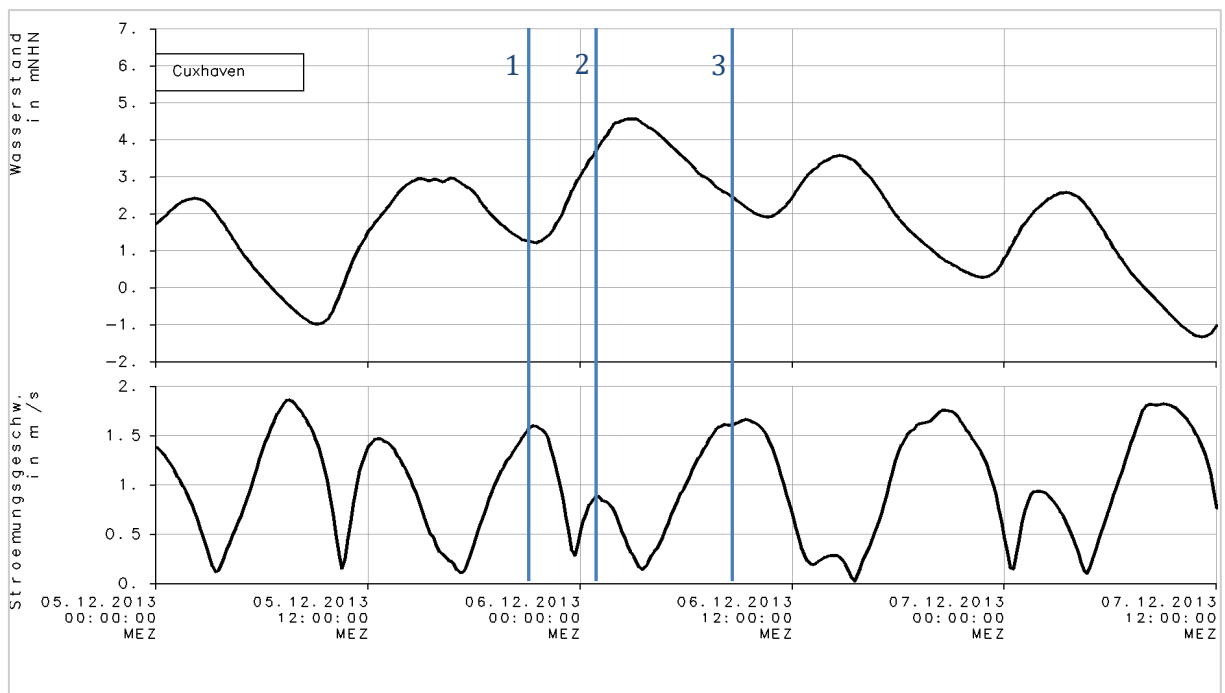


Bild 136: Zeitreihen Wasserstand und Strömungsgeschwindigkeit bei SF2013 bei Cuxhaven (Elbe-km 725): ref (schwarz) mit eingezeichneten ausgewählten Zeitpunkten (blau)

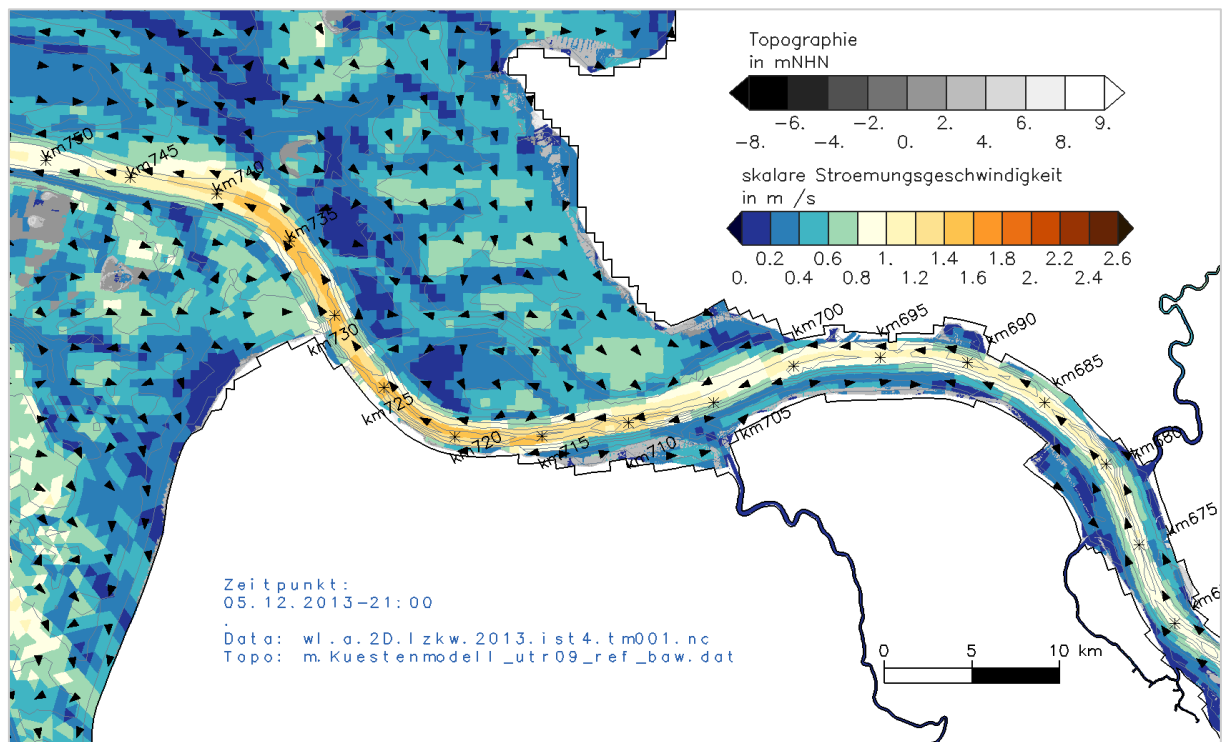


Bild 137: Tiefengemittelte Strömungsgeschwindigkeit und -richtung in der Elbmündung bei SF2013 ref an einem Zeitpunkt bei Ebbstrom vor HW (Zeitpunkt 1 in Bild 136)

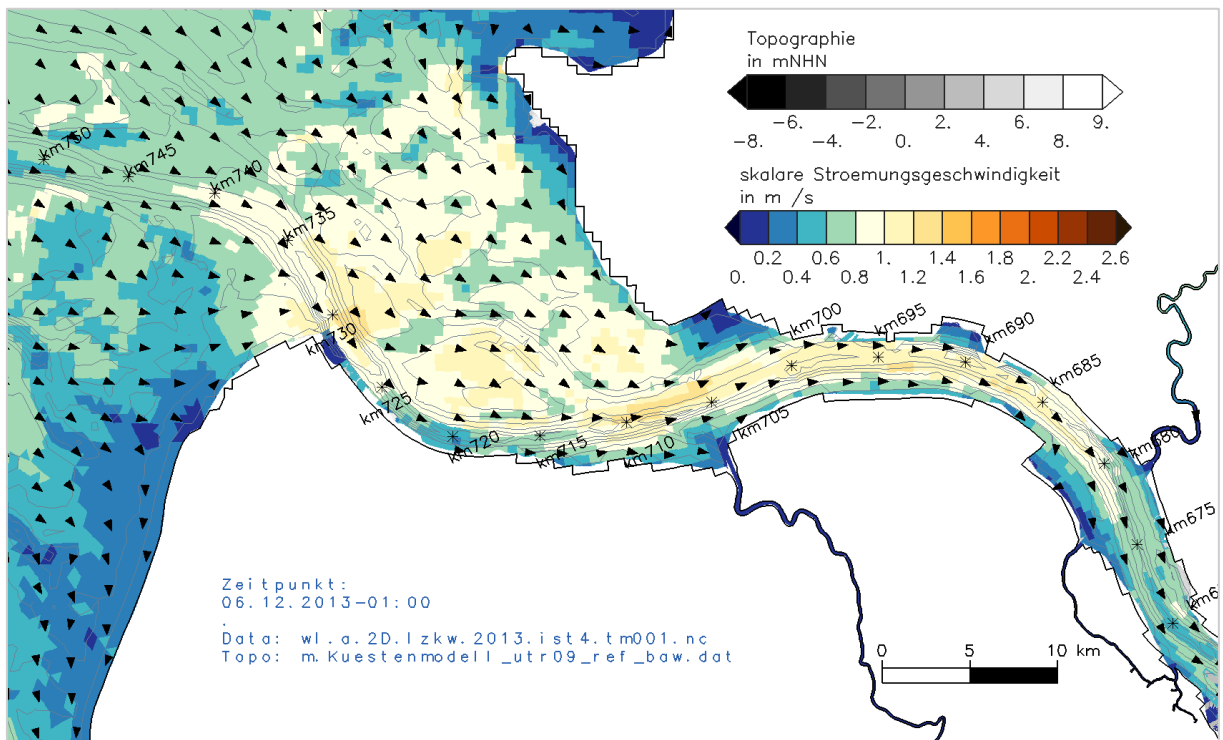


Bild 138: Tiefengemittelte Strömungsgeschwindigkeit und -richtung in der Elbmündung bei SF2013 ref an einem Zeitpunkt bei Flutstrom vor HW (Zeitpunkt 2 in Bild 136)

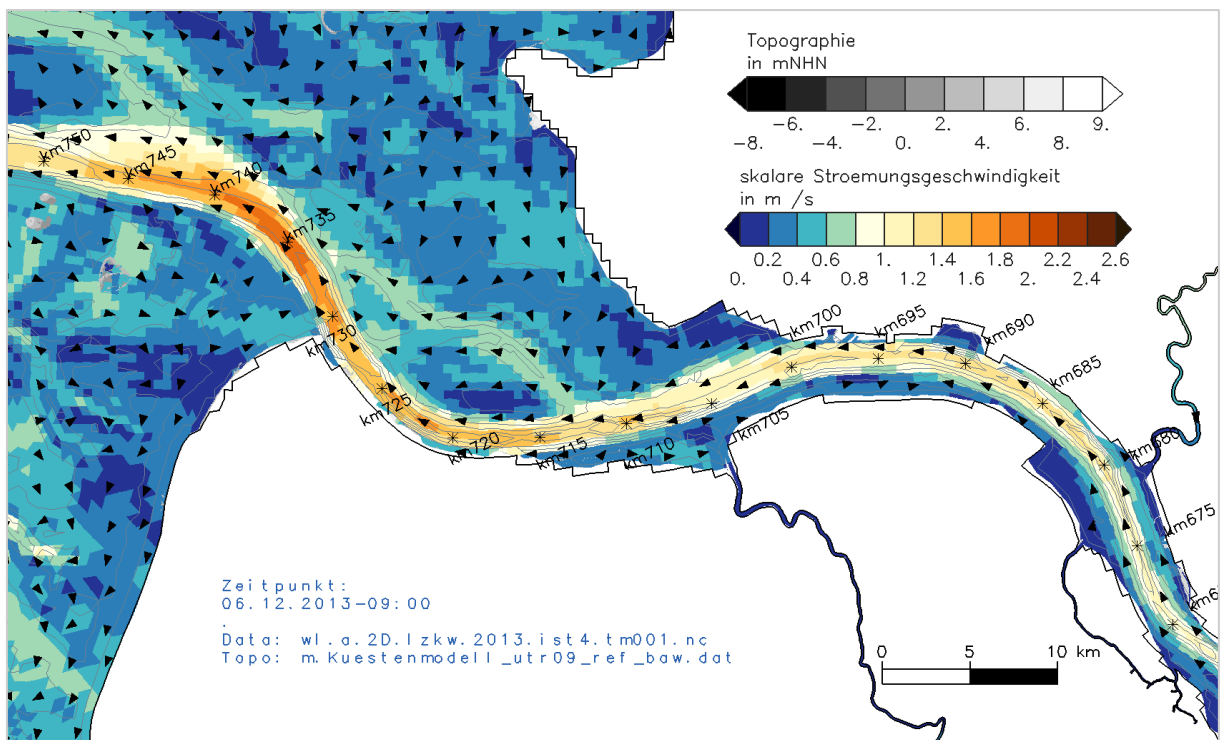


Bild 139: Tiefengemittelte Strömungsgeschwindigkeit und -richtung in der Elbmündung bei SF2013 ref an einem Zeitpunkt bei Ebbstrom nach HW (Zeitpunkt 3 in Bild 136)

3.4.3 SFEH

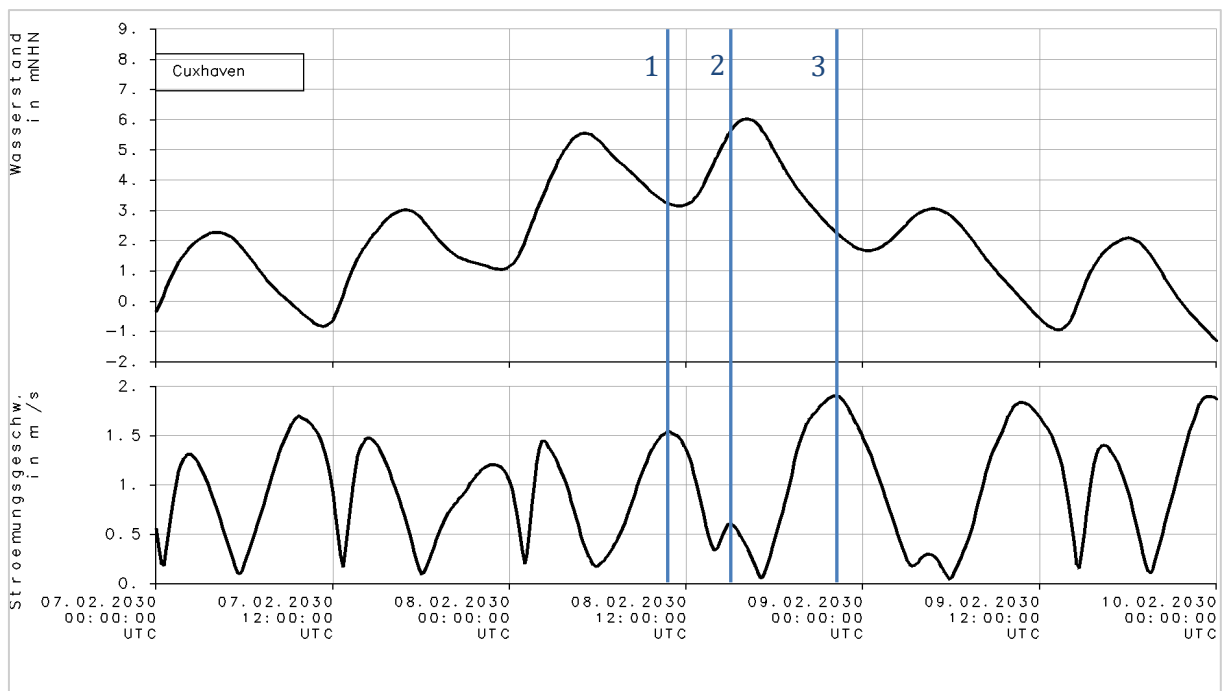


Bild 140: Zeitreihen Wasserstand und Strömungsgeschwindigkeit bei SFEH bei Cuxhaven (Elbe-km 725): ref (schwarz) mit eingezeichneten ausgewählten Zeitpunkten (blau)

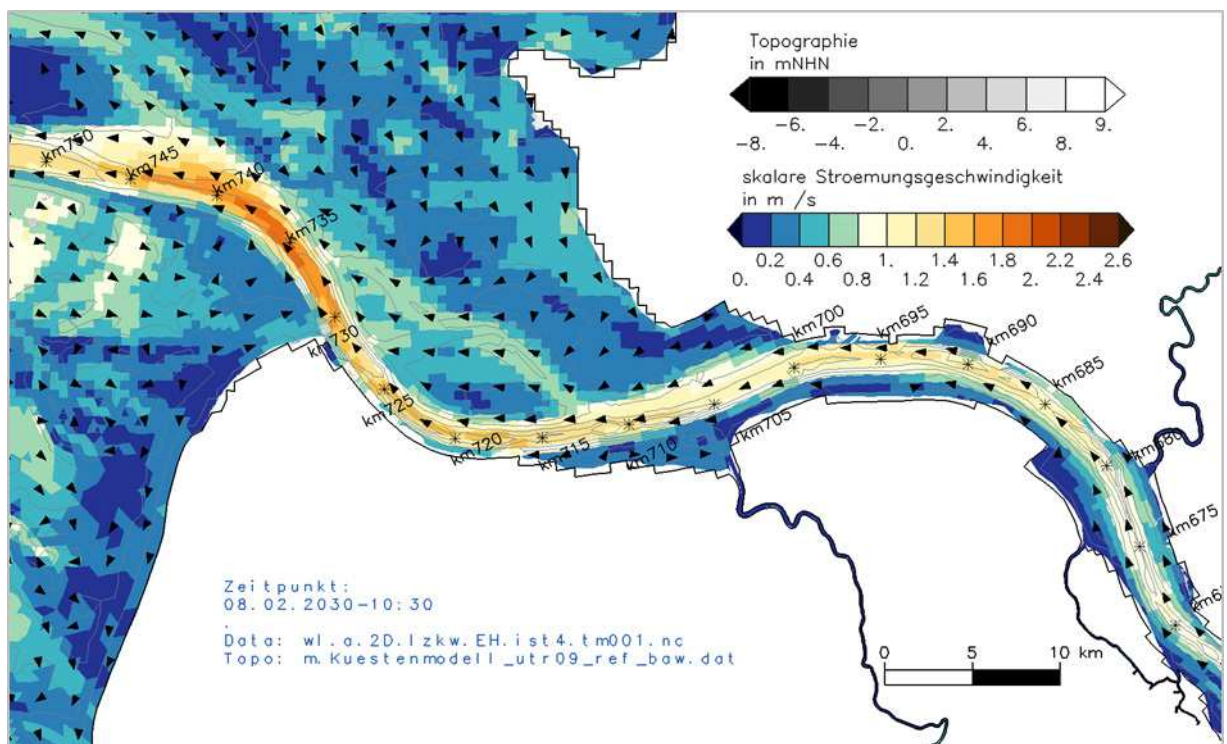


Bild 141: Tiefengemittelte Strömungsgeschwindigkeit und -richtung in der Elbmündung bei SFEH ref an einem Zeitpunkt bei Ebbstrom vor HW (Zeitpunkt 1 in Bild 140)

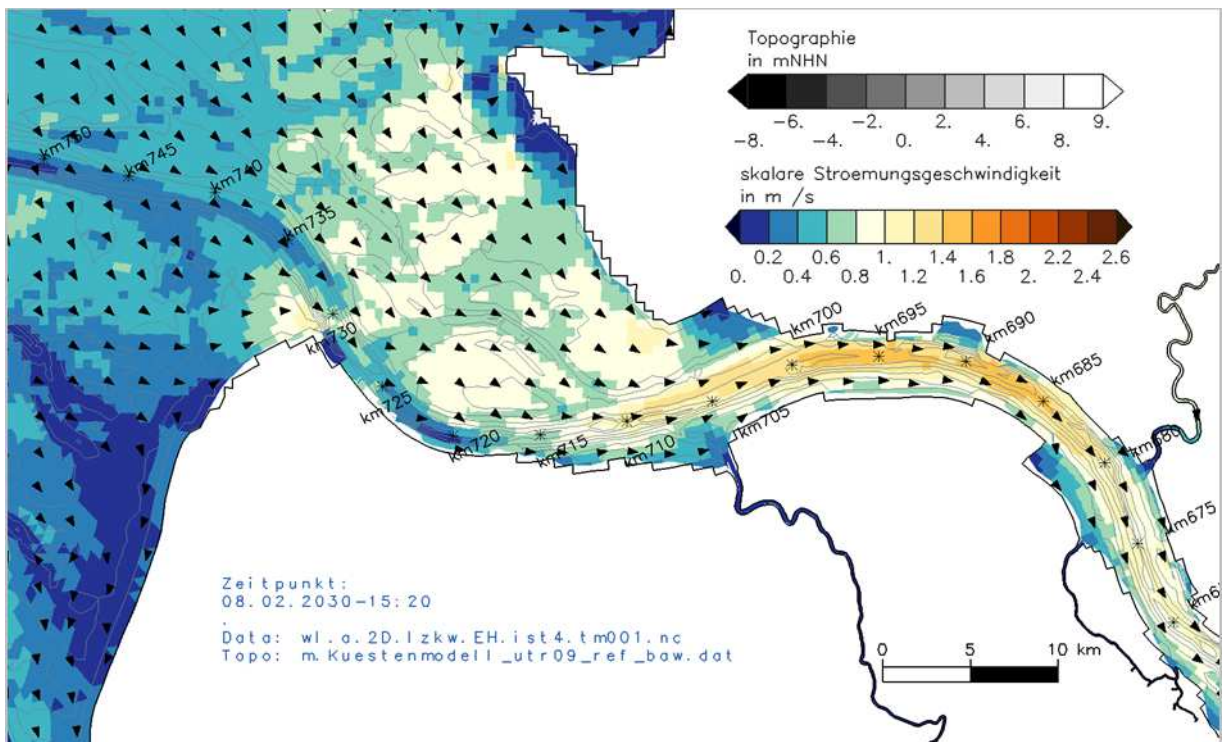


Bild 142: Tiefengemittelte Strömungsgeschwindigkeit und -richtung in der Elbmündung bei SFEH ref an einem Zeitpunkt bei Flutstrom vor HW (Zeitpunkt 2 in Bild 140)

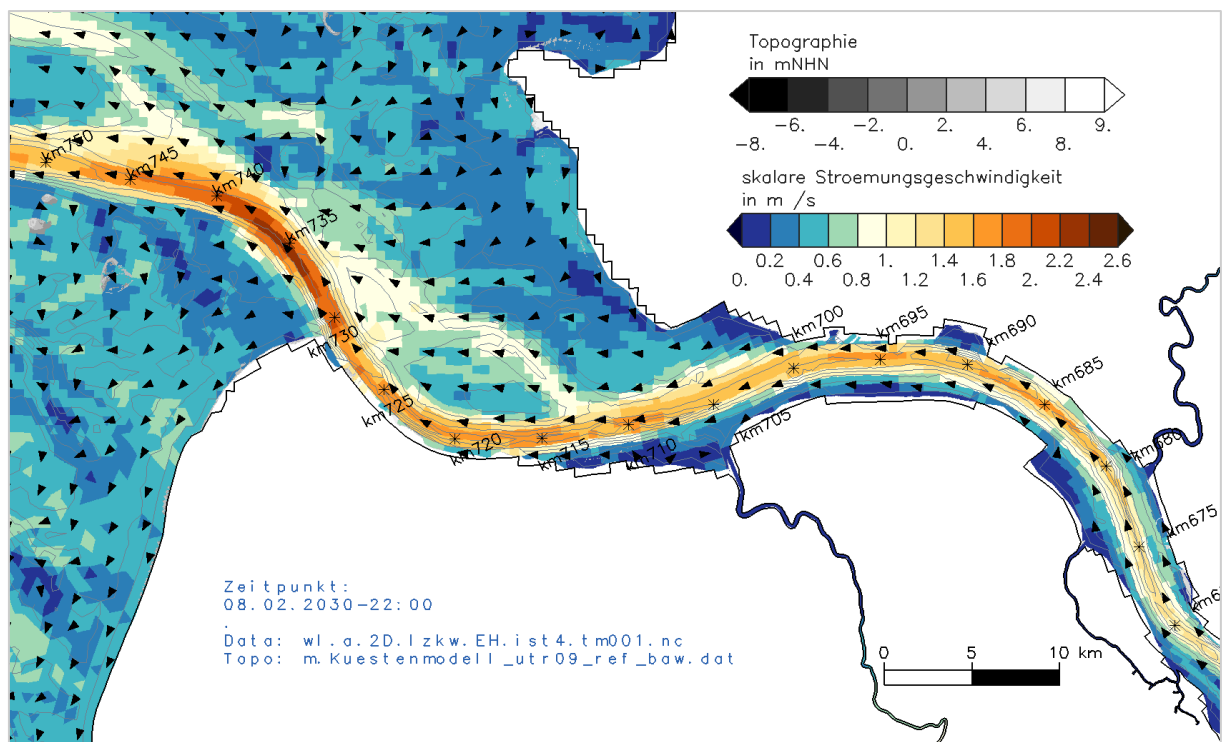


Bild 143: Tiefengemittelte Strömungsgeschwindigkeit und -richtung in der Elbmündung bei SFEH ref an einem Zeitpunkt bei Ebbstrom nach HW (Zeitpunkt 3 in Bild 140)

3.5 Tidekennwerte der Strömung

Die mittlere tiefengemittelte Flut- und Ebbstromgeschwindigkeit (V_{fMt} und V_{eMt}) sind auf einem Längsprofil entlang der Fahrrinnenmitte der Elbe für die untersuchten Szenarien (Tabelle 1) dargestellt. Auch hier sind sowohl die absoluten Größen, als auch die Änderungen zum Referenzzustand dargestellt.

