BUNDESANSTALT FÜR WASSERBAU

Karlsruhe · Hamburg · Ilmenau

GUTACHTEN

Anpassung der Fahrrinne von Unter- und Außenelbe an die Containerschifffahrt

Gutachten

zu

Ausbaubedingten Änderungen der Sturmflutkenngrößen

BAW-Nr A3955 03 10062

H.1 b

BUNDESANSTALT FÜR WASSERBAU
Karlsruhe • Hamburg • Ilmenau

Anpassung der Fahrrinne von Unter- und Außenelbe an die Containerschifffahrt

Gutachten
zu
Ausbaubedingten Änderungen der Sturmflutkenngrößen

Auftraggeber:	Projektbüro Fahrrinnenanpassung der Unter- und Außenelbe beim Wasser- und Schifffahrtsamt Hamburg, der WSV (Bündelungsstelle) und Hamburg Port Authority Moorweidenstraße 14 20148 Hamburg
Auftrag vom:	1. November 2004, Az.: A;192-4;427.04
Auftrags-Nr.:	BAW-Nr. A3955 03 10062
Aufgestellt von:	Abteilung: Wasserbau im Küstenbereich Referat: Ästuarsysteme II (K3) Bearbeiterin: Dr. rer. nat. E. Rudolph

Hamburg, im Januar 2007

Das Gutachten darf nur ungekürzt vervielfältigt werden. Die Vervielfältigung und eine Veröffentlichung bedürfen der schriftlichen Genehmigung der BAW.

Bundesanstalt für Wasserbau · Wedeler Landstr. 157 · D-22559 Hamburg · ✆ (040) 81908 - 0

Zusammenfassung

Mit dem Kabinettsbeschluss der Bundesregierung vom 15. September 2004 zur Aufnahme der weiteren Fahrrinnenanpassung von Unter- und Außenelbe in den Bundesverkehrswegeplan erhielt das Wasser- und Schifffahrtsamt Hamburg von der Wasser- und Schifffahrtsdirektion Nord den uneingeschränkten Planungsauftrag für die Hauptuntersuchung. Seitens der Freien und Hansestadt Hamburg wurde das damalige Amt Strom- und Hafenbau (jetzt Hamburg Port Authority) mit der Planung des weiteren Fahrrinnenausbaues beauftragt.

Für das Planfeststellungsverfahren wurde die Bundesanstalt für Wasserbau (BAW) vom Wasser- und Schifffahrtsamt Hamburg und der Hamburg Port Authority über das gemeinsame Projektbüro Fahrrinnenanpassung (JAP – Auftrag Nr. A3955 03 10062 und Schreiben vom 1. 11. 2004, Geschäftszeichen A;192-4;427.04) beauftragt, eine wasserbauliche Systemanalyse mit dem Ziel einer detaillierten Ermittlung ausbaubedingter Änderungen der abiotischen Systemparameter zu erstellen.

Im Rahmen dieser Anpassung der Fahrrinne von Unter- und Außenelbe soll die Fahrrinne der Elbe so vertieft werden, dass moderne Containerschiffe mit einem Tiefgang bis 13,50 m (Salzwasser) tideunabhängig verkehren können und tideabhängig fahrende Containerschiffe den Hamburger Hafen innerhalb eines zweistündigen Tidefensters mit einem Tiefgang von 14,50 m (Salzwasser) verlassen können. Dabei soll ebenfalls der Verlauf und die Breite der Fahrrinne den Erfordernissen der zukünftigen Schiffstypen angepasst und eine Strecke für die Begegnung von großen ein- und auslaufenden Schiffen hergestellt werden.

Das vorliegende Gutachten beschreibt die ausbaubedingten Änderungen der maßgebenden Sturmflutkenngrößen im Elbe – Ästuar durch die Anpassung der Unter- und Außenelbe. Grundlage der wasserbaulichen Systemanalyse zur detaillierten Ermittlung der ausbaubedingten Änderungen der Sturmflutkenngrößen ist die *Festlegung des Untersuchungsrahmens gem. §5 des Gesetzes über die Umweltverträglichkeitsprüfung (UVPG)* (WSD Nord & BWA, 2005).

Für das vorliegende Gutachten wird der Ausbauzustand AZ385S mit Hilfe eines hydrodynamisch-numerischen (HN) – Modells bezüglich seiner Wirkung bei Sturmfluten untersucht und die Änderungen in Bezug auf den planerischen Ist – Zustand (PIZ) dargestellt. Diese Untersuchungen werden auf der Grundlage von Sturmfluten unterschiedlicher Charakteristik durchgeführt: Sturmfluten vom 3. 1. 1976 (steile Windstaukurve), 28. 1. 1994 (fülligе Windstaukurve) und 3./4. 12. 1999 (Windstaumaximum in zeitlicher Nähe zum Hochwasser) sowie der Bemessungssturmflut 2085A.

Die hochaufgelöste Modelltopographie des planerischen Ist – Zustandes sowie des Ausbauzustandes der Unter- und Außenelbe wird auf der Grundlage der Topographie von 2003 unter Berücksichtigung der Sollgeometrie erzeugt.

Die ausbaubedingten Änderungen der Sturmflutkenngrößen in der Elbe ergeben sich aus der Differenz zwischen dem Ausbauzustand und dem planerischen Ist – Zustand.

Für den untersuchten Ausbauzustand AZ385S ergeben sich in der Unter- und Außenelbe bei den betrachteten sechs Sturmflutszenarien folgende Änderungen der Sturmflutkenngrößen gegenüber dem planerischen Ist – Zustand PIZ:

- Die Sturmflutscheitelwasserstände verändern sich um weniger als $+2$ cm / -3 cm.
- Die Eintrittszeit des Sturmflutscheitelwasserstandes verändert sich ausbaubedingt um weniger als ± 5 Minuten.
- Die Dauer hoher Wasserstände verändert sich um weniger als ± 5 Minuten.
- Die querschnittsgemittelten Flut- und Ebbestromgeschwindigkeiten verändern sich um weniger als ± 10 cm / s.
- Das querschnittsintegrierten Flut- und Ebbestromvolumen verändern sich um weniger als $\pm 10 \cdot 10^{+6}$ m^3 (weniger als $\pm$ 2%).

Inhaltsverzeichnis

1 Veranlassung und Aufgabenstellung 1

2 Unterlagen und Daten 3

3 Untersuchungskonzept 5

4 Das mathematische Modell des Elbe – Ästuars 7
4.1 Das numerische Verfahren UnTRIM 7
4.2 Modellgebiet 8
4.3 Gitternetz 10
4.4 Modelltopographie der Untersuchungsvarianten 11
4.4.1 Planerischer Ist – Zustand PIZ 11
4.4.2 Ausbauzustand Unter- und Außenelbe AZ385S 11
4.5 Modellsteuerung 14
4.6 Das HN – Modell der Elbe 18
4.6.1 Kalibrierung 19
4.6.2 Vergleich Messung mit Modellergebnis 21
4.6.3 Sensitivität der Prognoseergebnisse – Reibung 24
4.6.4 Sensitivität der Prognoseergebnisse – 2D / 3D 26

5 Untersuchungsvarianten 31
5.1 Sturmflutszenarien 31
5.1.1 Charakterisierung der Sturmflut vom 3. 1. 1976 31
5.1.2 Charakterisierung der Sturmflut vom 28. 1. 1994 31
5.1.3 Charakterisierung der Sturmflut vom 3. 12. 1999 32
5.1.4 Charakterisierung der Bemessungssturmflut 2085A 32
5.2 Zusammenstellung der Untersuchungsvarianten 34

6 Ergebnisse der Systemanalyse 37
6.1 Änderung der Sturmflutscheitelwasserstände 39
6.2 Änderung der Eintrittszeit der Scheitelwasserstände 41
6.3 Änderung der Dauer hoher Wasserstände 43
6.4 Änderung der Flutstromgeschwindigkeit 53
6.5 Änderung der Ebbestromgeschwindigkeit 56
6.6 Änderung des Flutstromvolumens 59
6.7 Änderung des Ebbestromvolumens 61
6.8 Hochwasserneutralität 63

7 Schlußbetrachtung 65

Literaturverzeichnis 67

A Anlagen 69

B Ergänzende Abbildungen **71**

C Laufzeit der Flutstrom- und Ebbestromkenterung **75**

D Topographie des HN - Modells des Elbeästuares: Teilgebiet West **89**

E Sturmflut SF76: Elbe Teilgebiet West **93**

F Sturmflut SF94: Elbe Teilgebiet West **113**

G Sturmflut SF99: Elbe Teilgebiet West **133**

H Sturmflut SFB: Elbe Teilgebiet West **161**

Bildverzeichnis

1 Topographie des HN – Modells des Elbe – Ästuars 9
2 Änderung der Topographie des HN – Modells des Elbe – Ästuars 12
3 Tiefenlängsprofil PIZ und AZ385S 13
4 Wasserstandsentwicklung SF76: Cuxhaven 15
5 Wasserstandsentwicklung SF94: Cuxhaven 15
6 Wasserstandsentwicklung SF99: Cuxhaven 16
7 Wasserstandsentwicklung SFB: Cuxhaven 16
8 SF99: Windfeld 3. 12. 1999 20:00 h (MKW) 17
9 Terminologie der Modellierung 18
10 SF94 (Reibung): Wasserstandsentwicklung Cuxhaven 20
11 SF94 (Reibung): Wasserstandsentwicklung Hamburg St. Pauli 20
12 Wasserstandsentwicklung SF94: Cuxhaven 22
13 Wasserstandsentwicklung SF94: Glückstadt 22
14 Wasserstandsentwicklung SF94: Hamburg St.Pauli 23
15 Wasserstandsentwicklung SF94: Bunthaus 23
16 SF94 (Reibung): Sturmflutscheitelwasserstand (Längsprofil-Elbe) 25
17 SF94 (Reibung): Änderung Sturmflutscheitelwasserstand (LP-Elbe) 25
18 SF94 Sturmflutscheitelwasserstand (LP-Elbe) 28
19 SF94 Änderung des Sturmflutscheitelwasserstandes (LP-Elbe) 28
20 SF94 Eintrittszeit Sturmflutscheitelwasserstand (LP-Elbe, qsm) 29
21 SF94 Änderung der Eintrittszeit HW (LP-Elbe, qsm) 29
22 SF94 Dauer Wasserstand $>$ NN $+$ 3,00 m (LP-Elbe, qsm) 30
23 SF94 Änderung DHW $>$ NN $+$ 3,00 m (LP-Elbe, qsm) 30
24 Sturmflutscheitelwasserstand (Längsprofil-Elbe) 40
25 Änderung des Sturmflutscheitelwasserstandes (LP-Elbe) 40
26 Eintrittszeit Sturmflutscheitelwasserstand (LP-Elbe, qsm) 42
27 Änderung der Eintrittszeit HW (LP-Elbe, qsm) 42
28 Dauer Wasserstand $>$ NN $+$ 2,00 m (LP-Elbe, qsm) 44
29 Änderung DHW $>$ NN $+$ 2,00 m (LP-Elbe, qsm) 44
30 Dauer Wasserstand $>$ NN $+$ 3,00 m (LP-Elbe, qsm) 46
31 Änderung DHW $>$ NN $+$ 3,00 m (LP-Elbe, qsm) 46
32 Dauer Wasserstand $>$ NN $+$ 4,00 m (LP-Elbe, qsm) 48
33 Änderung DHW $>$ NN $+$ 4,00 m (LP-Elbe, qsm) 48
34 Dauer Wasserstand $>$ NN $+$ 5,00 m (LP-Elbe, qsm) 50
35 Änderung DHW $>$ NN $+$ 5,00 m (LP-Elbe, qsm) 50
36 Dauer Wasserstand $>$ NN $+$ 6,00 m (LP-Elbe, qsm) 52
37 Änderung DHW $>$ NN $+$ 6,00 m (LP-Elbe, qsm) 52
38 max. Flutstromgeschwindigkeit (LP-Elbe, qsm) 54
39 Änderung max. Flutstromgeschwindigkeit (LP-Elbe, qsm) 54
40 mitt. Flutstromgeschwindigkeit (LP-Elbe, qsm) 55
41 Änderung mitt. Flutstromgeschwindigkeit (LP-Elbe, qsm) 55

42 max. Ebbestromgeschwindigkeit (LP-Elbe, qsm) 57
43 Änderung der max. Ebbestromgeschwindigkeit (LP-Elbe, qsm) 57
44 mitt. Ebbestromgeschwindigkeit (LP-Elbe, qsm) 58
45 Änderung mitt. Ebbestromgeschwindigkeit (LP-Elbe, qsm) 58
46 Flutstromvolumen (LP-Elbe, qsi) 60
47 Änderung Flutstromvolumen (LP-Elbe, qsi) 60
48 Ebbestromvolumen (LP-Elbe, qsi) 62
49 Änderung Ebbestromvolumen (LP-Elbe, qsi) 62
50 SFB Sturmflutscheitelwasserstand (LP-Elbe) 64
51 SFB Änderung Sturmflutscheitelwasserstand (LP-Elbe) 64
B.1 effektive Sohlrauheit aus Kalibrierung Spring – Nipp 72
B.2 effektive Sohlrauheit aus Re-Kalibrierung Sturmflut 73
B.3 Lage der Querprofile 74
C.1 Laufzeit der Flut- und Ebbestromkenterung SF76 (LP-Elbe, qsm) 76
C.2 Zeitreihen SF76 77
C.3 Laufzeit der Flut- und Ebbestromkenterung SF94 (LP-Elbe, qsm) 78
C.4 Zeitreihen SF94 79
C.5 Laufzeit der Flut- und Ebbestromkenterung SF99 (LP-Elbe, qsm) 80
C.6 Zeitreihen SF99 81
C.7 Laufzeit der Flut- und Ebbestromkenterung SFB (LP-Elbe, qsm) 82
C.8 Zeitreihen SFB 83
C.9 Laufzeit der Flut- und Ebbestromkenterung SFB_Q3000 (LP-Elbe, qsm) 84
C.10 Zeitreihen SFB_Q3000 85
C.11 Laufzeit der Flut- und Ebbestromkenterung SFB_Q4000 (LP-Elbe, qsm) 86
C.12 Zeitreihen SFB_Q4000 87
C.13 Flutstromvolumen (LP-Elbe, qsi) 88
C.14 Änderung des Flutstromvolumens (LP-Elbe, qsi) 88
D.1 Topographie PIZ Teilgebiet West 90
D.2 Topographie AZ385S Teilgebiet West 91
D.3 Diff. Topographie AZ385S – PIZ Teilgebiet West 92
E.1 SF76 PIZ Elbe Teilgebiet West HW 94
E.2 SF76 AZ385S – PIZ Elbe Teilgebiet West dHW 95
E.3 SF76 PIZ Elbe Teilgebiet West tHW 96
E.4 SF76 AZ385S – PIZ Elbe Teilgebiet West dtHW 97
E.5 SF76 PIZ Elbe Teilgebiet West DHW300 98
E.6 SF76 AZ385S – PIZ Elbe Teilgebiet West dDHW300 99
E.7 SF76 PIZ Elbe Teilgebiet West Vfx 100
E.8 SF76 AZ385S – PIZ Elbe Teilgebiet West dVfx 101
E.9 SF76 PIZ Elbe Teilgebiet West Vfm 102
E.10 SF76 AZ385S – PIZ Elbe Teilgebiet West dVfm 103
E.11 SF76 PIZ Elbe Teilgebiet West Vex 104
E.12 SF76 AZ385S – PIZ Elbe Teilgebiet West dVex 105

E.13 SF76 PIZ Elbe Teilgebiet West Vem 106
E.14 SF76 AZ385S – PIZ Elbe Teilgebiet West dVem 107
E.15 SF76 PIZ Elbe Teilgebiet West Qf 108
E.16 SF76 AZ385S – PIZ Elbe Teilgebiet West dQe 109
E.17 SF76 PIZ Elbe Teilgebiet West Qe 110
E.18 SF76 AZ385S – PIZ Elbe Teilgebiet West dQe 111
F.1 SF94 PIZ Elbe Teilgebiet West HW 114
F.2 SF94 AZ385S – PIZ Elbe Teilgebiet West dHW 115
F.3 SF94 PIZ Elbe Teilgebiet West tHW 116
F.4 SF94 AZ385S – PIZ Elbe Teilgebiet West dtHW 117
F.5 SF94 PIZ Elbe Teilgebiet West DHW300 118
F.6 SF94 AZ385S – PIZ Elbe Teilgebiet West dDHW300 119
F.7 SF94 PIZ Elbe Teilgebiet West Vfx 120
F.8 SF94 AZ385S – PIZ Elbe Teilgebiet West dVfx 121
F.9 SF94 PIZ Elbe Teilgebiet West Vfm 122
F.10 SF94 AZ385S – PIZ Elbe Teilgebiet West dVfm 123
F.11 SF94 PIZ Elbe Teilgebiet West Vex 124
F.12 SF94 AZ385S – PIZ Elbe Teilgebiet West dVex 125
F.13 SF94 PIZ Elbe Teilgebiet West Vem 126
F.14 SF94 AZ385S – PIZ Elbe Teilgebiet West dVem 127
F.15 SF94 PIZ Elbe Teilgebiet West Qf 128
F.16 SF94 AZ385S – PIZ Elbe Teilgebiet West dQe 129
F.17 SF94 PIZ Elbe Teilgebiet West Qe 130
F.18 SF94 AZ385S – PIZ Elbe Teilgebiet West dQe 131
G.1 SF99 PIZ Elbe Teilgebiet West HW 134
G.2 SF99 AZ385S – PIZ Elbe Teilgebiet West dHW 135
G.3 SF99 PIZ Elbe Teilgebiet West tHW 136
G.4 SF99 AZ385S – PIZ Elbe Teilgebiet West dtHW 137
G.5 SF99 PIZ Elbe Teilgebiet West DHW200 138
G.6 SF99 AZ385S – PIZ Elbe Teilgebiet West dDHW200 139
G.7 SF99 PIZ Elbe Teilgebiet West DHW300 140
G.8 SF99 AZ385S – PIZ Elbe Teilgebiet West dDHW300 141
G.9 SF99 PIZ Elbe Teilgebiet West DHW400 142
G.10 SF99 AZ385S – PIZ Elbe Teilgebiet West dDHW400 143
G.11 SF99 PIZ Elbe Teilgebiet West DHW500 144
G.12 SF99 AZ385S – PIZ Elbe Teilgebiet West dDHW500 145
G.13 SF99 PIZ Elbe Teilgebiet West DHW600 146
G.14 SF99 AZ385S – PIZ Elbe Teilgebiet West dDHW600 147
G.15 SF99 PIZ Elbe Teilgebiet West Vfx 148
G.16 SF99 AZ385S – PIZ Elbe Teilgebiet West dVfx 149
G.17 SF99 PIZ Elbe Teilgebiet West Vfm 150
G.18 SF99 AZ385S – PIZ Elbe Teilgebiet West dVfm 151

G.19 SF99 PIZ Elbe Teilgebiet West Vex 152
G.20 SF99 AZ385S – PIZ Elbe Teilgebiet West dVex 153
G.21 SF99 PIZ Elbe Teilgebiet West Vem 154
G.22 SF99 AZ385S – PIZ Elbe Teilgebiet West dVem 155
G.23 SF99 PIZ Elbe Teilgebiet West Qf 156
G.24 SF99 AZ385S – PIZ Elbe Teilgebiet West dQe 157
G.25 SF99 PIZ Elbe Teilgebiet West Qe 158
G.26 SF99 AZ385S – PIZ Elbe Teilgebiet West dQe 159
H.1 SFB PIZ Elbe Teilgebiet West HW 162
H.2 SFB AZ385S – PIZ Elbe Teilgebiet West dHW 163
H.3 SFB PIZ Elbe Teilgebiet West tHW 164
H.4 SFB AZ385S – PIZ Elbe Teilgebiet West dtHW 165
H.5 SFB PIZ Elbe Teilgebiet West DHW300 166
H.6 SFB AZ385S – PIZ Elbe Teilgebiet West dDHW300 167
H.7 SFB PIZ Elbe Teilgebiet West Vfx 168
H.8 SFB AZ385S – PIZ Elbe Teilgebiet West dVfx 169
H.9 SFB PIZ Elbe Teilgebiet West Vfm 170
H.10 SFB AZ385S – PIZ Elbe Teilgebiet West dVfm 171
H.11 SFB PIZ Elbe Teilgebiet West Vex 172
H.12 SFB AZ385S – PIZ Elbe Teilgebiet West dVex 173
H.13 SFB PIZ Elbe Teilgebiet West Vem 174
H.14 SFB AZ385S – PIZ Elbe Teilgebiet West dVem 175
H.15 SFB PIZ Elbe Teilgebiet West Qf 176
H.16 SFB AZ385S – PIZ Elbe Teilgebiet West dQe 177
H.17 SFB PIZ Elbe Teilgebiet West Qe 178
H.18 SFB AZ385S – PIZ Elbe Teilgebiet West dQe 179

Tabellenverzeichnis

1 Übersicht Kurzbezeichnungen SF94 26
2 Übersicht Oberwasserereignisse 33
3 Übersicht Untersuchungsvarianten 34
4 Analysezeiträume 35

Verzeichnis der Abkürzungen

Abkürzung	Vollständige Bezeichnung
AZ385S	Ausbauzustand mit 385 m breiter Begegnungsstrecke
BAW – DH	Bundesanstalt für Wasserbau – Dienststelle Hamburg
BMVBW	Bundesministerium für Verkehr, Bau- und Wohnungswesen
BMVBS	Bundesministerium für Verkehr, Bau- und Stadtentwicklung
DGJ	Deutsches Gewässerkundliches Jahrbuch
DGM	Digitales Geländemodell
DHW	Dauer hoher Wasserstände
dHW	Änderung des höchsten Wasserstands HW
dDHW	Änderung der Dauer hoher Wasserstände DHW
dtHW	Änderung der Eintrittszeit des Hochwassers tHW
DWD	Deutscher Wetterdienst
FF	Stationen mit Stundenwerten Wind des DWD
GF	Geschäftsfeld
HHQ	höchster bekannter Wert des Oberwasserabfluß (DIN 4049-3)
HHThw	höchster bekannter Wert des Tidehochwassers (DIN 4049-3)
HN – Modell	hydrodynamisch – numerisches Modell
HPA	Hamburg Port Authority
HW	höchster Wasserstand in einem Zeitraum (DIN 4049-3)
IKSE – MKOL	Internationale Kommission zum Schutz der Elbe Mezinarodni komise pro ochranu Labe
LP	Längsprofil
LP – Elbe	Längsprofil entlang des Elbefahrwassers
MKW	Massenkonsistentes Windfeld, Name des meteorologischen numerischen Modells
NN	Normalnull
PIZ	planerischer Ist – Zustand
PG	Projektgruppe
prf	Profil
Qe	Ebbestromvolumen (DIN 4049-3)
Qf	Flutstromvolumen (DIN 4049-3)
QP	Querprofil
qsi	querschnittsintegriert
qsm	querschnittsgemittelt
SF	Sturmflut
SF76	Sturmflut 3. 1. 1976
SF94	Sturmflut 28. 1. 1994

Abkürzung	Vollständige Bezeichnung
SF99	Sturmflut 3. 12. 1999
SFB	Bemessungssturmflut 2085A
SKN	Seekartennull
SN	Spring – Nipp
SN – Zyklus	14 – tägiger Zeitraum von Neumond zu Vollmond, der Springtide und Nipptide enthält
SY	Synoptische Stationen des DWD
tHW	Eintrittszeit des HW (DIN 4049-3)
UnTRIM	Unstructured TRIM, Name des hydrodynamisch - numerischen Modells
UVPG	Gesetz über die Umweltverträglichkeitsprüfung
Vem	mittlere Ebbestromgeschwindigkeit (DIN 4049-3)
Vex	maximale Ebbestromgeschwindigkeit (DIN 4049-3)
Vfm	mittlere Flutstromgeschwindigkeit (DIN 4049-3)
Vfx	maximale Flutstromgeschwindigkeit (DIN 4049-3)
WaStrG	Bundeswasserstraßengesetz
WSA	Wasser- und Schifffahrtsamt
WSD	Wasser- und Schifffahrtsdirektion
WSV	Wasser- und Schifffahrtsverwaltung des Bundes

1 Veranlassung und Aufgabenstellung

Mit dem Kabinettsbeschluss der Bundesregierung vom 15. September 2004 zur Aufnahme der weiteren Fahrrinnenanpassung von Unter- und Außenelbe in den Bundesverkehrswegeplan erhielt das Wasser- und Schifffahrtsamt Hamburg von der Wasser- und Schifffahrtsdirektion Nord den uneingeschränkten Planungsauftrag für die Hauptuntersuchung. Seitens der Freien und Hansestadt Hamburg wurde das damalige Amt Strom- und Hafenbau (jetzt Hamburg Port Authority) mit der Planung des weiteren Fahrrinnenausbaues beauftragt.

Für das Planfeststellungsverfahren wurde die BAW vom Wasser- und Schifffahrtsamt Hamburg und der Hamburg Port Authority über das gemeinsame Projektbüro Fahrrinnenanpassung (JAP – Auftrag Nr. A3955 03 10062 und Schreiben vom 1.11.2004, Geschäftszeichen A;192-4;427.04) beauftragt, eine wasserbauliche Systemanalyse mit dem Ziel einer detaillierten Ermittlung ausbaubedingter Änderungen der abiotischen Systemparameter zu erstellen.

Im Rahmen dieser Anpassung der Fahrrinne von Unter- und Außenelbe soll die Fahrrinne der Elbe so vertieft werden, dass moderne Containerschiffe mit einem Tiefgang bis 13,50 m (Salzwasser) tideunabhängig verkehren können und tideabhängig fahrende Containerschiffe den Hamburger Hafen innerhalb eines zweistündigen Tidefensters mit einem Tiefgang von 14,50 m (Salzwasser) verlassen können. Dabei soll ebenfalls der Verlauf und die Breite der Fahrrinne den Erfordernissen der zukünftigen Schiffstypen angepasst und eine Strecke für die Begegnung von großen ein- und auslaufenden Schiffen hergestellt werden.

Aufgrund der umfangreichen Untersuchungen wurde von der BAW das folgende Bearbeitungskonzept zur Ermittlung der Auswirkungen der Fahrrinnenanpassung zugrunde gelegt:

- **Tidedynamik und Salztransport**
  Ermittlung der maßgebenden Kennwerte der Tidedynamik und des Salztransportes auf der Basis einer hochauflösenden 3D HN – Modellierung des planerischer Ist – Zustandes (PIZ) sowie Ermittlung der ausbaubedingten Auswirkungen auf die Kennwerte.

- **Sturmfluten**
  Ermittlung der heutigen Sturmflutverhältnisse auf der Basis einer hochauflösenden HN – Modellierung des planerischen Ist – Zustandes (PIZ) sowie Ermittlung der ausbaubedingten Auswirkungen auf die Sturmflutkennwerte unterschiedlicher Sturmfluten.

- **Morphodynamik**
  Beschreibung der heutigen Transportprozesse auf der Basis einer hochauflösenden 3D HN – Modellierung des planerischen Ist – Zustandes (PIZ) sowie Ermittlung der ausbaubedingten Auswirkungen auf die Transportprozesse.

- **Schiffserzeugte Belastung**
  Beschreibung der heutigen schiffserzeugten Belastungen auf der Basis von Naturun-

tersuchungen und hydraulischen Modellversuchen sowie Ermittlung der ausbaubedingten Änderungen der schiffserzeugten Belastungen.

Das vorliegende Gutachten behandelt ausschließlich die Untersuchungen zum Teilaspekt Sturmfluten. In weiteren Gutachten der BAW werden die Teilaspekte *Tidedynamik und Salztransport* (BAW, 2006c), *Morphodynamik* (BAW, 2006b) sowie *Schiffserzeugte Belastungen* (BAW, 2006a) behandelt.

2 Unterlagen und Daten

Zur Erstellung der Topographie des planerischen Ist – Zustandes sowie des Ausbauzustandes der Unter- und Außenelbe werden die bereits im Gutachten zu Hydrodynamik und Salztransport (BAW, 2006c, Kapitel 2) beschriebenen Unterlagen verwendet. Zusätzlich wurden folgende Unterlagen benutzt:

- Peildaten für den Bereich Elbe - km 590 bis 540 aus dem Jahr 2000 (WSA Lauenburg),
- Vorlanddaten zwischen Geesthacht und Bleckede aus der Digitalen Bundeswasserstraßenkarte DBWK 2 (1:2000) (2003),
- Landdaten für den bei Sturmflut überflutbaren Bereich des Hamburger Hafens aus dem Jahr 2003 (Amt für Strom- und Hafenbau der Wirtschaftsbehörde der Freien und Hansestadt Hamburg),
- Befliegungsdaten des Vorlandes im Bereich Borghorst – Geesthacht aus dem Jahr 2003 (Landesbetrieb Geoinformation und Vermessung der Freien und Hansestadt Hamburg),
- Hafenplan Cuxhaven mit den bei Sturmflut überflutbaren Bereichen aus dem Jahr 2003 (Niedersächsisches Hafenamt Cuxhaven).

Zur Steuerung des HN – Modells während der untersuchten historischen Sturmfluten werden die folgenden zusätzlichen Daten verwendet:

- Oberwasserzufluss der Elbe bei Neu Darchau für Januar 1976, Januar 1994 und Dezember 1999 aus dem Gewässerkundlichen Jahrbuch (DGJ, 1976, DGJ, 1997 und DGJ, 2001),
- vom DWD GF Seeschifffahrt mit MKW (Schmidt, H. und Pätsch, J., 1992) modellierte Windfelder für die Untersuchungszeiträume 1. 1. bis 4. 1. 1976 sowie 25. 1. bis 30. 1. 1994,
- mit MKW (Schmidt, H. und Pätsch, J., 1992) modellierte Windfelder für den Untersuchungszeitraum 30. 11. bis 4. 12. 1999,
- Wasserstandsentwicklung am seeseitigen Rand für die Sturmflut 28. 01. 1994 und 3. / 4. 12. 1999 aus dem Nordseemodell der BAW (Plüß, A., 1999 bzw. Plüß, A., 2003) für die genannten Untersuchungszeiträume,
- Wasserstandsentwicklung am seeseitigen Rand für die Sturmflut 03. 01. 1976 aus der Pegelaufzeichnung der Bake W (Zehnerloch).

Zur Steuerung des HN – Modells während der untersuchten Bemessungssturmflut 2085A werden folgende Daten verwendet:

- von der Länderarbeitsgruppe, 1988 definierter konstanter Oberwasserzufluss der Elbe bei Neu Darchau,

- vom DWD GF Seeschifffahrt mit MKW (Schmidt, H. und Pätsch, J., 1992) für den Untersuchungszeitraum der Bemessungssturmflut 2085A modellierte Windfelder,
- Wasserstandsentwicklung am seeseitigen Rand für die Bemessungssturmflut 2085A aus den Vorgaben für den Pegel Cuxhaven (Länderarbeitsgruppe, 1988).

Zusätzlich lagen folgende Daten vor:

- Originalpegelbögen oder Kopien für Januar 1976 und Januar 1994 der Pegel Bleckede (nur 1994), Hohnstorf, Geesthacht Wehr, Altengamme (nur 1994), Over, Bunthaus, Hamburg St. Pauli, Harburg, Seemannshöft, Blankenese, Cranz, Schulau, Stadersand, Krautsand, Glückstadt (nur 1994), Brokdorf, Brunsbüttel, Osteriff, Otterndorf, Cuxhaven Steubenhöft, Bake W (Zehnerloch), Bake F (Mittelgrund), Neuwerk (nur 1994), Bake C (Scharhörn, nur 1994), Bake A (nur 1994), Bake Z (nur 1994),
- Messungen des Wasserstandes im Dezember 1999 am Pegel Neu Darchau, Bleckede, Boizenburg, Hohnstorf, Artlenburg, Wehr Geesthacht, Altengamme, Zollenspieker, Over, Bunthaus, Hamburg St. Pauli, Blankenese, Schulau, Grauerort, Stadersand, Krautsand, Glückstadt, Brokdorf, Brunsbüttel, Osteriff, Otterndorf, Cuxhaven Steubenhöft, Bake W (Zehnerloch), Bake F (Mittelgrund), Bake C (Scharhörn), Bake A und Bake Z (digital bereitgestellt vom WSA Lauenburg, WSA Hamburg, WSA Cuxhaven sowie HPA),
- Orographie des Elbegebietes zur Verwendung in MKW (DWD GF Seeschifffahrt),
- Landnutzung im Elbegebiet zur Verwendung in MKW (DWD GF Seeschifffahrt),
- Messwerte der Windgeschwindigkeit und der Windrichtung für Januar 1976, Januar 1994 und Dezember 1999 aus dem Klimainformationssystem (Messnetz FF bzw. SY) des DWD für die Stationen Cuxhaven, Brunsbüttel und Hamburg St. Pauli,
- Messwerte der Windgeschwindigkeit und der Windrichtung für Januar 1976, Januar 1994 und Dezember 1999 des Amtes Strom und Hafenbau der Wirtschaftsbehörde der Freien und Hansestadt Hamburg (heute HPA) für die Station Scharhörn.

Der Untersuchungsrahmen wird durch die Planfeststellungsbehörde (WSD Nord & BWA, 2005) beschrieben und festgelegt.

3 Untersuchungskonzept

In diesem Gutachten werden die Ergebnisse der Untersuchung zur ausbaubedingten Veränderung der Sturmflutscheitelwasserstände, der Eintrittszeiten der Sturmflutscheitelwasserstände, der Dauer hoher Wasserstände, der maximalen Flut- und Ebbestromgeschwindigkeiten sowie der Flut- und Ebbestromvolumen in der Unter- und Außenelbe dargestellt. Untersucht werden der planerische Ist – Zustand (PIZ) sowie der Ausbauzustand der Unter- und Außenelbe (AZ385S). Der planerische Ist – Zustand berücksichtigt alle baulichen Maßnahmen, die zum Zeitpunkt der Ausführung der zu untersuchenden Maßnahme (AZ385S) mit hoher Wahrscheinlichkeit realisiert sein werden.

Die Kalibrierung und Validierung des numerischen Modells wird für den Zeitraum 11. 5. 2002 bis 26. 5. 2002 (Spring-Nipp-Zyklus) durchgeführt. Eine detaillierte Beschreibung findet sich in Anlage 8 des Gutachtens zu Hydrodynamik und Salztransport (BAW, 2006c). Mit dem kalibrierten HN – Modell wird die Sturmflutuntersuchung durchgeführt. Die modellierten Wasserstände des planerischen Ist – Zustandes werden für eine zusätzliche Validierung an ausgewählten Pegeln in der Unter- und Außenelbe mit den während der Sturmflut vom 28. 1. 1994 gemessenen Wasserständen verglichen (siehe hierzu auch Abschnitt 4.6 auf Seite 18).

Das Modellgebiet wird so groß gewählt, dass der gesamte Einflussbereich der Ausbaumaßnahmen untersucht werden kann und die ausbaubedingten Änderungen nicht bis zum seeseitigen Rand reichen. Es umfasst das Elbe - Ästuar mit der Außenelbe (Elbe - km 756), der Unterelbe sowie der Mittelelbe bis Bleckede (Elbe - km 549,7). Es enthält das im Untersuchungsrahmen (WSD Nord & BWA, 2005) festgelegte Untersuchungsgebiet. Da bei Sturmflut die Nebenflüsse der Elbe durch Sperrwerke von der Elbe getrennt sind, werden diese im Modell nicht berücksichtigt.

Für die Untersuchungen werden im Rahmen der wasserbaulichen Systemanalyse die hydrodynamischen Zustandsgrößen für den planerischen Ist – Zustand und für den Ausbauzustand bei identischen hydrologischen und meteorologischen Situationen (Sturmflut vom 3. 1. 1976 (SF76), Sturmflut vom 28. 1. 1994 (SF94), Sturmflut vom 3. / 4. 12. 1999 (SF99) sowie der Bemessungssturmflut 2085A (SFB)) mit einem hochauflösenden zweidimensionalen HN – Modell ermittelt.

Die Ergebnisse sind Grundlage für die Berechnung, Analyse und fachwissenschaftliche Bewertung der ausbaubedingten Änderungen. Die Vorgabe identischer hydrologischer Situationen für die Berechnung des planerischen Ist – Zustandes und des Ausbauzustandes ermöglicht die eindeutige Zuordnung von Veränderungen der Hydrodynamik auf die zu untersuchende Ausbaumaßnahme.

Mit dem mathematischen Tidemodell werden die folgenden Systemzustände des Elbe - Ästuars untersucht:

- planerischer Ist – Zustand (PIZ) und
- Ausbauzustand der Unter- und Außenelbe (AZ385S).

4 Das mathematische Modell des Elbe – Ästuars

Die Auswahl des geeigneten Modellverfahrens, die Festlegung des zu untersuchenden Modellgebietes und die geometrische Auflösung der Topographie sind abhängig von der Aufgabenstellung und bestimmen die Prognosefähigkeit mathematischer Modelle.

4.1 Das numerische Verfahren UnTRIM

Die durch den Unter- und Außenelbeausbau bedingten hydrologischen Veränderungen werden auf der Basis eines numerischen Modells des Elbe – Ästuars unter Verwendung des hydronumerischen Modellverfahrens *UnTRIM* (Casulli, V. und Walters, R.A., 2000) untersucht. Eine detaillierte Beschreibung des Verfahrens findet sich im *Mathematical Model UnTRIM – Validation Document* (BAW, 2004c). *UnTRIM* ist ein Finite Differenzen / Finite Volumen Verfahren, das die Flachwassergleichungen auf einem unstrukturierten orthogonalen Gitter löst. Grundlage des Verfahrens *UnTRIM* sind Differentialgleichungen, die eine mathematische Formulierung der physikalischen Erhaltungssätze für das Wasservolumen und den Impuls der Strömung darstellen. Zur Modellierung von Sturmfluten wird die tiefenintegrierte Version von *UnTRIM* verwendet.

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

- Wasserspiegelauslenkung (bezüglich NN) und
- Strömungsgeschwindigkeit (tiefengemittelt).

Bei der Berechnung der aufgezählten physikalischen Größen berücksichtigt das mathematische Modell des Elbe – Ästuars 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.

Die räumliche und zeitliche Variabilität des lokalen Windfeldes erzeugt einen zusätzlichen räumlich und zeitlich variablen Impulseintrag aus der Atmosphäre, der Strömung und Wasserstand von Flüssen und Ästuaren kleinräumig beeinflusst. Dieser Effekt ist bei Extremereignissen wie Sturmfluten nicht zu vernachlässigen und muss deshalb im Rahmen dieser Untersuchungen im HN – Modell berücksichtig werden.

Der Impulseintrag aus der Atmosphäre wird parametrisiert und durch die Windschubspannung $\vec{\tau}_{Wind}$ beschrieben:

$$\vec{\tau}_{Wind} = \rho_{Luft} C_D \vec{v}_{10,Wind} |\vec{v}_{10,Wind}|.$$

Hierbei bezeichnet ρ_{Luft} die Dichte der Luft und $\vec{v}_{10,Wind}$ die Windgeschwindigkeit in 10 m Höhe über Grund. Für die vorliegenden Untersuchungen wird der Impulsaustauschkoeffizient C_D mit den von Smith und Banke (Smith, S.D. und Banke, E.G, 1975) vorgeschlagenen Koeffizienten berechnet:

$$C_D = (0.63 + 0.066 |\vec{v}_{10,Wind}|) 10^{-3}.$$

4.2 Modellgebiet

Das Modellgebiet des verwendeten HN-Modells umfasst die folgenden Gebiete:

- Außenelbe bis Elbe – km 756,
- Unterelbe und
- Mittelelbe bis Bleckede (Elbe – km 550).

Das Modellgebiet deckt den durch die Planfeststellungsbehörde festgelegten Untersuchungsraum ab (WSD Nord & BWA, 2005).

Bei der Festlegung der Grenzen (Berandung) des Simulationsgebietes werden folgende Kriterien beachtet:

- Der offene seeseitige Rand muss hinreichend weit von den durchgeführten Maßnahmen in der Unter- und Außenelbe entfernt sein. Es ist zu gewährleisten, dass die für die Modellsteuerung erforderlichen Größen (z.B. Wasserstandsverlauf) am seeseitigen Rand nicht durch die zu untersuchenden Maßnahmen beeinflusst sind.
- Da bei hohem Oberwasserzufluss (> 1100 m^3/s) oder Sturmflut das Wehr Geesthacht gelegt wird, reicht das Modellgebiet bis Bleckede.
- Da bei Sturmflut die Nebenflüsse der Elbe durch Sperrwerke von der Elbe getrennt sind, werden diese im Modell nicht berücksichtigt.

Ausgehend von den vorstehend ausgeführten Kriterien wurde das in Bild 1 auf der nächsten Seite dargestellte Modellgebiet gewählt. Der seeseitige Rand des Modellgebietes wird durch die gedachte Linie von Cuxhaven – Sahlenburg über Neuwerk, Scharhörn, Bake A, Bake Z bis Blauortsand und dann nach Osten zur Schleswig – Holsteinischen Küste gebildet. Landseitig endet das Modell bei Bleckede. Das Gebiet des Elbe – Ästuars ist bis zur Deichlinie nachgebildet.

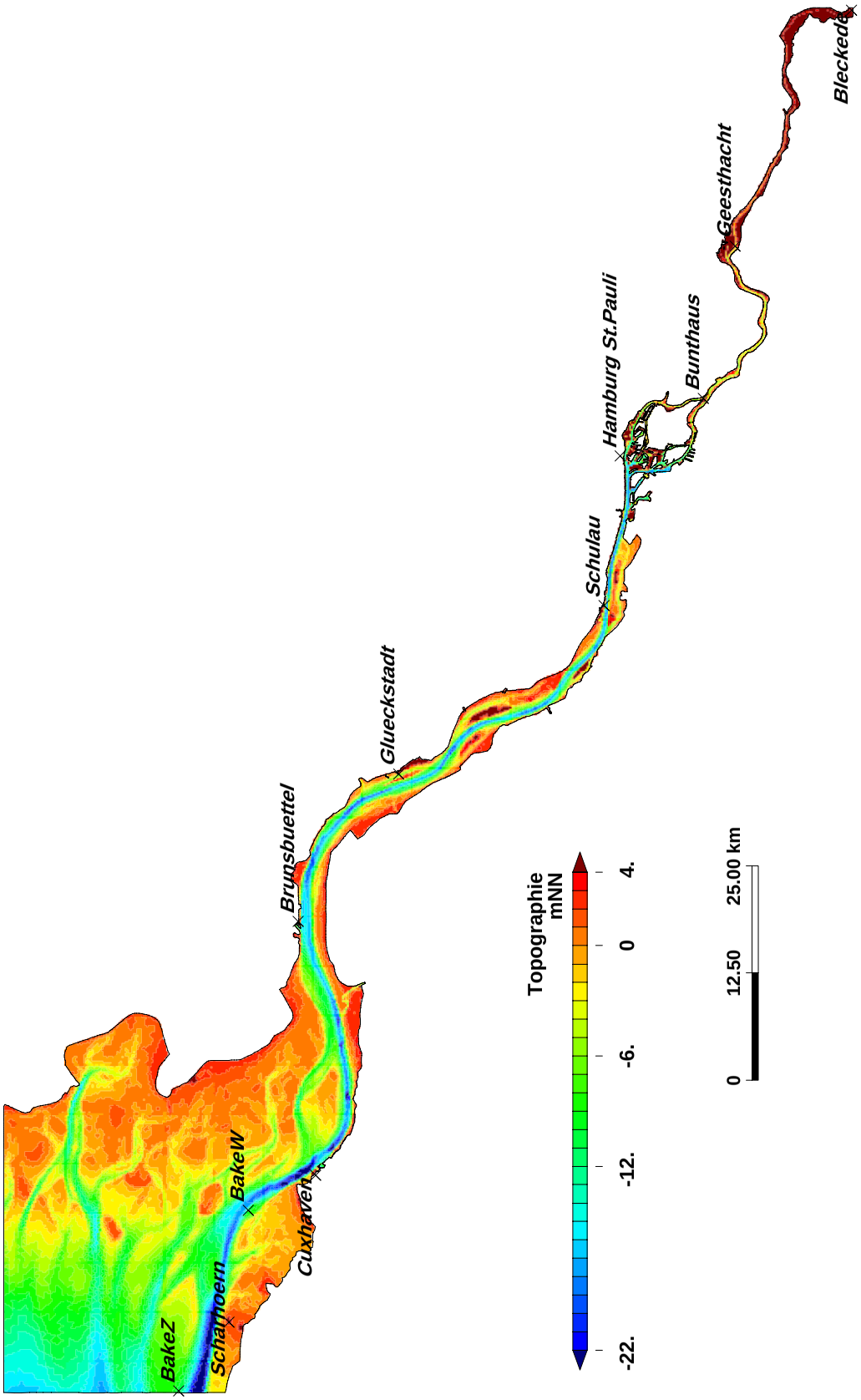

Bild 1: *Topographie des HN – Modells des Elbe – Ästuars für Sturmflutuntersuchungen (planerischer Ist – Zustand PIZ) mit ausgewählten Pegelorten.*

4.3 Gitternetz

Das dem HN – Modell zugrunde liegende unstrukturierte orthogonale Gitternetz ist im vorliegenden Fall aus dreieckigen Gitterelementen aufgebaut und überdeckt das Modellgebiet vollständig. Gitternetz und räumliche Diskretisierung werden wie folgt näher beschrieben:

- Anzahl der Knoten: 77083
- Anzahl der Kanten: 223891
- Anzahl der Polygone: 146783
- Kantenlänge: 5 m bis 820 m
- Elementflächen: 47 m^2 bis 0,62 km^2.

4.4 Modelltopographie der Untersuchungsvarianten

4.4.1 Planerischer Ist – Zustand PIZ

Zur Erstellung der hochaufgelösten Modelltopographie liegen Informationen über den morphologischen Zustand 2003 vor. Im planerischen Ist – Zustand (PIZ, siehe auch Bild 1 auf Seite 9) werden außerdem alle baulichen Maßnahmen berücksichtigt, die zum Zeitpunkt der Ausführung der zu untersuchenden Maßnahme AZ385S mit hoher Wahrscheinlichkeit realisiert sein werden. Da für die Sturmflutuntersuchungen dieselbe Topographie wie für die Untersuchungen zur Tidedynamik verwendet wird, gelten auch hier die im Gutachten zu *Tidedynamik und Salztransport* in Kapitel 3 (BAW, 2006c) gegebenen Erläuterungen.

Bild 3 auf Seite 13 zeigt in Schwarz das Längsprofil der Sohllage entlang des Elbefahrwassers für den *planerischen Ist – Zustand* (PIZ) zwischen Elbe – km 748 in der Außenelbe und Elbe – km 550 bei Bleckede.

4.4.2 Ausbauzustand Unter- und Außenelbe AZ385S

Die Topographie des Ausbauzustandes der Unter- und Außenelbe (AZ385S) wird auf der Grundlage der Topographie des planerischen Ist- Zustandes (PIZ) erstellt. Der Ausbauzustand AZ385S enthält zusätzlich zur Anpassung der Fahrrinne und der 385 m breiten Begegnungsstrecke zwischen Elbe – km 644 und Elbe – km 636 auch die im Gutachten zu Tidedynamik und Salztransport (BAW, 2006c) beschriebenen Unterwasserablagerungsflächen, Übertiefenverfüllungen, Ufervorspülungen sowie Spülfelder. Eine detaillierte Beschreibung der Topographie für den Ausbauzustand der Unter- und Außenelbe (AZ385S) gibt Kapitel 3 des Gutachtens zu Tidedynamik und Salztransport (BAW, 2006c).

In Bild 2 sind die ausbaubedingten Änderungen der Topographie des HN – Modells des Elbe – Ästuares dargestellt.

Bild 3 zeigt in Rot zusätzlich das Längsprofil der Sohllage entlang des Elbefahrwassers für den *Ausbauzustand* (AZ385S) zwischen Elbe – km 748 in der Außenelbe und Elbe – km 550 bei Bleckede. Man erkennt, dass stromauf des Hamburger Hafens keine Veränderungen der Sohllage auftreten.

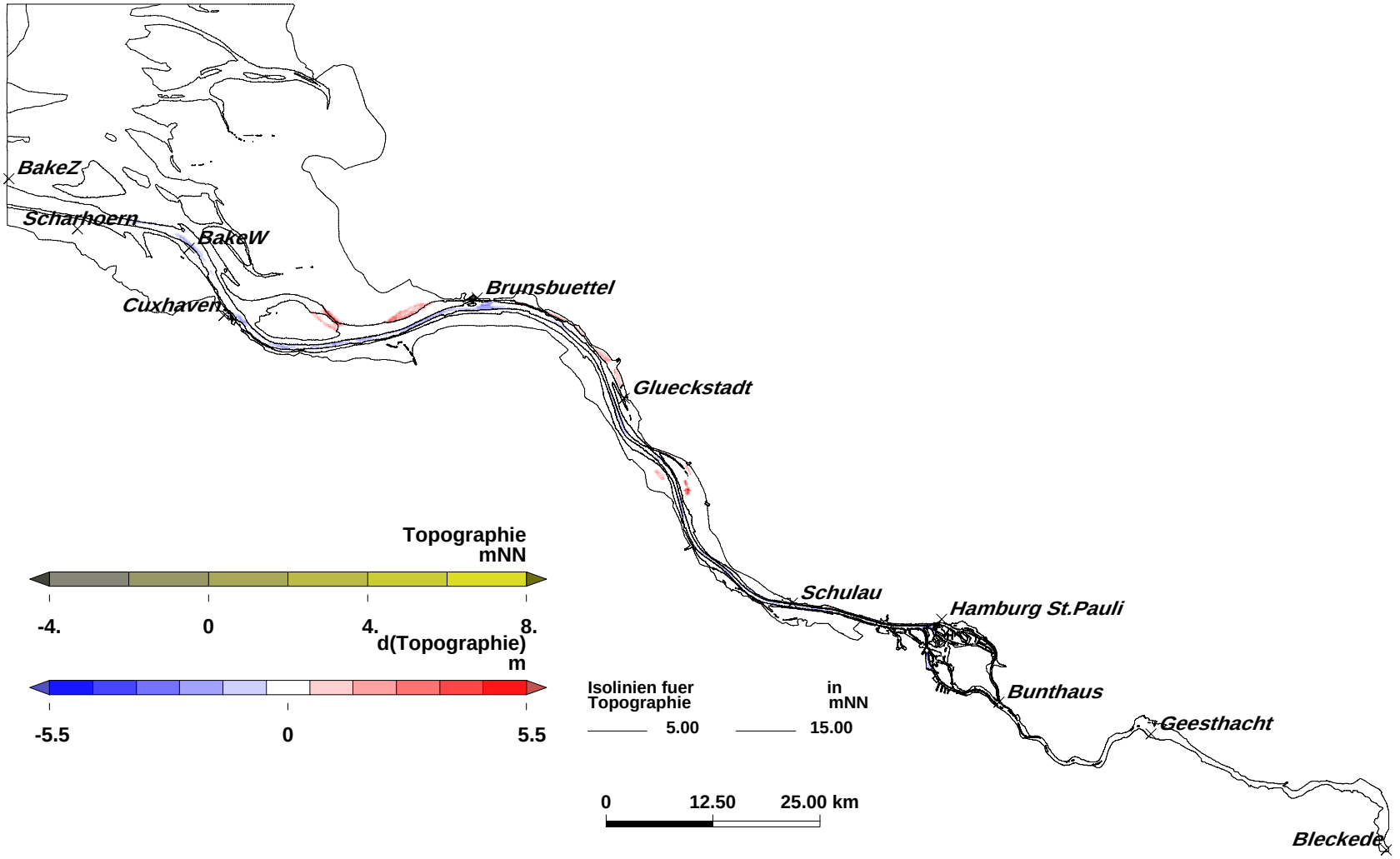

Bild 2: *Änderung der Topographie des HN – Modells des Elbe – Ästuars für Sturmflutuntersuchungen (AZ385S – PIZ) mit ausgewählten Pegelorten. Eine Farbstufe entspricht einer Tiefenänderung von 1 m. In den weiß dargestellten Gebieten ändert sich die Topographie um weniger als ±50 cm.*

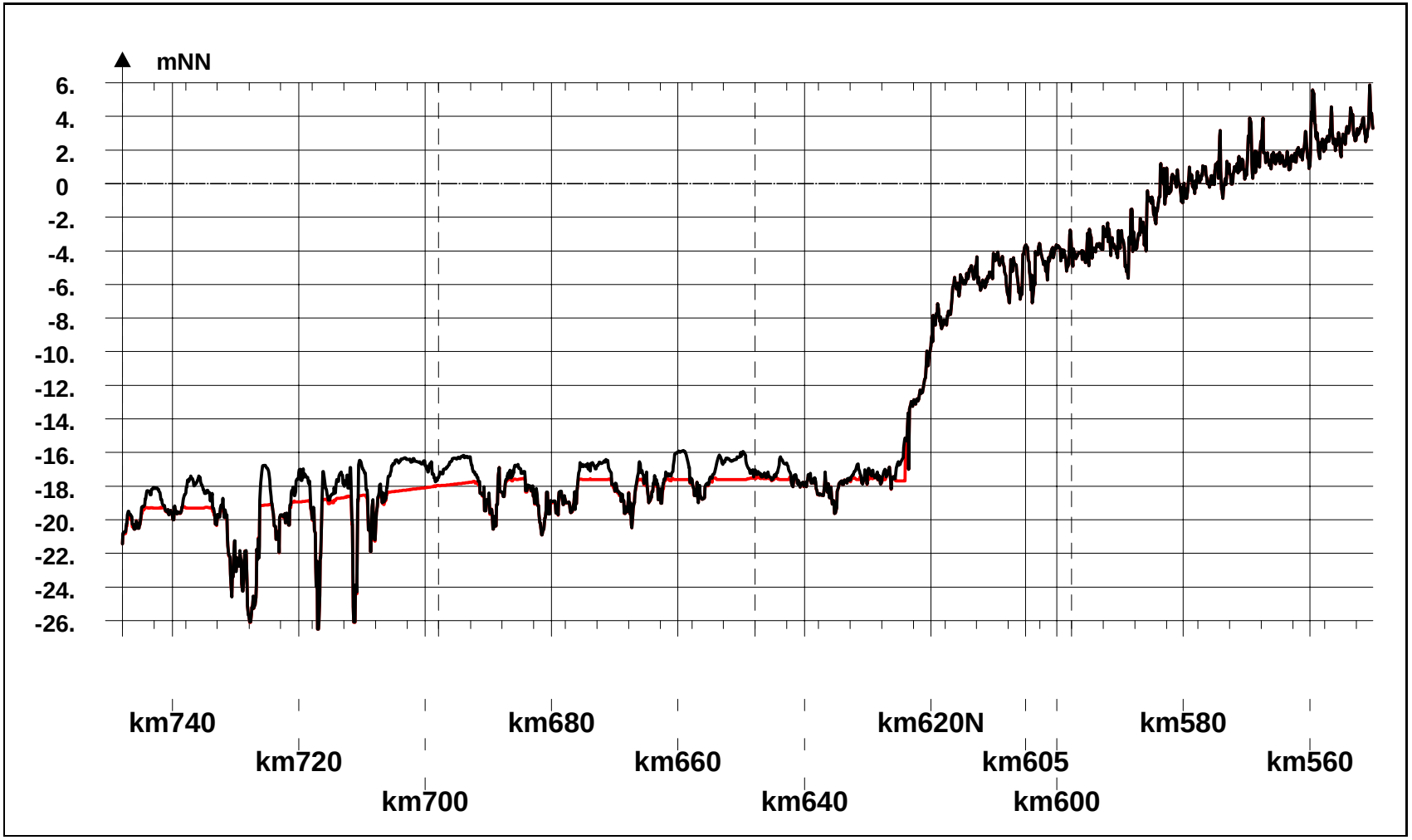

Bild 3: *Längsprofil der auf NN bezogenen Sohllage der Fahrrinnenachse in der Topographie des HN – Modells für den planerischen Ist – Zustand (PIZ, schwarz) und für den Ausbauzustand (AZ385S, rot) zwischen Elbe – km 748 und Elbe – km 550. Stromauf des Hamburger Hafens treten keine ausbaubedingten Veränderungen der Sohllage auf.*

4.5 Modellsteuerung

Für die Steuerung des mathematischen Modells wird am offenen seeseitigen Rand der zeitliche Verlauf des Wasserstandes für jedes auf dem offenen Rand liegende Polygon vorgegeben.

Für die Sturmflut vom 3. 1. 1976 (SF76) wird aus den Pegelaufzeichnungen der Bake W (Zehnerloch) unter Berücksichtigung einer Übertragungsfunktion der Wasserstandsverlauf auf dem seeseitigen Modellrand bestimmt.

Für die Sturmfluten vom 28. 1. 1994 (SF94) wird der Wasserstandsverlauf aus Modellergebnissen des großräumiger HN – Modells der Deutschen Bucht (Plüß, A., 1999) vorgegeben.

Für die Sturmfluten vom 3./4. 12. 1999 (SF99) wird der Wasserstandsverlauf aus Modellergebnissen des großräumiger HN – Modells der Deutschen Bucht (Plüß, A., 1999) vorgegeben.

Für die Bemessungssturmflut 2085A (SFB) wird der Wasserstandsverlauf auf dem seeseitigen Modellrand unter Berücksichtigung einer Übertragungsfunktion so erzeugt, dass die Vorgaben der *Länderarbeitsgruppe, 1988* für Cuxhaven erreicht werden.

Die Bilder 4 bis 7 zeigen für die Sturmfluten SF76, SF94, SF99 und SFB am Pegel Cuxhaven den Vergleich zwischen beobachteter und mit dem HN – Modell berechneter Wasserstandsentwicklung. Die Lage des Pegels Cuxhaven ist aus Bild 1 ersichtlich.

Im HN – Modell der Elbe wird die Topographie des planerischen Ist – Zustandes (Datengrundlage Jahrespeilung 2003) berücksichtigt. Es werden somit Sturmflutszenarien vom Typ SF76 (steile Windstaukurve), SF94 (füllige Windstaukurve), SF99 (Windstaumaximum in zeitlicher Nähe zum Hochwasser) sowie die Bemessungssturmflut in der Topographie des planerischen Ist – Zustandes untersucht.

Am landseitigen offenen Modellrand bei Bleckede werden für die historischen Sturmfluten SF76, SF94 und SF99 die am Pegel Neu Darchau gemessenen Abflüsse (siehe hierzu DGJ, 1976, DGJ, 1997 und DGJ, 2001) mit einem Zeitversatz von + 7 Stunden (ermittelt aus Laufzeit der Hochwasserwelle zwischen Neu Darchau und Bleckede, pers. Mitteilung WSA Lauenburg) vorgegeben. Für die Bemessungssturmflut SFB ist der Oberwasserzufluss mit $Q = 2200\ m^3/s$ definiert (Länderarbeitsgruppe, 1988).

Das Wehr Geesthacht ist bei Sturmflut gelegt. Die Sturmflutsperrwerke an den Nebenflüssen der Elbe werden für die Untersuchungszeiträume als geschlossen vorausgesetzt.

Zur Berechnung des Impulseintrages aus der Atmosphäre während der Sturmfluten SF76, SF94, SF99 und SFB wird die Windgeschwindigkeit in 10 m Höhe aus modellierten hochaufgelösten lokalen Windfeldern über dem gesamten Modellgebiet vorgegeben (vgl. Abschnitt 2 auf Seite 3). Im Abstand von zwei Stunden liegen für die Zeiträume 1. 1. 1976 bis 4. 1. 1976, 25. 1. 1994 bis 29. 1. 1994, 30. 11. 1999 bis 4. 12. 1999 sowie 1. 1. bis 4. 1. (SFB, Datum ohne Bedeutung) Windfelder mit einer räumlichen Auflösung von 450 m x 450 m vor. Bild 8 zeigt für den 3. 12. 1999 20:00 h und beispielhaft ein mit MKW (Schmidt, H. und Pätsch, J., 1992) modelliertes Windfeld.

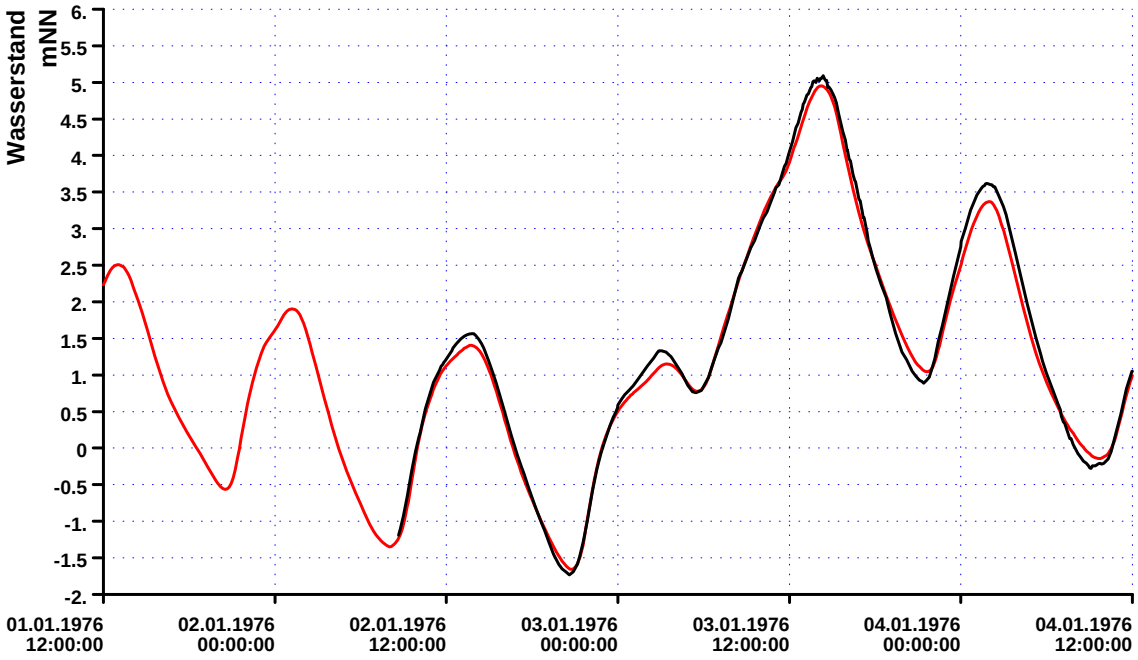

Bild 4: *SF76, Wasserstandsentwicklung vom 1.1. bis 4.1.1976 für den Pegel Cuxhaven. Die Messung ist schwarz und die Rechnung (HN – Modell der Elbe, PIZ) rot gekennzeichnet.*

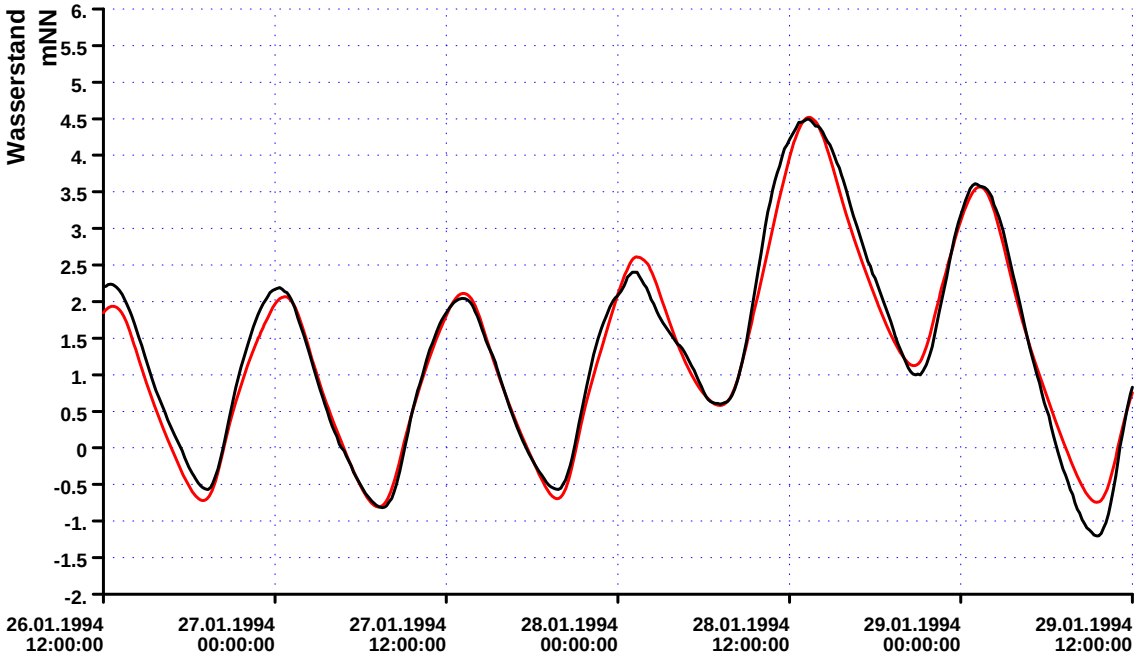

Bild 5: *SF94, Wasserstandsentwicklung vom 26.1. bis 29.1.1994 für den Pegel Cuxhaven. Die Messung ist schwarz und die Rechnung (HN – Modell der Elbe, PIZ) rot gekennzeichnet.*

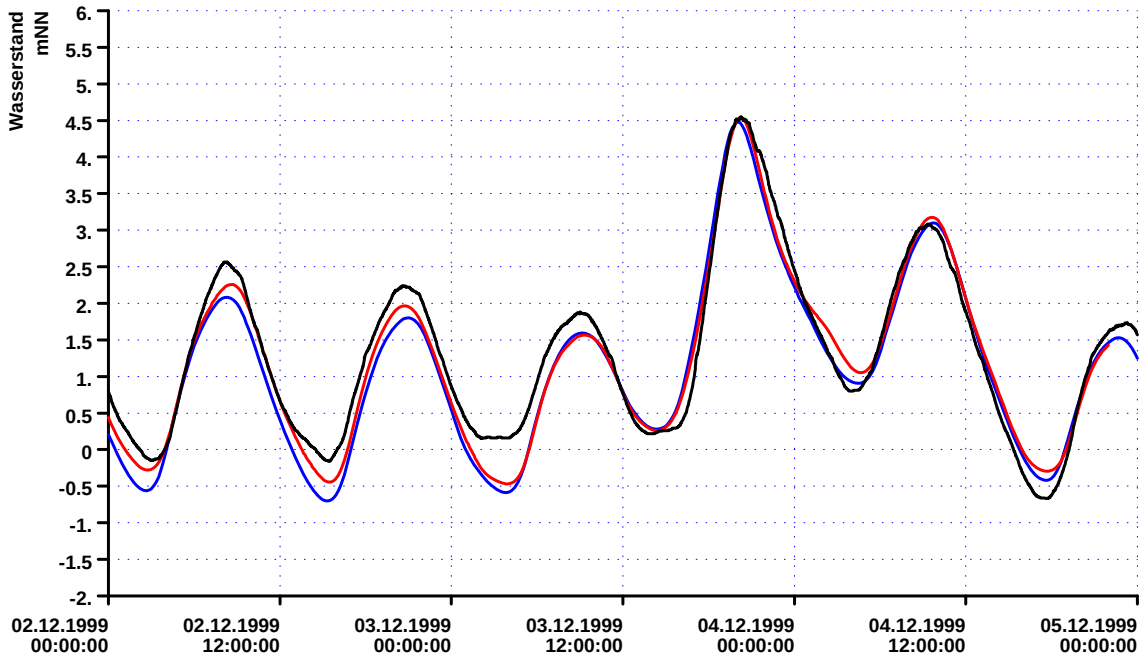

Bild 6: *SF99, Wasserstandsentwicklung vom 2. 12. bis 5. 12. 1999 für den Pegel Cuxhaven. Die Messung ist schwarz und die Rechnung (HN – Modell der Elbe, PIZ) rot gekennzeichnet. In Blau ist der mit dem HN – Modell der Deutschen Bucht (Randwertmodell) berechnete Wasserstandsverlauf dargestellt.*

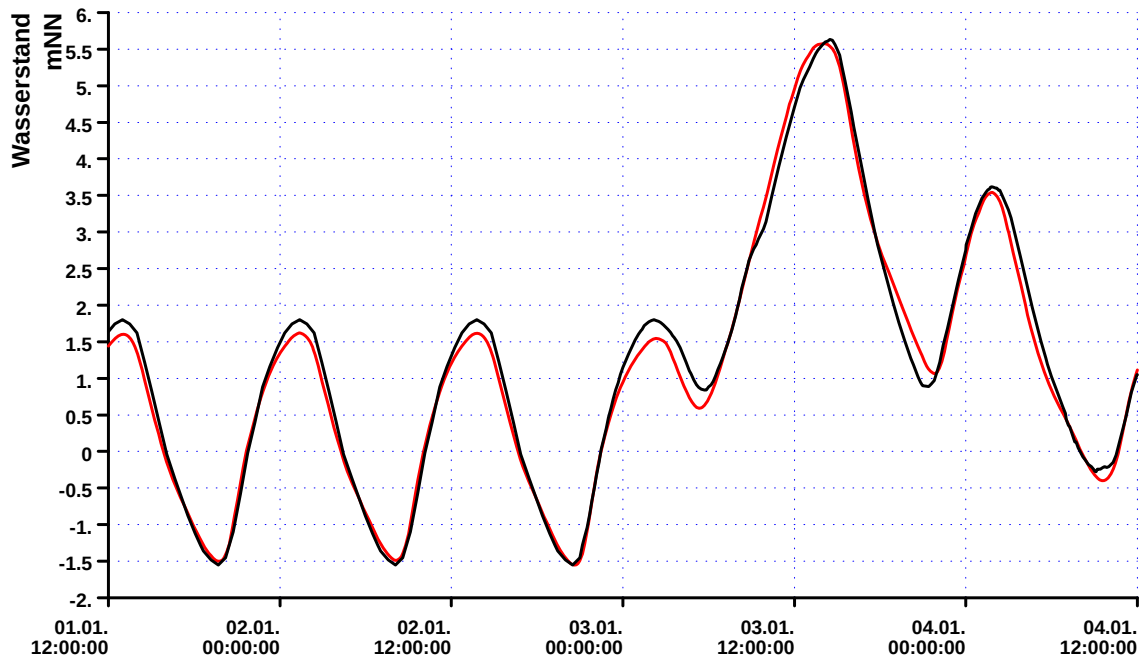

Bild 7: *SFB, Wasserstandsentwicklung vom 1. 1. bis 4. 1. (Datum ohne Bedeutung) für den Pegel Cuxhaven. Die durch die Definition der Bemessungssturmflut 2085A vorgegebene Wasserstandsentwicklung ist schwarz und die Rechnung (HN – Modell der Elbe, PIZ) rot gekennzeichnet.*

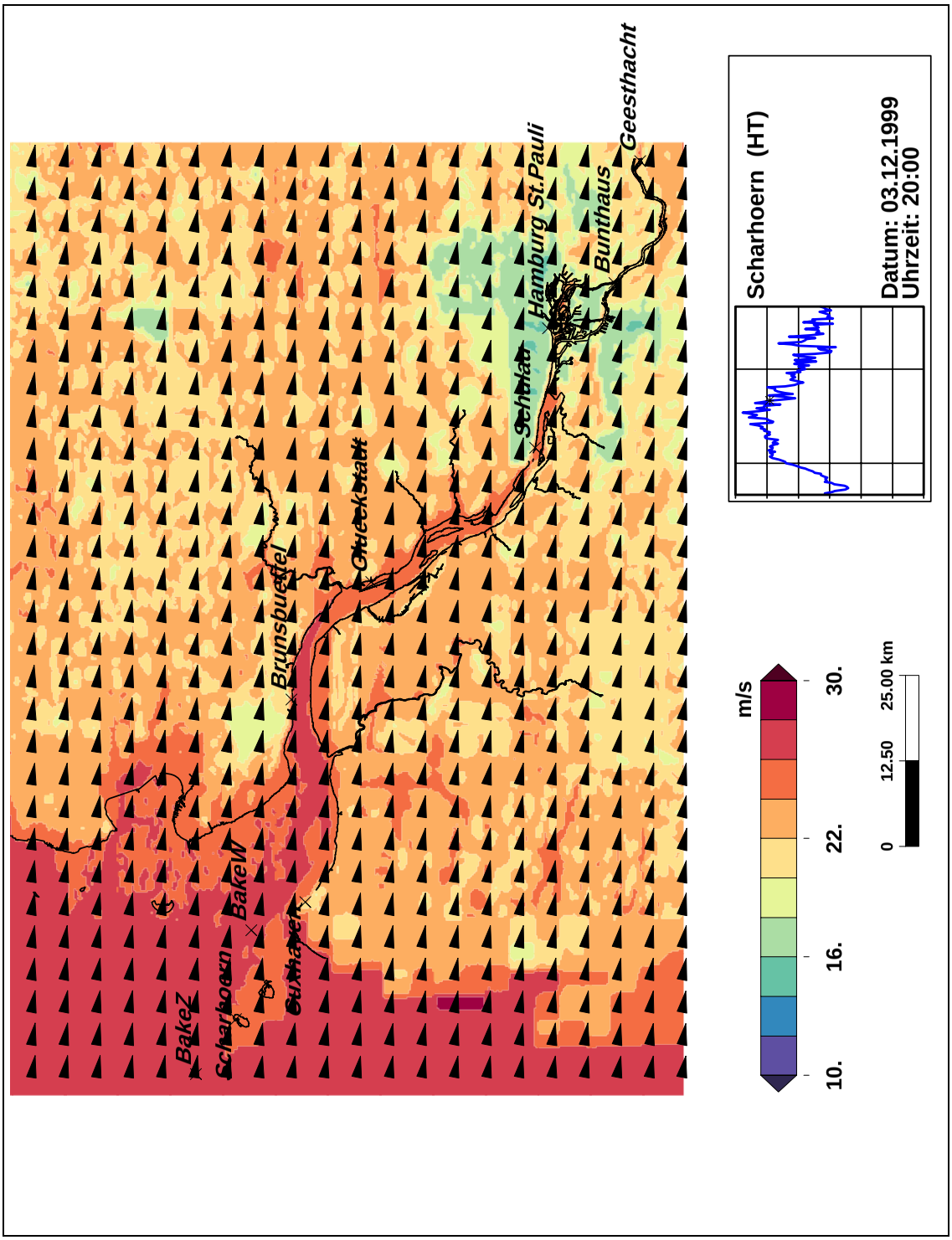

Bild 8: *Sturmflut SF99: Windgeschwindigkeit 10 m über Grund am 3. 12. 1999 20:00 Uhr berechnet mit MKW (DWD).*

4.6 Das HN – Modell der Elbe

Der Berechnung der ausbaubedingten Änderungen der Hydrologie der Unter- und Außenelbe geht die Kalibrierung und Validierung des Modelles für den Ist – Zustand voraus. Bild 9 zeigt den Weg von der Analyse der Realität über das konzeptionelle Modell und den Modell – Code zum ortsspezifischen numerischen Modell (HN – Modell). Dessen Ergebnisse werden wiederum mit der Realität verglichen.

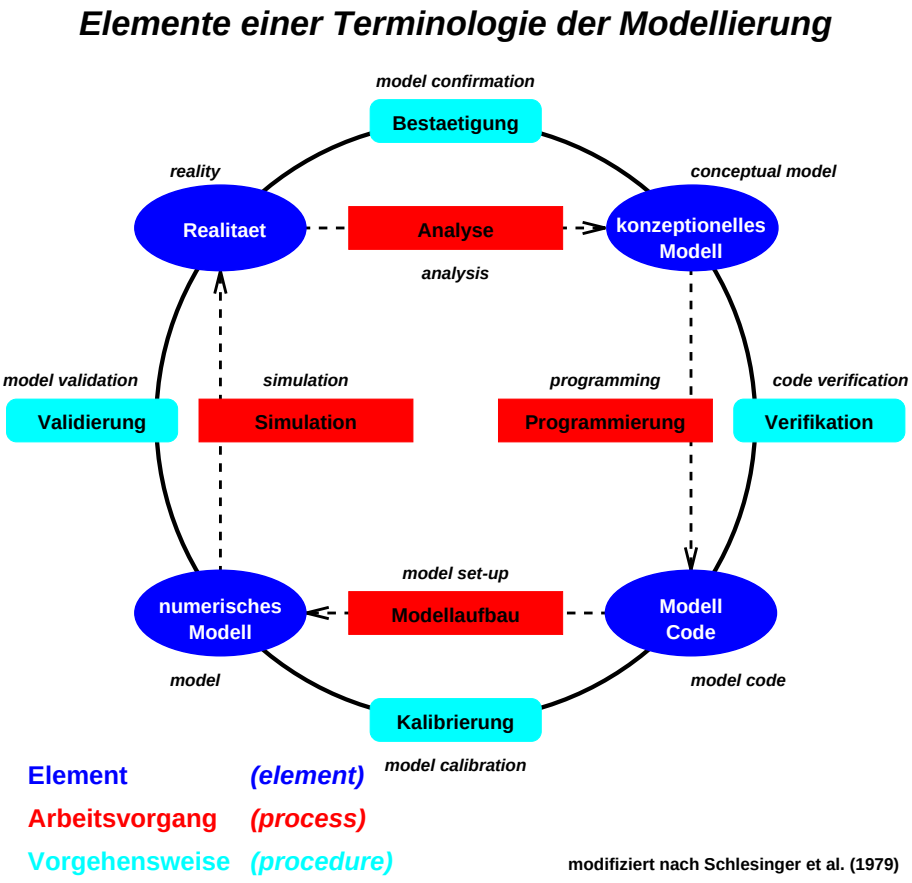

Bild 9: *Elemente einer Terminologie der Modellierung (nach Schlesinger, S. et al., 1979).*

Für die Modellkalibrierung werden verschiedene Parameter eines ortsspezifischen numerischen Modells so angepasst, dass ein realitätsnahes Modellverhalten erzielt wird. Abweichungen können sich aus Messfehlern (Pegelmessungen, Peilungen) und aus Modellapproximationen und -parametrisierungen ergeben.

Mit der Modellvalidierung wird der Nachweis erbracht, dass die Ergebnisse des verwendeten numerischen Modells für den Anwendungsbereich innerhalb des geforderten Genauigkeitsbereiches für die beabsichtigte Modellanwendung (siehe hierzu Anlage 8 des Gutachtens zu *Tidedynamik und Salztransport* (BAW, 2006c) liegen. Hierbei werden die bei der Kalibrierung ermittelten Parameter unverändert für andere Simulationszeiträume übernommen.

4.6.1 Kalibrierung

Zur Kalibrierung des HN – Modells des Elbe – Ästuares werden gemessene Zeitreihen des Wasserstandes aus dem Zeitraum 11. 5. 2002 bis 26. 5. 2002 (siehe BAW, 2006c) mit den entsprechenden berechneten Zeitreihen verglichen. Wesentliches Ziel der Kalibrierung und Validierung ist es, nachzuweisen, dass das HN – Modell, welches immer ein vereinfachtes Ersatzsystem der komplexen natürlichen Vorgänge darstellt, das Systemverhalten (Tidedynamik) im Untersuchungsgebiet richtig wiedergibt. Eine detaillierte Beschreibung der Kalibrierung und Validierung wird in Anlage 8 des Gutachtens zu Hydrodynamik und Salztransport (BAW, 2006c) vorgestellt.

Im Rahmen der Sturmflutuntersuchungen wird eine Re-Kalibrierung durchgeführt. Mit dem für den morphologischen Zustand 2003 und für einen Spring – Nipp – Zyklus im Mai 2002 kalibrierten HN – Modell des Elbe – Ästuares wird unter Berücksichtigung der Topographie des planerischen Ist – Zustandes (PIZ) der Sturmflutzeitraum 25. 1. 1994 1:00 Uhr bis zum 29. 1. 1994 13:00 Uhr mit *UnTRIM* (3D, mit Dichteeinfluss durch räumliche Gradienten des Salzgehaltes) modelliert.

Bild 11 auf der nächsten Seite zeigt den gemessenen (schwarz) und modellierten Wasserstandsverlauf (blau) am Pegel Hamburg St. Pauli. Für die Vortide am Morgen des 27. 1. 1994 findet man eine gute Übereinstimmung zwischen Messung und Modell. Bei den deutlich höheren Wasserständen während der Sturmflut am 28. 1. 1994 überschätzt das Modell die gemessenen Wasserstände um ca. 15 cm. Die für die Kalibrierung verwendete Reibungsverteilung ist auf Bild B.1 auf Seite 72 dargestellt. Auf den nur bei Sturmflut überfluteten Vorlandbereichen und Wattgebieten wurde die effektive Sohlrauheit bei der Kalibrierung sehr niedrig angesetzt. Für die Sturmflutmodellierung wird deshalb nur in diesen Gebieten die effektive Sohlrauheit (siehe Bild B.2 auf Seite 73) erhöht. Dies führt zu einem Absenken der Sturmflutscheitelwasserstände in Hamburg St. Pauli um ca. 15 cm (siehe Bild 11 auf der nächsten Seite, rot), während die Wasserstände der Vortide kaum verändert werden. Die Kalibrierung des HN – Modells der Elbe wurde mit dieser Vorgehensweise für sehr hohe Wasserstände angepasst.

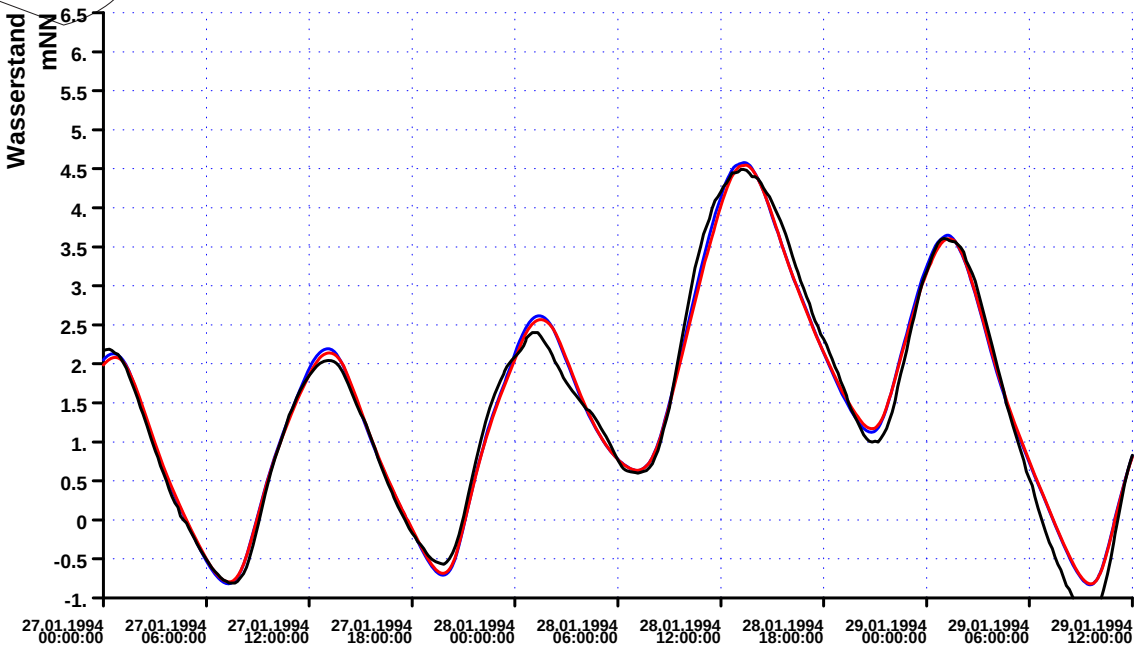

Bild 10: *Einfluss der eff. Sohlrauheit auf die Wasserstandsentwicklung am 27. und 28. 1. 1994 am Pegel Cuxhaven. Die Messung ist schwarz, die Modellrechnung (PIZ, eff. Sohlrauheit siehe Bild B.1 auf Seite 72) blau und die Modellrechnung mit der für Sturmflutverhältnisse angepassten eff. Sohlrauheit (PIZ, eff. Sohlrauheit siehe Bild B.2) rot gekennzeichnet.*

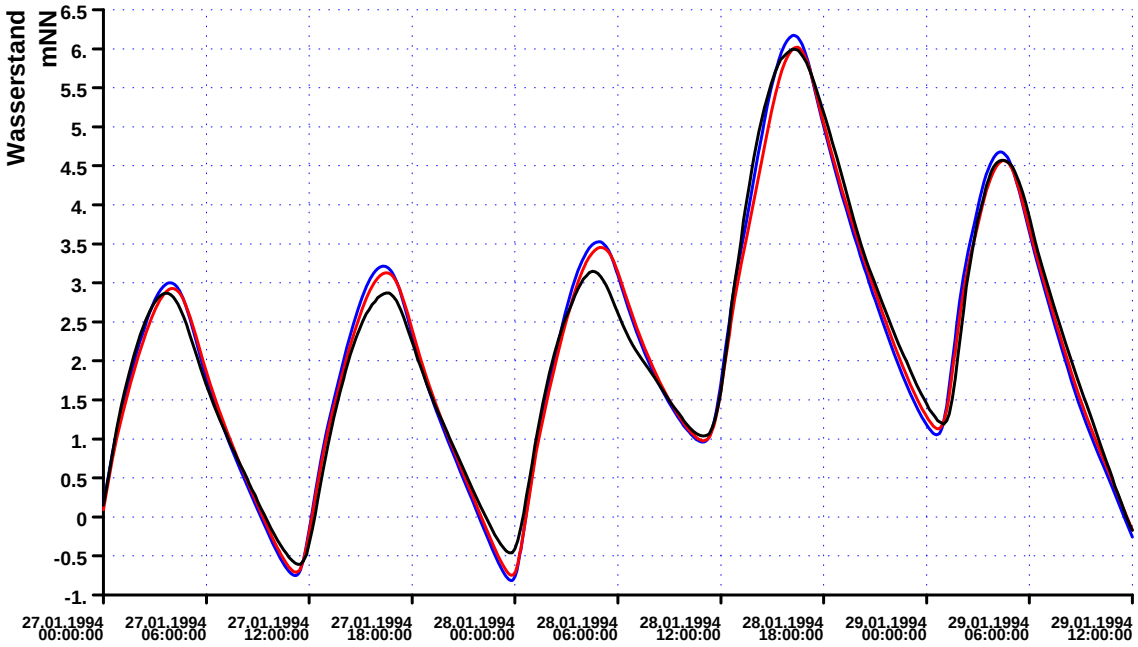

Bild 11: *Einfluss der eff. Sohlrauheit auf die Wasserstandsentwicklung am 27. und 28. 1. 1994 am Pegel Hamburg St. Pauli. Die Messung ist schwarz, die Modellrechnung (PIZ, eff. Sohlrauheit siehe Bild B.1) blau und die Modellrechnung mit der für Sturmflutverhältnisse angepassten eff. Sohlrauheit (PIZ, eff. Sohlrauheit siehe Bild B.2) rot gekennzeichnet. Durch die Erhöhung der Reibung im Vorland wird der Sturmflutscheitelwasserstand um 15 cm gesenkt. Für die Vortiden ist, wie erwartet, ein deutlich geringerer Einfluss der veränderten Reibung im Vorland auf die Höhe der Wasserstände zu beobachten.*

4.6.2 Vergleich Messung mit Modellergebnis

Die Bilder 12 bis 15 zeigen den Vergleich zwischen den mit dem Modell berechneten (rot) und den gemessenen Wasserstandszeitreihen (schwarz) für den Zeitraum 27. 1. 1994 12:00 Uhr bis 29. 1. 1994 12:00 Uhr an den Pegeln Cuxhaven Steubenhöft, Glückstadt, Hamburg St. Pauli und Bunthaus. Die Lage dieser Pegel ist in Bild 1 auf Seite 9 markiert.

Es zeigt sich, dass die für mittlere Verhältnisse durchgeführte Modellkalibrierung (Anpassung verschiedener Modellparameter) verbunden mit der Anpassung der effektiven Sohlrauheit in bei Sturmflut überfluteten Gebieten für den Sturmflutzeitraum SF94 zu einer guten Übereinstimmung von gemessenen und modellierten Wasserstandszeitreihen führt. Die modellierten Sturmflutscheitelwasserstände weichen an den vier gezeigten Pegeln um $\pm$ 10 cm von den gemessenen Scheitelwasserständen ab.

Für dieses Gutachten wird die an die Sturmflutverhältnisse angepasste Verteilung der effektiven Sohlrauheit (Bild B.2 auf Seite 73) benutzt.

Unterschiede im Wasserstandsverlauf können zum einen mit Veränderungen in der Topographie der Unterelbe seit 1994 erklärt werden. Aber auch die Randsteuerung mit Modellergebnissen aus einem Nordseemodell (siehe hierzu Plüß, A., 1999) kann zu Unterschieden führen, falls im großräumigen Modell einzelne Phänomene nicht aufgelöst sind. So liegen z. B. die großräumigen Windfelder (Gitterweite 75 km x 75 km) über der Nordsee, die im Nordseemodell verwendet werden, im Abstand von 6 Stunden vor. Wasserstandsänderungen durch zeitlich und räumlich kleinskaligere Variationen des Windes können somit vom Nordseemodell nicht erfasst werden.

Die vergleichende Gegenüberstellung des gemessenen (schwarz) und des mit dem HN – Modell des Elbe – Ästuars numerisch berechneten (rot) zeitlichen Wasserstandsverlaufes in den Bildern 12 bis 15 zeigt, dass das Systemverhalten im Tidezyklus sowohl hinsichtlich der Höhen- als auch der Phasenlage durch das Modell nachgebildet wird.

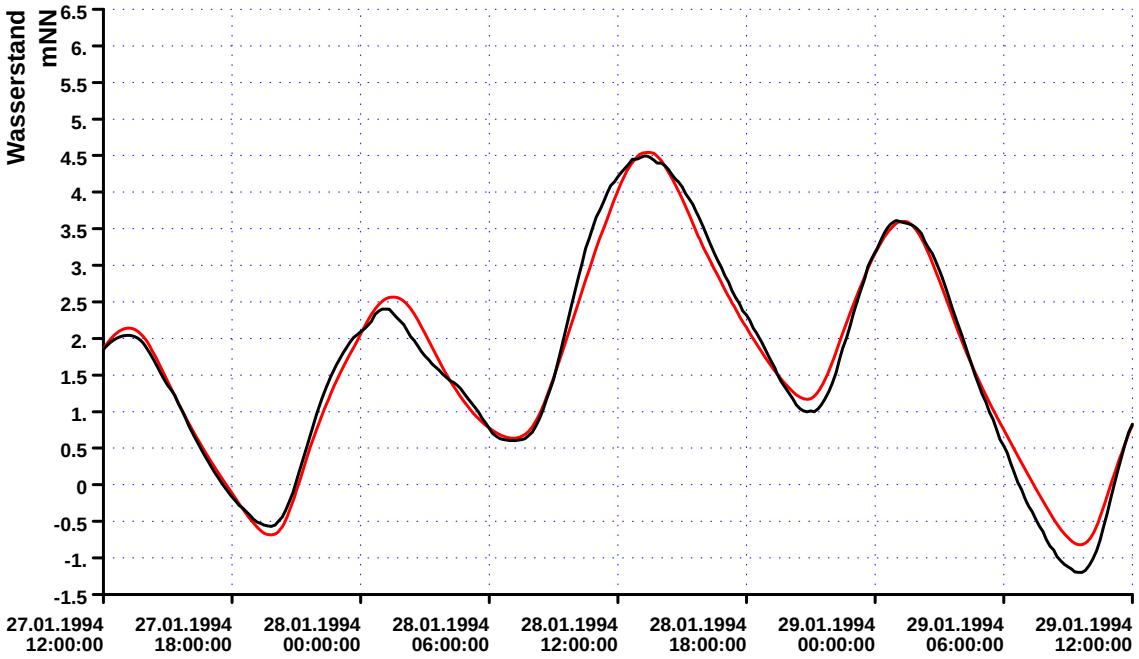

Bild 12: *Wasserstandsentwicklung am 27. und 28. 1. 1994 am Pegel Cuxhaven. Die Messung ist schwarz und die Modellrechnung (PIZ) rot gekennzeichnet.*

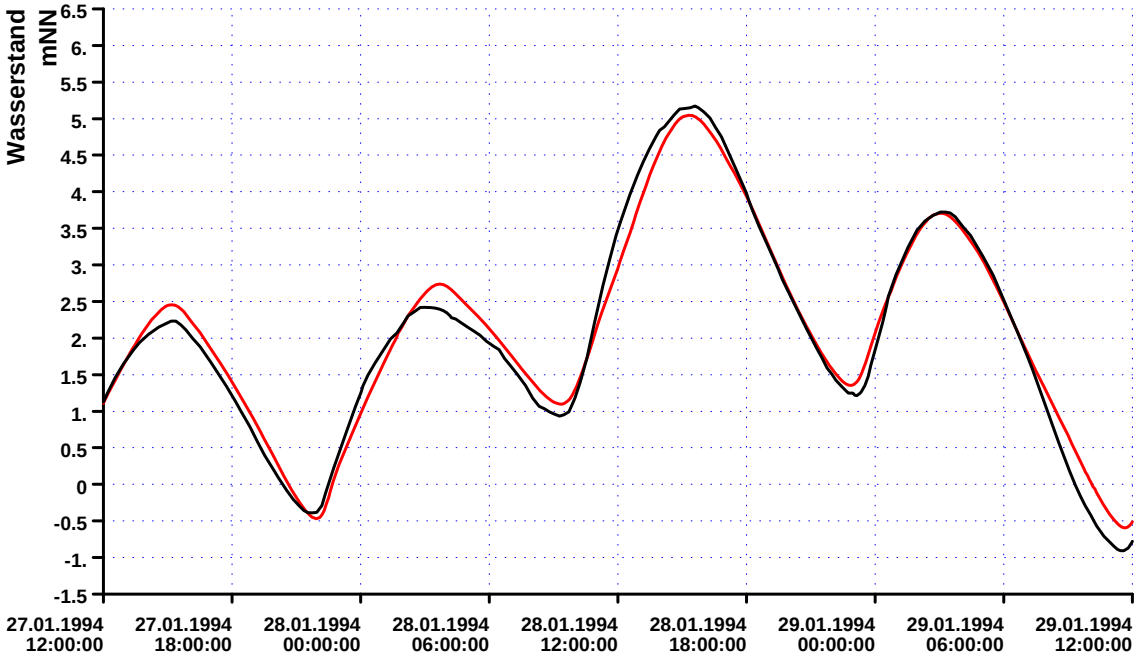

Bild 13: *Wasserstandsentwicklung am 27. und 28. 1. 1994 am Pegel Glückstadt. Die Messung ist schwarz, und die Modellrechnung (PIZ) rot gekennzeichnet.*

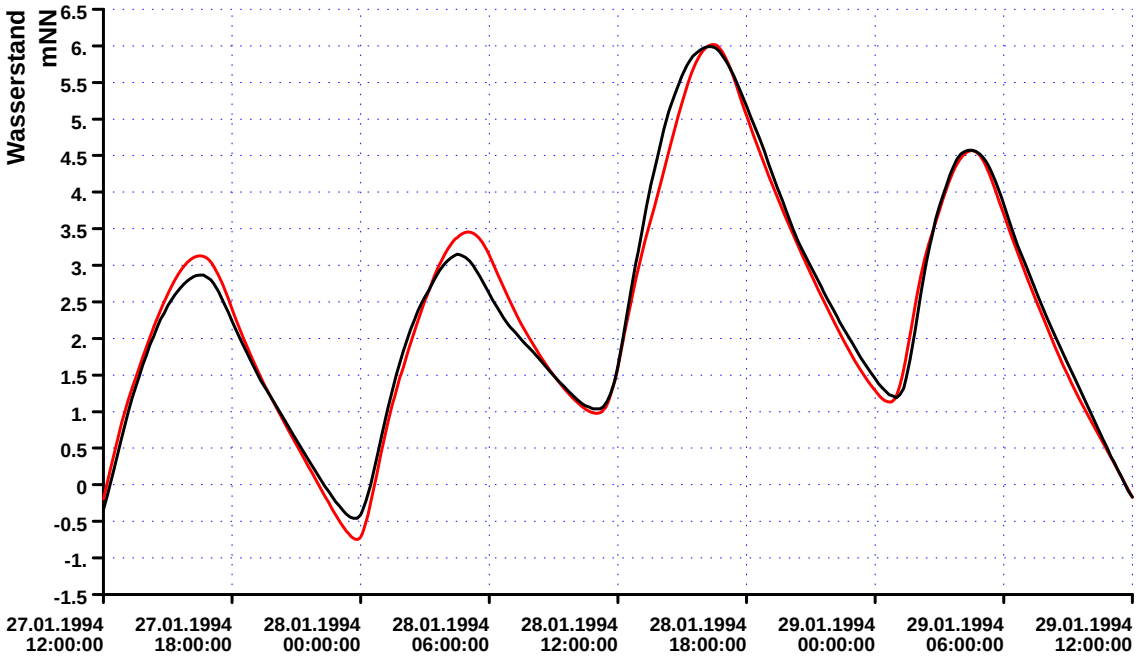

Bild 14: *Wasserstandsentwicklung am 27. und 28. 1. 1994 am Pegel Hamburg St.Pauli. Die Messung ist schwarz und die Modellrechnung (PIZ) rot gekennzeichnet.*

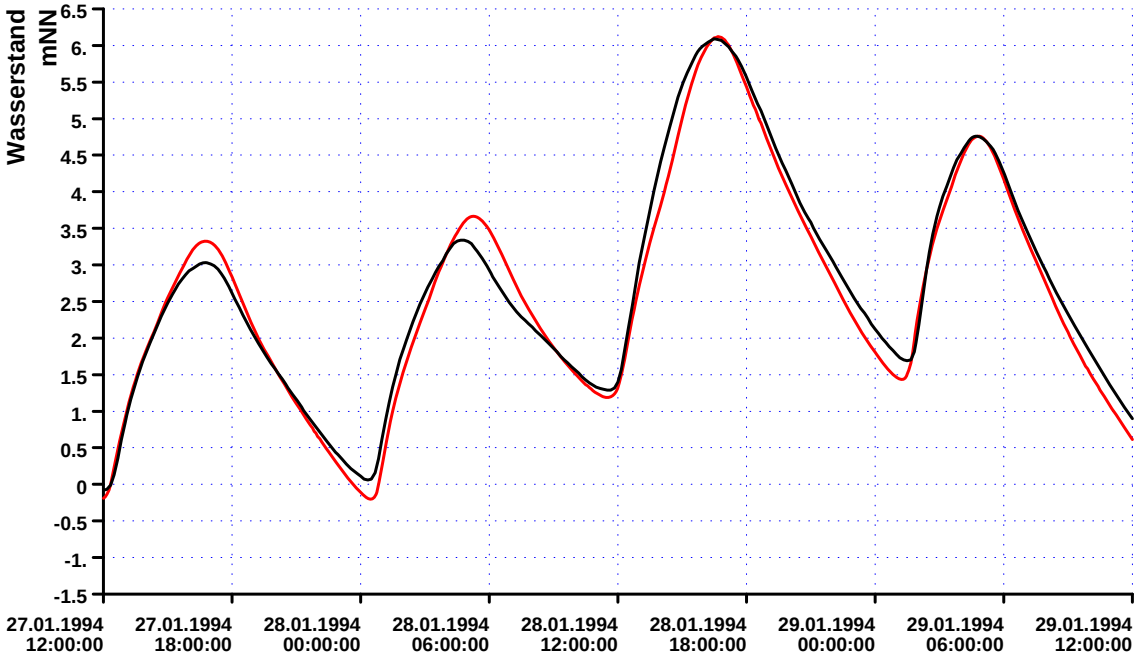

Bild 15: *Wasserstandsentwicklung am 27. und 28. 1. 1994 am Pegel Bunthaus. Die Messung ist schwarz, und die Modellrechnung (PIZ) rot gekennzeichnet.*

4.6.3 Sensitivität der Prognoseergebnisse – Reibung

In einem weiteren Schritt wird geprüft, welchen Einfluss die Erhöhung der Reibung im Vorland für die ausbaubedingten Änderungen des Sturmflutscheitelwasserstandes hat. Bild 16 auf der nächsten Seite zeigt die Scheitelwasserstände entlang der Elbe zwischen der Elbmündung bei Elbe – km 748 und dem Wehr Geesthacht (Elbe – km 586). Durch die Erhöhung der Reibung im Vorland sinken die Scheitelwasserstände (3D_S_rSF in Schwarz) zwischen Brunsbüttel und dem Wehr Geesthacht um 10 bis 15 cm.

Für diese beiden Untersuchungsvarianten wird jeweils die ausbaubedingte Änderung des Sturmflutscheitelwasserstandes (siehe Bild 17 auf der nächsten Seite) bestimmt. Trotz der unterschiedlichen absoluten Wasserstände sind die ausbaubedingten Veränderungen entlang der Tideelbe gleich groß.

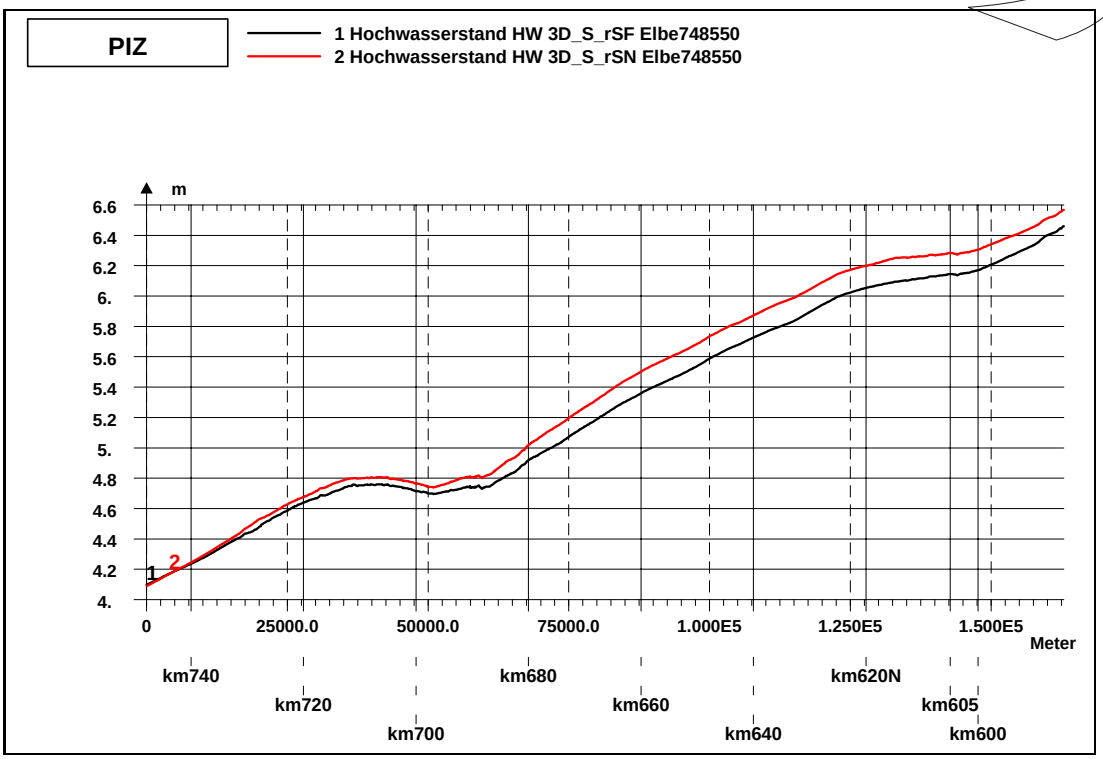

Bild 16: *Sturmflutscheitelwasserstand SF94 im planerischen Ist – Zustand PIZ entlang des Elbefahrwassers von Elbe – km 748 bis Elbe – km 586 unter Berücksichtigung der in Bild B.1 dargestellten eff. Sohlrauheit (3D_S_rSN, rot) sowie der in Bild B.2 dargestellten eff. Sohlrauheit (3D_S_rSF, schwarz).*

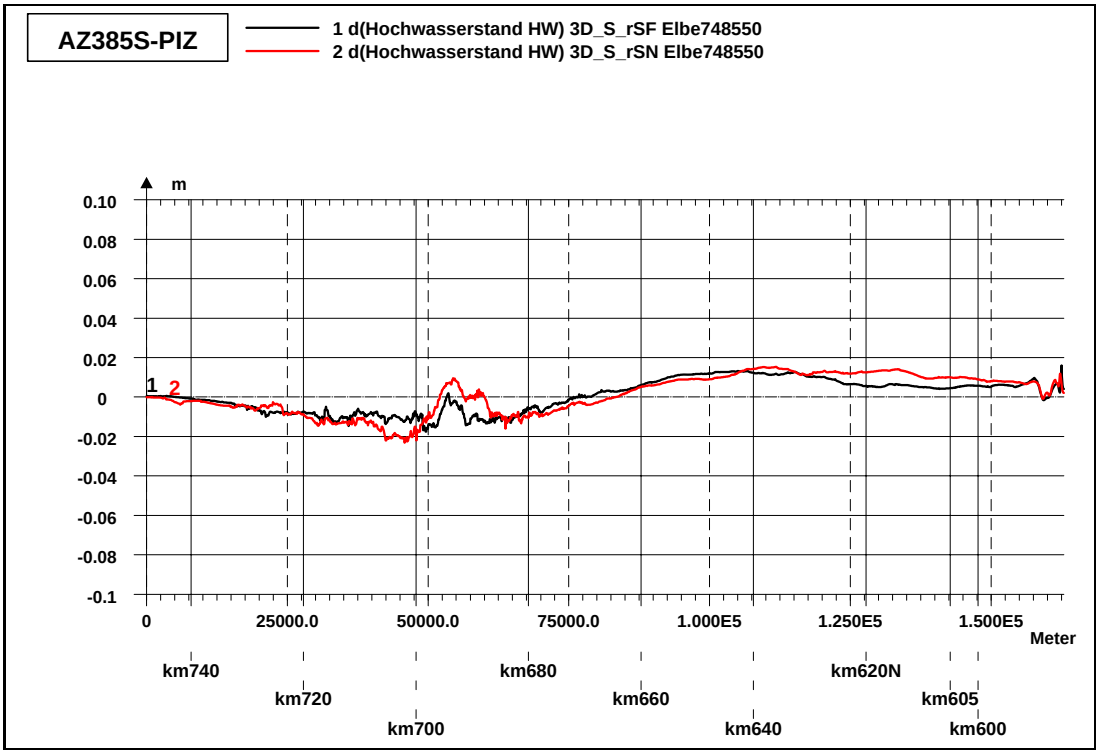

Bild 17: *Änderung des Sturmflutscheitelwasserstandes (AZ385S – PIZ) für die Sturmflut SF94 entlang des Elbefahrwassers von Elbe – km 748 bis Elbe – km 586 unter Berücksichtigung der in Bild B.1 und Bild B.2 dargestellten eff. Sohlrauheit (3D_S_rSN, rot und 3D_S_rSF, schwarz).*

4.6.4 Sensitivität der Prognoseergebnisse – 2D/3D

Die Kalibrierung und Validierung wird für ein dreidimensionales HN – Modell des Elbe – Ästuars unter Berücksichtigung des Dichteeinflusses des Salzes durchgeführt. Im folgenden Abschnitt wird geprüft, ob dreidimensionale Prozesse, bzw. der Dichteeinfluss des Salzes einen Einfluss auf die ausbaubedingten Änderungen der Sturmflutscheitelwasserstände haben.

Für den planerischer Ist – Zustand (PIZ) und den Ausbauzustand (AZ385S) wird jeweils ein Lauf mit *UnTRIM* (3D) sowie der tiefenintegrierten Version *UnTRIM* (2D) mit bzw. ohne Berücksichtigung des Salzeinflusses durchgeführt. Tabelle 1 gibt die verwendeten Kurzbezeichnungen zu diesen acht Untersuchungsvarianten an.

Kurzbezeichnung	Topographischer Zustand	Wind	Oberwasser	Salz	2D / 3D
SF94_PIZ_2D_oS	planerischer Ist – Zustand	MKW-SF94	1350 m^3/s	ohne	2D
SF94_PIZ_3D_oS	planerischer Ist – Zustand	MKW-SF94	1350 m^3/s	ohne	3D
SF94_PIZ_2D_S	planerischer Ist – Zustand	MKW-SF94	1350 m^3/s	mit	2D
SF94_PIZ_3D_S	planerischer Ist – Zustand	MKW-SF94	1350 m^3/s	mit	3D
SF94_AZ385S_2D_oS	Ausbauzustand 385	MKW-SF94	1350 m^3/s	ohne	2D
SF94_AZ385S_3D_oS	Ausbauzustand 385	MKW-SF94	1350 m^3/s	ohne	3D
SF94_AZ385S_2D_S	Ausbauzustand 385	MKW-SF94	1350 m^3/s	mit	2D
SF94_AZ385S_3D_S	Ausbauzustand 385	MKW-SF94	1350 m^3/s	mit	3D

Tabelle 1: *Bedeutung der Kurzbezeichnungen der Untersuchungsvarianten SF94.*

Die Sturmflutscheitelwasserstände zwischen Elbe – km 748 und Elbe – km 550 sind für die vier Untersuchungsvarianten im planerischen Ist – Zustand in Bild 18 dargestellt. Sowohl im Bereich der Außenelbe als auch im Bereich der Mittelelbe unterscheiden sich die Scheitelwasserstände nicht. Im Bereich der Unterelbe liegen die Ergebnisse um bis zu 30 cm auseinander. Der Einfluss der unterschiedlichen Dichte von salzhaltigem und nicht salzhaltigem Wasser macht sich in einer Differenz der Sturmflutscheitelwasserstände von ca. 15 cm bei SF94_PIZ_2D_S (rot) im Vergleich zu SF94_PIZ_2D_oS (schwarz) zwischen Brunsbüttel und dem Wehr Geesthacht bemerkbar.

Der Einfluss dreidimensionaler Prozesse bewirkt ebenfalls eine Erhöhung der Sturmflutscheitelwasserstände zwischen Cuxhaven (Elbe – km 724) und dem Wehr Geesthacht (Elbe – km 586) z.B. bei SF94_PIZ_2D_oS (schwarz) im Vergleich zu SF94_PIZ_3D_oS (grün).

Für diese vier Untersuchungsvarianten werden jeweils die ausbaubedingten Änderungen des Sturmflutscheitelwasserstandes bestimmt (Bild 19). Diese verhalten sich für die vier Untersuchungsvarianten (insbesondere auch für SF94_3D_S (blau) und SF94_2D_oS (schwarz)) entlang des Elbefahrwassers vergleichbar. In der Unterelbe werden Zunahmen der Sturmflutscheitelwasserstände von kleiner 2 cm beobachtet, in der Außenelbe nehmen die Sturmflutscheitelwasserstände ausbaubedingt um weniger als 2 cm ab. Die Wahl der hier untersuchten Parameter hat Einfluss auf die absolute Höhe der Sturmflutscheitelwasserstände, jedoch nicht auf die prognostizierten ausbaubedingten Änderungen.

Der Einfluss der genannten Prozesse auf die Sturmflutkenngrößen *Eintrittszeit des Sturm-*

flutscheitelwasserstandes (tHW, Bild 20) sowie *Dauer hoher Wasserstände* (DHW, Bild 22) wird ebenfalls untersucht. Auch hier zeigt sich, dass die Auswahl der Parameter Einfluss auf die absoluten Werte hat, jedoch nicht auf die ausbaubedingten Änderungen (siehe hierzu Bild 21 und 23).

Da die Wahl der hier untersuchten Parameter lediglich einen Einfluss auf die absolute Höhe der Sturmflutkenngrößen, jedoch nicht auf die Größenordnung der ausbaubedingten Änderungen hat, werden in der weiteren Bearbeitung des Gutachtens alle Sturmflutszenarien (siehe Tabelle 3 auf Seite 34) mit der tiefenintegrierten Version von *UnTRIM* (2D) sowie ohne Salzeinfluss modelliert.

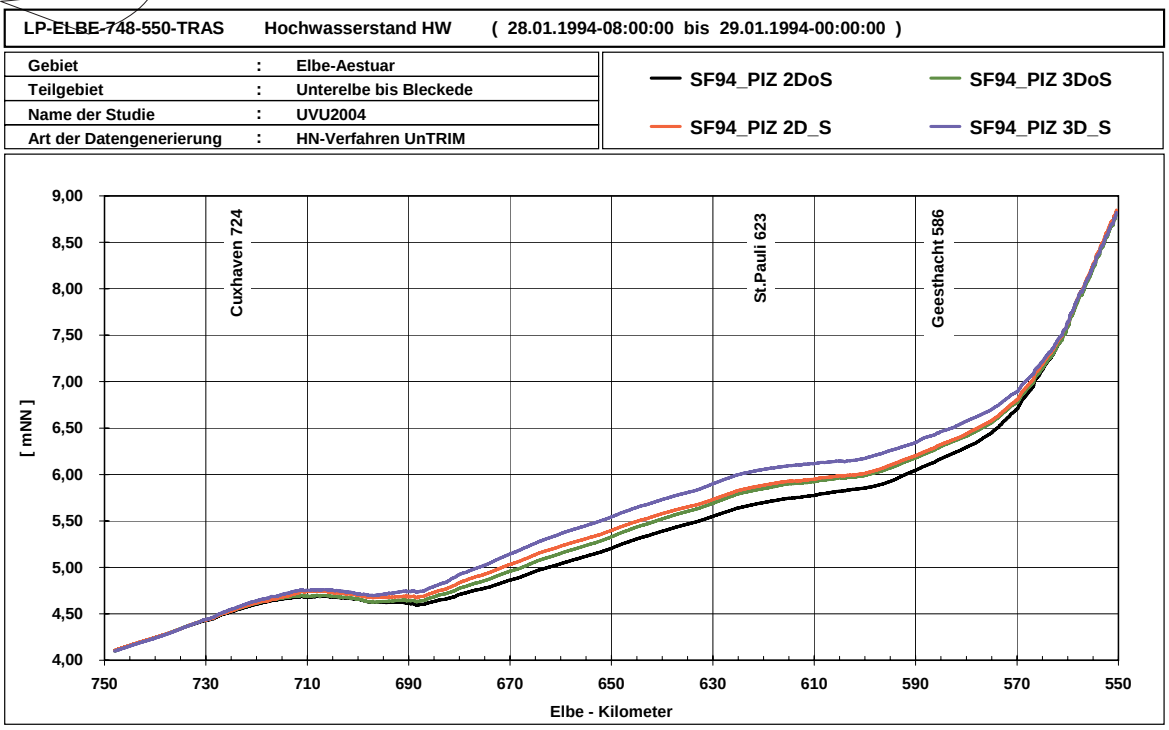

Bild 18: *Sturmflutscheitelwasserstand SF94 (Oberwasserzufluß Q = 1350 m³/s) im planerischen Ist – Zustand PIZ entlang des Elbefahrwassers von Elbe – km 748 bis Elbe – km 550 für vier unterschiedliche Parametereinstellungen in UnTRIM (Abkürzungen siehe Tabelle 1 auf Seite 26).*

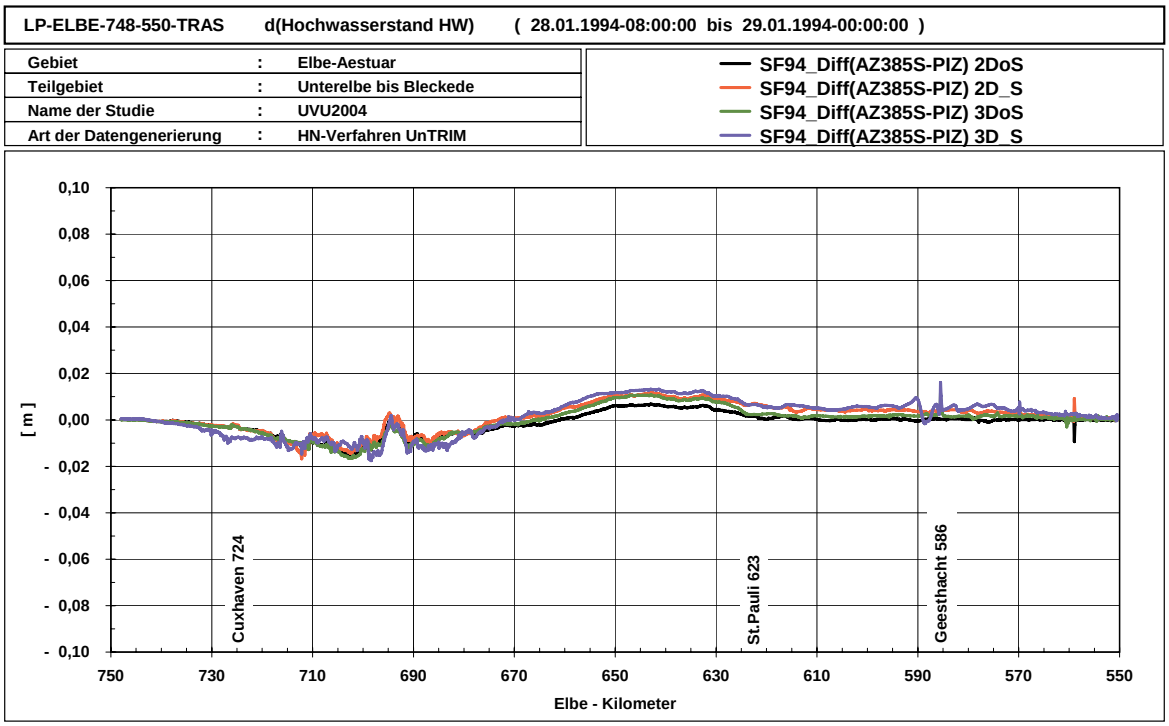

Bild 19: *Änderung des Sturmflutscheitelwasserstandes (AZ385S – PIZ) für die Sturmflut SF94 entlang des Elbefahrwassers von Elbe – km 748 bis Elbe – km 550 für vier unterschiedliche Parametereinstellungen in UnTRIM (Abkürzungen siehe Tabelle 1).*

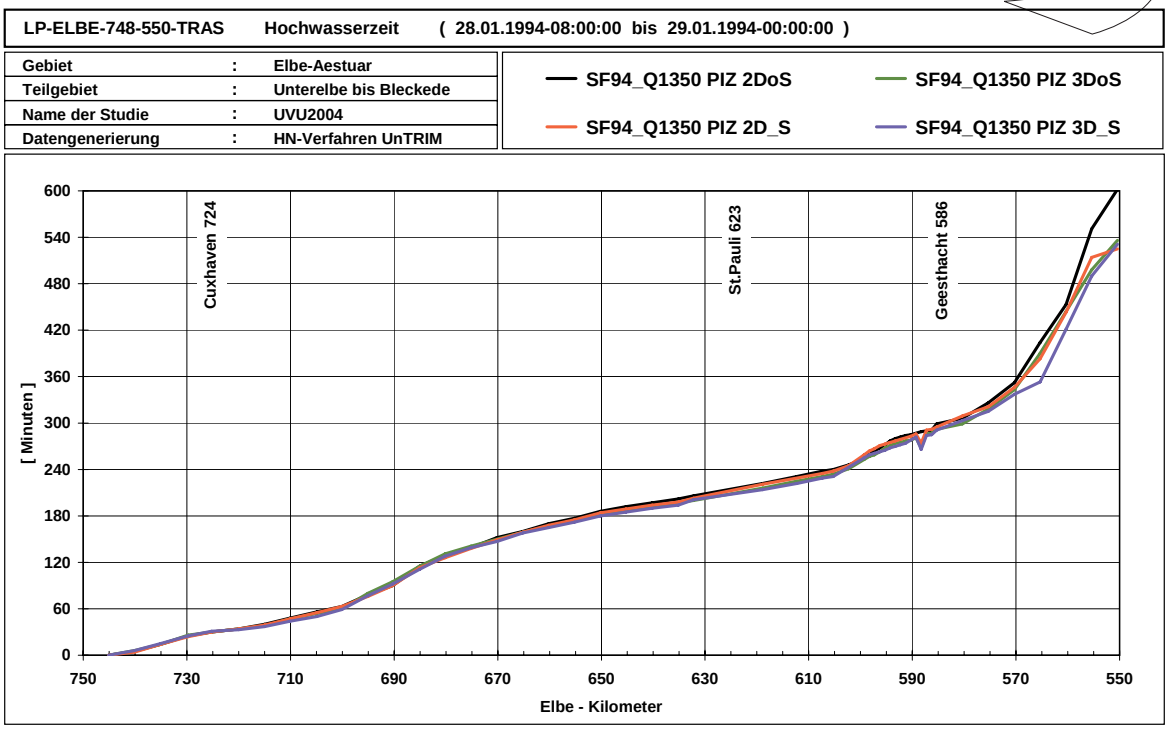

Bild 20: *Eintrittszeit des Sturmflutscheitelwasserstandes (querschnittsgemittelt) SF94 (Oberwasserzufluß $Q = 1350\,m^3/s$) im planerischen Ist – Zustand PIZ entlang des Elbefahrwassers von Elbe – km 745 bis Elbe – km 550 für vier unterschiedliche Parametereinstellungen in UnTRIM (Abkürzungen siehe Tabelle 1 auf Seite 26).*

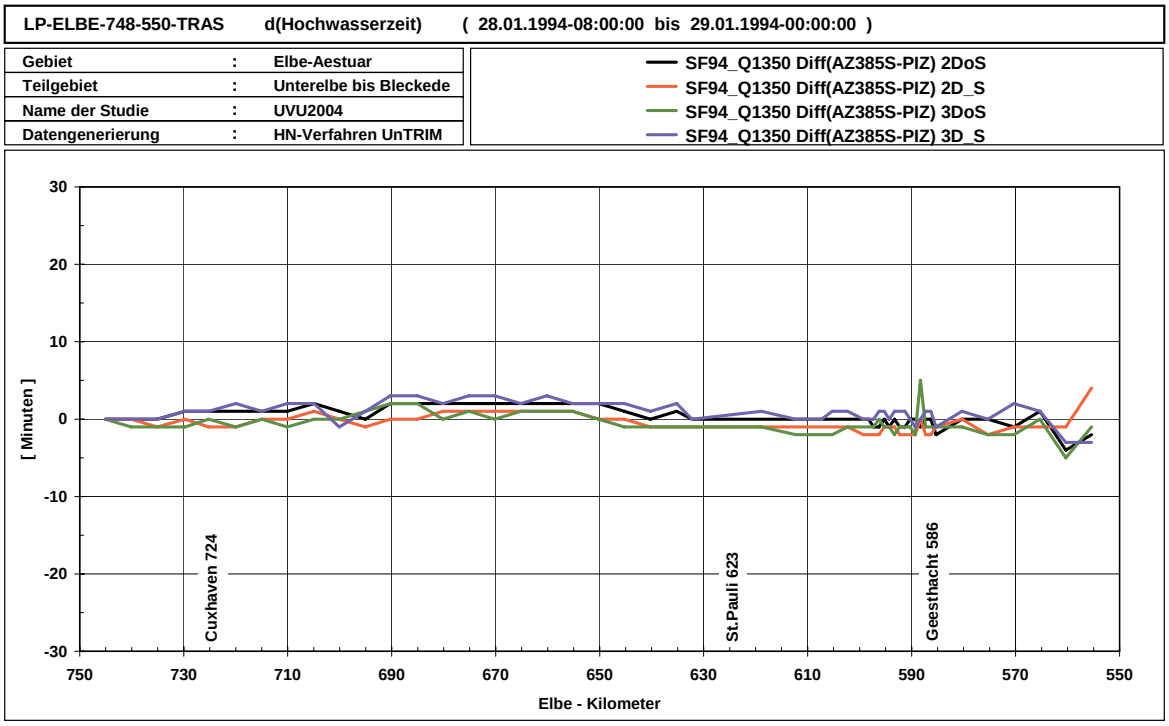

Bild 21: *Änderung Eintrittszeit des Sturmflutscheitelwasserstandes (querschnittsgemittelt) (AZ385S – PIZ) für die Sturmflut SF94 entlang des Elbefahrwassers von Elbe – km 745 bis Elbe – km 550 für vier unterschiedliche Parametereinstellungen in UnTRIM (Abkürzungen siehe Tabelle 1).*

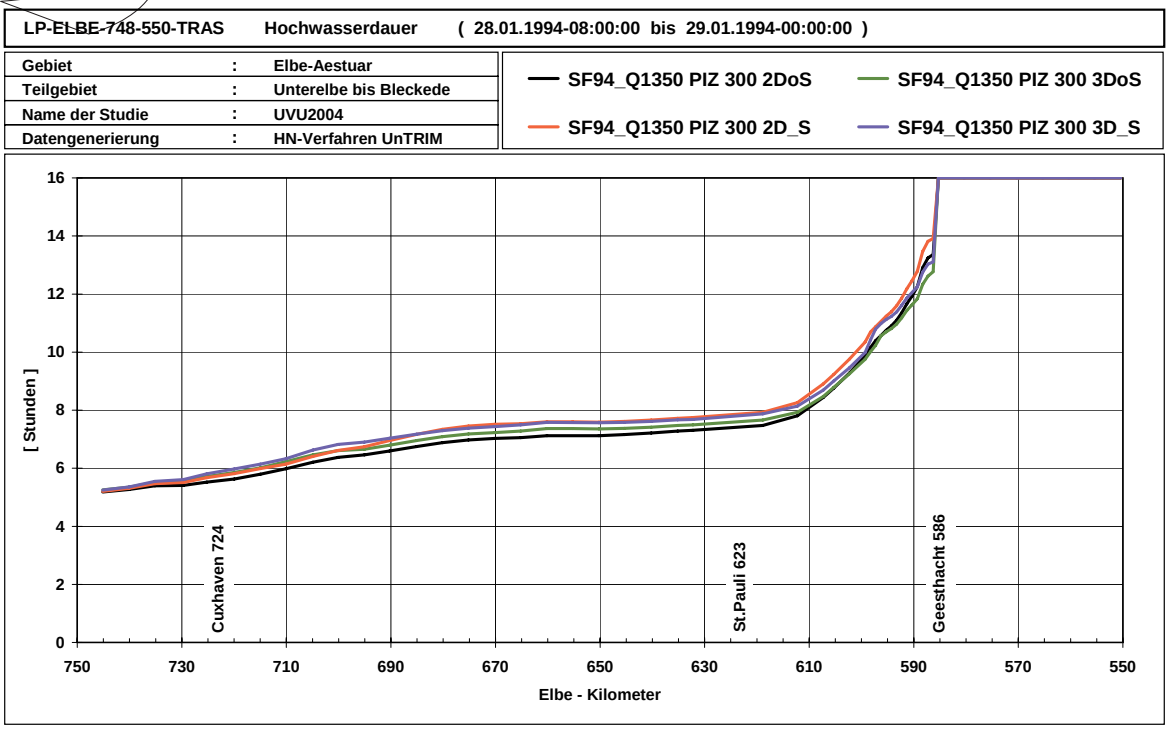

Bild 22: *Dauer Wasserstand $> NN + 3{,}00\,m$ (querschnittsgemittelt) für SF94 (Oberwasserzufluß $Q = 1350\,m^3/s$) im planerischen Ist – Zustand PIZ entlang des Elbefahrwassers von Elbe – km 745 bis Elbe – km 550 für vier unterschiedliche Parametereinstellungen in UnTRIM (Abkürzungen siehe Tabelle 1).*

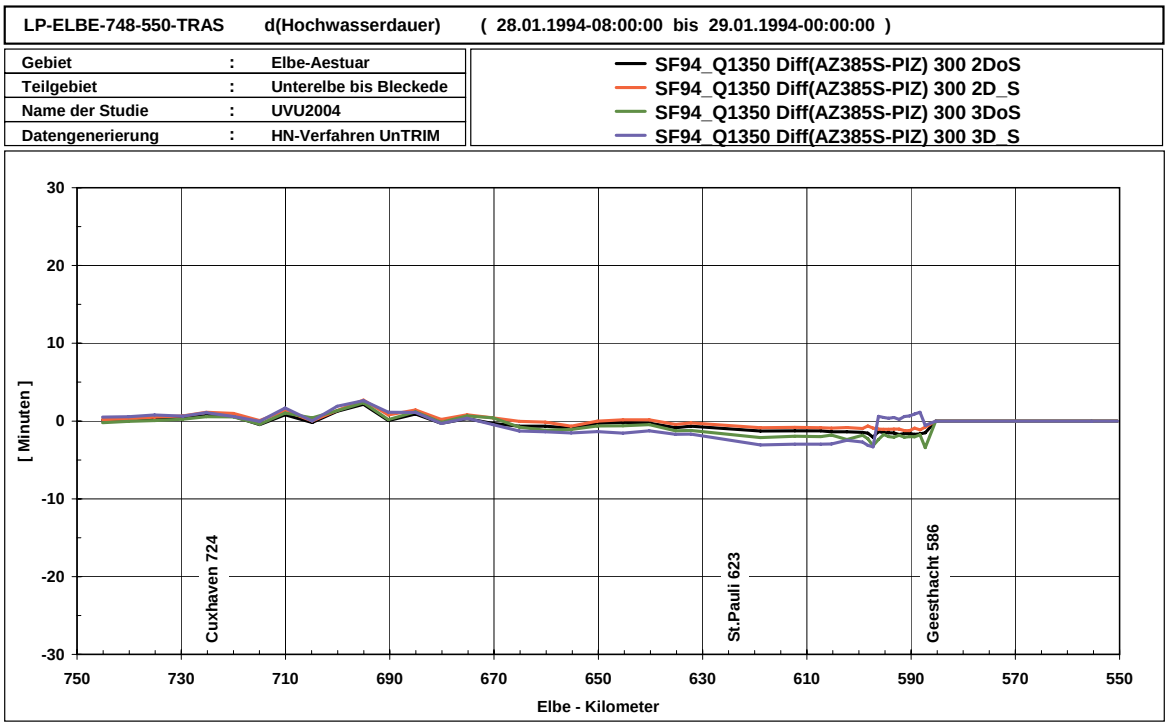

Bild 23: *Änderung der Dauer Wasserstand $> NN + 3{,}00\,m$ (querschnittsgemittelt) (AZ385S – PIZ) für die Sturmflut SF94 entlang des Elbefahrwassers von Elbe – km 745 bis Elbe – km 550 für vier unterschiedliche Parametereinstellungen in UnTRIM (Abkürzungen siehe Tabelle 1).*

5 Untersuchungsvarianten

Im Rahmen dieser Systemanalyse werden bezogen auf einen Vergleichszustand (PIZ) die ausbaubedingten Änderungen der Sturmflutscheitelwasserstände, der Eintrittszeit der Sturmflutscheitelwasserstände, der Dauer hoher Wasserstände, der Flut- und Ebbestromgeschwindigkeit sowie der Flut- und Ebbestromvolumen ermittelt und analysiert.

5.1 Sturmflutszenarien

Zur Analyse der Wirkung des Ausbaus der Unter- und Außenelbe auf die Sturmflutscheitelwasserstände in der Elbe werden drei historische Sturmfluten unterschiedlicher Charakteristik SF76, SF94 und SF99, sowie die Bemessungssturmflut 2085A (SFB) untersucht. Die Windstaukurve wird hier als Differenz zwischen der tatsächlich am Pegel Cuxhaven eingetretenen Sturmtidekurve und der mittleren Tidekurve definiert. Sie kann somit neben meteorologischen Einflüssen auch astronomische Anteile sowie Anteile aus Eigenschwingungen der Nordsee oder Fernwellen enthalten (siehe auch Länderarbeitsgruppe, 1988).

5.1.1 Charakterisierung der Sturmflut vom 3. 1. 1976 (SF76):

1. steile Windstaukurve (Anstieg des Windstaus $> 100\,\mathrm{cm/h}$),
2. maximaler Windstau tritt in zeitlicher Nähe zum Niedrigwasser auf,
3. Westwind mit Windgeschwindigkeiten bis 29 m / s bei Scharhörn,
4. Scheitelwasserstand Cuxhaven: NN + 5,12 m,
5. Scheitelwasserstand Hamburg St. Pauli: NN + 6,45 m sowie
6. Oberwasserzufluss der Elbe: $500\,\mathrm{m^3/s}$.

5.1.2 Charakterisierung der Sturmflut vom 28. 1. 1994 (SF94):

1. füllige Windstaukurve (Anstieg des Windstaus $\approx 40\,\mathrm{cm/h}$),
2. maximaler Windstau tritt über mehr als 6 Stunden auf,
3. Westwind mit Windgeschwindigkeiten bis 23 m / s bei Scharhörn,
4. Scheitelwasserstand Cuxhaven: NN + 4,51 m,
5. Scheitelwasserstand Hamburg St. Pauli: NN + 6,02 m sowie
6. Oberwasserzufluss der Elbe: $1350\,\mathrm{m^3/s}$.

5.1.3 Charakterisierung der Sturmflut vom 3. 12. 1999 (SF99):

1. maximaler Windstau tritt in zeitlicher Nähe zum Sturmflutscheitelwasserstand auf,
2. Westwind mit Windgeschwindigkeiten bis 29 m / s bei Scharhörn,
3. Scheitelwasserstand Cuxhaven: NN + 4,53 m,
4. Scheitelwasserstand Hamburg St. Pauli: NN + 5,95 m sowie
5. Oberwasserzufluss der Elbe: 350 m^3 / s.

5.1.4 Charakterisierung der Bemessungssturmflut 2085A (SFB):

1. maximaler Windstau tritt in zeitlicher Nähe zum Niedrigwasser auf,
2. Westwind mit Windgeschwindigkeiten bis 32 m / s bei Scharhörn,
3. Scheitelwasserstand Cuxhaven: NN + 5,65 m,
4. Scheitelwasserstand Hamburg St. Pauli: NN + 7,30 m sowie
5. Oberwasserzufluss der Elbe: 2200 m^3 / s.

Die Bemessungssturmflut 2085A ist eine synthetische Sturmflut, die an den Verlauf der Sturmflut vom 3. 1. 1976 angelehnt ist und entlang der Tideelbe die Bemessungswasserstände definiert. (Die HHThw in der Tideelbe stammen aus der Sturmflut 3. 1. 1976.) Eine detaillierte Beschreibung der Bemessungssturmflut gibt der Bericht der Länderarbeitsgruppe (1988) sowie Siefert, W. (1998). Diese Beschreibung kann wie folgt zusammengefasst werden:

- Wasserstandsverlauf Cuxhaven vergleichbar zum 3. 1. 1976, jedoch mit um 0,5 m erhöhtem Windstau,
- Oberwasserzufluss von 2200 m^3 / s und
- Windentwicklung über der Elbe vergleichbar zum 3. 1. 1976, jedoch mit um 10% erhöhter Windgeschwindigkeit.

Ein Oberwasserzufluss von 2200 m^3 / s ($\approx 2/3$ HHQ) wurde im Zeitraum 1926 / 1983 (sowie auch im Zeitraum 1926 / 2002) im Mittel an drei Tagen im Jahr überschritten (siehe hierzu Länderarbeitsgruppe, 1988 sowie DGJ, 2005). Eine Einordnung des für die Bemessungssturmflut gewählten Oberwasserzuflusses ermöglicht Tabelle 2.

Zusätzlich zu dem für diese Sturmflut definierten Oberwasserzufluss werden in diesem Gutachten weitere sehr hohe Abflüsse untersucht: 3000 m^3 / s und 4000 m^3 / s. Abflüsse dieser Größenordnung sind jedoch bisher bei Sturmfluten in der Elbe nicht beobachtet worden. Mit der Wahl dieser Oberwasserszenarien wird die Wirkung der Fahrrinnenanpassung bei einer extrem hohen Sturmflut mit extrem hohem Oberwasserzufluss untersucht.

MNQ (mittlerer niedrigster Abfluss)	280 m^3/s
MQ (mittlerer Abfluss)	712 m^3/s
MHQ (mittlerer höchster Abfluss)	1900 m^3/s
HHQ (höchster bekannter Abfluss, 31. 3. 1940)	3620 m^3/s
HQ_{100} (Neu Darchau – Geesthacht)	4000 m^3/s
Elbehochwasser 2002: 22. 8. 2002	3425 m^3/s
Elbehochwasser 2006: 10. 4. 2006	3600 m^3/s
Abfluss während der Sturmflut 3. 1. 1976	500 m^3/s
Abfluss während der Sturmflut 28. 1. 1994	1350 m^3/s
Abfluss während der Sturmflut 3. 12. 1999	350 m^3/s
Abfluss während der Bemessungssturmflut	2200 m^3/s

Tabelle 2: *Oberwasserereignisse der Elbe bei Neu Darchau (Elbe – km 536) bezogen auf den Zeitraum 1926/2002 (aus: DGJ, 2005, Internationale Kommission zum Schutz der Elbe, 2001 sowie pers. Mitteilung WSA Lauenburg 2006).*

5.2 Zusammenstellung der Untersuchungsvarianten

Unter Beachtung der in Kapitel 4.4 vorgestellten topographischen Modellzustände (PIZ und AZ385S, siehe auch Bild 1 auf Seite 9 und 2 auf Seite 12) sind in Tabelle 3 die Untersuchungsvarianten aufgeführt, für die jeweils ein Simulationslauf durchgeführt wurde.

Für die Simulationsläufe der Sturmflut SF76 wird der Simulationszeitraum vom 1. 1. 1976 2:00 Uhr bis zum 4. 1. 1976 13:00 Uhr gewählt. Für die Simulationsläufe der Sturmflut SF94 wird der Simulationszeitraum vom 25. 1. 1994 1:00 Uhr bis zum 29. 1. 1994 13:00 Uhr gewählt. Für die Simulationsläufe der Sturmflut SF99 wird der Simulationszeitraum vom 30. 11. 1999 6:00 Uhr bis zum 4. 12. 1999 22:00 Uhr gewählt. Für die Simulationsläufe der Sturmflut SFB wird der Simulationszeitraum vom 1. 1. 2:00 Uhr bis zum 4. 1. 13:00 Uhr (Datum ohne Bedeutung) gewählt. Für die Sturmflut SFB wird zusätzlich der Oberwasserzufluss wie in Abschnitt 5.1 beschrieben erhöht. Die gewählten Analysezeiträume für die Kennwerte des Wasserstandes und der Strömungsgeschwindigkeit sind in Tabelle 4 auf der nächsten Seite angegeben.

Sturmflut	Topographischer Zustand	Wind	Oberwasser	Kurzbezeichnung
SF76	planerischer Ist – Zustand	MKW-SF76	500 m^3/s	SF76_Q500_PIZ
SF76	Ausbauzustand 385S	MKW-SF76	500 m^3/s	SF76_Q500_AZ385S
SF94	planerischer Ist – Zustand	MKW-SF94	1350 m^3/s	SF94_Q1350_PIZ
SF94	Ausbauzustand 385S	MKW-SF94	1350 m^3/s	SF94_Q1350_AZ385S
SF99	planerischer Ist – Zustand	MKW-SF99	350 m^3/s	SF99_Q350_PIZ
SF99	Ausbauzustand 385S	MKW-SF99	350 m^3/s	SF99_Q350_AZ385S
SFB	planerischer Ist – Zustand	MKW-SFB	2200 m^3/s	SFB_Q2200_PIZ
SFB	Ausbauzustand 385S	MKW-SFB	2200 m^3/s	SFB_Q2200_AZ385S
SFB	planerischer Ist – Zustand	MKW-SFB	3000 m^3/s	SFB_Q3000_PIZ
SFB	Ausbauzustand 385S	MKW-SFB	3000 m^3/s	SFB_Q3000_AZ385S
SFB	planerischer Ist – Zustand	MKW-SFB	4000 m^3/s	SFB_Q4000_PIZ
SFB	Ausbauzustand 385S	MKW-SFB	4000 m^3/s	SFB_Q4000_AZ385S

Tabelle 3: *Untersuchungsvarianten bzw. Simulationsläufe mit dem HN-Modell des Elbe-Ästuars.*

Sturmflut	physikalische Größe	von	bis
SF76	Wasserstand (HW, tHW, DHW)	03.01.1976 04:00	03.01.1976 22:00
	Strömung (Vfm,Vfx, Vem, Vex, Qe, Qf)	03.01.1976 04:30	04.01.1976 00:00
SF94	Wasserstand (HW, tHW, DHW)	28.01.1994 08:00	29.01.1994 00:00
	Strömung (Vfm,Vfx, Vem, Vex, Qe, Qf)	28.01.1994 04:00	28.01.1994 23:00
SF99	Wasserstand (HW, tHW, DHW)	03.12.1999 17:00	04.12.1999 04:00
	Strömung (Vfm,Vfx, Vem, Vex, Qe, Qf)	03.12.1999 12:00	04.12.1999 08:00
SFB	Wasserstand (HW, tHW, DHW)	03.01. 08:00	04.01. 00:00
	Strömung (Vfm,Vfx, Vem, Vex, Qe, Qf)	03.01. 03:30	04.01. 00:00
SFB_Q3000	Wasserstand (HW, tHW, DHW)	03.01. 08:00	04.01. 00:00
	Strömung (Vfm,Vfx, Vem, Vex, Qe, Qf)	03.01. 03:30	04.01. 00:00
SFB_Q4000	Wasserstand (HW, tHW, DHW)	03.01. 08:00	04.01. 00:00
	Strömung (Vfm,Vfx, Vem, Vex, Qe, Qf)	03.01. 03:30	04.01. 00:00

Tabelle 4: *Analysezeiträume der einzelnen Sturmflutszenarien für die unterschiedlichen physikalischen Größen. Die tideunabhängigen Kennwerte des Wasserstandes (BAW, 2002) werden für den jeweiligen Tag der Sturmflut analysiert. Die Tidekennwerte der Strömung werden (BAW, 2004a) für die Flut vor dem Sturmflutscheitelwasserstand und die Ebbe nach dem Sturmflutscheitelwasserstand bestimmt.*

6 Ergebnisse der Systemanalyse

Die für die Unter- und Außenelbe geplante Vertiefung der Fahrrinne (siehe Bild 2 auf Seite 12 und Bild 3 auf Seite 13) bewirkt eine Veränderung der Form der Tidewelle sowie eine Veränderung der Fortschrittsgeschwindigkeit der Tidewelle. Die daraus resultierenden ausbaubedingten Änderungen der Sturmflutkenngrößen werden in den folgenden Abschnitten dargestellt.

Für die in Abschnitt 4 genannten topographischen Systemzustände, PIZ und AZ385S, wird mit dem mathematischen Modell des Elbe – Ästuars die jeweilige Sturmflut – Tidedynamik ermittelt. Daraus wird dann die ausbaubedingte Änderung als Differenz zwischen Ausbauzustand AZ385S und planerischem Ist – Zustand PIZ für die charakteristischen Systemkenngrößen bestimmt.

Als Ergebnis der mathematischen Modellierung steht für jeden durchgeführten Simulationslauf (vgl. Tabelle 3 auf Seite 34) an jedem (feuchten) Gitternetzpunkt für jeden Ausgabetermin (Datenausgabeintervall der Modellsimulation: $\Delta t = 600$ s) der Wasserstand sowie die (tiefengemittelte) Strömungsgeschwindigkeit zur Verfügung.

Wasserstandskenngrößen

Im Rahmen einer sich an die Modellrechnung anschließenden Auswertung wird aus den Zeitreihen der Wasserstände für jeden Simulationslauf im gesamten Modellgebiet der

- Sturmflutscheitelwasserstand (höchster aufgetretener Wasserstand HW) im Analysezeitraum (vgl. Tabelle 4 auf Seite 35), die
- Eintrittszeit des Sturmflutscheitelwasserstandes (tHW) bezogen auf Elbe – km 748 sowie die
- Dauer von Wasserständen (DHW) höher als NN + 2,00 m, NN + 3,00 m, NN + 4,00 m, NN + 5,00 m und NN + 6,00 m im Analysezeitraum (vgl. Tabelle 4)

berechnet. Zusätzliche Informationen zu den aus den berechneten Wasserstandszeitreihen abgeleiteten Kenngrößen HW, tHW und DHW findet man im Bericht *Tideunabhängige Kennwerte des Wasserstandes* (BAW, 2002).

Zur Ermittlung der Analysegröße HW werden die Zeitreihen des Wasserstandes auf einem Profil entlang des Elbefahrwassers analysiert. Für die Bestimmung der Analysegrößen tHW und DHW werden die Zeitreihen des Wasserstandes über den Gewässerquerschnitt gemittelt. Die Lage der verwendeten Querprofile ist in Bild B.3 auf Seite 74 eingezeichnet. Man erhält so eine für den jeweiligen Querschnitt charakteristische Eintrittszeit des Hochwassers bzw. Dauer hoher Wasserstände.

Die ausgewerteten Analysegrößen für den planerischen Ist – Zustand (PIZ) sowie die ausbaubedingten Änderungen (AZ385S – PIZ) werden auf einem Profil entlang des Elbefahrwassers von Elbe – km 748 (Bake C Scharhörn liegt bei Elbe – km 745) bis Elbe – km 550 (Bleckede bei Elbe – km 549) dargestellt.

Für den Bereich zwischen Elbe – km 748 und der seeseitigen Ausbaugrenze (Elbe – km 756, Bake Z) ergeben sich keine ausbaubedingten Änderungen (siehe auch Anlage E bis H).

Bei Sturmfluten wird das Wehr Geesthacht gelegt, so dass der Bereich stromauf des Wehres Geesthacht bis Bleckede durch die Sturmfluten beeinflusst werden kann. In diesem Teil der Elbe werden extrem hohe Wasserstände jedoch durch hohe Oberwasserabflüsse und nicht durch Sturmfluten erzeugt.

Strömungskenngrößen

Aus den Zeitreihen der Wasserstände und der Strömungsgeschwindigkeiten werden für jeden Simulationslauf entlang der Elbe

- die mittlere und maximale Flutstromgeschwindigkeit (Vfm und Vfx),
- die mittlere und maximale Ebbestromgeschwindigkeit (Vem und Vex),
- das Flutstromvolumen (Qf) sowie
- das Ebbestromvolumen (Qe)

bestimmt. Betrachtet wird, im Gegensatz zur Auswertung des Spring – Nipp Zeitraumes 2002, lediglich ein Ereignis: die Flut vor Erreichen des Sturmflutscheitelwasserstandes bzw. die Ebbe nach dem Sturmflutscheitelwasserstand. Die Analysezeiträume sind in Tabelle 4 auf Seite 35 angegeben. Zusätzliche Informationen zu den abgeleiteten Kenngrößen findet man im Bericht *Tidekennwerte der Strömungsgeschwindigkeit* (BAW, 2004a und BAW, 2004b). Zur Ermittlung dieser Analysegrößen werden die Zeitreihen des Wasserstandes und der Strömungsgeschwindigkeit auf Querschnitten im Abstand von 5 km entlang der Elbe querschnittsgemittelt. Die Lage dieser Querprofile ist in Bild B.3 auf Seite 74 eingezeichnet. Man erhält so die für den jeweiligen Querschnitt charakteristischen Strömungsgeschwindigkeiten. Ebbe- und Flutstromvolumen werden aus dem Durchfluss durch den jeweiligen Querschnitt berechnet.

Die ausgewerteten Analysegrößen für den planerischen Ist – Zustand (PIZ) sowie die ausbaubedingten Änderungen (AZ385S – PIZ) werden auf einem Profil entlang des Elbefahrwassers von Elbe – km 745 (Bake C Scharhörn) bis Elbe – km 605 (Over) dargestellt.

Für den Bereich zwischen Elbe – km 745 und der seeseitigen Ausbaugrenze (Elbe – km 756, Bake Z) ergeben sich keine ausbaubedingten Änderungen (siehe auch Anlage E bis H).

Im Anhang werden zusätzlich die flächenhaft ausgewerteten Wasserstands- und Strömungskenngrößen für den planerischen Ist – Zustand (PIZ) sowie die ausbaubedingten Änderungen (AZ385S – PIZ) im *Teilgebiet West* dargestellt. Bild D.1 auf Seite 90 zeigt die Topographie des Ausschnittes *Teilgebiet West*. Anlage E enthält die Analysegrößen für SF76, Anlage F die Analysegrößen für SF94, Anlage G die Analysegrößen für SF99 und Anlage H die Analysegrößen für SFB.

Die ausbaubedingten Änderungen beziehen sich für alle genannten Kenngrößen auf die Ergebnisse des planerischen Ist – Zustandes.

6.1 Änderung der Sturmflutscheitelwasserstände

Die Sturmflutscheitelwasserstände im planerischen Ist – Zustand (PIZ) der sechs untersuchten Sturmflutszenarien

- 3. 1. 1976 (SF76, $Q = 500\ m^3/s$),
- 28. 1. 1994 (SF94, $Q = 1350\ m^3/s$),
- 3. / 4. 12.1999 (SF99, $Q = 350\ m^3/s$),
- Bemessungssturmflut (SFB_Q2200),
- Bemessungssturmflut mit extremem Oberwasserzufluss $Q = 3000\ m^3/s$ (SFB_Q3000) sowie
- Bemessungssturmflut mit extremem Oberwasserzufluss $Q = 4000\ m^3/s$ (SFB_Q4000)

sind in Bild 24 entlang des Elbefahrwassers zwischen der Elbemündung (Elbe – km 748) und Bleckede (Elbe – km 550) dargestellt.

In der Unter- und Außenelbe werden die höchsten Sturmflutscheitelwasserstände von der synthetischen Bemessungssturmflut und die niedrigsten von den Sturmfluten am 3. / 4. 12. 1999 sowie am 28. 1. 1994 erreicht. Stromauf von Bunthaus (Elbe – km 610) wird der Einfluß des Oberwasserzuflusses größer. Hier erreicht die Sturmflut 28. 1. 1994 höhere Scheitelwasserstände als die Sturmflut vom 3. / 4. 12. 1999.

Eine Erhöhung des Oberwasserzuflusses der Bemessungssturmflut von $Q = 2200\ m^3/s$ auf $Q = 3000\ m^3/s$ und $Q = 4000\ m^3/s$ führt von Bleckede bis in den Bereich von Brunsbüttel zu einer Zunahme der Sturmflutscheitelwasserstände. Im Bereich des Mündungstrichters der Elbe stromab von Brunsbüttel (Elbe – km 696) wird der Oberwassereinfluß vernachlässigbar klein.

Die *Länderarbeitsgruppe, 1988* ging für Hamburg St. Pauli (Elbe – km 624N) von einem Anstieg des Scheitelwasserstandes von rd. 10 cm je $1000\ m^3/s$ Oberwasser und für Bunthaus (Elbe – km 610) von 10 bis 20 cm je $1000\ m^3/s$ Oberwasser aus. Vergleichbare Werte lassen sich auch aus den vorliegenden Modellergebnissen ableiten. Eine detaillierte Untersuchung des Einflusses hoher Oberwasserabflüsse auf die Wasserstände in der Tideelbe führte *Rudolph, E., 2005* durch.

Die Änderungen der Sturmflutscheitelwasserstände für den Ausbau der Unter- und Außenelbe entlang des Elbefahrwassers sind in Bild 25 auf der nächsten Seite dargestellt. Für die betrachteten Sturmflutszenarien sind die ausbaubedingte Änderungen entlang der Elbe kleiner als ± 2 cm. Lediglich für SF99 werden im Bereich Brokdorf (Elbe - km 685) Änderungen von bis zu -3 cm erreicht.

Die Sturmflutscheitelwasserstände im *Teilgebiet West* sind für SF76 in Bild E.1 für SF94 in Bild F.1 für SF99 in Bild G.1 und für SFB in Bild H.1 dargestellt. Die ausbaubedingten Änderungen der Sturmflutscheitelwasserstände im *Teilgebiet West* sind für SF76 in Bild E.2 für SF94 in Bild F.2 für SF99 in Bild G.2 und für SFB in Bild H.2 dargestellt. Man erkennt, dass die entlang des Elbefahrwassers dargestellten ausbaubedingten Änderungen der Sturmflutscheitelwasserstände repräsentativ für die Ergebnisse des jeweiligen Elbequerschnittes sind.

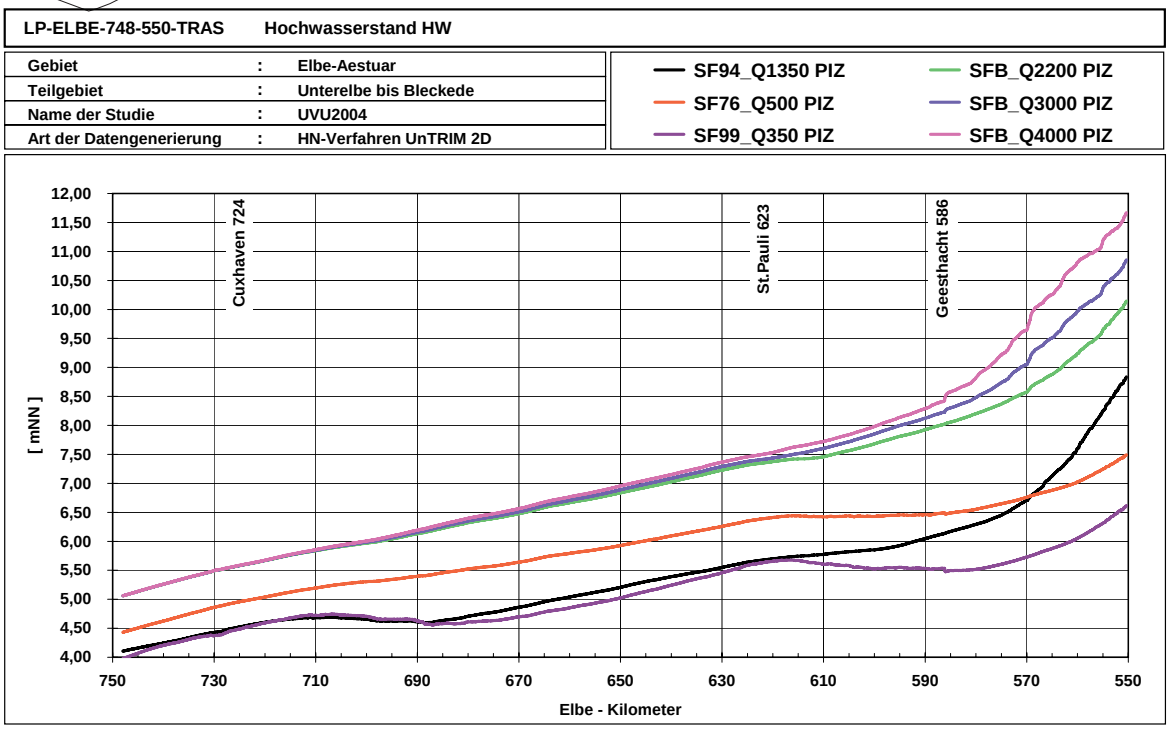

Bild 24: *Sturmflutscheitelwasserstand SF94, SF76, SF99, SFB sowie SFB_Q3000 und SFB_Q4000 im planerischen Ist – Zustand PIZ entlang des Elbefahrwassers von Elbe – km 748 bis Elbe – km 550 (Abkürzungen siehe Tabelle 3 auf Seite 34).*

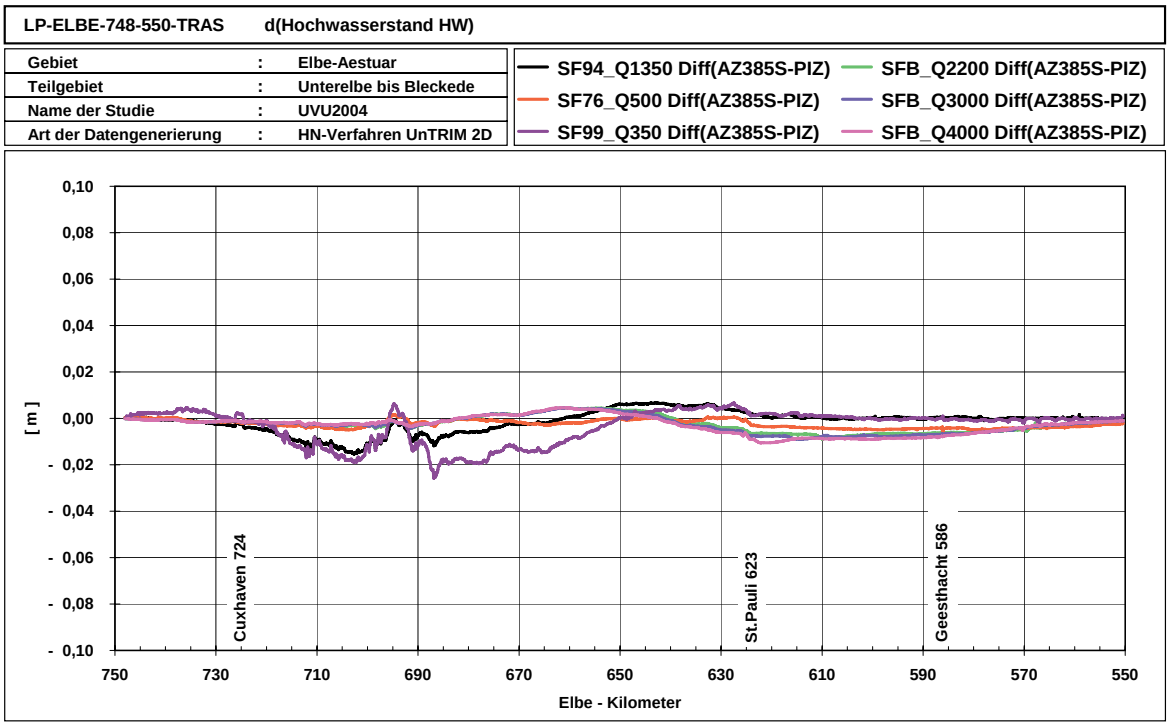

Bild 25: *Änderung des Sturmflutscheitelwasserstandes (AZ385S – PIZ) für die Sturmflut SF94, SF76, SF99, SFB sowie SFB_Q3000 und SFB_Q4000 entlang des Elbefahrwassers von Elbe – km 748 bis Elbe – km 550 (Abkürzungen siehe Tabelle 3).*

6.2 Änderung der Eintrittszeit der Scheitelwasserstände

Bild 26 zeigt die Eintrittszeit des Sturmflutscheitelwasserstandes (querschnittsgemittelt) entlang der Elbe für die sechs untersuchten Sturmflutszenarien bezogen auf Elbe – km 745. Für die Sturmflut vom 3. / 4. 12. 1999 (SF99) wird der Scheitelwasserstand in Hamburg St. Pauli 4 Stunden später als in der Elbmündung erreicht. Für die Sturmflut vom 28. 1. 1994 (SF94) wird der Scheitelwasserstand in Hamburg St. Pauli ebenfalls 4 Stunden später als in der Elbmündung erreicht. Für die Sturmflut vom 3. 1. 1976 (SF76) wird der Scheitelwasserstand in Hamburg St. Pauli nur 3 Stunden später als in der Elbmündung erreicht. Für die Bemessungssturmflut (SFB, SFB_Q3000 und SFB_Q4000) wird der Scheitelwasserstand in Hamburg St. Pauli 2,5 Stunden später als in der Elbmündung erreicht.

Für die betrachteten Sturmfluten unterscheidet sich die Eintrittszeit des Sturmflutscheitelwasserstandes entlang der Elbe zwischen der Mündung und Hamburg St. Pauli um mehr als 60 Minuten.

Bild 27 zeigt die ausbaubedingten Änderungen der Eintrittszeit. Diese verändert sich entlang der Außen- und Unterelbe um weniger als ± 5 Minuten.

Die Eintrittszeiten der Sturmflutscheitelwasserstände im *Teilgebiet West* sind für SF76 in Bild E.3 für SF94 in Bild F.3 für SF99 in Bild G.3 und für SFB in Bild H.3 dargestellt. Die ausbaubedingten Änderungen der Eintrittszeit der Sturmflutscheitelwasserstände im *Teilgebiet West* sind für SF76 in Bild E.4 für SF94 in Bild F.4 für SF99 in Bild G.4 und für SFB in Bild H.4 dargestellt. Man erkennt, dass die entlang des Elbefahrwassers dargestellten ausbaubedingten Änderungen der Eintrittszeit der Sturmflutscheitelwasserstände repräsentativ für die Ergebnisse des jeweiligen Elbequerschnittes sind.

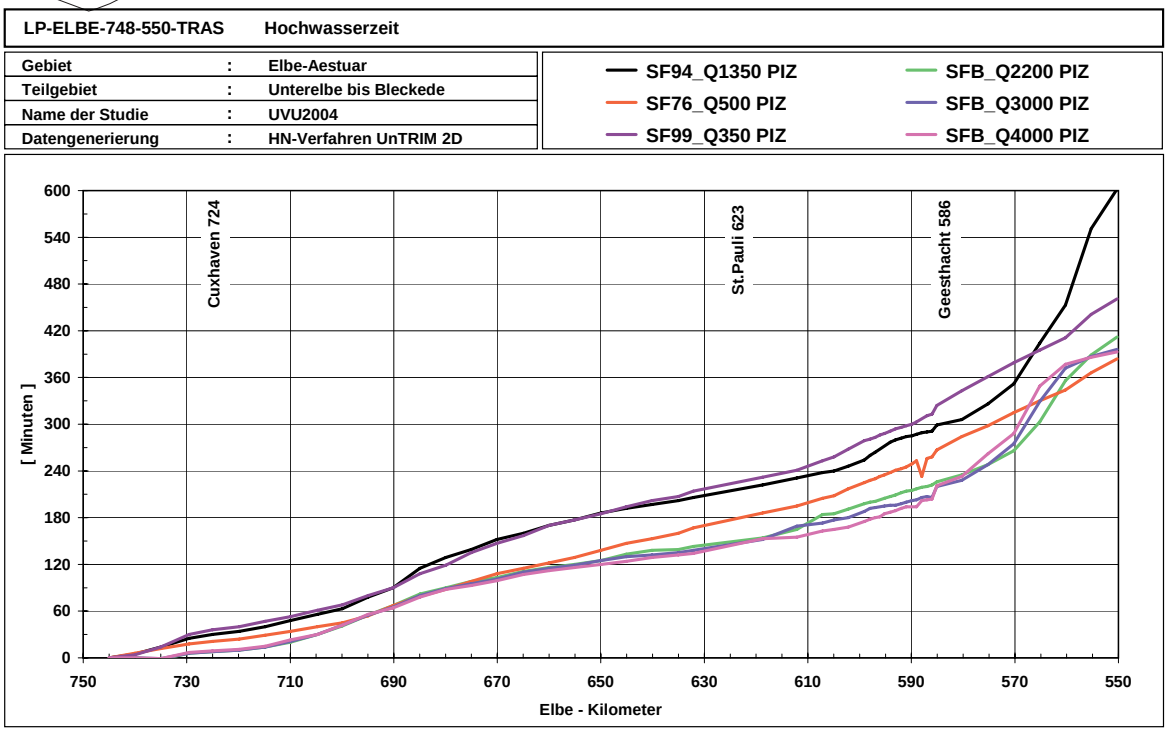

Bild 26: *Eintrittszeit des Sturmflutscheitelwasserstandes (querschnittsgemittelt) SF94, SF76, SF99, SFB sowie SFB_Q3000 und SFB_Q4000 im planerischen Ist – Zustand PIZ entlang des Elbefahrwassers von Elbe – km 745 bis Elbe – km 550 (Abkürzungen siehe Tabelle 3 auf Seite 34).*

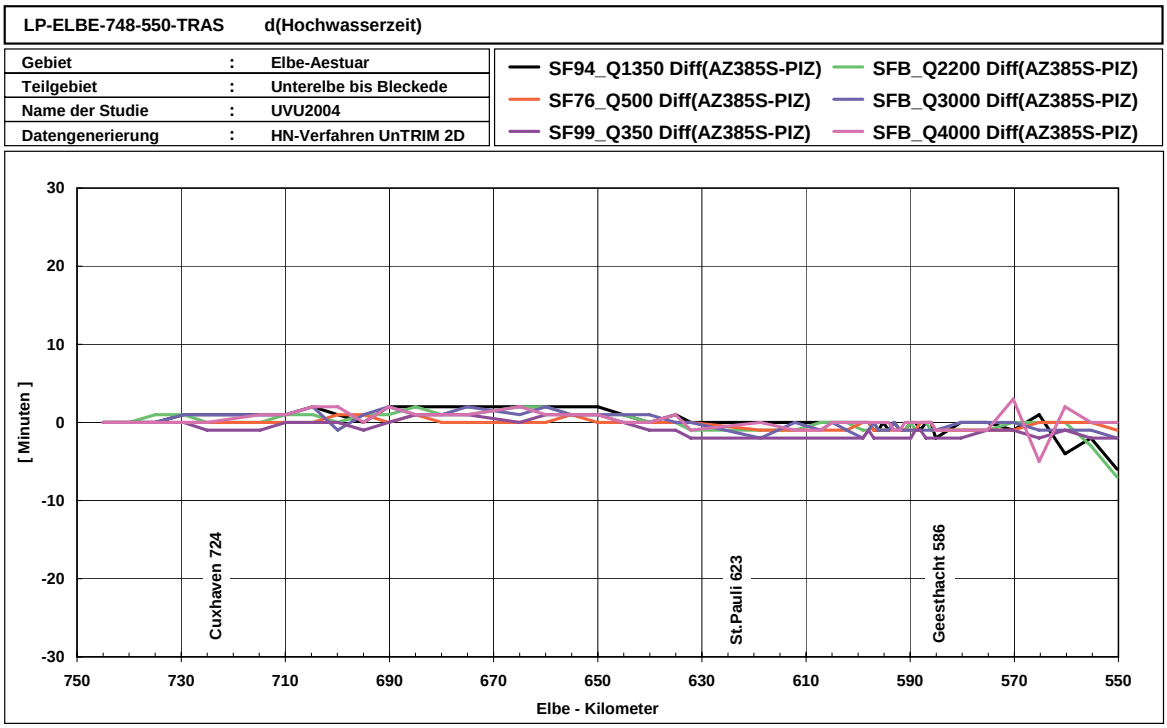

Bild 27: *Änderung der Eintrittszeit des Sturmflutscheitelwasserstandes (querschnittsgemittelt) (AZ385S – PIZ) für die Sturmflut SF94, SF76, SF99, SFB sowie SFB_Q3000 und SFB_Q4000 entlang des Elbefahrwassers von Elbe – km 745 bis Elbe – km 550 (Abkürzungen siehe Tabelle 3).*

6.3 Änderung der Dauer hoher Wasserstände

Die Dauer hoher Wasserstände (querschnittsgemittelt) zwischen Elbe – km 745 und Elbe – km 550 ist in den Bildern 28 bis 36 dargestellt.

Die Aufgabe des Wehres Geesthacht besteht darin, den Wasserspiegel am Pumpspeicherwerk Geesthacht auf NN + 4,00 m (WSV, 1994) zu halten. Im Bereich stromauf von Elbe – km 586 (Wehr Geesthacht) liegt der Wasserstand deshalb stets höher als NN + 4,00 m.