3.5.1 SN2013

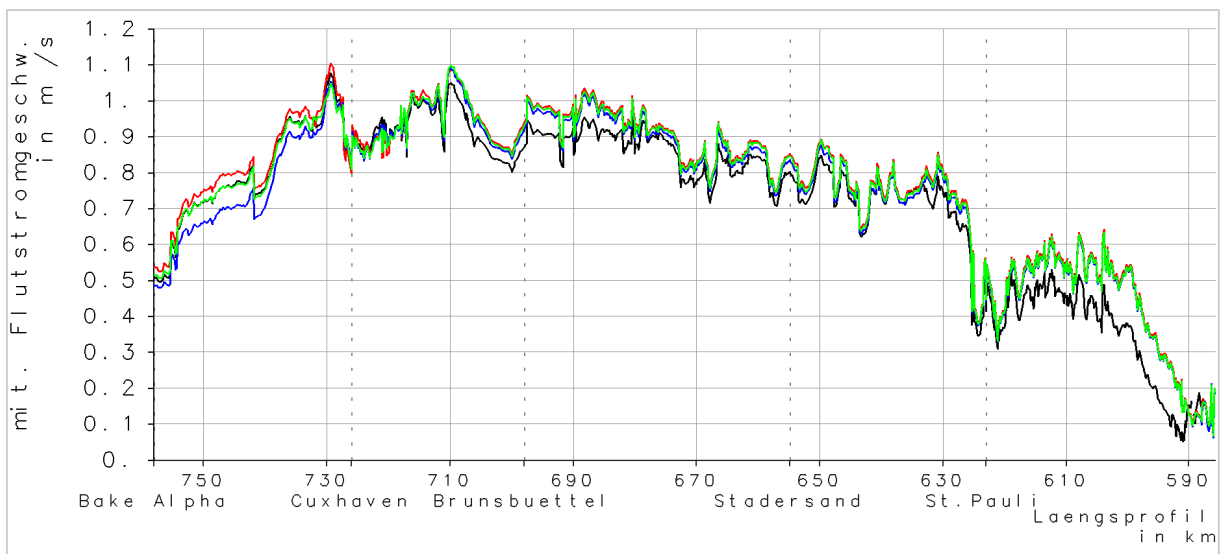


Bild 144: *VfMtMit bei SN2013 tiefengemittelt entlang der Elbe in Fahrrinnenmitte: ref (schwarz), f110 (rot), w55 (grün), w110 (blau)*

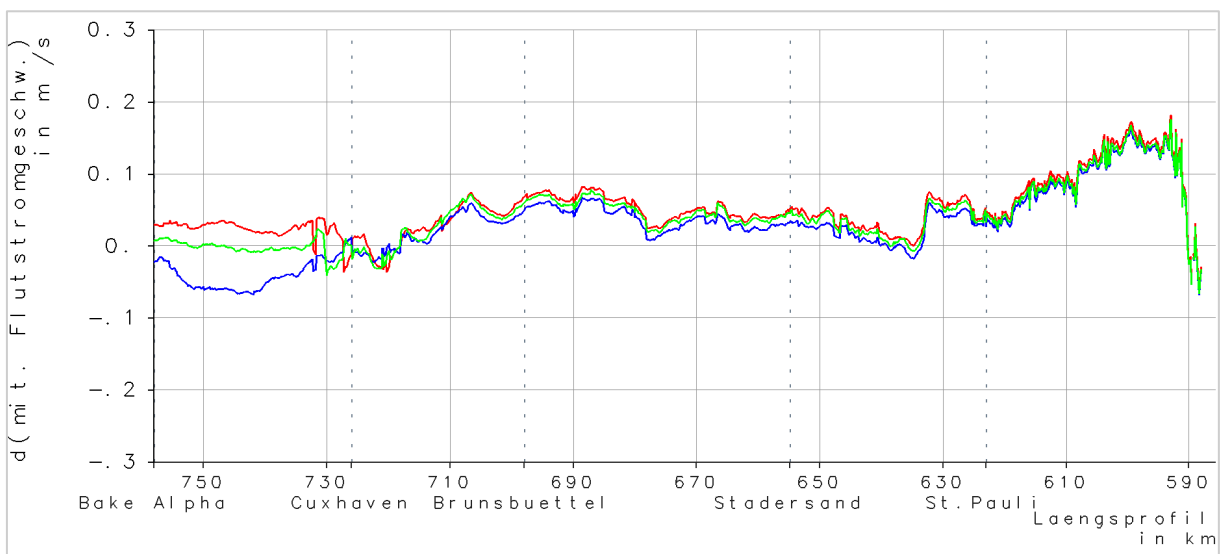


Bild 145: *Differenzen VfMtMit bei SN2013 tiefengemittelt entlang der Elbe in Fahrrinnenmitte: f110-ref (rot), w55-ref (grün), w110-ref (blau)*

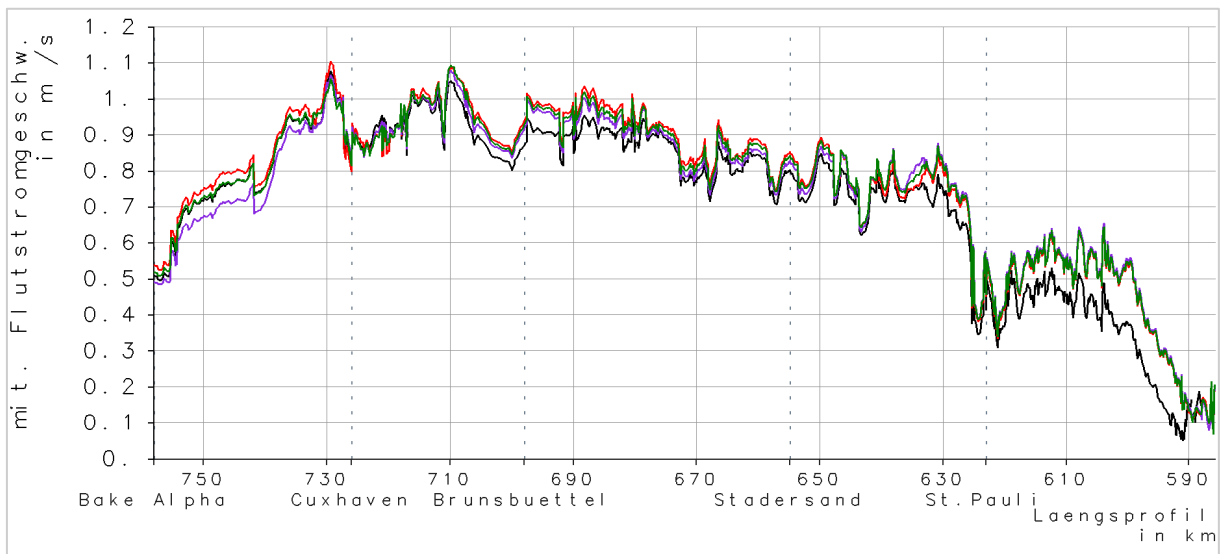


Bild 146: *VfMtMit bei SN2013 tiefengemittelt entlang der Elbe in Fahrrinnenmitte: ref (schwarz), f110 (rot), w55e (dunkelgrün), w110e (lila)*

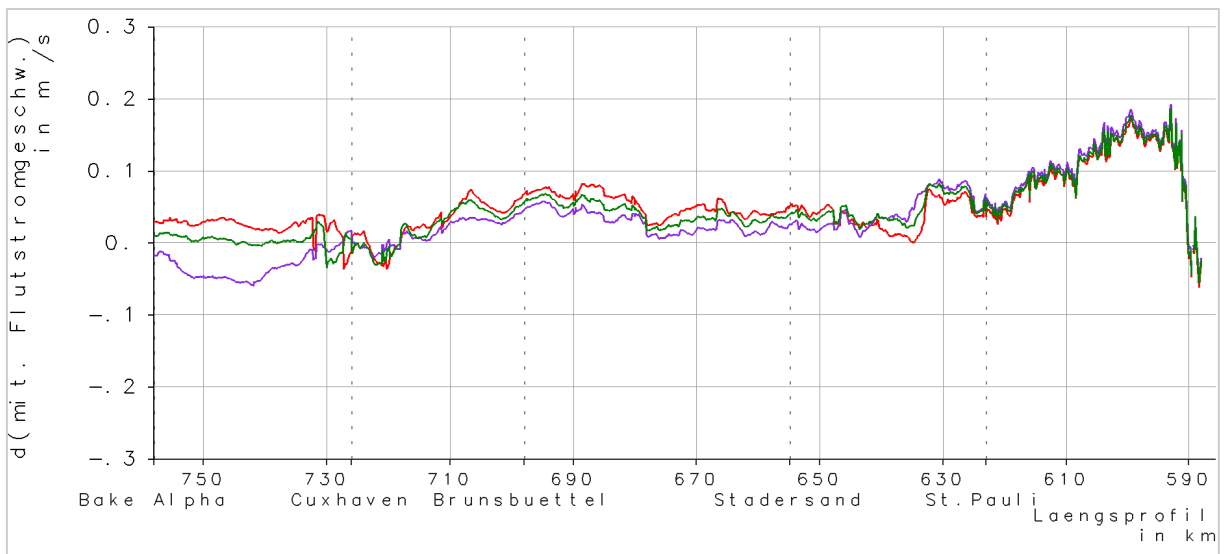


Bild 147: *Differenzen VfMtMit bei SN2013 tiefengemittelt entlang der Elbe in Fahrrinnenmitte: f110-ref (rot), w55e-ref (dunkelgrün), w110e-ref (lila)*

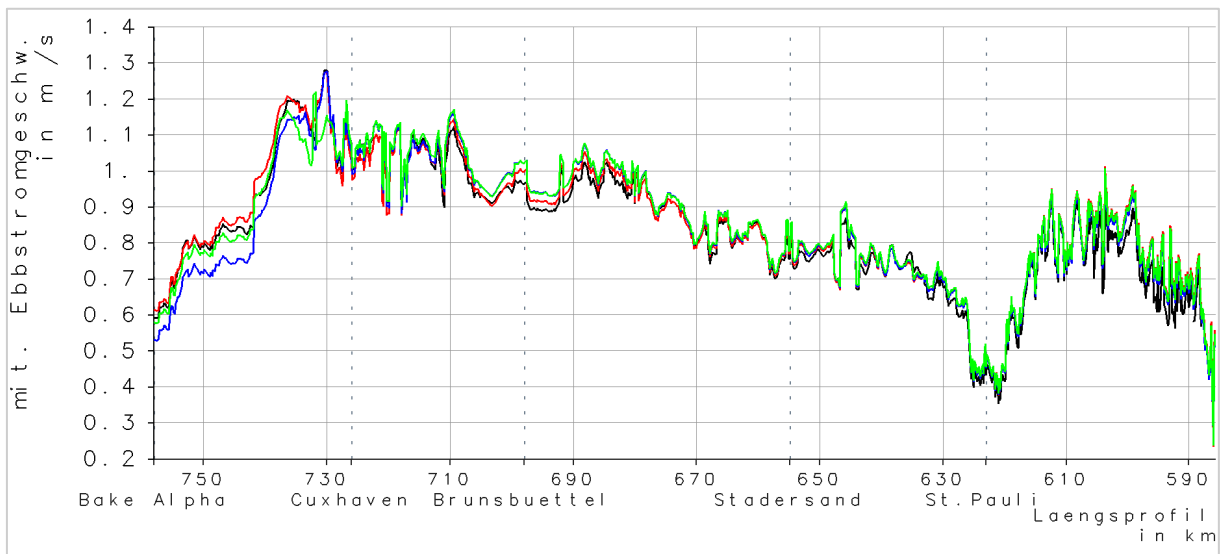


Bild 148: *VeMtMit bei SN2013 tiefengemittelt entlang der Elbe in Fahrrinnenmitte: ref (schwarz), f110 (rot), w55 (grün), w110 (blau)*

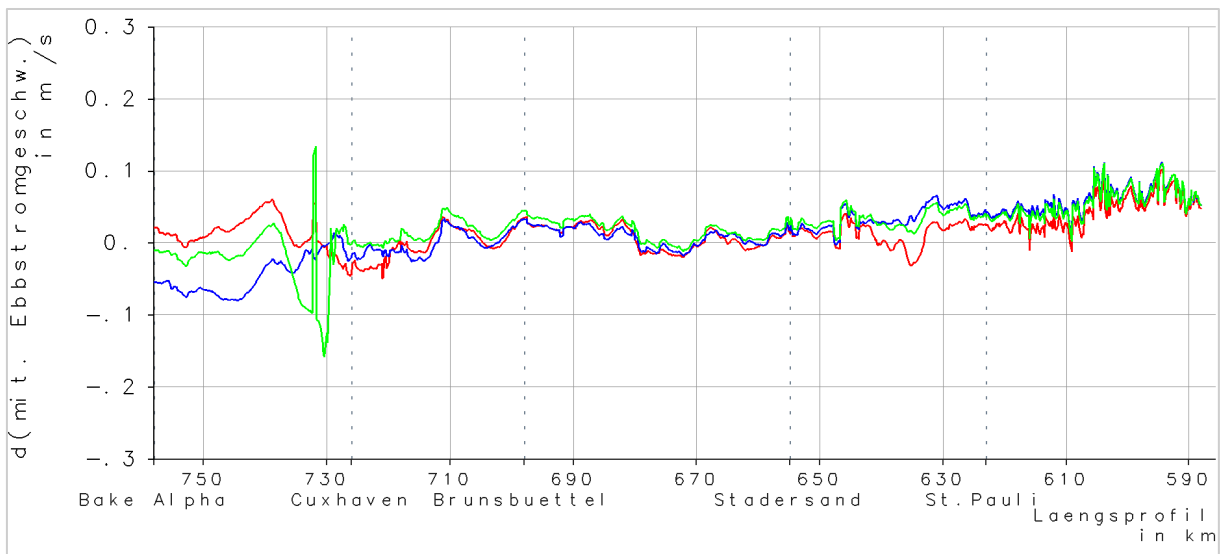


Bild 149: *Differenzen VeMtMit bei SN2013 tiefengemittelt entlang der Elbe in Fahrrinnenmitte: f110-ref (rot), w55-ref (grün), w110-ref (blau)*

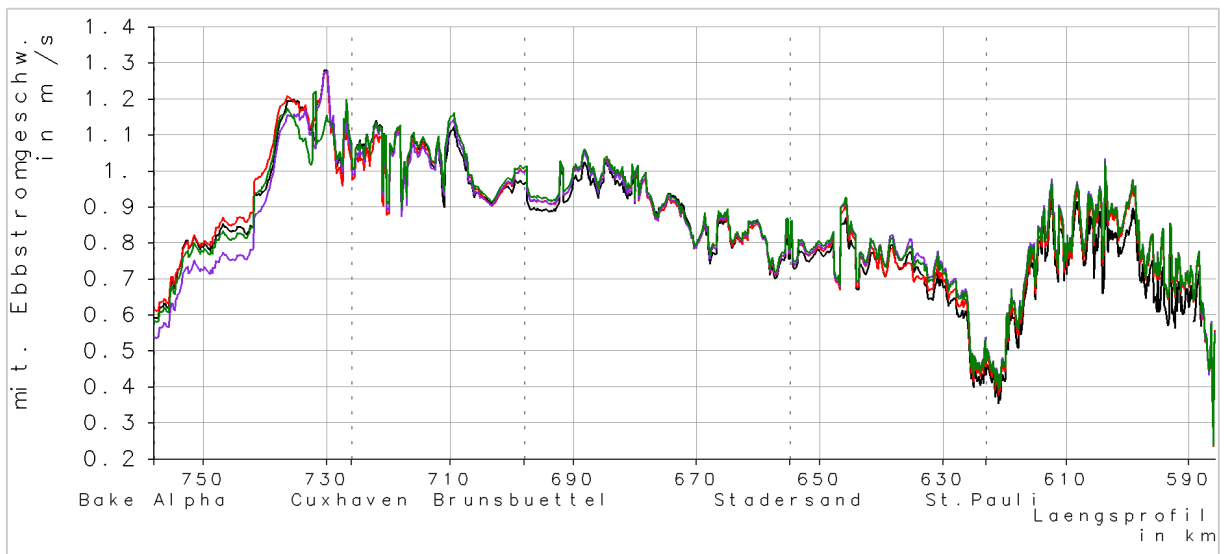


Bild 150: VeMtMit bei SN2013 tiefengemittelt entlang der Elbe in Fahrrinnenmitte: ref (schwarz), f110 (rot), w55e (dunkelgrün), w110e (lila)

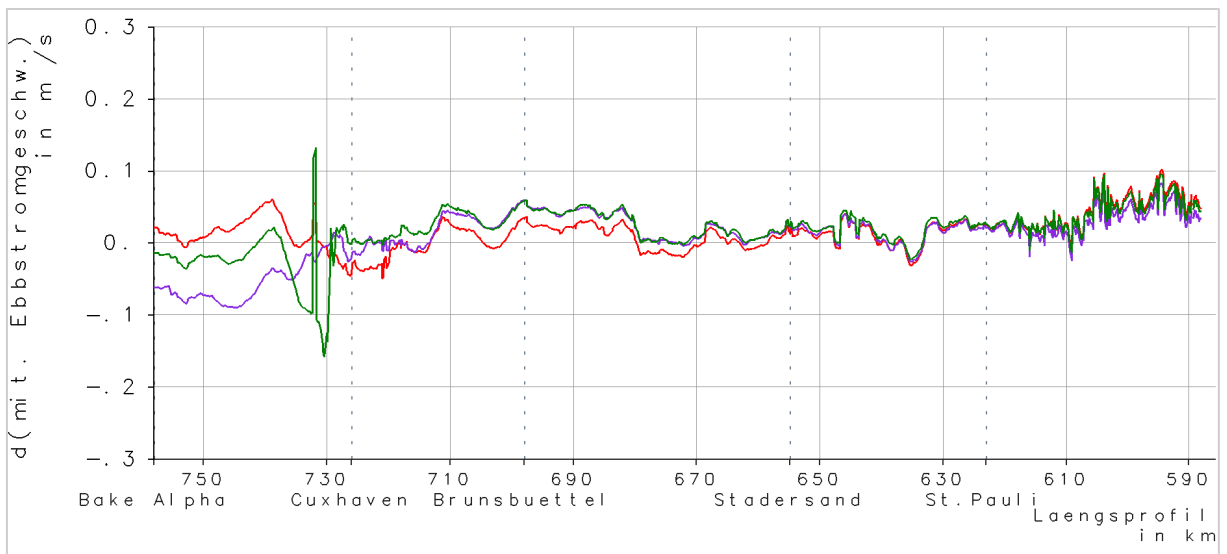


Bild 151: Differenzen VeMtMit bei SN2013 tiefengemittelt entlang der Elbe in Fahrrinnenmitte: f110-ref (rot), w55e-ref (dunkelgrün), w110e-ref (lila)

3.5.2 SF2013

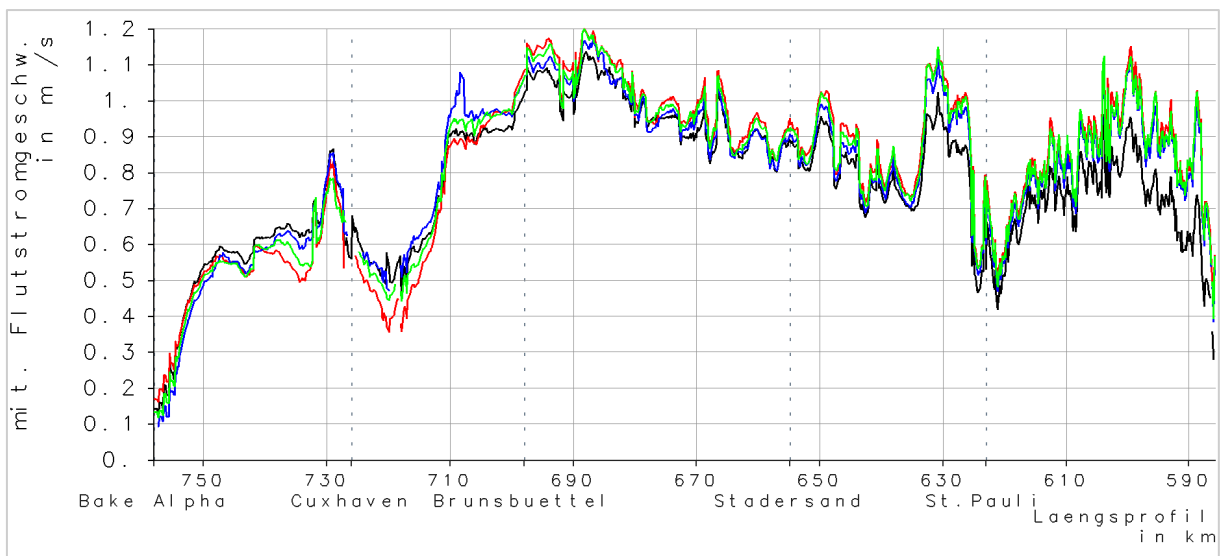


Bild 152: VfMtTide bei SF2013 tiefengemittelt entlang der Elbe in Fahrrinnenmitte: ref (schwarz), f110 (rot), w55 (grün), w110 (blau)

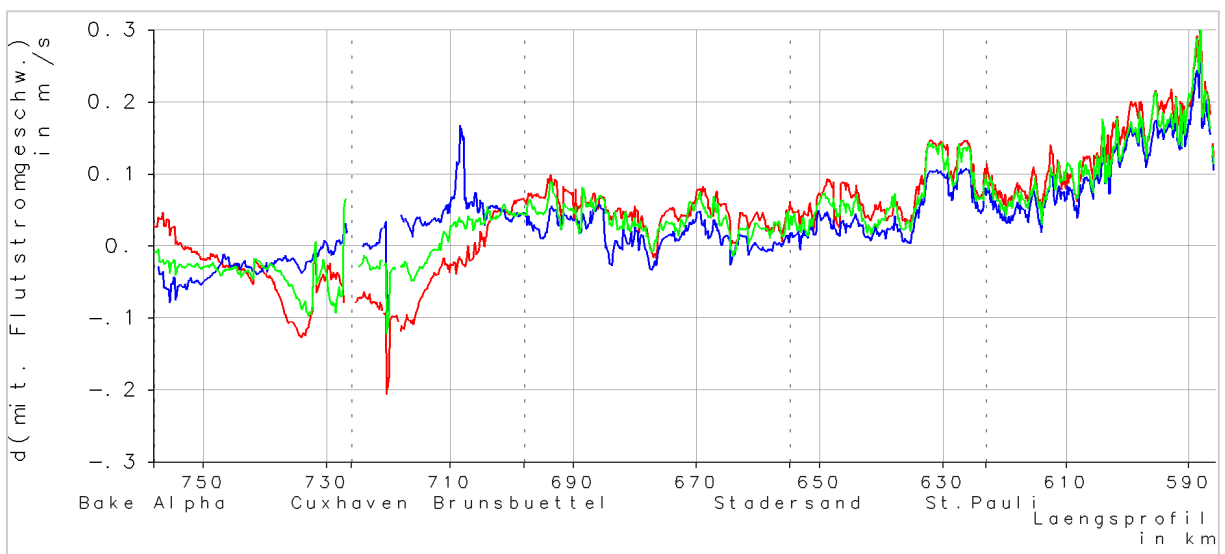


Bild 153: Differenzen VfMtTide bei SF2013 tiefengemittelt entlang der Elbe in Fahrrinnenmitte: f110-ref (rot), w55-ref (grün), w110-ref (blau)

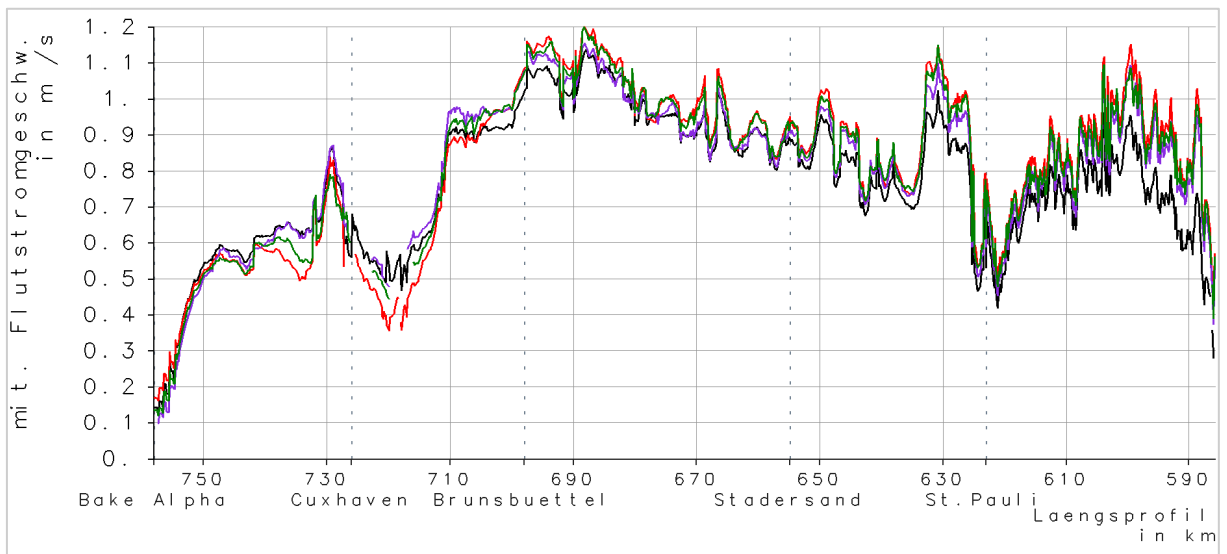


Bild 154: VfMtTide bei SF2013 tiefengemittelt entlang der Elbe in Fahrrinnenmitte: ref (schwarz), f110 (rot), w55e (dunkelgrün), w110e (lila)

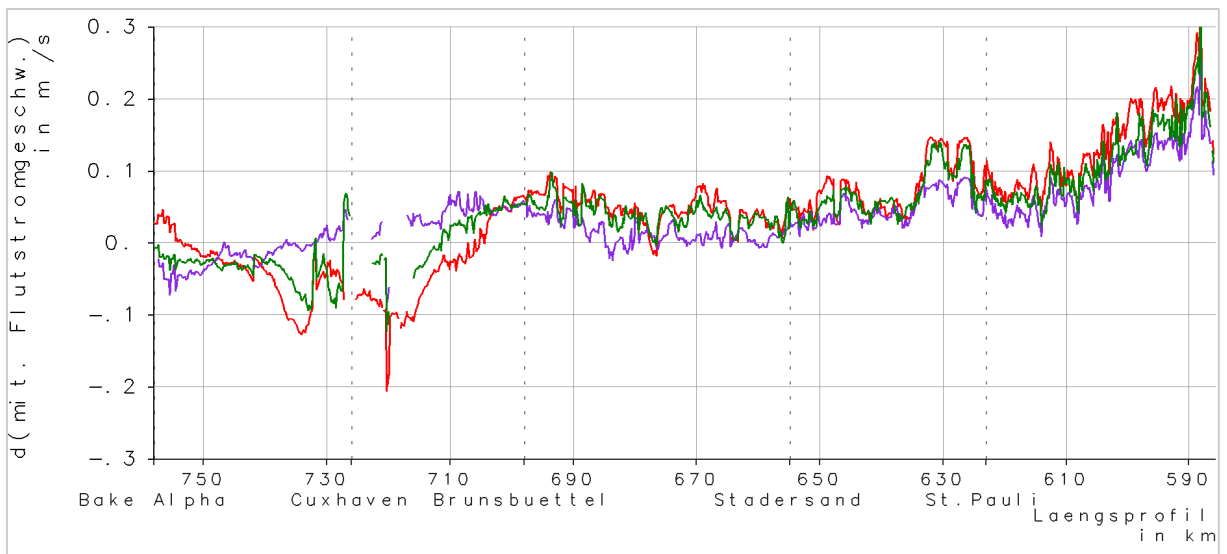


Bild 155: Differenzen VfMtTide bei SF2013 tiefengemittelt entlang der Elbe in Fahrrinnenmitte: f110-ref (rot), w55e-ref (dunkelgrün), w110e-ref (lila)

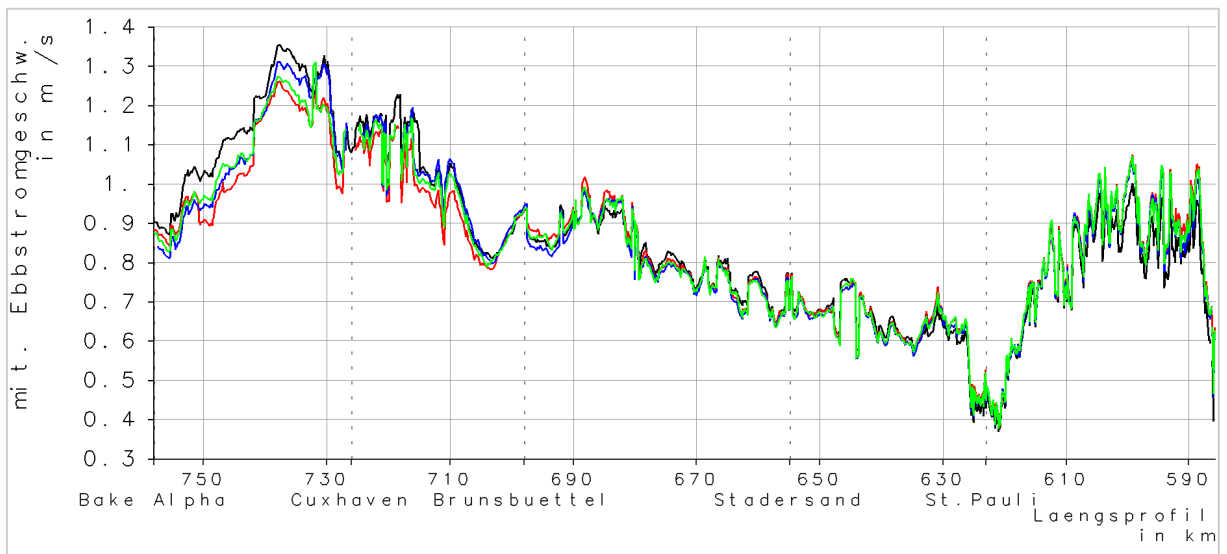


Bild 156: VeMtTide bei SF2013 tiefengemittelt entlang der Elbe in Fahrrinnenmitte: ref (schwarz), f110 (rot), w55 (grün), w110 (blau)

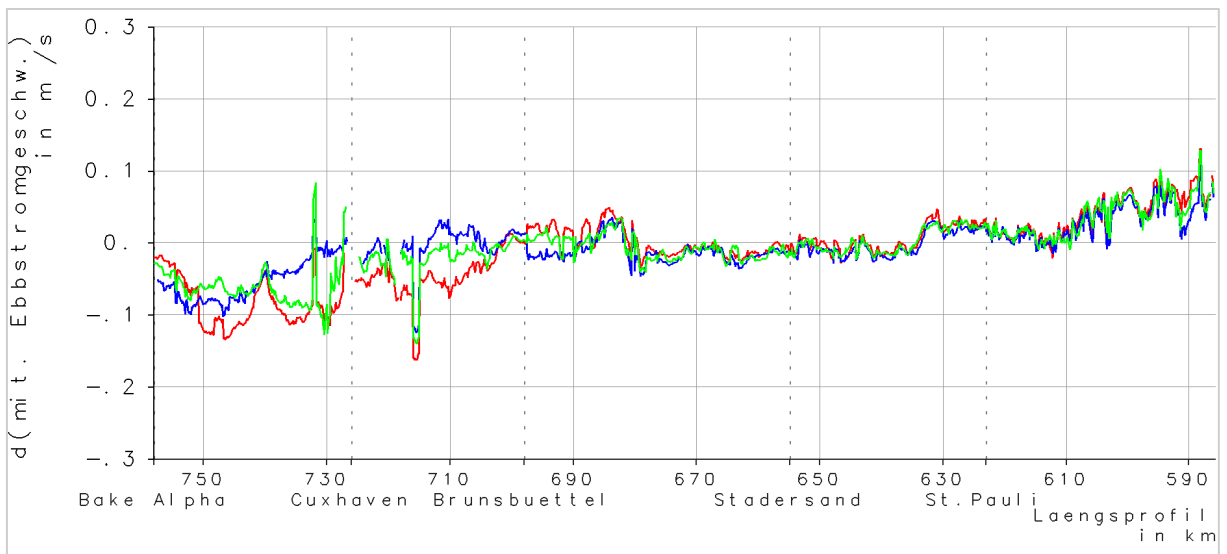


Bild 157: Differenzen VeMtTide bei SF2013 tiefengemittelt entlang der Elbe in Fahrrinnenmitte: f110-ref (rot), w55-ref (grün), w110-ref (blau)

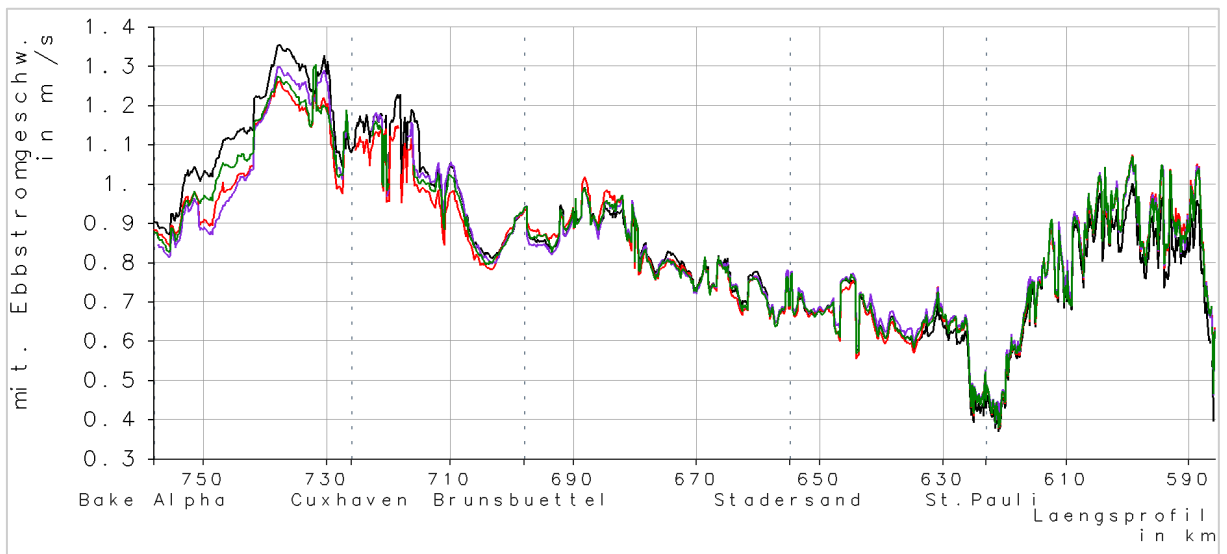


Bild 158: VeMtTide bei SF2013 tiefengemittelt entlang der Elbe in Fahrrinnenmitte: ref (schwarz), f110 (rot), w55e (dunkelgrün), w110e (lila)

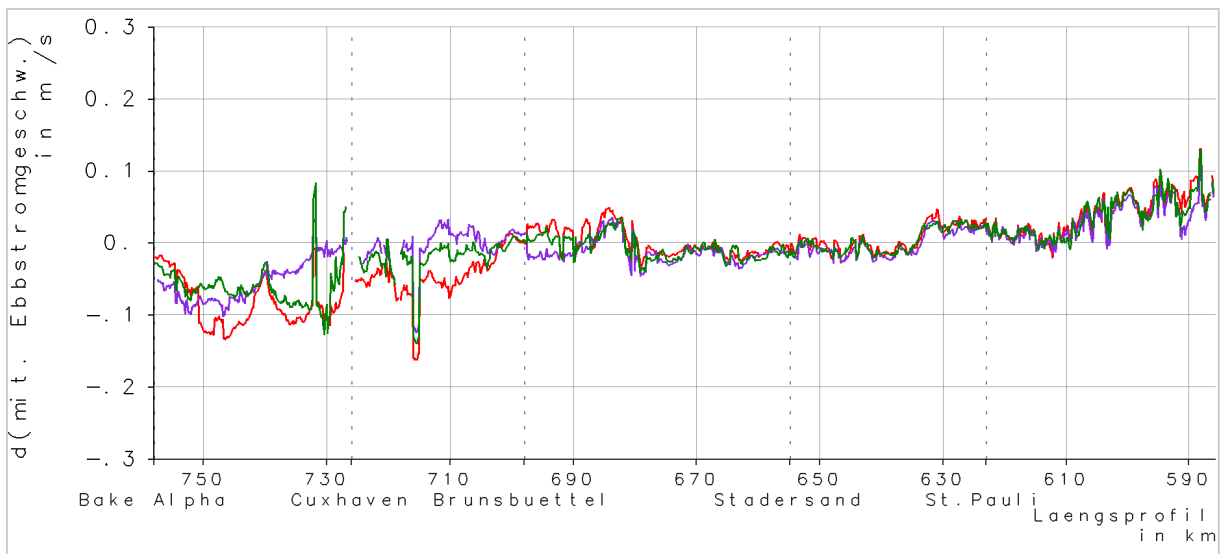


Bild 159: Differenzen VeMtTide bei SF2013 tiefengemittelt entlang der Elbe in Fahrrinnenmitte: f110-ref (rot), w55e-ref (dunkelgrün), w110e-ref (lila)

3.5.3 SFEH

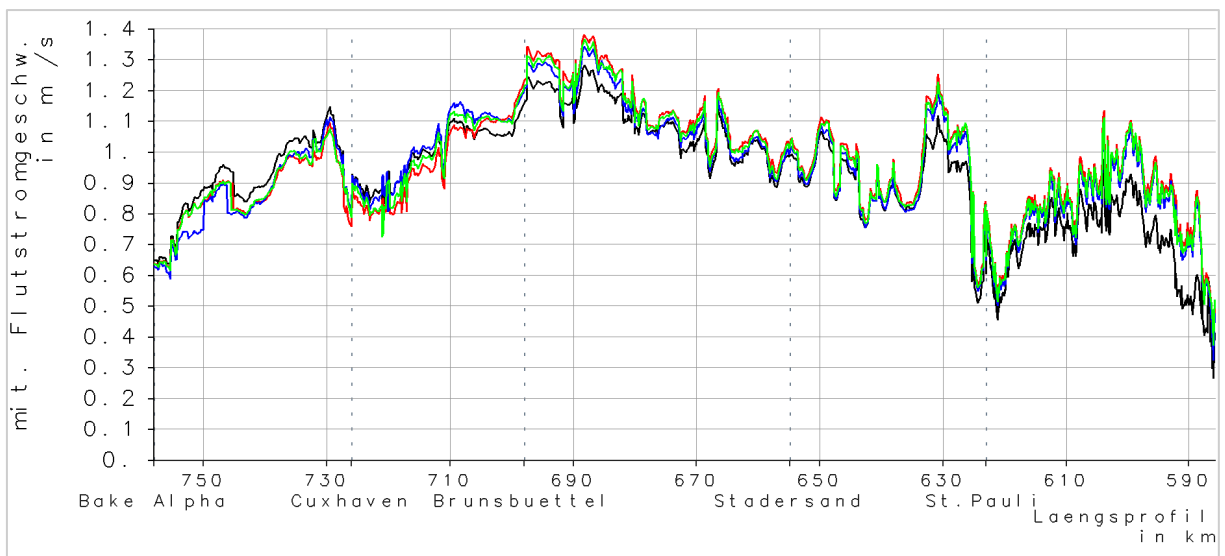


Bild 160: VfMtTide bei SFEH tiefengemittelt entlang der Elbe in Fahrrinnenmitte: ref (schwarz), f110 (rot), w55 (grün), w110 (blau)

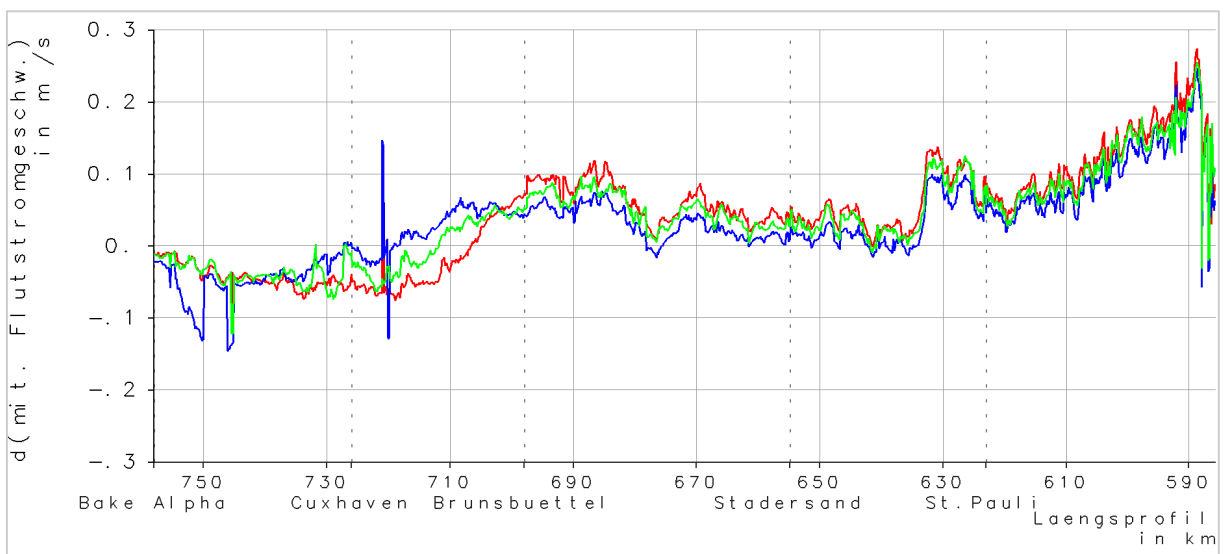


Bild 161: Differenzen VfMtTide bei SFEH tiefengemittelt entlang der Elbe in Fahrrinnenmitte: f110-ref (rot), w55-ref (grün), w110-ref (blau)

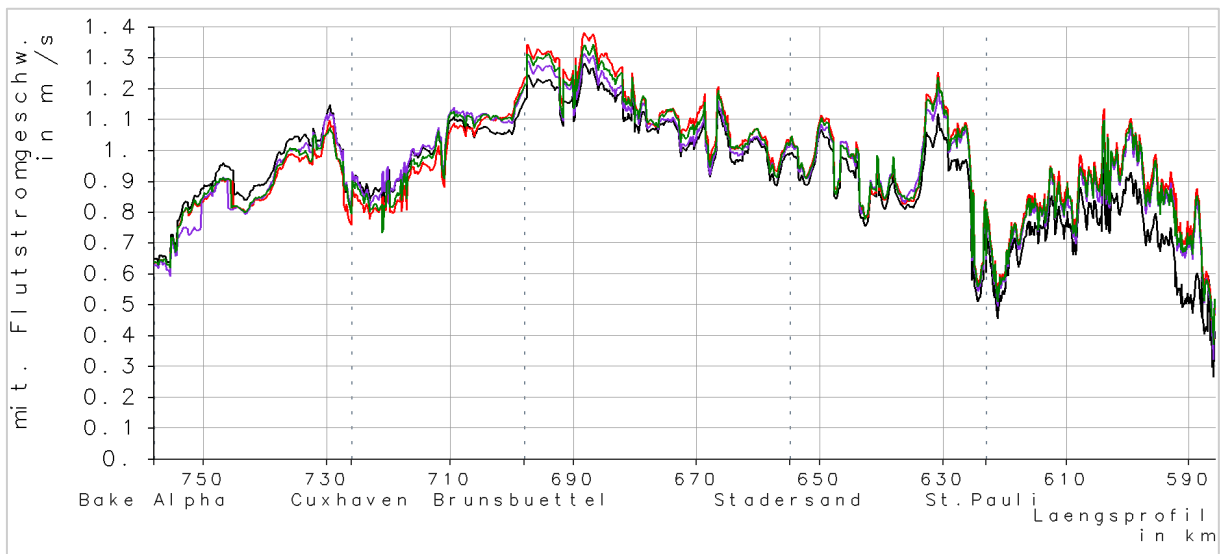


Bild 162: VfMtTide bei SFEH tiefengemittelt entlang der Elbe in Fahrrinnenmitte: ref (schwarz), f110 (rot), w55e (dunkelgrün), w110e (lila)

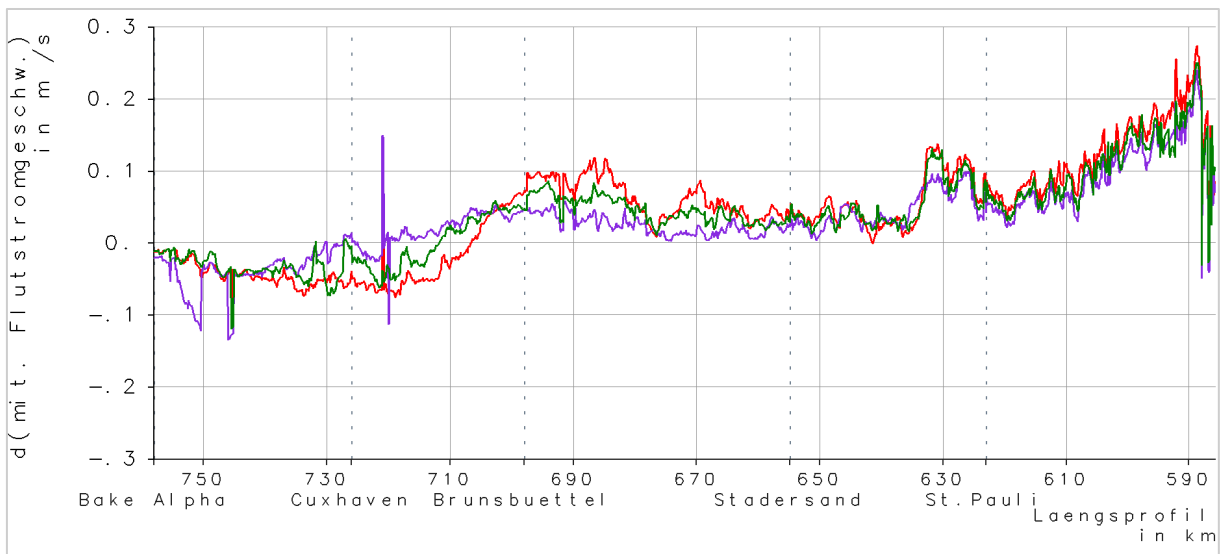


Bild 163: Differenzen VfMtTide bei SFEH tiefengemittelt entlang der Elbe in Fahrrinnenmitte: f110-ref (rot), w55e-ref (dunkelgrün), w110e-ref (lila)