Wasserstände höher als NN + 2,00 m

Wasserstände höher als NN + 2,00 m (Bild 28) treten in der Außenelbe (Elbe – km 745 bis Elbe – km 700) im planerischen Ist – Zustand (PIZ) für die genannten Sturmflutszenarien 9 bis 14 Stunden lang auf. Zwischen Elbe – km 700 und Elbe – km 640 treten Wasserstände höher als NN + 2,00 m 10 bis 15 Stunden lang auf. Stromauf von Elbe – km 640 treten Wasserstände höher als NN + 2,00 m 10 bis 16 Stunden lang auf.

Ausbaubedingt verändert sich diese Dauer um weniger als ±5 Minuten (Bild 29).

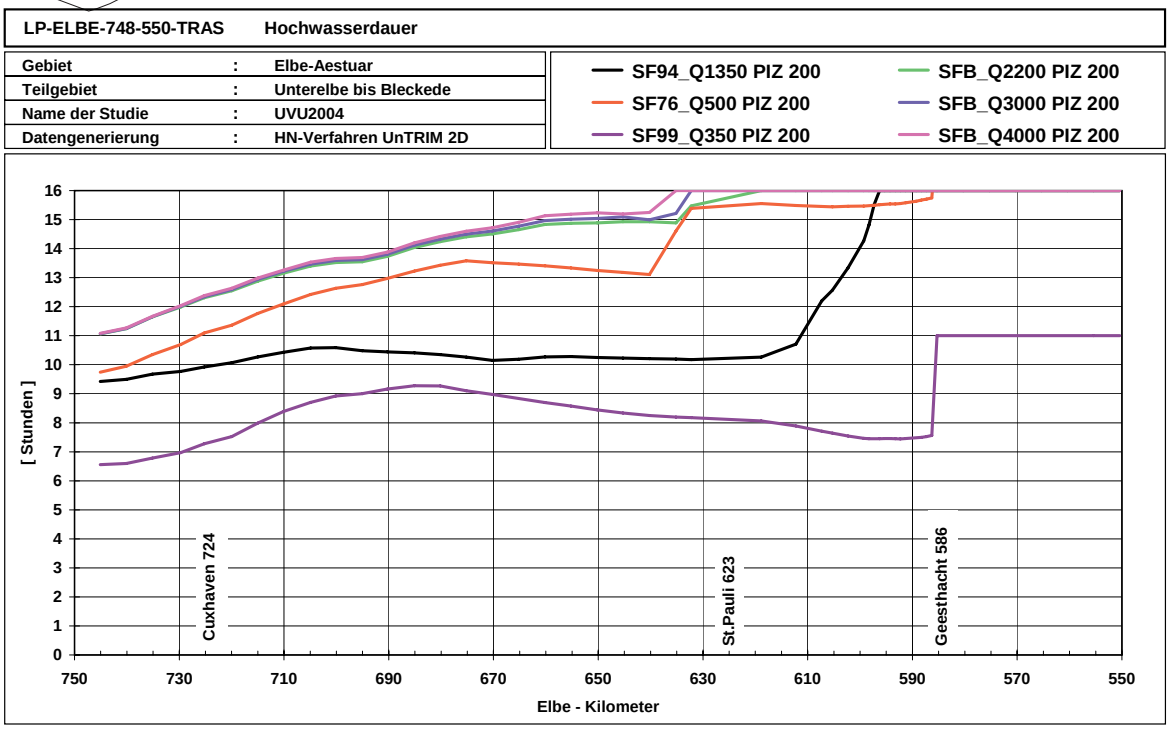

Bild 28: *Dauer hoher Wasserstände $>$ NN + 2,00 m (querschnittsgemittelt) für SF94, SF76, SF99, SFB sowie SFB_Q3000 und SFB_Q4000 im planerischen Ist – Zustand PIZ entlang des Elbefahrwassers von Elbe – km 745 bis Elbe – km 550 (Abkürzungen siehe Tabelle 3 auf Seite 34).*

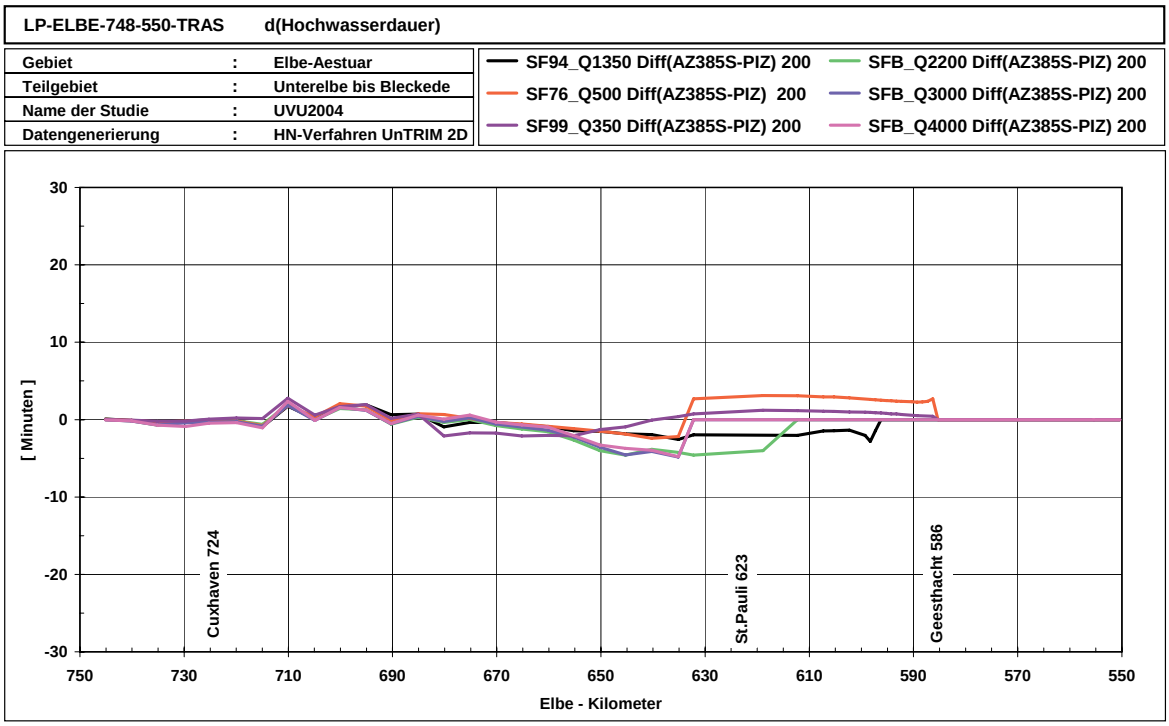

Bild 29: *Änderung der Dauer hoher Wasserstände $>$ NN + 2,00 m (querschnittsgemittelt) (AZ385S – PIZ) für die Sturmflut SF94, SF76, SF99, SFB sowie SFB_Q3000 und SFB_Q4000 entlang des Elbefahrwassers von Elbe – km 745 bis Elbe – km 550 (Abkürzungen siehe Tabelle 3).*

Wasserstände höher als NN + 3,00 m

Wasserstände höher als NN + 3,00 m (Bild 30) treten in der Außenelbe (Elbe – km 745 bis Elbe – km 700) im planerischen Ist – Zustand (PIZ) für die genannten Sturmflutszenarien 5 bis 10 Stunden lang auf. Zwischen Elbe – km 700 und Elbe – km 640 treten Wasserstände höher als NN + 3,00 m 6 bis 13 Stunden lang auf. Stromauf von Elbe – km 640 treten Wasserstände höher als NN + 3,00 m 7 bis 16 Stunden lang auf.

Ausbaubedingt verändert sich diese Dauer um weniger als ±5 Minuten (Bild 31).

Die Dauer hoher Wasserstände (hier höher als NN + 3,00 m) im *Teilgebiet West* sind für SF76 in Bild E.5 für SF94 in Bild F.5 für SF99 in Bild G.7 und für SFB in Bild H.5 dargestellt. Die ausbaubedingten Änderungen der Dauer hoher Wasserstände im *Teilgebiet West* sind für SF76 in Bild E.6 für SF94 in Bild F.6 für SF99 in Bild G.8 und für SFB in Bild H.6 dargestellt.

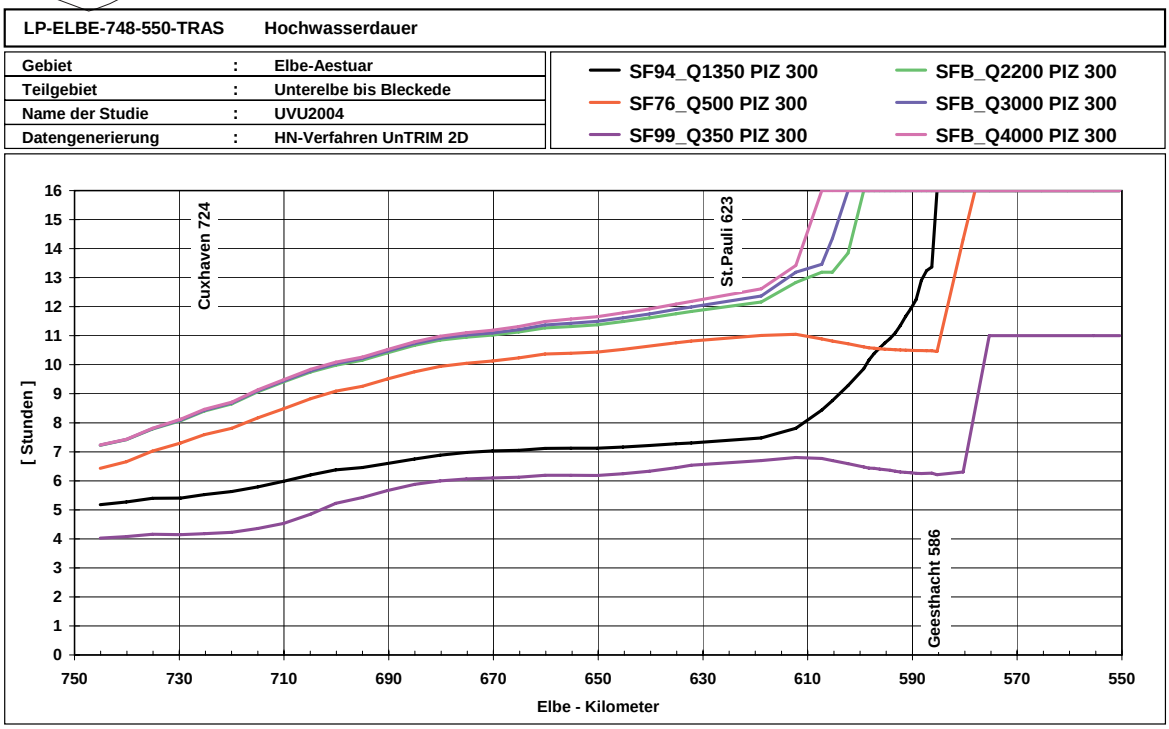

Bild 30: *Dauer hoher Wasserstände $>$ NN + 3,00 m (querschnittsgemittelt) für SF94, SF76, SF99, SFB sowie SFB_Q3000 und SFB_Q4000 im planerischen Ist – Zustand PIZ entlang des Elbefahrwassers von Elbe – km 745 bis Elbe – km 550 (Abkürzungen siehe Tabelle 3 auf Seite 34).*

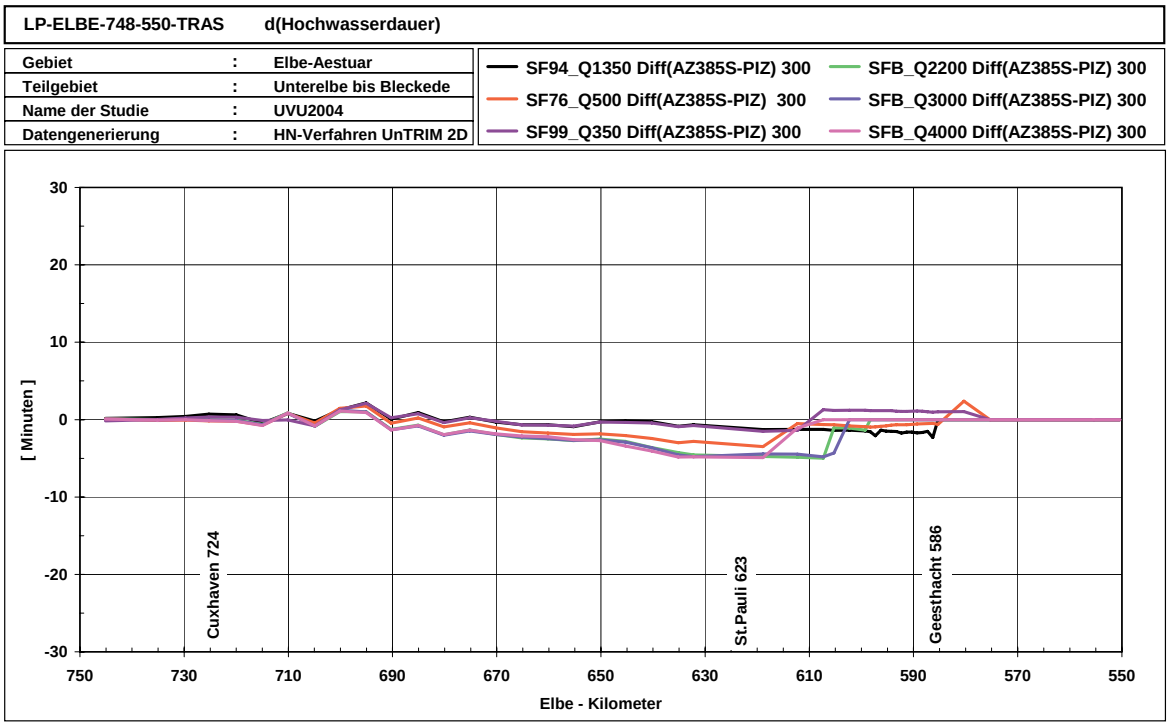

Bild 31: *Änderung der Dauer hoher Wasserstände $>$ NN + 3,00 m (querschnittsgemittelt) (AZ385S – PIZ) für die Sturmflut SF94, SF76, SF99, SFB sowie SFB_Q3000 und SFB_Q4000 entlang des Elbefahrwassers von Elbe – km 745 bis Elbe – km 550 (Abkürzungen siehe Tabelle 3).*

Wasserstände höher als NN + 4,00 m

Wasserstände höher als NN + 4,00 m (Bild 32) treten in der Außenelbe (Elbe – km 745 bis Elbe – km 700) im planerischen Ist – Zustand (PIZ) für die genannten Sturmflutszenarien 1 bis 7 Stunden lang auf. Zwischen Elbe – km 700 und Elbe – km 640 treten Wasserstände höher als NN + 4,00 m 3 bis 9 Stunden lang auf. Stromauf von Elbe – km 640 treten Wasserstände höher als NN + 4,00 m 4,5 bis 16 Stunden lang auf.

Ausbaubedingt verändert sich diese Dauer um weniger als ±5 Minuten (Bild 33).

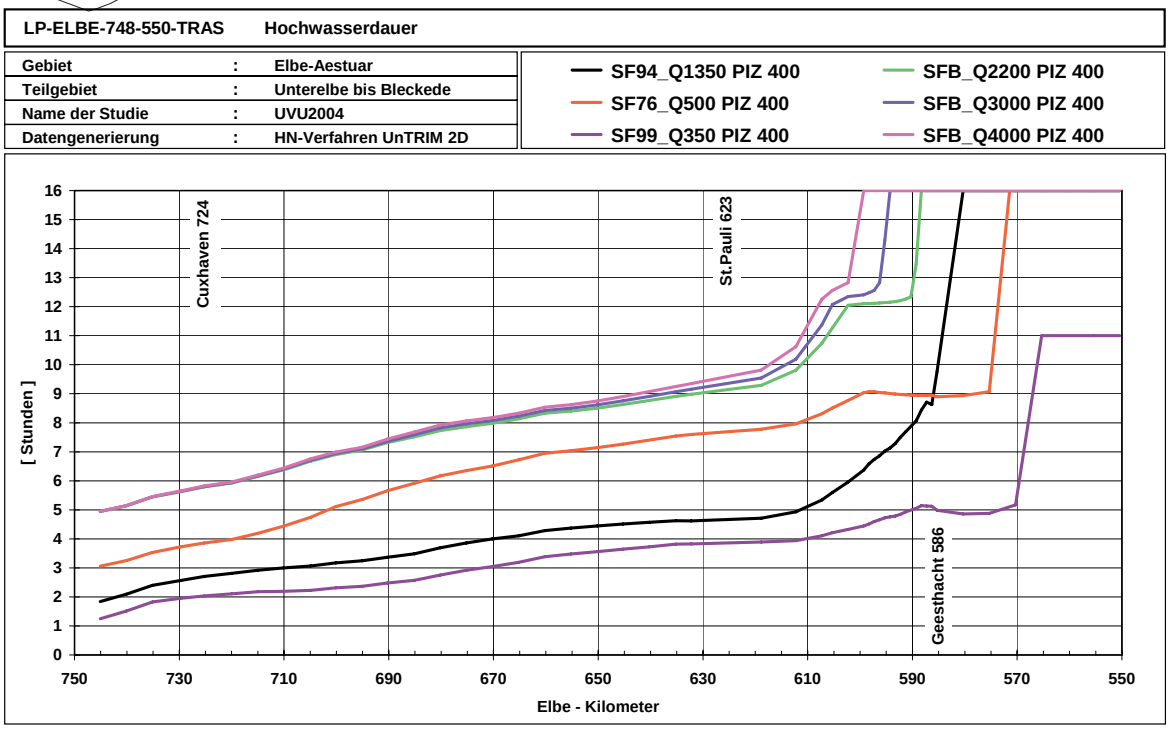

Bild 32: *Dauer hoher Wasserstände $>$ NN + 4,00 m (querschnittsgemittelt) für SF94, SF76, SF99, SFB sowie SFB_Q3000 und SFB_Q4000 im planerischen Ist – Zustand PIZ entlang des Elbefahrwassers von Elbe – km 745 bis Elbe – km 550 (Abkürzungen siehe Tabelle 3 auf Seite 34).*

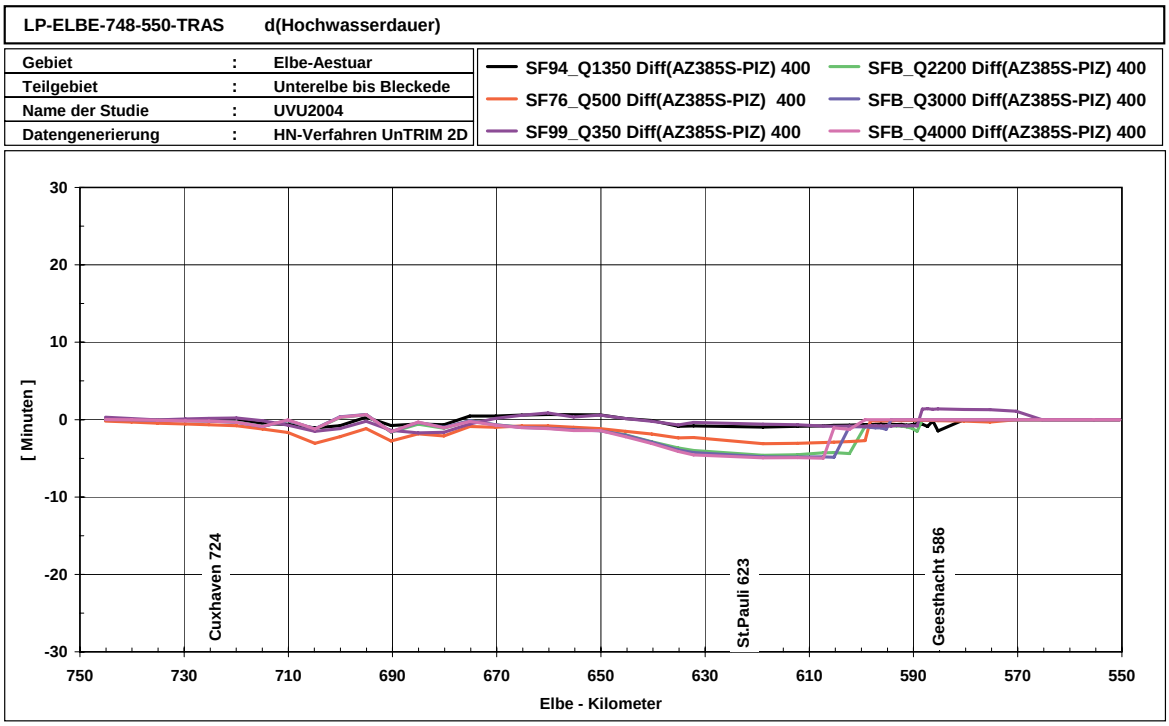

Bild 33: *Änderung der Dauer hoher Wasserstände $>$ NN + 4,00 m (querschnittsgemittelt) (AZ385S – PIZ) für die Sturmflut SF94, SF76, SF99, SFB sowie SFB_Q3000 und SFB_Q4000 entlang des Elbefahrwassers von Elbe – km 745 bis Elbe – km 550 (Abkürzungen siehe Tabelle 3).*

Wasserstände höher als NN + 5,00 m

Wasserstände höher als NN + 5,00 m (Bild 34) treten in der Außenelbe (Elbe – km 745 bis Elbe – km 700) im planerischen Ist – Zustand (PIZ) für die genannten Sturmflutszenarien 0 bis 4,5 Stunden lang auf. Zwischen Elbe – km 700 und Elbe – km 640 treten Wasserstände höher als NN + 5,00 m 0 bis 7 Stunden lang auf. Stromauf von Elbe – km 640 treten Wasserstände höher als NN + 5,00 m 2 bis 16 Stunden lang auf.

Ausbaubedingt verändert sich diese Dauer um weniger als ±5 Minuten (Bild 35).

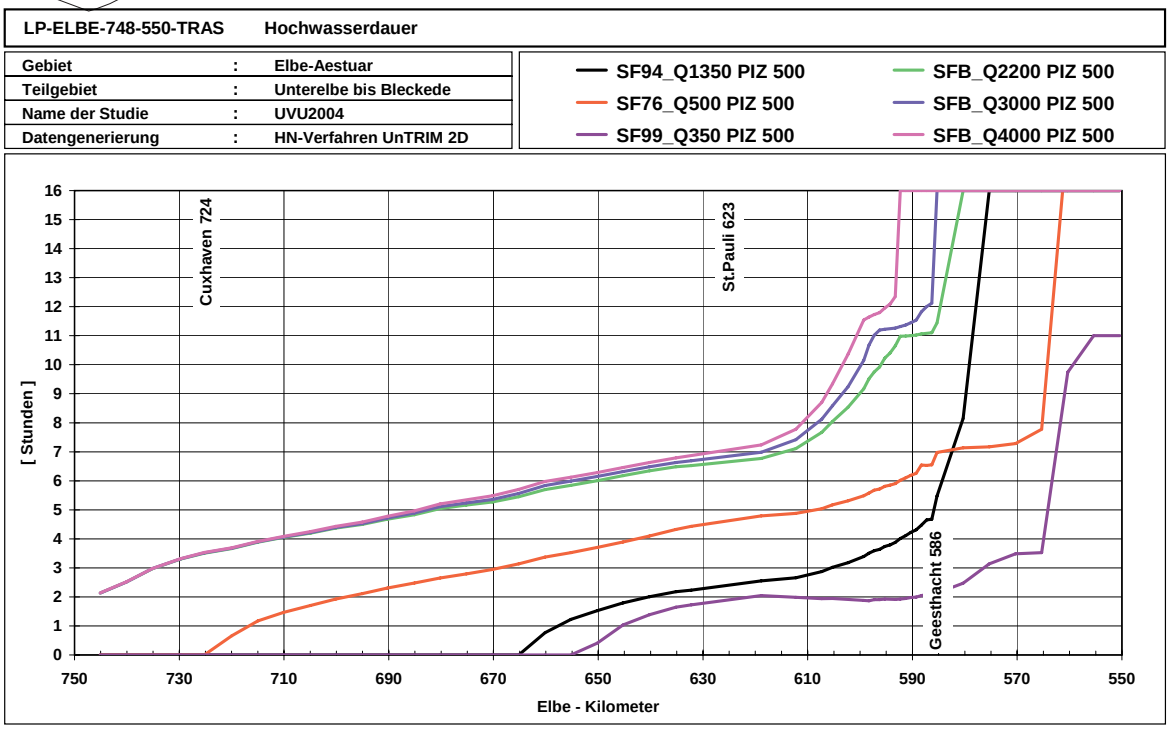

Bild 34: *Dauer hoher Wasserstände $>$ NN + 5,00 m (querschnittsgemittelt) für SF94, SF76, SF99, SFB sowie SFB_Q3000 und SFB_Q4000 im planerischen Ist – Zustand PIZ entlang des Elbefahrwassers von Elbe – km 745 bis Elbe – km 550 (Abkürzungen siehe Tabelle 3 auf Seite 34).*

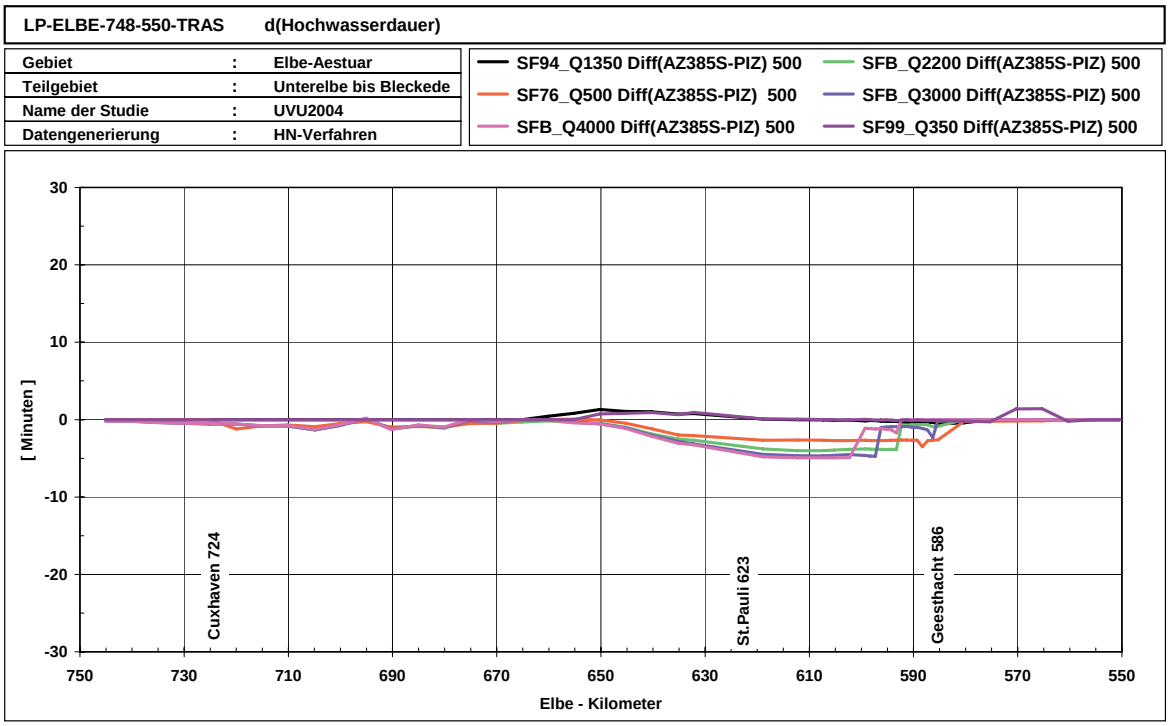

Bild 35: *Änderung der Dauer hoher Wasserstände $>$ NN + 5,00 m (querschnittsgemittelt) (AZ385S – PIZ) für die Sturmflut SF94, SF76, SF99, SFB sowie SFB_Q3000 und SFB_Q4000 entlang des Elbefahrwassers von Elbe – km 745 bis Elbe – km 550 (Abkürzungen siehe Tabelle 3).*

Wasserstände höher als NN + 6,00 m

Wasserstände höher als NN + 6,00 m (Bild 36) treten in der Außenelbe (Elbe – km 745 bis Elbe – km 700) im planerischen Ist – Zustand (PIZ) für die genannten Sturmflutszenarien nicht auf (siehe hierzu auch Bild 24 auf Seite 40). Zwischen Elbe – km 700 und Elbe – km 640 treten Wasserstände höher als NN + 6,00 m 0 bis 4 Stunden lang auf. Stromauf von Elbe – km 640 treten Wasserstände höher als NN + 6,00 m 0 bis 16 Stunden lang auf.

Ausbaubedingt verändert sich diese Dauer um weniger als ±5 Minuten (Bild 37).

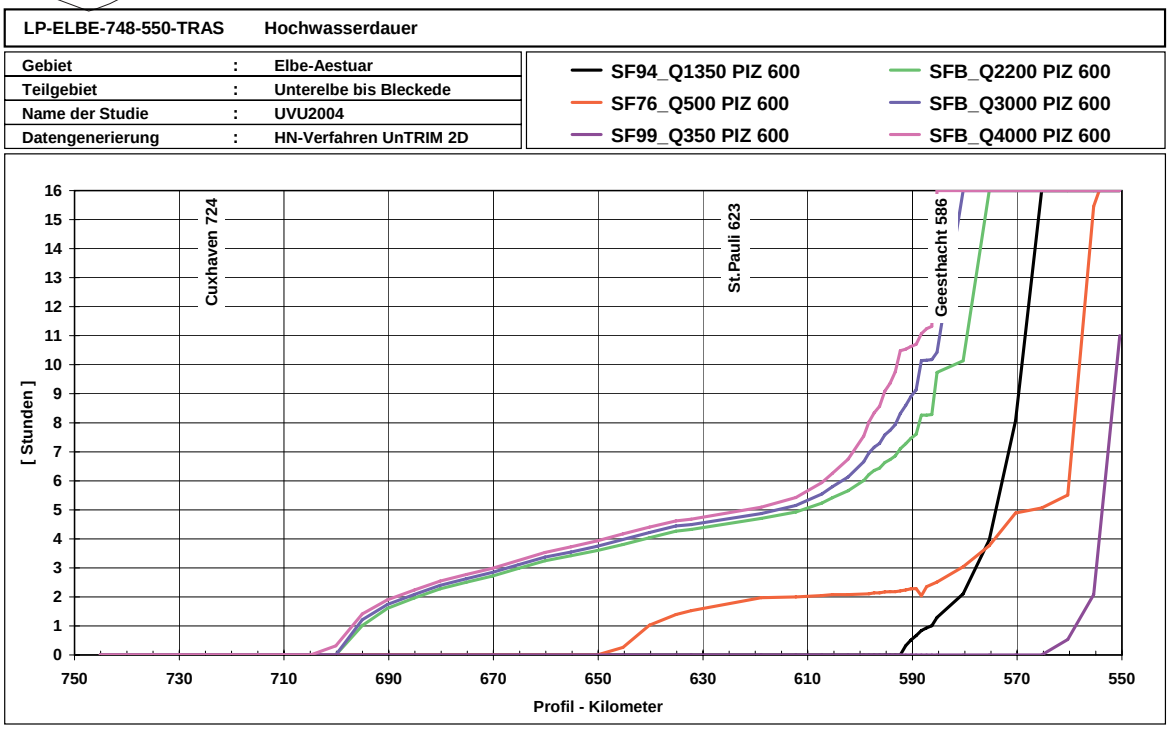

Bild 36: *Dauer hoher Wasserstände $>$ NN + 6,00 m (querschnittsgemittelt) für SF94, SF76, SF99, SFB sowie SFB_Q3000 und SFB_Q4000 im planerischen Ist – Zustand PIZ entlang des Elbefahrwassers von Elbe – km 745 bis Elbe – km 550 (Abkürzungen siehe Tabelle 3 auf Seite 34).*

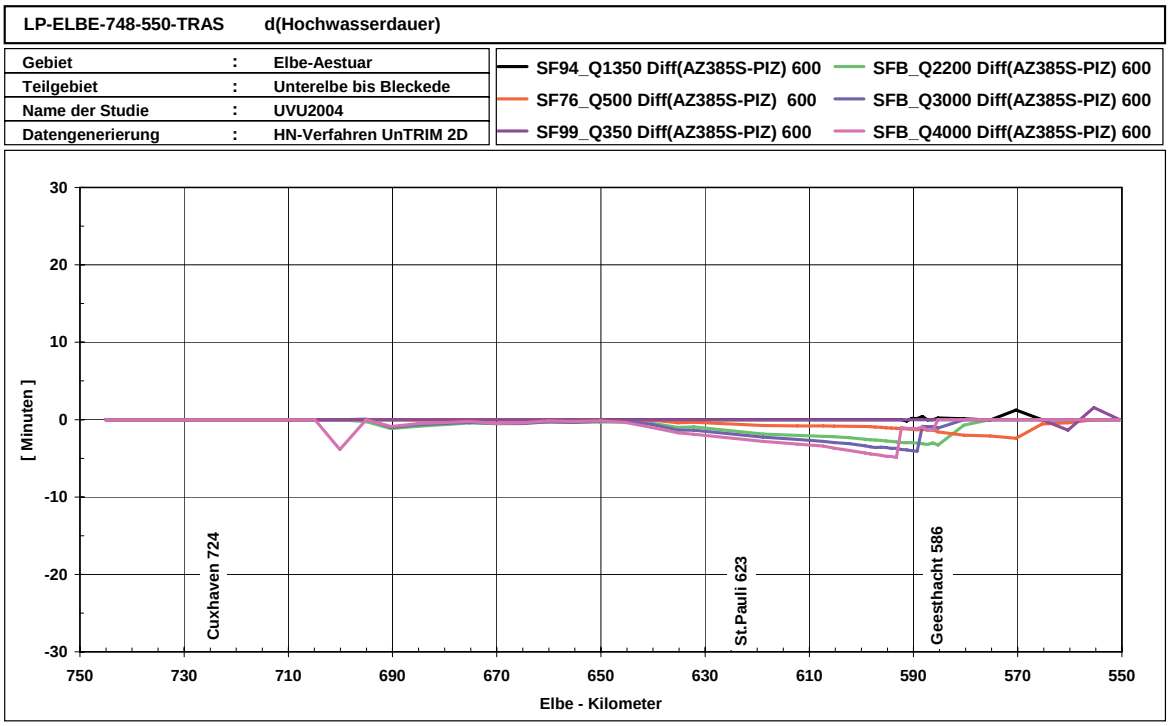

Bild 37: *Änderung der Dauer hoher Wasserstände $>$ NN + 6,00 m (querschnittsgemittelt) (AZ385S – PIZ) für die Sturmflut SF94, SF76, SF99, SFB sowie SFB_Q3000 und SFB_Q4000 entlang des Elbefahrwassers von Elbe – km 745 bis Elbe – km 550 (Abkürzungen siehe Tabelle 3).*

6.4 Änderung der Flutstromgeschwindigkeit

Die maximale Flutstromgeschwindigkeit (querschnittsgemittelt) ist auf einem Längsprofil zwischen Elbe – km 745 (Elbmündung bei Scharhörn) und Elbe – km 605 (Over) auf Bild 38 für die sechs untersuchten Sturmflutszenarien dargestellt. Die größten maximalen Flutstromgeschwindigkeiten ergeben sich für die Sturmflut SF99 und die niedrigsten für SF76. Während der sechs untersuchten Sturmflutszenarien treten die höchsten maximalen Flutstromgeschwindigkeiten im Bereich zwischen Elbe – km 705 (Osteriff) und Elbe – km 680 (Störmündung) auf. Bild 39 zeigt die ausbaubedingten Änderungen der maximalen Flutstromgeschwindigkeit. Sie liegen für alle betrachteten Szenarien zwischen Elbe – km 745 und Elbe – km 605 deutlich unter $\pm 10\,\mathrm{cm/s}$.

Die maximalen Flutstromgeschwindigkeiten im *Teilgebiet West* sind für SF76 in Bild E.7, für SF94 in Bild F.7, für SF99 in Bild G.15 und für SFB in Bild H.7 dargestellt. Die ausbaubedingten Änderungen der maximalen Flutstromgeschwindigkeit im *Teilgebiet West* sind für SF76 in Bild E.8, für SF94 in Bild F.8, für SF99 in Bild G.16 und für SFB in Bild H.8 dargestellt.

Bild 40 zeigt die mittleren Flutstromgeschwindigkeiten (querschnittsgemittelt) bei Sturmflut zwischen Elbe – km 745 und Elbe – km 605. Die ausbaubedingten Änderungen der mittleren Flutstromgeschwindigkeit sind in Bild 41 dargestellt. Sie liegen in der Größenordung $\pm 5\,\mathrm{cm/s}$.

Die mittleren Flutstromgeschwindigkeiten im *Teilgebiet West* sind für SF76 in Bild E.9 für SF94 in Bild F.9 für SF99 in Bild G.17 und für SFB in Bild H.9 dargestellt. Die ausbaubedingten Änderungen der maximalen Flutstromgeschwindigkeit im *Teilgebiet West* sind für SF76 in Bild E.10 für SF94 in Bild F.10 für SF99 in Bild G.18 und für SFB in Bild H.10 dargestellt.

Hinweis:
In einzelnen Abschnitten der Elbe werden für die Sturmflut SF76 und die Bemessungssturmflut mit extremem Oberwasser SFB_Q4000 deutlich höhere, nicht zutreffende Änderungen ermittelt. Zur Berechnung der mittleren Flutstromgeschwindigkeit wird die Flutstromdauer verwendet. Bei den hier betrachteten Sturmflutszenarien ist eine eindeutige automatische, programmgestützte Bestimmung der Kenterpunkte entlang des untersuchten Elbeabschnittes nicht immer möglich. Zur Erläuterung finden sich in Anlage C ab Seite 75 die Bilder C.1 bis C.12. Diese zeigen für alle betrachteten Sturmflutszenarien die berechneten Laufzeiten der Flut- und Ebbestromkenterung entlang der Elbe sowie für den Elbe – km 745 (Elbmündung bei Scharhörn) und den Elbe – km 640 (Unterelbe bei Schulau) den zeitlichen Verlauf des querschnittsgemittelten Wasserstandes, der querschnittsgemittelten Strömung und des querschnittsintegrierten Durchflusses für PIZ und AZ385S. Besonders für die Sturmflut SF76 und die Bemessungssturmflut SFB (bzw. SFB_Q3000 und SFB_Q4000) ist die Bestimmung der Ebbestromkenterung vor der Sturmflut auf Grund der im Vergleich zu mittleren Tiden deutlich verkürzten Ebbephase problematisch. Die sehr hohen ausbaubedingten Änderungen der mittleren Flutstromgeschwindigkeit bei SFB_Q4000 (Bild 41) treffen stets mit unterschiedlichen Laufzeiten für die Ebbestromkenterung für PIZ und AZ385S (Bild C.11 auf Seite 86) zusammen.

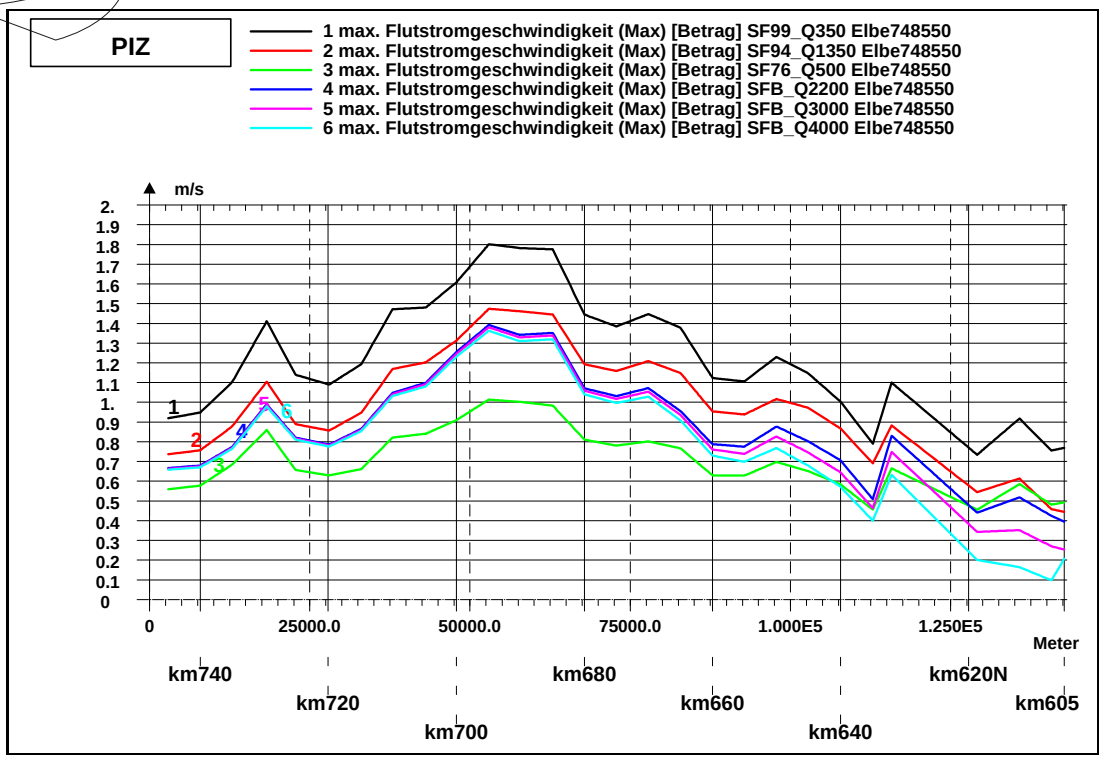

Bild 38: *Maximale Flutstromgeschwindigkeit (querschnittsgemittelt) SF99, SF94, SF76, SFB sowie SFB_Q3000 und SFB_Q4000 im planerischen Ist – Zustand PIZ entlang des Elbefahrwassers von Elbe – km 745 bis Elbe – km 605 (Abkürzungen siehe Tabelle 3 auf Seite 34).*

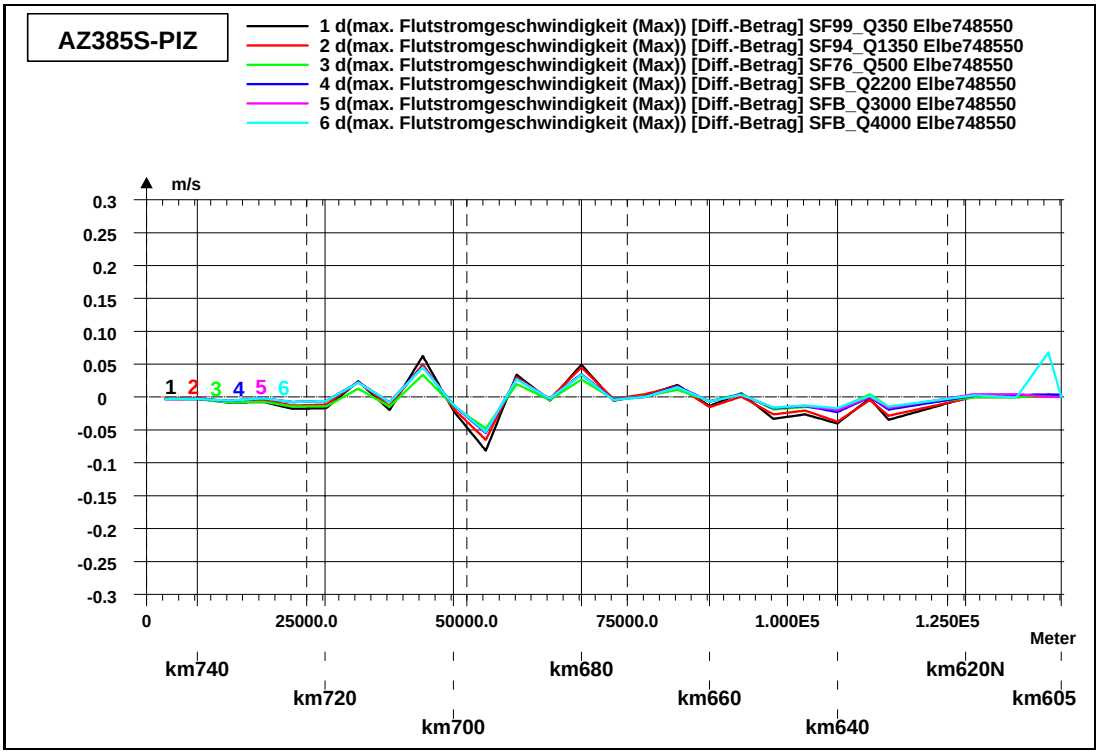

Bild 39: *Änderung der max. Flutstromgeschwindigkeit (querschnittsgemittelt) (AZ385S – PIZ) für die Sturmflut SF99, SF94, SF76, SFB sowie SFB_Q3000 und SFB_Q4000 entlang des Elbefahrwassers von Elbe – km 745 bis Elbe – km 605 (Abkürzungen siehe Tabelle 3).*

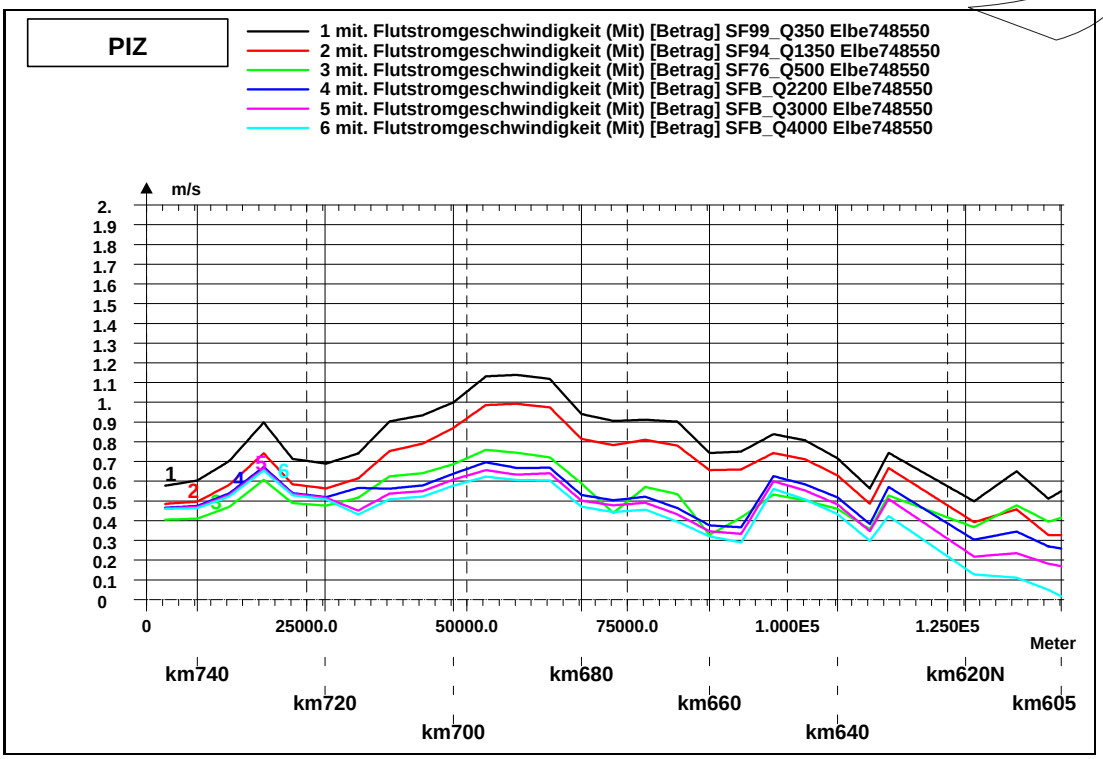

Bild 40: *Mittlere Flutstromgeschwindigkeit (querschnittsgemittelt) SF99, SF94, SF76, SFB sowie SFB_Q3000 und SFB_Q4000 im planerischen Ist – Zustand PIZ entlang des Elbefahrwassers von Elbe – km 745 bis Elbe – km 605 (Abkürzungen siehe Tabelle 3 auf Seite 34).*

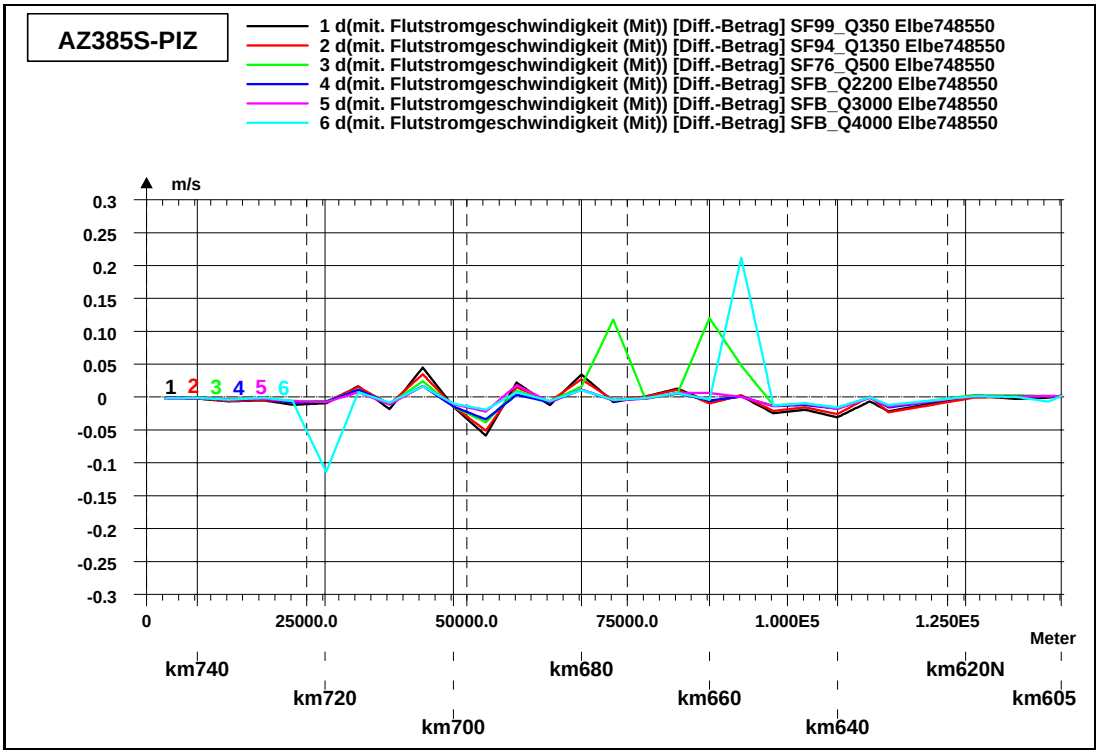

Bild 41: *Änderung der mittleren Flutstromgeschwindigkeit (querschnittsgemittelt) (AZ385S – PIZ) für die Sturmflut SF99, SF94, SF76, SFB sowie SFB_Q3000 und SFB_Q4000 entlang des Elbefahrwassers von Elbe – km 745 bis Elbe – km 605 (Abkürzungen siehe Tabelle 3).*

6.5 Änderung der Ebbestromgeschwindigkeit

Die maximale Ebbestromgeschwindigkeit (querschnittsgemittelt) ist auf einem Längsprofil zwischen Elbe – km 745 und Elbe – km 605 auf Bild 42 für die sechs untersuchten Sturmflutszenarien dargestellt. Die größten maximalen Ebbestromgeschwindigkeiten ergeben sich für die Bemessungssturmflut mit extremem Oberwasser SFB_Q4000 und die niedrigsten für SF99. Stromauf von Hamburg St. Pauli werden ebenfalls die höchsten maximalen Ebbestromgeschwindigkeiten von der Sturmflut mit dem höchsten Oberwasserzufluss (SFB_Q4000) und die niedrigsten maximalen Ebbestromgeschwindigkeiten von der Sturmflut mit dem niedrigsten Oberwasserzufluss (SF99) erreicht.

Während der sechs untersuchten Sturmflutszenarien treten die höchsten maximalen Ebbestromgeschwindigkeiten im Bereich zwischen Elbe – km 700 (Brunsbüttel) und Elbe – km 685 (Brokdorf) sowie im Bereich des Hamburger Hafens zwischen Elbe – km 615N und Elbe – km 605 auf.

Bild 43 zeigt die ausbaubedingten Änderungen der maximalen Ebbestromgeschwindigkeit. Sie liegen für alle betrachteten Szenarien zwischen Elbe – km 745 und Elbe – km 605 deutlich unter $\pm 10\,\mathrm{cm/s}$.

Die maximalen Ebbestromgeschwindigkeiten im *Teilgebiet West* sind für SF76 in Bild E.11, für SF94 in Bild F.11, für SF99 in Bild G.19 und für SFB in Bild H.11 dargestellt. Die ausbaubedingten Änderungen der maximalen Ebbestromgeschwindigkeit im *Teilgebiet West* sind für SF76 in Bild E.12, für SF94 in Bild F.12, für SF99 in Bild G.20 und für SFB in Bild H.12 dargestellt.

Bild 44 zeigt die mittleren Ebbestromgeschwindigkeiten (querschnittsgemittelt) bei Sturmflut zwischen Elbe – km 745 und Elbe – km 605. Die ausbaubedingten Änderungen der mittleren Ebbestromgeschwindigkeit sind in Bild 45 dargestellt. Sie liegen für alle betrachteten Szenarien deutlich unter $\pm 10\,\mathrm{cm/s}$.

Die mittleren Ebbestromgeschwindigkeiten im *Teilgebiet West* sind für SF76 in Bild E.13 für SF94 in Bild F.13 für SF99 in Bild G.21 und für SFB in Bild H.13 dargestellt. Die ausbaubedingten Änderungen der maximalen Ebbestromgeschwindigkeit im *Teilgebiet West* sind für SF76 in Bild E.14 für SF94 in Bild F.14 für SF99 in Bild G.22 und für SFB in Bild H.14 dargestellt.

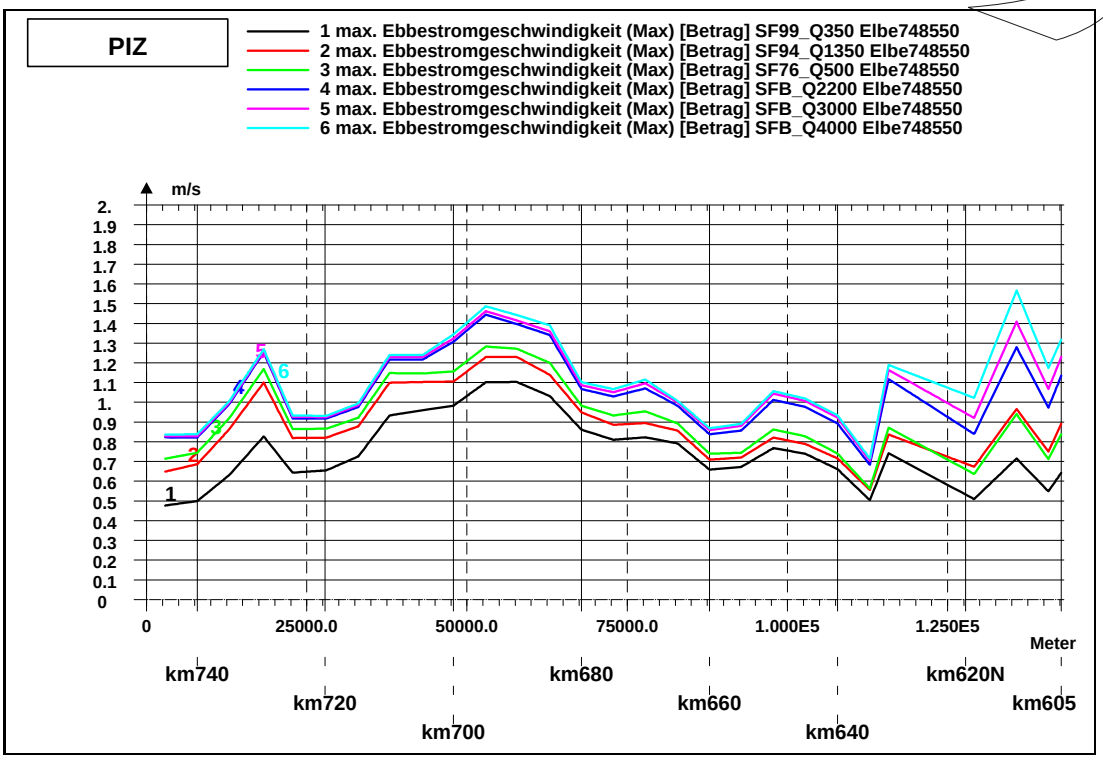

Bild 42: *Maximale Ebbestromgeschwindigkeit (querschnittsgemittelt) SF99, SF94, SF76, SFB sowie SFB_Q3000 und SFB_Q4000 im planerischen Ist – Zustand PIZ entlang des Elbefahrwassers von Elbe – km 745 bis Elbe – km 605 (Abkürzungen siehe Tabelle 3 auf Seite 34).*

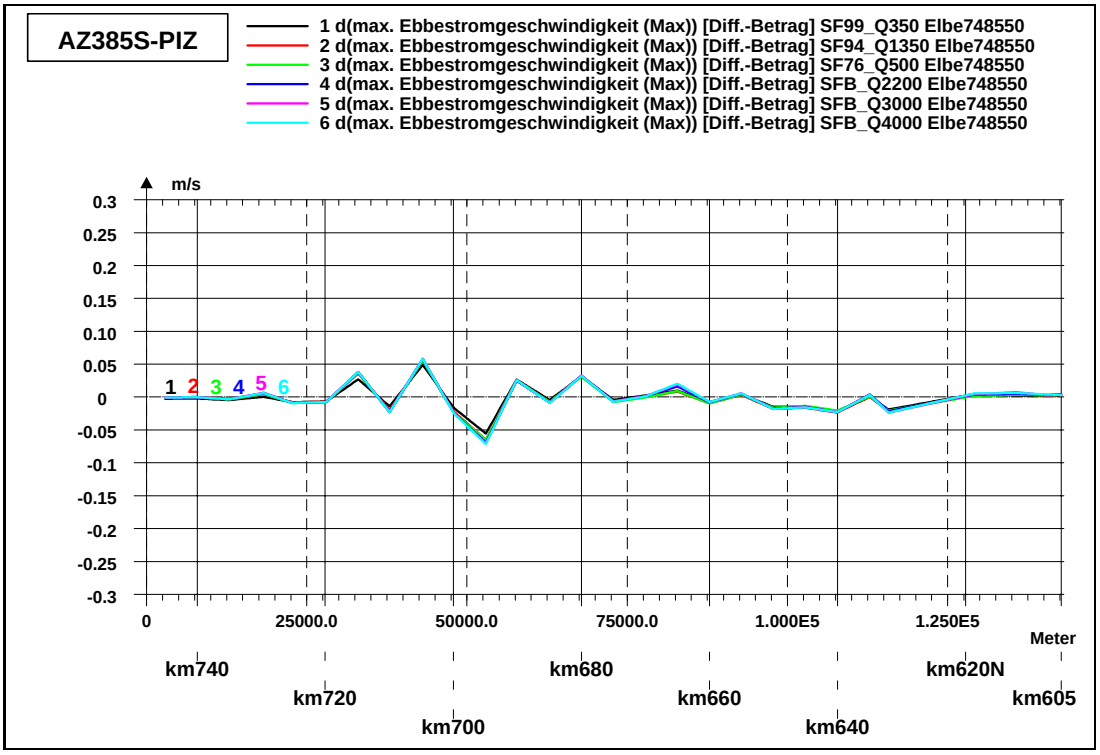

Bild 43: *Änderung max. Ebbestromgeschwindigkeit (querschnittsgemittelt) (AZ385S – PIZ) für die Sturmflut SF99, SF94, SF76, SFB sowie SFB_Q3000 und SFB_Q4000 entlang des Elbefahrwassers von Elbe – km 745 bis Elbe – km 605 (Abkürzungen siehe Tabelle 3).*

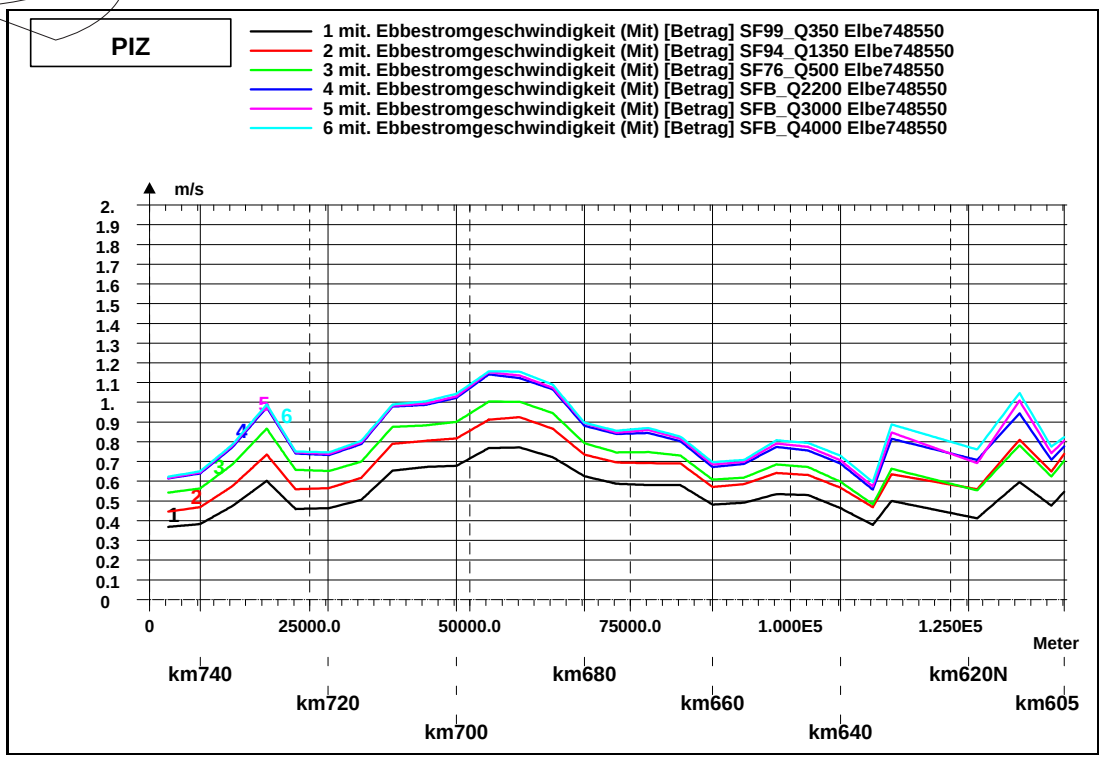

Bild 44: *Mittlere Ebbestromgeschwindigkeit (querschnittsgemittelt) SF99, SF94, SF76, SFB sowie SFB_Q3000 und SFB_Q4000 im planerischen Ist – Zustand PIZ entlang des Elbefahrwassers von Elbe – km 745 bis Elbe – km 605 (Abkürzungen siehe Tabelle 3 auf Seite 34).*

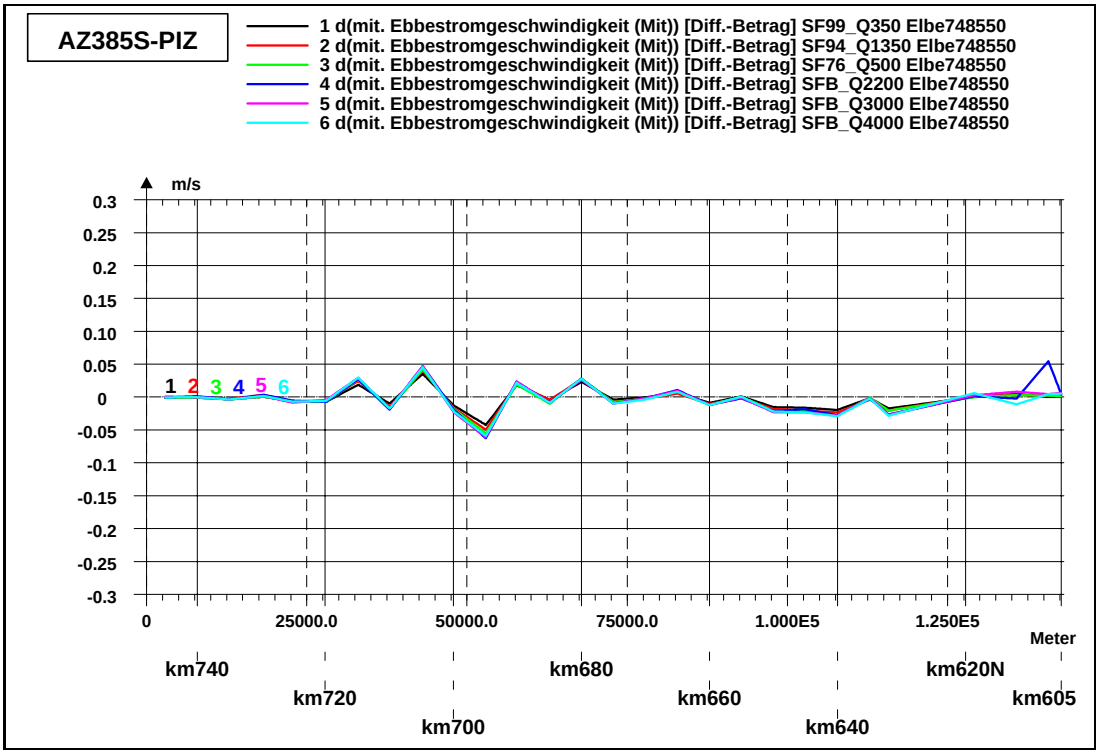

Bild 45: *Änderung der mittleren Ebbestromgeschwindigkeit (querschnittsgemittelt) (AZ385S – PIZ) für die Sturmflut SF99, SF94, SF76, SFB sowie SFB_Q3000 und SFB_Q4000 entlang des Elbefahrwassers von Elbe – km 745 bis Elbe – km 605 (Abkürzungen siehe Tabelle 3).*

6.6 Änderung des Flutstromvolumens

Das Flutstromvolumen (querschnittsintegriert) ist auf einem Längsprofil zwischen Elbe – km 745 und Elbe – km 605 auf Bild 46 für die sechs untersuchten Sturmflutszenarien dargestellt. In der Legende ist der Zeitpunkt der Ebbestromkenterung bei Elbe – km 745 als Beginn der Flut angegeben (siehe auch Anlage C).

Die größten Flutstromvolumina erreichen die drei Szenarien der Bemessungssturmflut und das niedrigste Flutstromvolumen SF94.

Bild 47 zeigt die ausbaubedingten Änderungen des Flutstromvolumens. Für alle betrachteten Szenarien ergeben sich ausbaubedingte Änderungen zwischen Elbe – km 745 und Elbe – km 630 (Hamburger Hafen bei Finkenwerder) von weniger als $\pm 10 \cdot 10^{+6}\,\mathrm{m}^3$. Dies entspricht einer ausbaubedingten Änderung des Flutstromvolumens in der Außenelbe von weniger als $-$ 1% und in der Unterelbe von weniger als $\pm$ 2%. Stromauf von Elbe – km 630 werden kaum noch ausbaubedingten Änderungen des Flutstromvolumens bei Sturmflut beobachtet.

Das Flutstromvolumen im *Teilgebiet West* ist für SF76 in Bild E.15, für SF94 in Bild F.15, für SF99 in Bild G.23 und für SFB in Bild H.15 dargestellt. Die ausbaubedingten Änderungen des Flutstromvolumens im *Teilgebiet West* ist für SF76 in Bild E.16, für SF94 in Bild F.16, für SF99 in Bild G.24 und für SFB in Bild H.16 dargestellt.

Der Vergleich der flächenhaft dargestellten Flutstromvolumen mit den querschnittsintegrierten Flutstromvolumen zeigt, dass es in der tiefen Fahrrinne zu einer ausbaubedingten Zunahme des Flutstromvolumens kommt, während auf den Wattflächen das Flutstromvolumen ausbaubedingt abnimmt.

Hinweis:

Auch bei den ausbaubedingten Änderungen des Flutstromvolumens findet man einzelne deutlich höhere, nicht zutreffende Werte (siehe Bild 47 auf der nächsten Seite bzw. Bild C.14 auf Seite 88). Zur Berechnung des Flutstromvolumens muss die Flutstromdauer bekannt sein, d. h. die Kenterpunkte bestimmt werden. Es gelten hier dieselben Hinweise wie bei der Berechnung der mittleren Flutstromgeschwindigkeit (siehe Abschnitt 6.4 auf Seite 53).

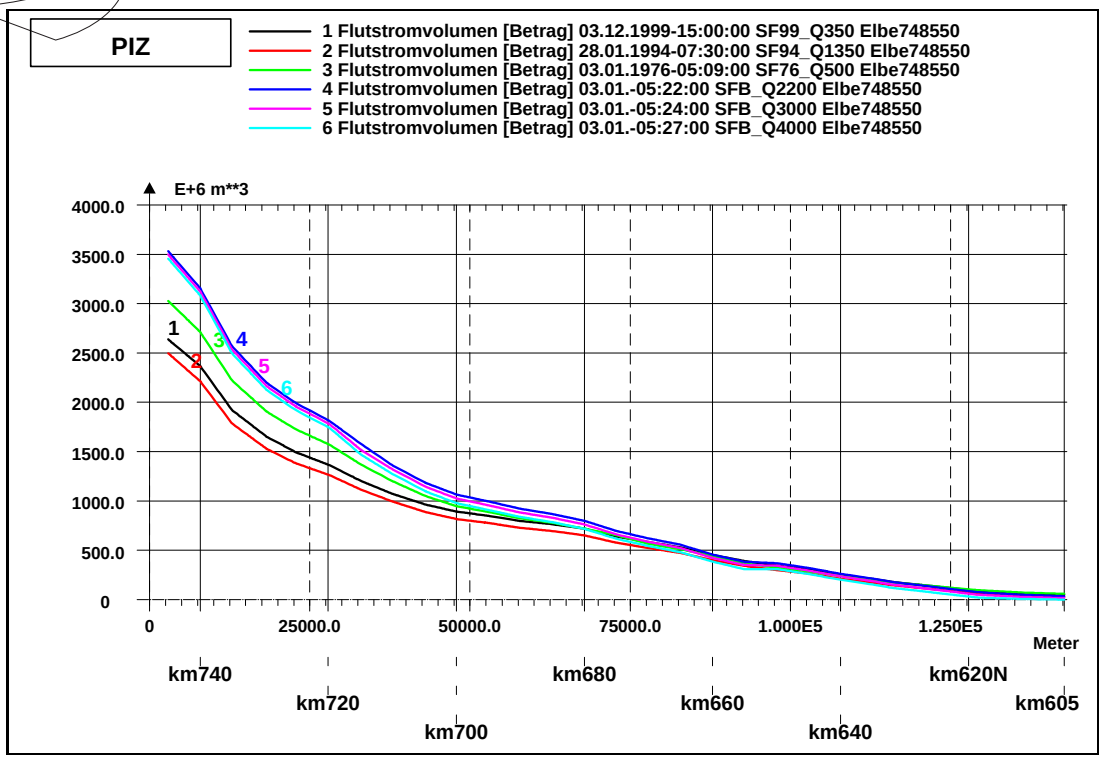

Bild 46: *Querschnittsintegriertes Flutstromvolumen für SF99, SF94, SF76, SFB sowie SFB_Q3000 und SFB_Q4000 im planerischen Ist – Zustand PIZ entlang des Elbefahrwassers von Elbe – km 745 bis Elbe – km 605 (Abkürzungen siehe Tabelle 3 auf Seite 34).*

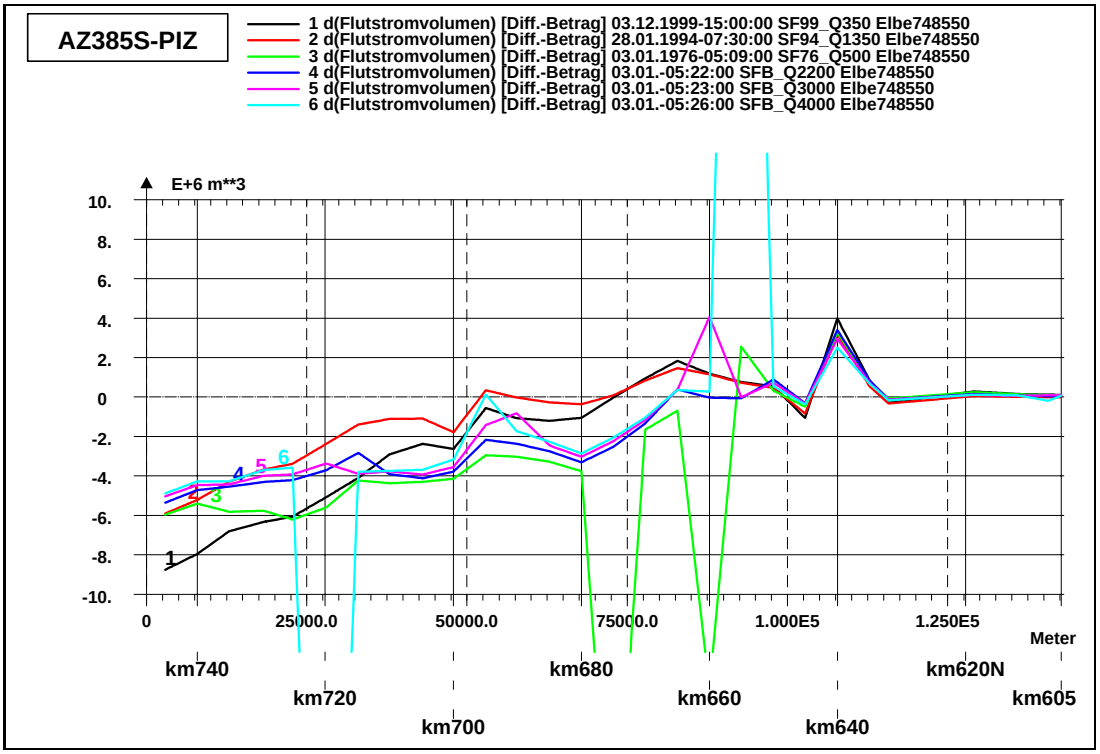

Bild 47: *Änderung des querschnittsintegrierten Flutstromvolumens (AZ385S – PIZ) für die Sturmflut SF99, SF94, SF76, SFB sowie SFB_Q3000 und SFB_Q4000 entlang des Elbefahrwassers von Elbe – km 745 bis Elbe – km 605 (Abkürzungen siehe Tabelle 3).*

6.7 Änderung des Ebbestromvolumens

Das Ebbestromvolumen (querschnittsintegriert) ist auf einem Längsprofil zwischen Elbe – km 745 und Elbe – km 605 auf Bild 48 für die sechs untersuchten Sturmflutszenarien dargestellt. In der Legende ist der Zeitpunkt der Flutstromkenterung bei Elbe – km 745 als Beginn der Ebbe angegeben (siehe auch Anlage C).

Die größten Ebbestromvolumen erreicht die Bemessungssturmflut mit extremem Oberwasser SFB_Q4000 und das niedrigste Ebbestromvolumen die Sturmflut SF99.

Bild 49 zeigt die ausbaubedingten Änderungen des Ebbestromvolumens. Für alle betrachteten Szenarien ergeben sich ausbaubedingte Änderungen zwischen Elbe – km 745 und Elbe – km 605 von deutlich weniger als $\pm 10 \cdot 10^{+6}$ m^3.

Dies entspricht einer ausbaubedingten Änderung des Ebbestromvolumens in der Außenelbe von weniger als $-$ 1% und in der Unterelbe von weniger als $\pm$ 2%.

Das Ebbestromvolumen im *Teilgebiet West* ist für SF76 in Bild E.17, für SF94 in Bild F.17, für SF99 in Bild G.25 und für SFB in Bild H.17 dargestellt. Die ausbaubedingten Änderungen des Ebbestromvolumens im *Teilgebiet West* ist für SF76 in Bild E.18, für SF94 in Bild F.18, für SF99 in Bild G.26 und für SFB in Bild H.18 dargestellt.

Der Vergleich der flächenhaft dargestellten Ebbestromvolumen mit den querschnittsintegrierten Ebbestromvolumen zeigt, dass es in der tiefen Fahrrinne zu einer ausbaubedingten Zunahme des Ebbestromvolumens kommt, während auf den Wattflächen das Ebbestromvolumen ausbaubedingt abnimmt.

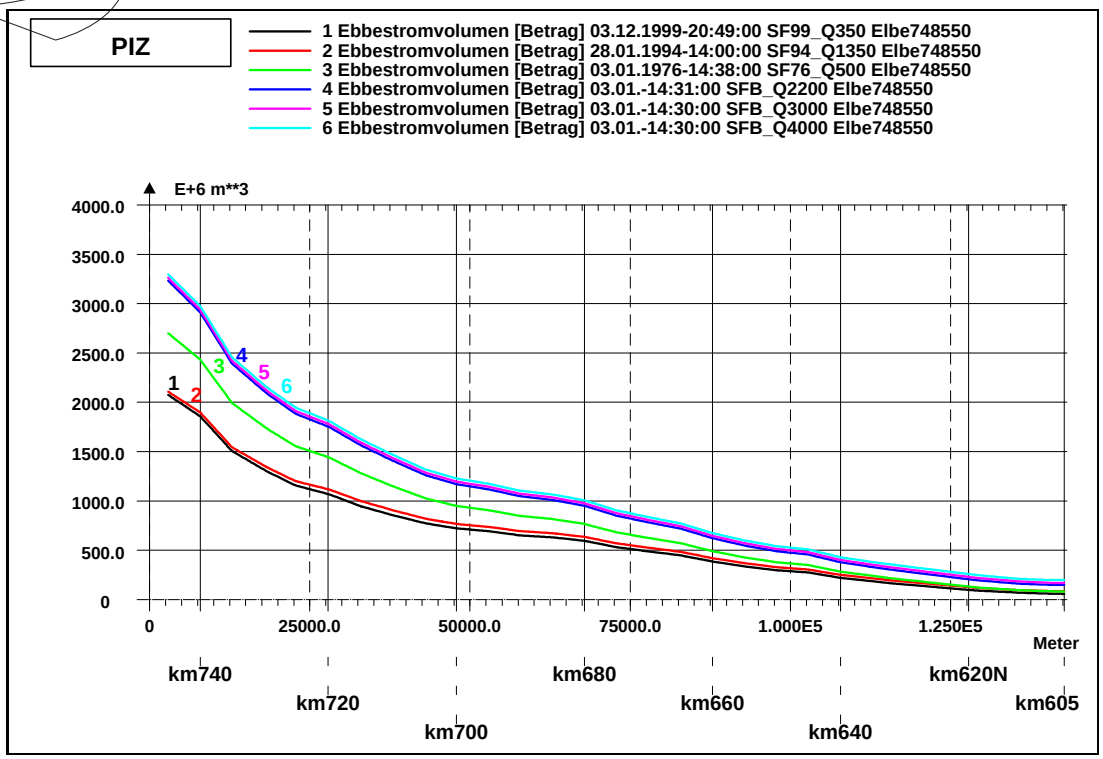

Bild 48: *Querschnittsintegriertes Ebbestromvolumen für SF99, SF94, SF76, SFB sowie SFB_Q3000 und SFB_Q4000 im planerischen Ist – Zustand PIZ entlang des Elbefahrwassers von Elbe – km 745 bis Elbe – km 605 (Abkürzungen siehe Tabelle 3 auf Seite 34).*

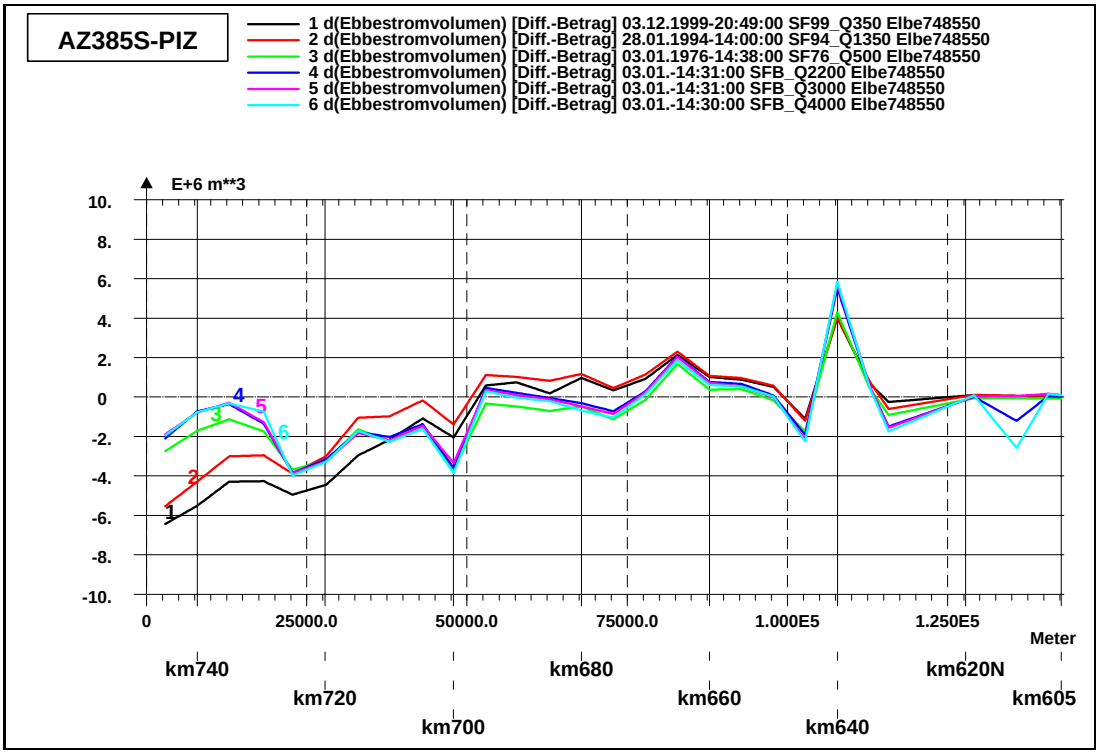

Bild 49: *Änderung des querschnittsintegrierten Ebbestromvolumens (AZ385S – PIZ) für die Sturmflut SF99, SF94, SF76, SFB sowie SFB_Q3000 und SFB_Q4000 entlang des Elbefahrwassers von Elbe – km 745 bis Elbe – km 605 (Abkürzungen siehe Tabelle 3).*

6.8 Hochwasserneutralität

Das 5 – Punkte Programm der Bundesregierung vom 15. September 2002 (BMVBW, 2003) sieht vor, dass alle Ausbauplanungen vor dem Hintergrund der Hochwasserereignisse der Elbe im August 2002 in ihrer Wirkung auf den Hochwasserschutz zu bewerten sind (siehe auch WaStrG § 12).

Die für den Hochwasserschutz maßgeblichen Wasserstände in Tidegewässern wie der Unterelbe werden durch extreme Sturmfluten bestimmt. Sturmfluten an der Küste und in den Flussmündungsgebieten der Deutschen Bucht werden hervorgerufen durch die Überlagerung

- der astronomische Gezeit,
- der durch (starken) Wind hervorgerufene Wasserstandserhöhung (Windstau) und
- der langperiodischen Fernwellen aus dem Atlantik.

Im oberen Ästuarbereich werden die Sturmflutscheitelwasserstände außerdem durch den Oberwasserzufluss aus dem Binnenland beeinflusst. Die höchsten Sturmflutscheitelwasserstände in den Ästuaren an der Deutschen Bucht treten folglich auf, wenn extrem hohe Sturmfluten mit extrem hohen Oberwasserereignissen zusammentreffen.