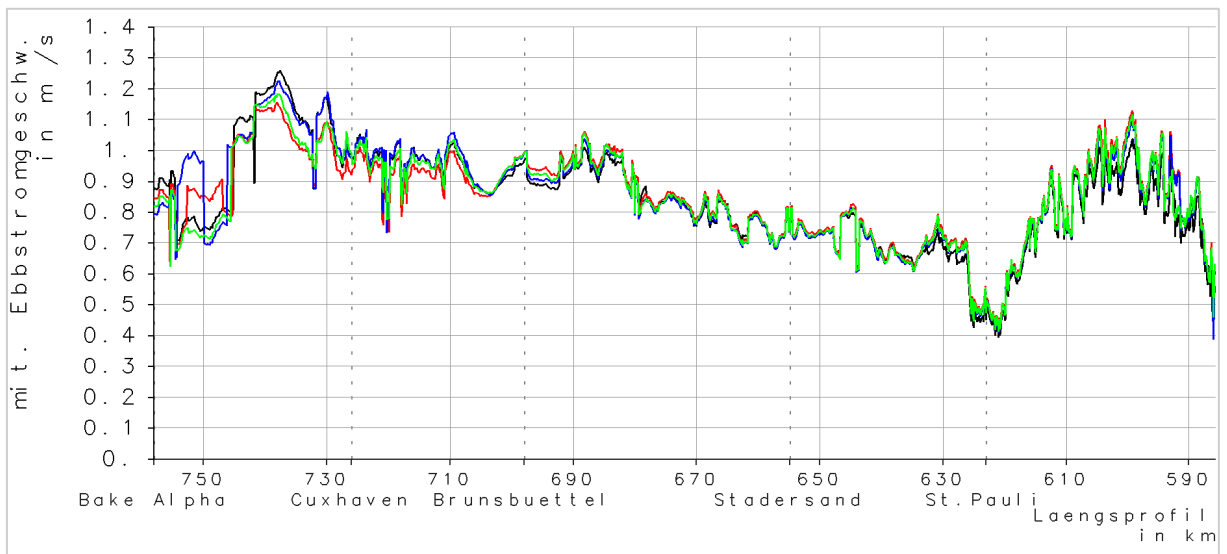


Bild 164: VeMtTide bei SFEH tiefengemittelt entlang der Elbe in Fahrrinnenmitte: ref (schwarz), f110 (rot), w55 (grün), w110 (blau)

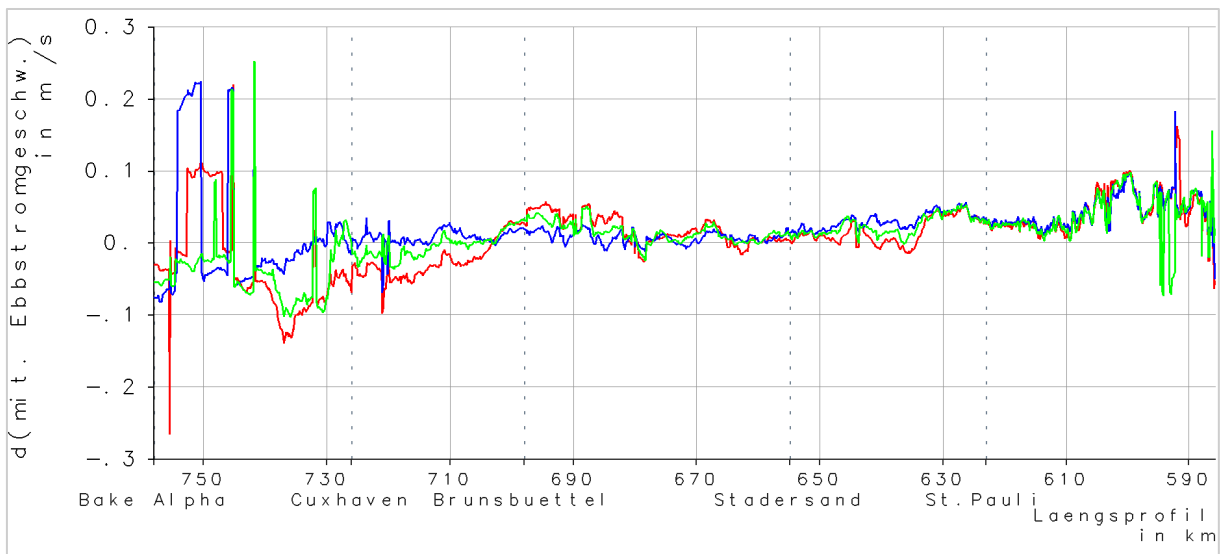


Bild 165: Differenzen VeMtTide bei SFEH tiefengemittelt entlang der Elbe in Fahrrinnenmitte: f110-ref (rot), w55-ref (grün), w110-ref (blau)

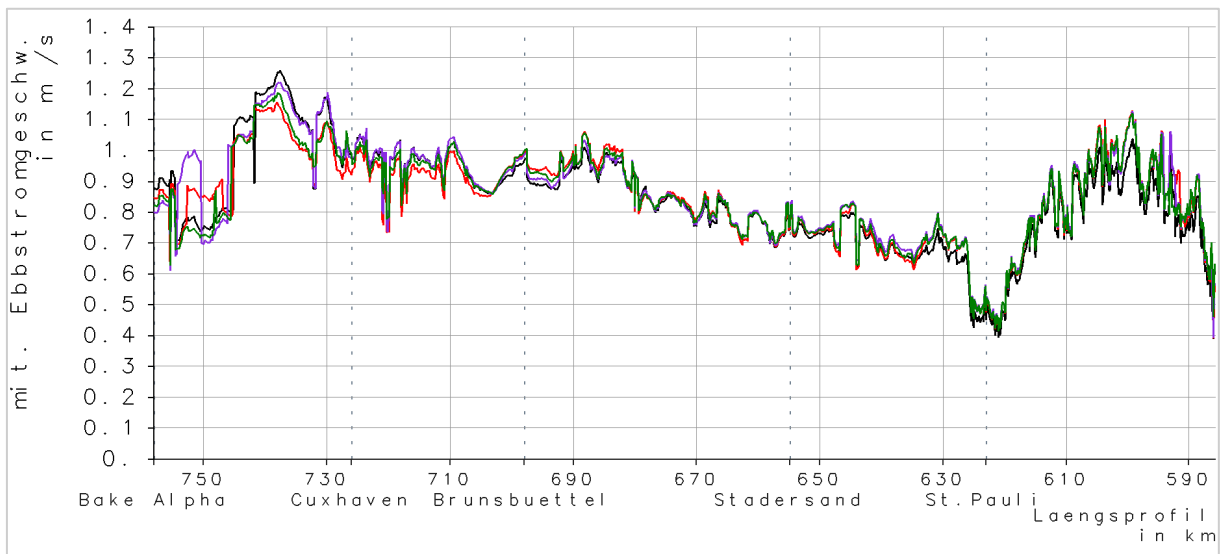


Bild 166: *VeMtTide bei SFEH tiefengemittelt entlang der Elbe in Fahrrinnenmitte: ref (schwarz), f110 (rot), w55e (dunkelgrün), w110e (lila)*

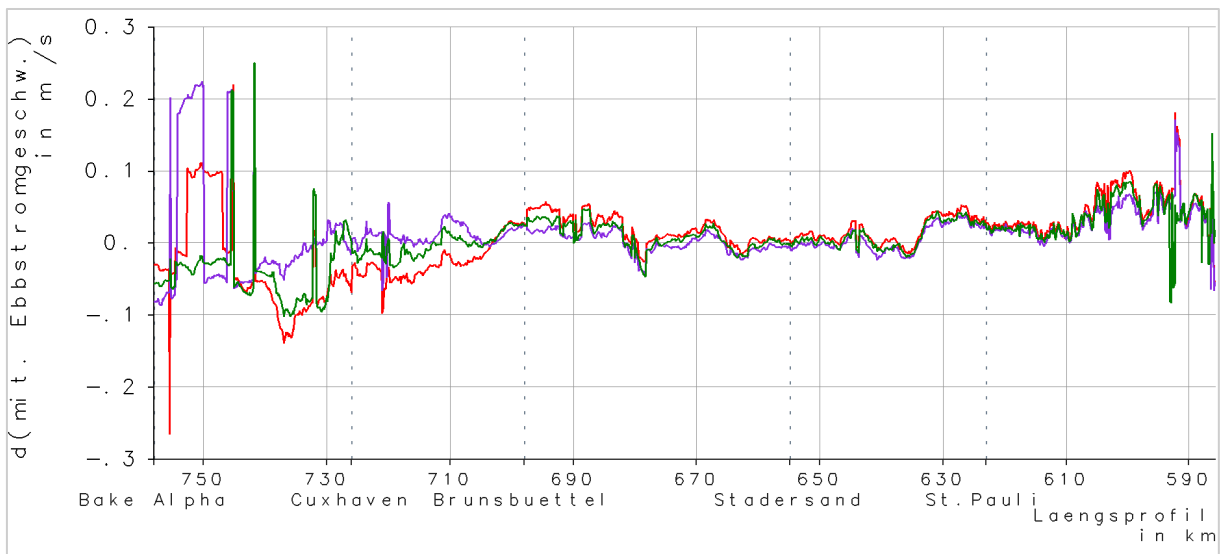


Bild 167: *Differenzen VeMtTide bei SFEH tiefengemittelt entlang der Elbe in Fahrrinnenmitte: f110-ref (rot), w55e-ref (dunkelgrün), w110e-ref (lila)*

3.6 Flutstromvolumen

Das über definierte Querschnitte (siehe Bild 16) aggregierte Flutstromvolumen ist entlang eines Elbe-Längsprofils dargestellt. Bei den Sturmflutereignissen handelt es sich dabei um den Flutstrom der höchsten Sturmfluttide und bei dem Spring-Nipp-Zeitraum um das mittlere Flutstromvolumen der analysierten Tiden. Auch hier sind sowohl die absoluten Größen, als auch die Änderungen zum Referenzzustand dargestellt.

3.6.1 SN2013

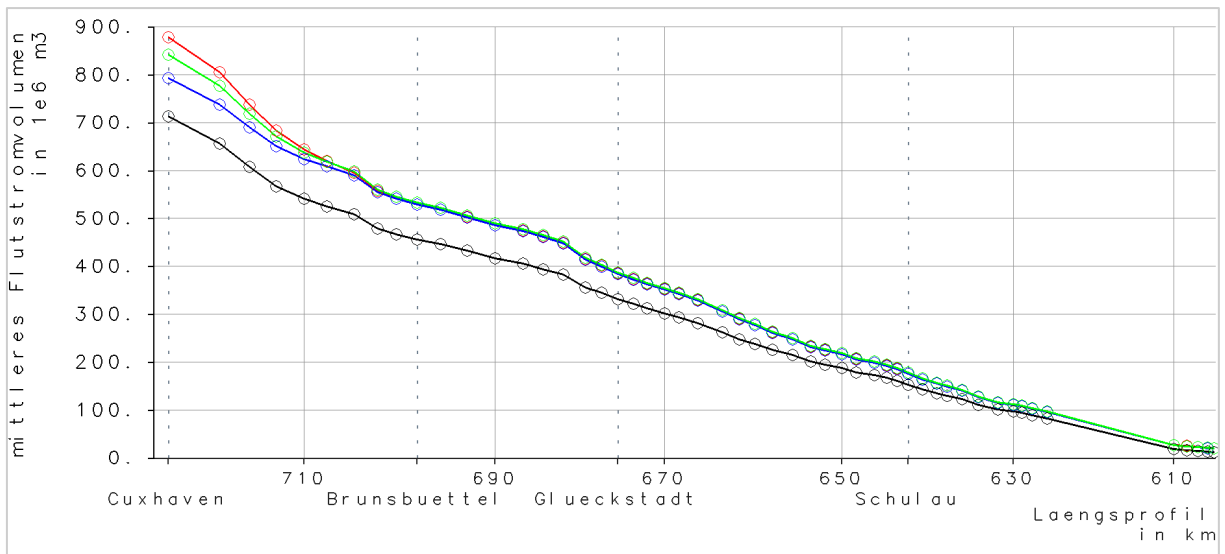


Bild 168: *QfMit bei SN2013 an definierten Querschnitten entlang der Elbe: ref (schwarz), f110 (rot), w55 (grün), w110 (blau)*

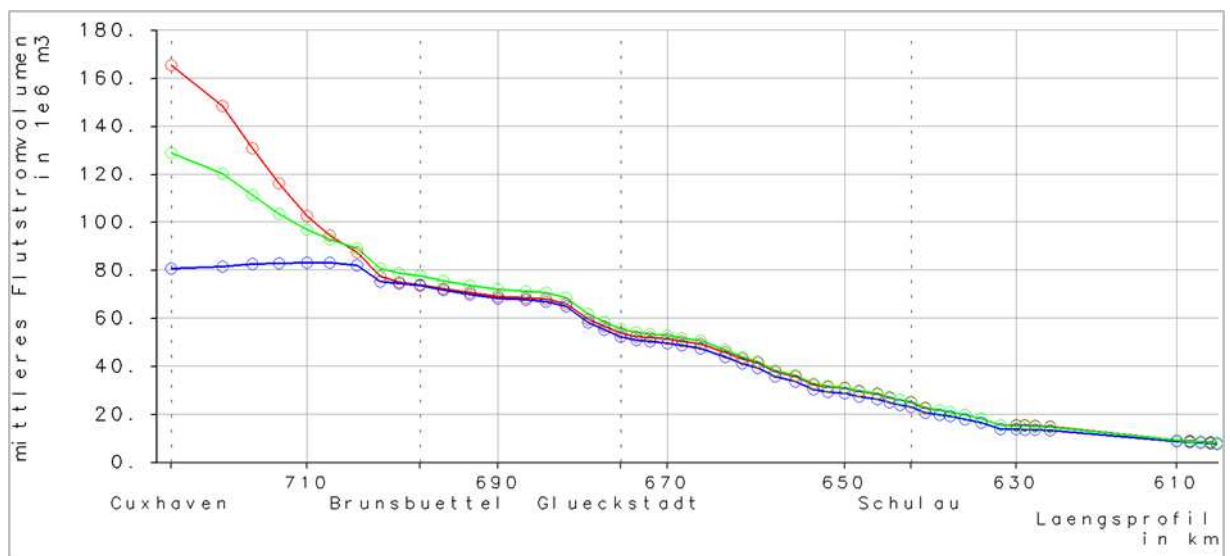


Bild 169: *Differenzen QfMit SN2013 an definierten Querschnitten entlang der Elbe: f110-ref (rot), w55-ref (grün), w110-ref (blau)*

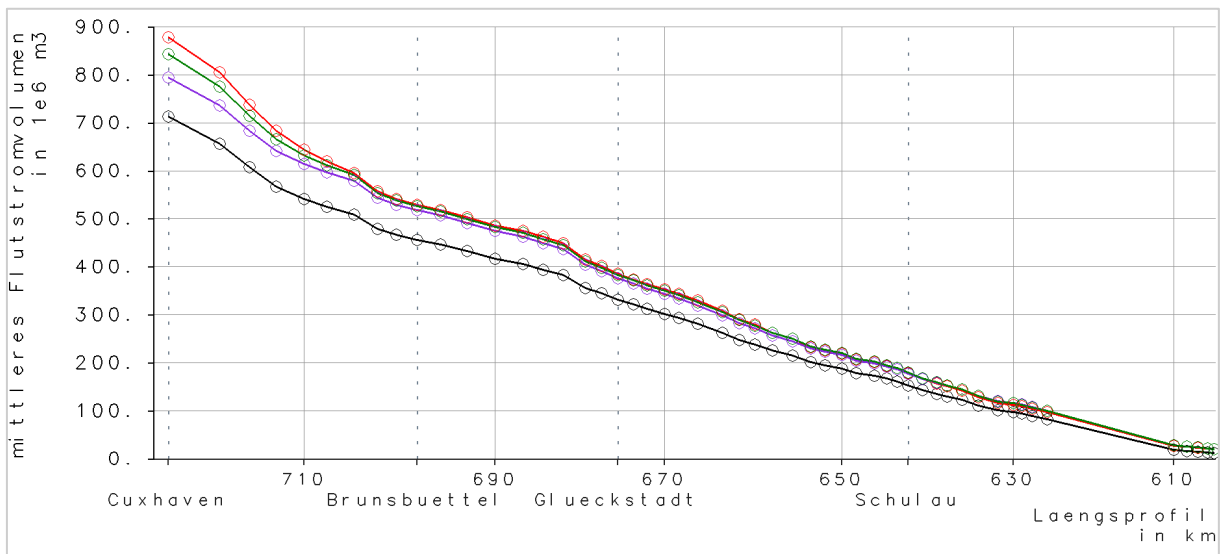


Bild 170: *QfMit SN2013 an definierten Querschnitten entlang der Elbe: ref (schwarz), f110 (rot), w55e (dunkelgrün), w110e (lila)*

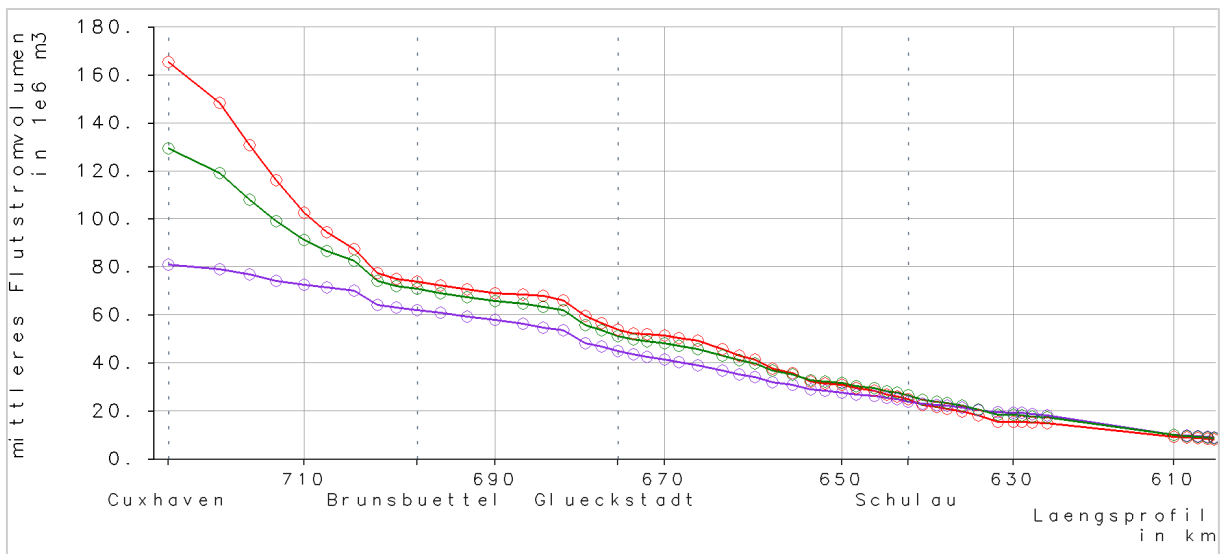


Bild 171: *Differenzen QfMit SN2013 an definierten Querschnitten entlang der Elbe: f110-ref (rot), w55e-ref (dunkelgrün), w110e-ref (lila)*

3.6.2 SF2013

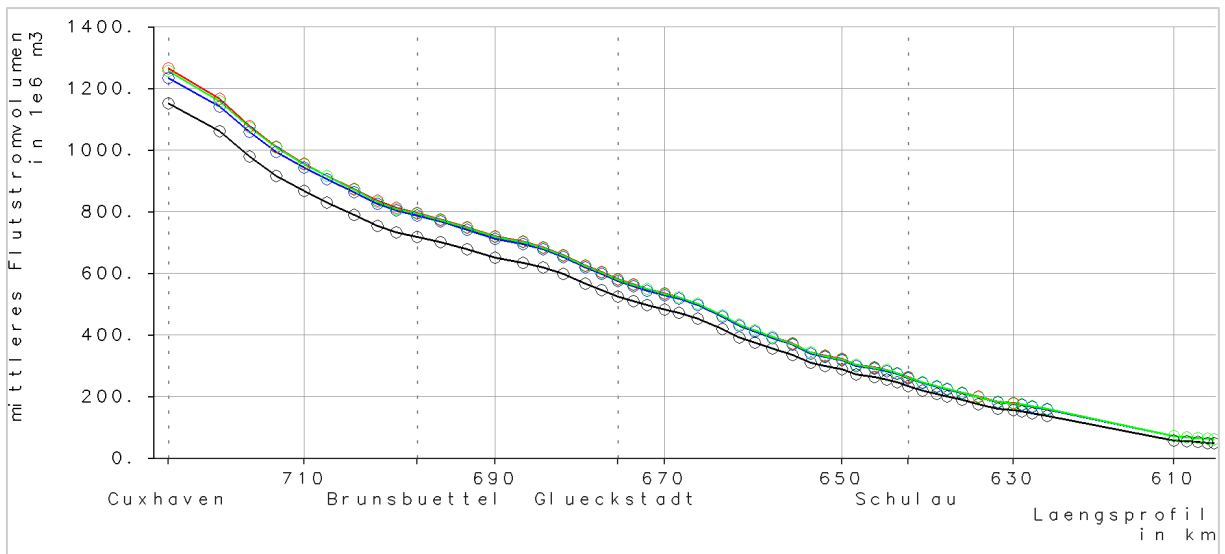


Bild 172: *QfTide bei SF2013 an definierten Querschnitten entlang der Elbe: ref (schwarz), f110 (rot), w55 (grün), w110 (blau)*

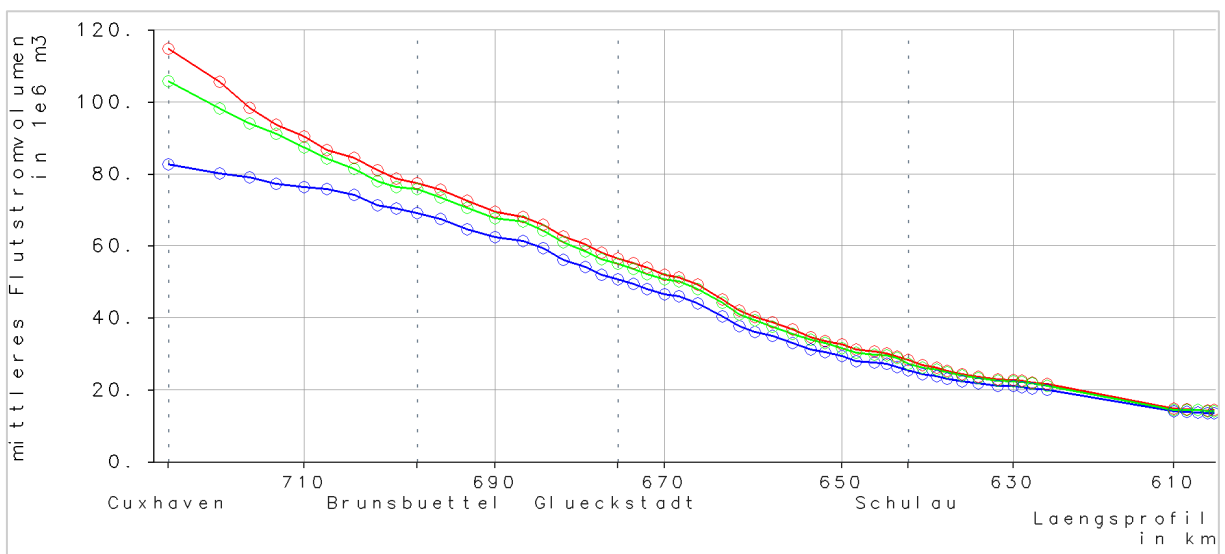


Bild 173: *Differenzen QfTide bei SF2013 an definierten Querschnitten entlang der Elbe: f110-ref (rot), w55-ref (grün), w110-ref (blau)*

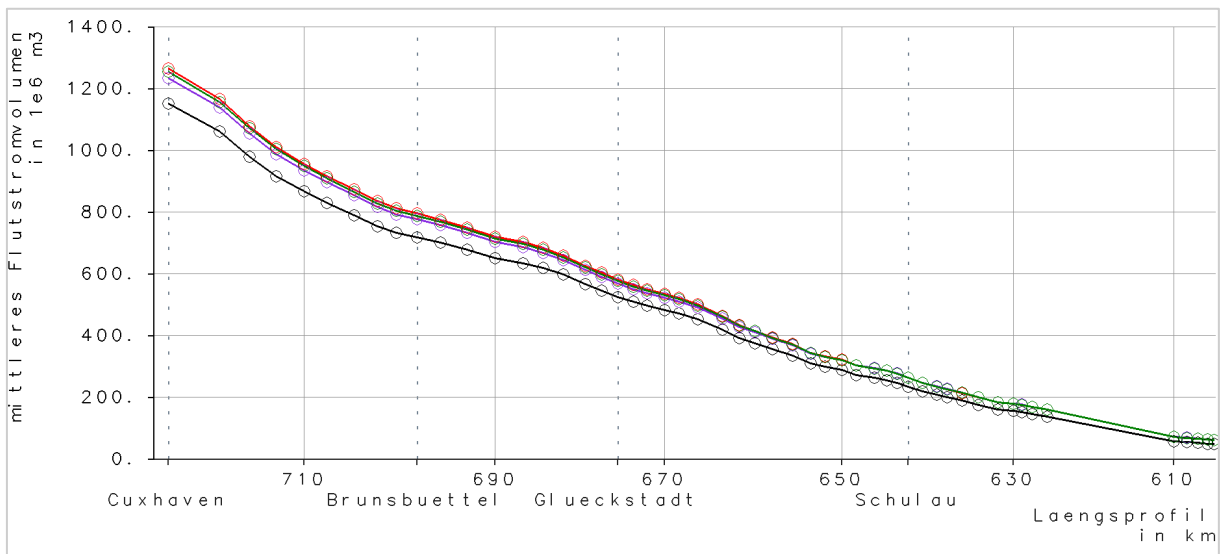


Bild 174: *QfTide bei SF2013 an definierten Querschnitten entlang der Elbe: ref (schwarz), f110 (rot), w55e (dunkelgrün), w110e*

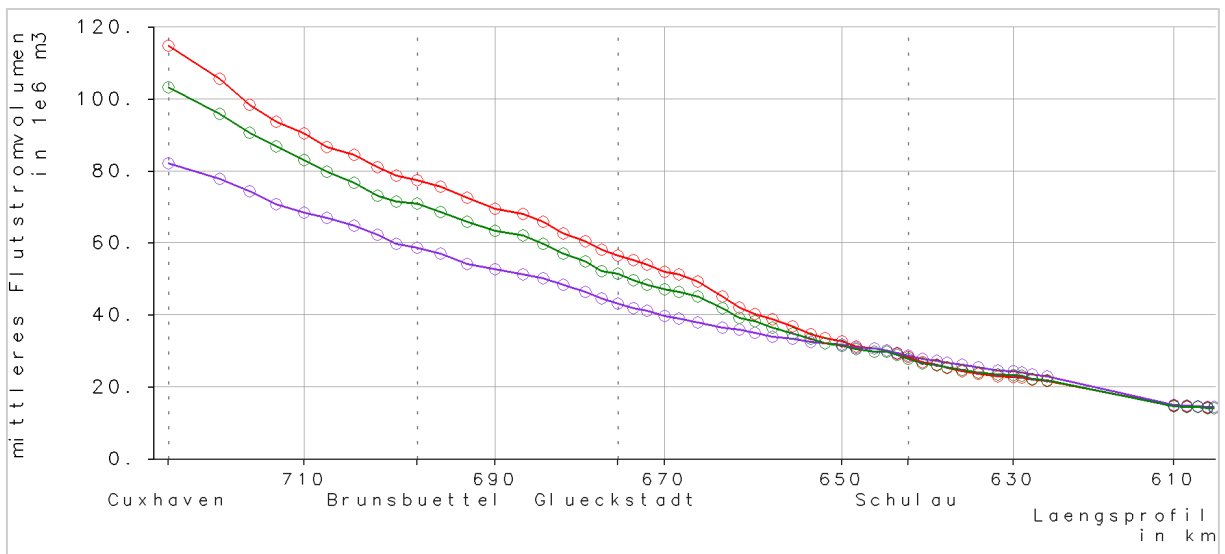


Bild 175: *Differenzen QfTide bei SF2013 an definierten Querschnitten entlang der Elbe: f110-ref (rot), w55e-ref (dunkelgrün), w110e-ref (lila)*

3.6.3 SFEH

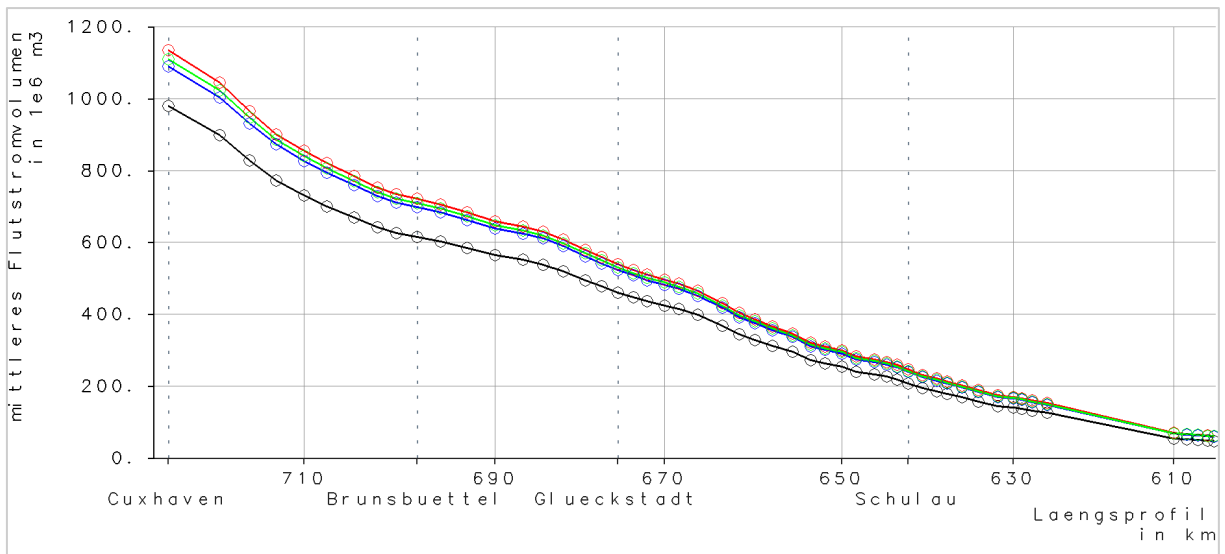


Bild 176: *QfTide bei SFEH an definierten Querschnitten entlang der Elbe: ref (schwarz), f110 (rot), w55 (grün), w110 (blau)*

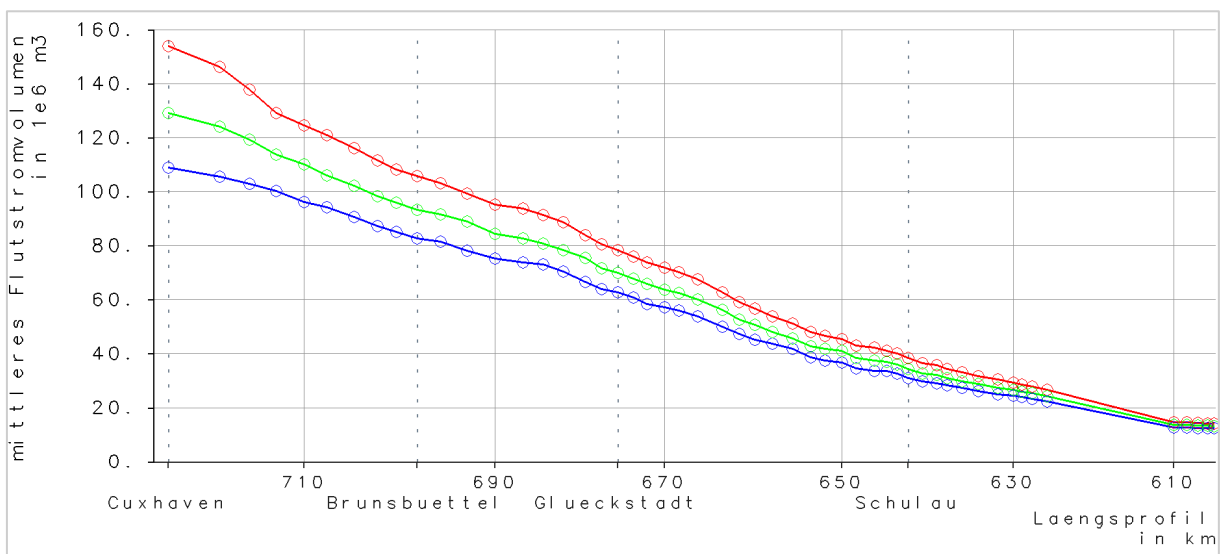


Bild 177: *Differenzen QfTide bei SFEH an definierten Querschnitten entlang der Elbe: f110-ref (rot), w55-ref (grün), w110-ref (blau)*

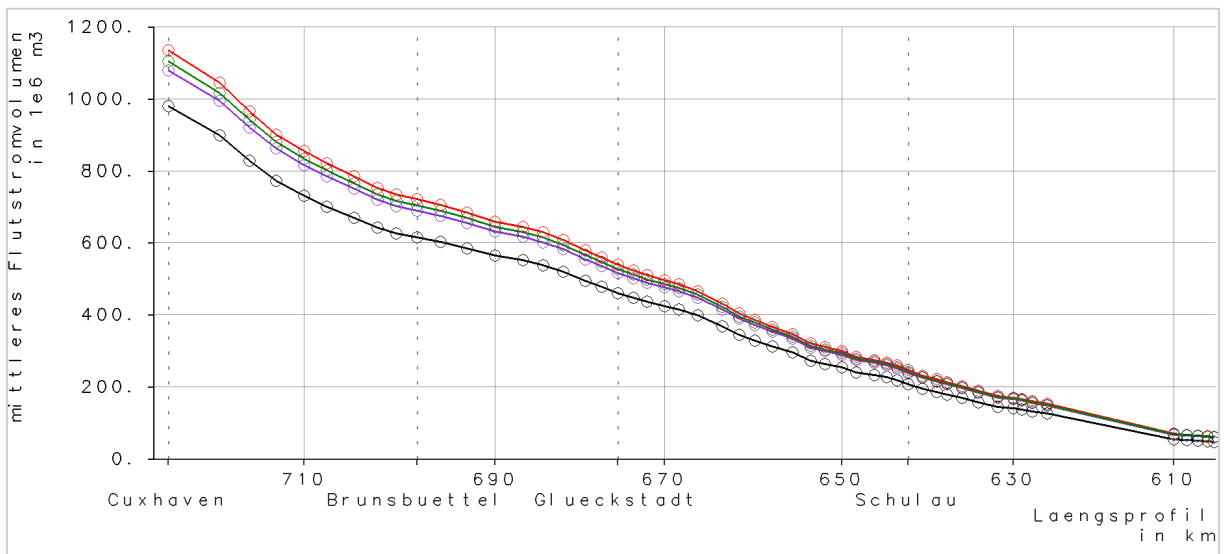


Bild 178: *QfTide bei SFEH an definierten Querschnitten entlang der Elbe: ref(schwarz), f110(rot), w55e (dunkelgrün), w110e*

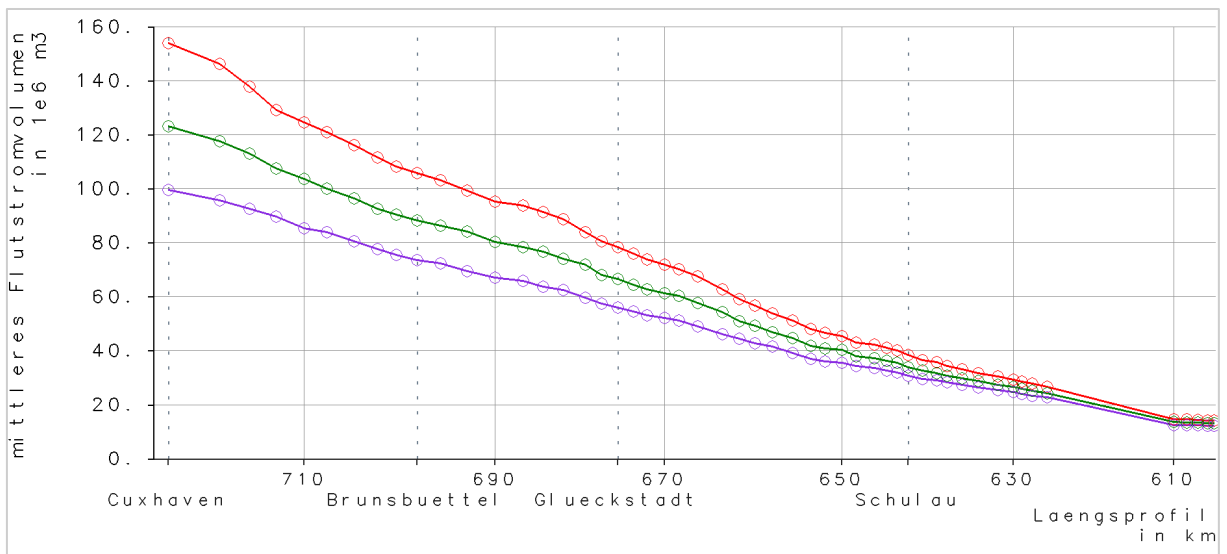


Bild 179: *Differenzen QfTide bei SFEH an definierten Querschnitten entlang der Elbe: f110-ref (rot), w55e-ref (dunkelgrün), w110e-ref (lila)*

3.7 Durchflussfläche

Die Durchflussfläche an den definierten Kantenflächen (siehe Bild 16) bei mittlerem Flut-Volumenstrom ist entlang des Elbe-Längsprofils dargestellt. Bei den Sturmflutereignissen handelt es sich dabei um den Flut-Volumenstrom der höchsten Sturmfluttide und bei dem Spring-Nipp-Zeitraum um die mittlere Durchflussfläche der analysierten Tiden. Es wird die absolute Fläche, sowie die relative Änderung zum Referenzzustand dargestellt.

3.7.1 SN2013

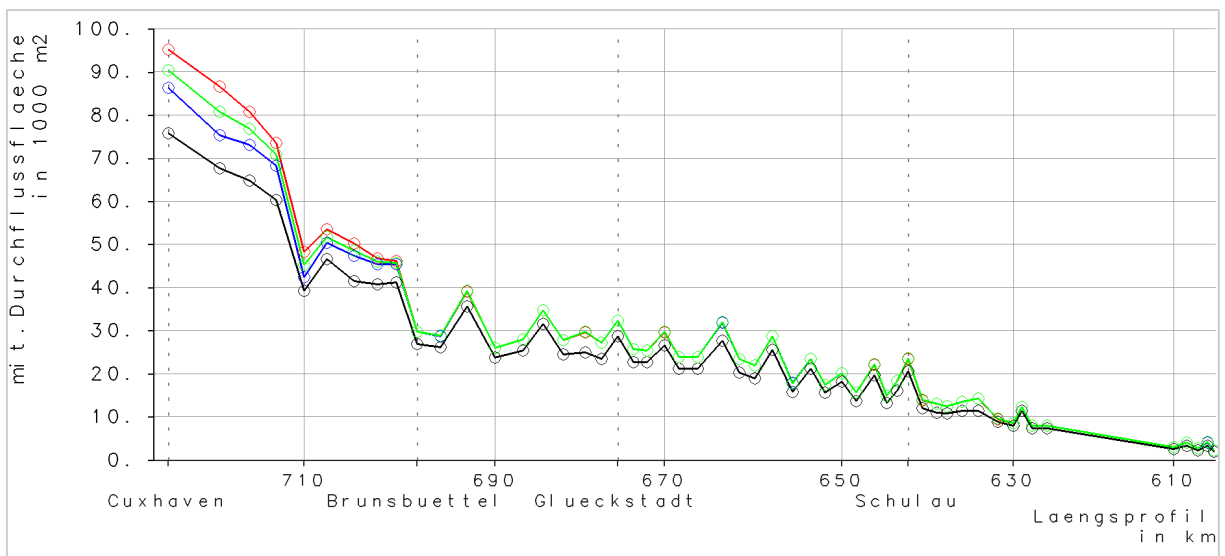


Bild 180: MHTrKa bei SN2013 an definierten Querschnitten entlang der Elbe: ref (schwarz), f110 (rot), w55 (grün), w110 (blau)

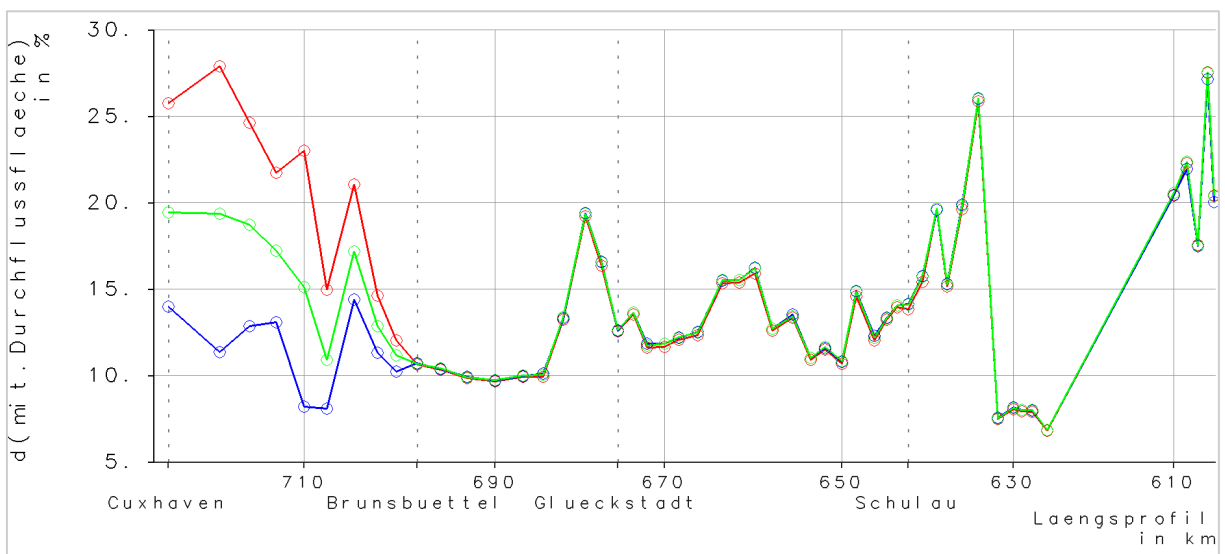


Bild 181: Rel. Änderung MHTrKa bei SN2013 an definierten Querschnitten entlang der Elbe: (f110-ref)/ref (rot), (w55-ref)/ref (grün), (w110-ref)/ref (blau)

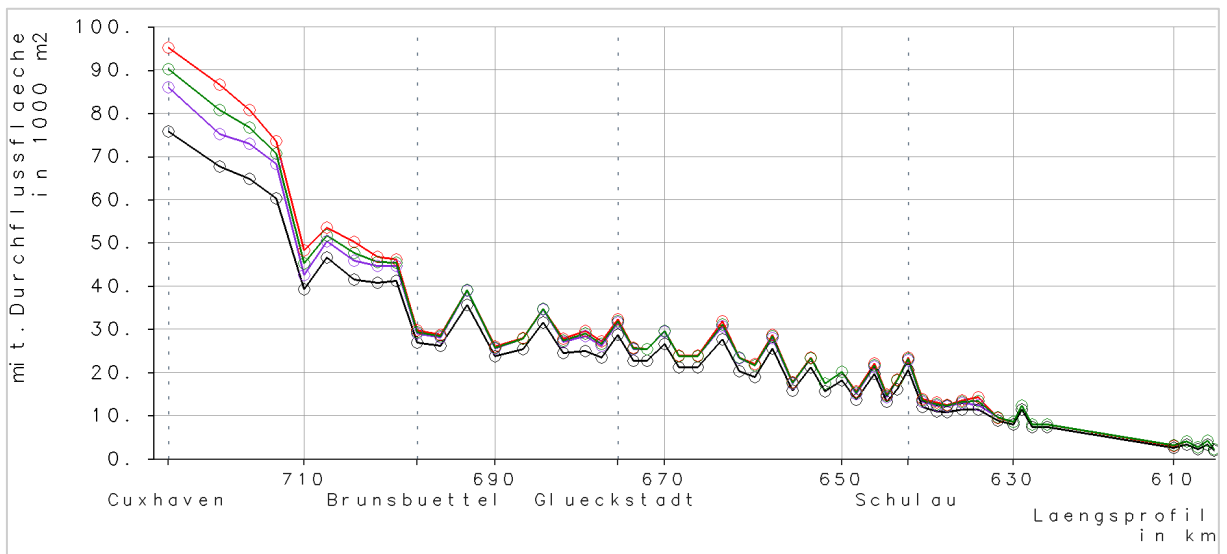


Bild 182: MHTrKa bei SN2013 an definierten Querschnitten entlang der Elbe: ref (schwarz), f110 (rot), w55e (dunkelgrün), w110e (lila)

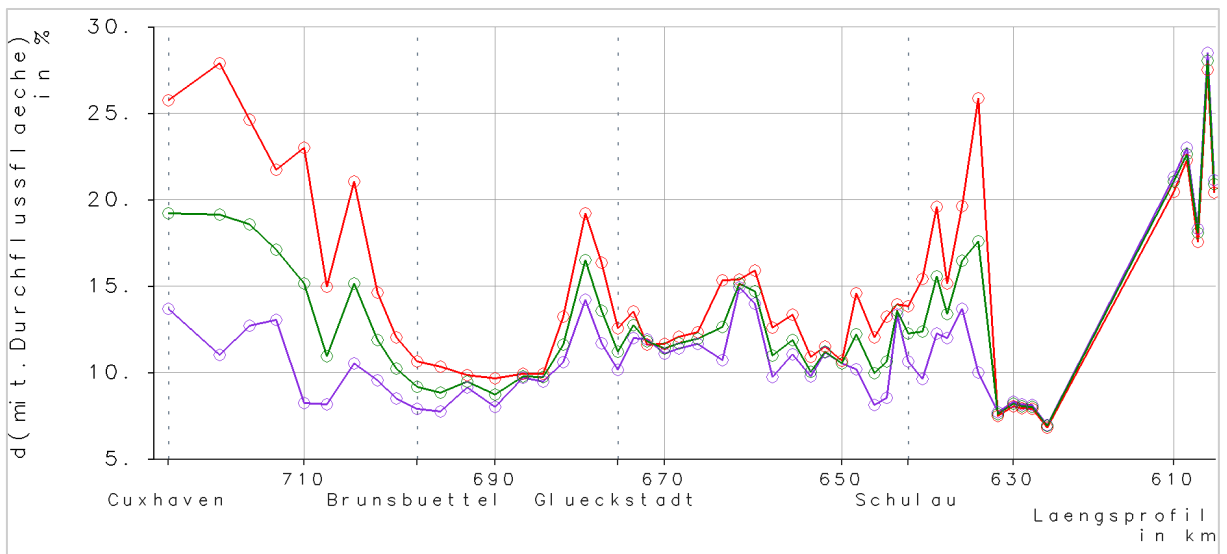


Bild 183: Rel. Änderung MHTrKa bei SN2013 an definierten Querschnitten entlang der Elbe: (f110-ref)/ref (rot), (w55e-ref)/ref (dunkelgrün), (w110e-ref)/ref (lila)