Zur Bewertung der Hochwasserneutralität der geplanten Fahrrinnenanpassung der Unter- und Außenelbe werden deshalb hier, wie bereits im *Testat zur Hochwasserneutralität der erwogenen Anpassung der Fahrrinne von Unter- und Außenelbe* (BAW, 2003), die ausbaubedingte Änderung des Sturmflutscheitelwasserstandes für die Bemessungssturmflut 2085A (SFB, $Q = 2200\ m^3/s$), sowie für die Bemessungssturmflut mit den extremen Oberwasserszenarien $Q = 3000\ m^3/s$ (SFB_Q3000) und $Q = 4000\ m^3/s$ (SFB_Q4000) betrachtet.

Bild 50 zeigt die Scheitelwasserstände diese Sturmflutszenarien entlang der Elbe von Elbe – km 748 bis Elbe – km 550. Die ausbaubedingten Änderungen der Sturmflutscheitelwasserstände für die Anpassung der Unter- und Außenelbe (Bild 51) sind kleiner als ± 2 cm. Änderungen des Hochwasserstandes in dieser Größenordnung sind nicht relevant für das Hochwasserschutzniveau. Die geplante Anpassung der Unter- und Außenelbe wird daher als hochwasserneutral bewertet.

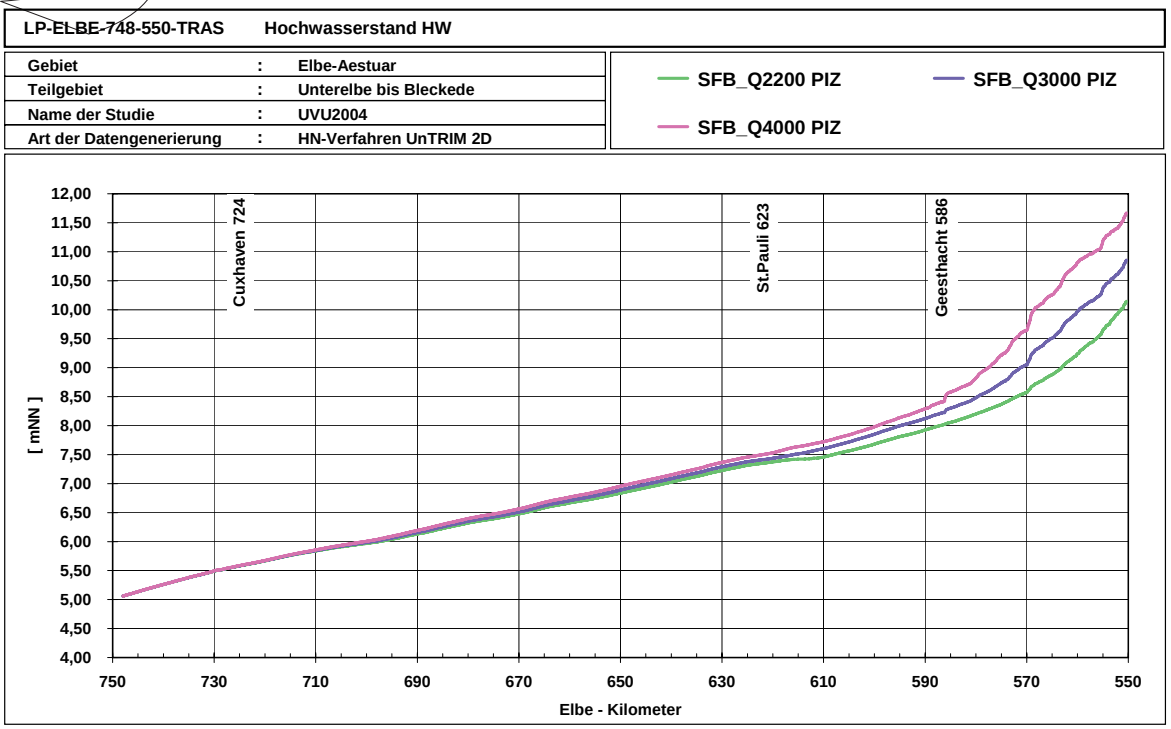

Bild 50: *Sturmflutscheitelwasserstand der Bemessungssturmflut SFB (grün) sowie der SFB mit extrem hohem Oberwasser $Q = 3000\ m^3/s$ (blau) und $Q = 4000\ m^3/s$ (violett) im planerischen Ist – Zustand PIZ von Elbe – km 748 (Elbmündung) bis Elbe – km 550 (Bleckede).*

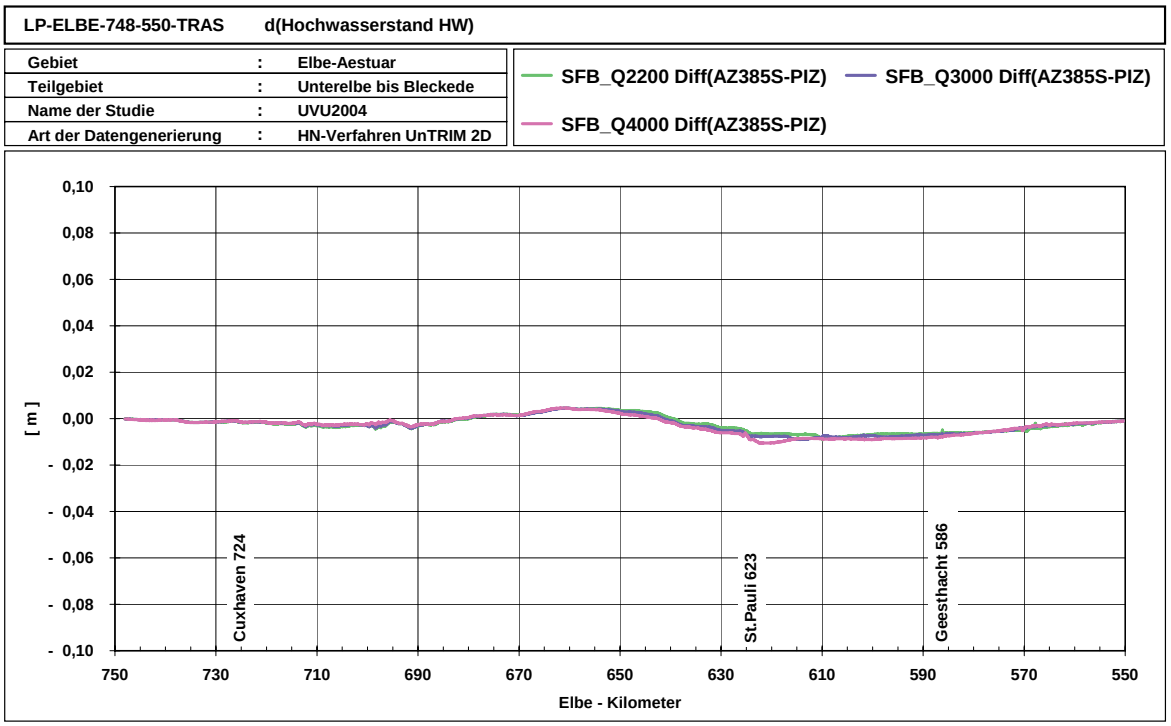

Bild 51: *Änderung des Sturmflutscheitelwasserstandes AZ385S – PIZ für die Bemessungssturmflut SFB (grün) und die SFB mit extrem hohem Oberwasser $Q = 3000\ m^3/s$ (blau) und $Q = 4000\ m^3/s$ (violett) entlang der Elbe von Elbe – km 748 bis Elbe – km 550.*

7 Schlußbetrachtung

Die durch die geplante Anpassung der Unter- und Außenelbe bedingten Änderungen der Sturmflutkenngrößen sind auf der Grundlage von numerischen Simulationen mit einem hochauflösenden HN – Modell der Elbe (*UnTRIM*) im Rahmen einer wasserbaulichen Systemanalyse ermittelt worden.

Die geforderte Untersuchung von Sturmfluttiden wird auf der Grundlage der historischen Sturmfluten vom 3. 1. 1976, 28. 1. 1994 und 3. / 4. 12. 1999, der Bemessungssturmflut 2085A sowie der Bemessungssturmflut mit extrem hohem Oberwasserzufluss von 3000 m^3/s bzw. 4000 m^3/s durchgeführt.

Aus den hier untersuchten Sturmflutszenarien ergeben sich folgende ausbaubedingte Änderungen der Sturmflutkenngrößen:

- der Sturmflutscheitelwasserstand verändert sich um weniger als $+2\,cm$ / $-3\,cm$;
- die Eintrittszeit des Sturmflutscheitelwasserstandes verändert sich um weniger als ± 5 Minuten;
- die Dauer hoher Wasserstände ändert sich um weniger als ± 5 Minuten;
- die querschnittsgemittelte Flutstromgeschwindigkeit verändert sich um weniger als $\pm 10\,cm/s$;
- die querschnittsgemittelte Ebbestromgeschwindigkeit verändert sich um weniger als $\pm 10\,cm/s$;
- das querschnittsintegrierte Flutstromvolumen verändert sich um weniger als $\pm\,10 \cdot 10^{+6}\,m^3$ (weniger als $\pm$ 2%);
- das querschnittsintegrierte Ebbestromvolumen verändert sich um weniger als $\pm\,10 \cdot 10^{+6}\,m^3$ (weniger als $\pm$ 2%).

Die geplante Fahrrinnenanpassung von Unter- und Außenelbe verändert bei hohen Sturmfluten mit hohem Oberwasserzufluss nicht das Hochwasserschutzniveau. Sie wird als hochwasserneutral bewertet.

Bundesanstalt für Wasserbau – Dienststelle Hamburg

Hamburg, den 26. Januar 2007

Im Auftrag	Bearbeiterin
gez. Winkel	gez. Rudolph
Dr. rer. nat Norbert Winkel	Dr. rer. nat. Elisabeth Rudolph
(Regierungsdirektor)	(Wiss. Angestellte)

Literaturverzeichnis

BAW (2002). Tideunabhängige Kennwerte des Wasserstands. Technischer Bericht, Bundesanstalt für Wasserbau – Dienststelle Hamburg, Wedeler Landstraße 157, 22559 Hamburg. *http://www.baw.de/vip/abteilungen/wbk/Methoden/kenn/lzkw/lzkw-de.html*.

BAW (2003). Testat zur Hochwasserneutralität der erwogenen Anpassung der Fahrrinne von Unter- und Außenelbe. Bericht BAW-Nr. 5.02.10014.00, Bundesanstalt für Wasserbau – Außenstelle Küste, Wedeler Landstraße 157, 22559 Hamburg. Unveröffentlicht.

BAW (2004a). Tidekennwerte der Strömung. Technischer Bericht, Bundesanstalt für Wasserbau – Dienststelle Hamburg, Wedeler Landstraße 157, 22559 Hamburg. *http://www.baw.de/vip/abteilungen/wbk/Methoden/kenn/tdkv/tdkv-de.html*.

BAW (2004b). Tidekennwerte des Wasserstands. Technischer Bericht, Bundesanstalt für Wasserbau – Dienststelle Hamburg, Wedeler Landstraße 157, 22559 Hamburg. *http://www.baw.de/vip/abteilungen/wbk/Methoden/kenn/tdkw/tdkw-de.html*.

BAW (2004c). Validation document – Mathematical-Model UnTRIM. Bericht, Bundesanstalt für Wasserbau – Dienststelle Hamburg, Wedeler Landstraße 157, 22559 Hamburg. *http://www.baw.de/vip/abteilungen/wbk/Methoden/hnm/untrim/PDF/vd-untrim-2004.pdf*.

BAW (2006a). Anpassung der Fahrrinne von Unter- und Außenelbe an die Containerschifffahrt – Ausbaubedingte Änderungen der schiffserzeugten Belastungen. Gutachten BAW A3955 03 10062 H.1d, Bundesanstalt für Wasserbau – Dienststelle Hamburg, Wedeler Landstraße 157, 22559 Hamburg. unveröffentlicht.

BAW (2006b). Anpassung der Fahrrinne von Unter- und Außenelbe an die Containerschifffahrt – Gutachten zur ausbaubedingten Änderung der morphodynamischen Prozesse. Gutachten BAW A3955 03 10062 H.1c, Bundesanstalt für Wasserbau – Dienststelle Hamburg, Wedeler Landstraße 157, 22559 Hamburg. unveröffentlicht.

BAW (2006c). Anpassung der Fahrrinne von Unter- und Außenelbe an die Containerschifffahrt – Gutachten zur ausbaubedingten Änderung von Hydrodynamik und Salztransport. Gutachten BAW A3955 03 10062 H.1a, Bundesanstalt für Wasserbau – Dienststelle Hamburg, Wedeler Landstraße 157, 22559 Hamburg. unveröffentlicht.

BMVBW (2003). Flusskonferenz 2002 – Dokumentation der gemeinsamen Konferenz zum vorbeugenden Hochwasserschutz, 15. September 2002. Bericht, Bundesministerium für Verkehr, Bau- und Wohnungswesen, 11030 Berlin.

Casulli, V. und Walters, R.A. (2000). An unstructured, three-dimensional model based on the shallow water equations. *International Journal for Numerical Methods in Fluids*, 32:331–348.

DGJ (1976). Deutsches Gewässerkundliches Jahrbuch – Unteres Elbegebiet, Abflußjahr 1976. Freie und Hansestadt Hamburg, Behörde für Wirtschaft, Verkehr und Landwirtschaft – Strom- und Hafenbau.

DGJ (1997). Deutsches Gewässerkundliches Jahrbuch – Elbegebiet, Teil III Untere Elbe ab Havelmündung, Abflußjahr 1994. Freie und Hansestadt Hamburg, Wirtschaftsbehörde – Strom- und Hafenbau.

DGJ (2001). Deutsches Gewässerkundliches Jahrbuch – Elbegebiet, Teil III Untere Elbe ab Havelmündung, Abflußjahr 1999. Freie und Hansestadt Hamburg, Wirtschaftsbehörde – Strom- und Hafenbau.

DGJ (2005). Deutsches Gewässerkundliches Jahrbuch – Elbegebiet, Teil III Untere Elbe ab Havelmündung, Abflußjahr 2002. Freie und Hansestadt Hamburg, Behörde für Wirtschaft und Arbeit – Hamburg Port Authority.

Internationale Kommission zum Schutz der Elbe (2001). Bestandsaufnahme des vorhandenen Hochwasserschutzniveaus im Einzugsgebiet der Elbe. Bericht, IKSE – MKOL, Magdeburg.

Länderarbeitsgruppe (1988). Bemessungswasserstände entlang der Elbe – Bericht einer Länderarbeitsgruppe. *Die Küste*, 47:31–50.

Plüß, A. (1999). Nordseemodell der BAW-AK. *Supercomputing News der BAW*, 8-4:22–30. *http://www.baw.de/vip/abteilungen/wbk/Publikationen/scn/sc4-99a/sc4-99a2.pdf.*

Plüß, A. (2003). Das Nordseemodell der BAW zur Simulation der Tide in der Deutschen Bucht. *Die Küste*, 67:83–127.

Rudolph, E. (2005). Einfluss sehr hoher Abflüsse auf die Wasserstände in der Tideelbe. *promet*, 31,2–4:186–190. *http://www.dmg-ev.de/gesellschaft/publikationen/promet_archiv.htm.*

Schlesinger, S., Crosbie, R.E., Gagné, R.E., Innis, G.S., Loch, J., Sylvester, J., Wright, R.D., Kheir, N., und Bartos, D. (1979). Terminology for model credibility. SCS Technical Committee on Model Credibility. *Simulation*, 32(3):103–104.

Schmidt, H. und Pätsch, J. (1992). Meteorologische Messungen auf Norderney und Modellrechnungen. *Die Küste*, 54:131–142.

Smith, S.D. und Banke, E.G (1975). Variation of the Sea Surface Drag Coefficient with Wind Speed. *Quart. J. of the Roy. Met. Soc.*, 101:665–673.

WSD Nord & BWA (2005). Geplante Fahrrinnenanpassung von Unter- und Außenelbe an die Containerschifffahrt – Festlegung des Untersuchungsrahmens gem. § 5 des Gesetzes über die Umweltverträglichkeitsprüfung (UVPG). Bericht, Wasser- und Schifffahrtsdirektion Nord & Behörde für Wirtschaft und Arbeit, Kiel / Hamburg.

WSV (1994). Staustufe Geesthacht. Bericht, WSD Ost, WSA Lauenburg. Unveröffentlicht.

A Anlagen

Anlage B zeigt ergänzend zum Gutachten die im HN – Modell der Elbe verwendete Verteilung der effektiven Sohlrauheit und die Lage der zur Querschnittsmittelung verwendeten Querprofile.

Anlage C zeigt die Laufzeit der Flutstrom- und Ebbestromkenterung entlang der Tideelbe.

Die Ergebnisse der in Tabelle 3 auf Seite 34 genannten Untersuchungsvarianten sind in Kapitel 6 dargestellt. Die Anlagen D bis H zeigen ergänzend flächenhafte Darstellungen im Teilgebiet West (Elbemündung) folgender Analysegrößen:

1. Sturmflutscheitelwasserstand (höchster aufgetretener Wasserstand HW) im Analysezeitraum (vgl. Abschnitt 5.2 auf Seite 34),

2. Eintrittszeit des Sturmflutscheitelwasserstandes (tHW) bezogen auf Elbe – km 748 in der Elbmündung,

3. Dauer von Wasserständen (DHW) höher als NN + 3,00 m,

4. maximale Flutstromgeschwindigkeit (Maximalwert der Fließgeschwindigkeit während der Flutstromdauer) im Analysezeitraum,

5. mittlere Flutstromgeschwindigkeit (Mittelwert der Fließgeschwindigkeit während der Flutstromdauer) im Analysezeitraum,

6. maximale Ebbestromgeschwindigkeit (Maximalwert der Fließgeschwindigkeit während der Ebbestromdauer) im Analysezeitraum,

7. mittlere Ebbestromgeschwindigkeit (Mittelwert der Fließgeschwindigkeit während der Flutstromdauer) im Analysezeitraum,

8. Flutstromvolumen ((für die über die Wassertiefe gemittelte Flutstromgeschwindigkeit) das zwischen dem Zeitpunkt der Ebbestromkenterung und dem Zeitpunkt der Flutstromkenterung durch eine einen Meter breite Fläche (senkrecht zur mittleren Strömungsrichtung und von der Wasseroberfläche bis zur Gewässersohle reichend) hindurchfliessende Wasservolumen) im Analysezeitraum, sowie

9. Ebbestromvolumen ((für die über die Wassertiefe gemittelte Ebbestromgeschwindigkeit) das zwischen dem Zeitpunkt der Flutstromkenterung und dem Zeitpunkt der Ebbestromkenterung durch eine einen Meter breite Fläche (senkrecht zur mittleren Strömungsrichtung und von der Wasseroberfläche bis zur Gewässersohle reichend) hindurchfliessende Wasservolumen) im Analysezeitraum.

Die Ergebnisse liegen für die jeweiligen Sturmflutszenarien im *planerischen Ist – Zustand PIZ* sowie als ausbaubedingte Änderungen d.h. Differenz zwischen *AZ385S* und *PIZ* vor. Der Anhang gliedert sich wie folgt:

Anlage D Abbildungen der Modelltopographie *PIZ* sowie der ausbaubedingten Veränderungen der Topographien *AZ385S* im Teilgebiet West;

Anlage E Abbildungen zur Sturmflut SF76 im Teilgebiet West;

Anlage F Abbildungen zur Sturmflut SF94 im Teilgebiet West;

Anlage G Abbildungen zur Sturmflut SF99 im Teilgebiet West;

Anlage H Abbildungen zur Sturmflut SFB im Teilgebiet West;

B Ergänzende Abbildungen

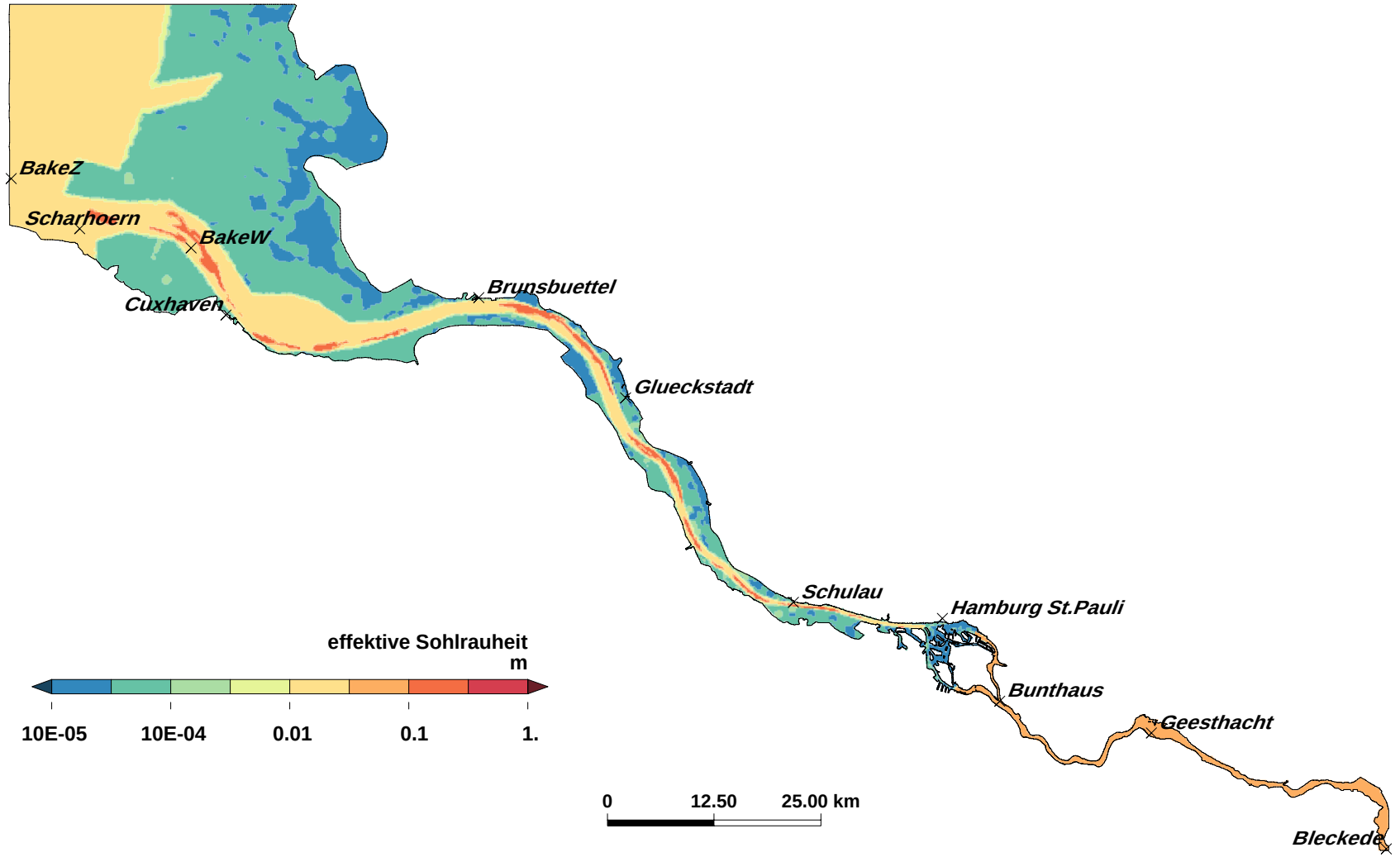

Bild B.1: *Bei der Kalibrierung des HN-Modells der Elbe mit Daten aus dem Mai 2002 (Spring – Nipp Zeitraum) verwendete effektive Sohlrauheit (auch k_s nach Nikuradse genannt).*

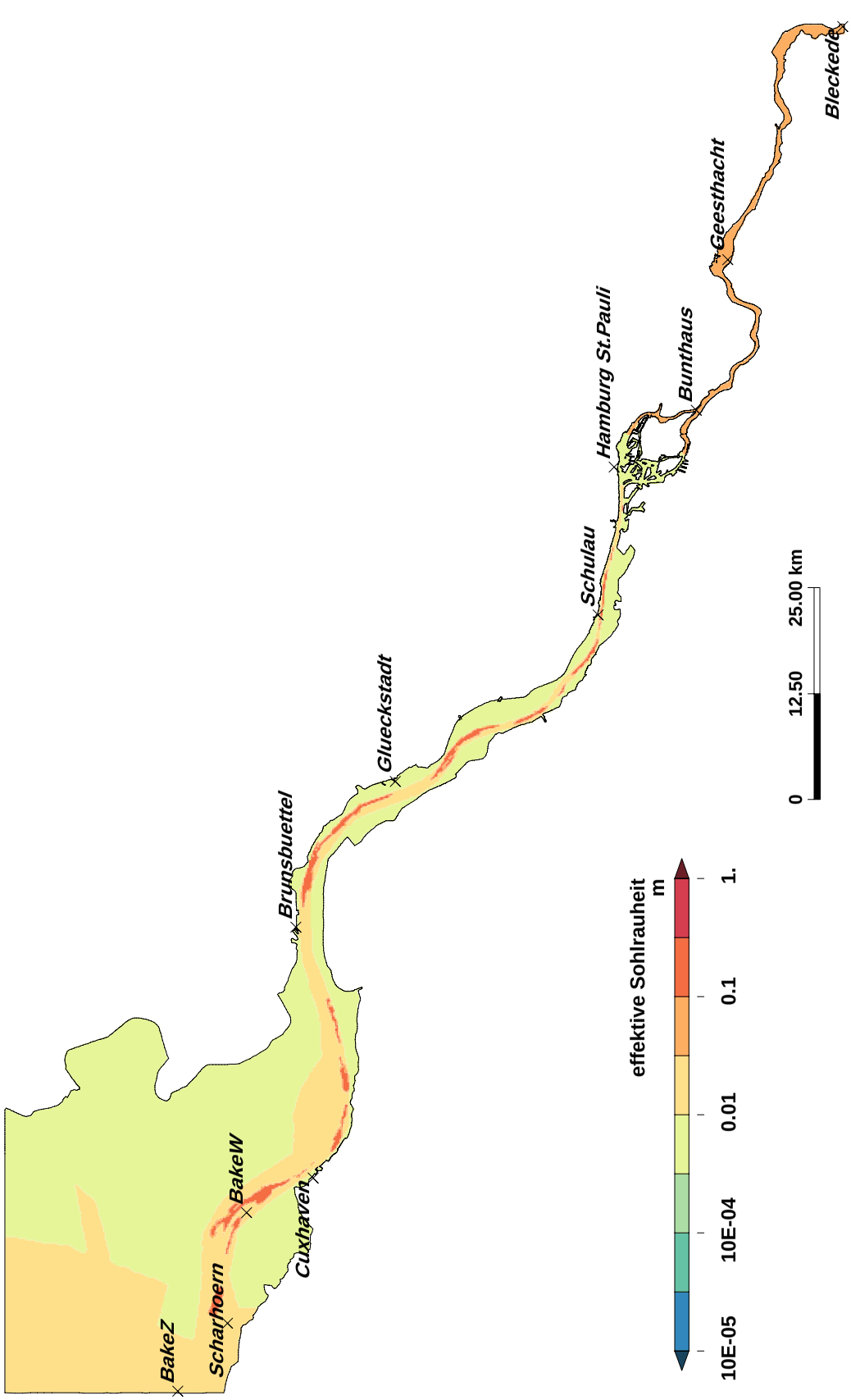

Bild B.2: *Bei der Re-Kalibrierung des HN – Modells der Elbe mit Daten aus dem Sturmflutzeitraum Januar 1994 verwendete effektive Sohlrauheit (auch k_s nach Nikuradse genannt). Bei Sturmflut sind die Wattflächen und Vorlandbereiche entlang der Tideelbe überflutet. In diesen Bereichen wurde die für die Sturmflutuntersuchungen verwendete effektive Sohlrauheit erhöht.*

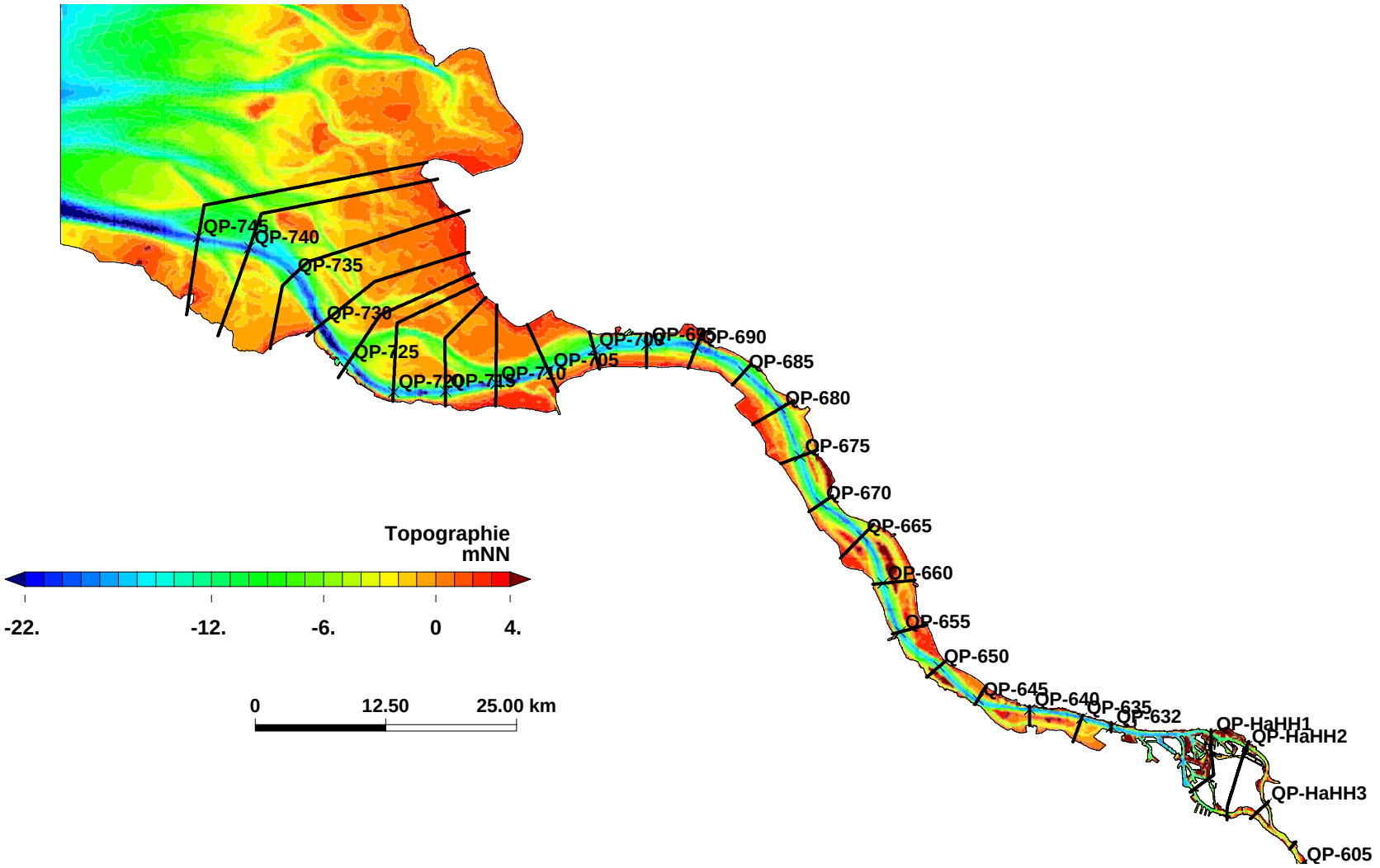

Bild B.3: *Topographie des HN-Modells des Elbe-Ästuares zwischen der Elbmündung und Elbe – km 605 (Over) mit der Lage der zur Querschnittsmittelung bzw. -integration der Wasserstands- und Strömungszeitreihen verwendeten Querprofile.*

C Laufzeit der Flutstrom- und Ebbestromkenterung

Die Abbildungen im folgenden Abschnitt zeigen für die sechs untersuchten Sturmflutszenarien die Laufzeiten der aus den querschnittsgemittelten Wasserstands- und Strömungsdaten bestimmten Flutstromkenterung und Ebbestromkenterung entlang des Elbefahrwassers zwischen Elbe – km 745 und Elbe – km 605.

Die Eintrittszeit der Flut- und Ebbestromkenterung kennzeichnet Beginn und Ende der jeweiligen untersuchten Zeiträume *Flut vor Erreichen des Sturmflutscheitelwasserstandes* sowie *Ebbe nach Erreichen des Sturmflutscheitelwasserstandes*. Für diese Zeiträume werden dann die in Kapitel 6 genannten Strömungskenngrößen bestimmt (siehe auch BAW, 2004a).

Zusätzlich ist die zeitliche Entwicklung des querschnittsgemittelten Wasserstandes, der querschnittsgemittelten Strömung und des querschnittsintegrierten Durchflusses für Elbe – km 754 und Elbe – km 640 dargestellt. Man erkennt, dass besonders für SF76 (Bild C.2) und SFB_Q4000 (Bild C.12) die automatische Analyse der Kenterpunkte problematisch ist.

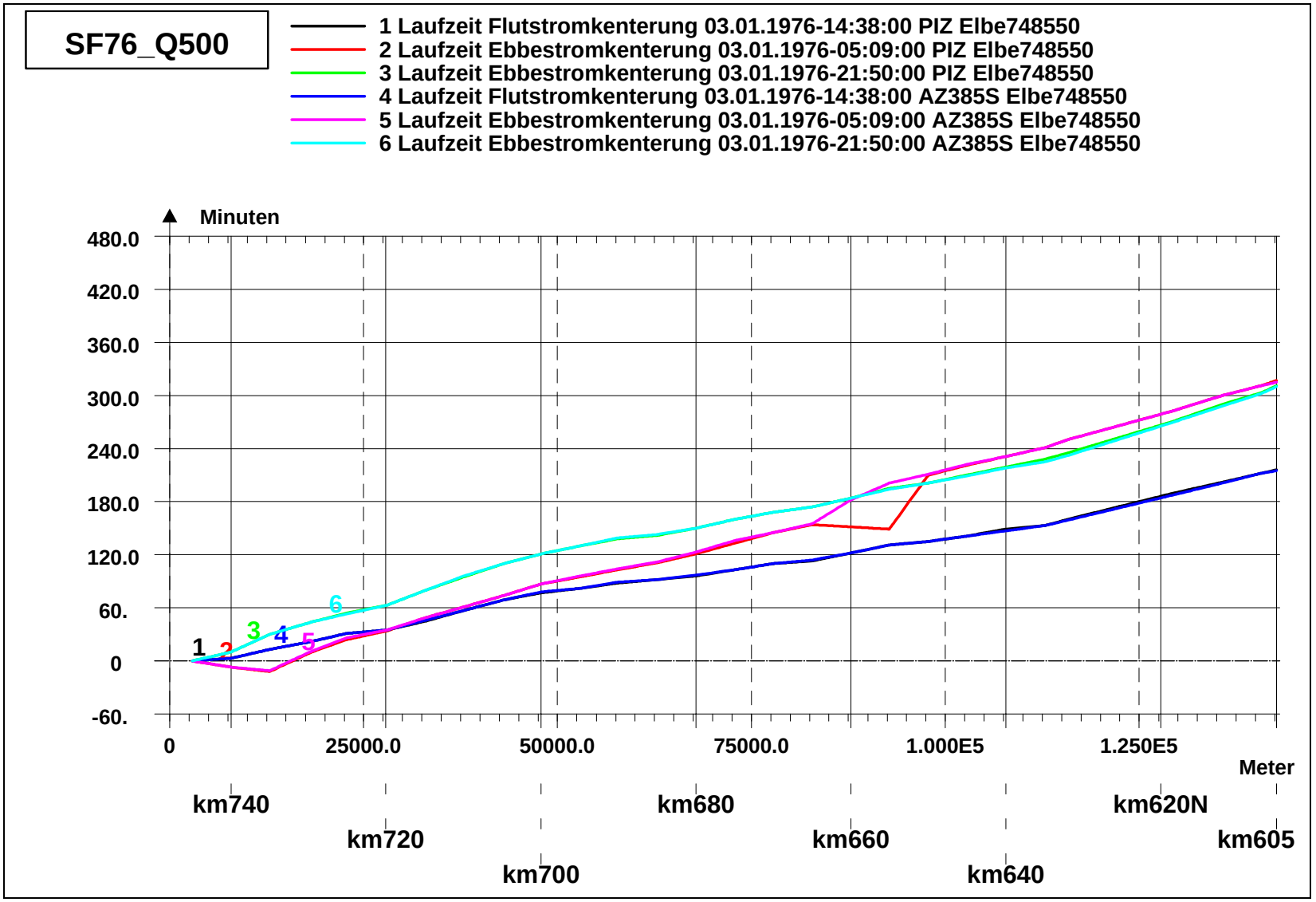

Bild C.1: *Laufzeit der Flut- und Ebbestromkenterung im Analysezeitraum SF76 entlang des Elbe–Ästuares zwischen der Elbmündung und Elbe–km 605 (Over) bezogen auf Elbe–km 745. Datengrundlage: Querschnittsgemittelte Zeitreihen des Wasserstandes und der Strömung im Abstand von 5 km.*

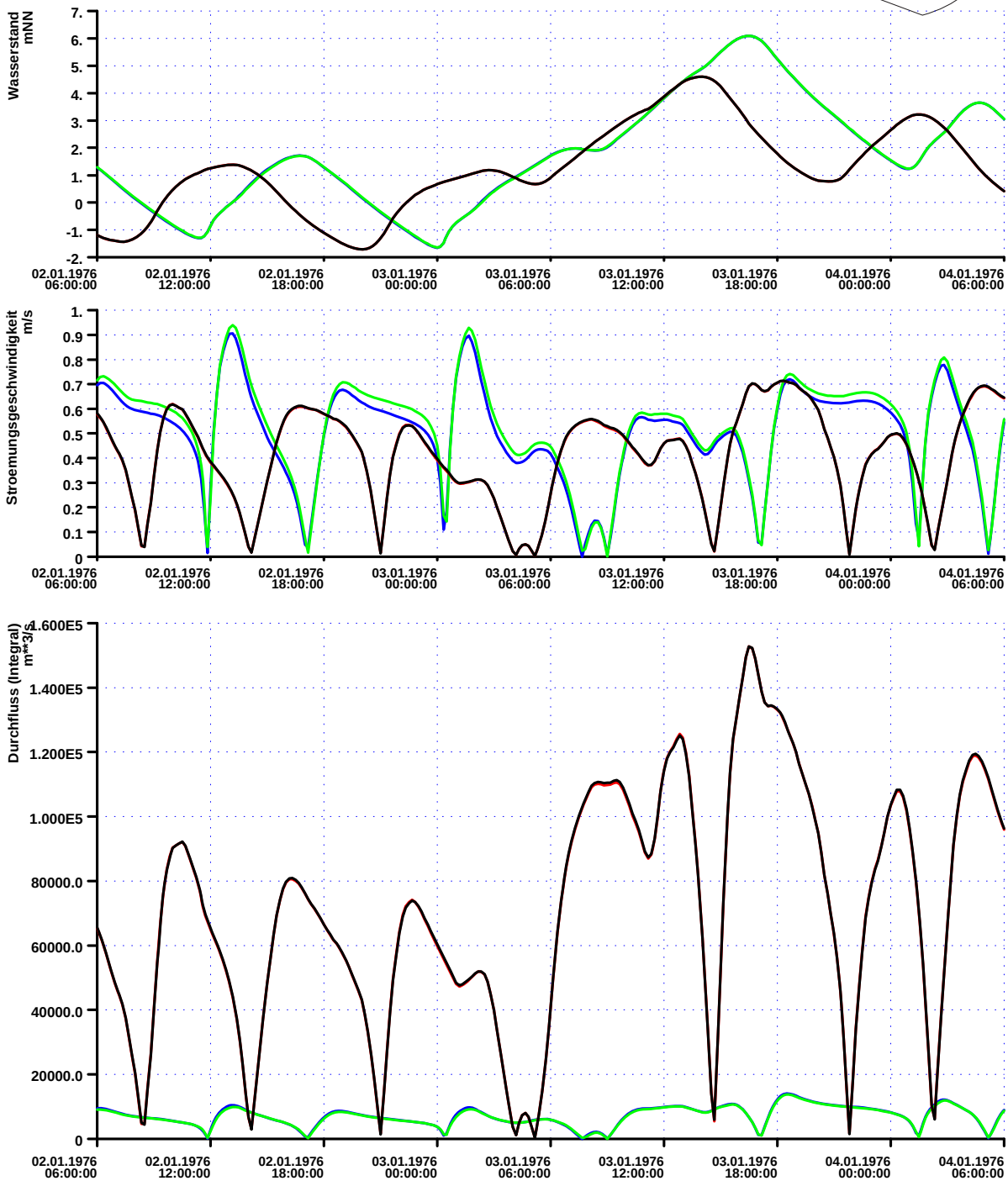

Bild C.2: *SF76: Zeitliche Entwicklung des querschnittsgemittelten Wasserstands (Oben), der Strömung (Mitte) und des querschnittsintegrierten Durchflusses (Unten) vom 2. 1. 1976 06:00 bis 4. 1. 1976 06:00 für Elbe – km 745 (Elbmündung, PIZ in Schwarz und AZ385S in Rot, teilweise überdeckt) und Elbe – km 640 (Schulau, PIZ in Grün und AZ385S in Blau). Während der Sturmfluttide am 3. 1. 1976 weichen der Verlauf von Wasserstand und Strömung deutlich vom Verlauf einer mittleren Tide (z.B. 2. 1. 1976) ab. Dies kann zu Schwierigkeiten bei der automatischen, programmgestützten Analyse der Hoch- und Niedrigwasser sowie der Kenterpunkte und somit der Berechnung von Flut- und Ebbestromdauer führen.*

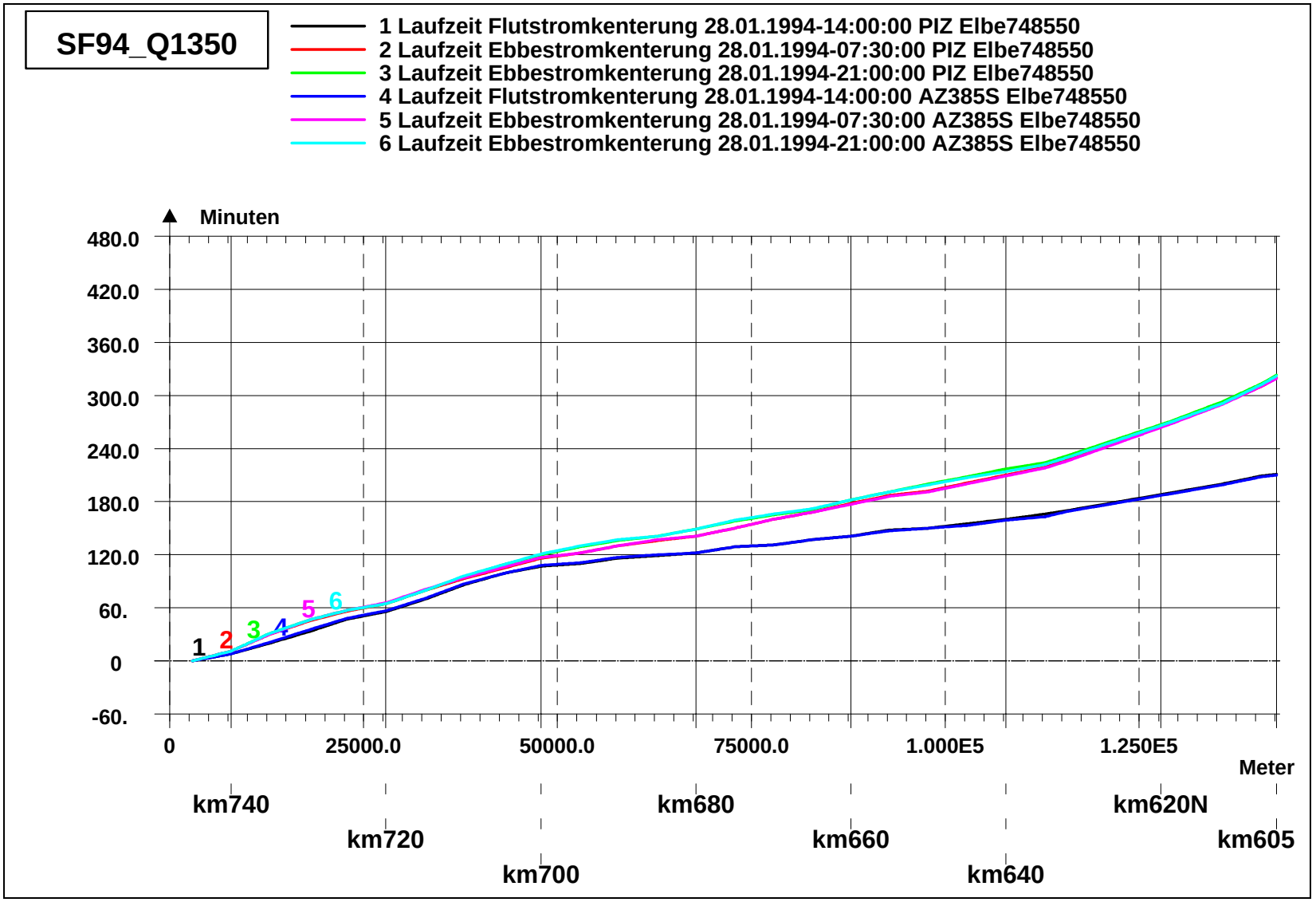

Bild C.3: *Laufzeit der Flut- und Ebbestromkenterung im Analysezeitraum SF94 entlang des Elbe–Ästuares zwischen der Elbmündung und Elbe–km 605 (Over) bezogen auf Elbe–km 745. Datengrundlage: Querschnittsgemittelte Zeitreihen des Wasserstandes und der Strömung im Abstand von 5 km.*

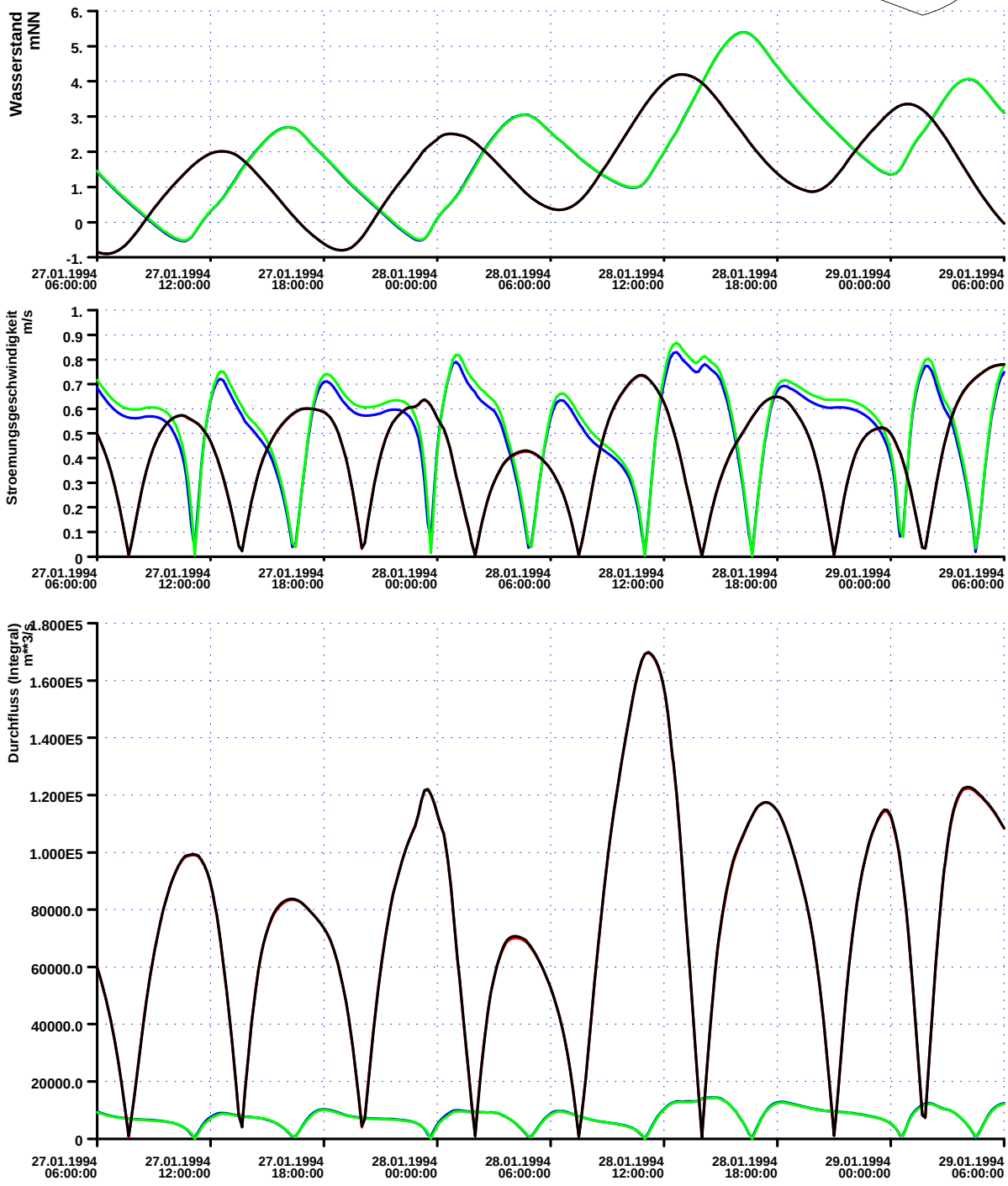

Bild C.4: *SF94: Zeitliche Entwicklung des querschnittsgemittelten Wasserstands (Oben), der Strömung (Mitte) und des querschnittsintegrierten Durchflusses (Unten) vom 27. 1. 1994 06:00 bis 29. 1. 1994 06:00 für Elbe – km 745 (Elbmündung, PIZ in Schwarz und AZ385S in Rot, teilweise überdeckt) und Elbe – km 640 (Schulau, PIZ in Grün und AZ385S in Blau). Während der Sturmfluttide am 28. 1. 1994 weicht der Verlauf der Strömung kaum vom Verlauf einer mittleren Tide (z.B. 27. 1. 1994) ab. Es treten keine Probleme bei der automatischen, programmgestützten Analyse der Kenterpunkte und somit der Berechnung von Flut- und Ebbestromdauer auf.*

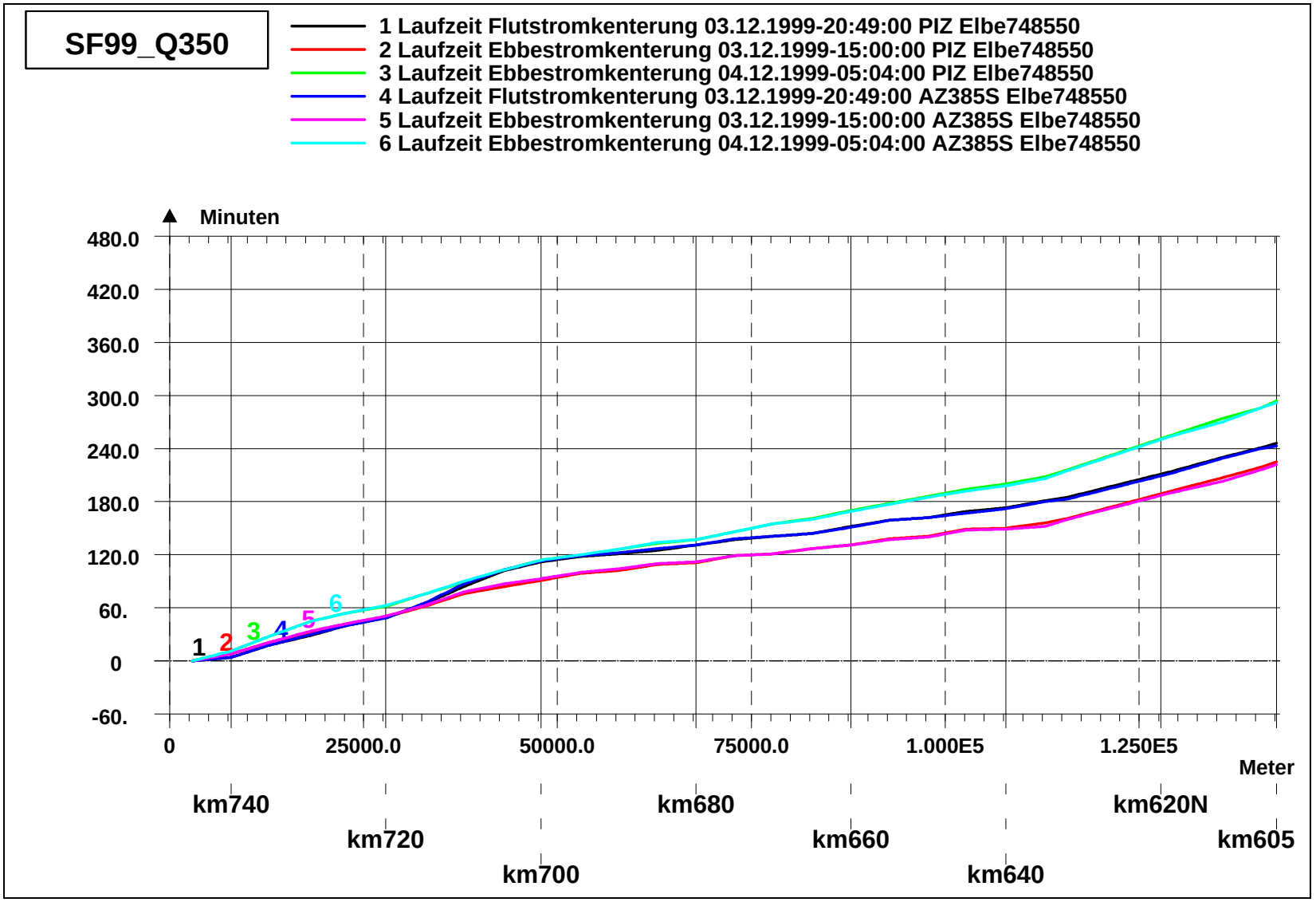

Bild C.5: *Laufzeit der Flut- und Ebbestromkenterung im Analysezeitraum SF99 entlang des Elbe–Ästuares zwischen der Elbmündung und Elbe–km 605 (Over) bezogen auf Elbe–km 745. Datengrundlage: Querschnittsgemittelte Zeitreihen des Wasserstandes und der Strömung im Abstand von 5 km.*

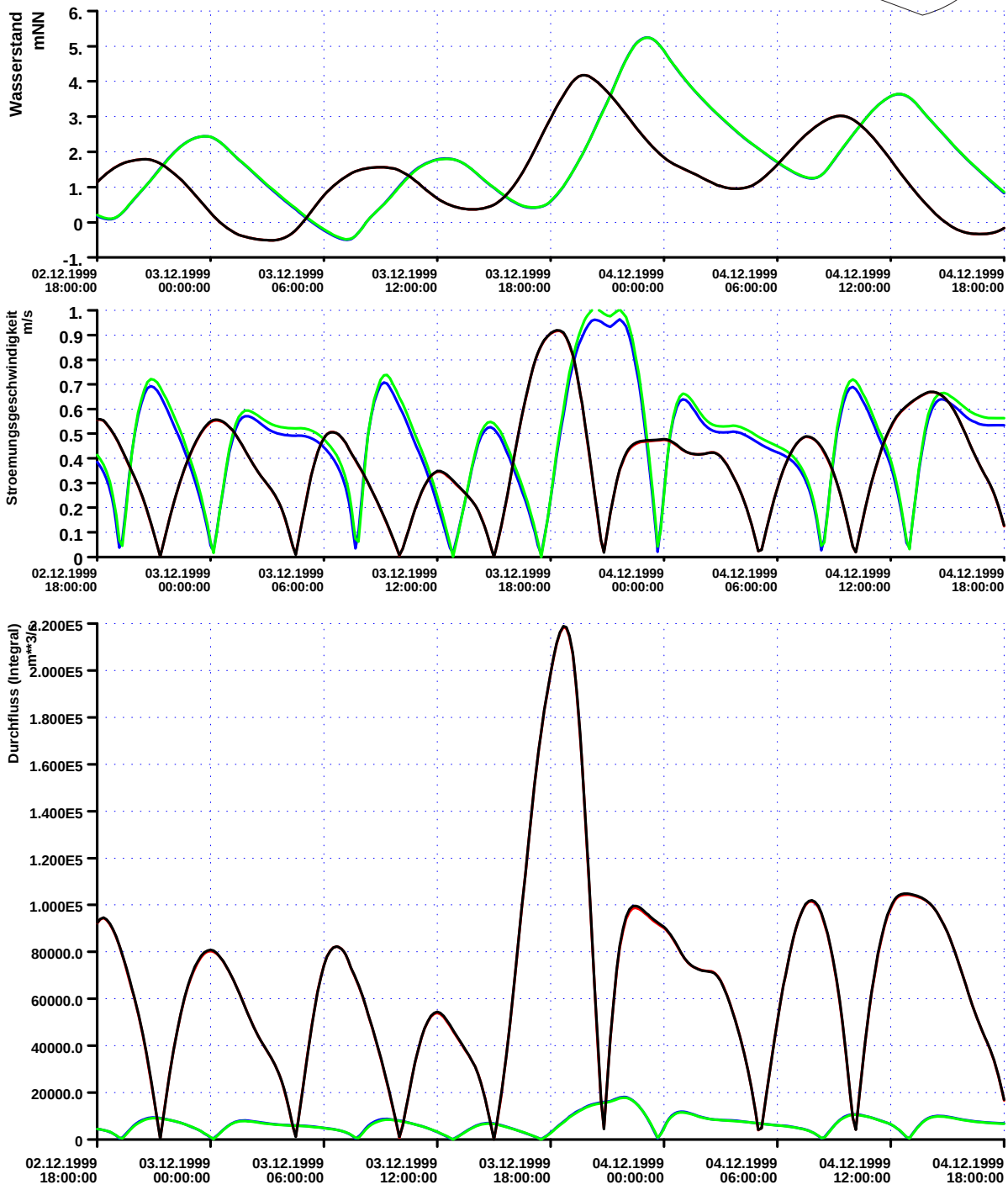

Bild C.6: *SF99: Zeitliche Entwicklung des querschnittsgemittelten Wasserstands (Oben), der Strömung (Mitte) und des querschnittsintegrierten Durchflusses (Unten) vom 2. 12. 1999 18:00 bis 4. 12. 1999 18:00 für Elbe – km 745 (Elbmündung, PIZ in Schwarz und AZ385S in Rot, teilweise überdeckt) und Elbe – km 640 (Schulau, PIZ in Grün und AZ385S in Blau). Während der Sturmfluttide am 3. 12. 1999 weicht der Verlauf der Strömung kaum vom Verlauf einer mittleren Tide (z.B. 2. 12. 1999) ab. Es treten keine Probleme bei der automatischen, programmgestützten Analyse der Kenterpunkte und somit der Berechnung von Flut- und Ebbestromdauer auf.*

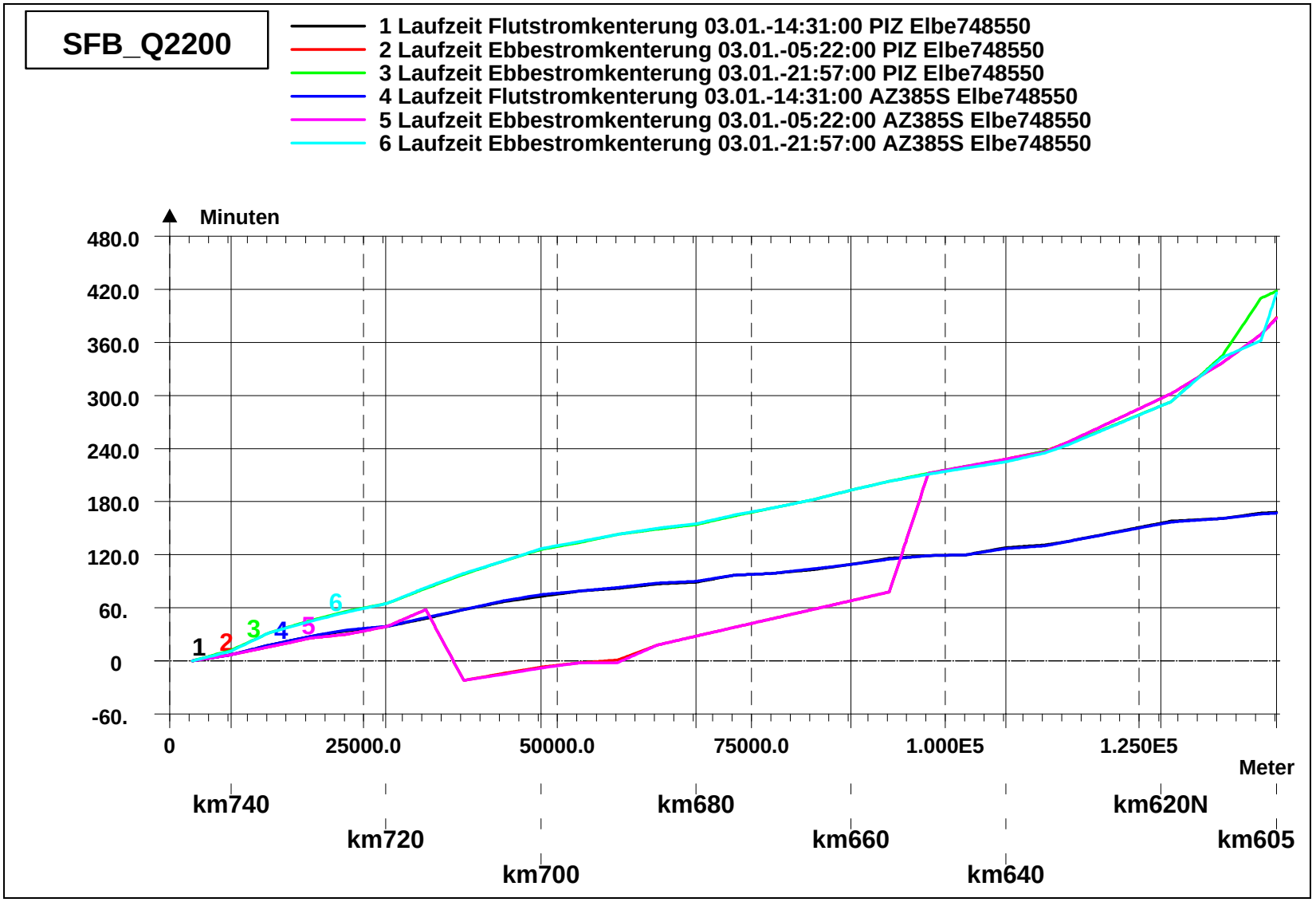

Bild C.7: *Laufzeit der Flut- und Ebbestromkenterung im Analysezeitraum SFB entlang des Elbe–Ästuares zwischen der Elbmündung und Elbe–km 605 (Over) bezogen auf Elbe–km 745. Datengrundlage: Querschnittsgemittelten Zeitreihen des Wasserstandes und der Strömung im Abstand von 5 km.*

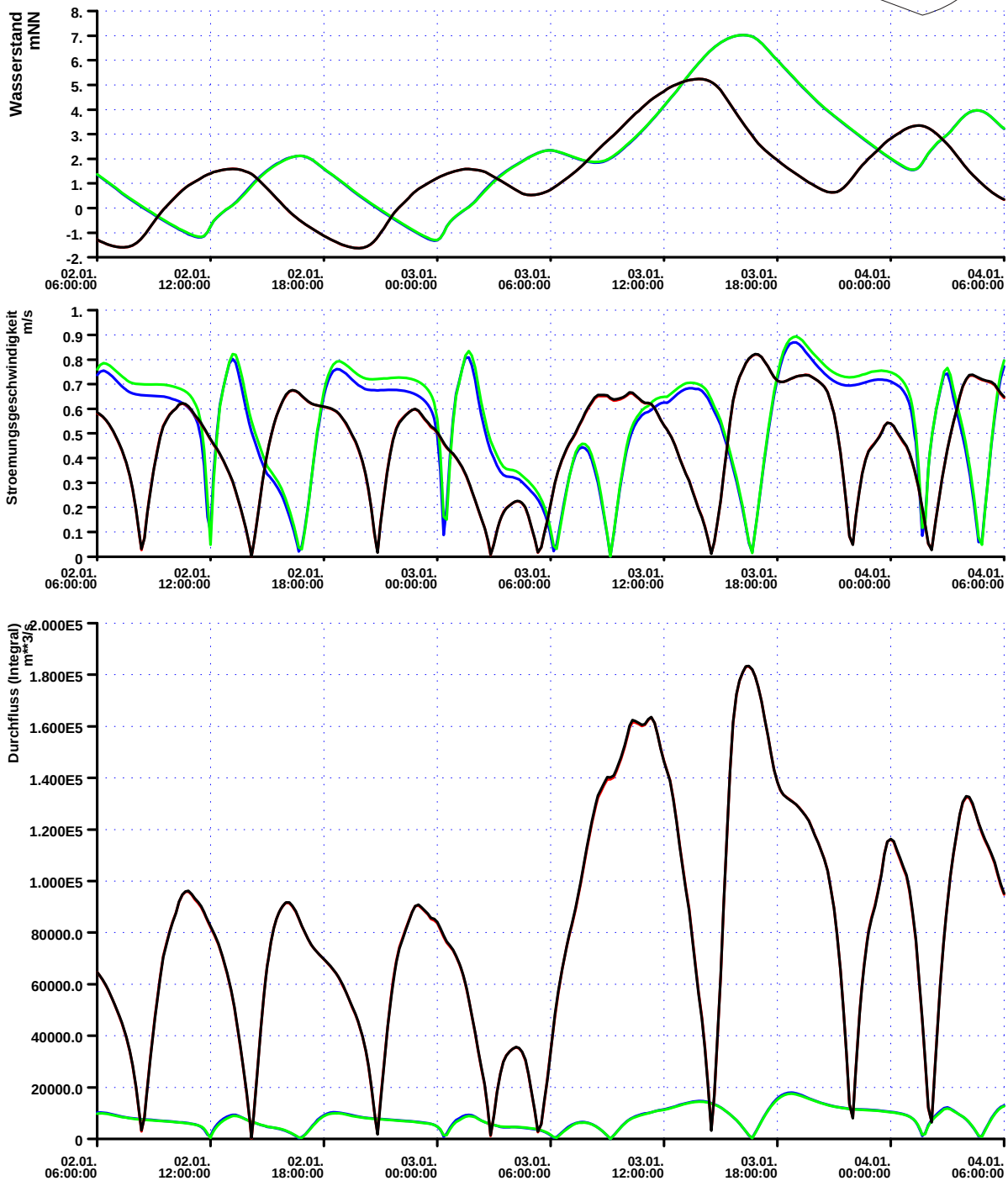

Bild C.8: *SFB: Zeitliche Entwicklung des querschnittsgemittelten Wasserstands (Oben), der Strömung (Mitte) und des querschnittsintegrierten Durchflusses (Unten) vom 2. 1. 06:00 bis 4. 1. 06:00 für Elbe – km 745 (Elbmündung, PIZ in Schwarz und AZ385S in Rot, teilweise überdeckt) und Elbe – km 640 (Schulau, PIZ in Grün und AZ385S in Blau). Während der Bemessungssturmflut weichen der Verlauf von Wasserstand und Strömung deutlich vom Verlauf einer mittleren Tide (z.B. 2. 1.) ab. Dies kann zu Schwierigkeiten bei der automatischen, programmgestützten Analyse der Hoch- und Niedrigwasser sowie der Kenterpunkte und somit der Berechnung von Flut- und Ebbestromdauer führen.*

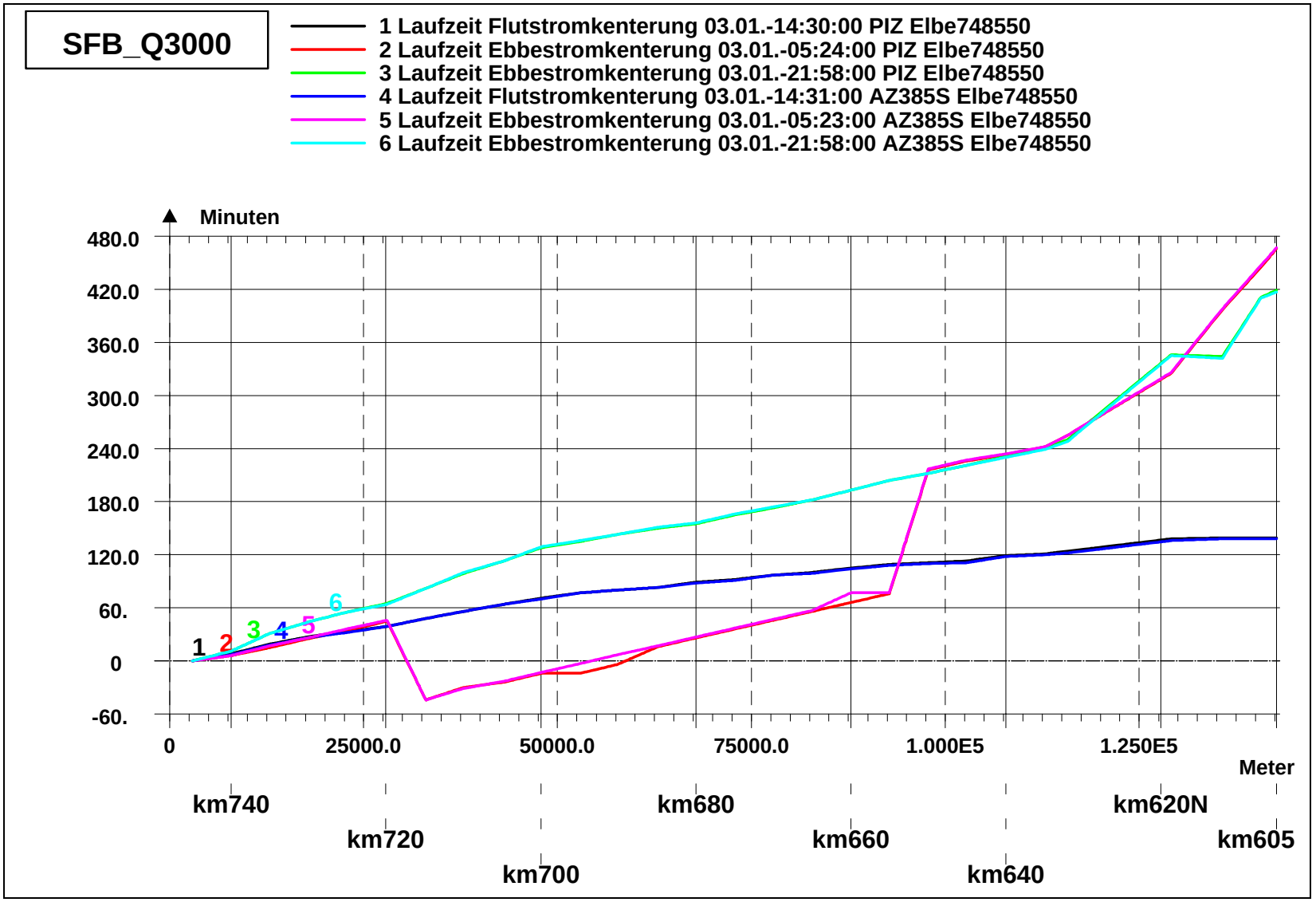

Bild C.9: *Laufzeit der Flut- und Ebbestromkenterung im Analysezeitraum SFB_Q3000 entlang des Elbe – Ästuares zwischen der Elbmündung und Elbe – km 605 (Over) bezogen auf Elbe – km 745. Datengrundlage: Querschnittsgemittelte Zeitreihen des Wasserstandes und der Strömung im Abstand von 5 km.*

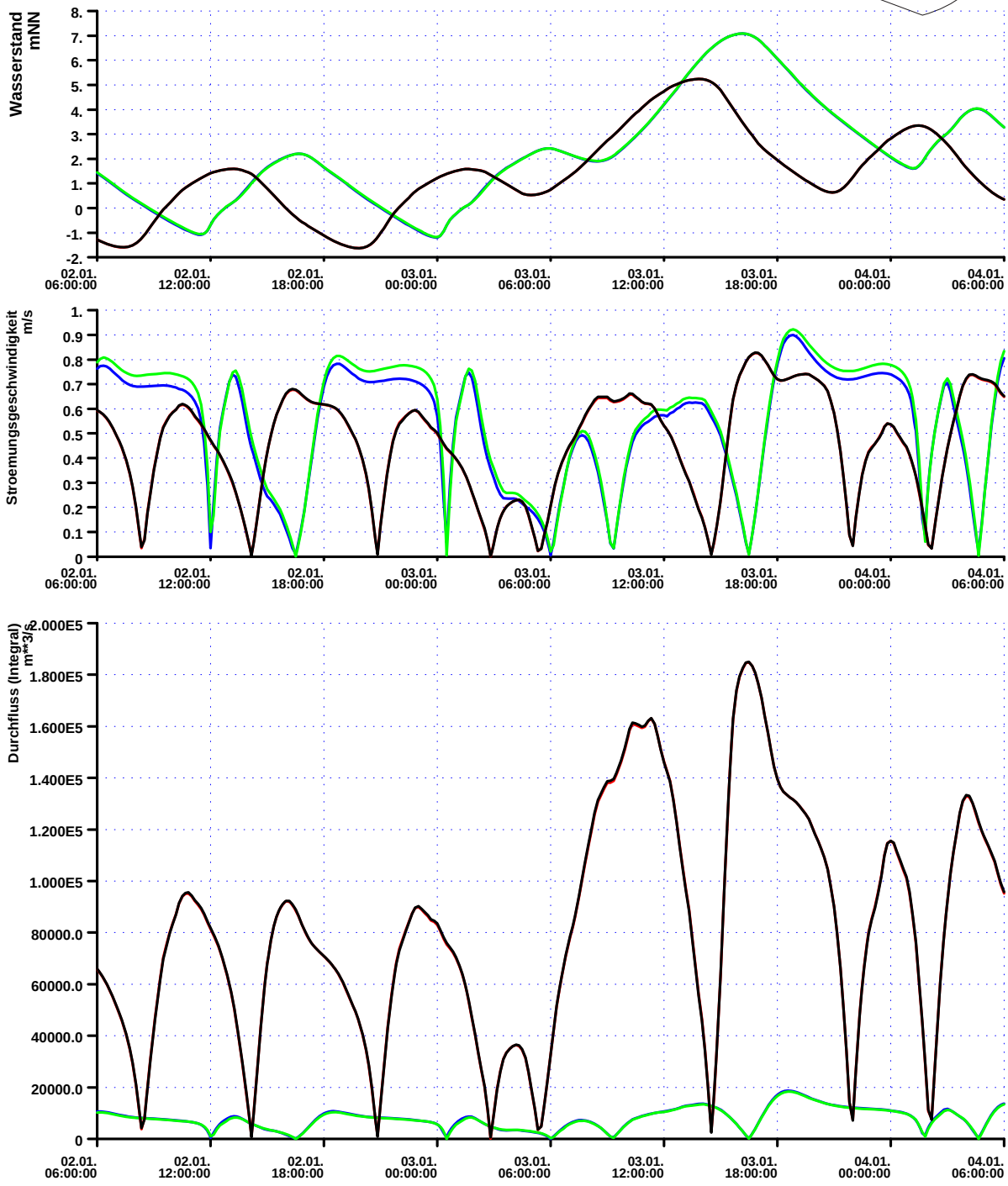

Bild C.10: *SFB_Q3000: Zeitliche Entwicklung des querschnittsgemittelten Wasserstands (Oben), der Strömung (Mitte) und des querschnittsintegrierten Durchflusses (Unten) vom 2.1. 06:00 bis 4.1. 06:00 für Elbe – km 745 (Elbmündung, PIZ in Schwarz und AZ385S in Rot, teilweise überdeckt) und Elbe – km 640 (Schulau, PIZ in Grün und AZ385S in Blau). Während der Bemessungssturmflut mit extrem hohem Oberwasserzufluss weichen der Verlauf von Wasserstand und Strömung deutlich vom Verlauf einer mittleren Tide (z.B. 2.1.) ab. Dies kann zu Schwierigkeiten bei der automatischen, programmgestützten Analyse der Hoch- und Niedrigwasser sowie der Kenterpunkte und somit der Berechnung von Flut- und Ebbestromdauer führen.*

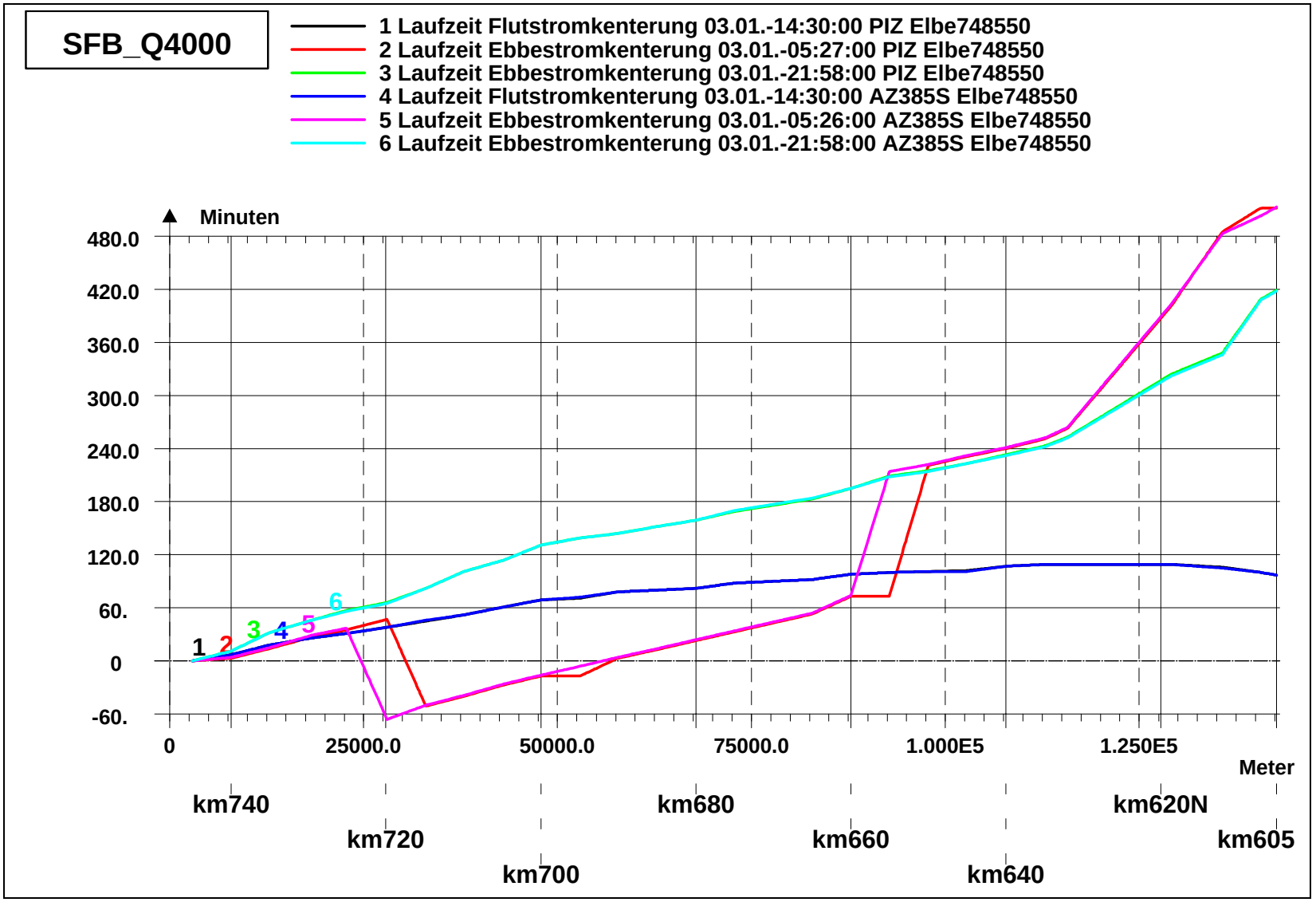

Bild C.11: *Laufzeit der Flut- und Ebbestromkenterung im Analysezeitraum SFB_Q4000 entlang des Elbe – Ästuares zwischen der Elbmündung und Elbe – km 605 (Over) bezogen auf Elbe – km 745. Datengrundlage: Querschnittsgemittelte Zeitreihen des Wasserstandes und der Strömung im Abstand von 5 km.*

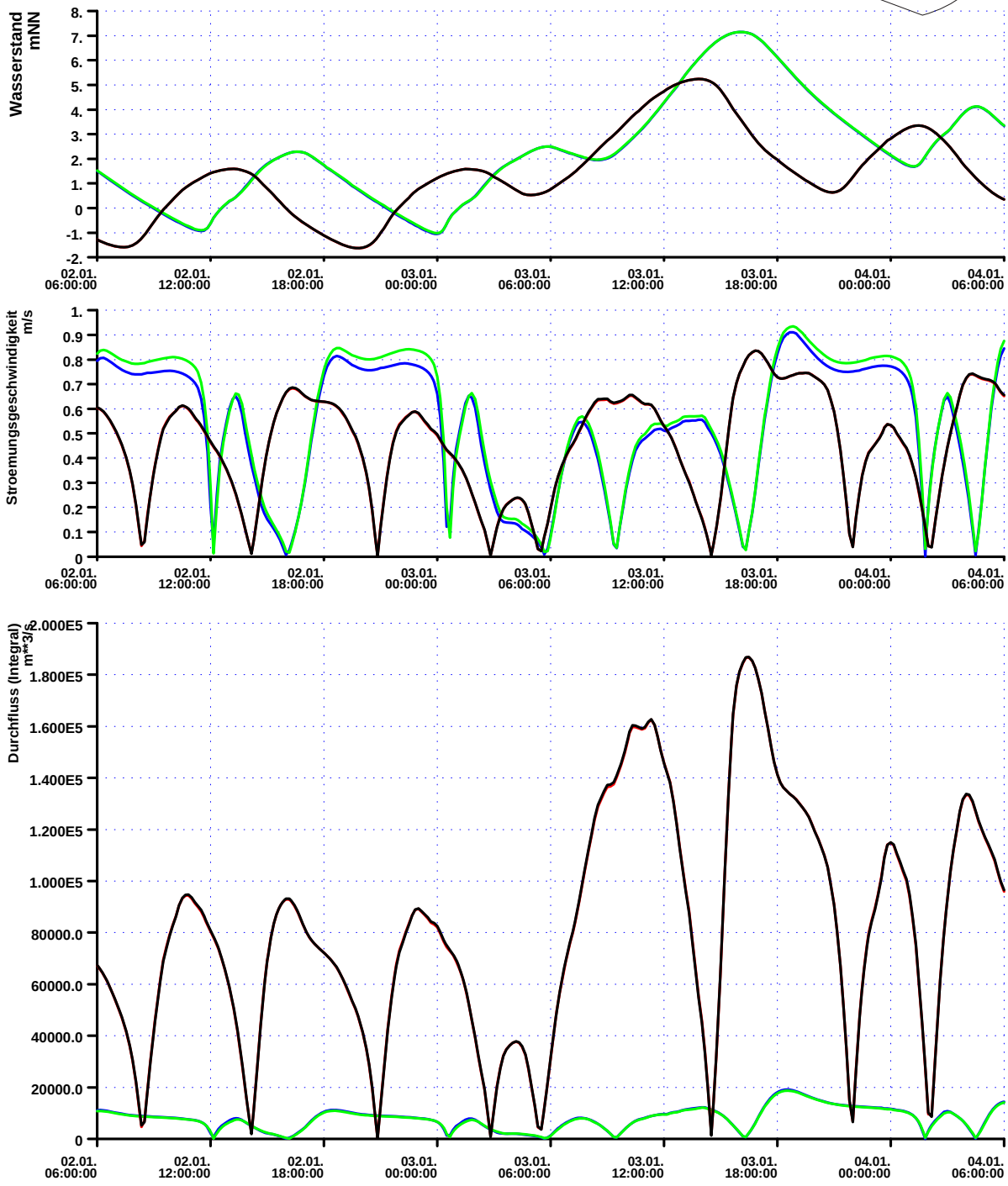

Bild C.12: *SFB_Q4000: Zeitliche Entwicklung des querschnittsgemittelten Wasserstands (Oben), der Strömung (Mitte) und des querschnittsintegrierten Durchflusses (Unten) vom 2.1. 06:00 bis 4.1. 06:00 für Elbe – km 745 (Elbmündung, PIZ in Schwarz und AZ385S in Rot, teilweise überdeckt) und Elbe – km 640 (Schulau, PIZ in Grün und AZ385S in Blau). Während der Bemessungssturmflut mit extrem hohem Oberwasserzufluss weichen der Verlauf von Wasserstand und Strömung deutlich vom Verlauf einer mittleren Tide (z.B. 2.1.) ab. Dies kann zu Schwierigkeiten bei der automatischen, programmgestützten Analyse der Hoch- und Niedrigwasser sowie der Kenterpunkte und somit der Berechnung von Flut- und Ebbestromdauer führen.*