3.7.2 SF2013

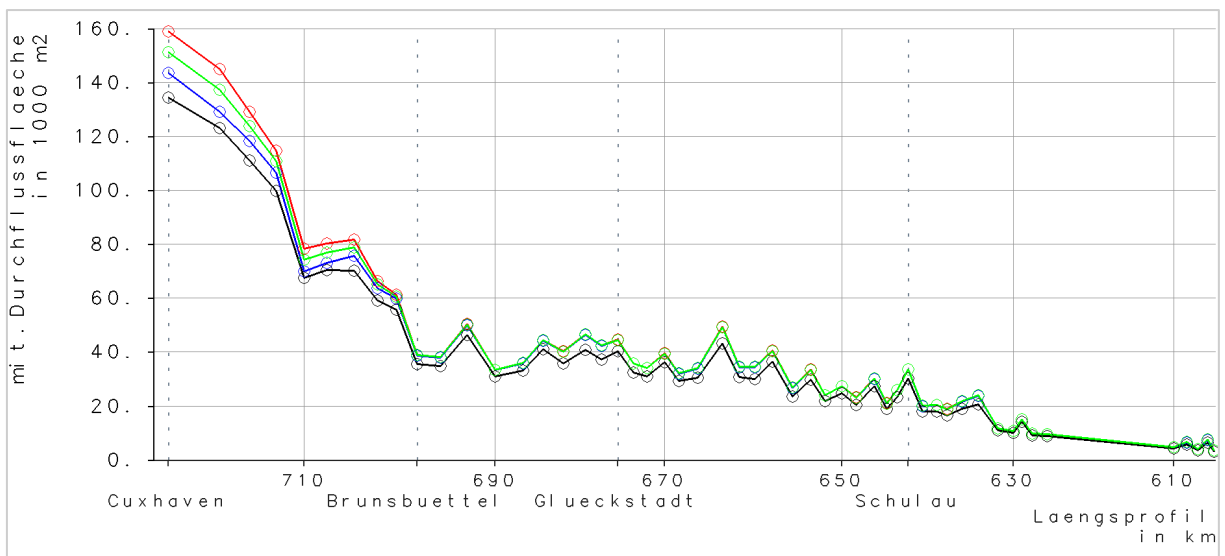


Bild 184: MHTrKa bei SF2013 an definierten Querschnitten entlang der Elbe: ref (schwarz), f110 (rot), w55 (grün), w110 (blau)

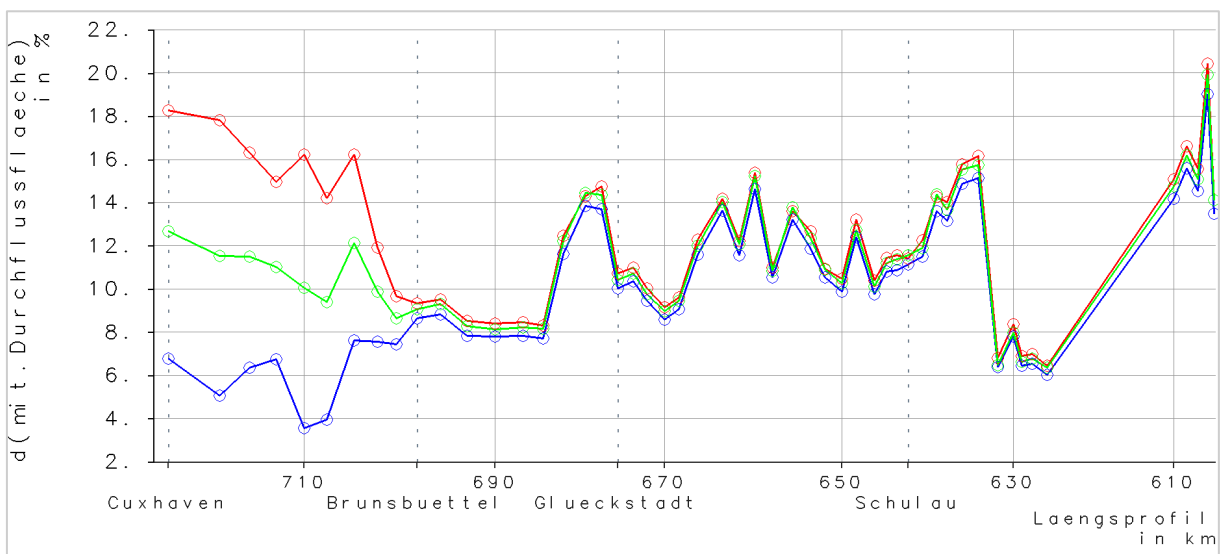


Bild 185: Rel. Änderung MHTrKa bei SF2013 an definierten Querschnitten entlang der Elbe: (f110-ref)/ref (rot), (w55-ref)/ref (grün), (w110-ref)/ref (blau)

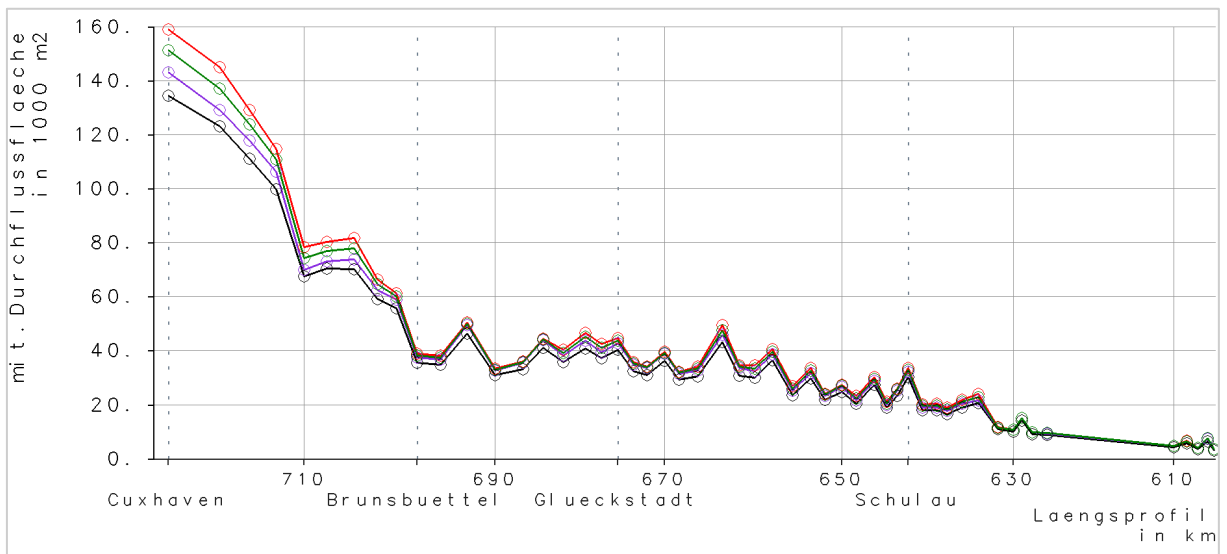


Bild 186: MHTrKa bei SF2013 an definierten Querschnitten entlang der Elbe: ref (schwarz), f110 (rot), w55e (dunkelgrün), w110e (lila)

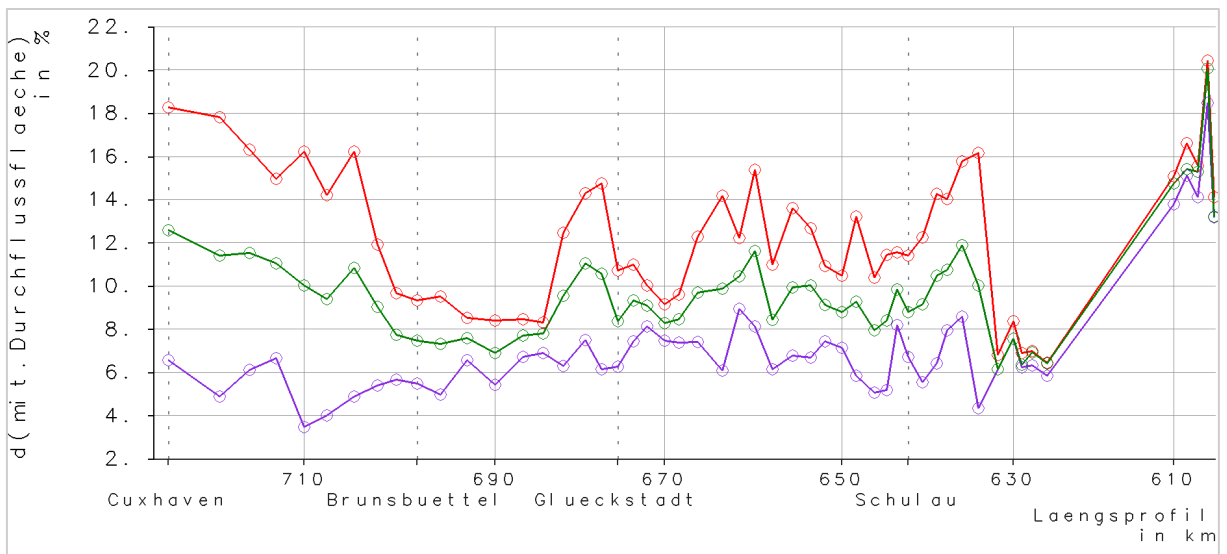


Bild 187: Rel. Änderung MHTrKa bei SF2013 Änderung an definierten Querschnitten entlang der Elbe: (f110-ref)/ref (rot), (w55e-ref)/ref (dunkelgrün), (w110e-ref)/ref (lila)

3.7.3 SFEH

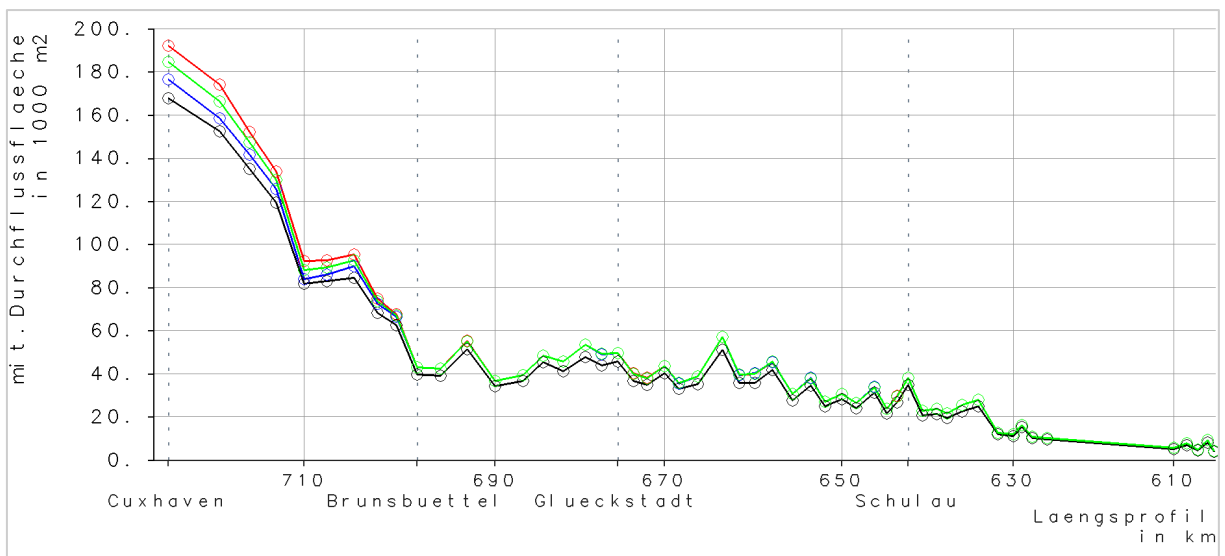


Bild 188: MHTrKa bei SFEH an definierten Querschnitten entlang der Elbe: ref (schwarz), f110 (rot), w55 (grün), w110 (blau)

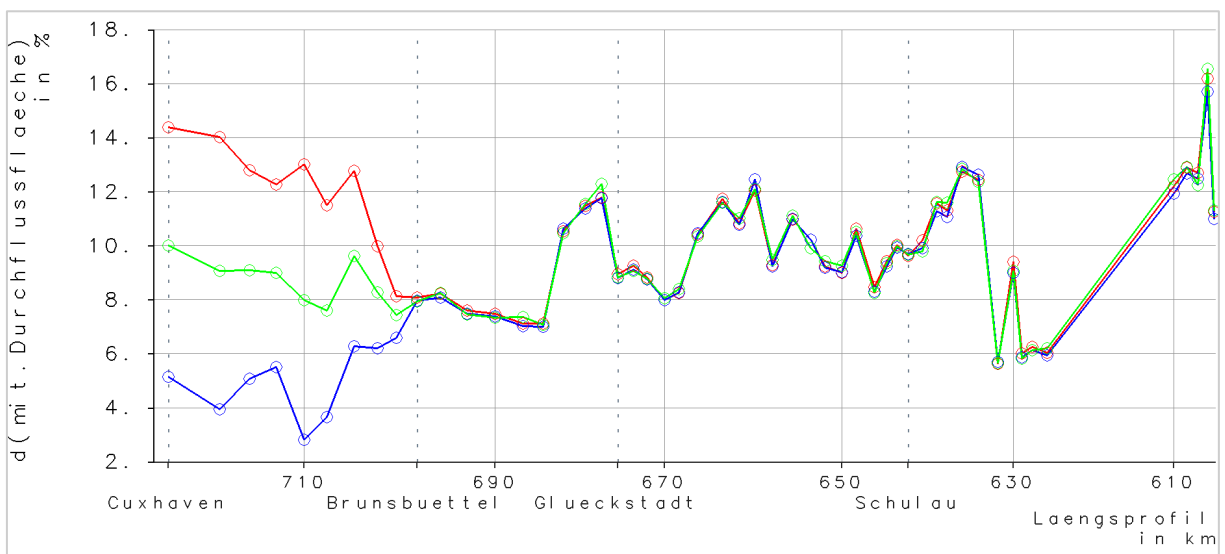


Bild 189: Rel. Änderung MHTrKa bei SFEH an definierten Querschnitten entlang der Elbe: (f110-ref)/ref (rot), (w55-ref)/ref (grün), (w110-ref)/ref (blau)

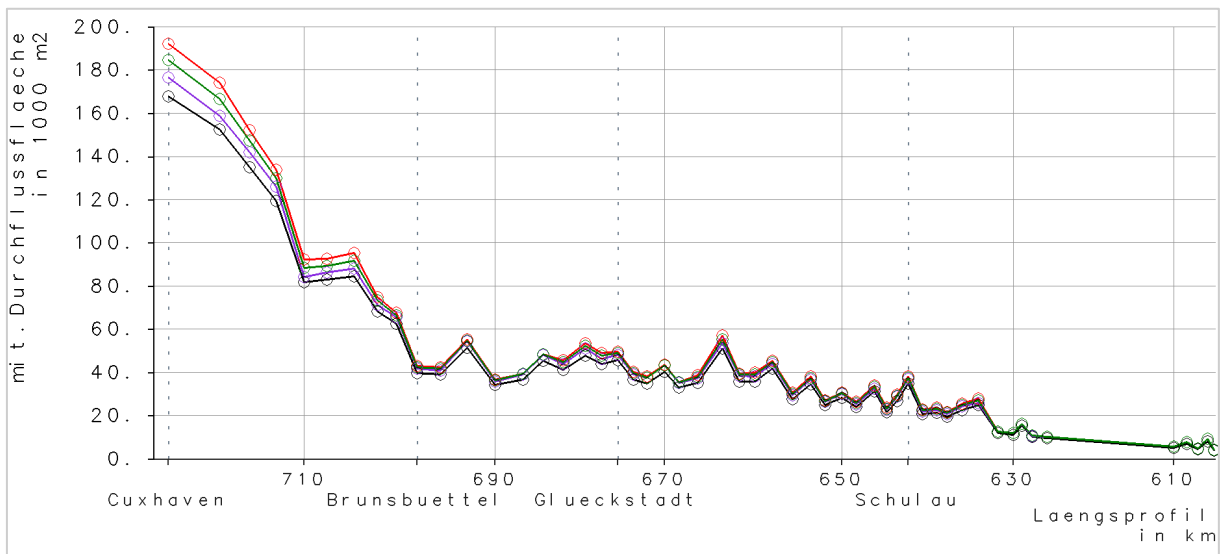


Bild 190: MHTrKa bei SFEH an definierten Querschnitten entlang der Elbe: ref (schwarz), f110 (rot), w55e (dunkelgrün), w110e (lila)

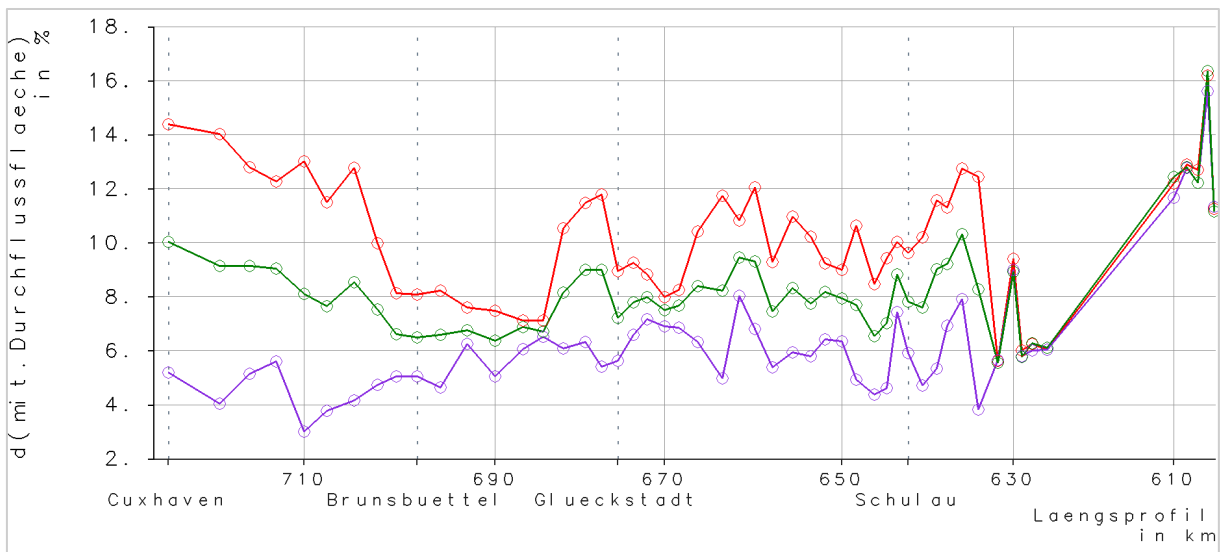


Bild 191: Rel. Änderung MHTrKa bei SFEH an definierten Querschnitten entlang der Elbe: (f110-ref)/ref (rot), (w55e-ref)/ref (dunkelgrün), (w110e-ref)/ref (lila)

3.8 Intertidale Fläche

Die intertidale Fläche, d.h. die Wasserfläche zwischen MTnw und MThw innerhalb der definierten Polygone (siehe Bild 16) ist entlang des Elbe-Längsprofils dargestellt. Die Größe der intertidalen Fläche entspricht in etwa der Größe der Wattfläche. Da sich diese Fläche auf das MThw und das MTnw bezieht, kann diese Größe nur für die untersuchten mittleren Tiden im Spring-Nipp-Zeitraum (SN2013) ausgewertet werden. Da das Tnw vor dem HW bei Sturmfluten meist stark erhöht ist, ist die Differenz zwischen der Wasserfläche bei Tnw und Thw (bzw. HW) bei diesen Ereignissen geringer. Diese Fläche zwischen dem Sturmflutscheitel (HW) und dem vorangehenden Tnw wird im Folgenden dennoch dargestellt und als sturmflutspezifische intertidale Fläche bezeichnet. Es werden die absoluten Größen der intertidalen Fläche und der sturmflutspezifischen intertidalen Fläche bei den unterschiedlichen untersuchten Szenarien, sowie die relativen Änderungen zum Referenzzustand (ref) dargestellt.

3.8.1 SN2013

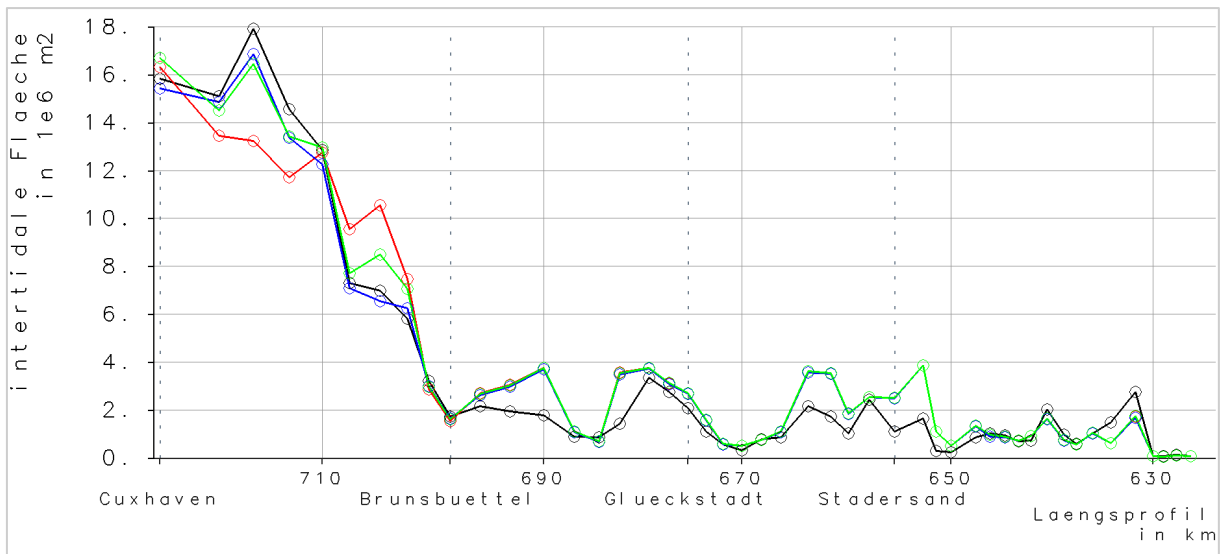


Bild 192: Intertidale Fläche bei SN2013 innerhalb definierter Polygone entlang der Elbe: ref (schwarz), f110 (rot), w55 (grün), w110 (blau)

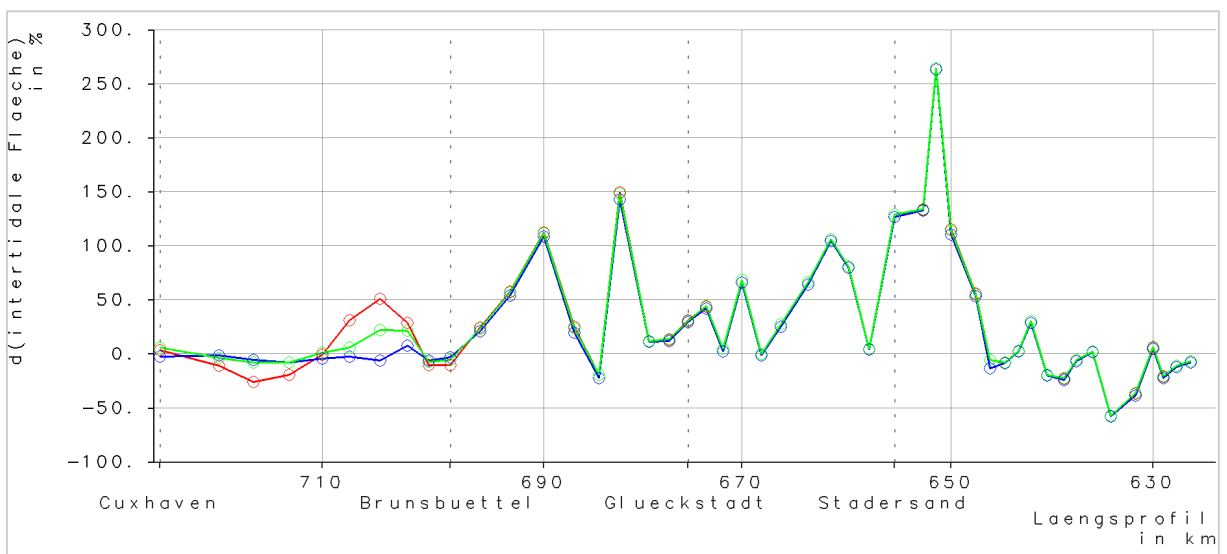


Bild 193: Rel. Änderung der intertidalen Fläche bei SN2013 innerhalb definierter Polygone entlang der Elbe: (f110-ref)/ref (rot), (w55-ref)/ref (grün), (w110-ref)/ref (blau)

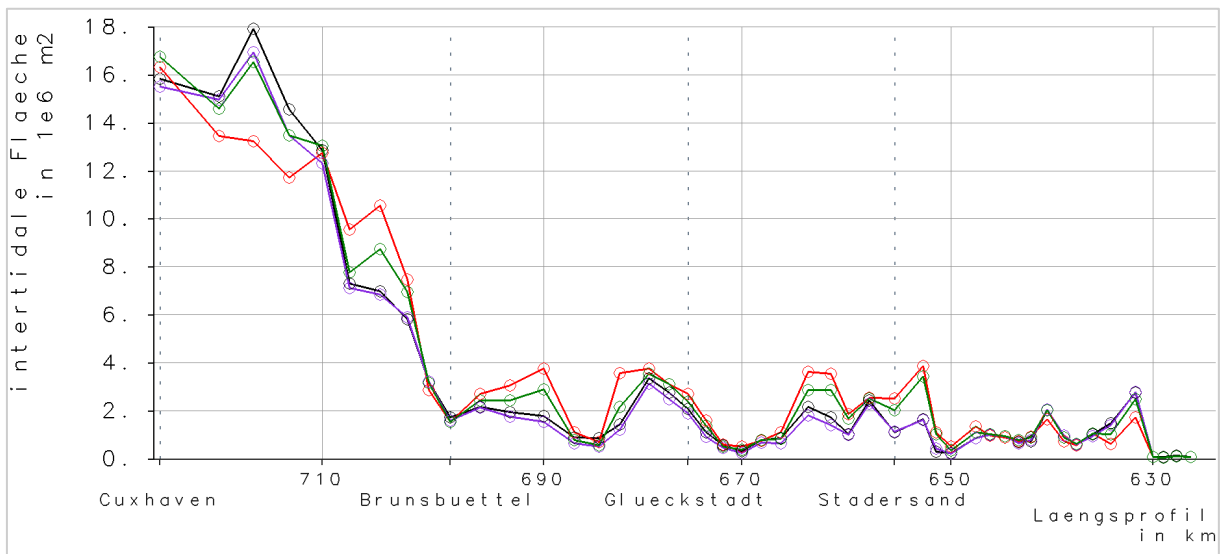


Bild 194: Intertidale Fläche bei SN2013 innerhalb definierter Polygone entlang der Elbe: ref (schwarz), f110 (rot), w55e (dunkelgrün), w110e (lila)

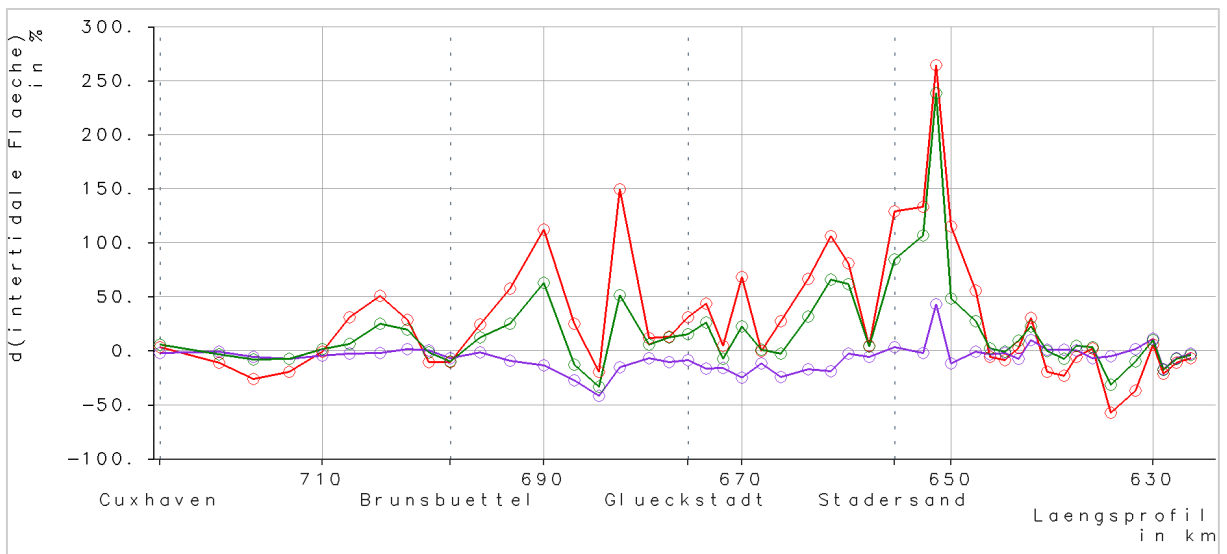


Bild 195: Rel. Änderung der intertidalen Fläche bei SN2013 innerhalb definierter Polygone entlang der Elbe: (f110-ref)/ref (rot), (w55e-ref)/ref (grün), (w110e-ref)/ref (blau)

3.8.2 SF2013

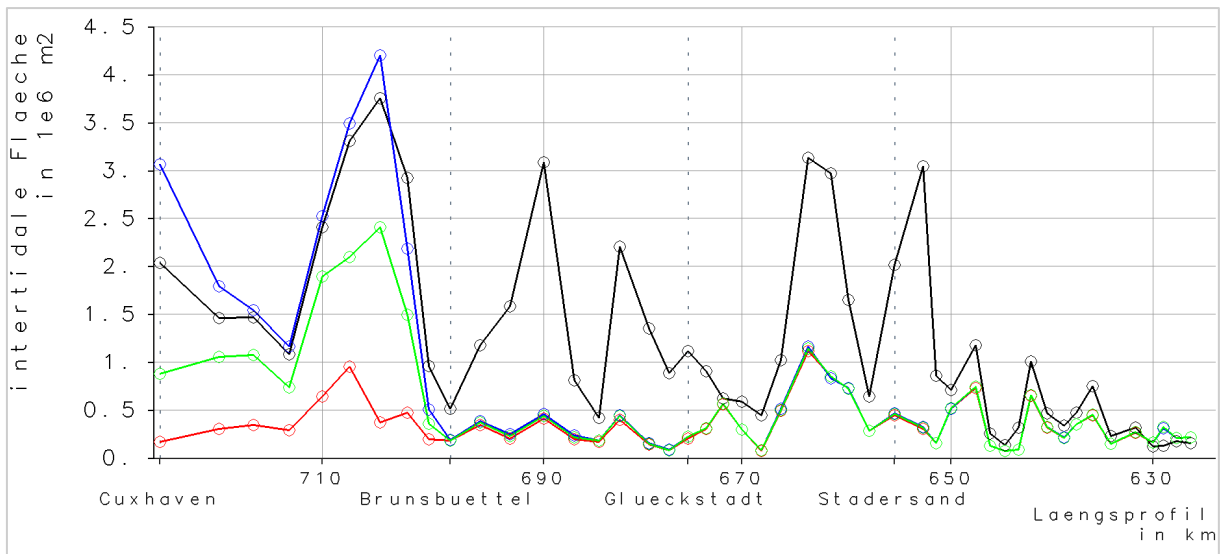


Bild 196: Sturmflutspezifische intertidale Fläche bei SF2013 innerhalb definierter Polygone entlang der Elbe: ref (schwarz), f110 (rot), w55 (grün), w110 (blau)

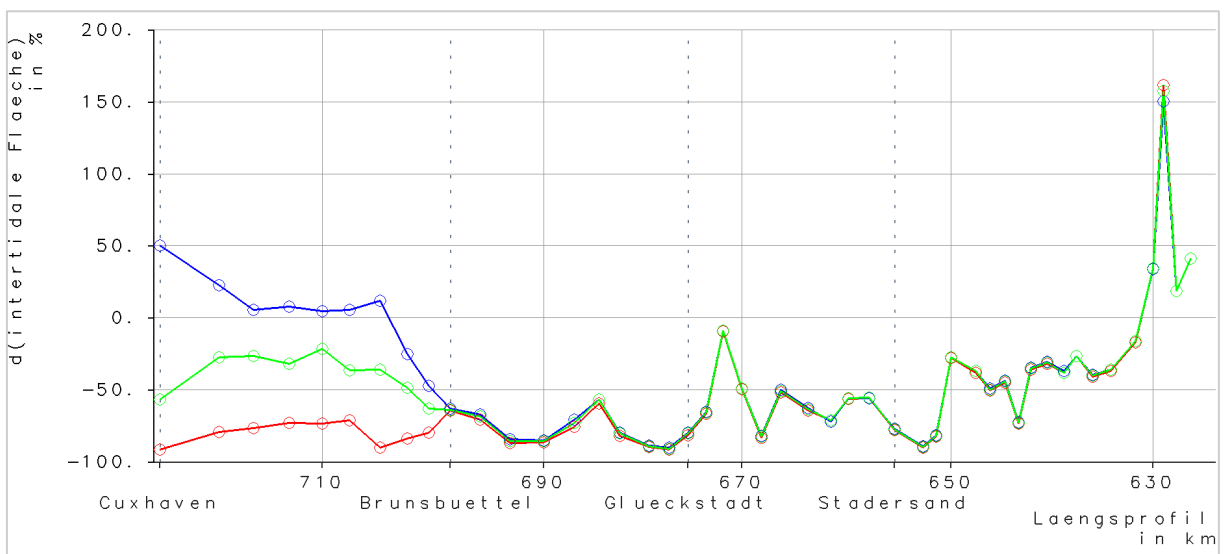


Bild 197: Rel. Änderung der sturmflutspezifischen intertidalen Fläche bei SF2013 innerhalb definierter Polygone entlang der Elbe: (f110-ref)/ref (rot), (w55-ref)/ref (grün), (w110-ref)/ref (blau)

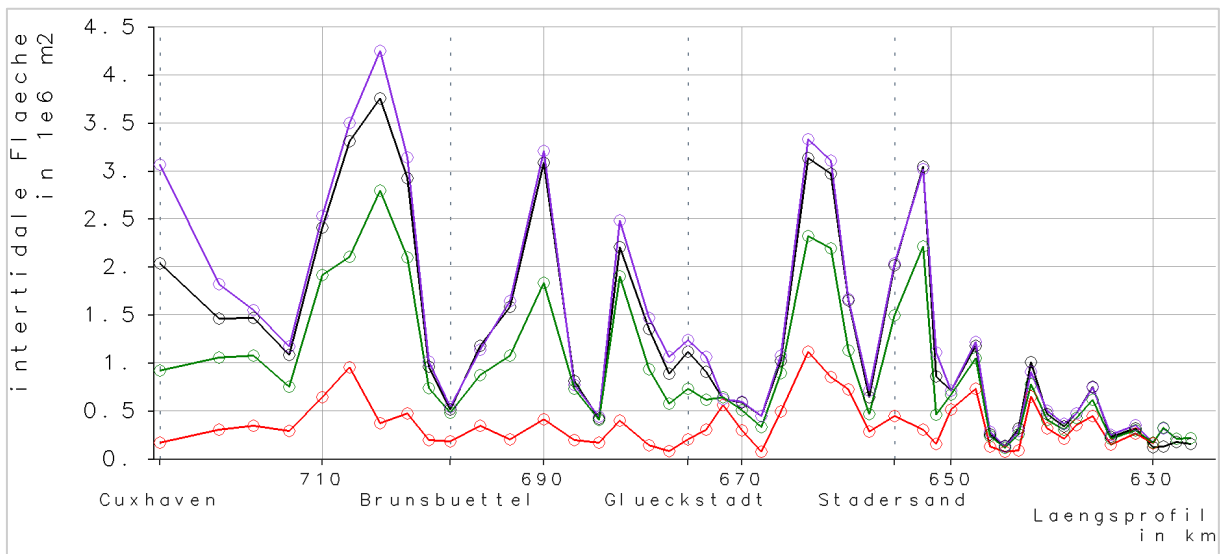


Bild 198: Sturmflutspezifische intertidale Fläche bei SF2013 innerhalb definierter Polygone entlang der Elbe: ref (schwarz), f110 (rot), w55e (dunkelgrün), w110e (lila)

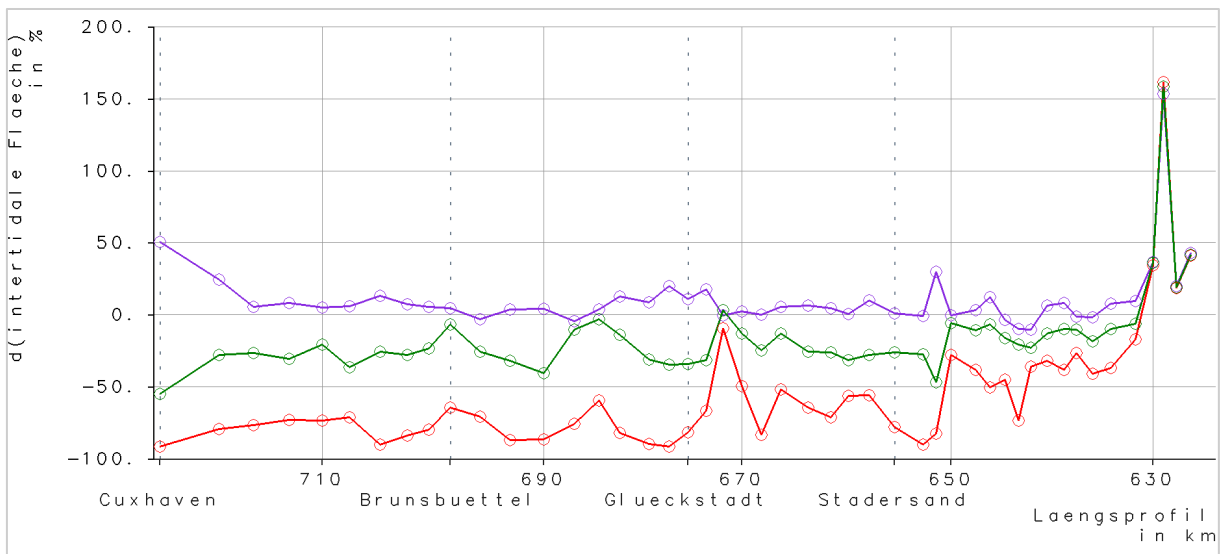


Bild 199: Rel. Änderung der sturmflutspezifischen intertidalen Fläche bei SF2013 innerhalb definierter Polygone entlang der Elbe: (f110-ref)/ref (rot), (w55e-ref)/ref (grün), (w110e-ref)/ref (blau)

3.8.3 SFEH

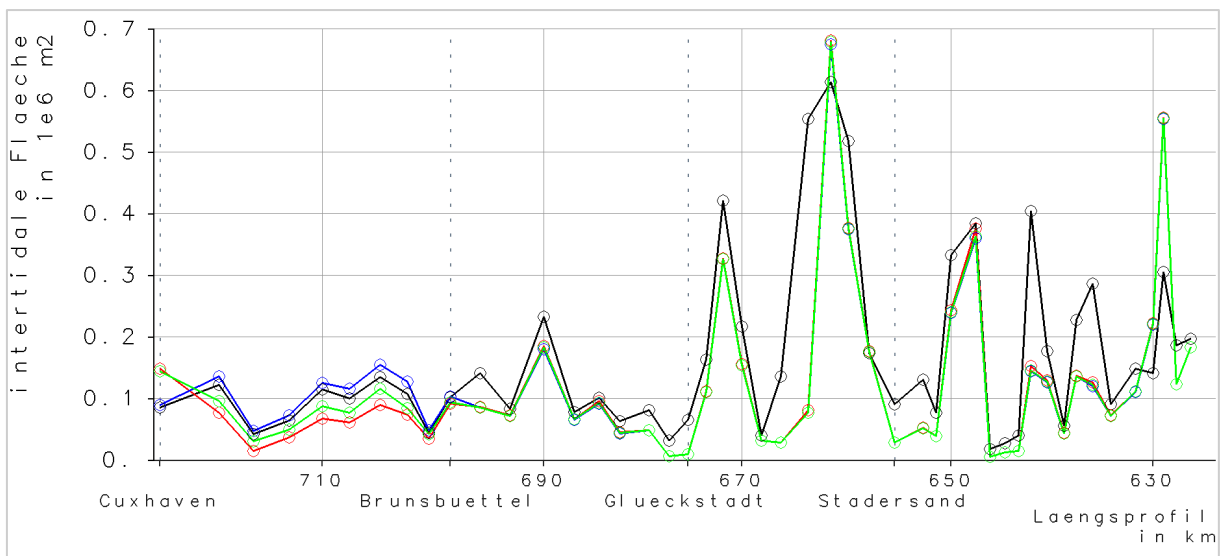


Bild 200: Sturmflutspezifische intertidale Fläche bei SFEH innerhalb definierter Polygone entlang der Elbe: ref (schwarz), f110 (rot), w55 (grün), w110 (blau)

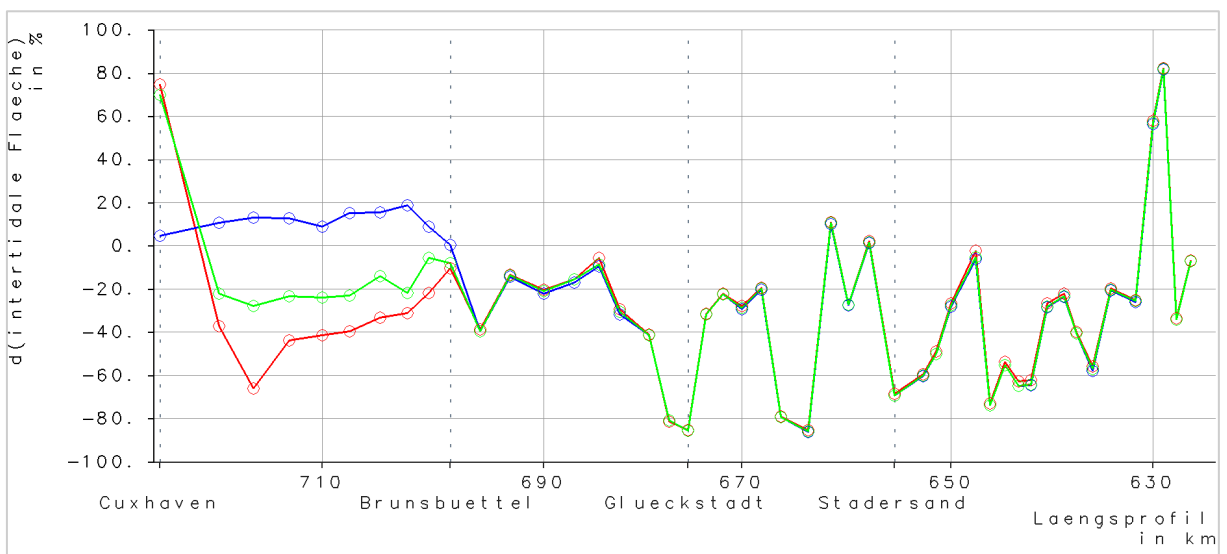


Bild 201: Rel. Änderung der sturmflutspezifischen intertidalen Fläche bei SFEH innerhalb definierter Polygone entlang der Elbe: (f110-ref)/ref (rot), (w55-ref)/ref (grün), (w110-ref)/ref (blau)

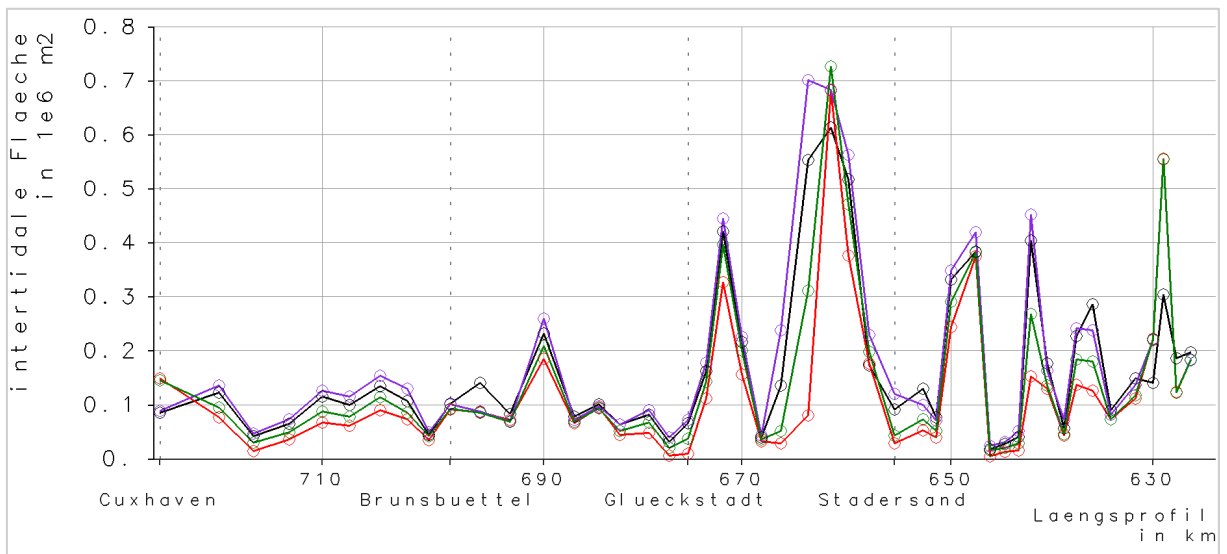


Bild 202: *Sturmflutspezifische intertidale Fläche bei SFEH innerhalb definierter Polygone entlang der Elbe: ref (schwarz), f110 (rot), w55e (dunkelgrün), w110e (lila)*

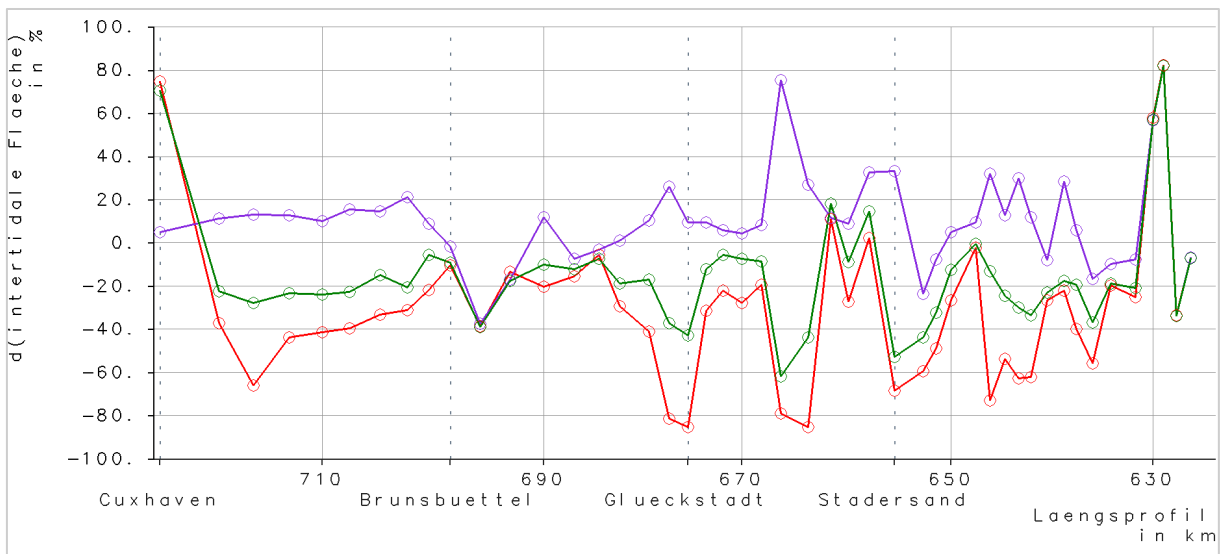


Bild 203: *Rel. Änderung der sturmflutspezifischen intertidalen Fläche bei SFEH innerhalb definierter Polygone entlang der Elbe: (f110-ref)/ref (rot), (w55e-ref)/ref (grün), (w110e-ref)/ref (blau)*

4 Literaturverzeichnis

BAW (2004): Mathematical Model UnTRIM Validation Document. Hg. v. Bundesanstalt für Wasserbau (BAW). BAW. Online verfügbar unter https://wiki.baw.de/downloads/wasserbau/mathematische_verfahren/pdf/Simulationsverfahren_Kueste_validation_document-untrim-2004.pdf.

Becherer, Johannes; Hofstede, Jacobus; Gräwe, Ulf; Purkiani, Kaveh; Schulz, Elisabeth; Burchard, Hans (2018): The Wadden Sea in transition – Consequences of Sea Level Rise. In: *Ocean Dynamics* 68 (1), S. 131–151. DOI: 10.1007/s10236-017-1117-5.

Benninghoff, Markus; Winter, Christian (2019): Recent morphologic evolution of the German Wadden Sea. In: *Scientific reports* 9 (1), S. 9293. DOI: 10.1038/s41598-019-45683-1.