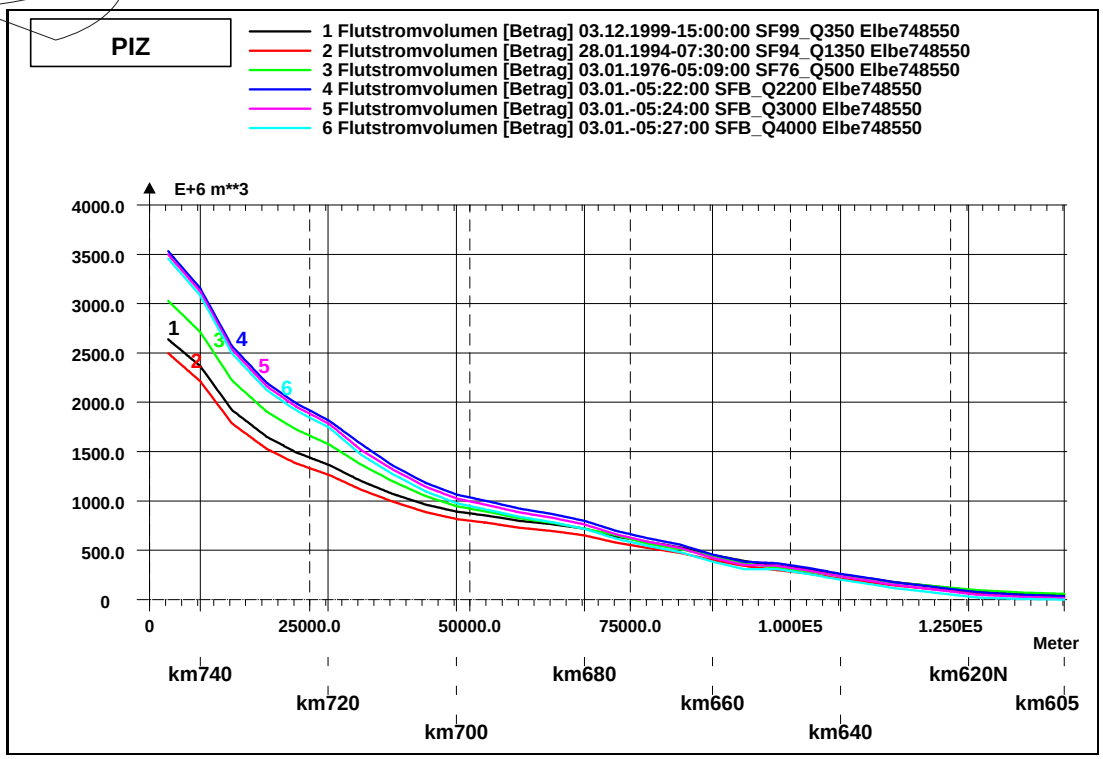

Bild C.13: *Querschnittsintegriertes Flutstromvolumen für SF99, SF94, SF76, SFB sowie SFB_Q3000 und SFB_Q4000 im planerischen Ist – Zustand PIZ entlang des Elbefahrwassers von Elbe – km 745 bis Elbe – km 605 (Abkürzungen siehe Tabelle 3 auf Seite 34).*

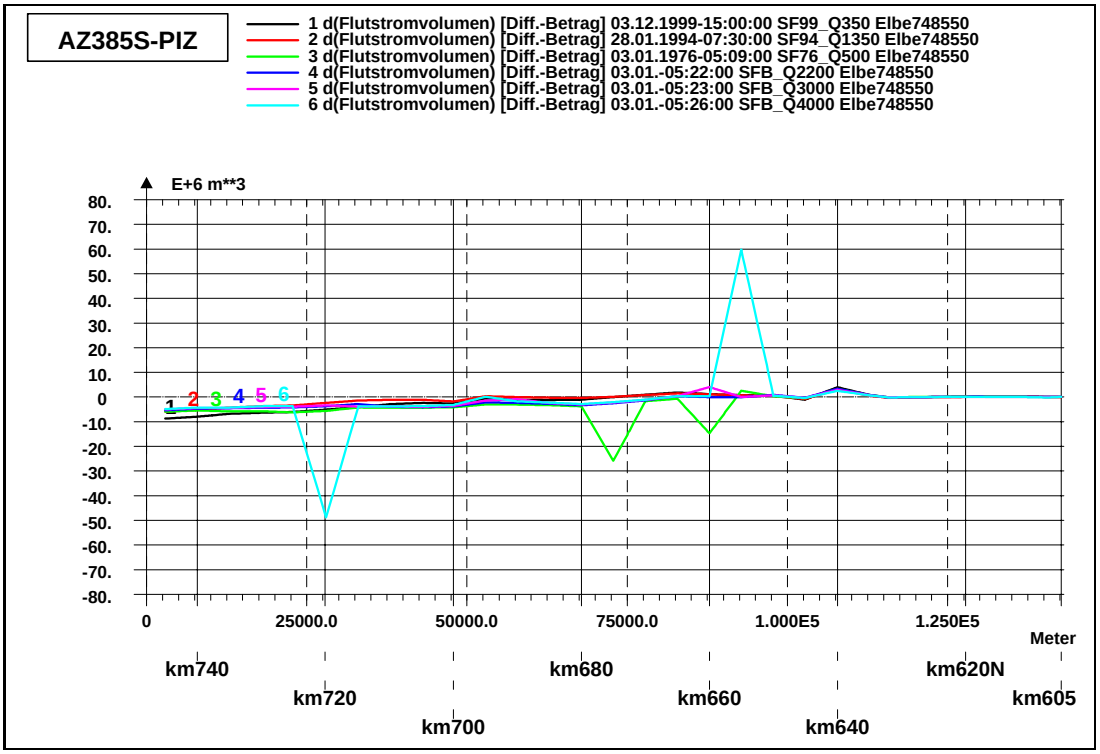

Bild C.14: *Änderung des querschnittsintegrierten Flutstromvolumens (AZ385S – PIZ) für die Sturmflut SF99, SF94, SF76, SFB sowie SFB_Q3000 und SFB_Q4000 entlang des Elbefahrwassers von Elbe – km 745 bis Elbe – km 605 mit veränderter Skalierung (Abkürzungen siehe Tabelle 3).*

D Topographie des HN - Modells des Elbeästuares: Teilgebiet West

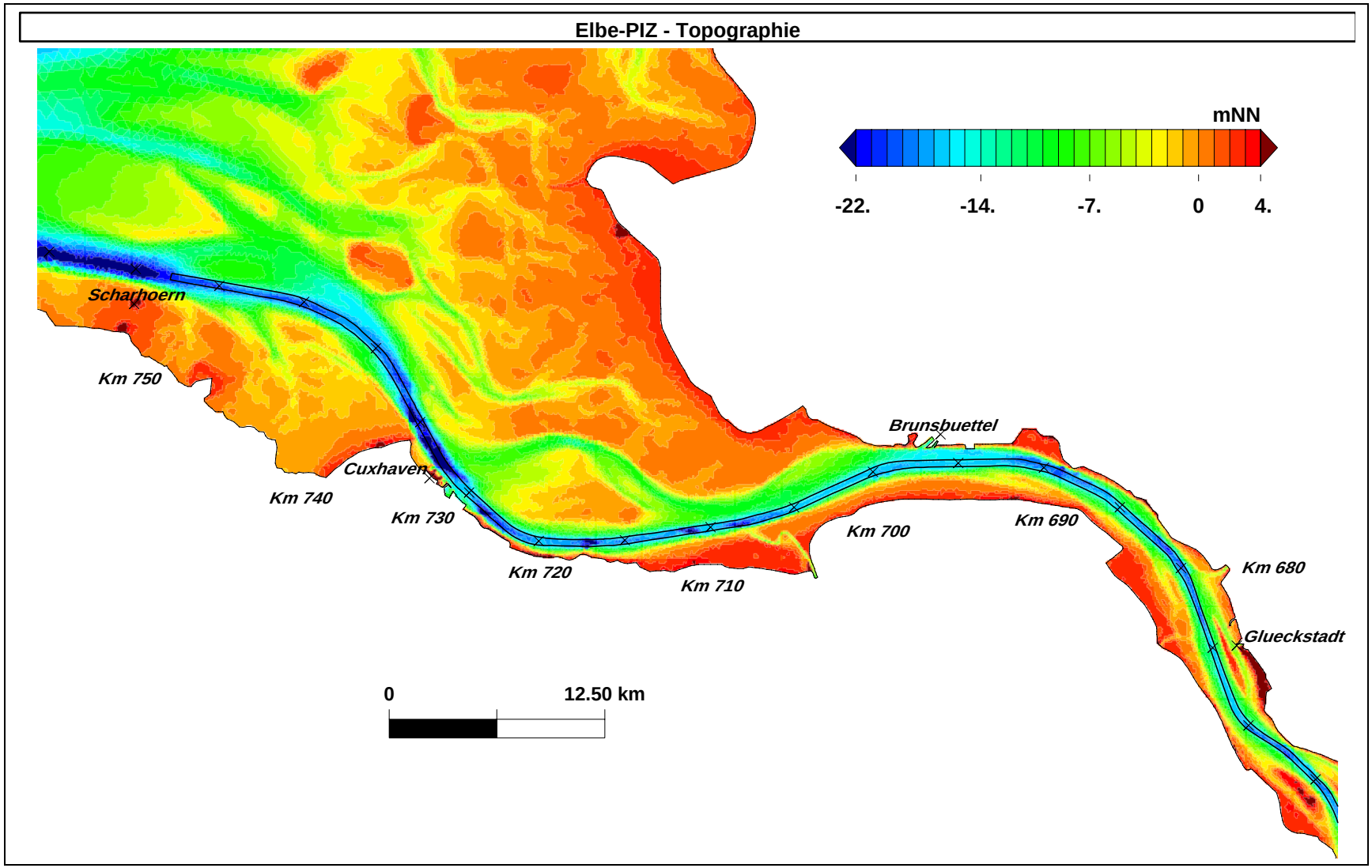

Bild D.1: *Topographie des HN – Modells des Elbeästuares für den planerischen Ist – Zustand (PIZ) im Teilgebiet West. Die Klassenbereite einer Farbstufe entspricht einem Tiefenunterschied von 1 m*

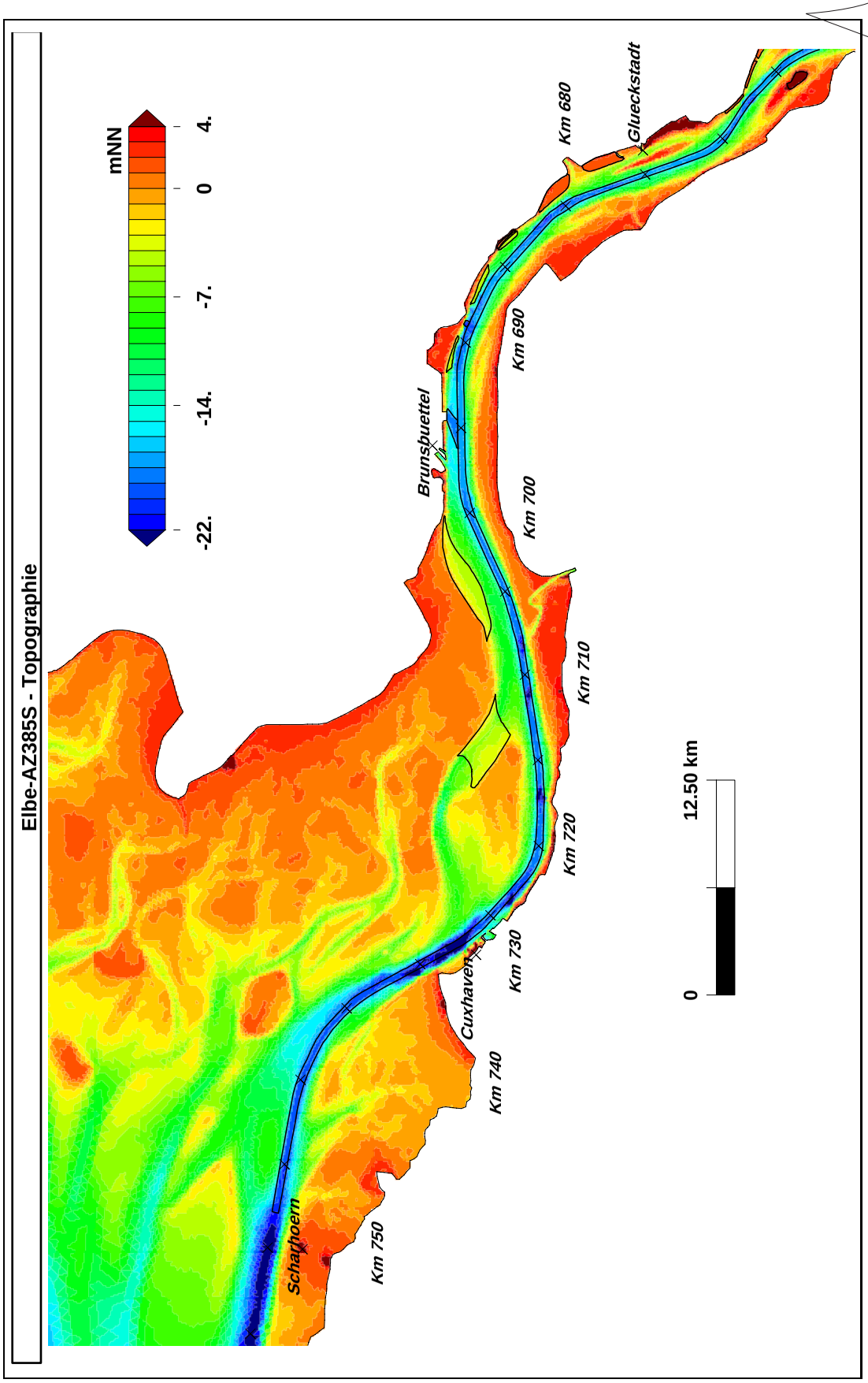

Bild D.2: *Topographie des HN – Modells des Elbeästuares für den Ausbauzustand (AZ385S) im Teilgebiet West. Die Klassenbereite einer Farbstufe entspricht einem Tiefenunterschied von 1 m*

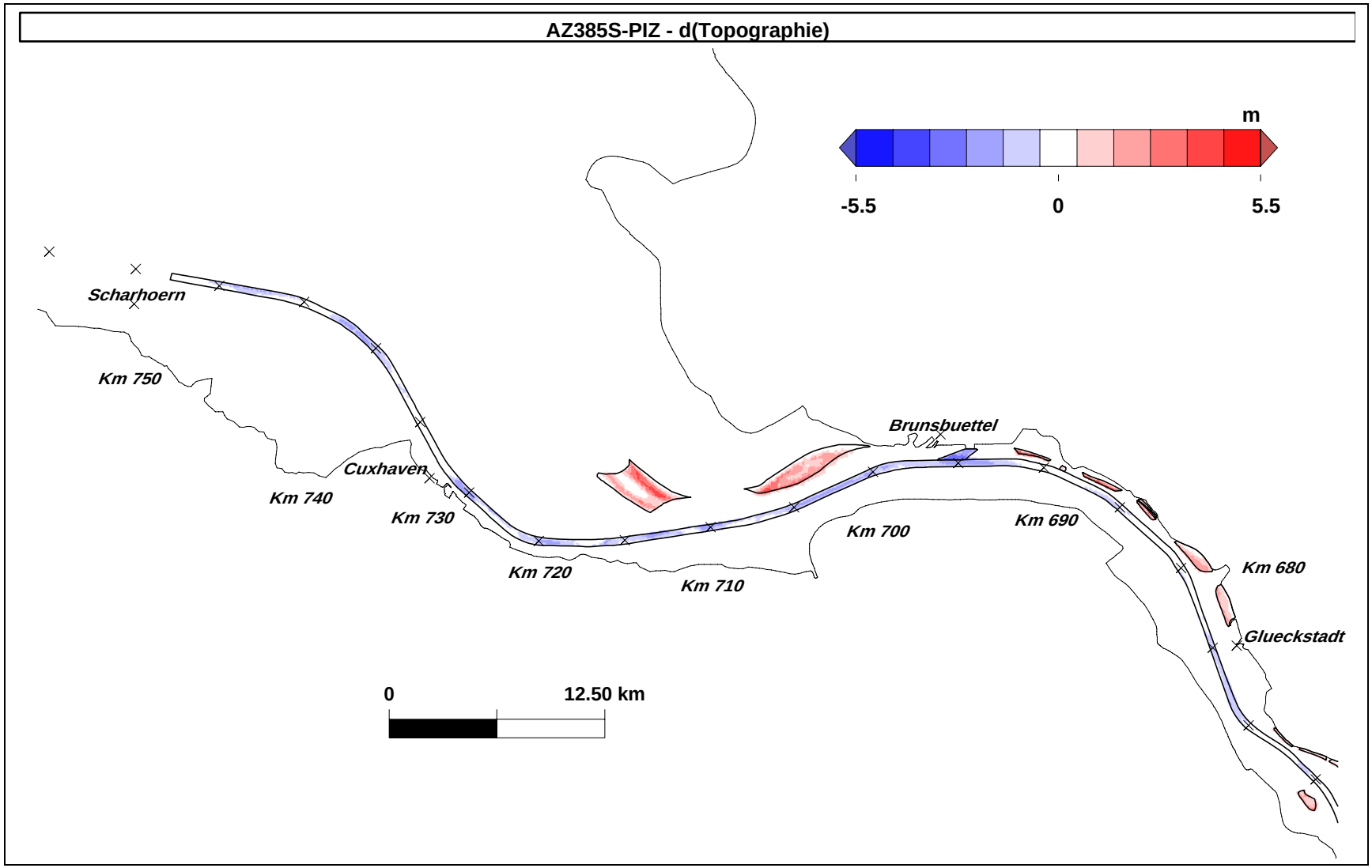

Bild D.3: *Änderung der Topographie des HN – Modells des Elbeästuares (AZ385S – PIZ) im Teilgebiet West. Eine Farbstufe entspricht einer ausbaubedingten Tiefenänderung von 1 m. In den weiß dargestellten Gebieten ändert sich die Topographie um weniger als ± 50 cm.*

E Sturmflut SF76: Elbe Teilgebiet West

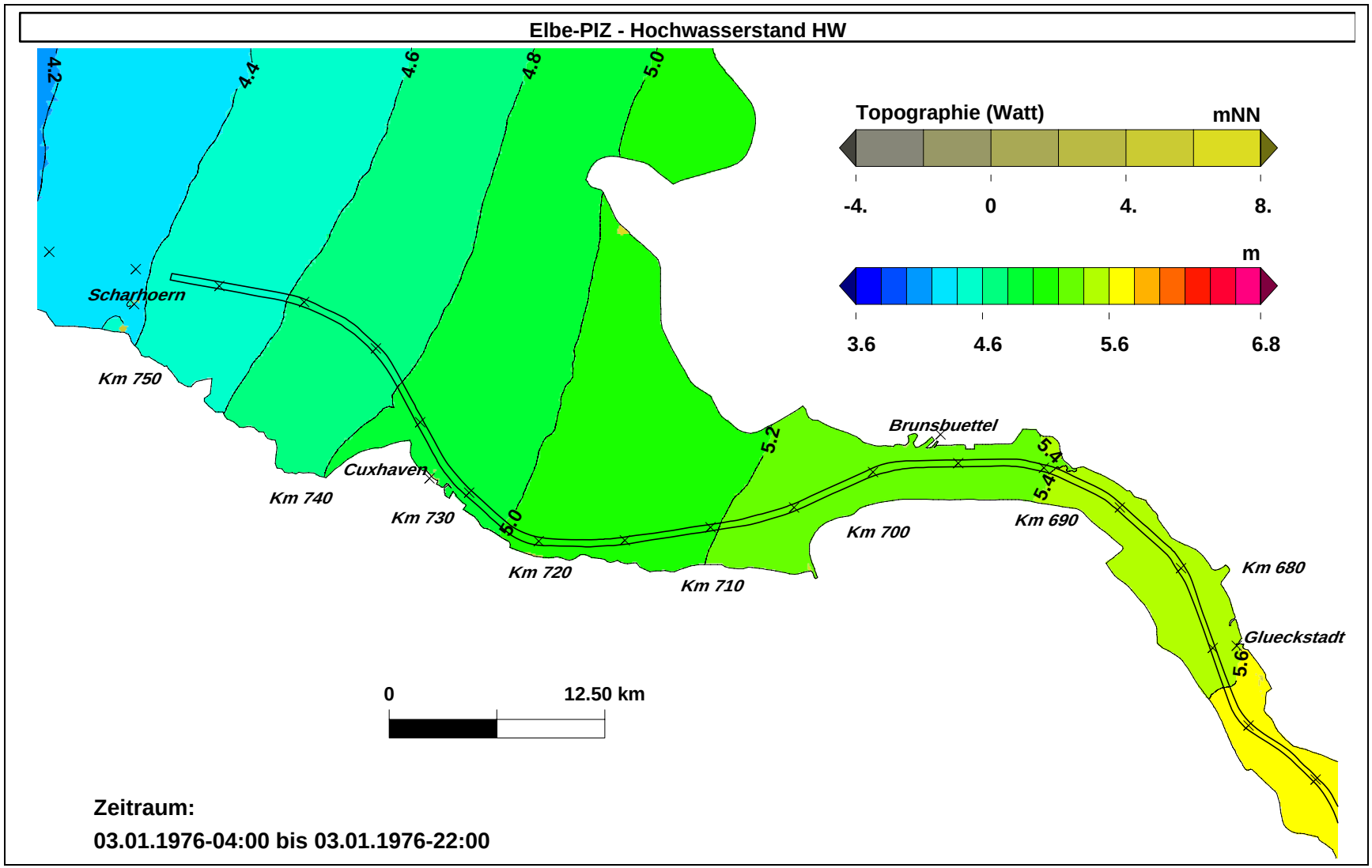

Bild E.1: *Sturmflutscheitelwasserstand HW für die Sturmflut SF76 im Teilgebiet West für den planerischen Ist – Zustand* PIZ. *Eine Farbstufe entspricht einem Unterschied im HW von 20 cm.*

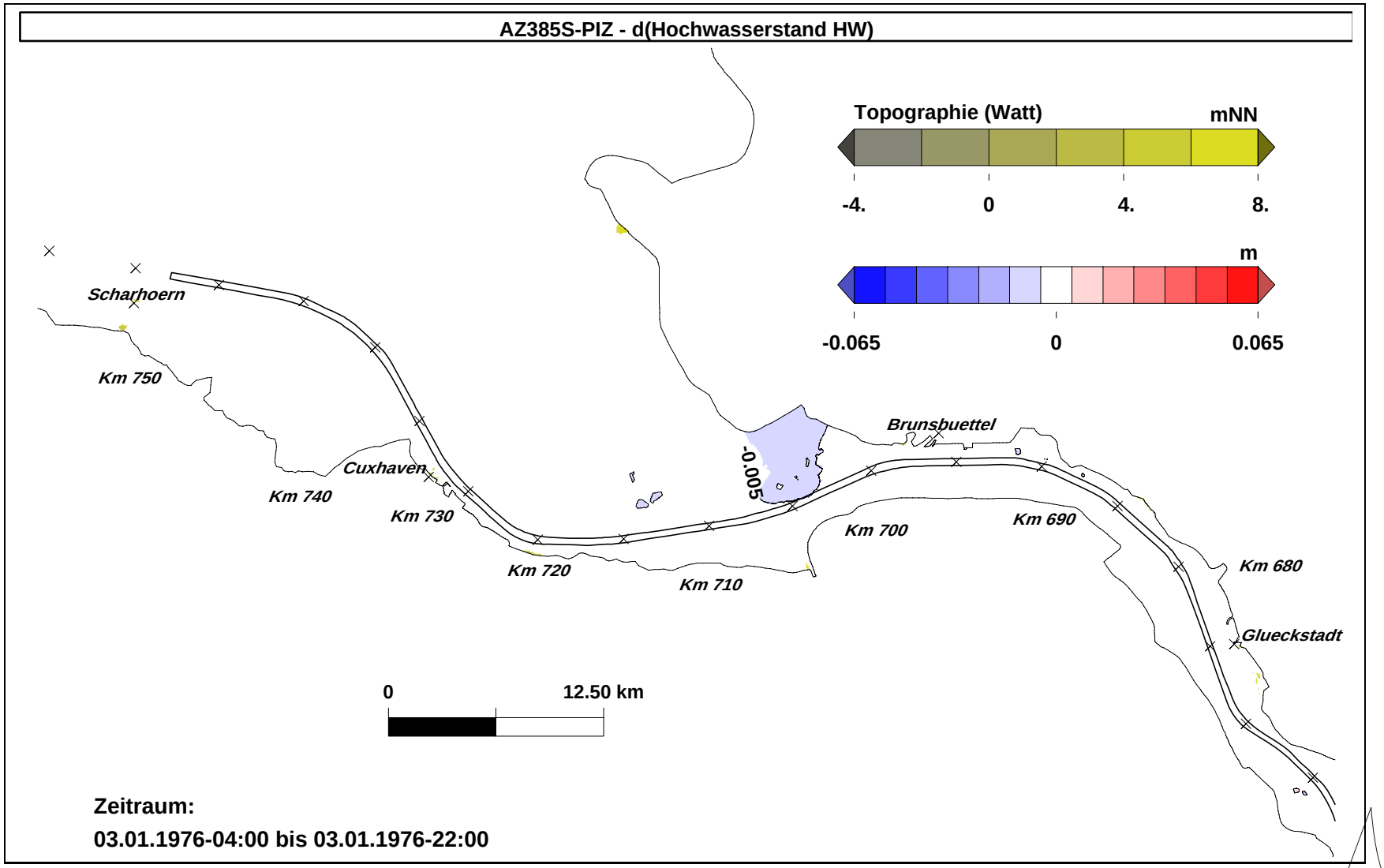

Bild E.2: *Änderung des Sturmflutscheitelwasserstand HW für die Sturmflut SF76 im Teilgebiet West (AZ385S – PIZ). Eine Farbstufe entspricht einem Unterschied im HW von 1 cm. In den weiß dargestellten Gebieten ändert sich das HW ausbaubedingt um weniger als ± 0,5 cm.*

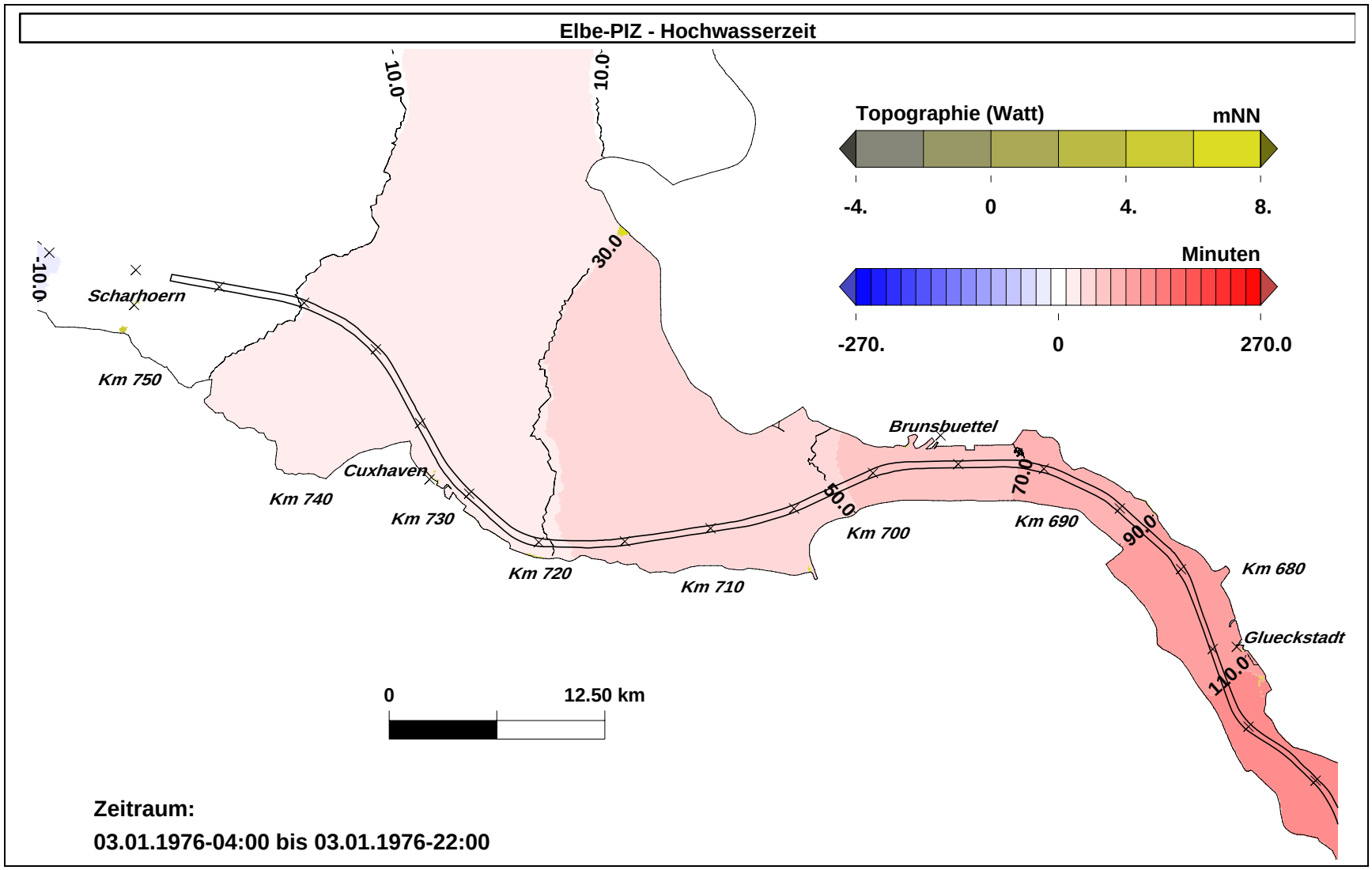

Bild E.3: *Eintrittszeit Sturmflutscheitelwasserstand tHW für die Sturmflut SF76 im Teilgebiet West für den planerischen Ist – Zustand* PIZ. *Eine Farbstufe entspricht einem Eintrittszeitunterschied von 20 Minuten bezogen auf Elbe – km 748 in der Elbmündung. In den weiß dargestellten Gebieten tritt der Sturmflutscheitel ± 10 Minuten vor/nach Elbe – km 748 ein.*

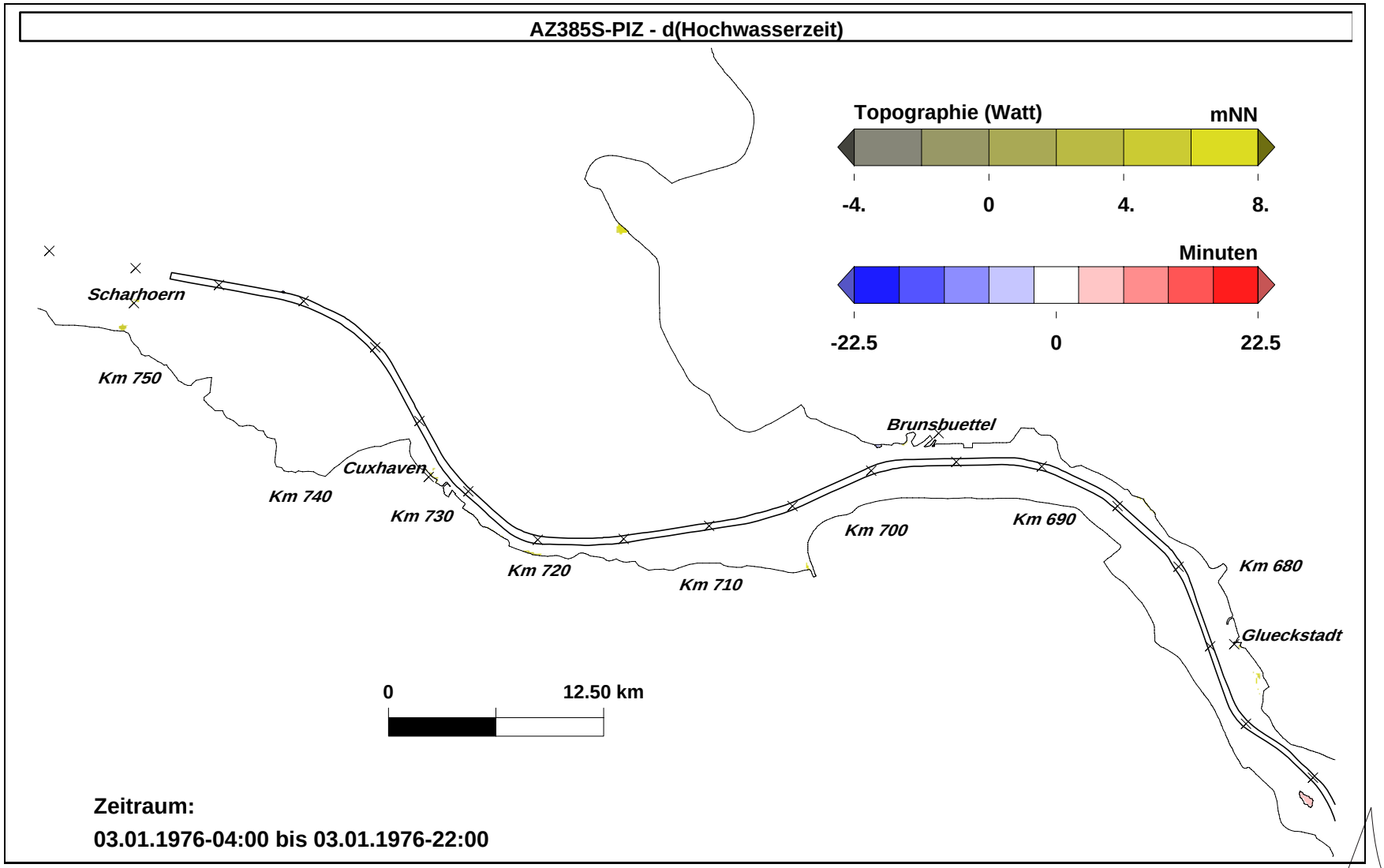

Bild E.4: *Änderung der Eintrittszeit des Sturmflutscheitelwasserstand tHW für die Sturmflut SF76 im Teilgebiet West (AZ385S – PIZ). Eine Farbstufe entspricht einer ausbaubedingten Änderung der Eintrittszeit von 5 Minuten. In den weiß dargestellten Gebieten sind die Änderungen kleiner als ± 2,5 Minuten.*

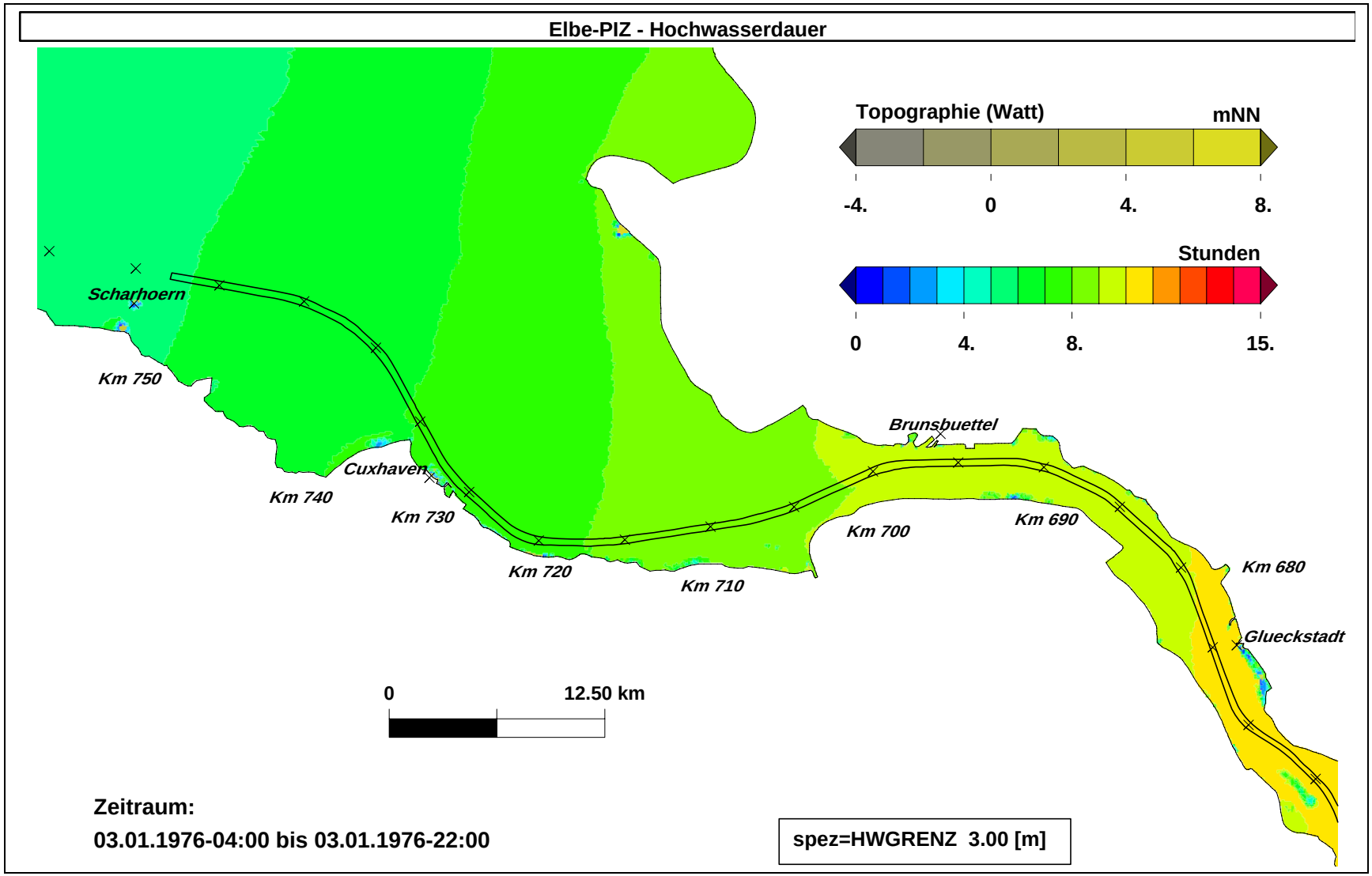

Bild E.5: *Dauer hoher Wasserstände > NN + 3,00 m während der Sturmflut SF76 im Teilgebiet West für den planerischen Ist – Zustand* PIZ. *Eine Farbstufe entspricht einer Dauer der Wasserstandshöhe von 1 Stunde.*

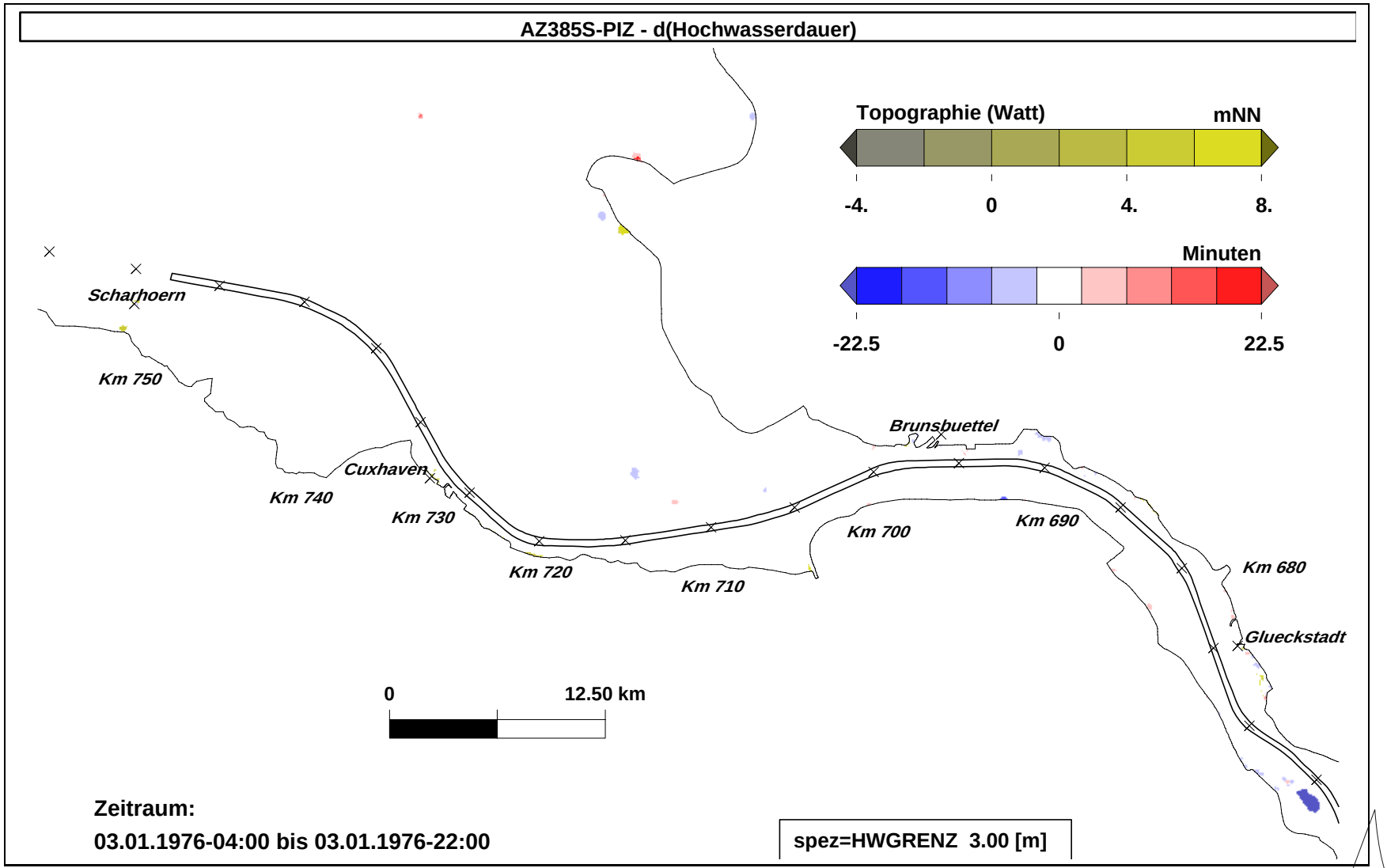

Bild E.6: *Änderung der Dauer hoher Wasserstände > NN + 3,00 m während der Sturmflut SF76 im Teilgebiet West (AZ385S – PIZ). Eine Farbstufe entspricht ausbaubedingten Änderungen der Dauer von 5 Minuten. In den weiß dargestellten Gebieten sind die Änderungen kleiner als ± 2,5 Minuten.*

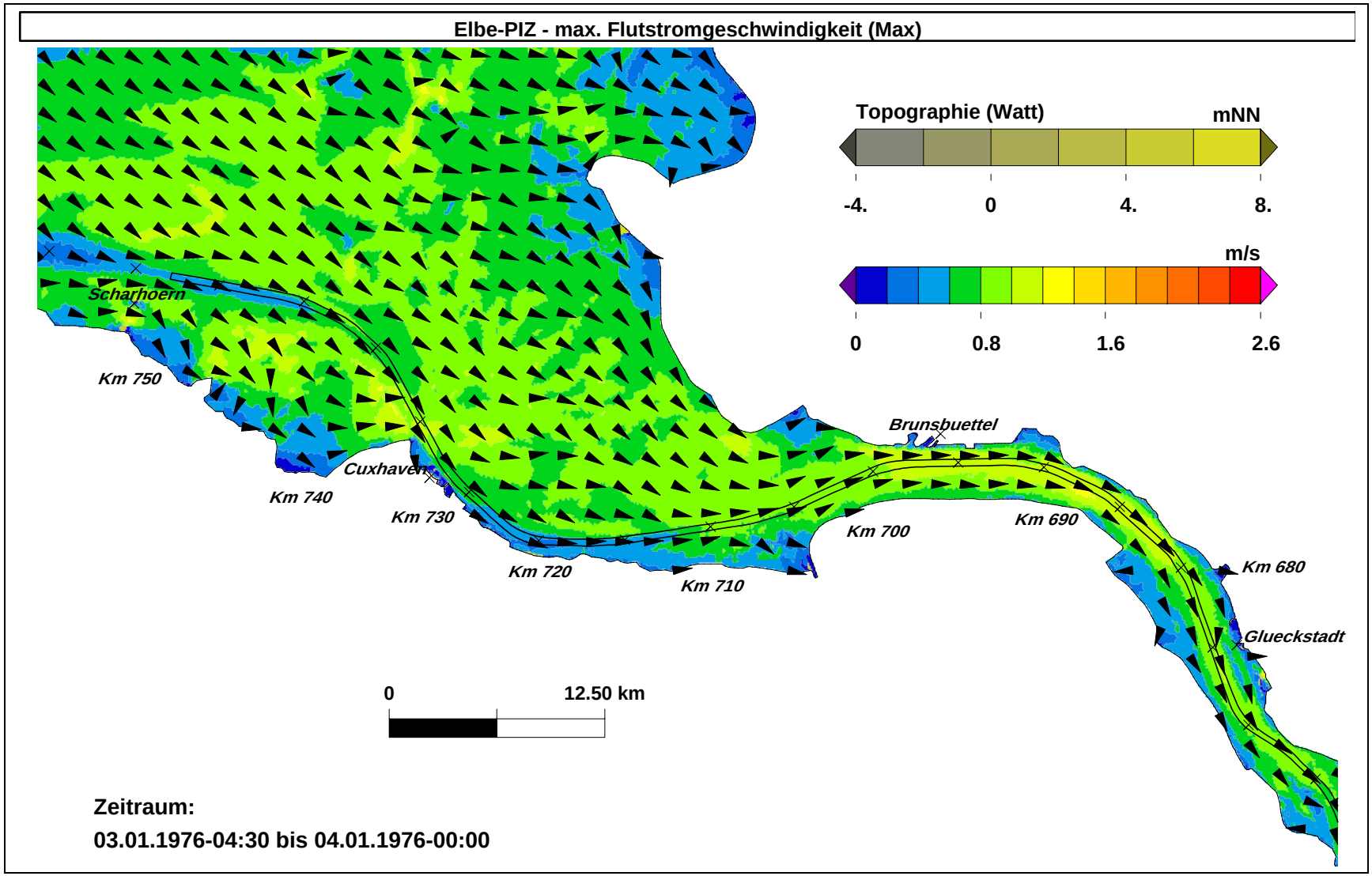

Bild E.7: *Maximale Flutstromgeschwindigkeit während der Sturmflut SF76 im Teilgebiet West für den planerischen Ist – Zustand* PIZ. *Eine Farbstufe entspricht einer Geschwindigkeit von 0,2 m/s.*

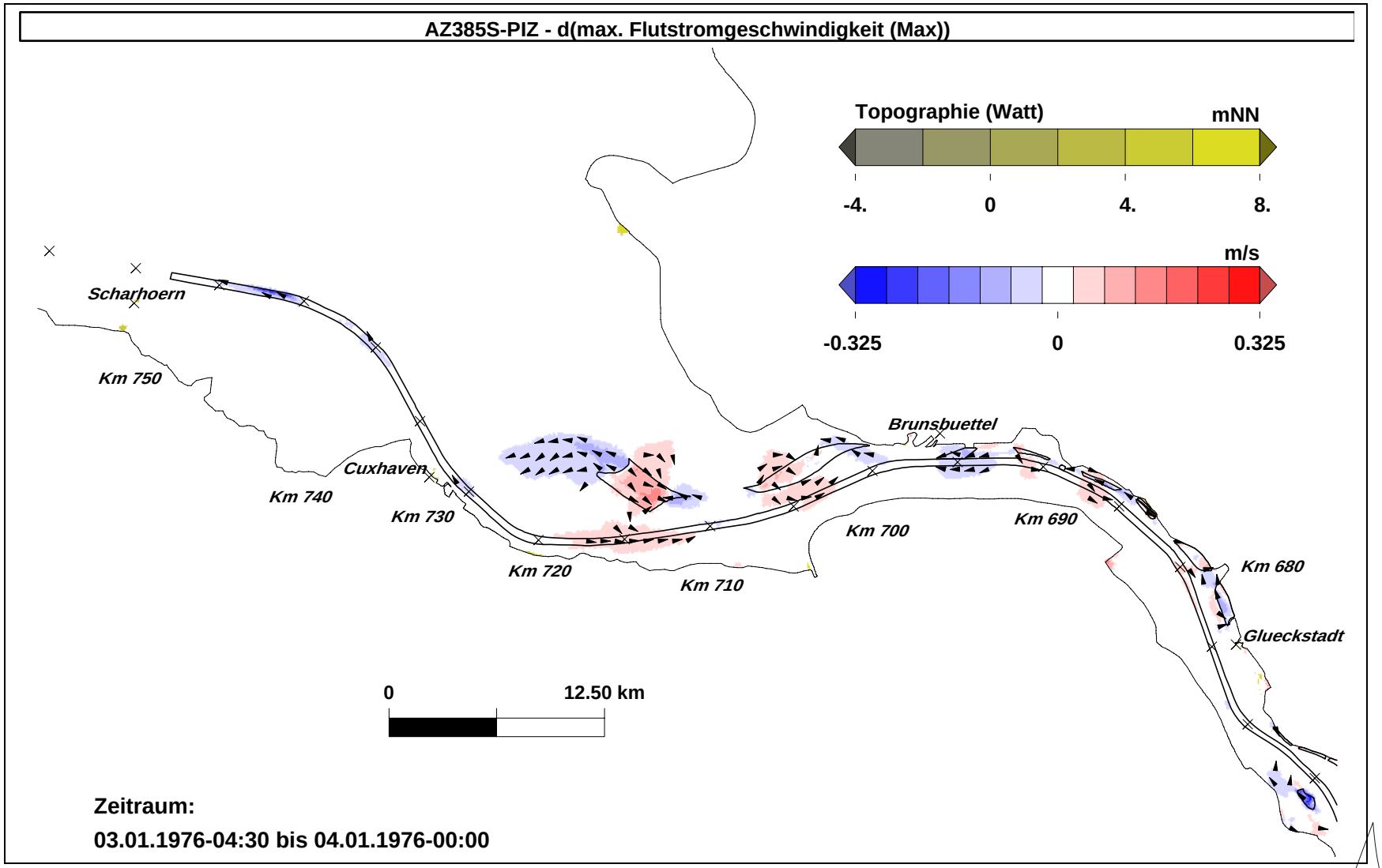

Bild E.8: *Änderung der maximalen Flutstromgeschwindigkeit während der Sturmflut SF76 im Teilgebiet West (AZ385S – PIZ). Eine Farbstufe entspricht ausbaubedingten Änderungen der maximalen Flutstromgeschwindigkeit von 0,05 m/s. In den weiß dargestellten Gebieten sind die Änderungen kleiner als ± 0,025 m/s.*

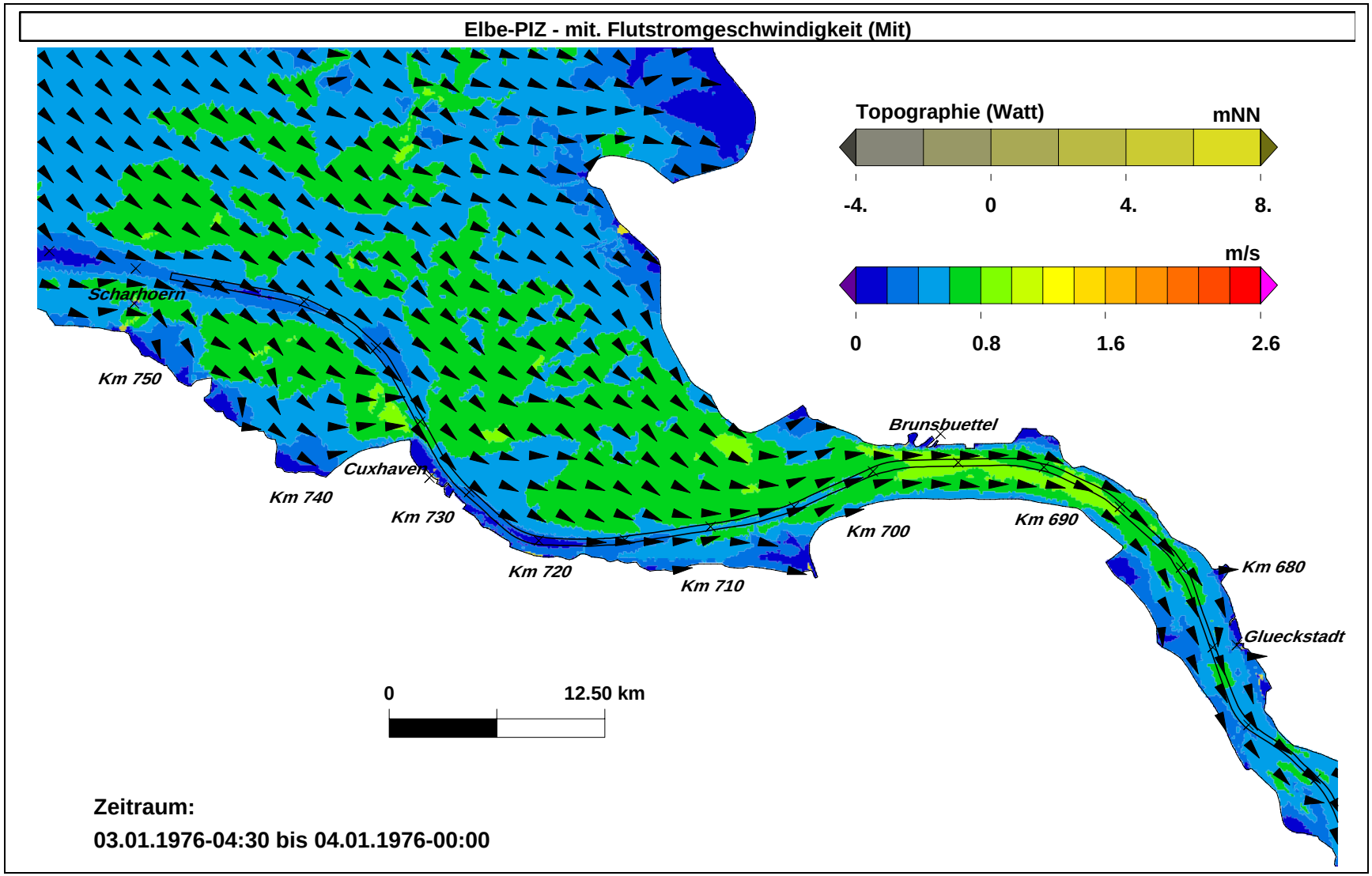

Bild E.9: *Mittlere Flutstromgeschwindigkeit während der Sturmflut SF76 im Teilgebiet West für den planerischen Ist – Zustand* PIZ. *Eine Farbstufe entspricht einer Geschwindigkeit von 0,2 m/s.*

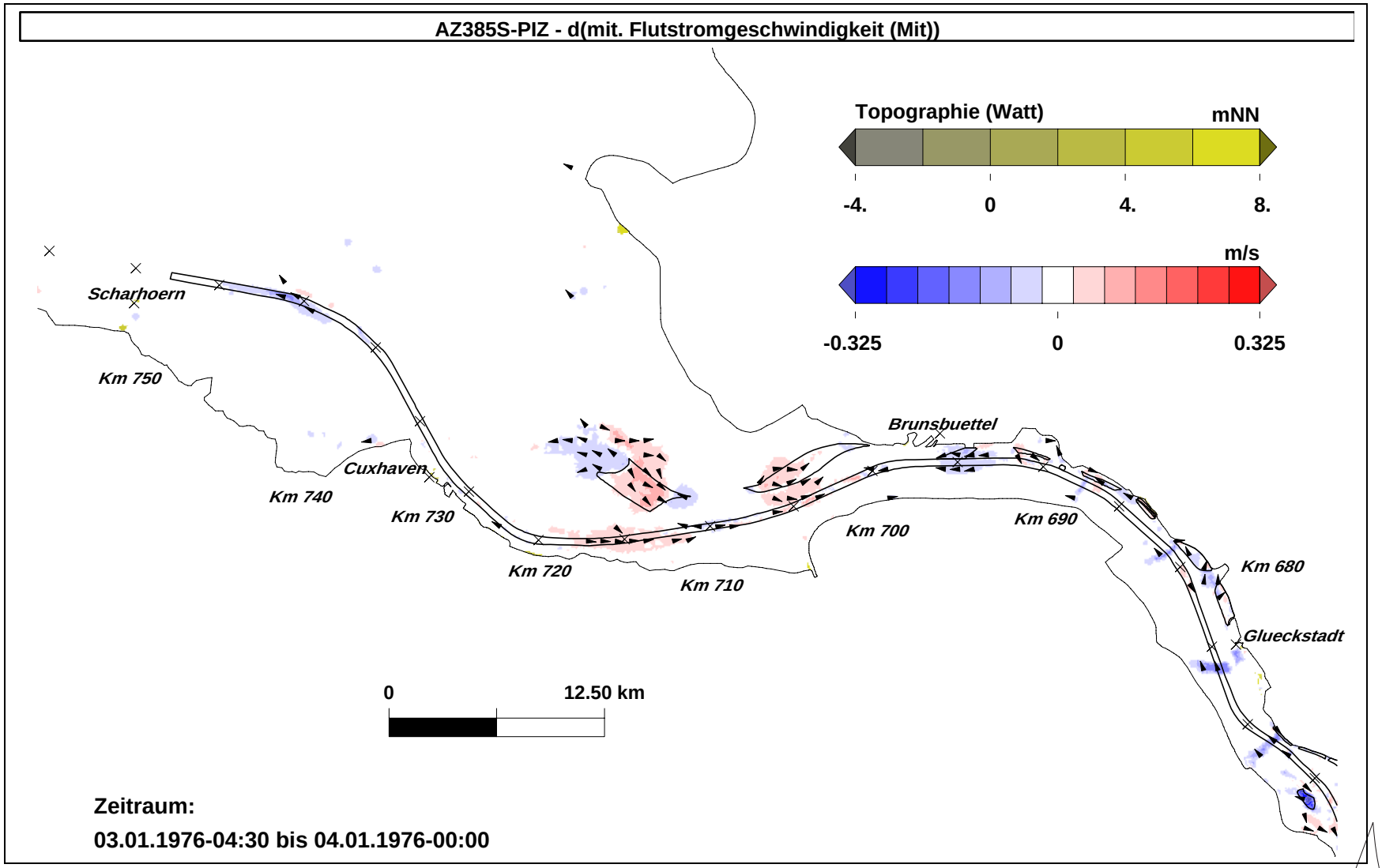

Bild E.10: *Änderung der mittleren Flutstromgeschwindigkeit während der Sturmflut SF76 im Teilgebiet West (AZ385S – PIZ). Eine Farbstufe entspricht ausbaubedingten Änderungen der mittleren Flutstromgeschwindigkeit von 0,05 m/s. In den weiß dargestellten Gebieten sind die Änderungen kleiner als ± 0,025 m/s.*

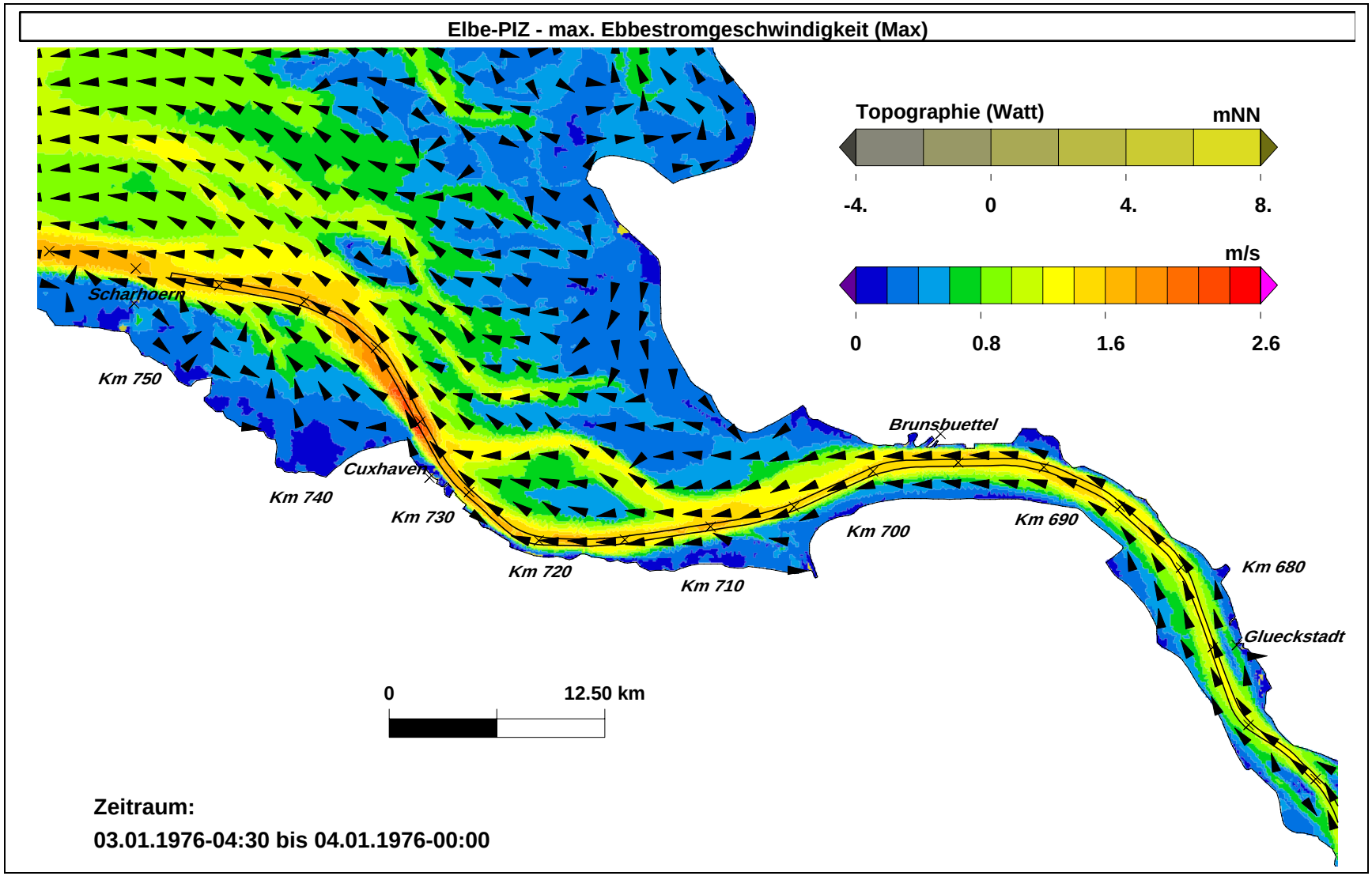

Bild E.11: *Maximale Ebbestromgeschwindigkeit während der Sturmflut SF76 im Teilgebiet West für den planerischen Ist – Zustand* PIZ. *Eine Farbstufe entspricht einer Geschwindigkeit von 0,2 m/s.*

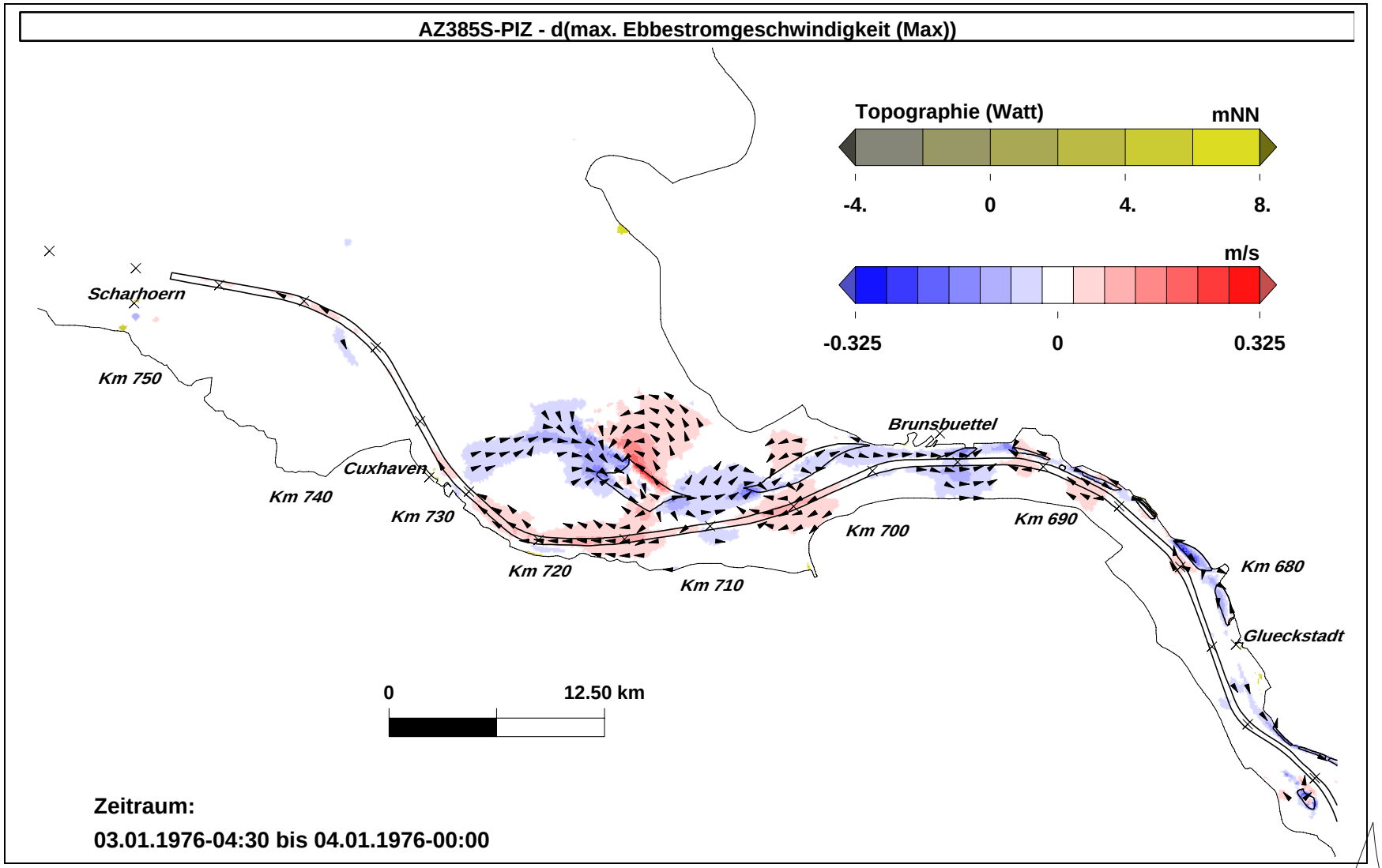

Bild E.12: *Änderung der maximalen Ebbestromgeschwindigkeit während der Sturmflut SF76 im Teilgebiet West (AZ385S – PIZ). Eine Farbstufe entspricht ausbaubedingten Änderungen der maximalen Flutstromgeschwindigkeit von 0,05 m/s. In den weiß dargestellten Gebieten sind die Änderungen kleiner als ± 0,025 m/s.*

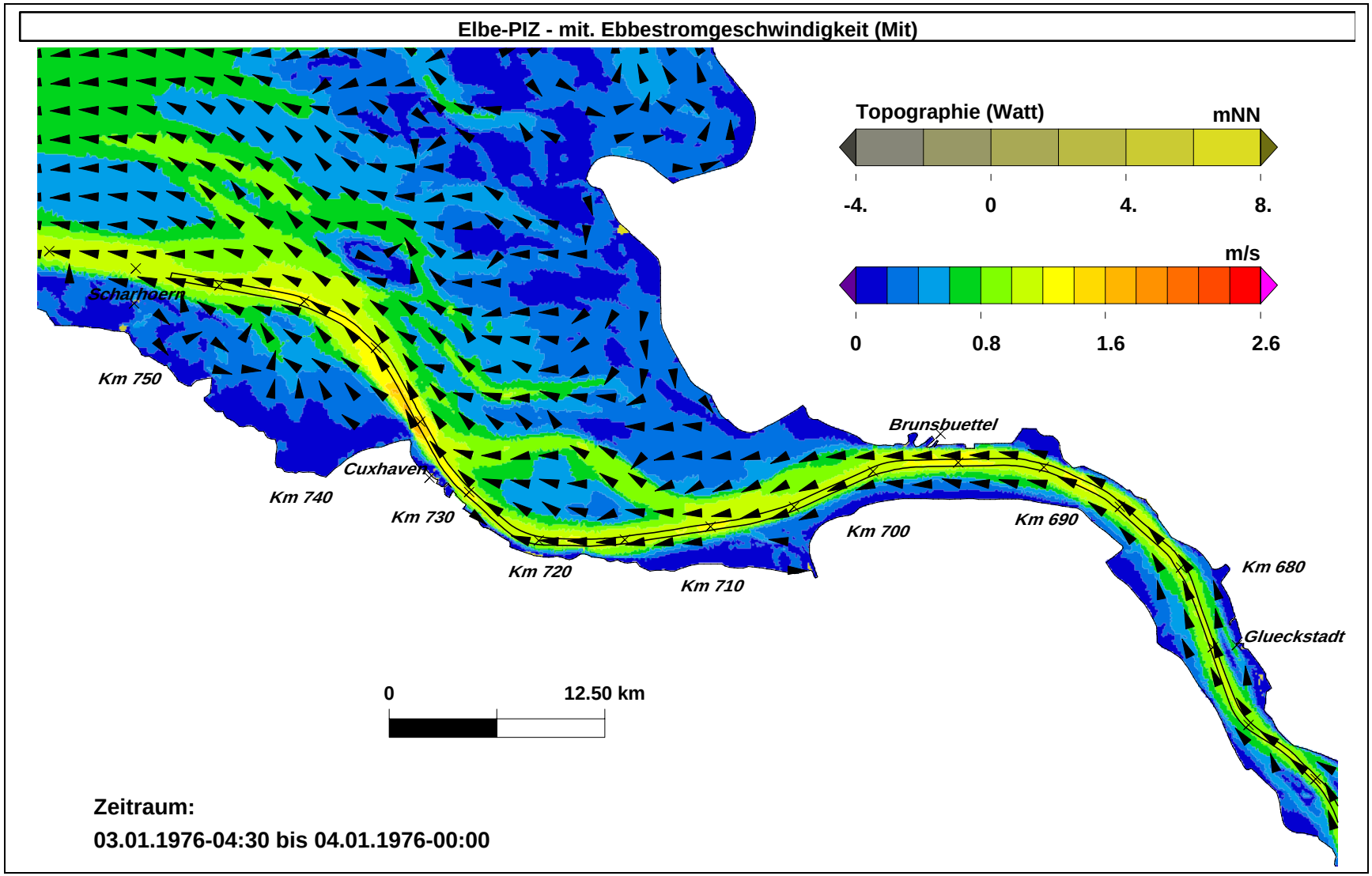

Bild E.13: *Mittlere Ebbestromgeschwindigkeit während der Sturmflut SF76 im Teilgebiet West für den planerischen Ist – Zustand* PIZ. *Eine Farbstufe entspricht einer Geschwindigkeit von 0,2 m/s.*

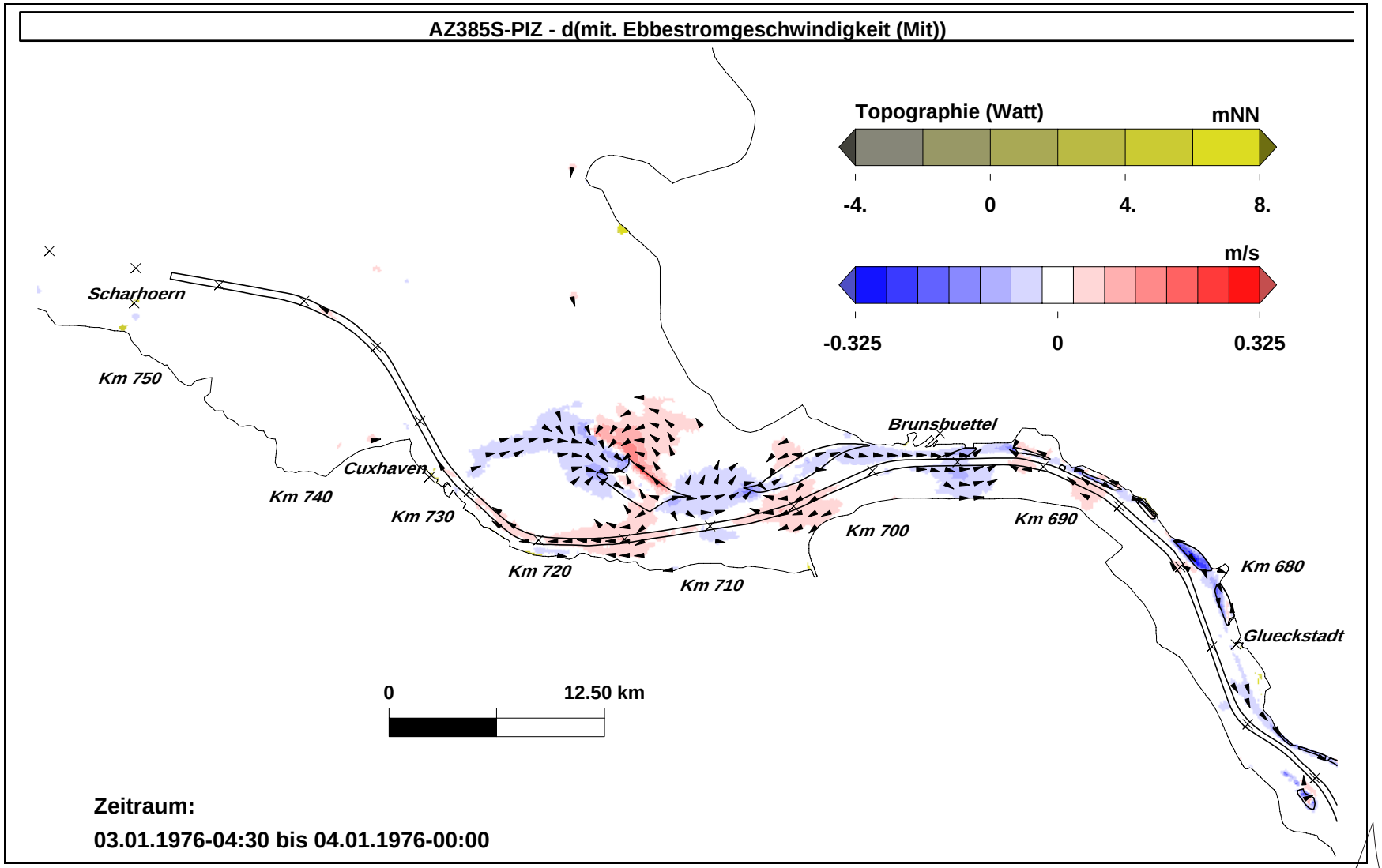

Bild E.14: *Änderung der mittleren Ebbestromgeschwindigkeit während der Sturmflut SF76 im Teilgebiet West (AZ385S – PIZ). Eine Farbstufe entspricht ausbaubedingten Änderungen der mittleren Flutstromgeschwindigkeit von 0,05 m/s. In den weiß dargestellten Gebieten sind die Änderungen kleiner als ± 0,025 m/s.*

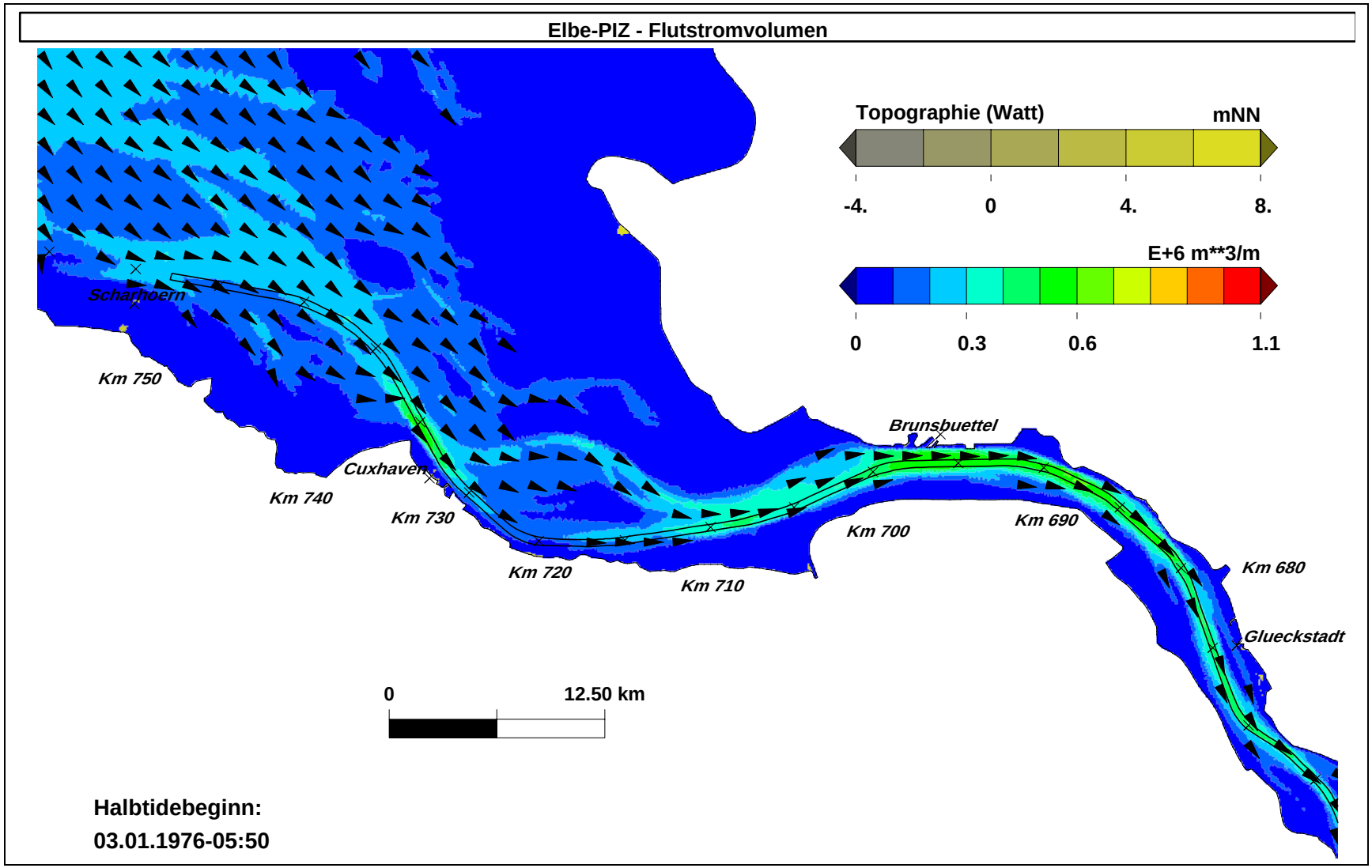

Bild E.15: *Flutstromvolumen der am 3.1.1976 um 5:50 Uhr bei Elbe – km 748 beginnenden Flut während der Sturmflut SF76 im Teilgebiet West für den planerischen Ist – Zustand* PIZ. *Eine Farbstufe entspricht einem Volumen von* $1 \cdot 10^{+6} m^3/m$.

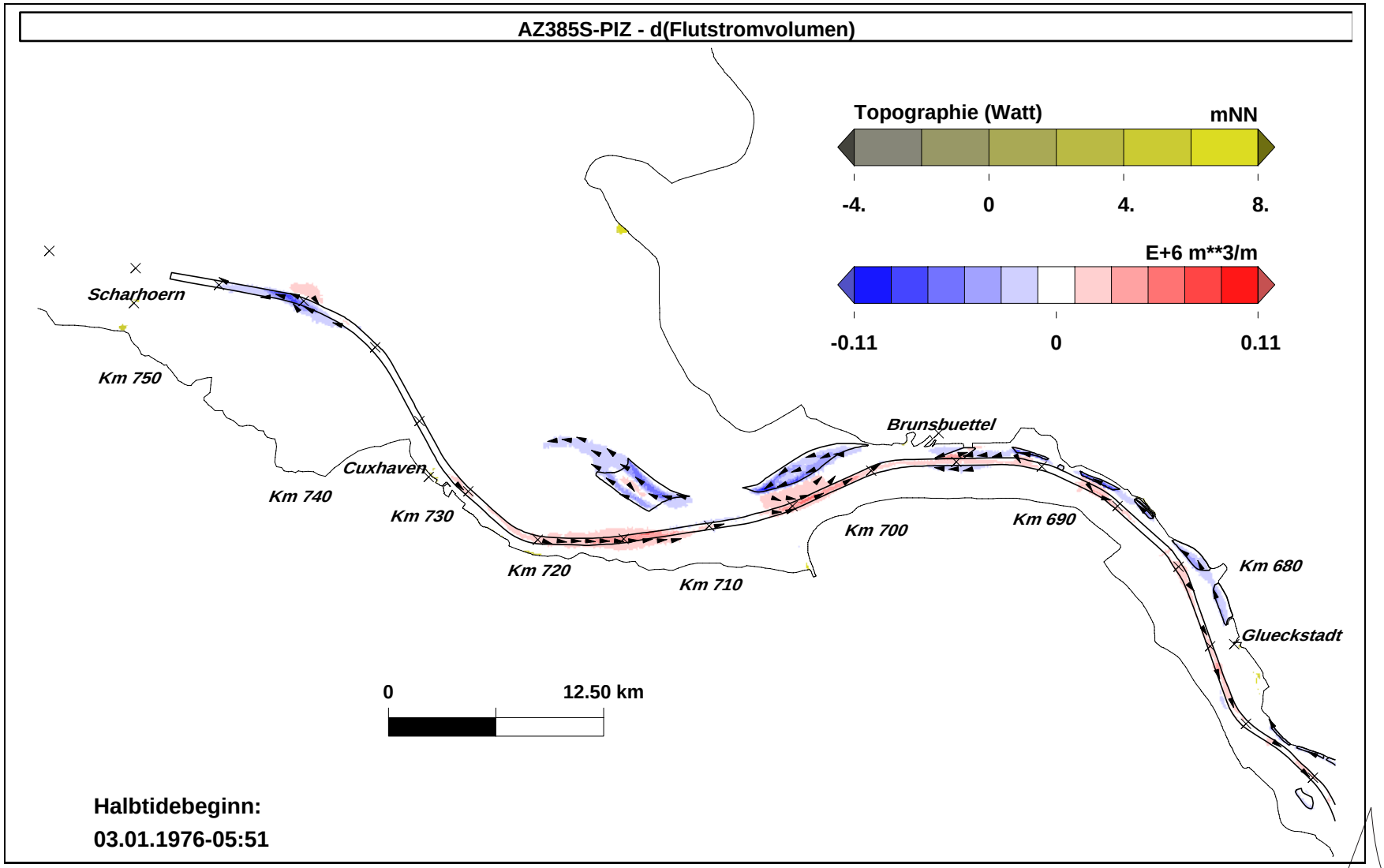

Bild E.16: *Änderung des Flutstromvolumens während der Sturmflut SF76 im Teilgebiet West (AZ385S – PIZ). Eine Farbstufe entspricht ausbaubedingten Änderungen des Flutstromvolumens von 0,02 $\cdot 10^{+6} m^3/m$. In den weiß dargestellten Gebieten sind die Änderungen kleiner als $\pm 0{,}01 \cdot 10^{+6} m^3/m$.*

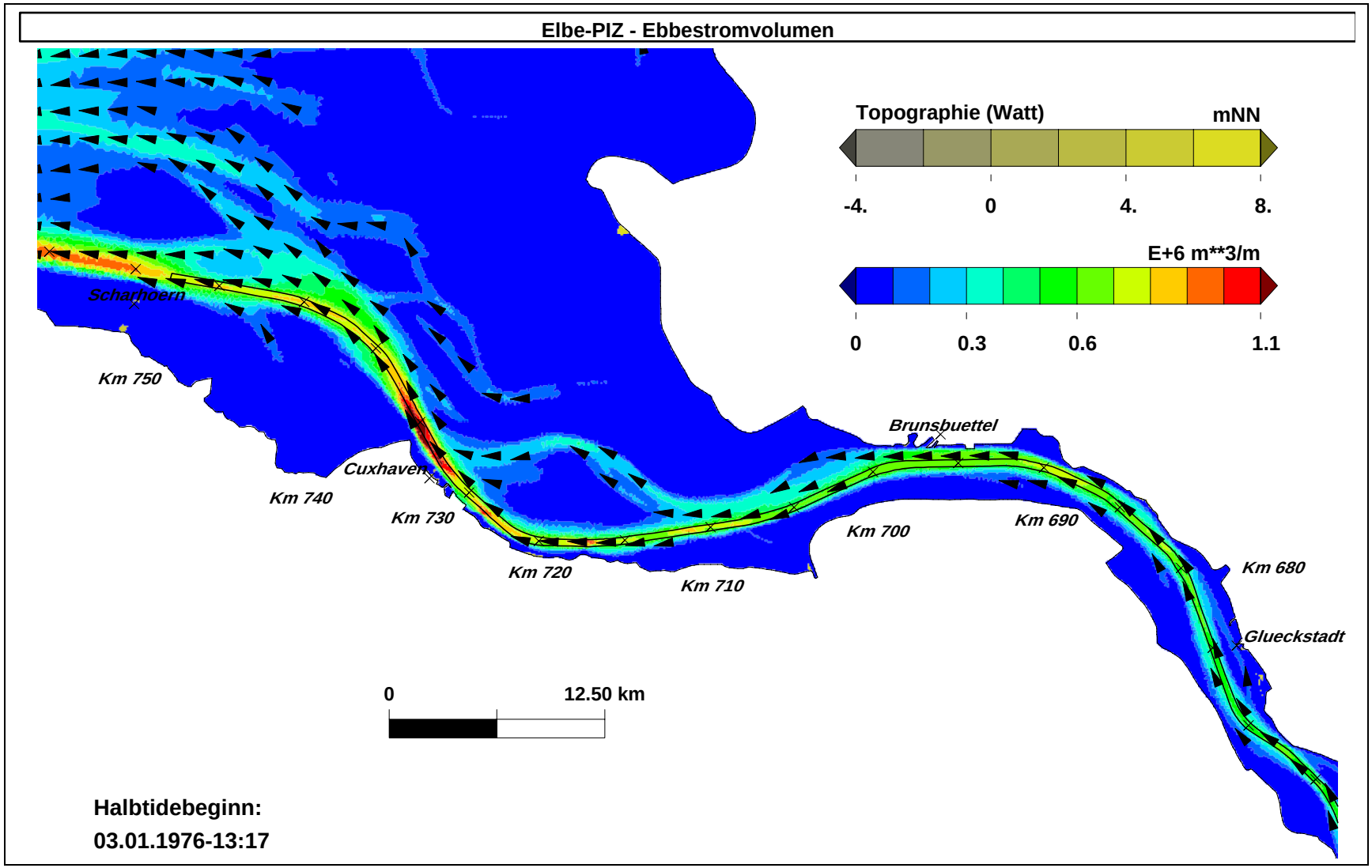

Bild E.17: *Ebbestromvolumen der am 3.1.1976 um 13:17 Uhr bei Elbe – km 748 beginnenden Ebbe während der Sturmflut SF76 im Teilgebiet West für den planerischen Ist – Zustand* PIZ. *Eine Farbstufe entspricht einem Volumen von* $1 \cdot 10^{+6} m^3/m$.

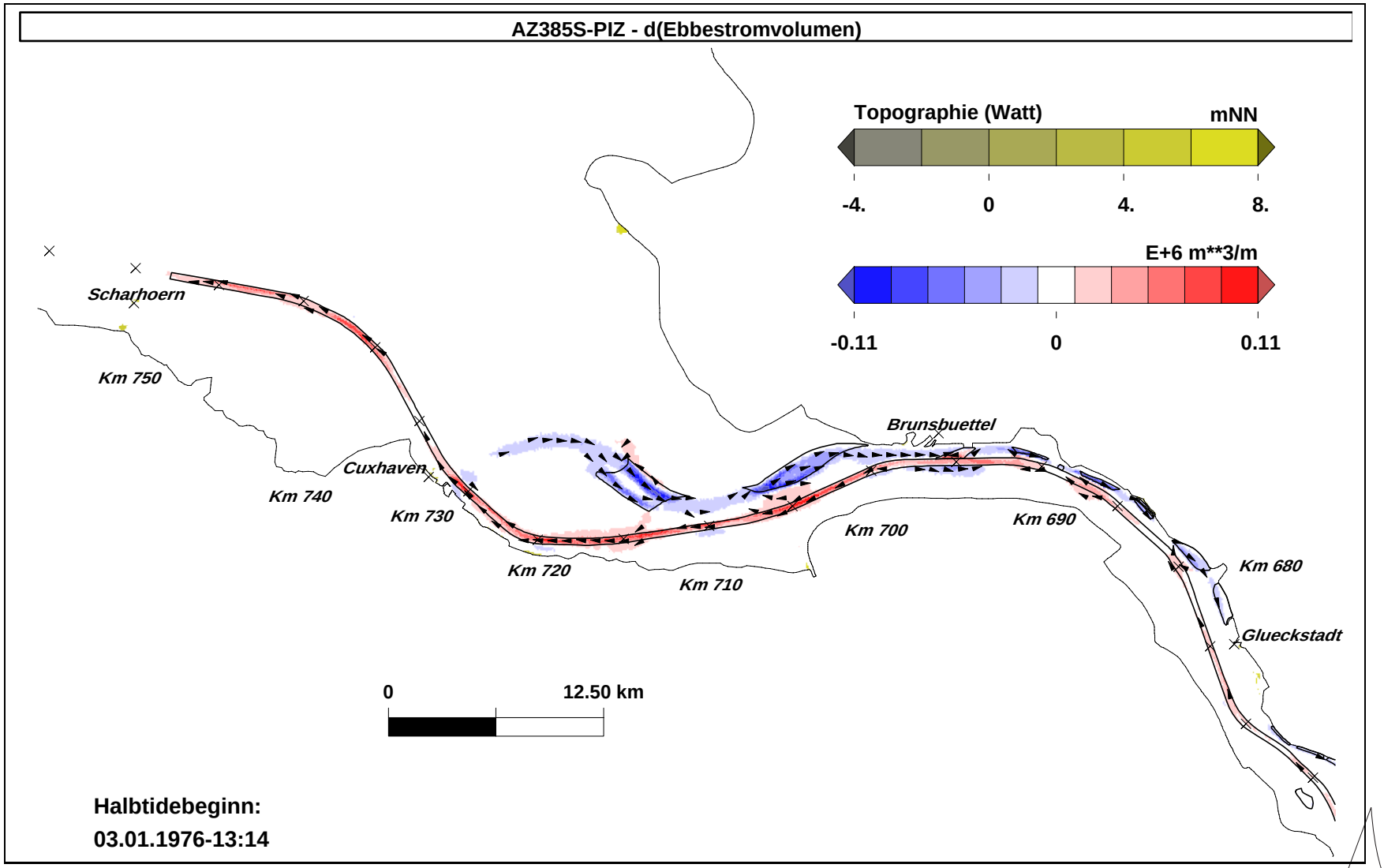

Bild E.18: *Änderung des Ebbestromvolumens während der Sturmflut SF76 im Teilgebiet West (AZ385S – PIZ). Eine Farbstufe entspricht ausbaubedingten Änderungen des Ebbestromvolumens von 0,02 $\cdot 10^{+6} m^3/m$. In den weiß dargestellten Gebieten sind die Änderungen kleiner als $\pm$ 0,01 $\cdot 10^{+6} m^3/m$.*

F Sturmflut SF94: Elbe Teilgebiet West

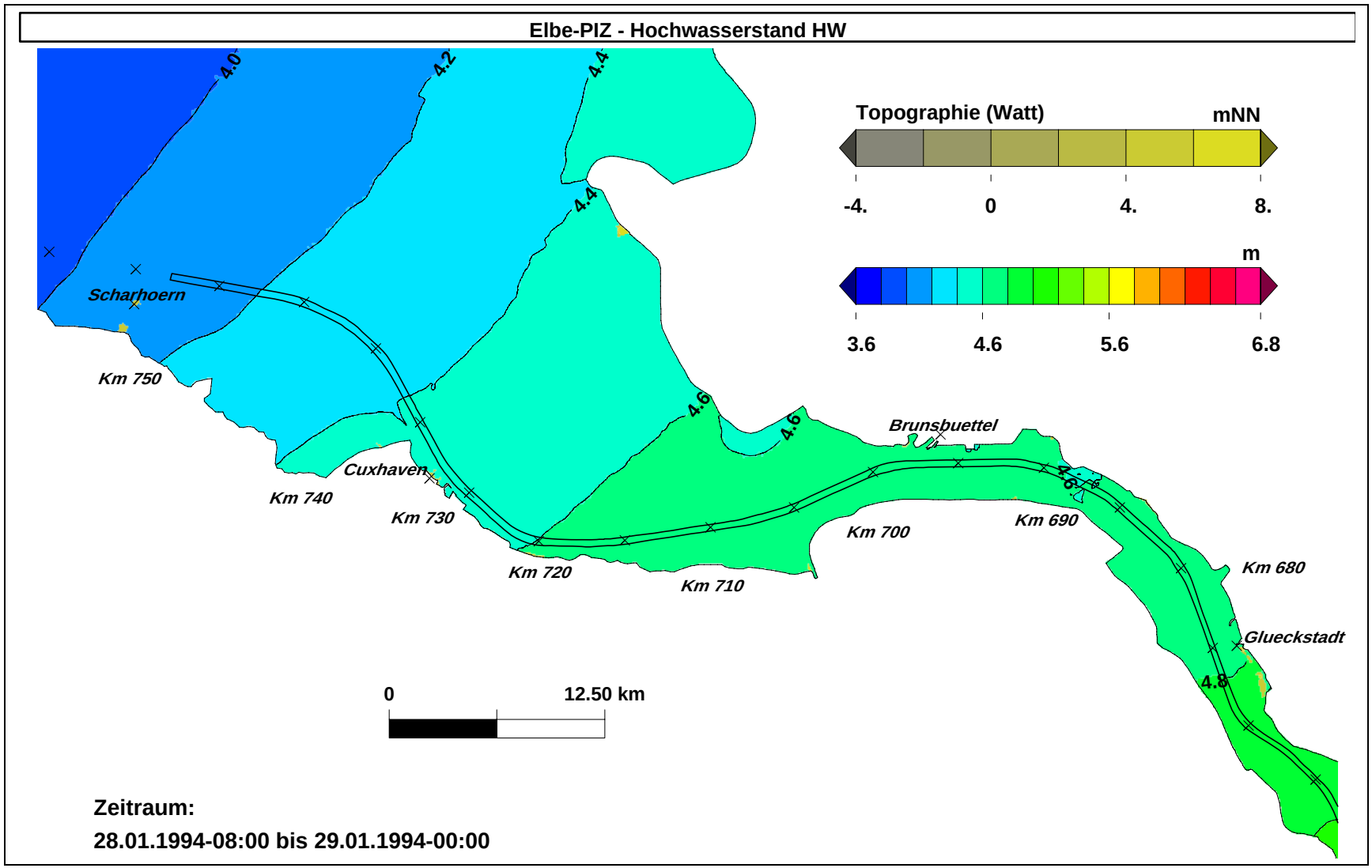

Bild F.1: *Sturmflutscheitelwasserstand HW für die Sturmflut SF94 im Teilgebiet West für den planerischen Ist – Zustand* PIZ. *Eine Farbstufe entspricht einem Unterschied im HW von 20 cm.*

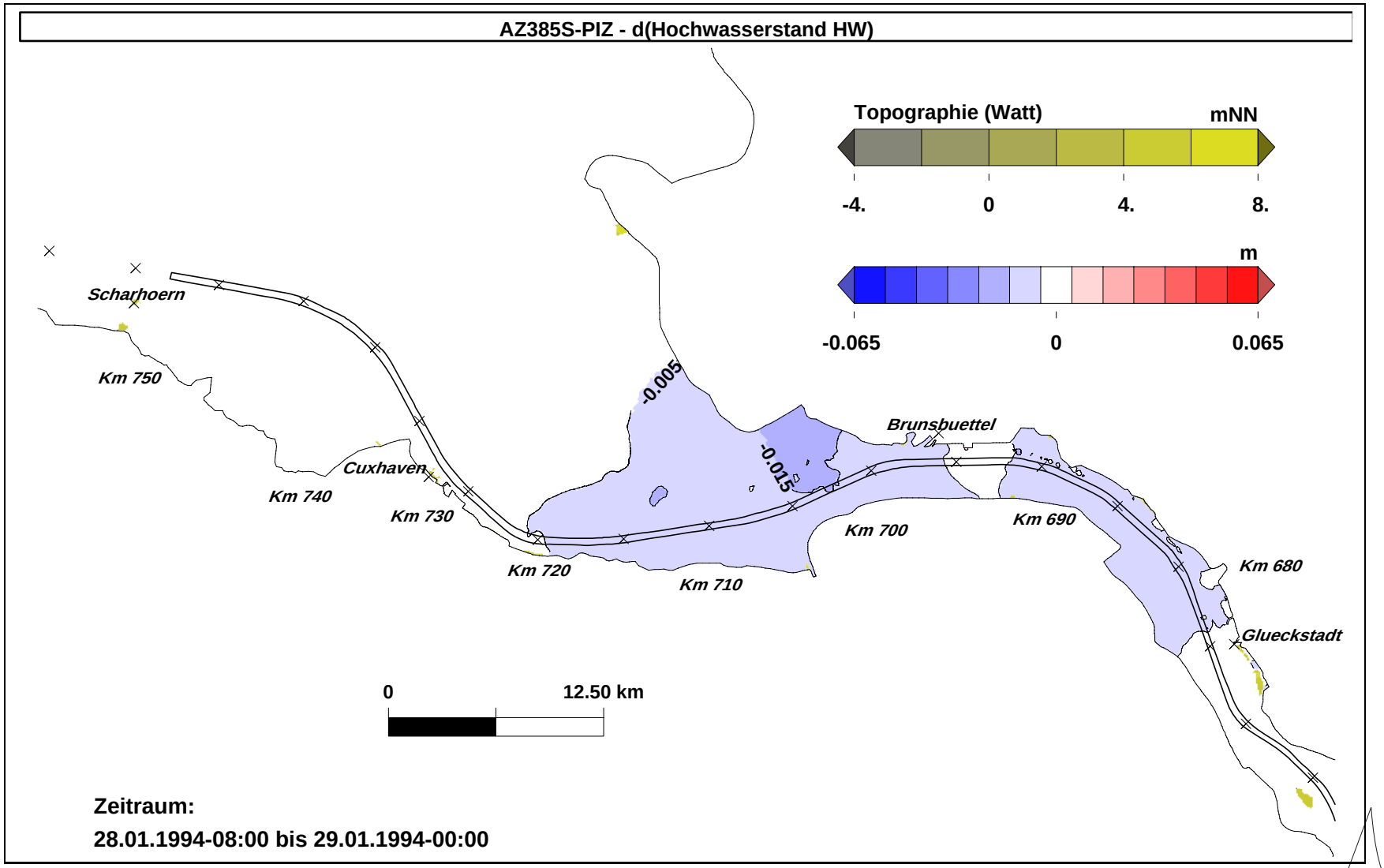

Bild F.2: *Änderung des Sturmflutscheitelwasserstand HW für die Sturmflut SF94 im Teilgebiet West (AZ385S – PIZ). Eine Farbstufe entspricht einem Unterschied im HW von 1 cm. In den weiß dargestellten Gebieten ändert sich das HW ausbaubedingt um weniger als ± 0,5 cm.*

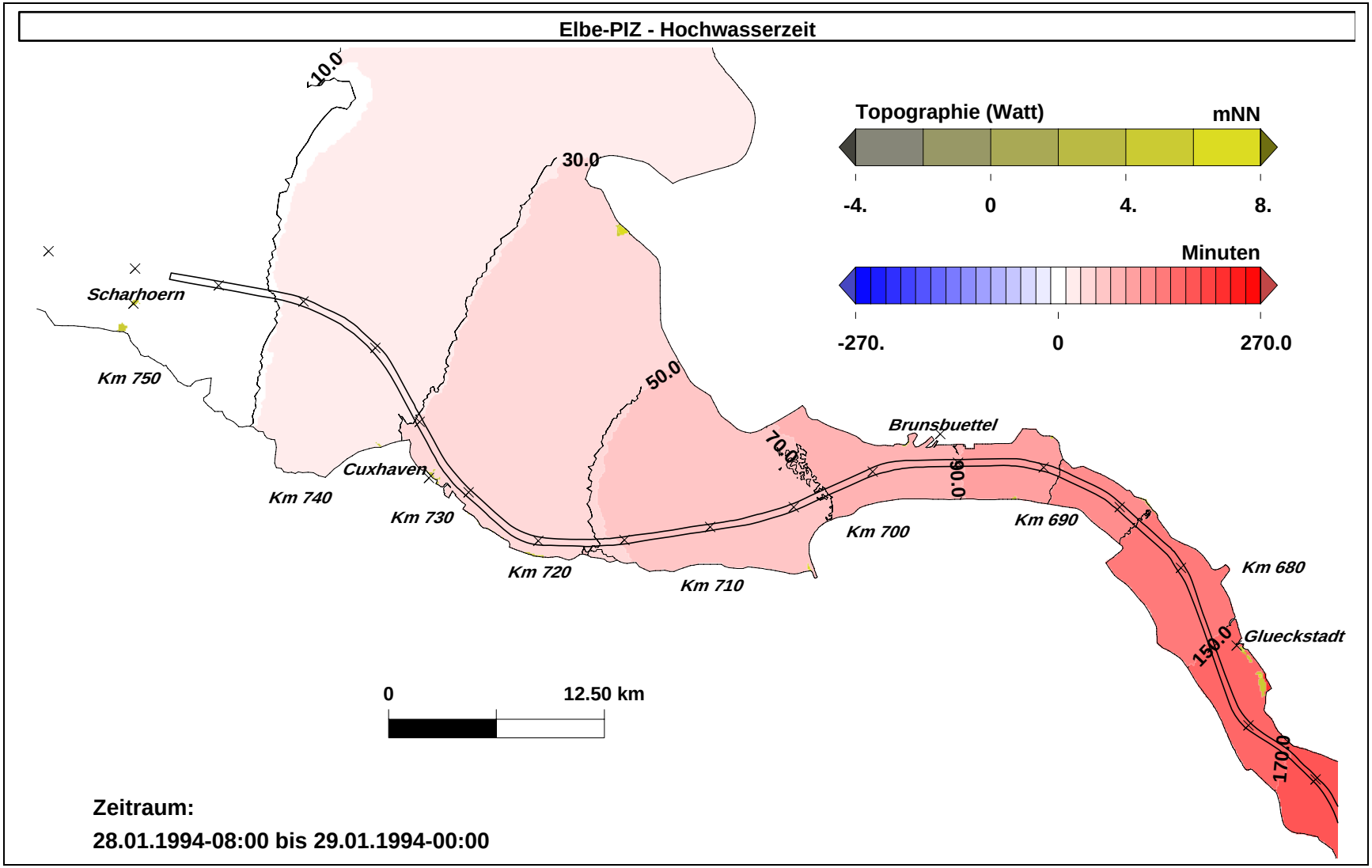

Bild F.3: *Eintrittszeit Sturmflutscheitelwasserstand tHW für die Sturmflut SF94 im Teilgebiet West für den planerischen Ist – Zustand* PIZ. *Eine Farbstufe entspricht einem Eintrittszeitunterschied von 20 Minuten bezogen auf Elbe – km 748 in der Elbmündung. In den weiß dargestellten Gebieten tritt der Sturmflutscheitel ± 10 Minuten vor/nach Elbe – km 748 ein.*

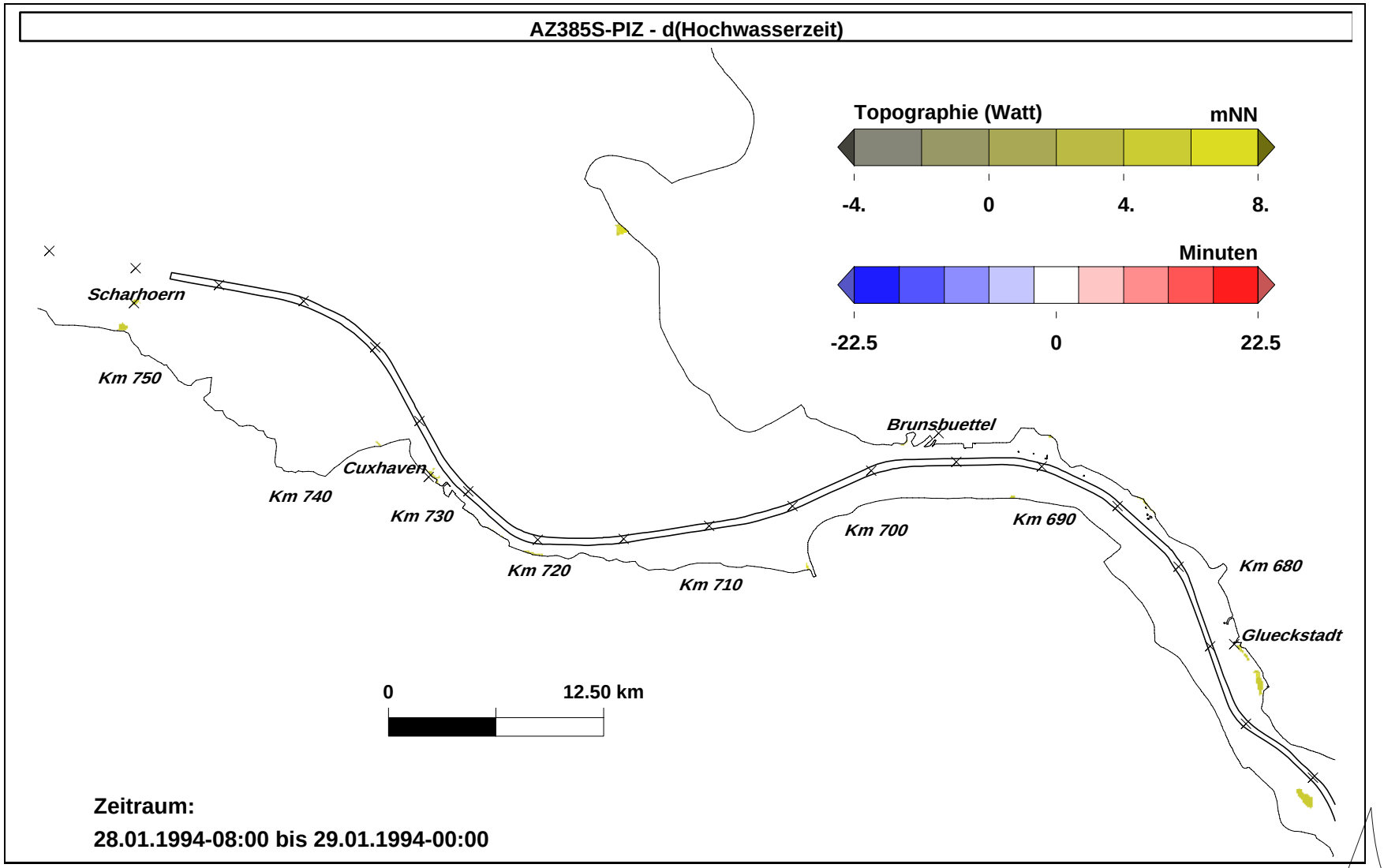

Bild F.4: *Änderung der Eintrittszeit des Sturmflutscheitelwasserstand tHW für die Sturmflut SF94 im Teilgebiet West (AZ385S – PIZ). Eine Farbstufe entspricht einer ausbaubedingten Änderung der Eintrittszeit von 5 Minuten. In den weiß dargestellten Gebieten sind die Änderungen kleiner als ± 2,5 Minuten.*

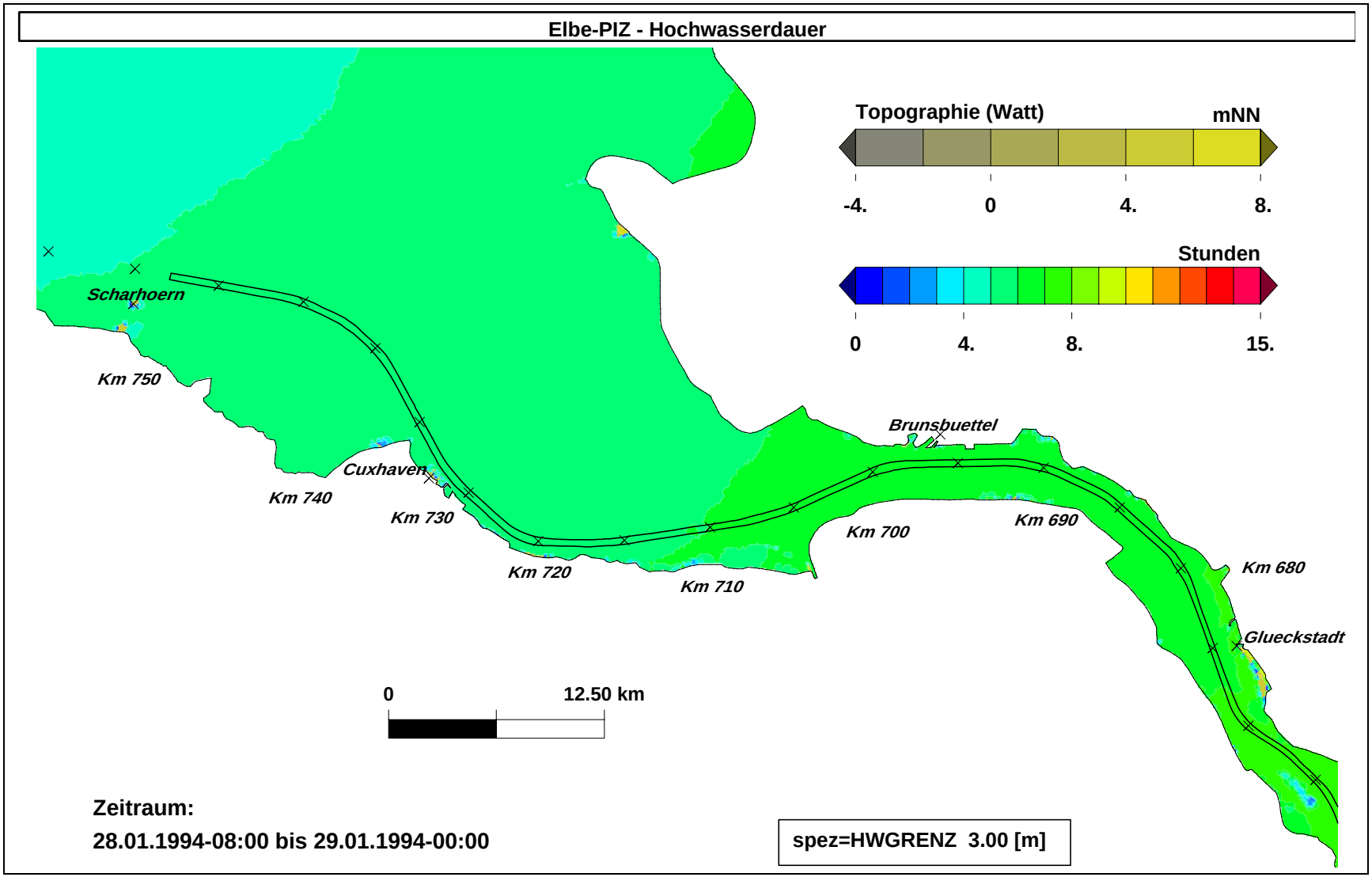

Bild F.5: *Dauer hoher Wasserstände $> NN + 3{,}00\,m$ während der Sturmflut SF94 im Teilgebiet West für den planerischen Ist – Zustand* PIZ. *Eine Farbstufe entspricht einer Dauer der Wasserstandshöhe von 1 Stunde.*

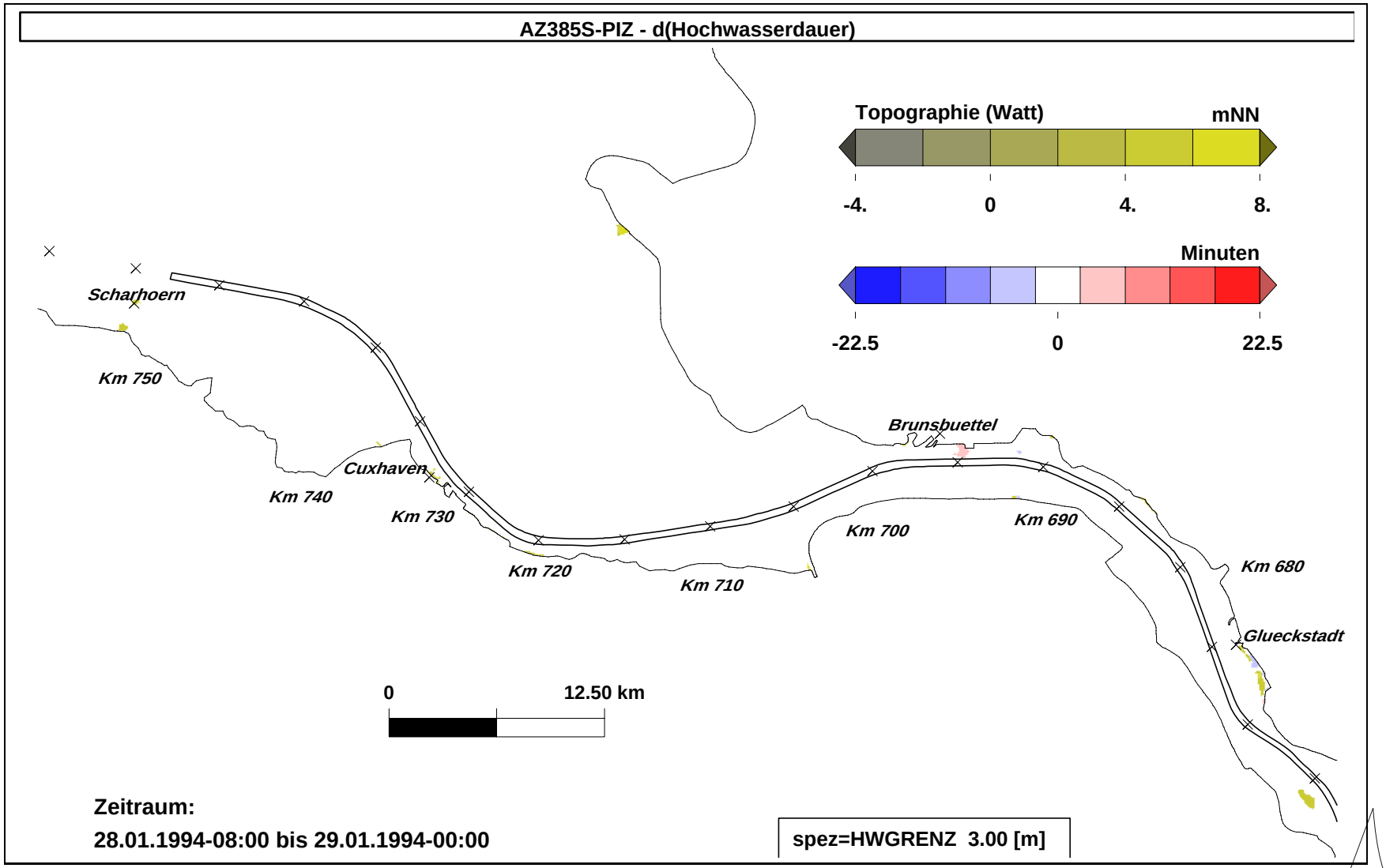

Bild F.6: *Änderung der Dauer hoher Wasserstände $> NN + 3{,}00\,m$ während der Sturmflut SF94 im Teilgebiet West (AZ385S – PIZ). Eine Farbstufe entspricht ausbaubedingten Änderungen der Dauer von 5 Minuten. In den weiß dargestellten Gebieten sind die Änderungen kleiner als $\pm 2{,}5$ Minuten.*

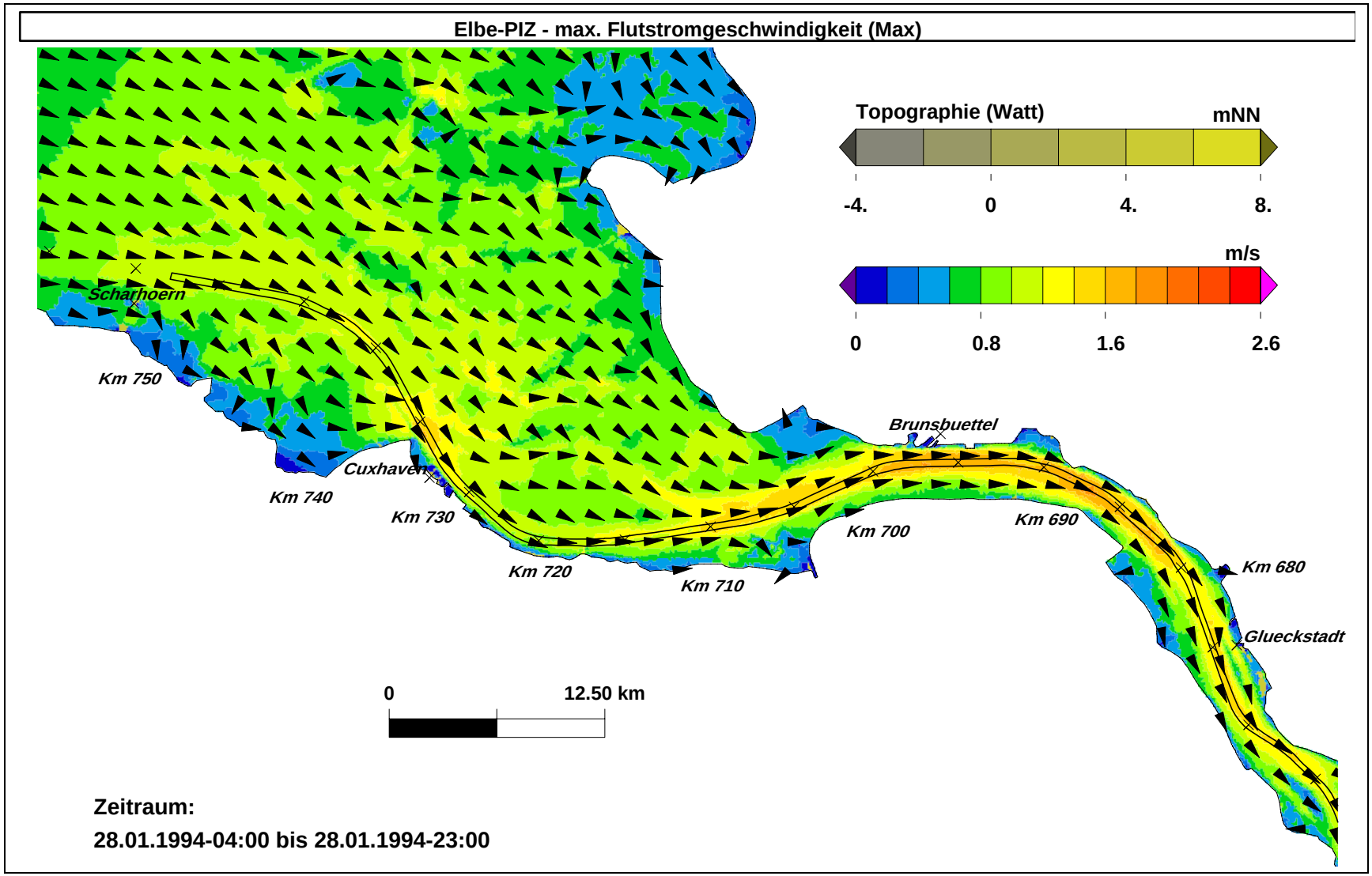

Bild F.7: *Maximale Flutstromgeschwindigkeit während der Sturmflut SF94 im Teilgebiet West für den planerischen Ist – Zustand* PIZ. *Eine Farbstufe entspricht einer Geschwindigkeit von 0,2 m/s.*

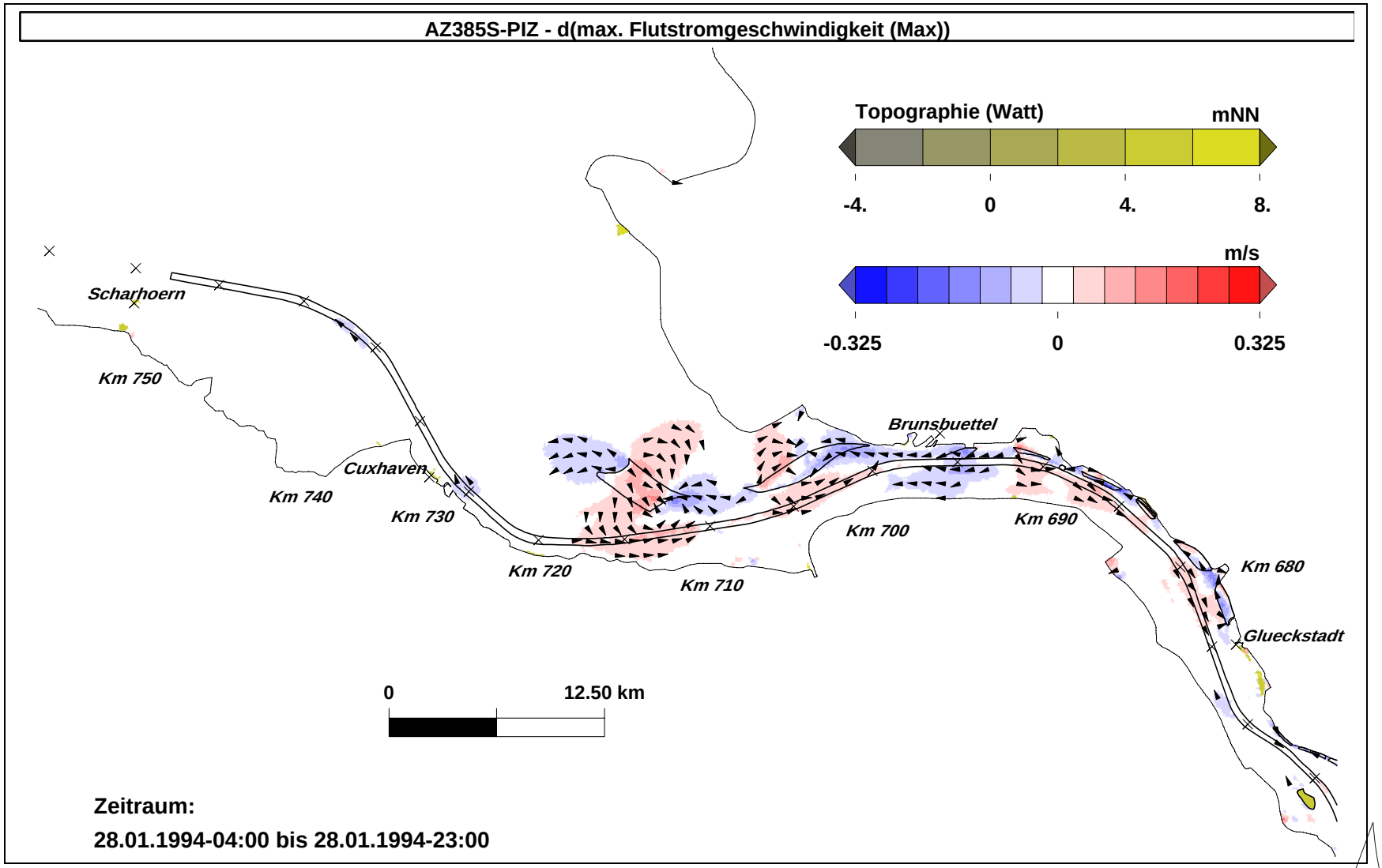

Bild F.8: *Änderung der maximalen Flutstromgeschwindigkeit während der Sturmflut SF94 im Teilgebiet West (AZ385S – PIZ). Eine Farbstufe entspricht ausbaubedingten Änderungen der maximalen Flutstromgeschwindigkeit von 0,05 m/s. In den weiß dargestellten Gebieten sind die Änderungen kleiner als ± 0,025 m/s.*

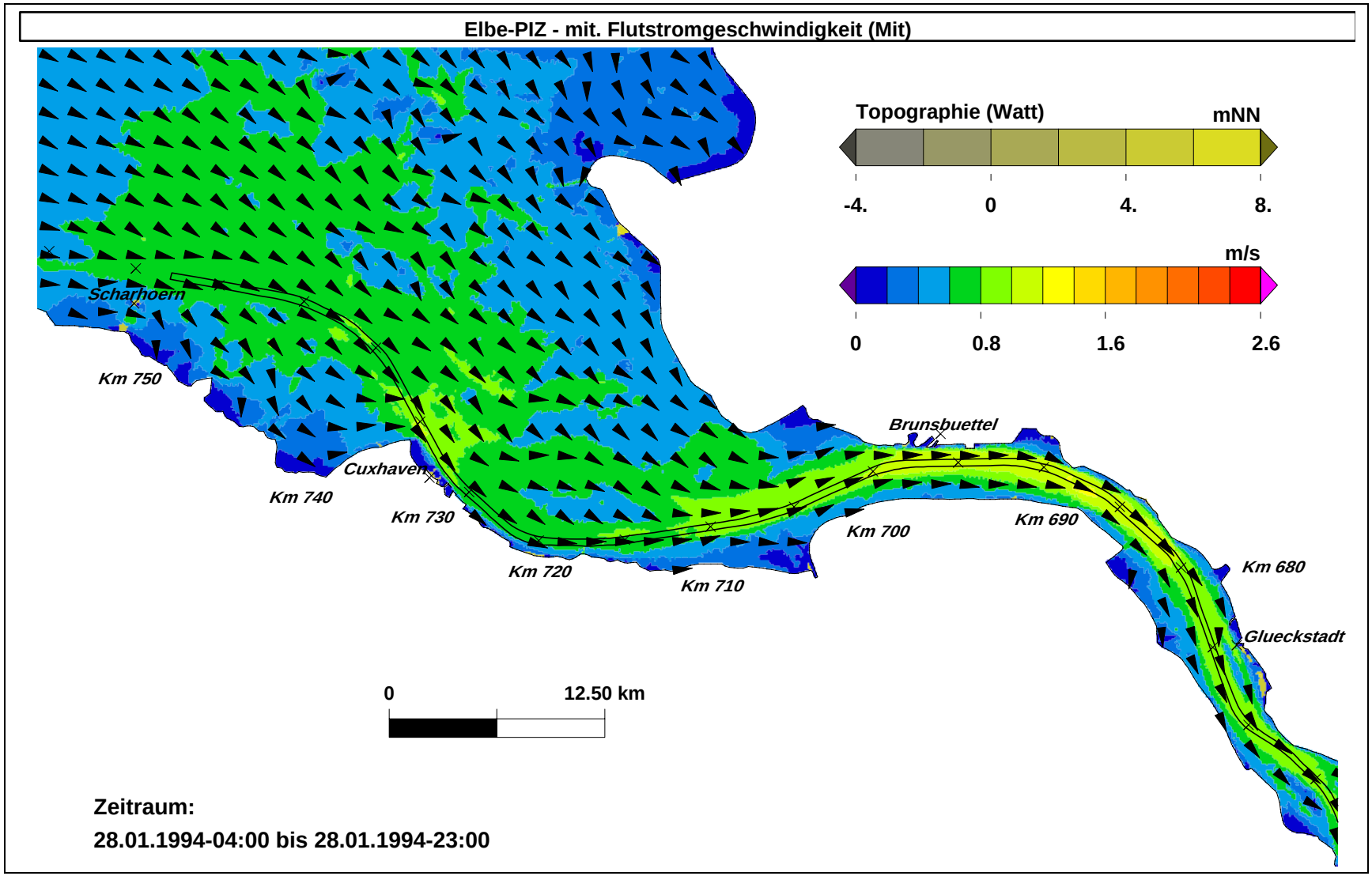

Bild F.9: *Mittlere Flutstromgeschwindigkeit während der Sturmflut SF94 im Teilgebiet West für den planerischen Ist – Zustand* PIZ. *Eine Farbstufe entspricht einer Geschwindigkeit von 0,2 m/s.*

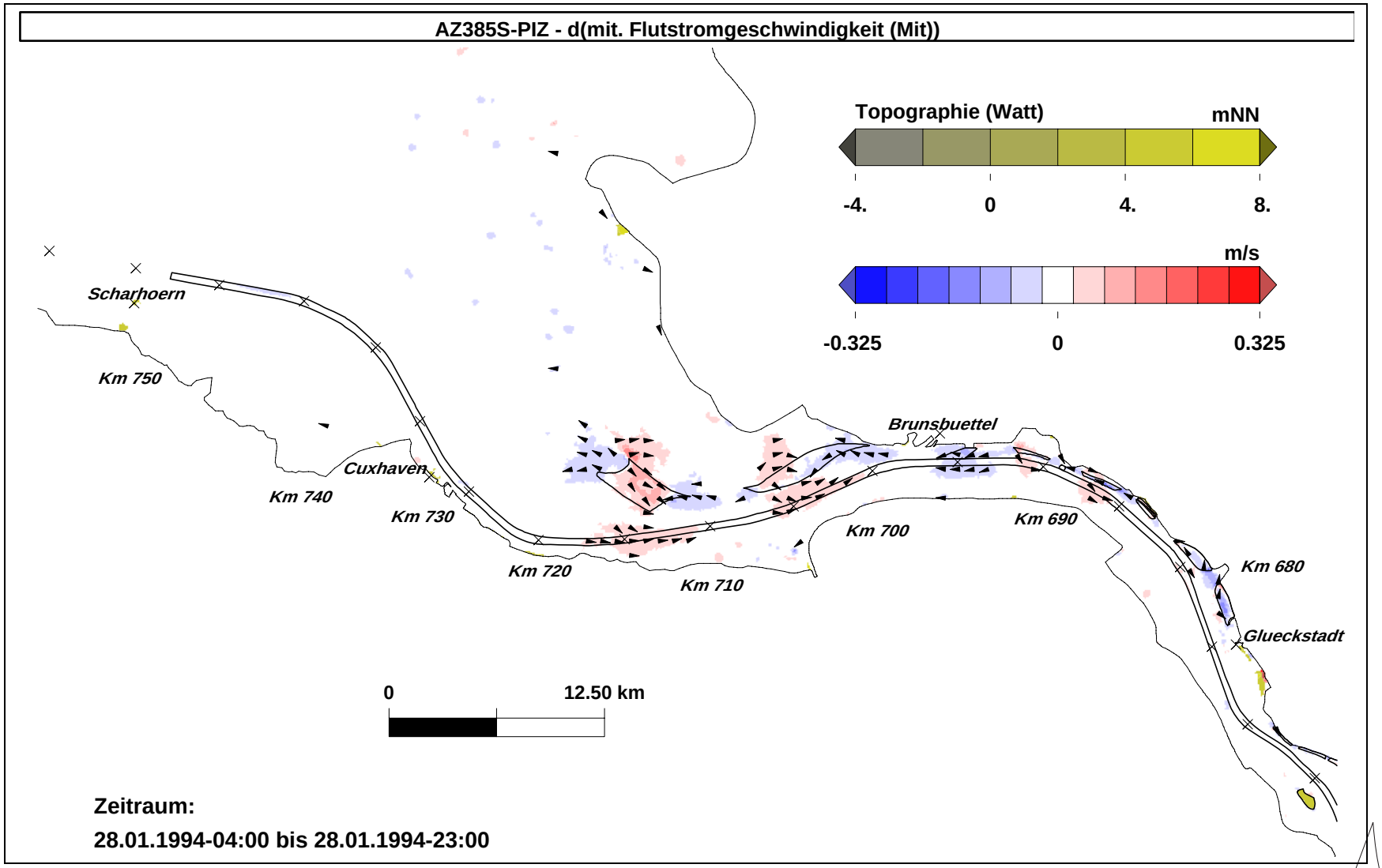

Bild F.10: *Änderung der mittleren Flutstromgeschwindigkeit während der Sturmflut SF94 im Teilgebiet West (AZ385S – PIZ). Eine Farbstufe entspricht ausbaubedingten Änderungen der mittleren Flutstromgeschwindigkeit von 0,05 m/s. In den weiß dargestellten Gebieten sind die Änderungen kleiner als ± 0,025 m/s.*

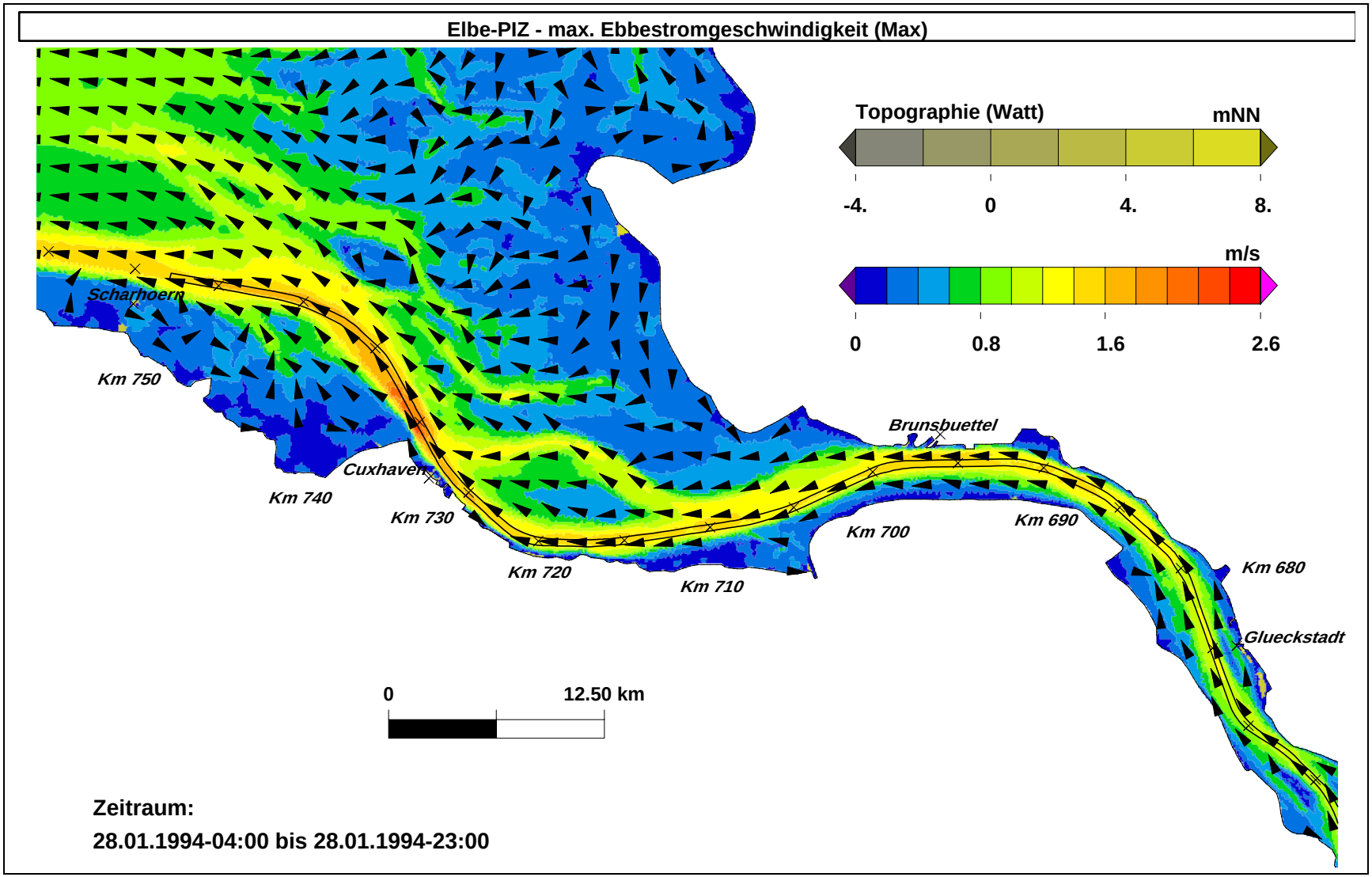

Bild F.11: *Maximale Ebbestromgeschwindigkeit während der Sturmflut SF94 im Teilgebiet West für den planerischen Ist – Zustand* PIZ. *Eine Farbstufe entspricht einer Geschwindigkeit von 0,2 m/s.*

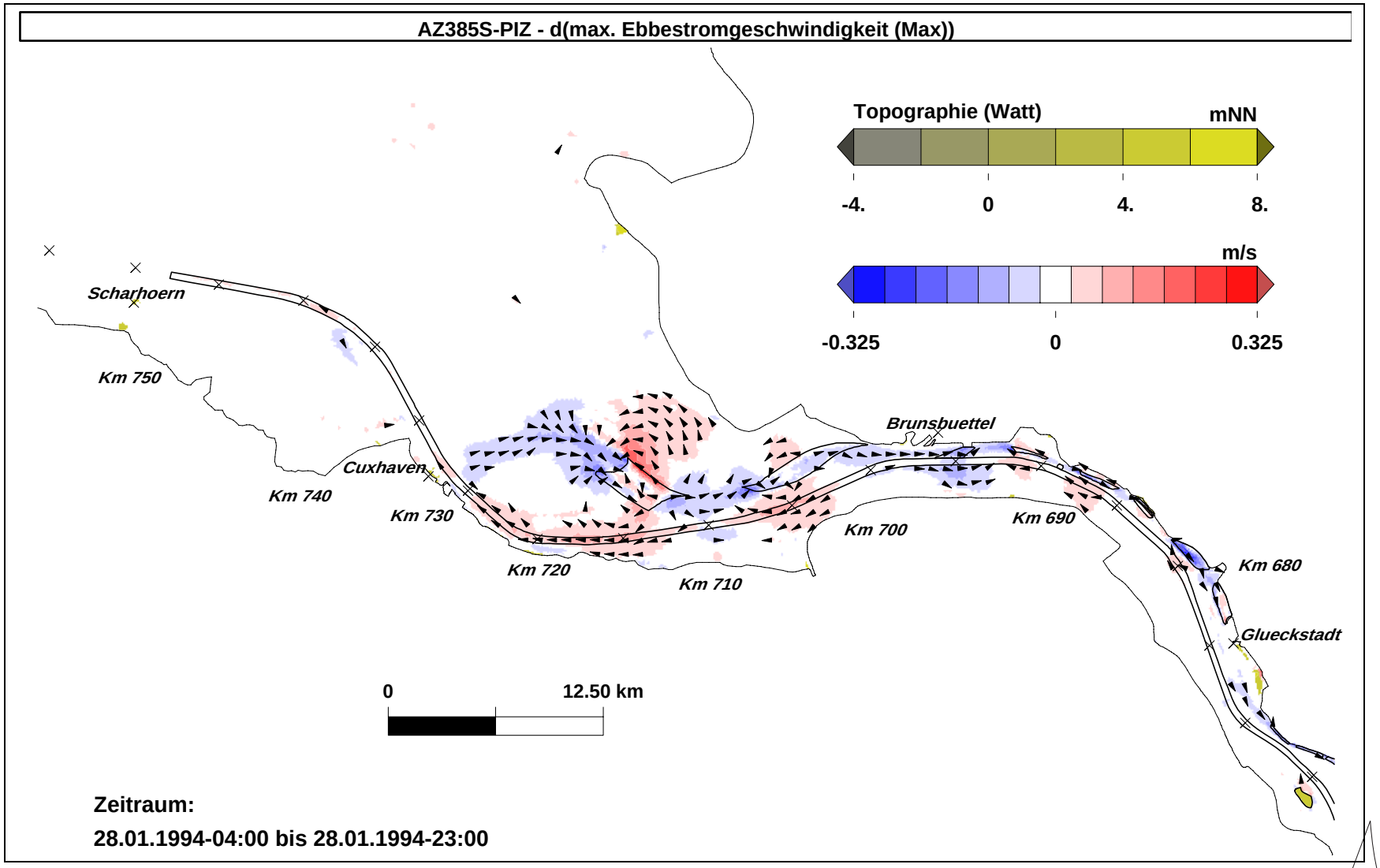

Bild F.12: *Änderung der maximalen Ebbestromgeschwindigkeit während der Sturmflut SF94 im Teilgebiet West (AZ385S – PIZ). Eine Farbstufe entspricht ausbaubedingten Änderungen der maximalen Flutstromgeschwindigkeit von 0,05 m/s. In den weiß dargestellten Gebieten sind die Änderungen kleiner als ± 0,025 m/s.*

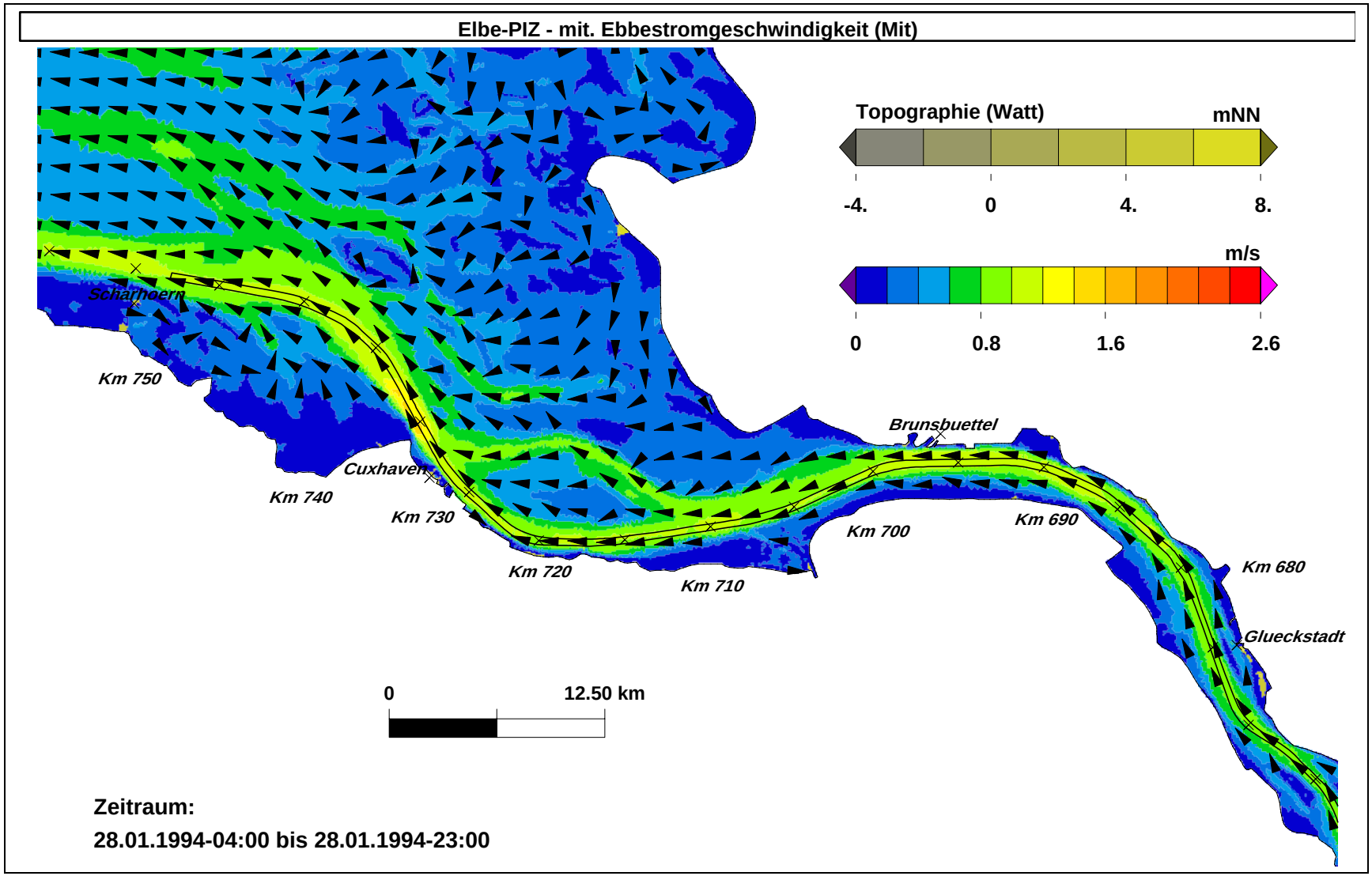

Bild F.13: *Mittlere Ebbestromgeschwindigkeit während der Sturmflut SF94 im Teilgebiet West für den planerischen Ist – Zustand* PIZ. *Eine Farbstufe entspricht einer Geschwindigkeit von 0,2 m/s.*

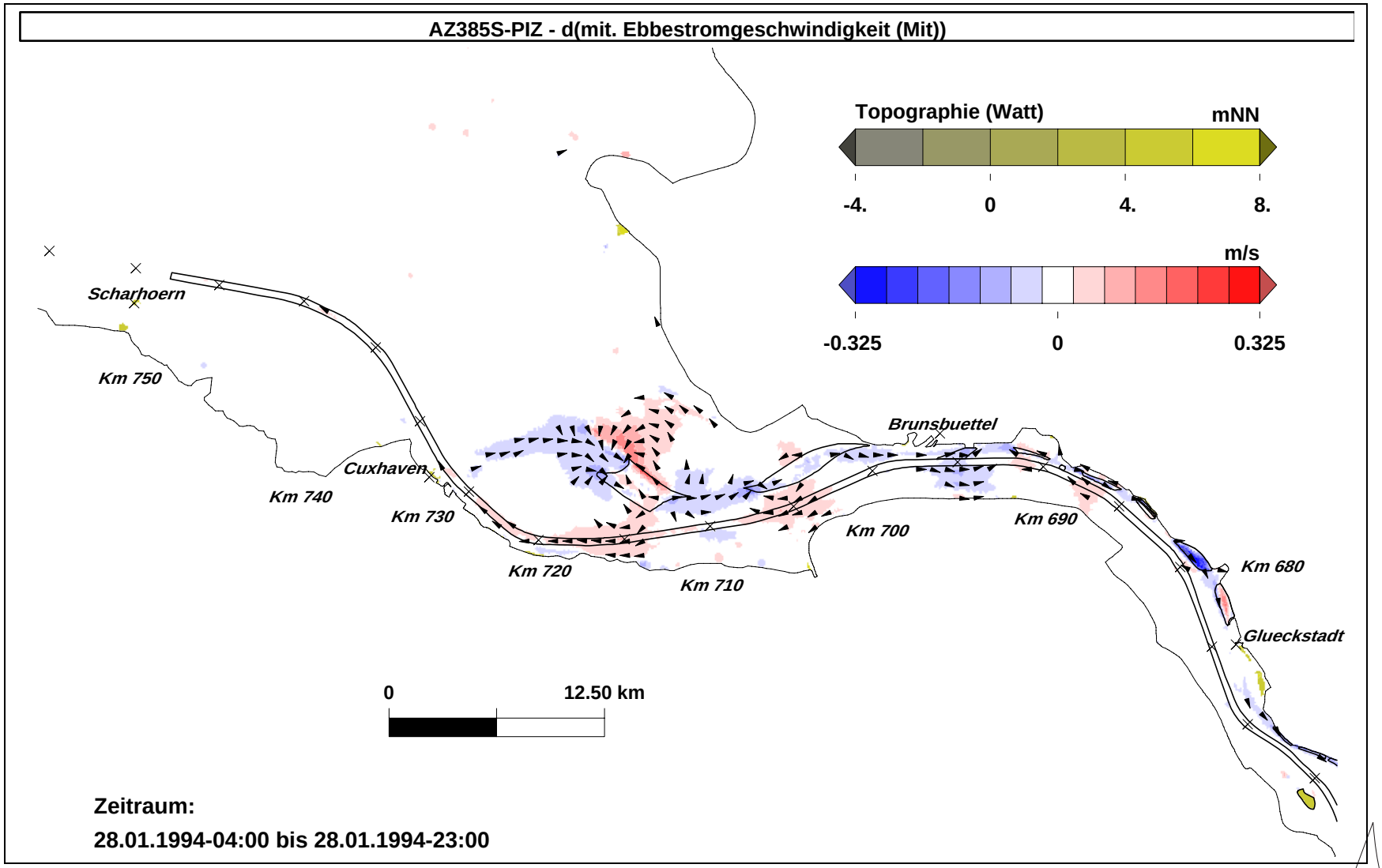

Bild F.14: *Änderung der mittleren Ebbestromgeschwindigkeit während der Sturmflut SF94 im Teilgebiet West (AZ385S – PIZ). Eine Farbstufe entspricht ausbaubedingten Änderungen der mittleren Flutstromgeschwindigkeit von 0,05 m/s. In den weiß dargestellten Gebieten sind die Änderungen kleiner als ± 0,025 m/s.*

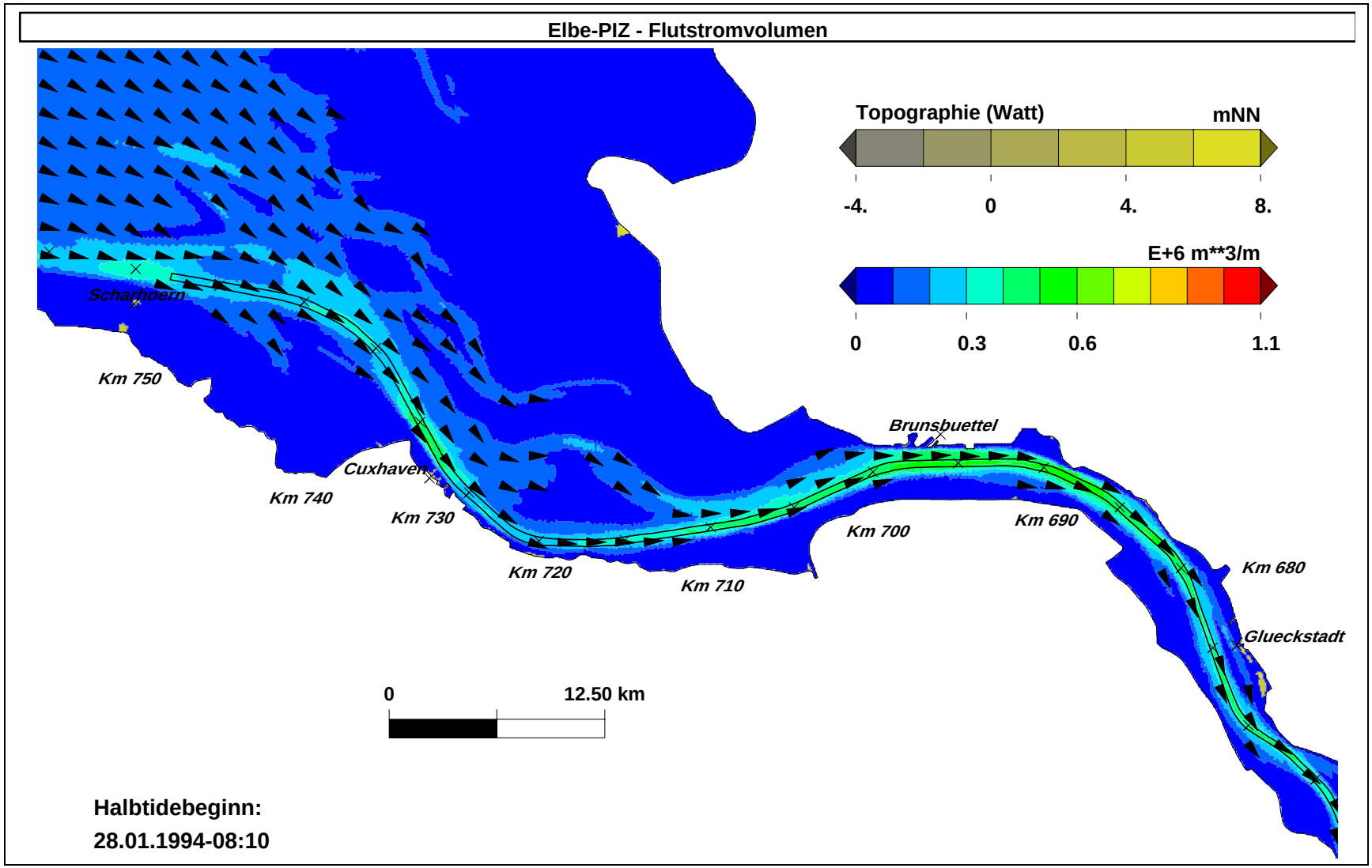

Bild F.15: *Flutstromvolumen der am 28. 1. 1994 um 8:10 Uhr bei Elbe – km 748 beginnenden Flut während der Sturmflut SF94 im Teilgebiet West für den planerischen Ist – Zustand* PIZ. *Eine Farbstufe entspricht einem Volumen von* $1 \cdot 10^{+6} m^3/m$.

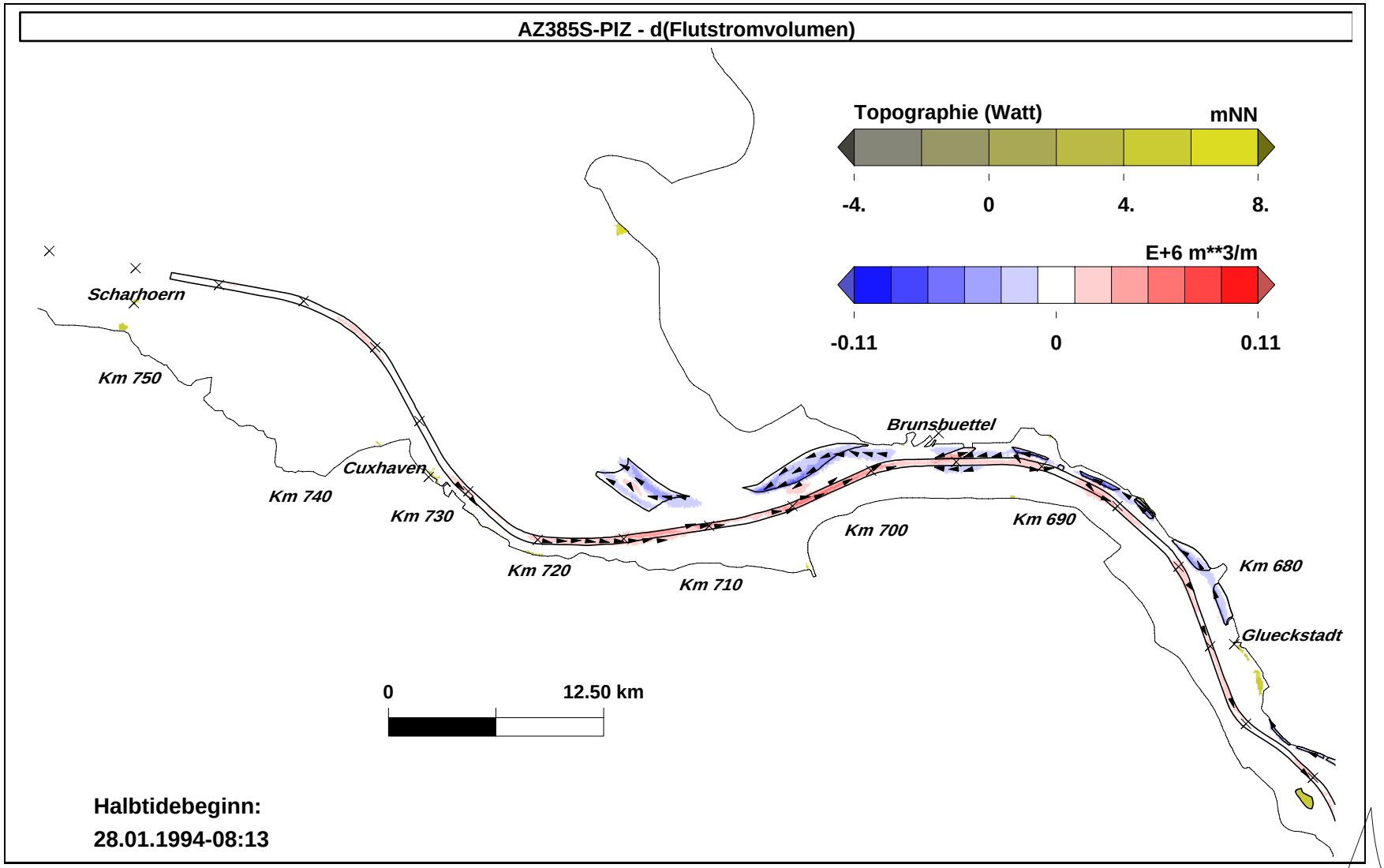

Bild F.16: *Änderung des Flutstromvolumens während der Sturmflut SF94 im Teilgebiet West (AZ385S – PIZ). Eine Farbstufe entspricht ausbaubedingten Änderungen des Flutstromvolumens von* $0{,}02 \cdot 10^{+6} m^3/m$. *In den weiß dargestellten Gebieten sind die Änderungen kleiner als* $\pm 0{,}01 \cdot 10^{+6} m^3/m$.

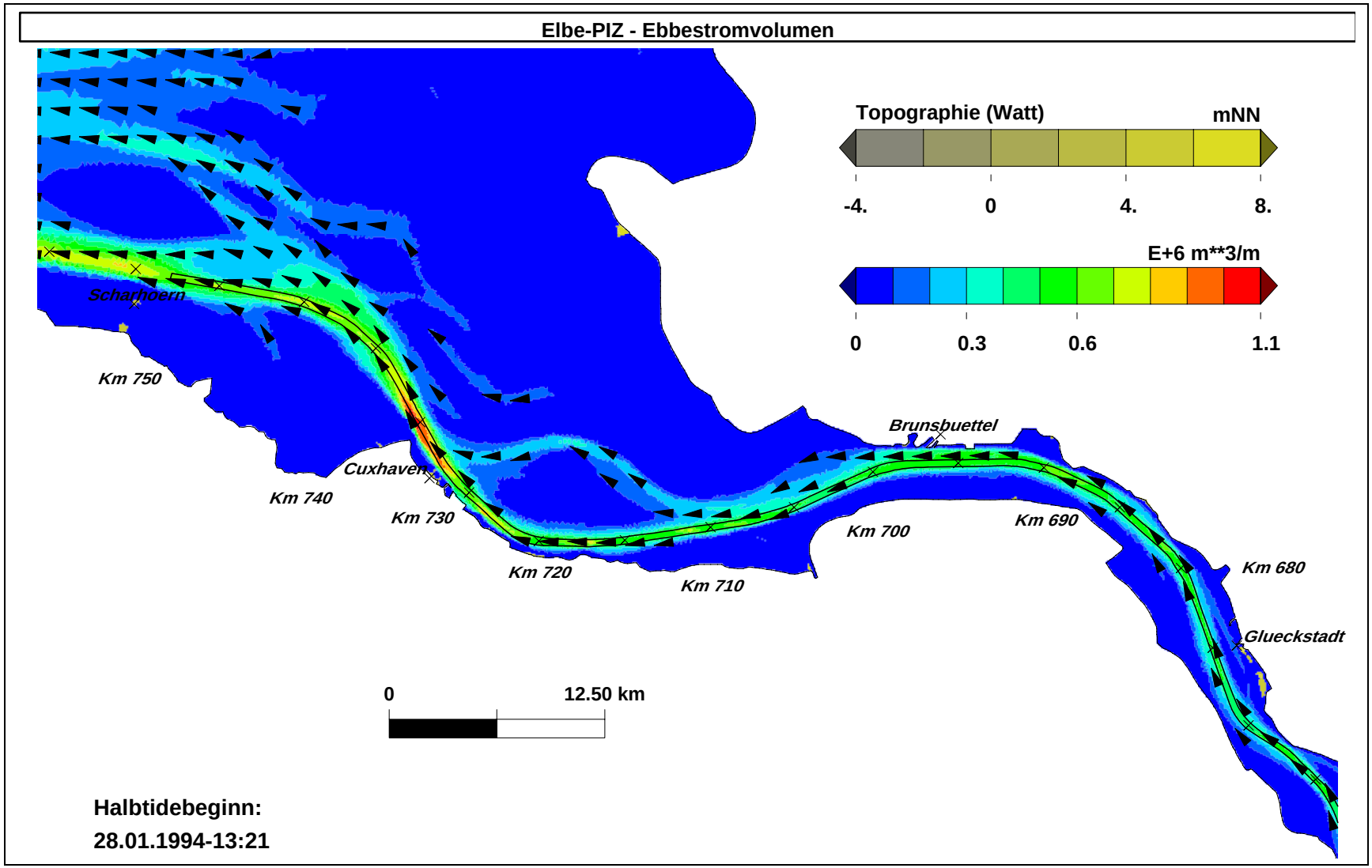

Bild F.17: *Ebbestromvolumen der am 28. 1. 1994 um 13:21 Uhr bei Elbe – km 748 beginnenden Ebbe während der Sturmflut SF94 im Teilgebiet West für den planerischen Ist – Zustand* PIZ. *Eine Farbstufe entspricht einem Volumen von* $1 \cdot 10^{+6} m^3/m$.