Bollmeyer, Christoph; Keller, J. D.; Ohlwein, Christian; Wahl, S.; Crewell, Susanne; Friederichs, P. et al. (2015): Towards a high-resolution regional reanalysis for the European CORDEX domain. In: *Q.J.R. Meteorol. Soc.* 141 (686), S. 1–15. DOI: 10.1002/qj.2486.

Bosboom, Judith; Stive, Marcel J.F. (2015): Coastal Dynamics I lecture notes CIE4305. Delft: Delft University of Technology Press.

BSH (2020): Sturmfluten. Bundesamt für Seeschifffahrt und Hydrographie. Online verfügbar unter https://www.bsh.de/DE/THEMEN/Wasserstand_und_Gezeitzen/Sturmfluten/sturmfluten_node.html, zuletzt geprüft am 12.05.2020.

Casulli, Vincenzo (2008): A high-resolution wetting and drying algorithm for free-surface hydrodynamics. In: *Int. J. Numer. Meth. Fluids* 60 (4), S. 391–408. DOI: 10.1002/fld.1896.

Dissanayake, Pushpa Kumara (2012): Modelling morphological response of large tidal inlet systems to sea level rise. Dissertation: submitted in fulfillment of the requirements of the Board for Doctorates of Delft University of Technology and of the Academic Board of the UNESCO-IHE Institute for Water Education for the degree of doctor to be defended in public on Monday, 12 December 2011 at 15:00 hours in Delft, the Netherlands. Boca Raton, Fla.: CRC Press, Taylor & Francis Group.

Friedrichs, Carl T. (2011): Tidal Flat Morphodynamics: A Synthesis: Elsevier Inc.

Gaslikova, Lidia; Grabemann, Iris; Groll, Nikolaus (2013): Changes in North Sea storm surge conditions for four transient future climate realizations. In: *Nat Hazards* 66 (3), S. 1501–1518. DOI: 10.1007/s11069-012-0279-1.

Gerber, Marie; Ganske, Anette; Müller-Navarra, Sylvain; Rosenhagen, Gudrun (2016): Categorisation of Meteorological Conditions for Storm Tide Episodes in the German Bight. In: *metz* 25 (4), S. 447–462. DOI: 10.1127/metz/2016/0660.

Hagen, Robert; Freund, Janina; Plüß, Andreas; Ihde, Romina (2019): Validierungsdokument EasyGSH-DB Nordseemodell. Teil. UnTRIM2 – SediMorph – UnK. Hg. v. BAW.

IPCC (2019): IPCC Special Report on the Ocean and Cryosphere in a Changing Climate. in press. Hg. v. H.-O. Pörtner, D.C. Roberts, V. Masson-Delmotte, P. Zhai, M. Tignor, E. Poloczanska, K. Mintenbeck, M. Nicolai, A. Okem, J. Petzold, B. Rama, N. Weyer.

Jensen, Jürgen; Mundersbach, Christoph; Müller-Navarra, Sylvain H.; Bork, Ingrid; Koziar, Christian; Renner, Volker (2006): Modellgestützte Untersuchungen zu Sturmfluten mit sehr geringen Eintrittswahrscheinlichkeiten an der deutschen Nordseeküste. In: Die Küste 71, S. 123–167.

Kapitza, Hartmut; Eppel, D. P. (2000): Simulating morphodynamical processes on a parallel system. In: Estuarine and Coastal Modeling, S. 1182–1191.

Kremp, Christine; Rudolph, Elisabeth; Sehili, Aissa (2012): OPTEL-C: Entwicklung eines operativen Tidemodells der Elbe sowie einer Modellkopplung mit dem BSH-Vorhersagemodell der Nordsee. In: Die Küste 79, S. 141–168.

Lang, Günther (2003): Analyse von HN-Modell-Ergebnissen im Tidegebiet. In: Mitteilungsblatt der Bundesanstalt für Wasserbau 86, S. 101–108.

LSBG (2012): Ermittlung des Sturmflutbemessungswasserstandes für den öffentlichen Hochwasserschutz in Hamburg. Landesbetrieb Straßen, Brücken und Gewässer. Hamburg (Berichte des Landesbetriebes Straßen, Brücken und Gewässer, 12).

Milbradt, Peter; Jennifer Valerius; Zeiler, Manfred (2015): Das Funktionale Bodenmodell: Aufbereitung einer konsistenten Datenbasis für die Morphologie und Sedimentologie. In: Die Küste 83, S. 19–38.

Rockel, Burkhard; Will, Andreas; Hense, Andreas (2008): The Regional Climate Model COSMO-CLM (CCLM). In: metz 17 (4), S. 347–348. DOI: 10.1127/0941-2948/2008/0309.

Röckner, E.; Bäuml, G.; Bonaventura, L.; Brokopf, R.; Esch, M.; Giorgetta, M. et al. (2003): The atmospheric general circulation model ECHAM5. Part I: model description. MPI - rep 349. Hg. v. Max Planck Institute for Meteorology. Max Planck Institute for Meteorology. Online verfügbar unter https://www.mpimet.mpg.de/fileadmin/models/echam/mpi_report_349.pdf.

Rudolph, Elisabeth (2014): Storm Surges in the Elbe, Jade-Weser and Ems Estuaries. In: Die Küste 81.

Rudolph, Elisabeth; Brodhagen, Tabea; Fery, Natacha; Gaslikova, Lidia; Grabemann, Iris; Meyer, Elke et al. (submitted): Analyse extremer Sturmfluten an der deutschen Nordseeküste und ihrer möglichen Verstärkung. In: Die Küste.

S. D. Smith; E. G. Banke (1975): Variation of the surface drag coefficient with wind speed. In: Q.J.R. Meteorol. Soc. 101, S. 656–673.

Sehili, Aissa; Lang, Günther; Lippert, Christoph (2014): High-resolution subgrid models. Background, grid generation, and implementation. In: Ocean Dynamics 64 (4), S. 519–535. DOI: 10.1007/s10236-014-0693-x.

Siefert, Winfred (1998): Tiden und Sturmfluten in der Elbe und ihren Nebenflüssen. In: Die Küste 60, S. 1–115.

van der Wegen, Mick (2013): Numerical modeling of the impact of sea level rise on tidal basin morphodynamics. In: J. Geophys. Res. Earth Surf. 118 (2), S. 447–460. DOI: 10.1002/jgrf.20034.

van Goor (2001): Influence of relative sea level rise on coastal inlets and tidal basins. Are the Dutch Wadden capable of following the rising sea level? DELFT HYDRAULICS.

Wahl, Sabrina; Bollmeyer, Christoph; Crewell, Susanne; Figura, Clarissa; Friederichs, Petra; Hense, Andreas et al. (2017): A novel convective-scale regional reanalysis COSMO-REA2. Improving the representation of precipitation. In: metz 26 (4), S. 345–361. DOI: 10.1127/metz/2017/0824.

Zijl, Firmijn; Sumihar, Julius; Verlaan, Martin (2015): Application of data assimilation for improved operational water level forecasting on the northwest European shelf and North Sea. In: Ocean Dynamics 65 (12), S. 1699–1716. DOI: 10.1007/s10236-015-0898-7.

Zijl, Firmijn; Verlaan, Martin; Gerritsen, Herman (2013): Improved water-level forecasting for the Northwest European Shelf and North Sea through direct modelling of tide, surge and non-linear interaction. In: Ocean Dynamics 63 (7), S. 823–847. DOI: 10.1007/s10236-013-0624-2.

5 Glossar

Begriff	Definition	Quelle
Abfluss	Wasservolumen, das einen bestimmten Querschnitt in der Zeiteinheit durchfließt und einem Einzugsgebiet zugeordnet ist.	DIN 4049-3 2.2.13
Ästuar	Tidenbeeinflusstes Mündungsgebiet eines Flusses.	BMVBS 2012
Bathymetrie	Topographische bzw. morphologische Gestalt von Gewässerbett oder Meeresboden	eigene Definition
DCSMv6FM	Dutch Continental Shelf Model, Version 6, D-Flow FM basiert (Schelfmodell zur Simulation der Hydrodynamik im Bereich des Nordwesteuropäischen Kontinentalschelfs einschließlich der gesamten Nordsee).	eigene Definition
Digitales Geländemodell (DGM)	Datenverarbeitungsgemäße Erfassung der Geländeoberfläche durch die räumlichen Koordinaten einer hinreichenden Menge von Geländepunkten.	FGSV 2012
Dissipation	Übergang einer umwandelbaren Energieform in Wärmeenergie.	eigene Definition
Ebbe	Das Fallen des Wassers vom Tidehochwasser zum folgenden Tideniedrigwasser.	DIN 4049-3 2.4.1.45
Ebbedauer	Zeitspanne von Tidehochwasser bis zum folgenden Tideniedrigwasser.	DIN 4049-3 2.4.2.14
Ebbestrom	Strömung während der Ebbestromdauer, im Allgemeinen seewärts gerichtet.	DIN 4049-3 2.4.3.7
Ebbestromdauer	Zeitspanne zwischen Flutstromkenterpunkt und dem folgenden Ebbestromkenterpunkt.	DIN 4049-3 2.4.3.21
Ebbestromdominanz	Verhältnis von mittlerer bzw. maximaler Flutstromgeschwindigkeit zu mittlerer bzw. maximaler Ebbstromgeschwindigkeit < 1 (Flutstromgeschwindigkeit kleiner als Ebbstromgeschwindigkeit).	eigene Definition
Ebbestromgeschwindigkeit	Bei Ebbestrom gemessene Fließgeschwindigkeit zu einem bestimmten Zeitpunkt.	DIN 4049-3 2.4.3.9
Ebbestromkenterpunkt	Kenterpunkt zwischen Ebbestrom und Flutstrom.	DIN 4049-3 2.4.3.17
Ebbestromvolumen	Wasservolumen, das einen Querschnitt während der Ebbestromdauer durchfließt.	DIN 4049-3 2.4.3.23

Flut	Das Steigen des Wassers vom Tideniedrigwasser zum folgenden Tidehochwasser.	DIN 4049-3 2.4.1.44
Flutdauer	Zeitspanne von Tideniedrigwasser bis zum folgenden Tidehochwasser.	DIN 4049-3 2.4.2.13
Flutstrom	Strömung während der Flutstromdauer, im Allgemeinen landwärts gerichtet.	DIN 4049-3 2.4.3.6
Flutstromdauer	Zeitspanne zwischen Ebbestromkenterpunkt und dem folgenden Flutstromkenterpunkt.	DIN 4049-3 2.4.3.20
Flutstromdominanz	Verhältnis von mittlerer bzw. maximaler Flutstromgeschwindigkeit zu mittlerer bzw. maximaler Ebbestromgeschwindigkeit > 1 (Flutstromgeschwindigkeit ist größer als Ebbestromgeschwindigkeit).	eigene Definition
Flutstromgeschwindigkeit	Bei Flutstrom gemessene Fließgeschwindigkeit zu einem bestimmten Zeitpunkt.	DIN 4049-3 2.4.3.8
Flutstromkenterpunkt	Kenterpunkt zwischen Flutstrom und Ebbestrom.	DIN 4049-3 2.4.3.16
Flutstromvolumen	Wasservolumen, das einen Querschnitt während der Flutstromdauer durchfließt.	DIN 4049-3 2.4.3.22
intertidal	lokales Höhenintervall von Bereichen, die (bezogen auf einen längeren Zeitraum, also bei mittleren Verhältnissen) bei den meisten Tiden geflutet und entleert werden.	eigene Definition
Kenterpunkt	Wechsel von Flutstrom auf Ebbestrom und umgekehrt.	DIN 4049-3 2.4.3.15
Kenterpunktabstand	Zeitspanne zwischen dem Kenterpunkt und der dazugehörigen Tidehochwasserzeit bzw. Tideniedrigwasserzeit.	DIN 4049-3 2.4.3.18
Morphodynamik	Änderungen der Topographie oder Bathymetrie infolge von Erosion, Transport und Deposition von Sedimenten (hier: Änderungen der Bathymetrie von Gewässerbett und Meeresboden)	eigene Definition
Nipptide	Tide mit astronomisch bedingtem niedrigstem Tidehochwasserstand innerhalb eines Mondzyklus. An der deutschen Nordseeküste tritt die Nipptide fast drei Tage später ein als das erste oder letzte Viertel des Mondes.	DIN 4049-3 2.4.2.15
Oberwasserzufluss	Abfluss an der Tidegrenze eines Wasserlaufs.	DIN 4049-3 2.4.3.27

Pegel	Einrichtung zum Messen des Wasserstandes oberirdischer Gewässer. An einem Pegel sind häufig auch Vorrichtungen zur Ermittlung anderer hydrologischer Kenngrößen (z. B. Fließgeschwindigkeit, Wassertemperatur) vorhanden.	DIN 4049-3 2.3.1
RCP (Repräsentative Konzentrationspfade)-Szenarien	Szenarien, die Zeitreihen von Emissionen und Konzentrationen sämtlicher Treibhausgase, Aerosole und chemisch aktiven Gase sowie Landnutzung/Landbedeckung mit einschließen.	Moss et al., 2008
Sedimentmanagement	Bestandteil des Unterhaltungskonzepts von Wasserstraßen zur Erhaltung ihrer Funktion als Verkehrsweg. Maßnahmen des Sedimentmanagements in den Seehafenzufahrten sind beispielsweise das Nutzen des Oberwasserzuflusses oder von der Tide abhängiger günstiger Zeitpunkte für die Umlagerung von Baggergut sowie die Umlagerung von Baggergut in ebbstromdominierten Bereichen mit dem Ziel der Reduzierung von Baggerkreisläufen und der Minimierung von Baggermengen. Neben dem Sedimentmanagement sind bauliche Maßnahmen Bestandteil des Unterhaltungskonzepts von Wasserstraßen, die die Wirkungsweise von Maßnahmen des Sedimentmanagements unterstützen sollten.	eigene Definition
Seeschiffahrtsstraße	Binnenwasserstraße oder Seewasserstraße, auf der vorwiegend Seeschiffe verkehren und auf der der Schiffsverkehr gesetzlich geregelt ist.	WSV
SLR Sperrwerk	sea level rise - engl. für Meeresspiegelanstieg Querbauwerk in einem Tidefluss mit Verschlussvorrichtungen zum Absperren bestimmter Tiden, vor allem zum Schutz gegen Sturmfluten.	BAWiki
Springtide	Tide mit astronomisch bedingtem höchstem Tidehochwasserstand innerhalb eines Mondzyklus. An der deutschen Nordseeküste tritt die Springtide fast drei Tage später ein als Neu- oder Vollmond.	DIN 4049-3 2.4.2.17
Stauwasser	Strömungszustand eines Tidegewässers während des Kenterns.	DIN 4049-3 2.4.3.19

Sturmflut	Durch starken Wind verursachtes Ansteigen des Wassers an der Meeresküste und in den Flussmündungen im Küstenbereich, wenn die Wasserstände einen bestimmten Wert überschreiten.	DIN 4049-3 2.4.2.19
Sturmflutscheitelwasserstand	Höchster Wasserstand im Sturmflutzeitraum.	eigene Definition
Sturmtide	Vorwiegend durch Wind veränderte Tide mit Sturmflutwasserständen.	DIN 4049-3 2.4.2.20
subtidal	lokales Höhenintervall von Bereichen, die (bezogen auf einen längeren Zeitraum, also bei mittleren Verhältnissen) bei den meisten Tiden permanent geflutet sind.	eigene Definition
supratidal	lokales Höhenintervall von Bereichen, die (bezogen auf einen längeren Zeitraum, also bei mittleren Verhältnissen) bei den meisten Tiden trocken bleiben, aber dennoch bei höher als normal auflaufenden Tiden geflutet werden (Bereiche oberhalb des mittleren Tidehochwassers bzw. Bereiche zwischen Watt und landseitiger Begrenzung wie Deiche oder Kliffs; klassisches Milieu von Salzwiesen).	eigene Definition
Tide	Periodische Änderungen des Wasserspiegels und horizontale Bewegungen des Wassers, hervorgerufen durch die Massenanziehungs- und Fliehkräfte des Systems Sonne, Mond und Erde in Verbindung mit der Erdrotation. In dieser allgemeinen Bedeutung gleichzusetzen mit Gezeiten, auch astronomische Tide genannt.; Eine Tide enthält die vorstehend bezeichneten Änderungen des Wasserspiegels und Bewegungen des Wassers an einem Ort und für eine Periode einschließlich der nicht astronomischen Einflüsse (z. B. Oberwasser-, Windeinfluß).	DIN 4049-3 2.4.12

Tideasymmetrie	Ungleiche Ausprägung von die Tide charakterisierenden Kenngrößen während der Flut- und Ebbstromphase (z. B. mittlere Flutstromgeschwindigkeit vs. mittlere Ebbstromgeschwindigkeit, maximale Flutstromgeschwindigkeit vs. maximale Ebbstromgeschwindigkeit, mittlere Flutstromdauer vs. mittlere Ebbstromdauer, Stauwasserdauer bei Tidehochwasser vs. Stauwasserdauer bei Tideniedrigwasser), vgl. auch Flutstromdominanz, Ebbstromdominanz.	eigene Definition
Tidebecken	Gebiet, das von einem Rinnensystem (Wattstrom, Priele) im Rhythmus der Gezeiten gefüllt und entleert wird und das sich räumlich durch supratidale Bereiche oder Barrieren wie Deiche oder Kliffs (landseitig), Wattscheiden (seitlich zu benachbarten Tidebecken), und ggf. Barriereinseln oder Sandbänke (seewärts) abgrenzen lässt.	eigene Definition
Tidedauer	Zeitspanne zwischen zwei aufeinanderfolgenden Tideniedrigwasser oder Tidehochwasser; Tidedauer = Flutdauer + Ebbdauer. Anmerkung: In der Nordsee beträgt die Tidedauer etwa 12 h 25 min (halbtägige Tide).	DIN 4049-3 2.4.2.12
Tidedynamik	Durch astronomische Gezeiten und Flachwassereffekte beeinflusste Hydrodynamik in Küstengewässern.	eigene Definition
Tidefall	Höhenunterschied zwischen einem Tidehochwasser und dem folgenden Tideniedrigwasser.	DIN 4049-3 2.4.2.4
Tidegebiet	Teil des Küstengebiets seewärts der am weitesten landeinwärts gelegenen Tidegrenze.	DIN 4049-3 2.4.1.4
Tidegrenze	Linie in einem Gewässer im Küstengebiet bis zu der jeweils eine tidebedingte Wasserstandsänderung messbar ist.	DIN 4049-3 2.4.1.3
Tidehochwasser Thw	Höchster Wert der Tidekurve zwischen zwei aufeinanderfolgenden Tideniedrigwasser.	DIN 4049-3 2.4.2.5
Tidehochwasserzeit	Eintrittszeit (gesetzliche Uhrzeit) des Tidehochwassers.	DIN 4049-3 2.4.2.6
Tidehub Thb	Mittlerer Höhenunterschied zwischen Tidehochwasser und den beiden benachbarten Tideniedrigwasser.	DIN 4049-3 2.4.2.9

Tidekurve	Ganglinie der Wasserstände im Tidegebiet an einem bestimmten Ort über mindestens eine Tidedauer.	DIN 4049-3 2.4.2.1
Tidemittelwasser Tmw	Wasserstand der waagerechten Schwerlinie einer Tidekurve.	DIN 4049-3 2.4.2.11
Tideniedrigwasser Tnw	Niedrigster Wert der Tidekurve zwischen zwei aufeinanderfolgenden Tidehochwasser.	DIN 4049-3 2.4.2.7
Tideniedrigwasserzeit	Eintrittszeit (gesetzliche Uhrzeit) des Tideniedrigwassers.	DIN 4049-3 2.4.2.8
Tidestieg	Höhenunterschied zwischen einem Tideniedrigwasser und dem folgenden Tidehochwasser.	DIN 4049-3 2.4.2.3
Tidestromfigur (auch: Tidestromelipse)	Umhüllende der Vektoren der Fließgeschwindigkeiten an einem Ort während einer Tidedauer.	DIN 4049-3 2.4.3.2
Tideströmung	Überwiegend durch Tide erzeugte Strömung.	DIN 4049-3 2.4.3.1
Umlagerung (von Baggergut)	Hier: Vorgang des Sedimentmanagements, bei dem gebaggerte und per Baggerschiff transportierte Sedimente an anderer Stelle durch Entleeren des Baggerschiffs wieder in den Wasserkörper eingebracht werden.	eigene Definition
Unterhaltungsbaggerungen	Baggerungen im Bereich der Fahrrinne zur Erhaltung der gesetzlich festgelegten Solltiefe (vgl. auch Sedimentmanagement).	eigene Definition
Vorland	Gelände außerhalb des Gewässerbettes in der Regel durch Deich, Dünen oder Hochufer begrenzt. Im Küstengebiet wasserwärtig durch die Uferlinie bei MW oder MThw begrenzt.	DIN 4049-3 2.1.20
Wasserstand	Lotrechter Abstand eines Punktes des Wasserspiegels über oder unter einem Bezugshorizont, z. B. durch einen Pegelnullpunkt festgelegt. Als Wasserstand wird die aktuelle Höhe eines natürlichen oder künstlichen Wasserspiegels in Bezug auf eine definierte Marke oder einen Pegel (Wasserstandsmessung) bezeichnet.	DIN 4049-3 2.2.4
Wasserstraße	Oberirdisches Gewässer oder Küstengewässer, das gesetzlich für den Personen- und/oder für den Güterverkehr mit Schiffen bestimmt ist.	WSV

Watt	Ausgedehntes, flaches mit Sand oder Schlick bedecktes Gebiet unter mittlerem Tidehochwasser (MThw) oder Mittelwasser (MW), das tide-, wind- oder abflussregimeabhängig überflutet wird und wieder trockenfällt und das meist durch Rinnen und Wasserläufe gegliedert ist.	DIN 4049-3 2.4.1.17
Watteinzugsgebiet	Teil des Watts, der von einem Wattstrom oder einem Priel gefüllt und entleert wird. (eigene Ergänzung: wenn auf Wattstrom bezogen, Synonym zu Tidebecken)	DIN 4049-3 2.4.1.22
Watthöhenscheide oder Wattscheide	Grenze zwischen zwei benachbarten Tidebecken bzw. Watteinzugsgebieten, die von der Linie der maximalen Geländehöhe im Grenzbe- reich gebildet wird.	eigene Definition
Wattrinne	Auf hohen Wattflächen gelegene, häufig den Oberlauf eines Priels bildende flache Rinne, die in der Regel während der Ebbe trockenfällt.	DIN 4049-3 2.4.1.20
Wattstrom	Hauptwasserlauf im Watt	DIN 4049-3 2.4.1.18
Wattwasserscheide	Grenze zwischen Watteinzugsgebieten, meist im Verlauf der Tide ihre Lage verändernd. Hydrodynamische Grenze, entlang der das Wasser aus zwei benachbarten Tidebecken bzw. Watteinzugsgebieten aufeinandertrifft (bei Flut) bzw. auseinanderströmt (bei Ebbe).	DIN 4049-3 2.4.1.23 (er- gänzt)
Wehr	Absperrbauwerk (Teil einer Staustufe), das der Hebung des Wasserstandes und meist auch der Regelung des Abflusses dient; festes oder mit beweglichen Verschlüssen versehenes Absperrbauwerk überwiegend als Teil einer Staustufe zur Hebung des Wasserstandes und meist auch zur Regelung des Abflusses. Kehrend: Ist auf Strömungsdruck von beiden Richtungen ausgelegt. Nicht kehrend: Kann nur von einer Seite überströmt werden, wird bei Strömungsumkehr gelegt.	DIN 4048-1 (ergänzt)
Windstau	Durch Wind verursachte Erhöhung des Wasserstandes.	DIN 4049-3 2.2.5



Bundesministerium
für Verkehr und
digitale Infrastruktur

Bundesanstalt für Wasserbau (BAW)

Kußmaulstraße 17, 76187 Karlsruhe
Telefon: +49 (0) 721 9726-0
Telefax: +49 (0) 721 9726-4540

Wedeler Landstraße 157, 22559 Hamburg
Telefon: +49 (0) 40 81908-0
Telefax: +49 (0) 40 81908-373

www.baw.de