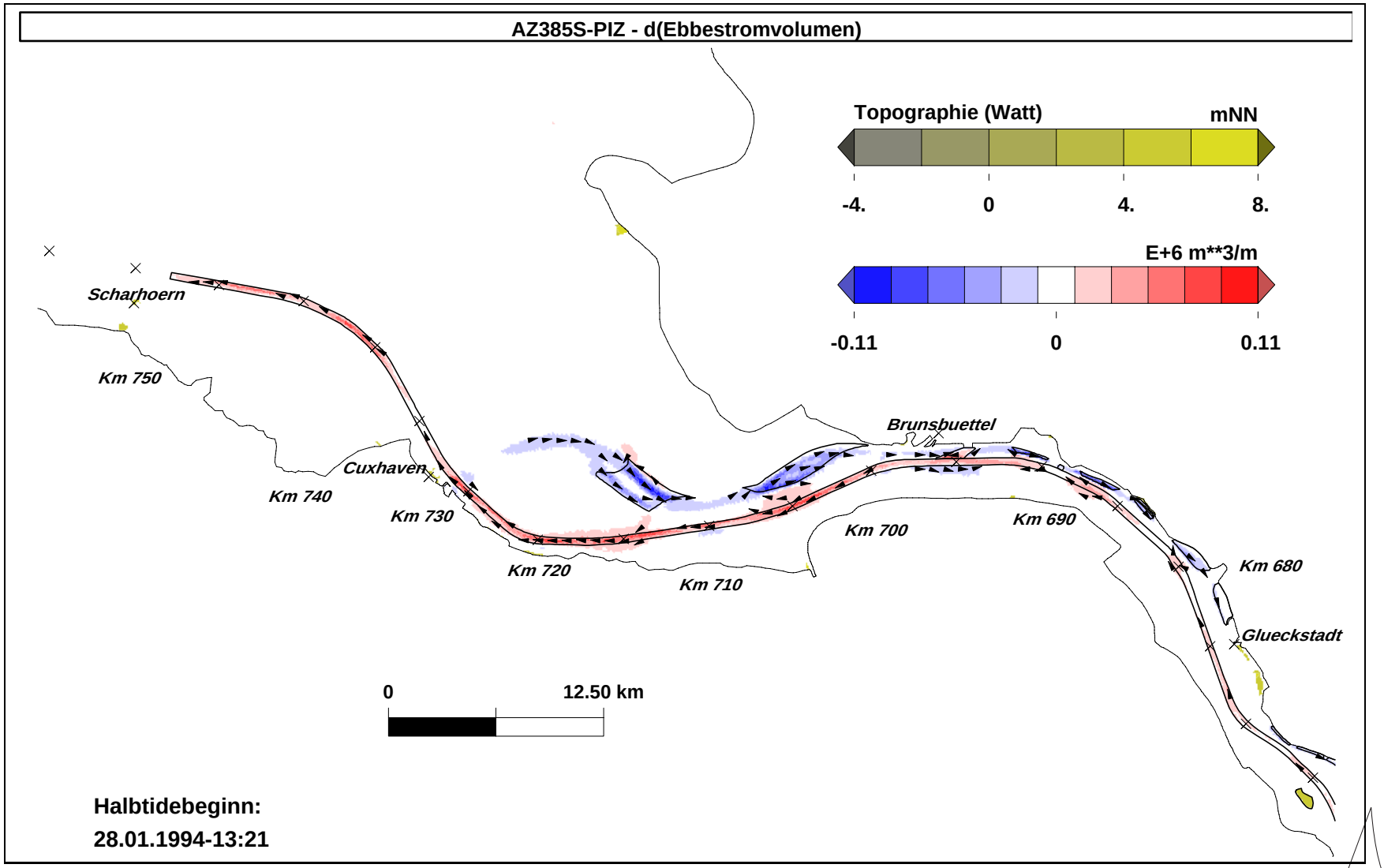

Bild F.18: *Änderung des Ebbestromvolumens während der Sturmflut SF94 im Teilgebiet West (AZ385S – PIZ). Eine Farbstufe entspricht ausbaubedingten Änderungen des Ebbestromvolumens von 0,02 $\cdot 10^{+6} m^3/m$. In den weiß dargestellten Gebieten sind die Änderungen kleiner als $\pm$ 0,01 $\cdot 10^{+6} m^3/m$.*

G Sturmflut SF99: Elbe Teilgebiet West

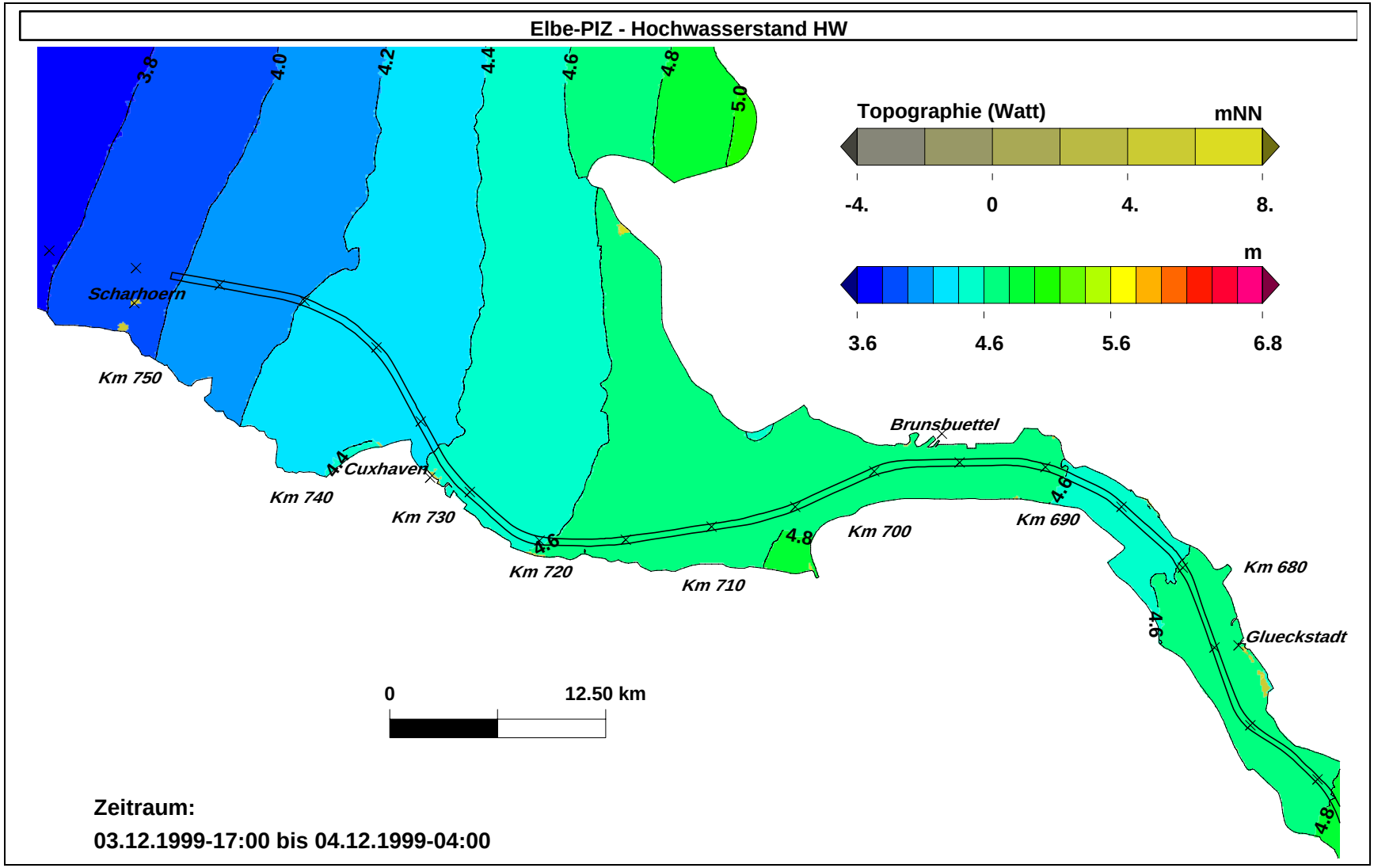

Bild G.1: *Sturmflutscheitelwasserstand HW für die Sturmflut SF99 im Teilgebiet West für den planerischen Ist – Zustand* PIZ. *Eine Farbstufe entspricht einem Unterschied im HW von 20 cm.*

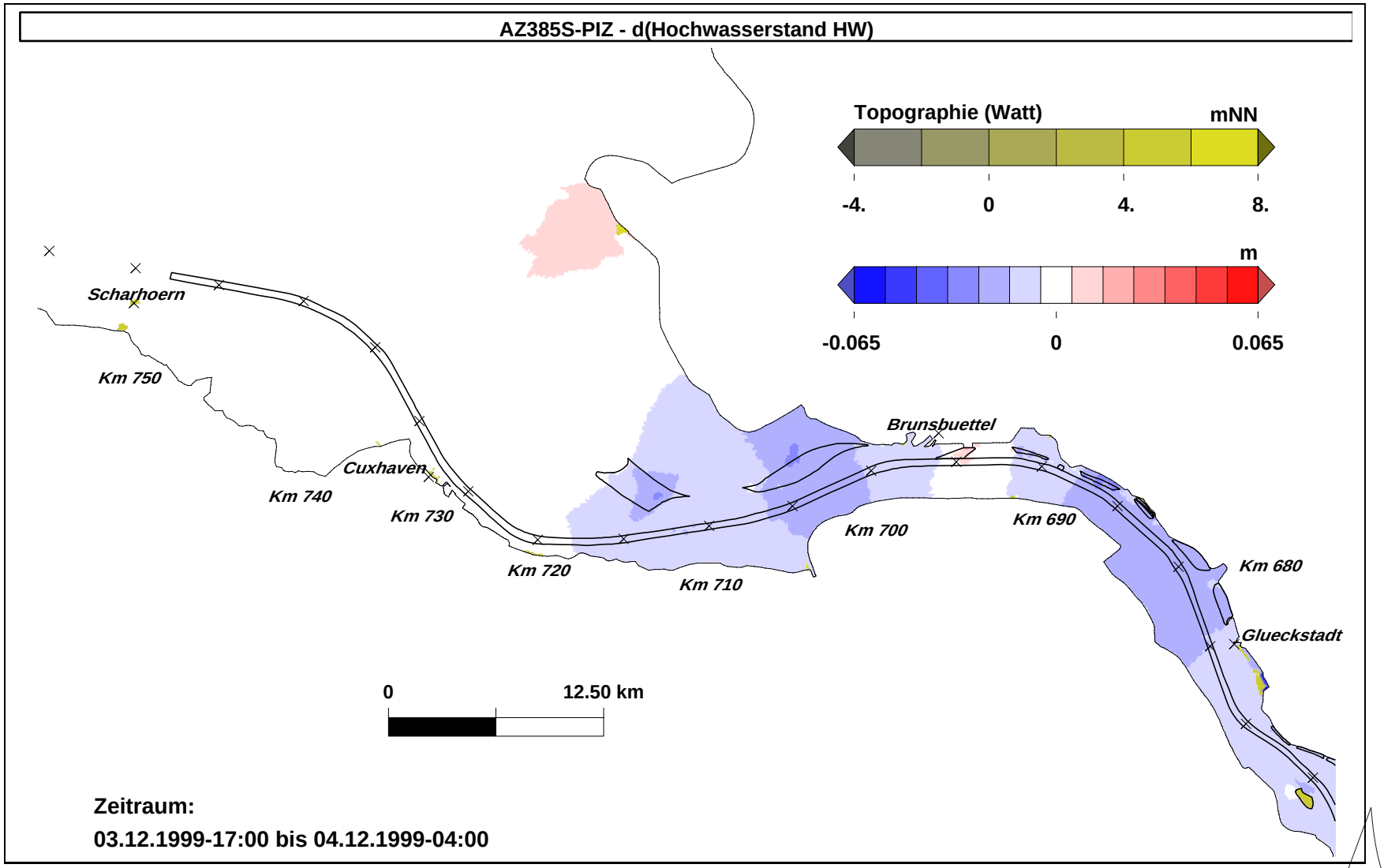

Bild G.2: *Änderung des Sturmflutscheitelwasserstand HW für die Sturmflut SF99 im Teilgebiet West (AZ385S – PIZ). Eine Farbstufe entspricht einem Unterschied im HW von 1 cm. In den weiß dargestellten Gebieten ändert sich das HW ausbaubedingt um weniger als ± 0,5 cm.*

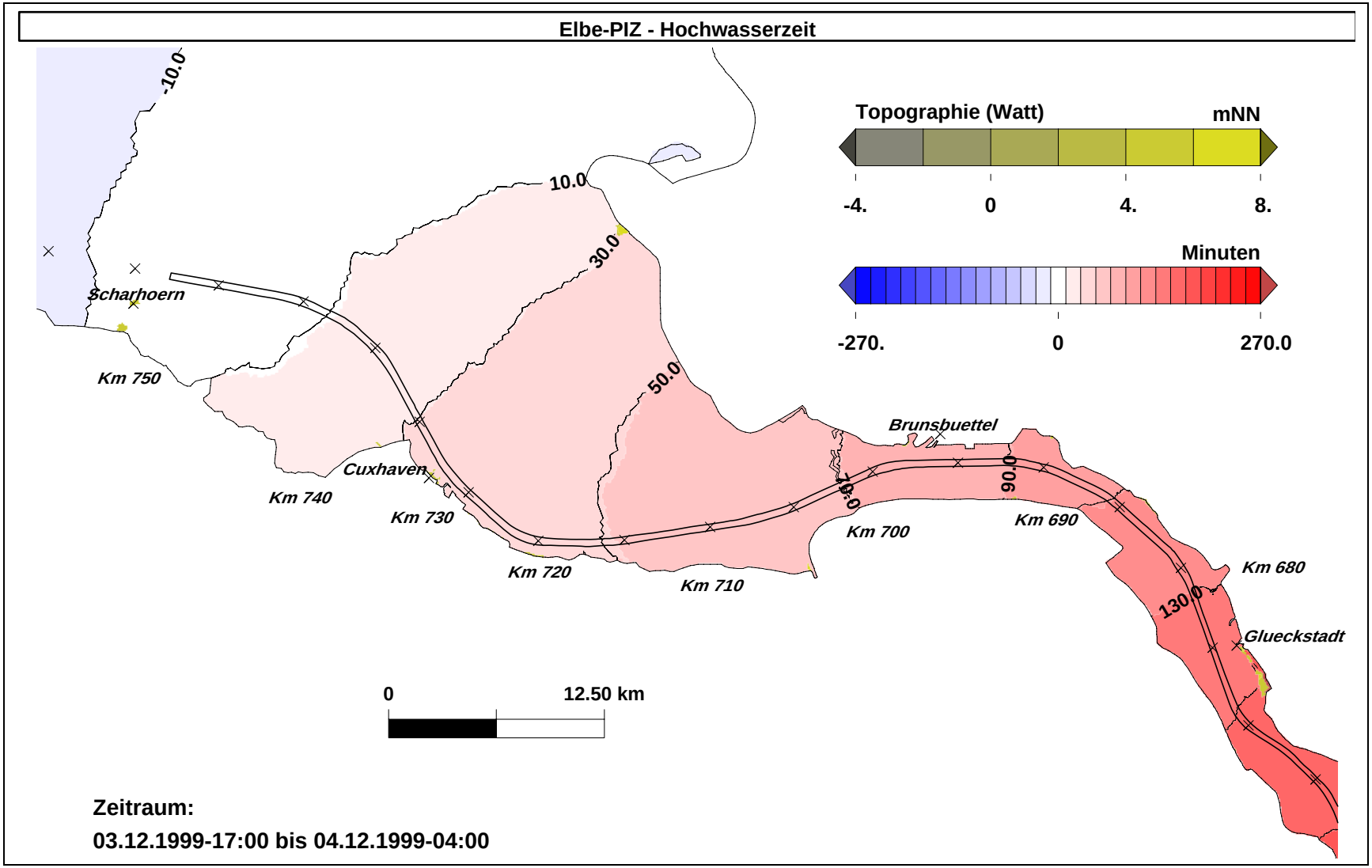

Bild G.3: *Eintrittszeit Sturmflutscheitelwasserstand tHW für die Sturmflut SF99 im Teilgebiet West für den planerischen Ist – Zustand* PIZ. *Eine Farbstufe entspricht einem Eintrittszeitunterschied von 20 Minuten bezogen auf Elbe – km 748 in der Elbmündung. In den weiß dargestellten Gebieten tritt der Sturmflutscheitel ± 10 Minuten vor/nach Elbe – km 748 ein.*

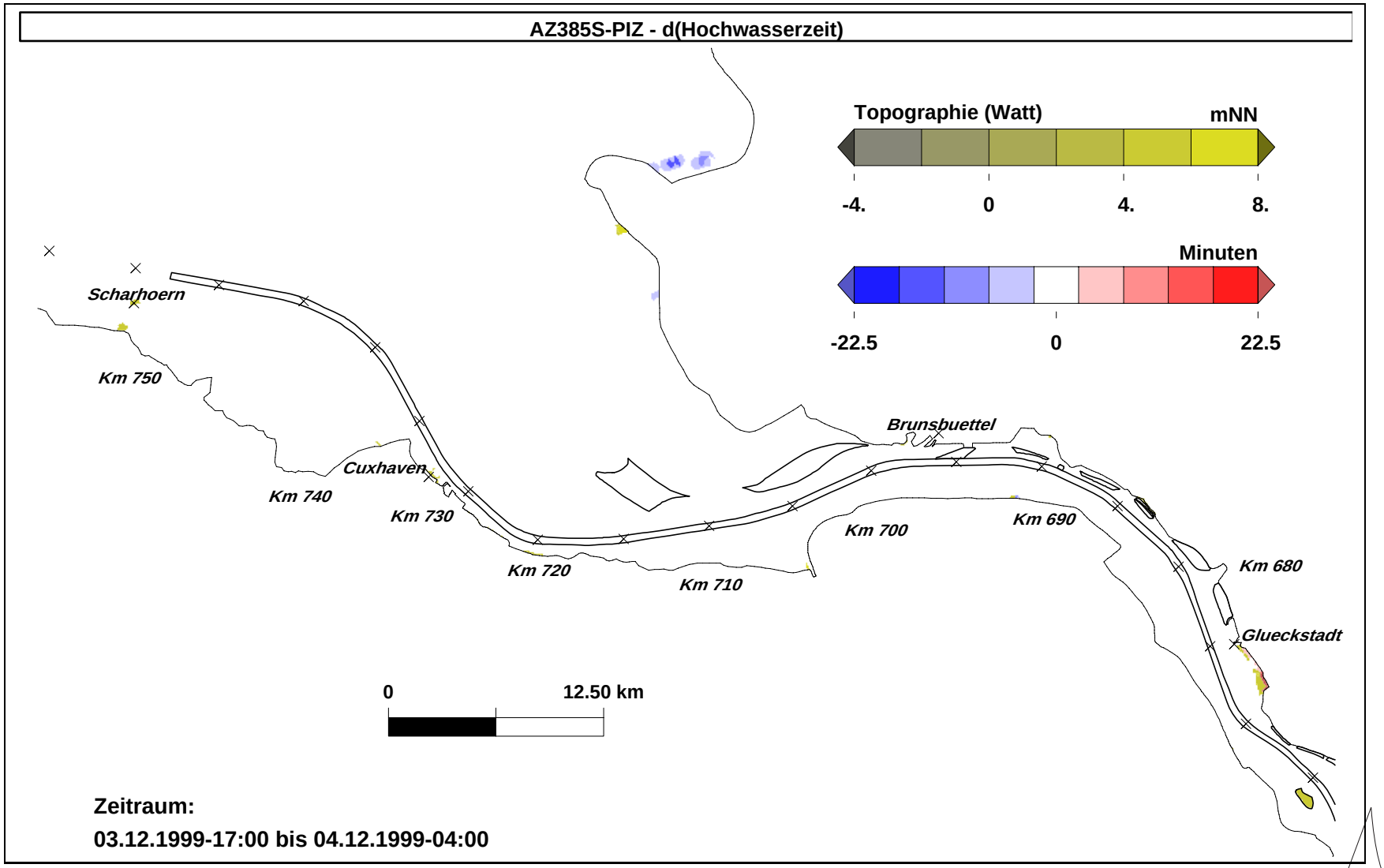

Bild G.4: *Änderung der Eintrittszeit des Sturmflutscheitelwasserstand tHW für die Sturmflut SF99 im Teilgebiet West (AZ385S – PIZ). Eine Farbstufe entspricht einer ausbaubedingten Änderung der Eintrittszeit von 5 Minuten. In den weiß dargestellten Gebieten sind die Änderungen kleiner als ± 2,5 Minuten.*

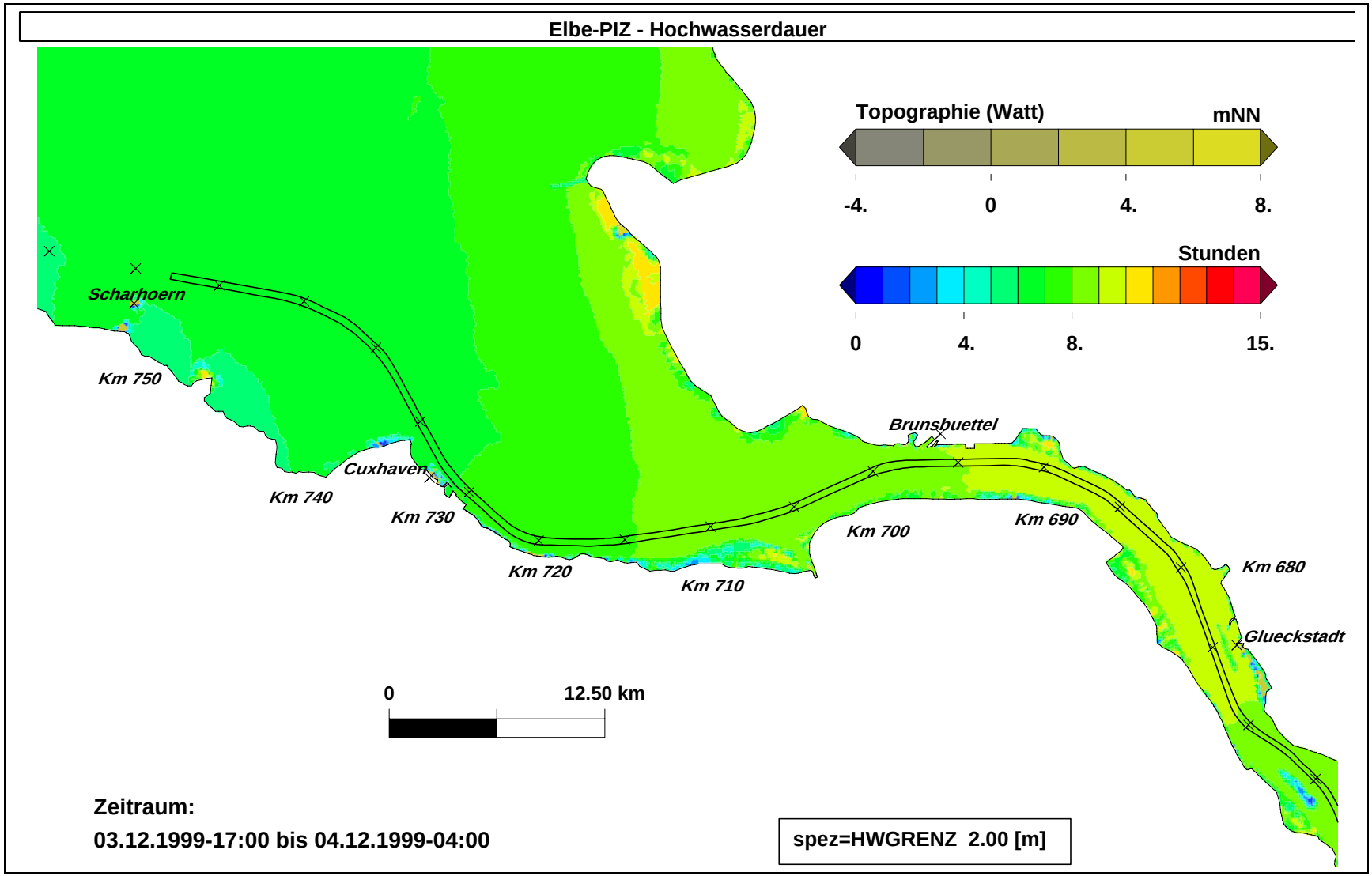

Bild G.5: *Dauer hoher Wasserstände > NN + 2,00 m während der Sturmflut SF99 im Teilgebiet West für den planerischen Ist – Zustand* PIZ. *Eine Farbstufe entspricht einer Dauer der Wasserstandshöhe von 1 Stunde.*

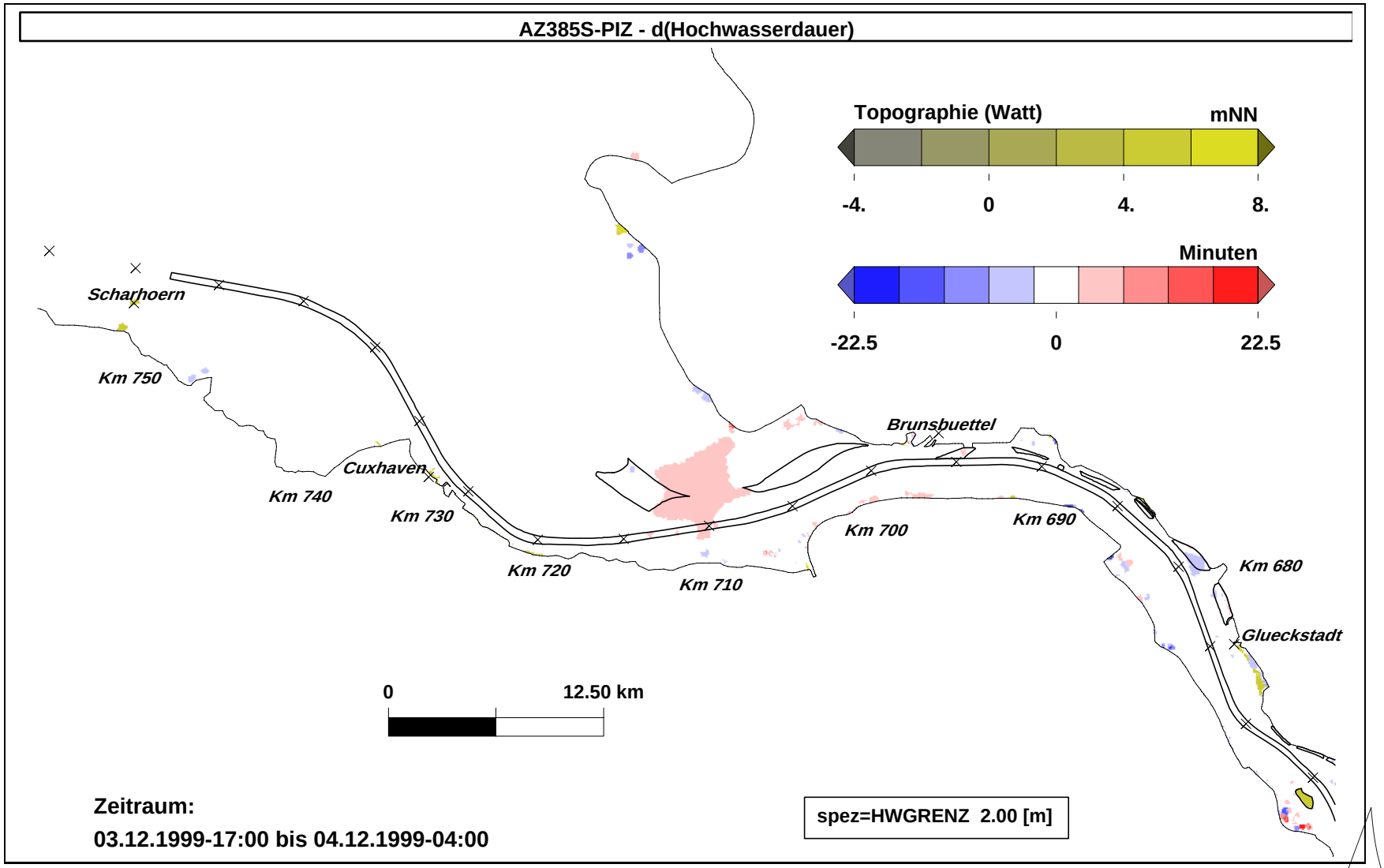

Bild G.6: *Änderung der Dauer hoher Wasserstände $> NN + 2{,}00\,m$ während der Sturmflut SF99 im Teilgebiet West (AZ385S – PIZ). Eine Farbstufe entspricht ausbaubedingten Änderungen der Dauer von 5 Minuten. In den weiß dargestellten Gebieten sind die Änderungen kleiner als $\pm 2{,}5$ Minuten.*

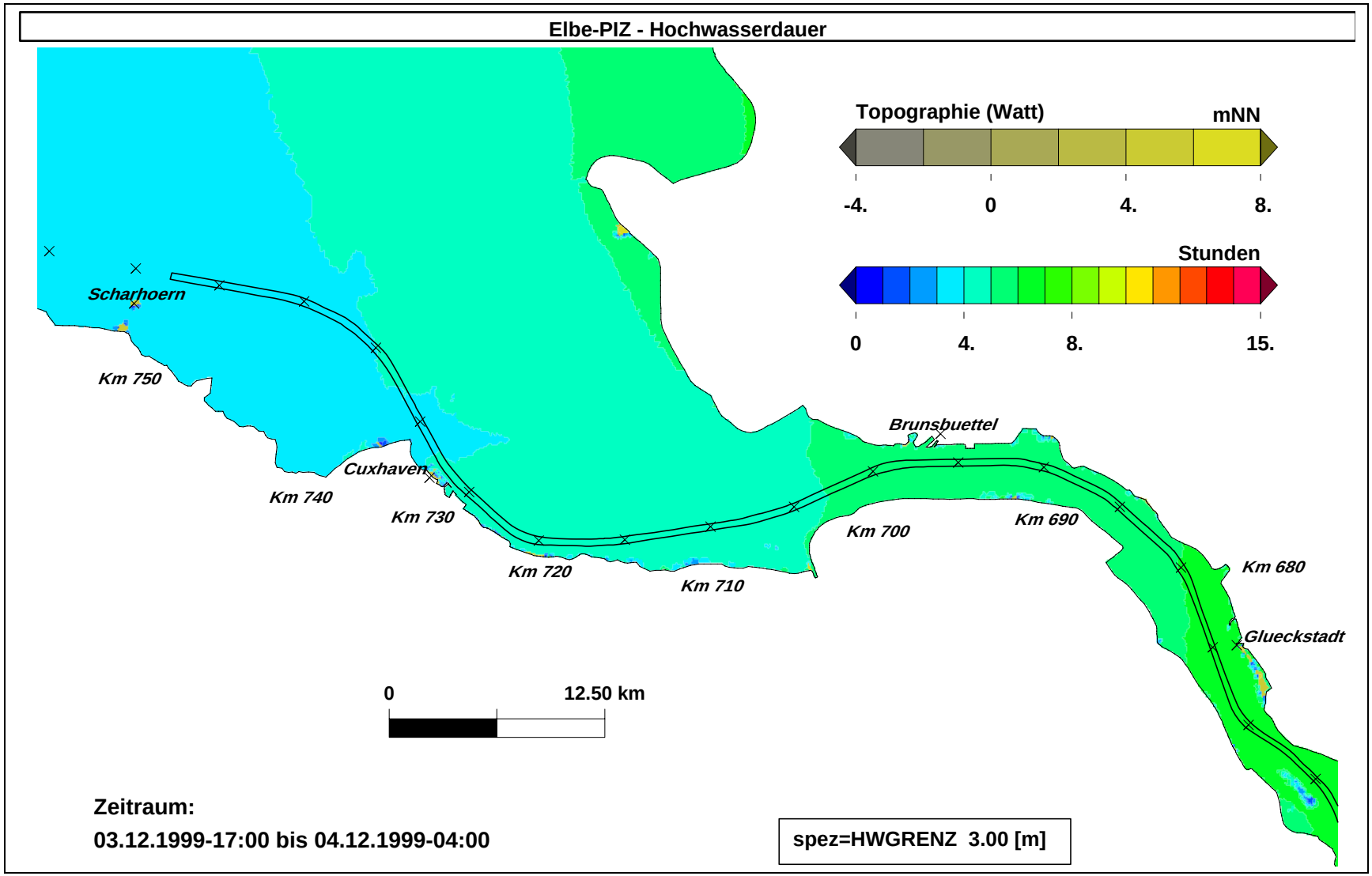

Bild G.7: *Dauer hoher Wasserstände > NN + 3,00 m während der Sturmflut SF99 im Teilgebiet West für den planerischen Ist – Zustand* PIZ. *Eine Farbstufe entspricht einer Dauer der Wasserstandshöhe von 1 Stunde.*

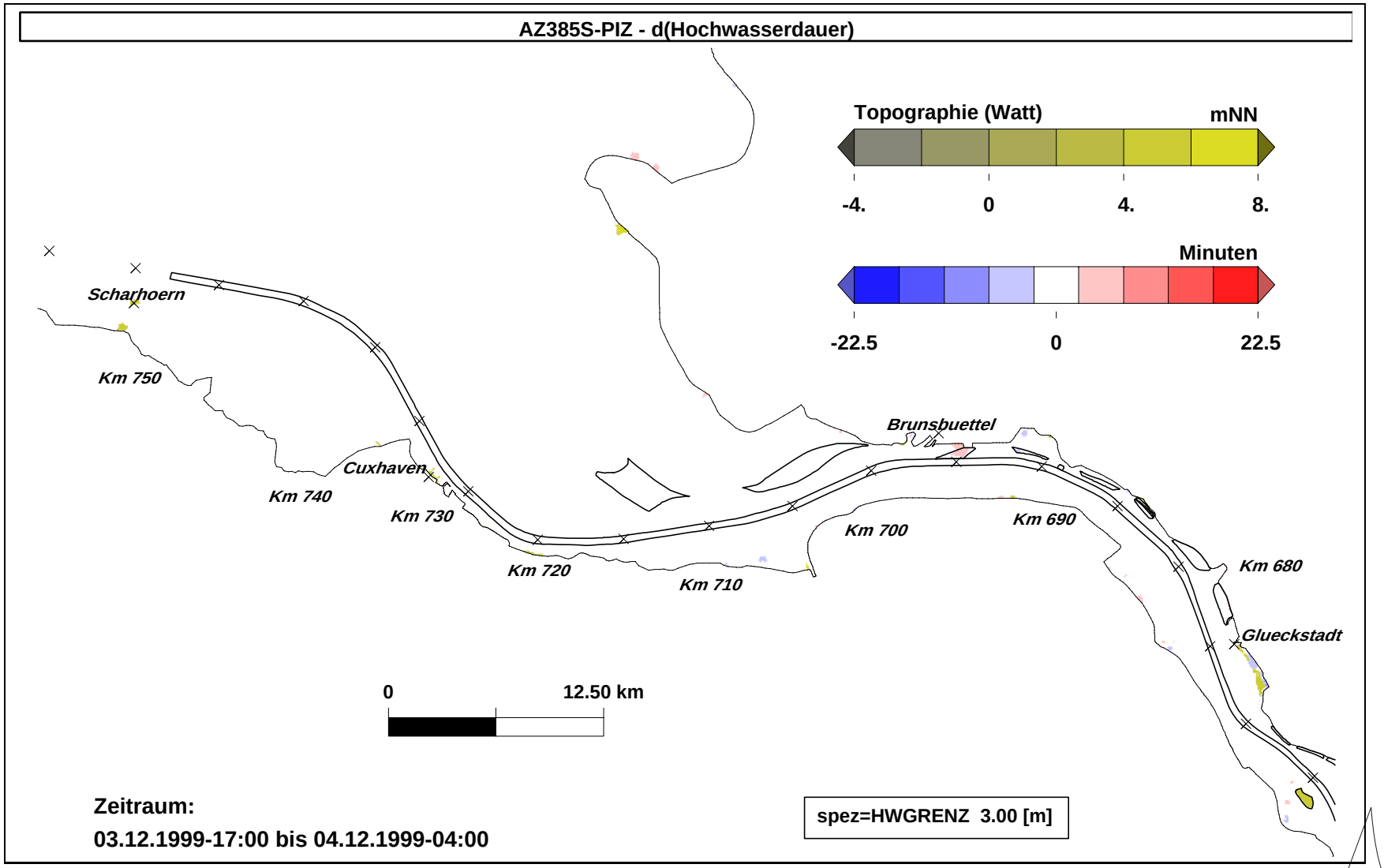

Bild G.8: *Änderung der Dauer hoher Wasserstände $> NN + 3{,}00\,m$ während der Sturmflut SF99 im Teilgebiet West ($AZ385S - PIZ$). Eine Farbstufe entspricht ausbaubedingten Änderungen der Dauer von 5 Minuten. In den weiß dargestellten Gebieten sind die Änderungen kleiner als $\pm 2{,}5$ Minuten.*

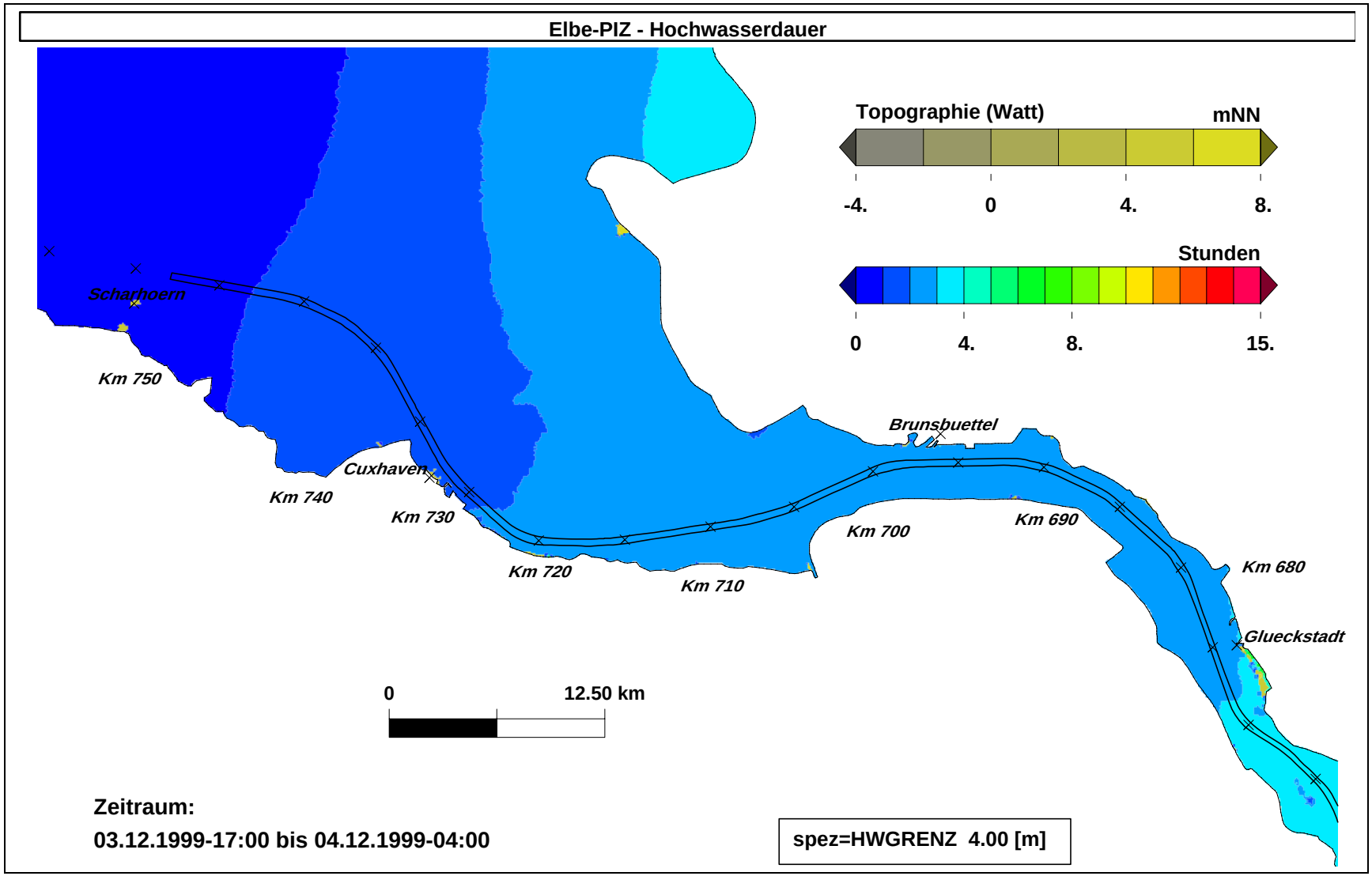

Bild G.9: *Dauer hoher Wasserstände > NN + 4,00 m während der Sturmflut SF99 im Teilgebiet West für den planerischen Ist – Zustand* PIZ. *Eine Farbstufe entspricht einer Dauer der Wasserstandshöhe von 1 Stunde.*

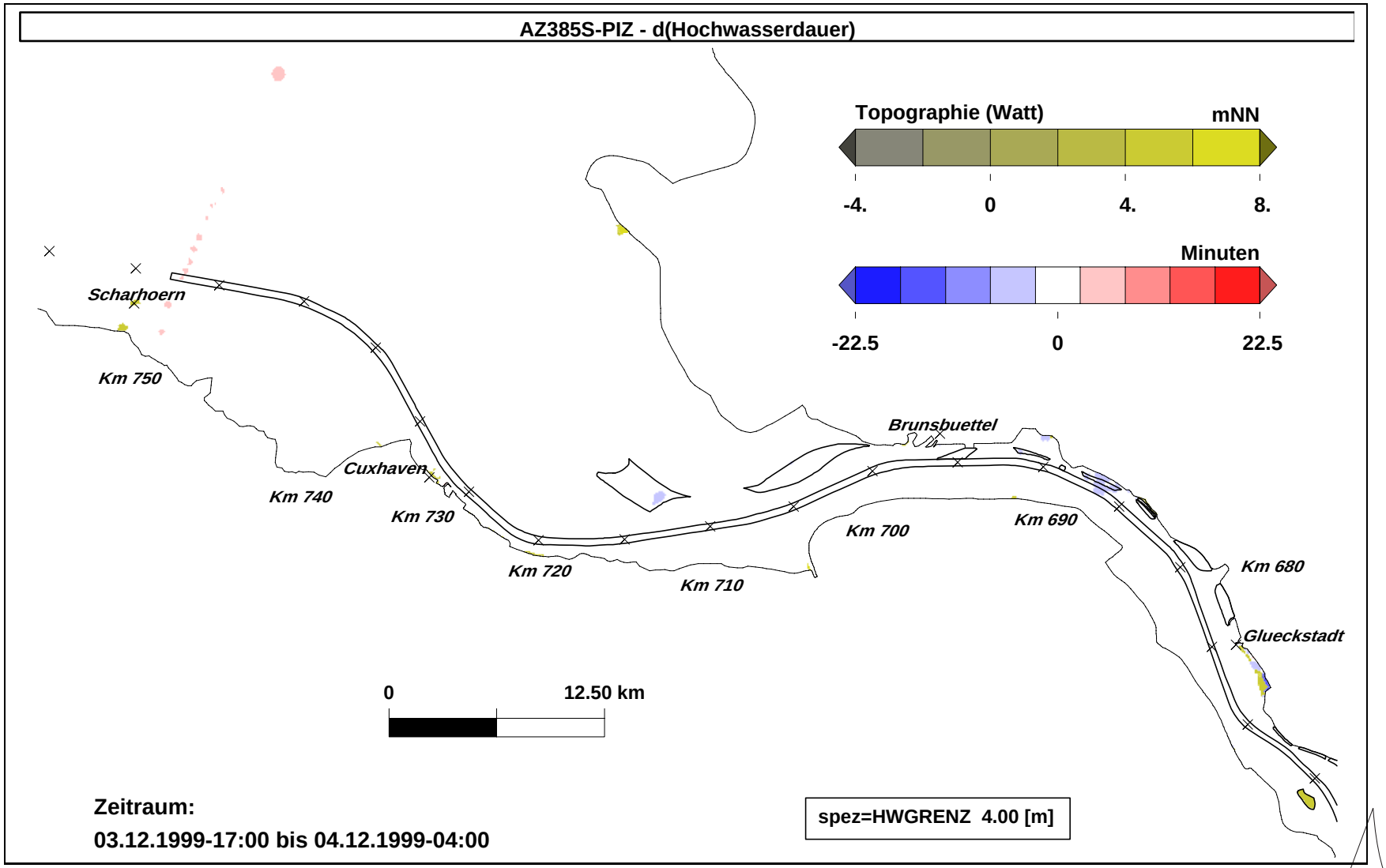

Bild G.10: *Änderung der Dauer hoher Wasserstände $> NN + 4{,}00\,m$ während der Sturmflut SF99 im Teilgebiet West ($AZ385S - PIZ$). Eine Farbstufe entspricht ausbaubedingten Änderungen der Dauer von 5 Minuten. In den weiß dargestellten Gebieten sind die Änderungen kleiner als $\pm 2{,}5$ Minuten.*

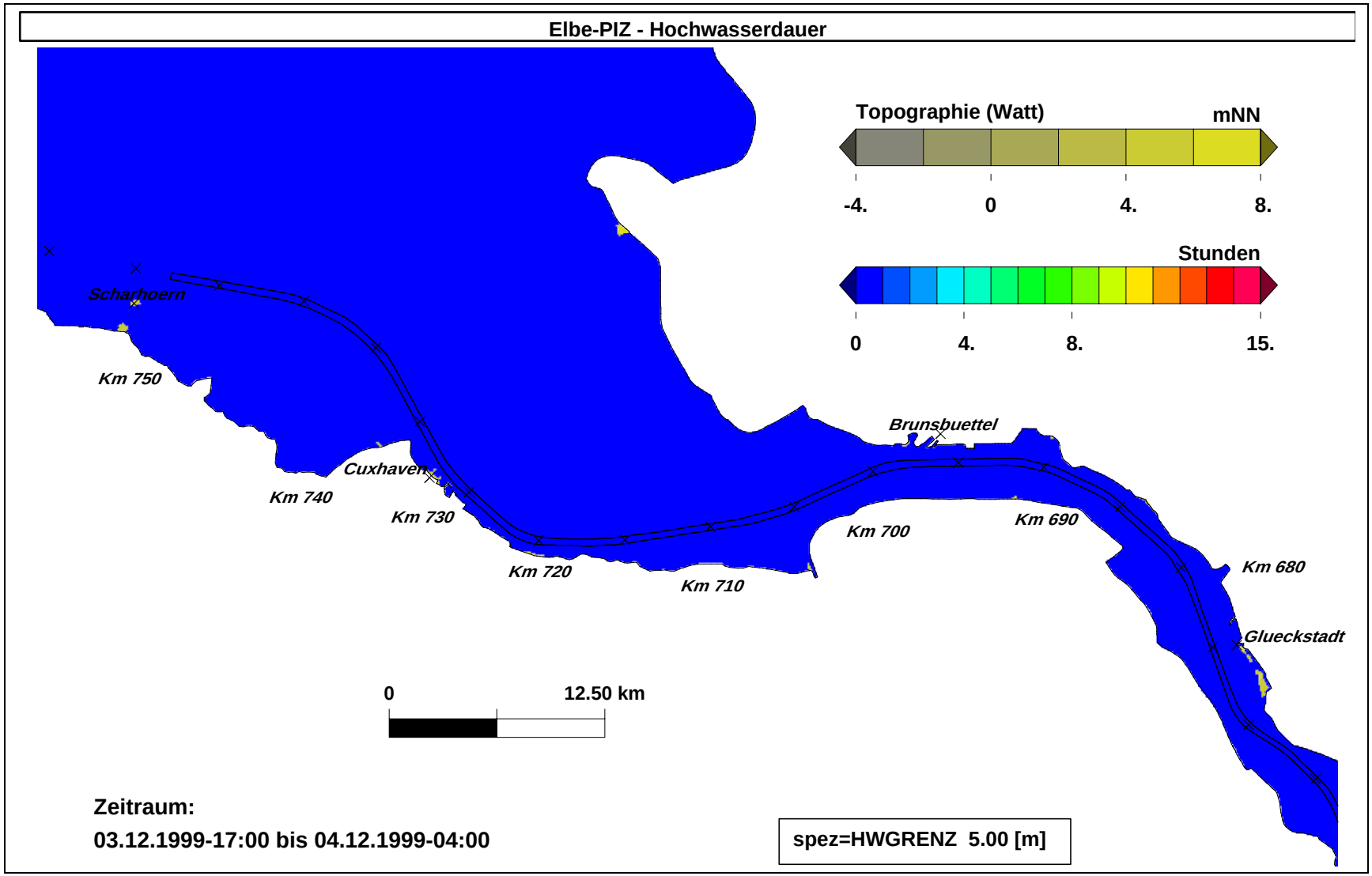

Bild G.11: *Dauer hoher Wasserstände > NN + 5,00 m während der Sturmflut SF99 im Teilgebiet West für den planerischen Ist – Zustand* PIZ. *Eine Farbstufe entspricht einer Dauer der Wasserstandshöhe von 1 Stunde.*

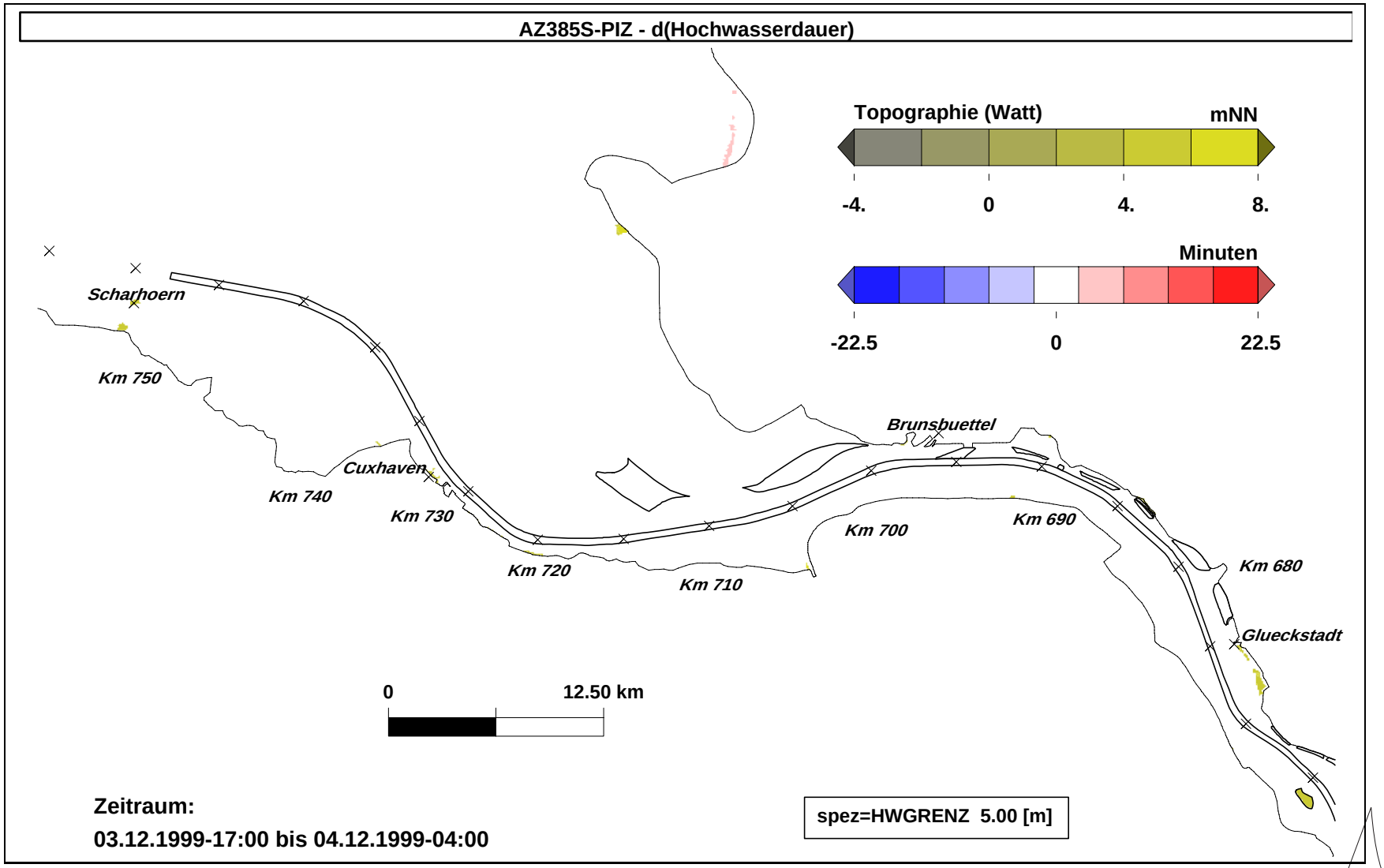

Bild G.12: *Änderung der Dauer hoher Wasserstände $> NN + 5{,}00\,m$ während der Sturmflut SF99 im Teilgebiet West ($AZ385S - PIZ$). Eine Farbstufe entspricht ausbaubedingten Änderungen der Dauer von 5 Minuten. In den weiß dargestellten Gebieten sind die Änderungen kleiner als $\pm 2{,}5$ Minuten.*

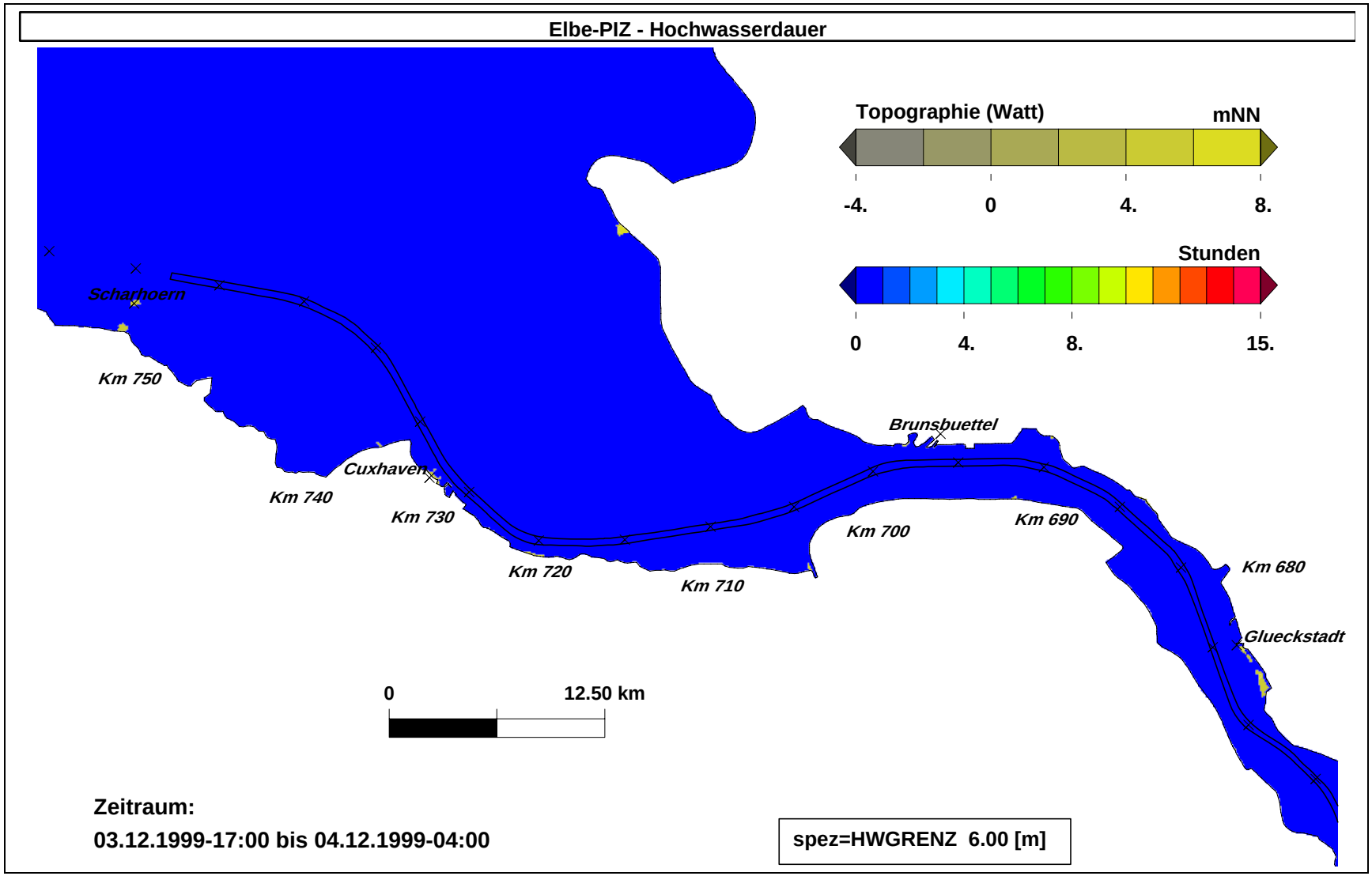

Bild G.13: *Dauer hoher Wasserstände > NN + 6,00 m während der Sturmflut SF99 im Teilgebiet West für den planerischen Ist – Zustand* PIZ. *Eine Farbstufe entspricht einer Dauer der Wasserstandshöhe von 1 Stunde.*

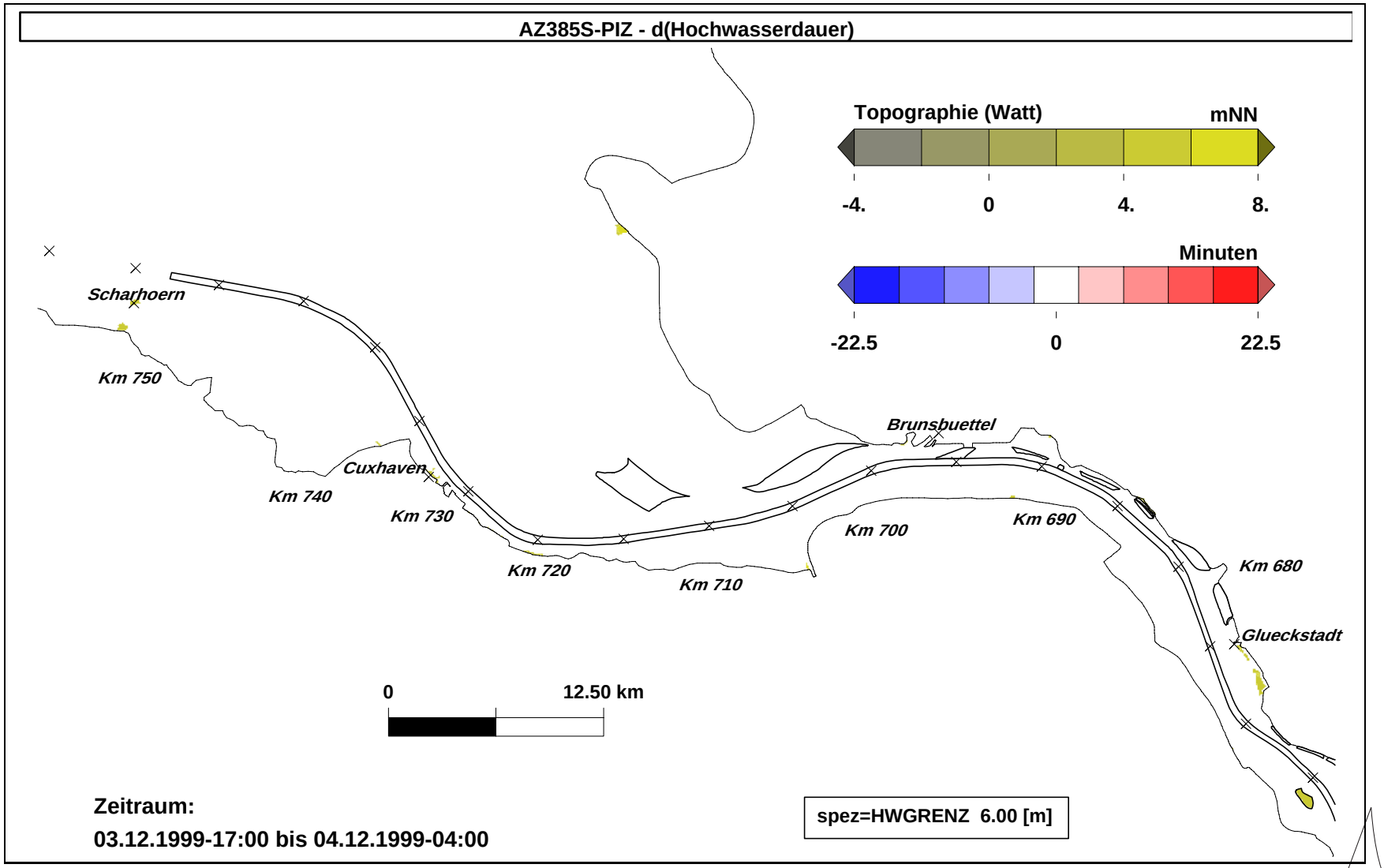

Bild G.14: *Änderung der Dauer hoher Wasserstände $> NN + 6{,}00\,m$ während der Sturmflut SF99 im Teilgebiet West ($AZ385S - PIZ$). Eine Farbstufe entspricht ausbaubedingten Änderungen der Dauer von 5 Minuten. In den weiß dargestellten Gebieten sind die Änderungen kleiner als $\pm 2{,}5$ Minuten.*

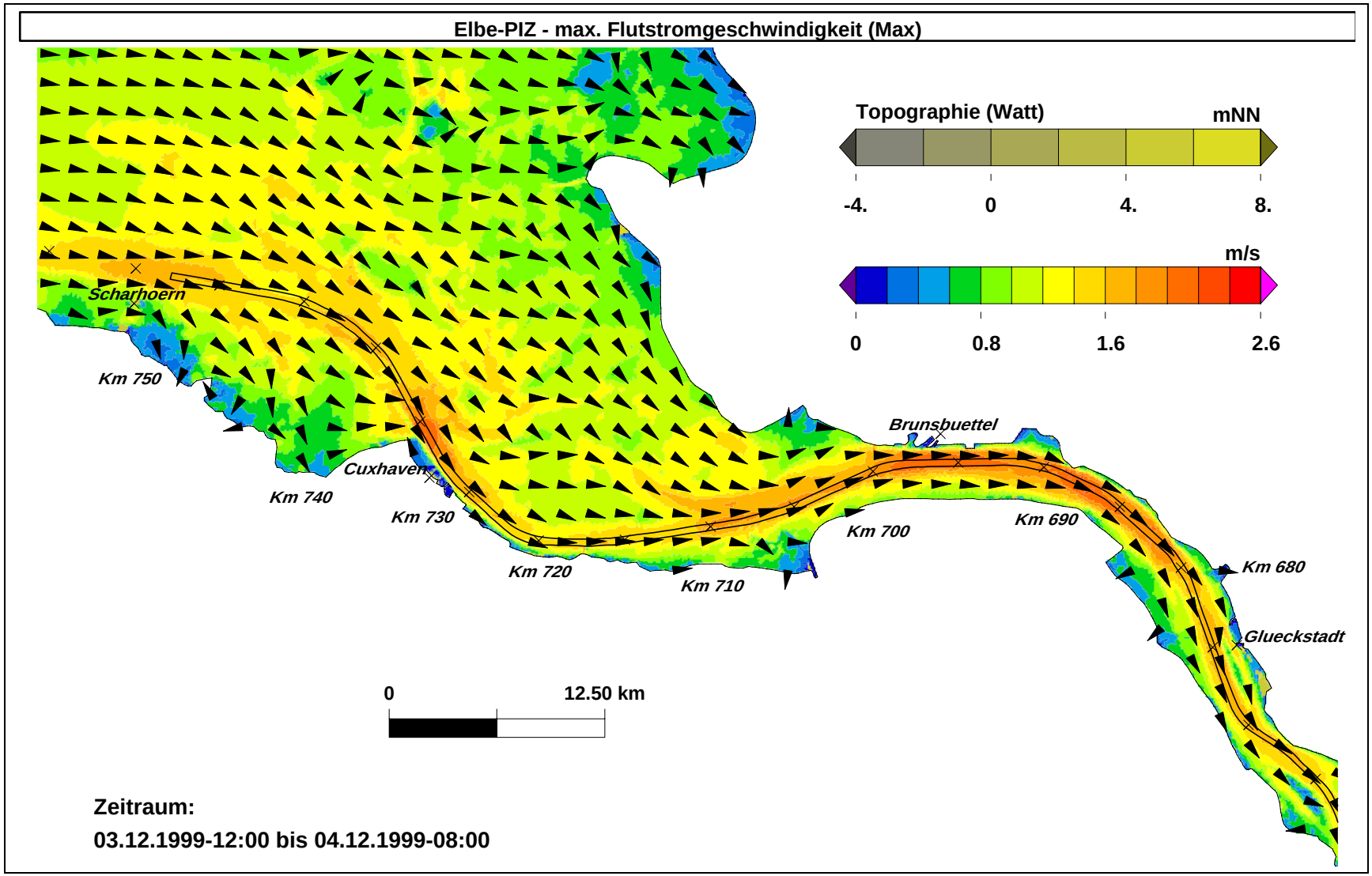

Bild G.15: *Maximale Flutstromgeschwindigkeit während der Sturmflut SF99 im Teilgebiet West für den planerischen Ist – Zustand* PIZ. *Eine Farbstufe entspricht einer Geschwindigkeit von 0,2 m/s.*

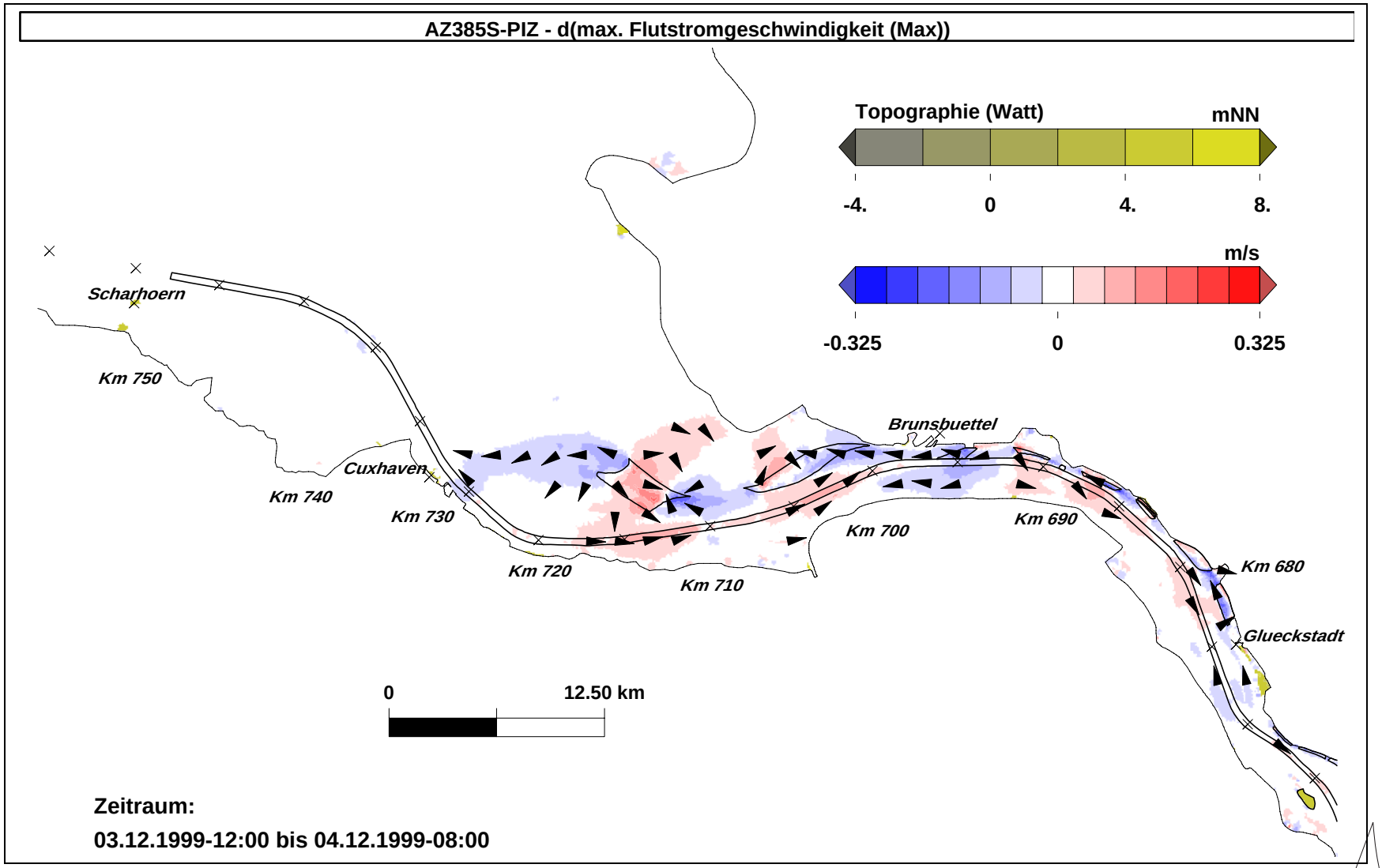

Bild G.16: *Änderung der maximalen Flutstromgeschwindigkeit während der Sturmflut SF99 im Teilgebiet West (AZ385S – PIZ). Eine Farbstufe entspricht ausbaubedingten Änderungen der maximalen Flutstromgeschwindigkeit von 0,05 m/s. In den weiß dargestellten Gebieten sind die Änderungen kleiner als ± 0,025 m/s.*

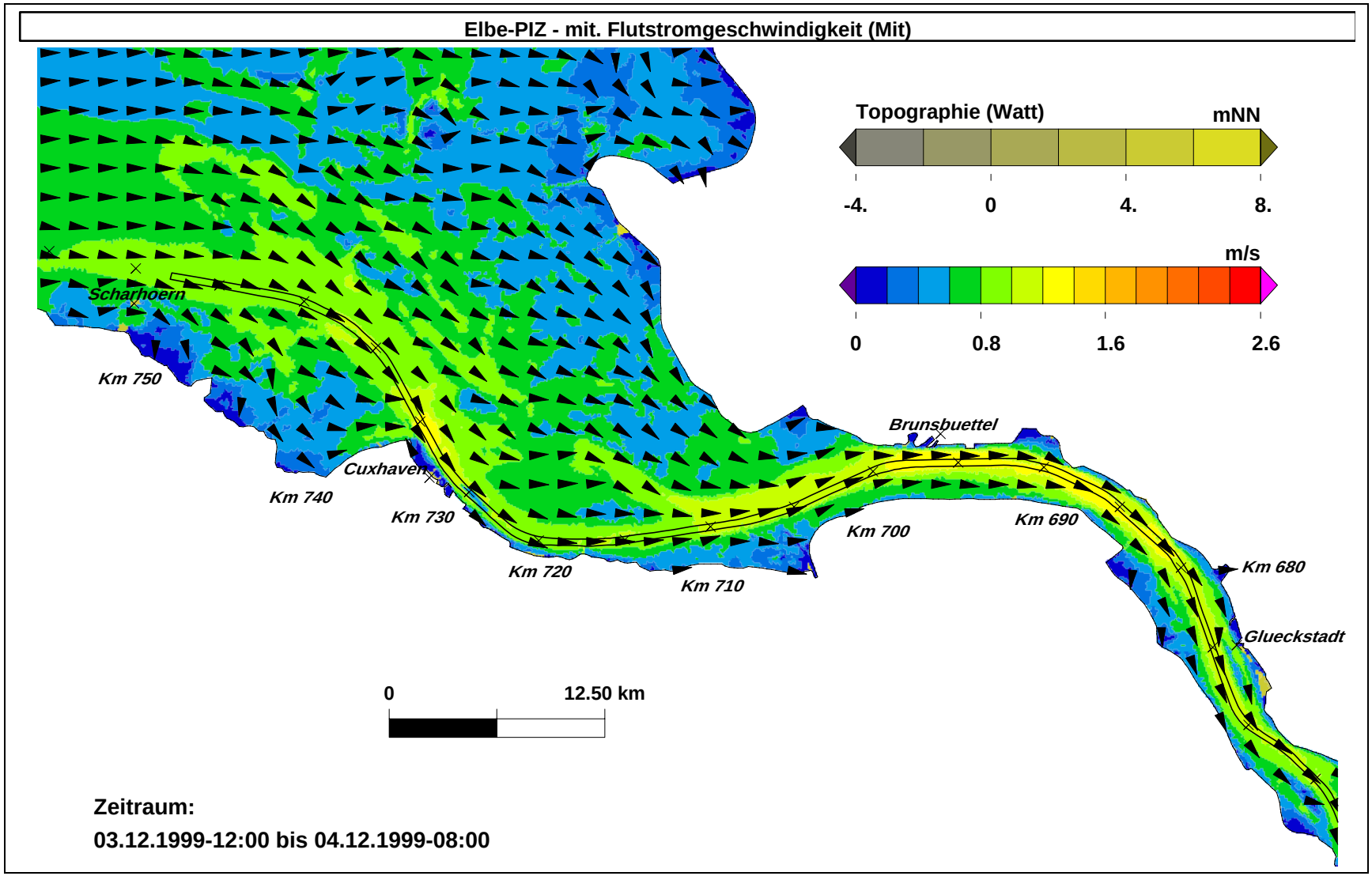

Bild G.17: *Mittlere Flutstromgeschwindigkeit während der Sturmflut SF99 im Teilgebiet West für den planerischen Ist – Zustand* PIZ. *Eine Farbstufe entspricht einer Geschwindigkeit von 0,2 m/s.*

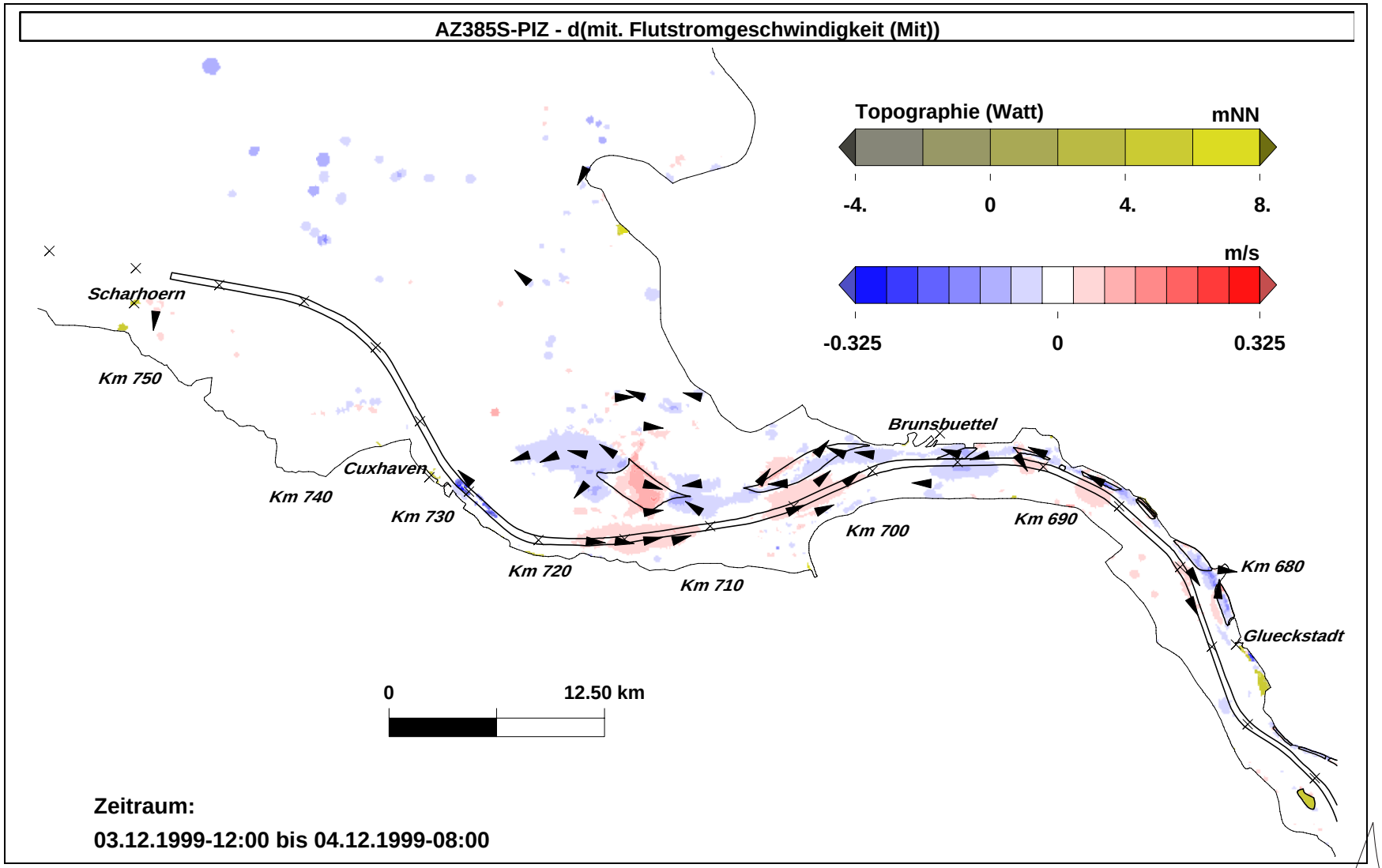

Bild G.18: *Änderung der mittleren Flutstromgeschwindigkeit während der Sturmflut SF99 im Teilgebiet West (AZ385S – PIZ). Eine Farbstufe entspricht ausbaubedingten Änderungen der mittleren Flutstromgeschwindigkeit von 0,05 m/s. In den weiß dargestellten Gebieten sind die Änderungen kleiner als ± 0,025 m/s.*

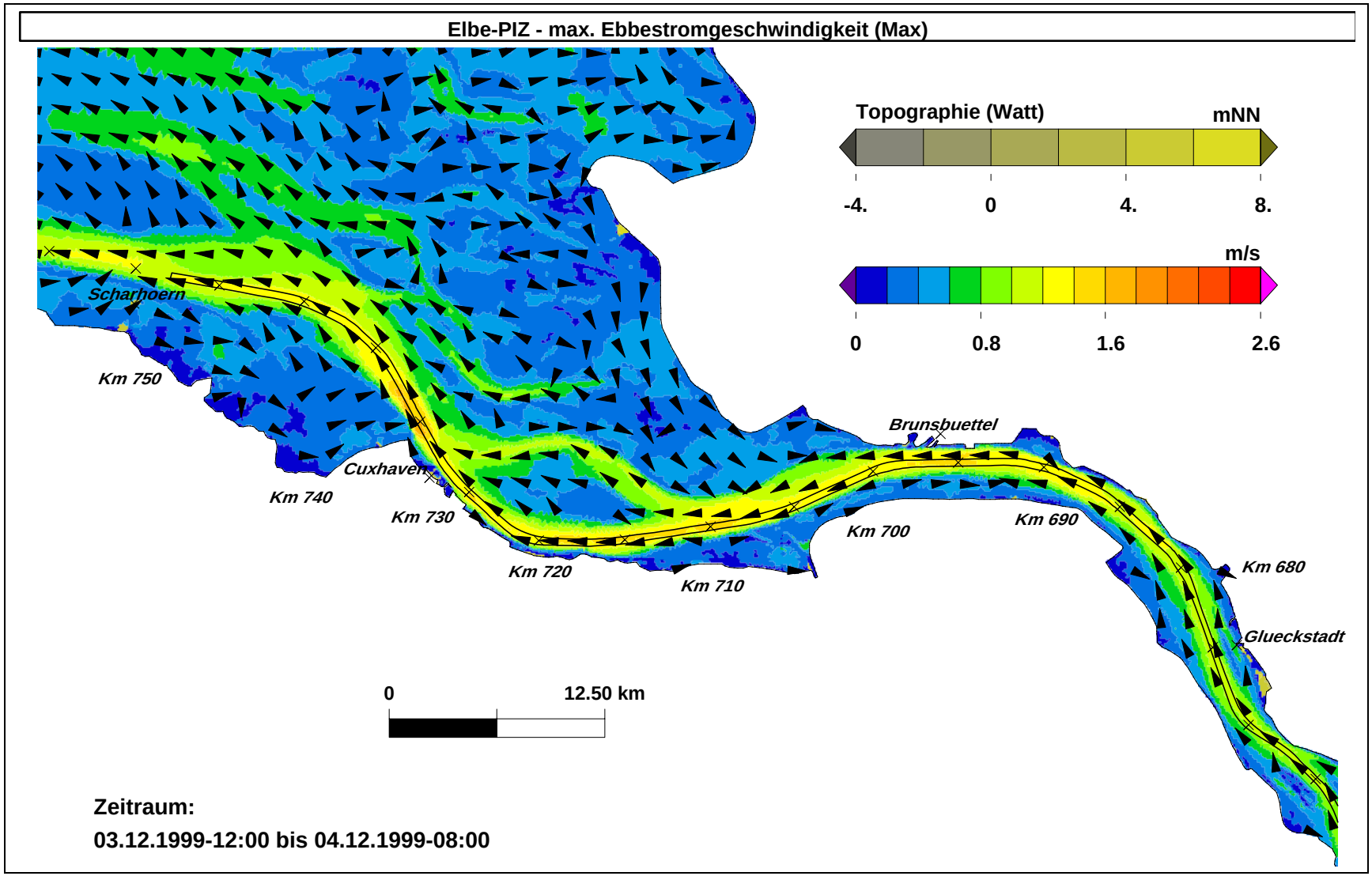

Bild G.19: *Maximale Ebbestromgeschwindigkeit während der Sturmflut SF99 im Teilgebiet West für den planerischen Ist – Zustand* PIZ. *Eine Farbstufe entspricht einer Geschwindigkeit von 0,2 m/s.*

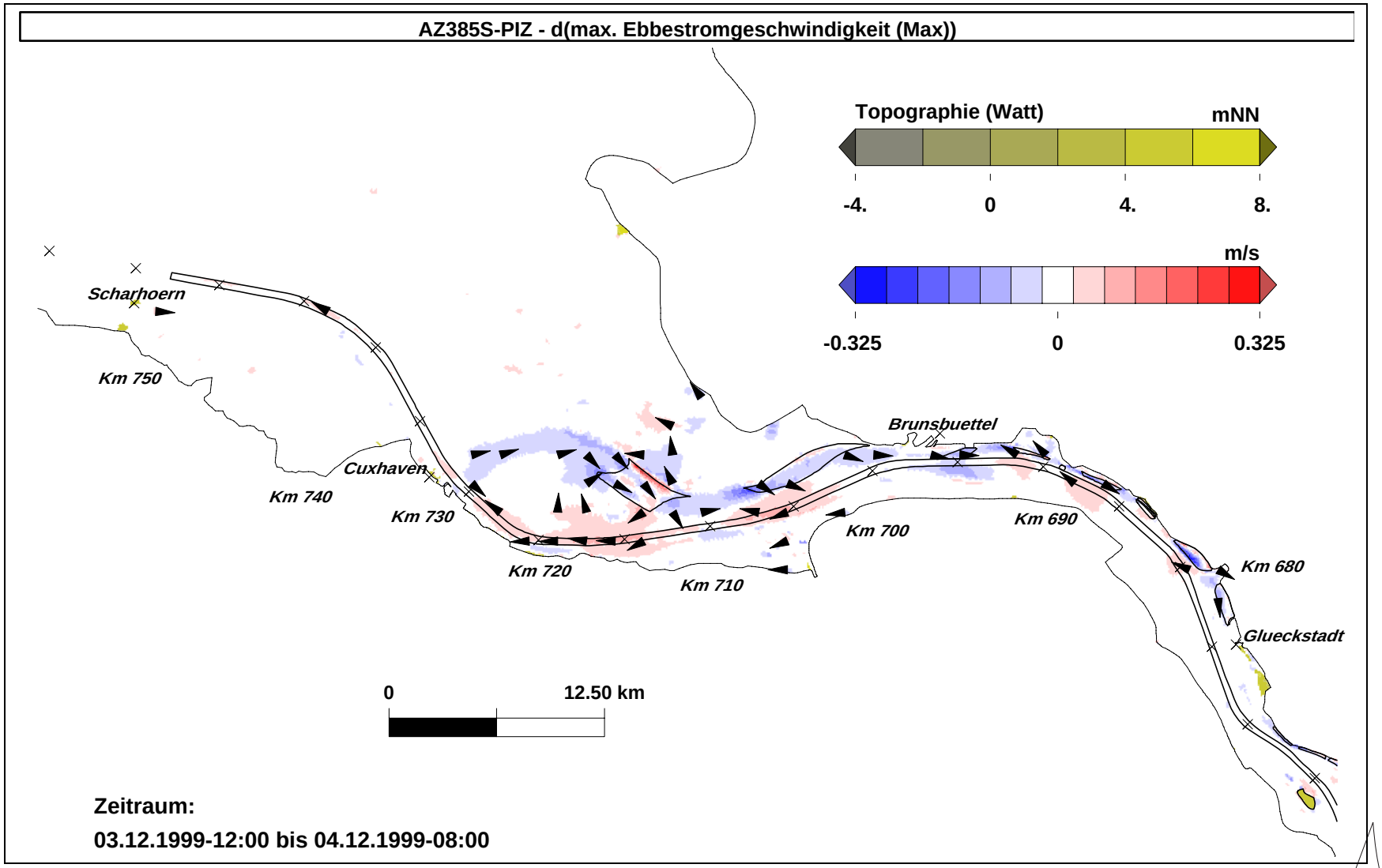

Bild G.20: *Änderung der maximalen Ebbestromgeschwindigkeit während der Sturmflut SF99 im Teilgebiet West (AZ385S – PIZ). Eine Farbstufe entspricht ausbaubedingten Änderungen der maximalen Flutstromgeschwindigkeit von 0,05 m/s. In den weiß dargestellten Gebieten sind die Änderungen kleiner als ± 0,025 m/s.*

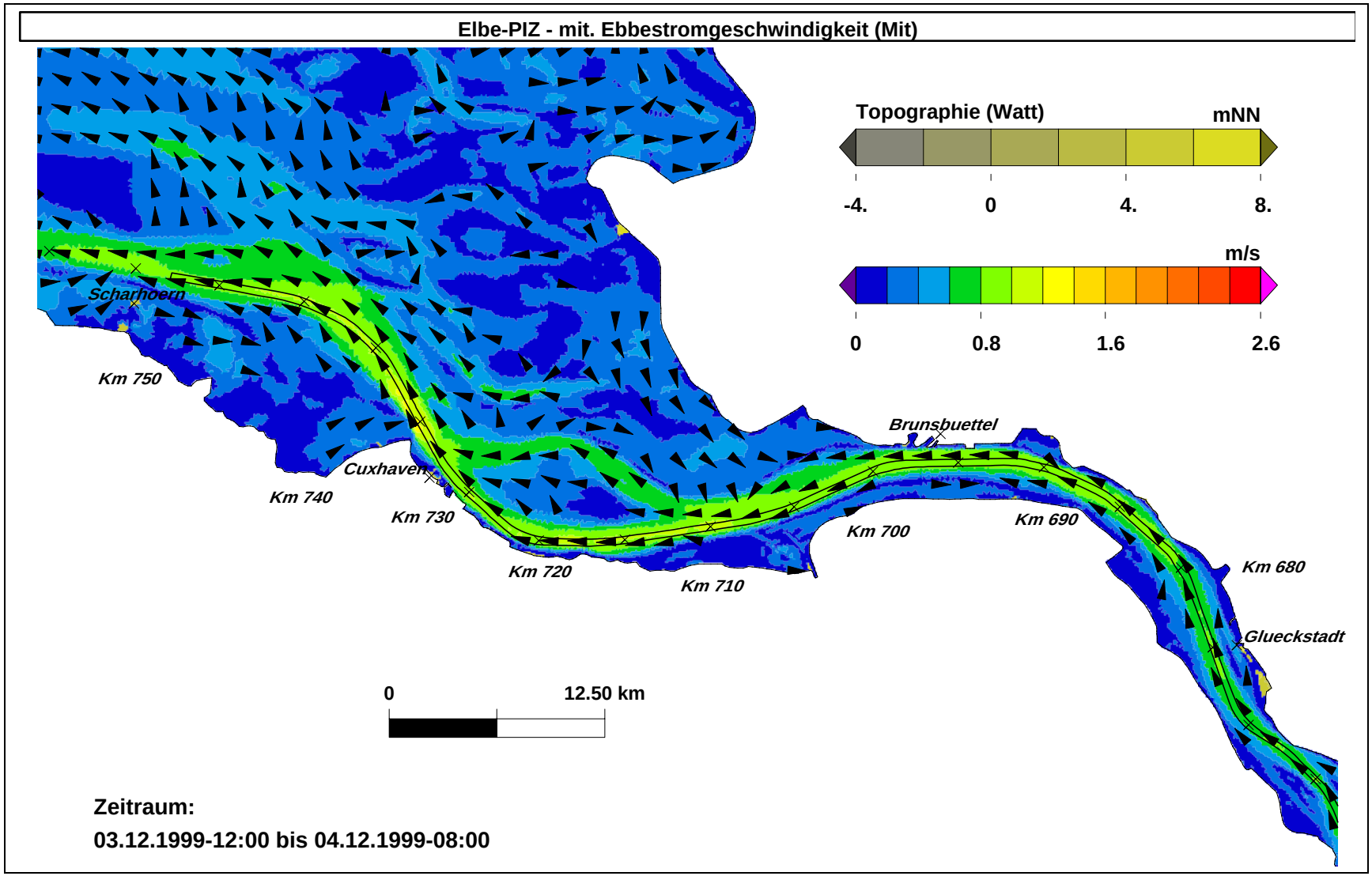

Bild G.21: *Mittlere Ebbestromgeschwindigkeit während der Sturmflut SF99 im Teilgebiet West für den planerischen Ist – Zustand* PIZ. *Eine Farbstufe entspricht einer Geschwindigkeit von 0,2 m/s.*

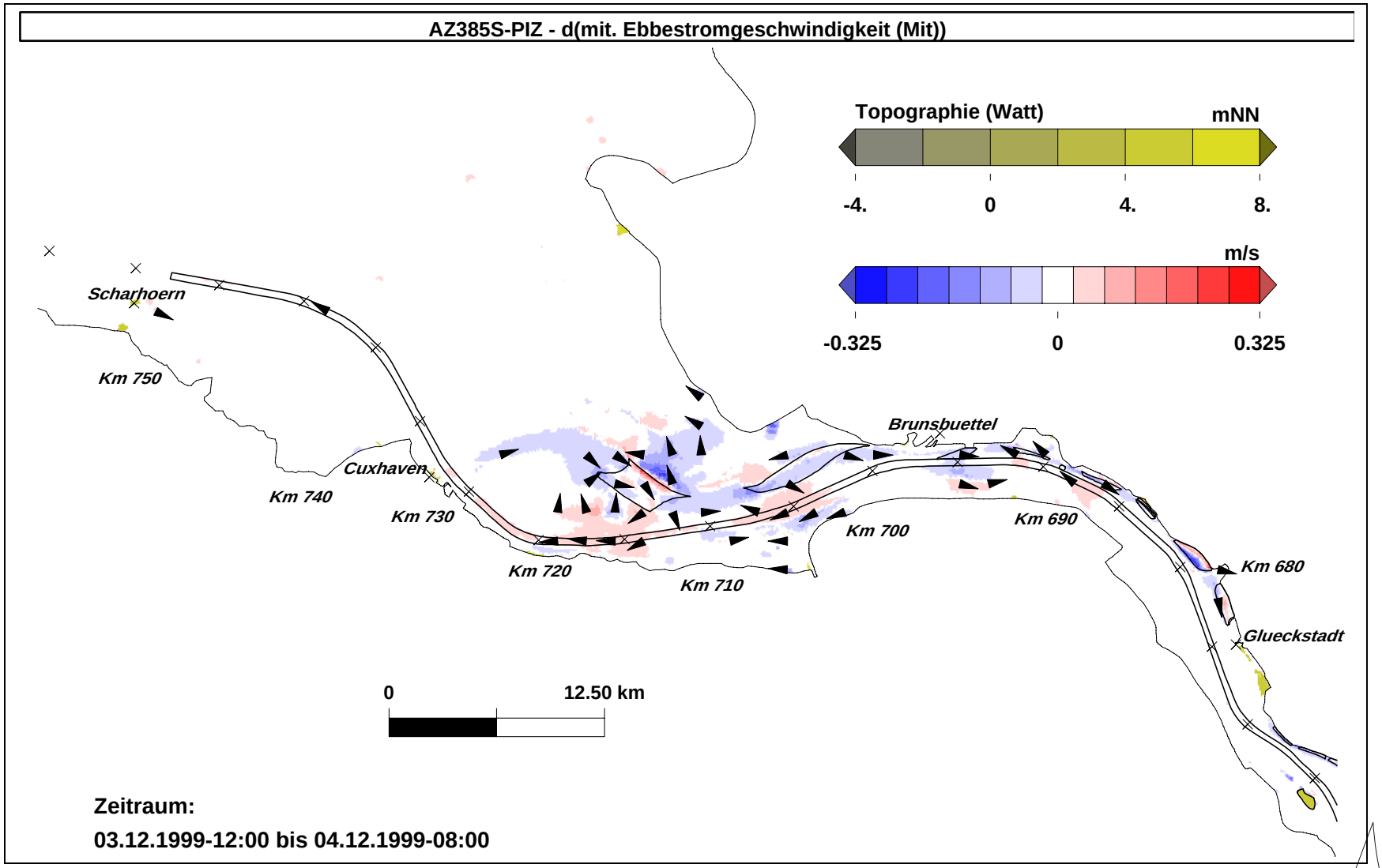

Bild G.22: *Änderung der mittleren Ebbestromgeschwindigkeit während der Sturmflut SF99 im Teilgebiet West (AZ385S – PIZ). Eine Farbstufe entspricht ausbaubedingten Änderungen der mittleren Flutstromgeschwindigkeit von 0,05 m/s. In den weiß dargestellten Gebieten sind die Änderungen kleiner als ± 0,025 m/s.*

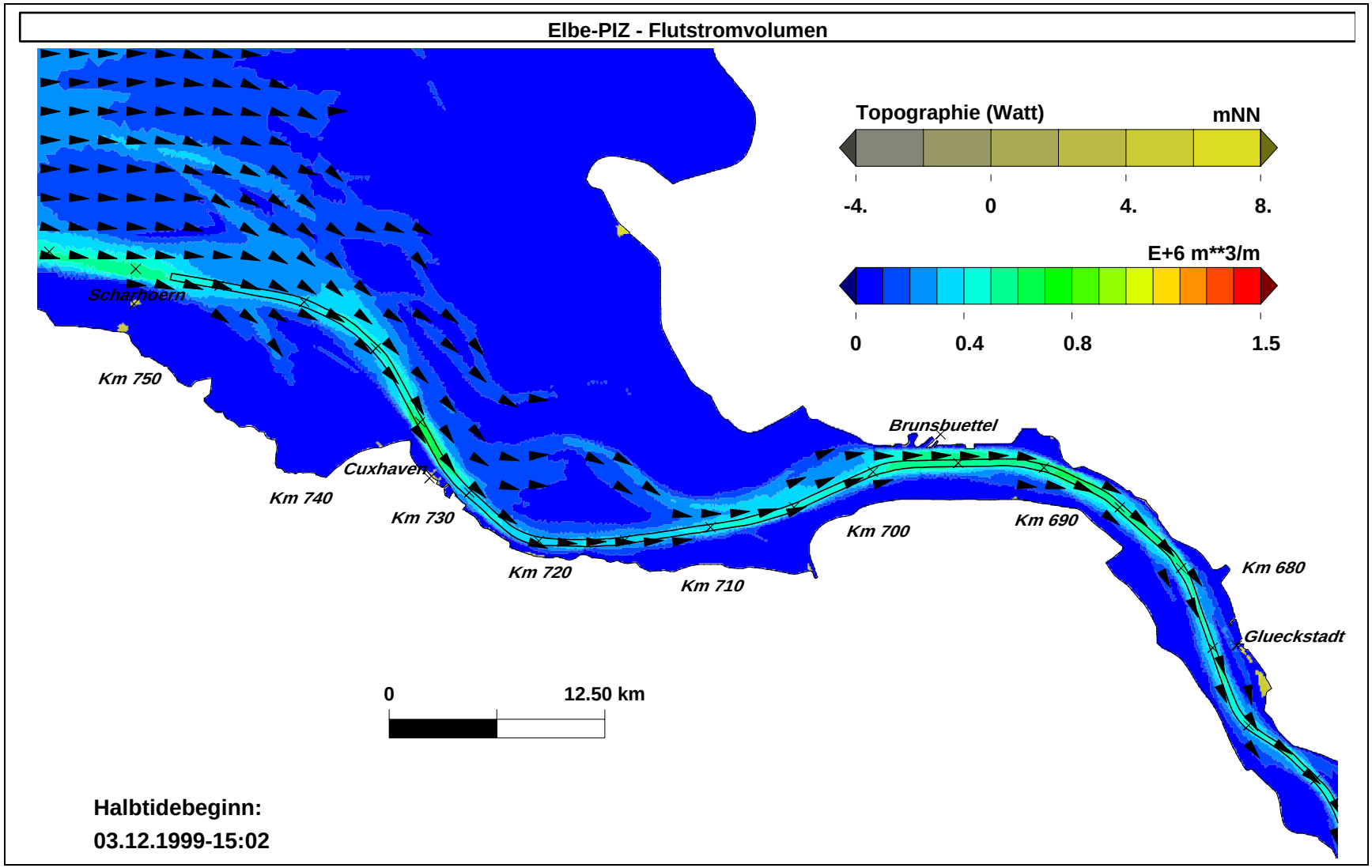

Bild G.23: *Flutstromvolumen der am 3. 12. 1999 um 15:02 Uhr bei Elbe – km 748 beginnenden Flut während der Sturmflut SF99 im Teilgebiet West für den planerischen Ist – Zustand* PIZ. *Eine Farbstufe entspricht einem Volumen von* $1 \cdot 10^{+6} m^3/m$.

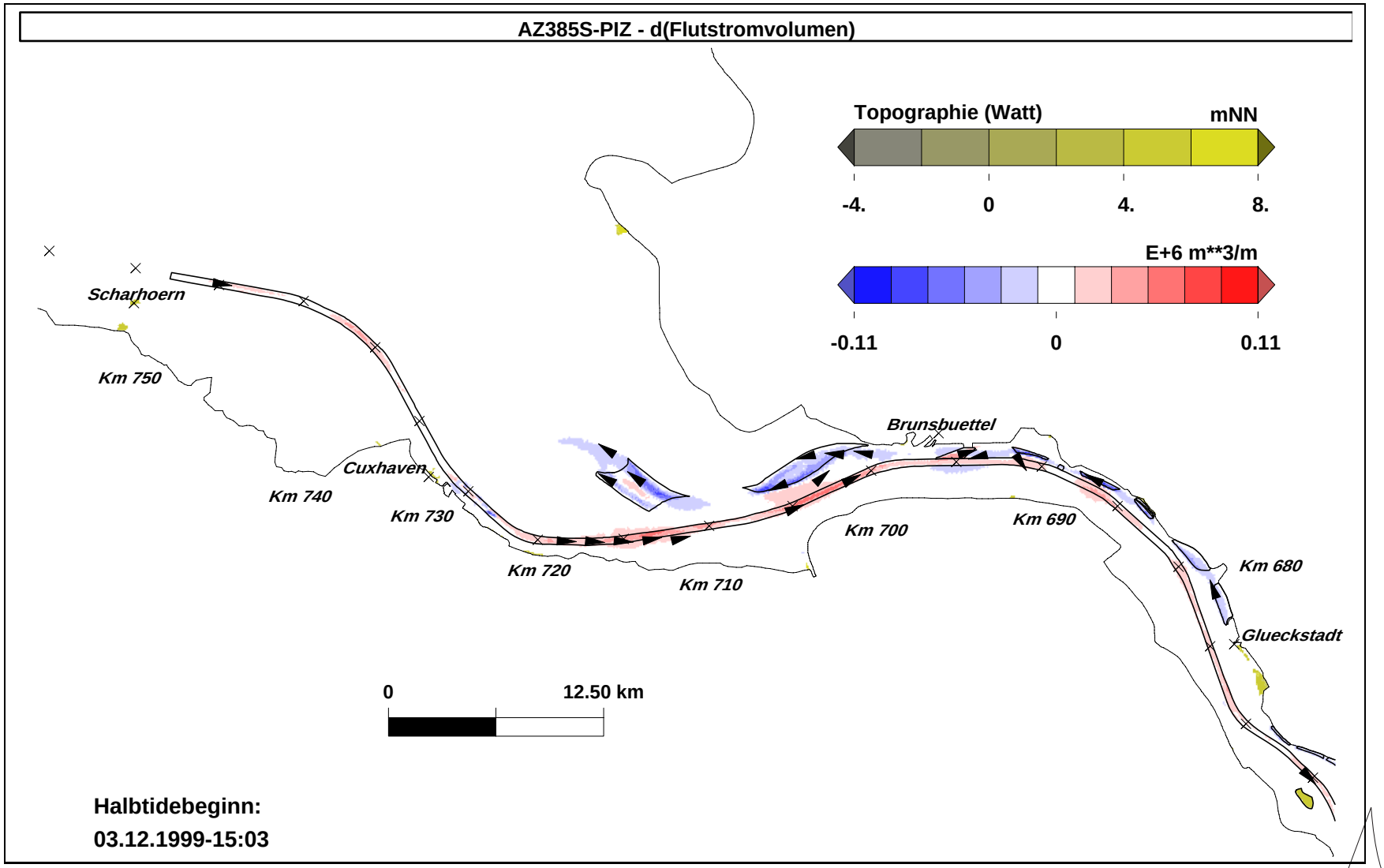

Bild G.24: *Änderung des Flutstromvolumens während der Sturmflut SF99 im Teilgebiet West (AZ385S – PIZ). Eine Farbstufe entspricht ausbaubedingten Änderungen des Flutstromvolumens von 0,02 $\cdot 10^{+6} m^3/m$. In den weiß dargestellten Gebieten sind die Änderungen kleiner als $\pm 0{,}01 \cdot 10^{+6} m^3/m$.*

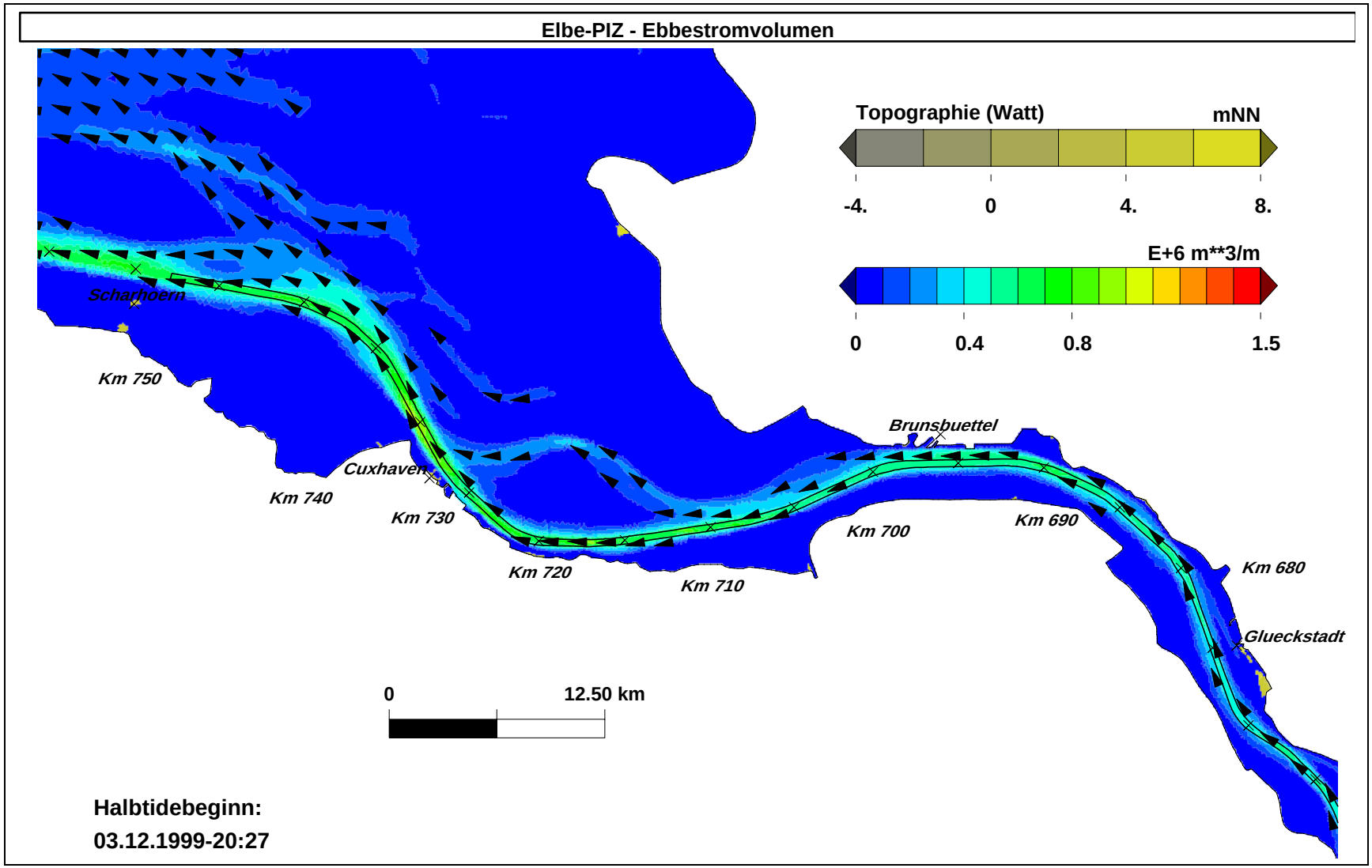

Bild G.25: *Ebbestromvolumen der am 3. 12. 1999 um 20:27 Uhr bei Elbe – km 748 beginnenden Ebbe während der Sturmflut SF99 im Teilgebiet West für den planerischen Ist – Zustand* PIZ. *Eine Farbstufe entspricht einem Volumen von* $1 \cdot 10^{+6} m^3/m$.

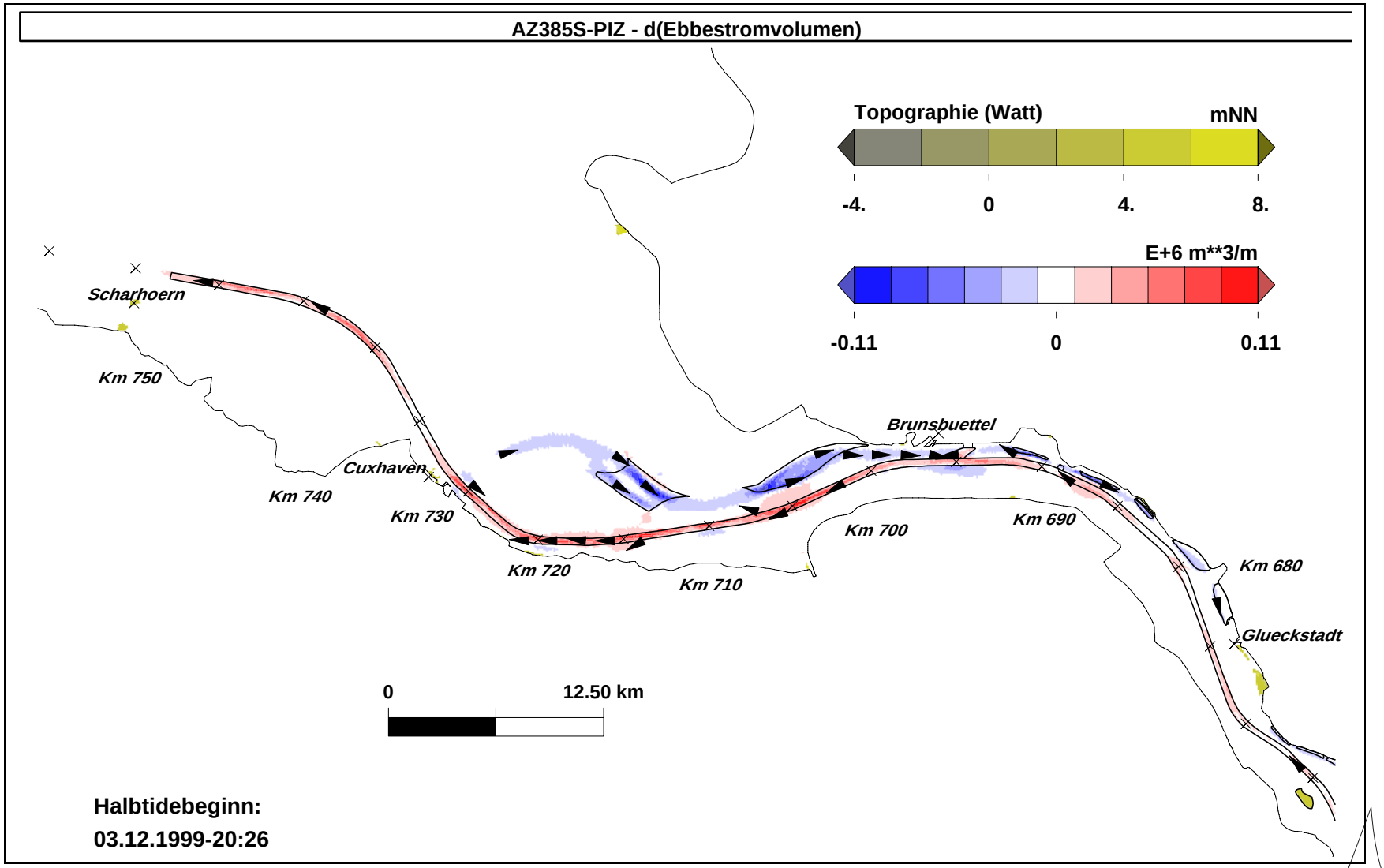

Bild G.26: *Änderung des Ebbestromvolumens während der Sturmflut SF99 im Teilgebiet West (AZ385S – PIZ). Eine Farbstufe entspricht ausbaubedingten Änderungen des Ebbestromvolumens von 0,02 $\cdot 10^{+6} m^3/m$. In den weiß dargestellten Gebieten sind die Änderungen kleiner als $\pm$ 0,01 $\cdot 10^{+6} m^3/m$.*

H Sturmflut SFB: Elbe Teilgebiet West

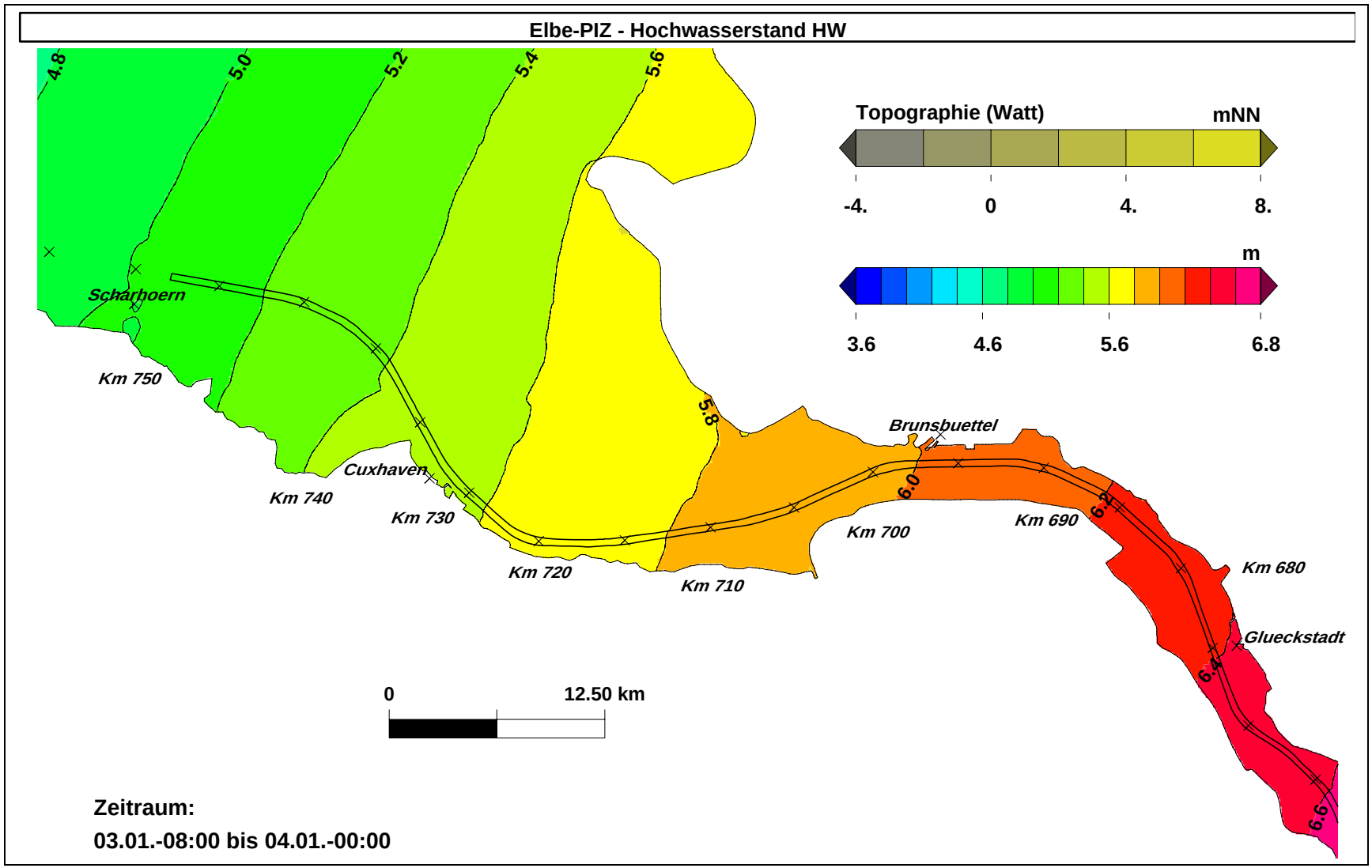

Bild H.1: *Sturmflutscheitelwasserstand HW für die Sturmflut SFB im Teilgebiet West für den planerischen Ist – Zustand* PIZ. *Eine Farbstufe entspricht einem Unterschied im HW von 20 cm.*

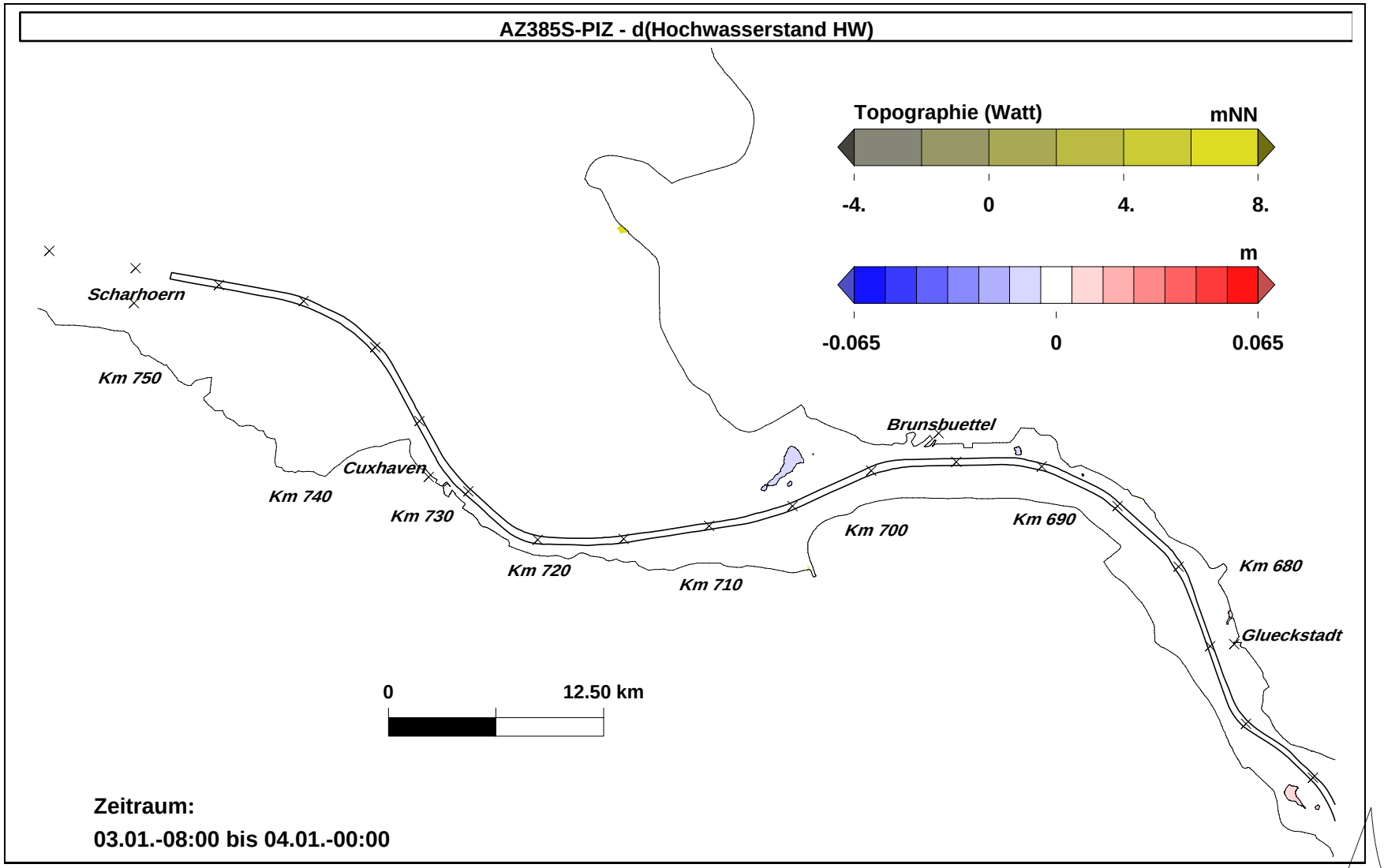

Bild H.2: *Änderung des Sturmflutscheitelwasserstand HW für die Sturmflut SFB im Teilgebiet West (AZ385S – PIZ). Eine Farbstufe entspricht einem Unterschied im HW von 1 cm. In den weiß dargestellten Gebieten ändert sich das HW ausbaubedingt um weniger als ± 0,5 cm.*

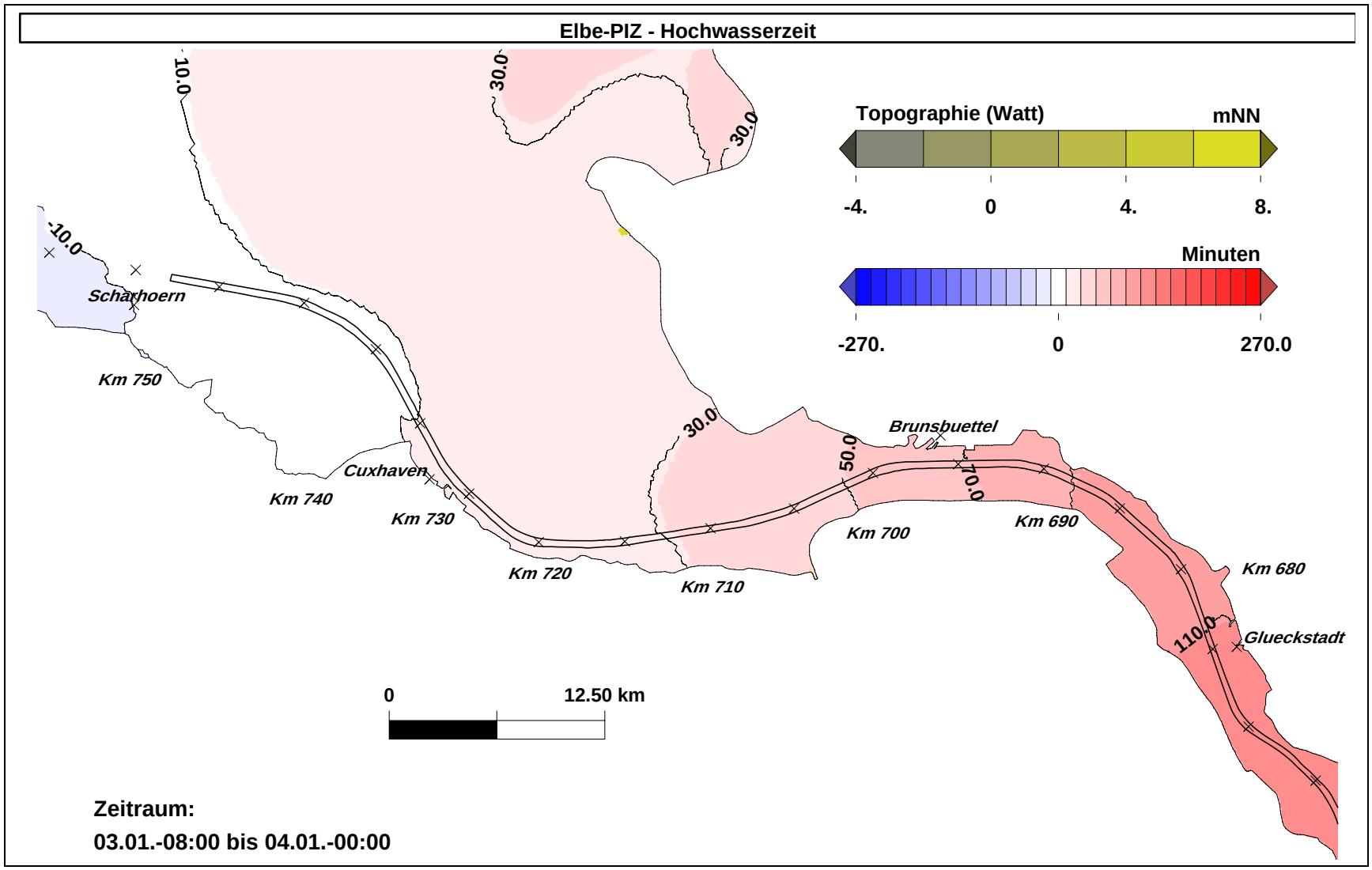

Bild H.3: *Eintrittszeit Sturmflutscheitelwasserstand tHW für die Sturmflut SFB im Teilgebiet West für den planerischen Ist – Zustand* PIZ. *Eine Farbstufe entspricht einem Eintrittszeitunterschied von 20 Minuten bezogen auf Elbe km 748 in der Elbmündung. In den weiß dargestellten Gebieten tritt der Sturmflutscheitel ± 10 Minuten vor/nach Elbe km 748 ein.*

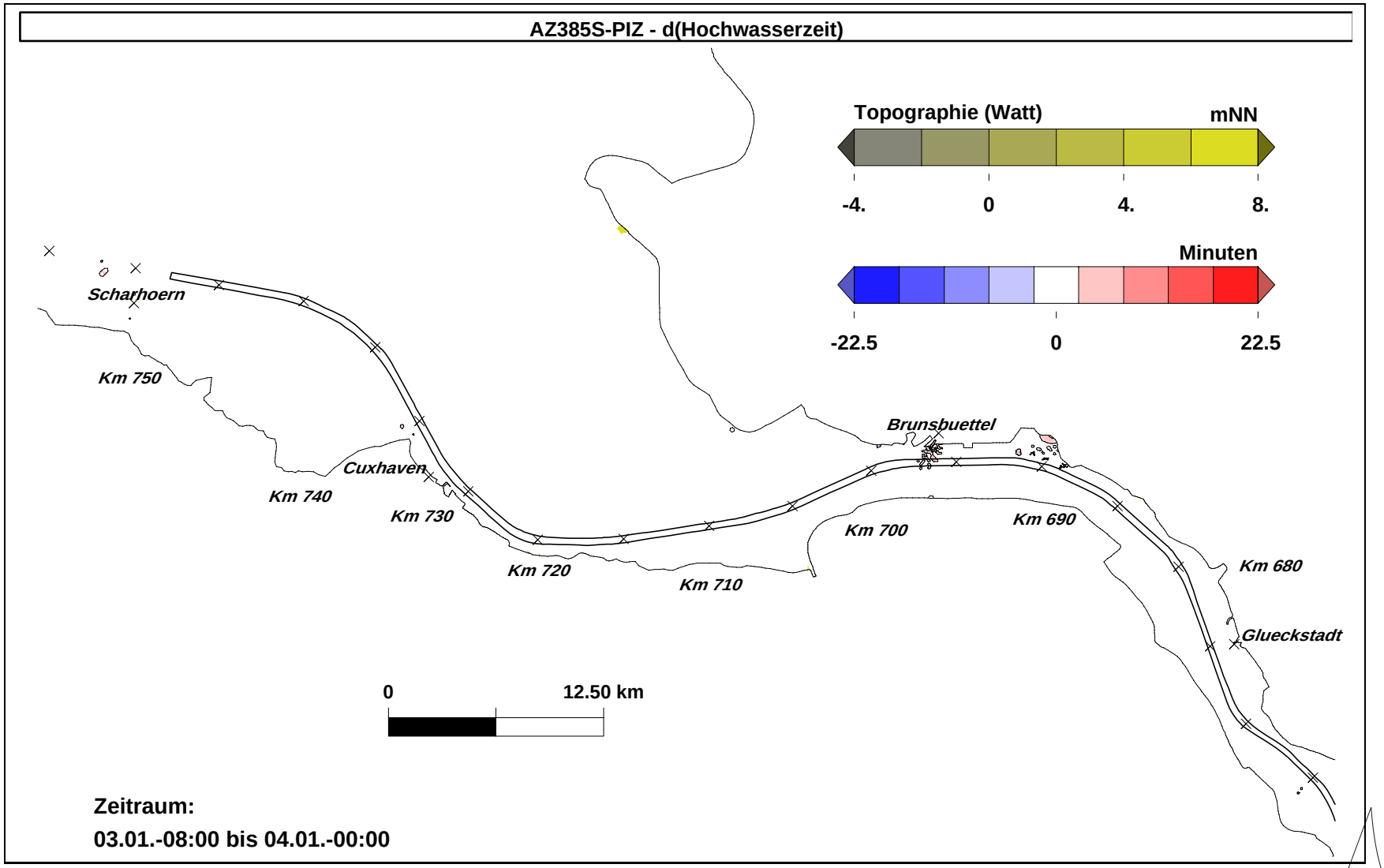

Bild H.4: *Änderung der Eintrittszeit des Sturmflutscheitelwasserstand tHW für die Sturmflut SFB im Teilgebiet West (AZ385S – PIZ). Eine Farbstufe entspricht einer ausbaubedingten Änderung der Eintrittszeit von 5 Minuten. In den weiß dargestellten Gebieten sind die Änderungen kleiner als ± 2,5 Minuten.*

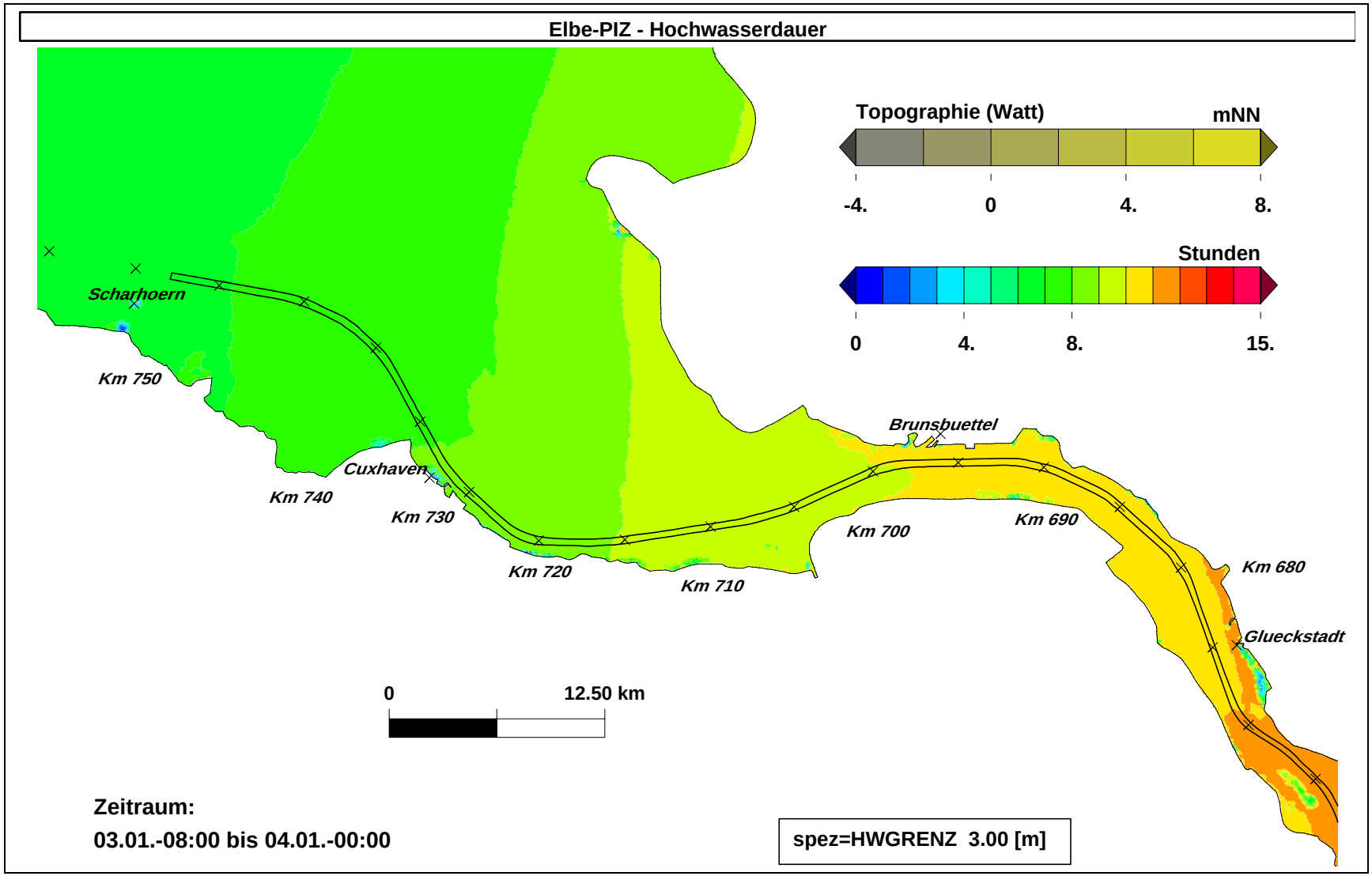

Bild H.5: *Dauer hoher Wasserstände > NN + 3,00 m während der Sturmflut SFB im Teilgebiet West für den planerischen Ist – Zustand* PIZ. *Eine Farbstufe entspricht einer Dauer der Wasserstandshöhe von 1 Stunde.*

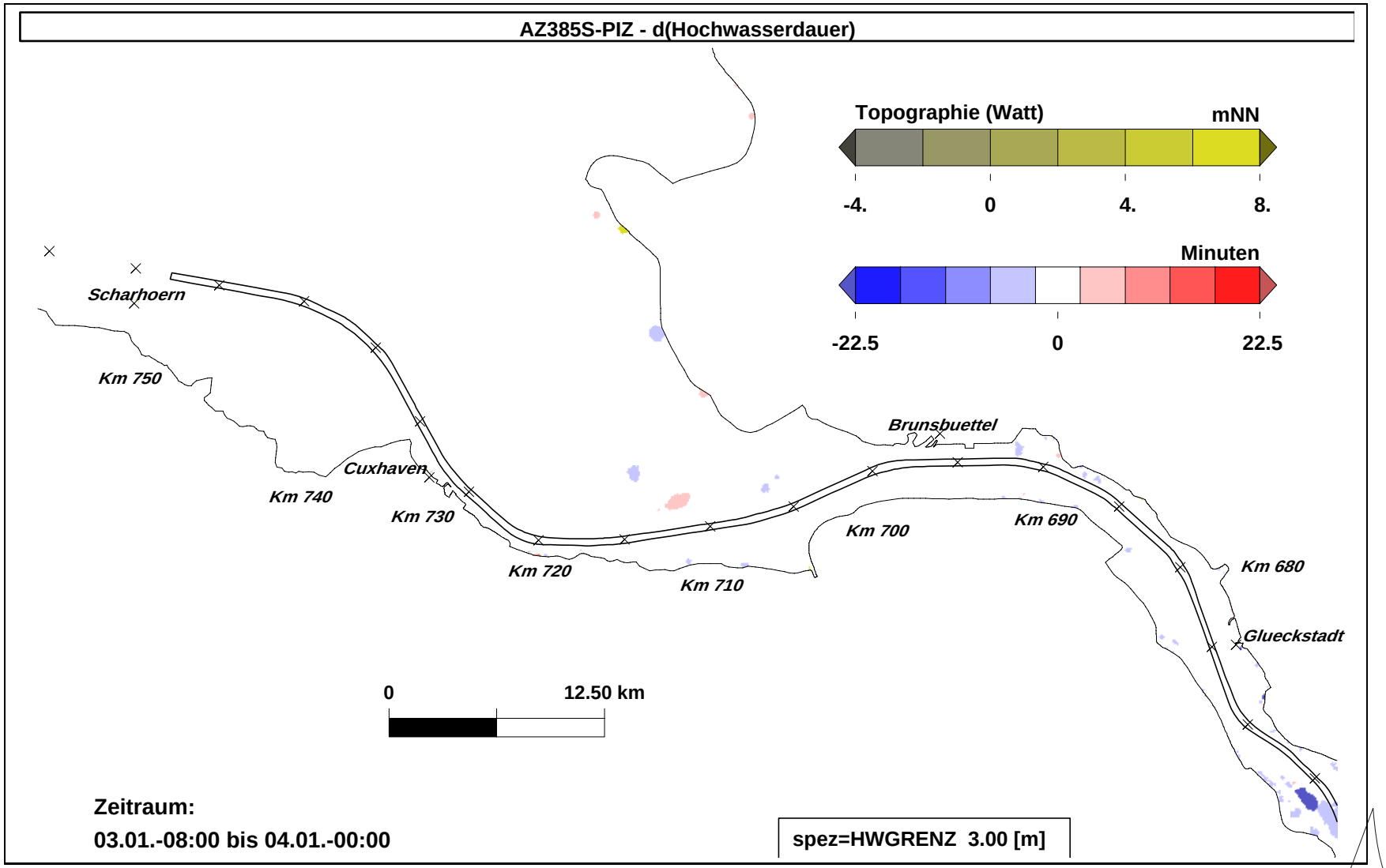

Bild H.6: *Änderung der Dauer hoher Wasserstände > NN + 3,00 m während der Sturmflut SFB im Teilgebiet West (AZ385S – PIZ). Eine Farbstufe entspricht ausbaubedingten Änderungen der Dauer von 5 Minuten. In den weiß dargestellten Gebieten sind die Änderungen kleiner als ± 2,5 Minuten.*

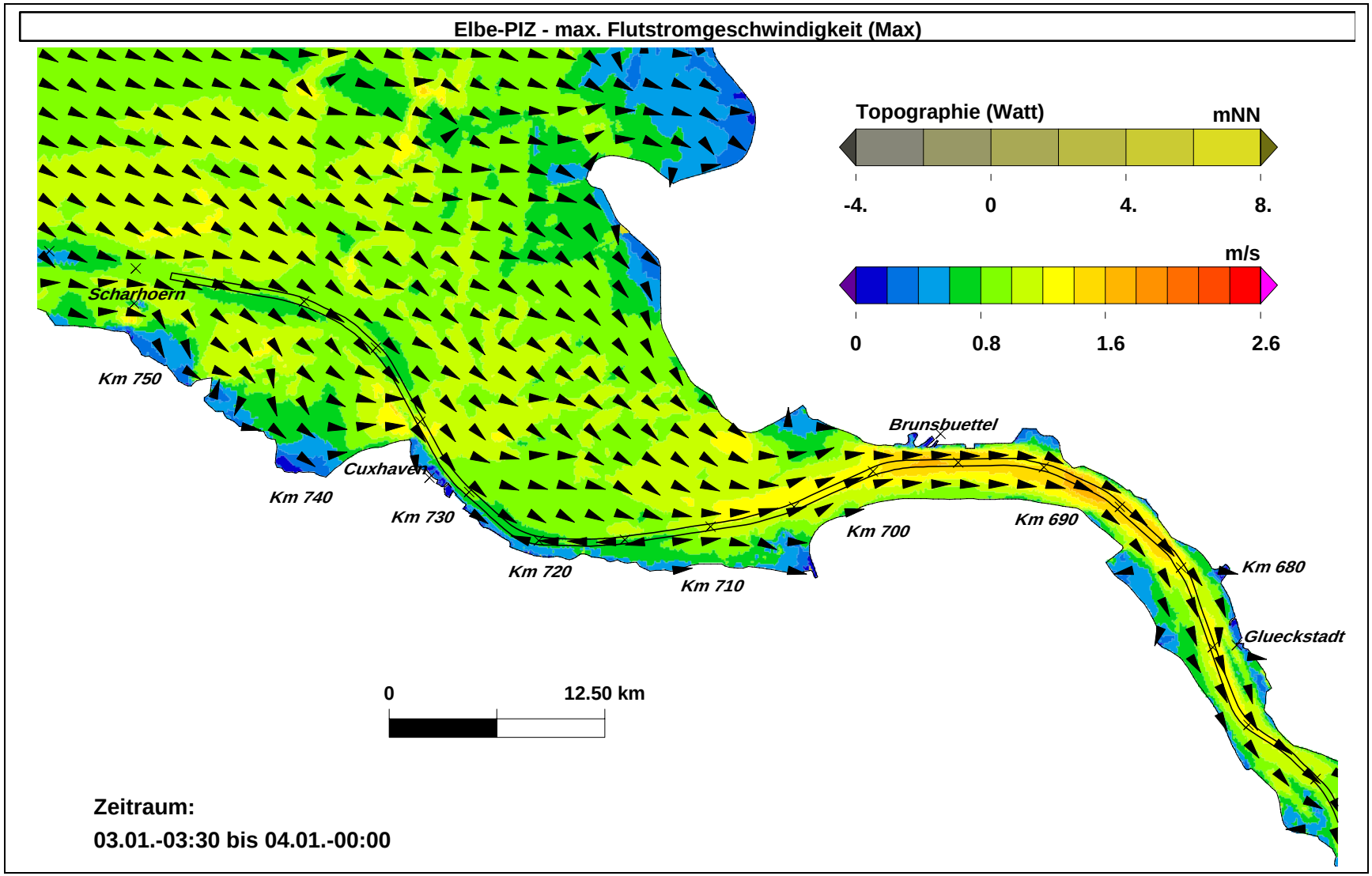

Bild H.7: *Maximale Flutstromgeschwindigkeit während der Sturmflut SFB im Teilgebiet West für den planerischen Ist – Zustand* PIZ. *Eine Farbstufe entspricht einer Geschwindigkeit von 0,2 m/s.*

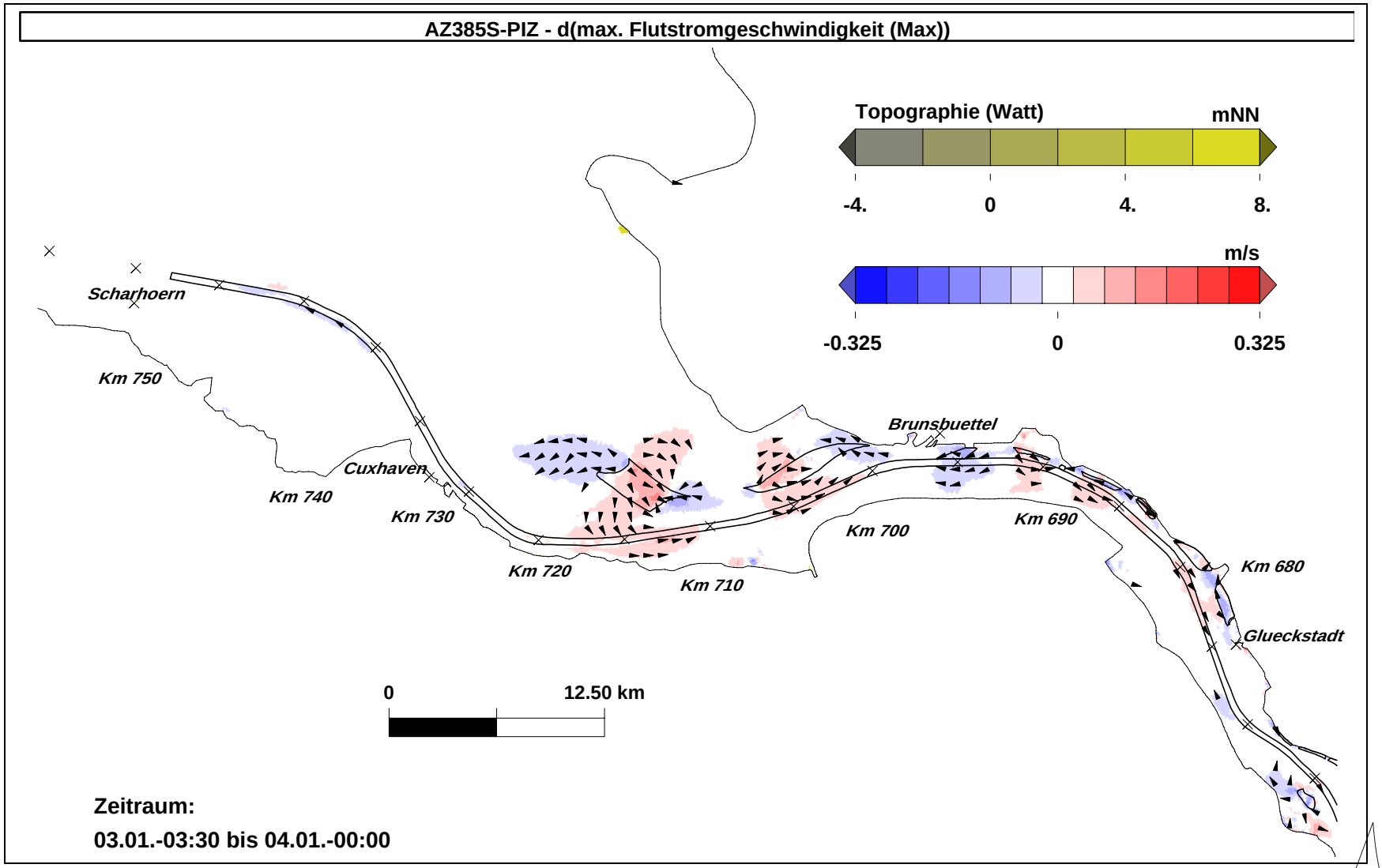

Bild H.8: *Änderung der maximalen Flutstromgeschwindigkeit während der Sturmflut SFB im Teilgebiet West (AZ385S – PIZ). Eine Farbstufe entspricht ausbaubedingten Änderungen der maximalen Flutstromgeschwindigkeit von 0,05 m/s. In den weiß dargestellten Gebieten sind die Änderungen kleiner als ± 0,025 m/s.*

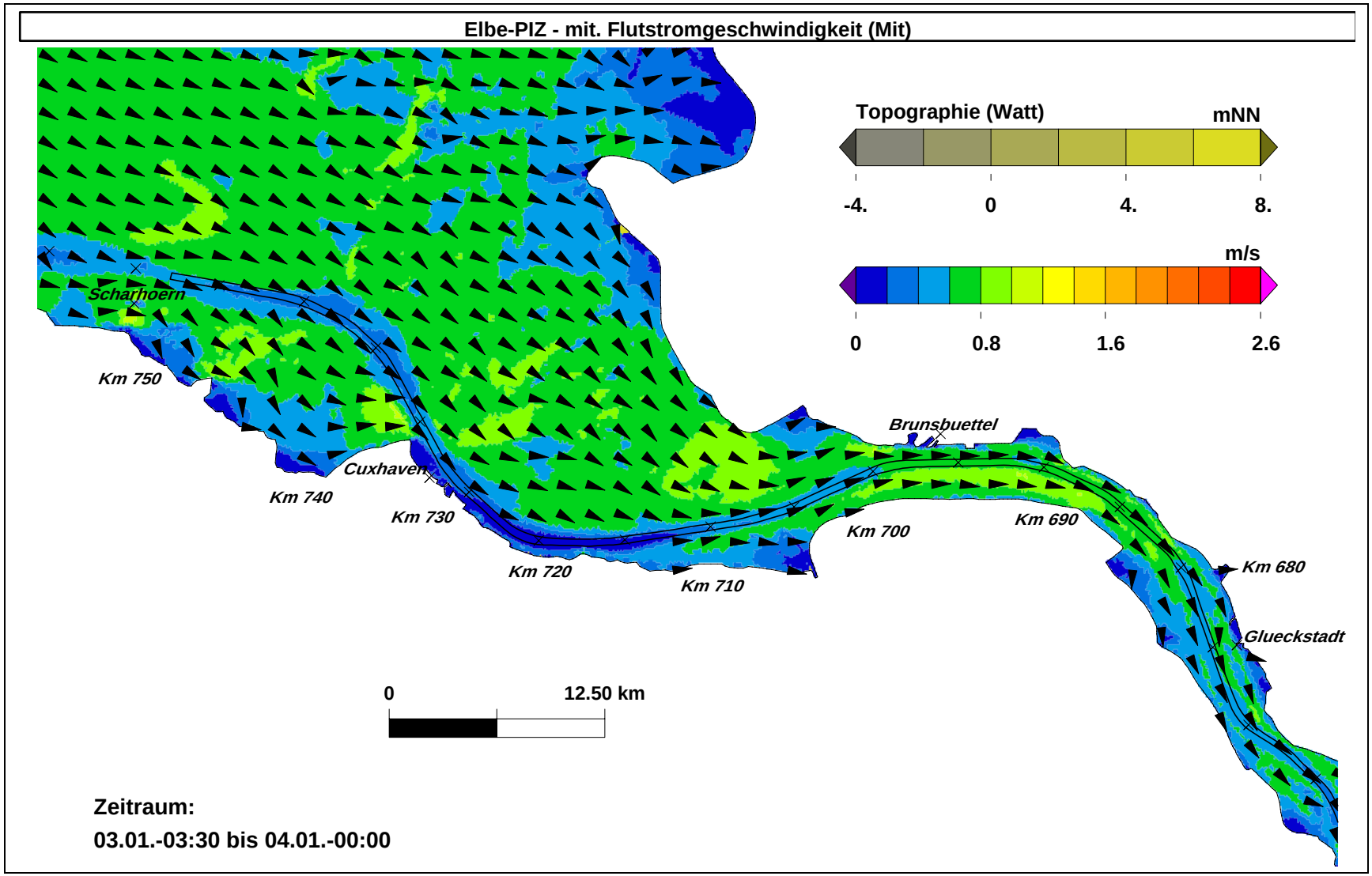

Bild H.9: *Mittlere Flutstromgeschwindigkeit während der Sturmflut SFB im Teilgebiet West für den planerischen Ist – Zustand* PIZ. *Eine Farbstufe entspricht einer Geschwindigkeit von 0,2 m/s.*

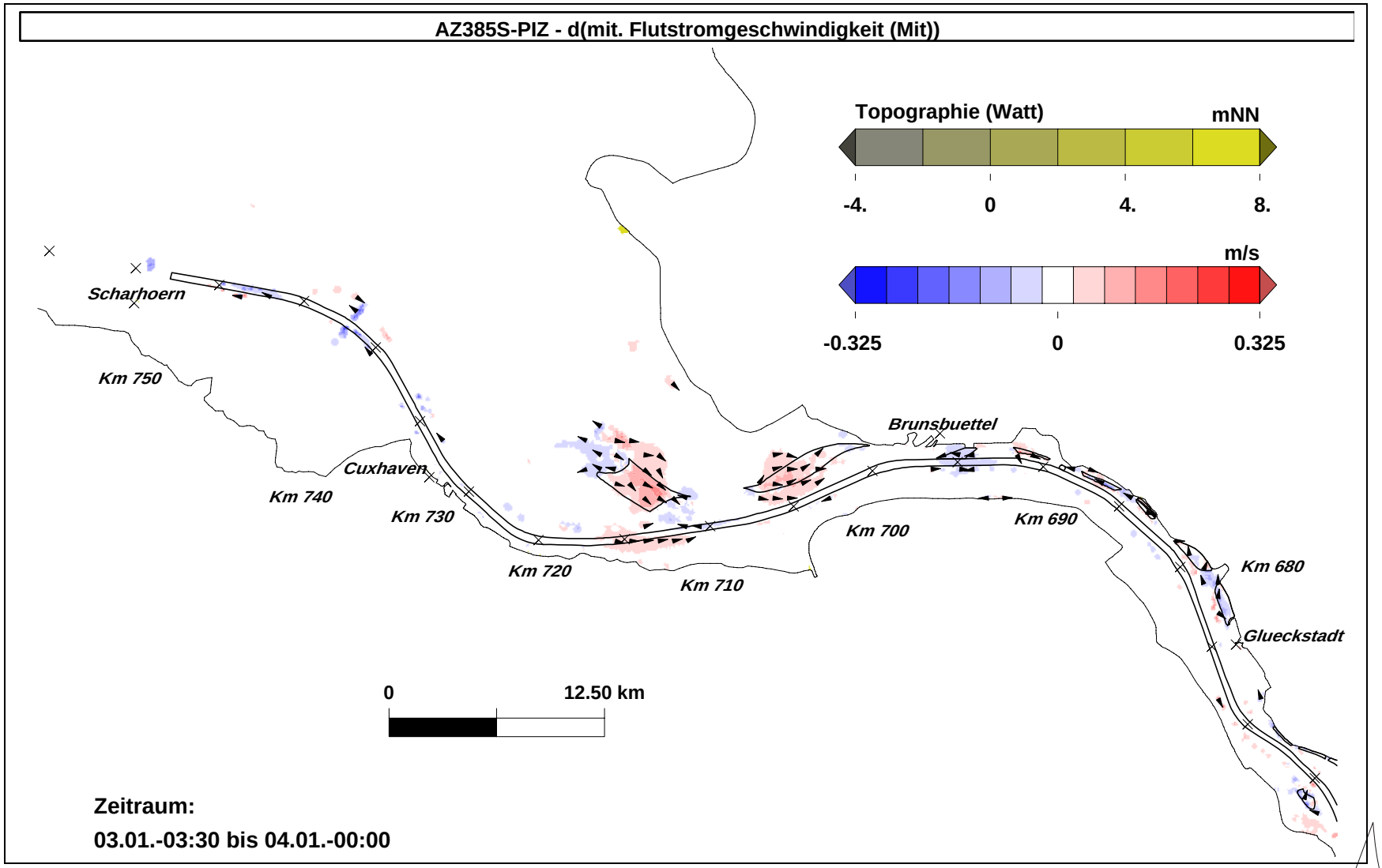

Bild H.10: *Änderung der mittleren Flutstromgeschwindigkeit während der Sturmflut SFB im Teilgebiet West (AZ385S – PIZ). Eine Farbstufe entspricht ausbaubedingten Änderungen der mittleren Flutstromgeschwindigkeit von 0,05 m/s. In den weiß dargestellten Gebieten sind die Änderungen kleiner als ± 0,025 m/s.*

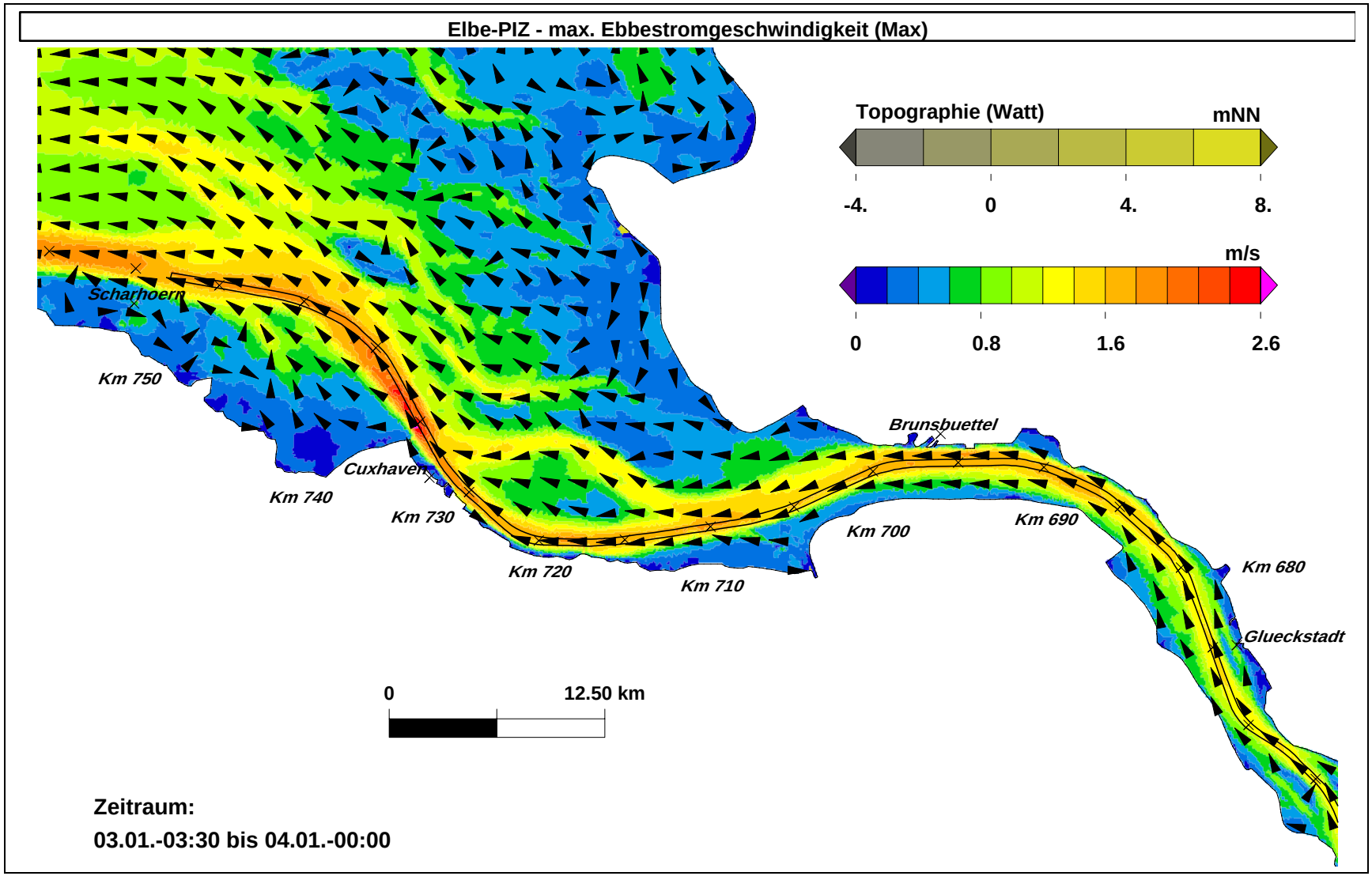

Bild H.11: *Maximale Ebbestromgeschwindigkeit während der Sturmflut SFB im Teilgebiet West für den planerischen Ist – Zustand* PIZ. *Eine Farbstufe entspricht einer Geschwindigkeit von 0,2 m/s.*

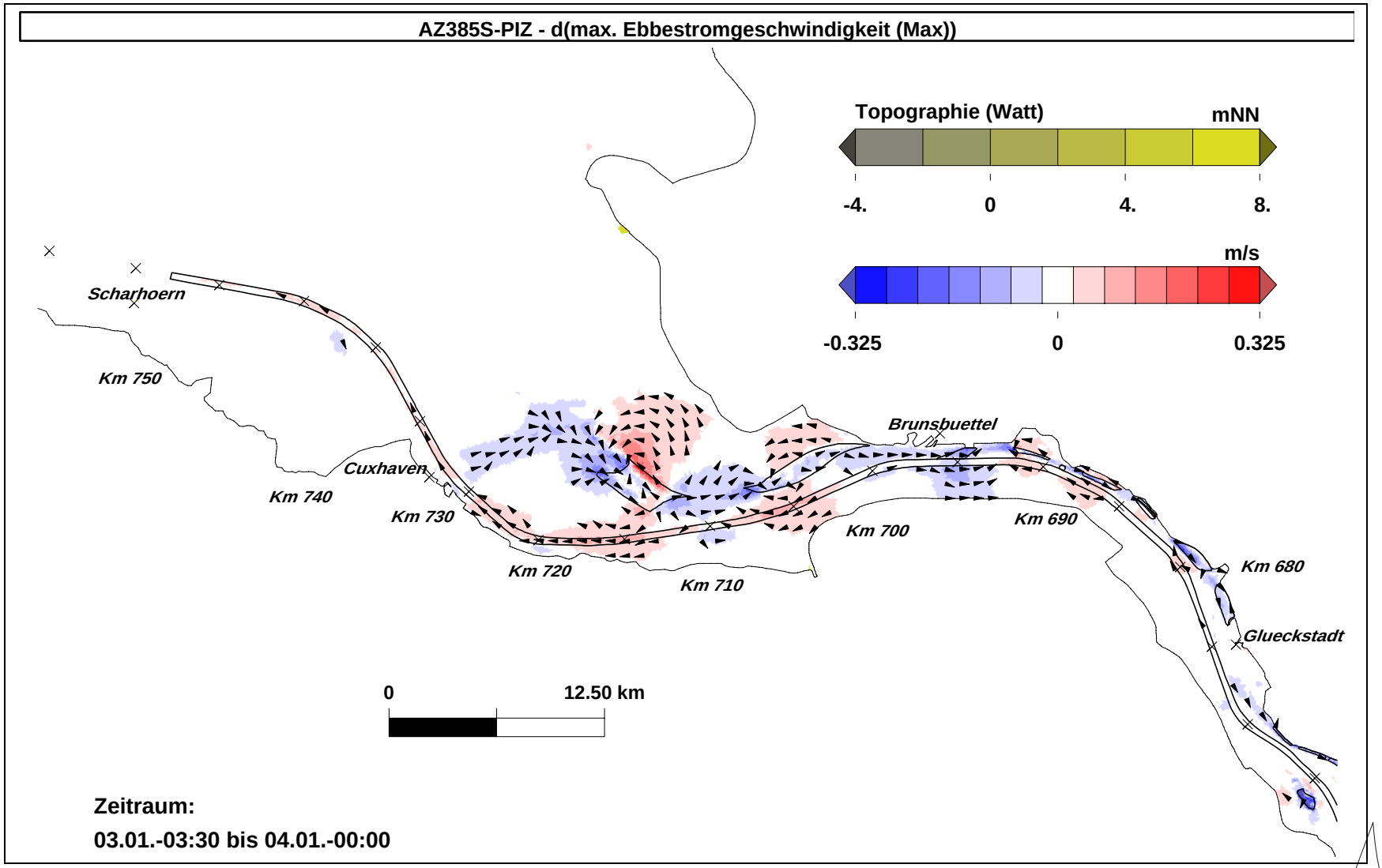

Bild H.12: *Änderung der maximalen Ebbestromgeschwindigkeit während der Sturmflut SFB im Teilgebiet West (AZ385S – PIZ). Eine Farbstufe entspricht ausbaubedingten Änderungen der maximalen Flutstromgeschwindigkeit von 0,05 m/s. In den weiß dargestellten Gebieten sind die Änderungen kleiner als ± 0,025 m/s.*

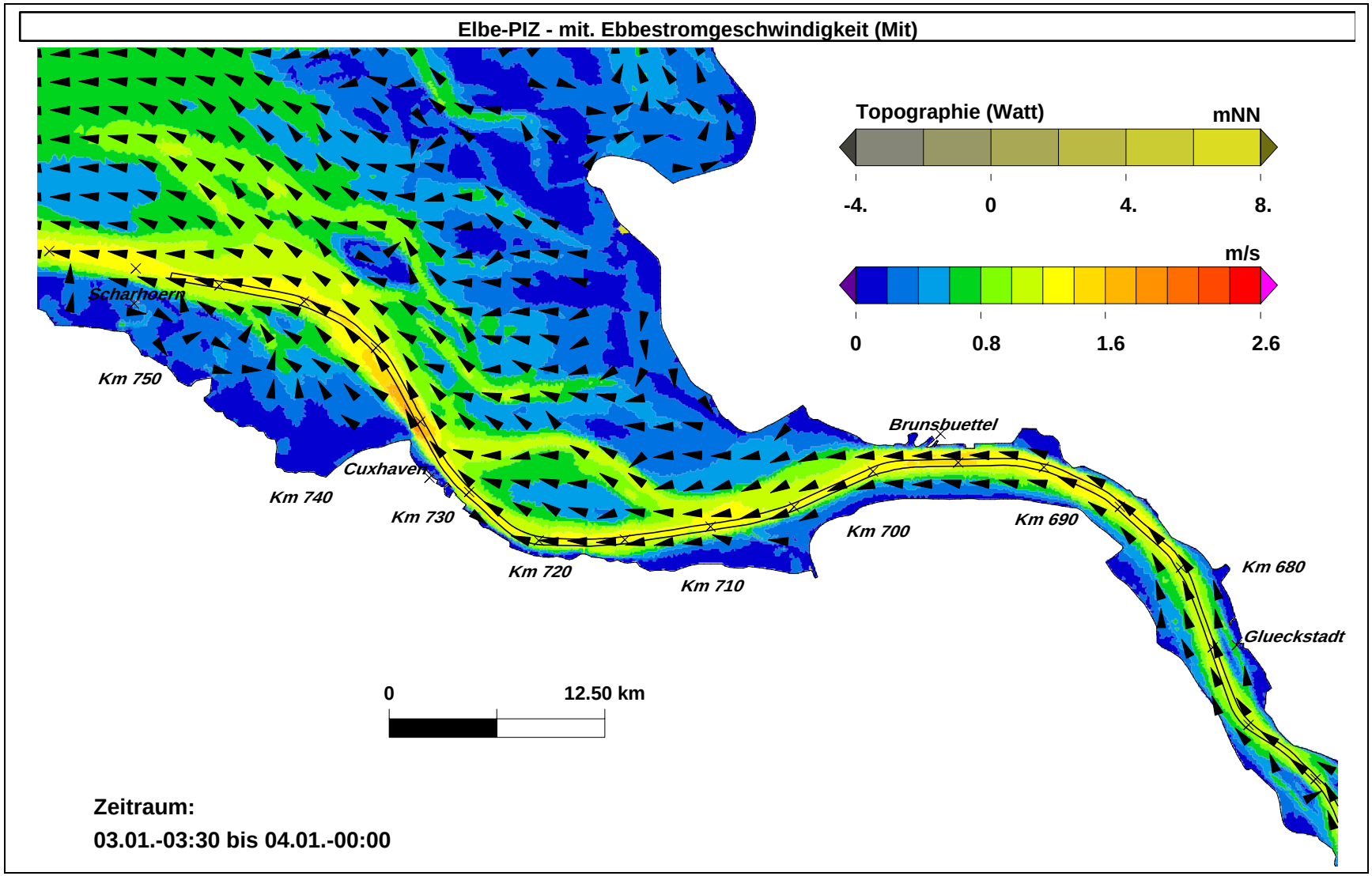

Bild H.13: *Mittlere Ebbestromgeschwindigkeit während der Sturmflut SFB im Teilgebiet West für den planerischen Ist – Zustand* PIZ. *Eine Farbstufe entspricht einer Geschwindigkeit von 0,2 m/s.*

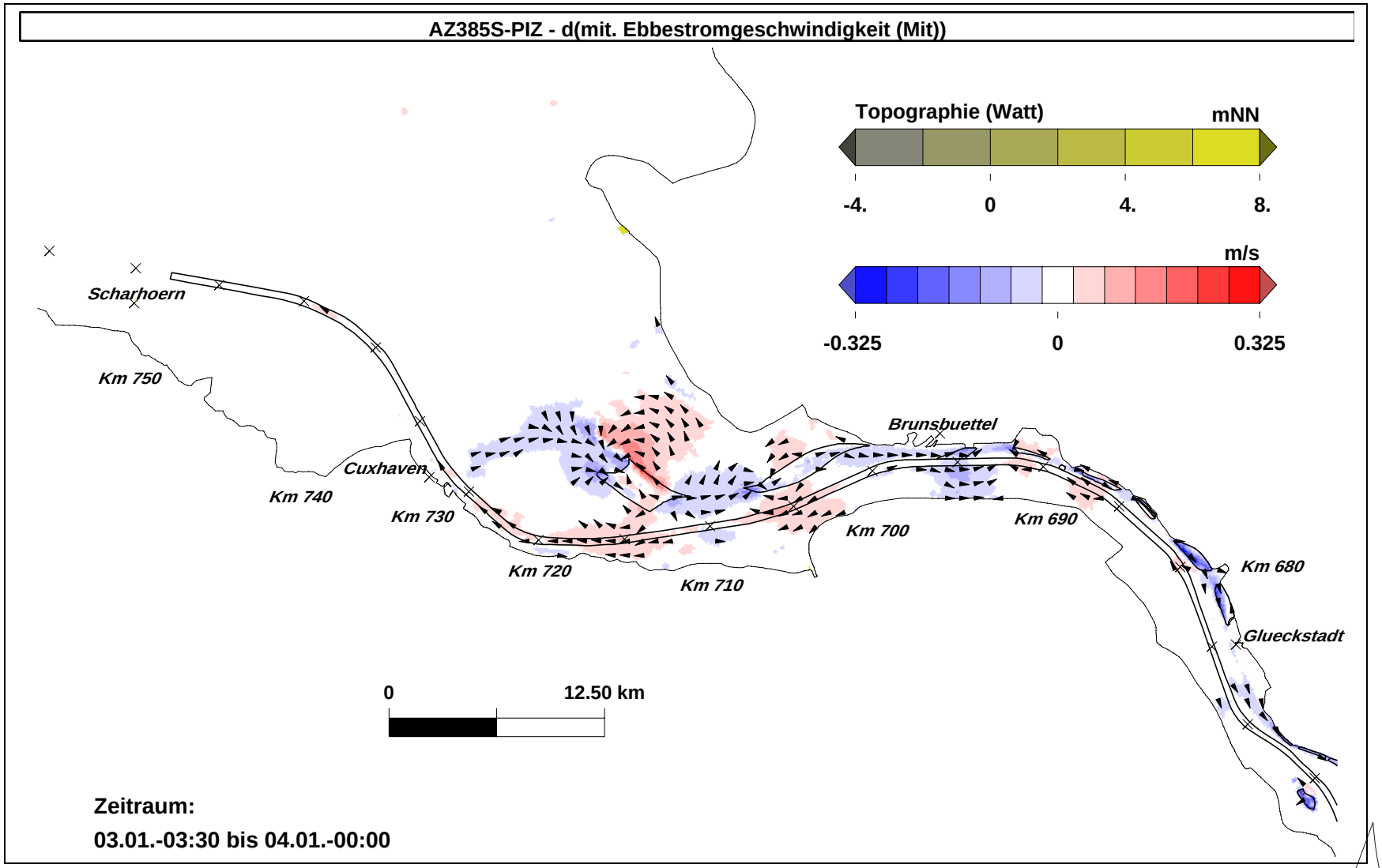

Bild H.14: *Änderung der mittleren Ebbestromgeschwindigkeit während der Sturmflut SFB im Teilgebiet West (AZ385S – PIZ). Eine Farbstufe entspricht ausbaubedingten Änderungen der mittleren Flutstromgeschwindigkeit von 0,05 m/s. In den weiß dargestellten Gebieten sind die Änderungen kleiner als ± 0,025 m/s.*

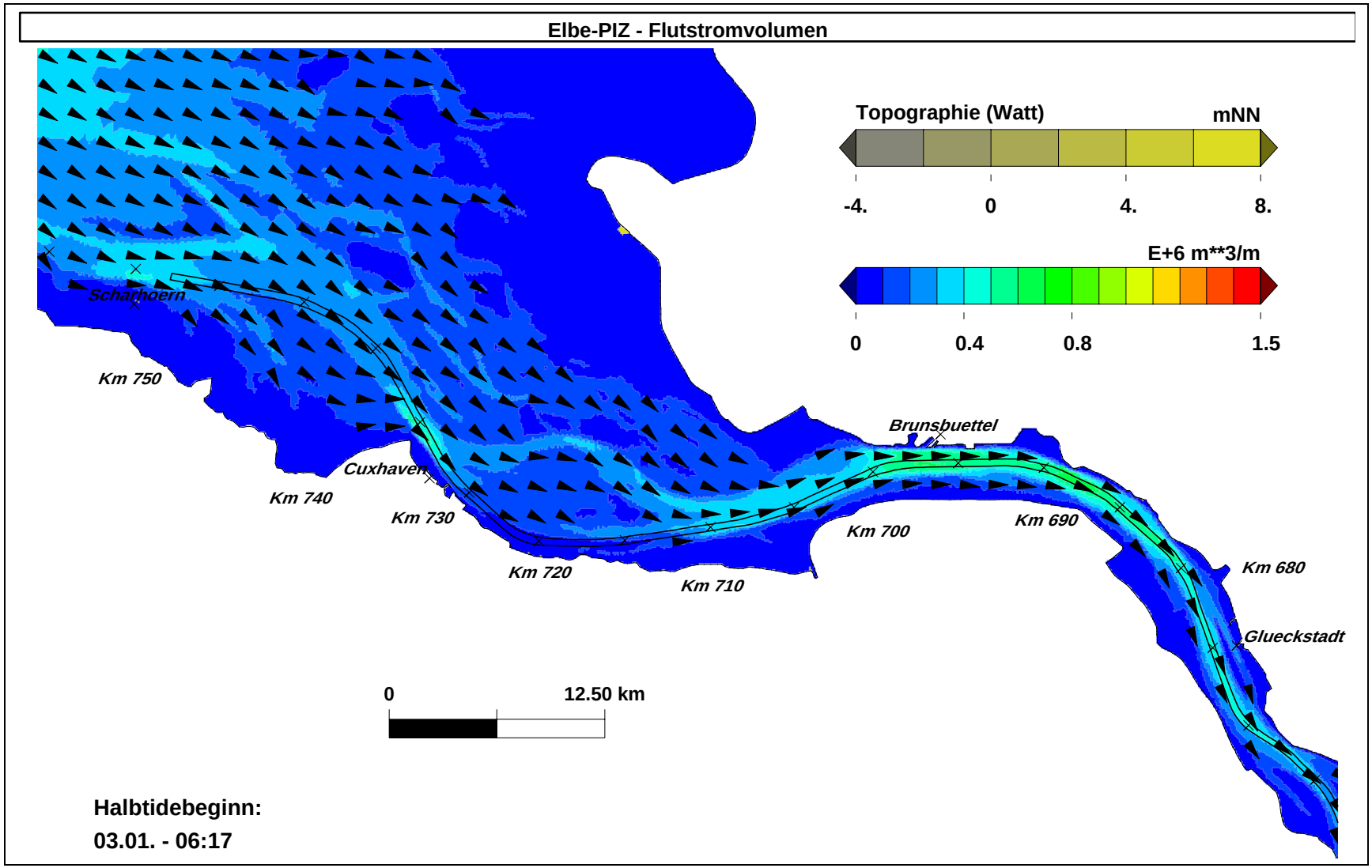

Bild H.15: *Flutstromvolumen der am 3. 1. um 6:17 Uhr bei Elbe km 748 beginnenden Flut während der Sturmflut SFB im Teilgebiet West für den planerischen Ist – Zustand* PIZ. *Eine Farbstufe entspricht einem Volumen von* $1 \cdot 10^{+6} m^3/m$.

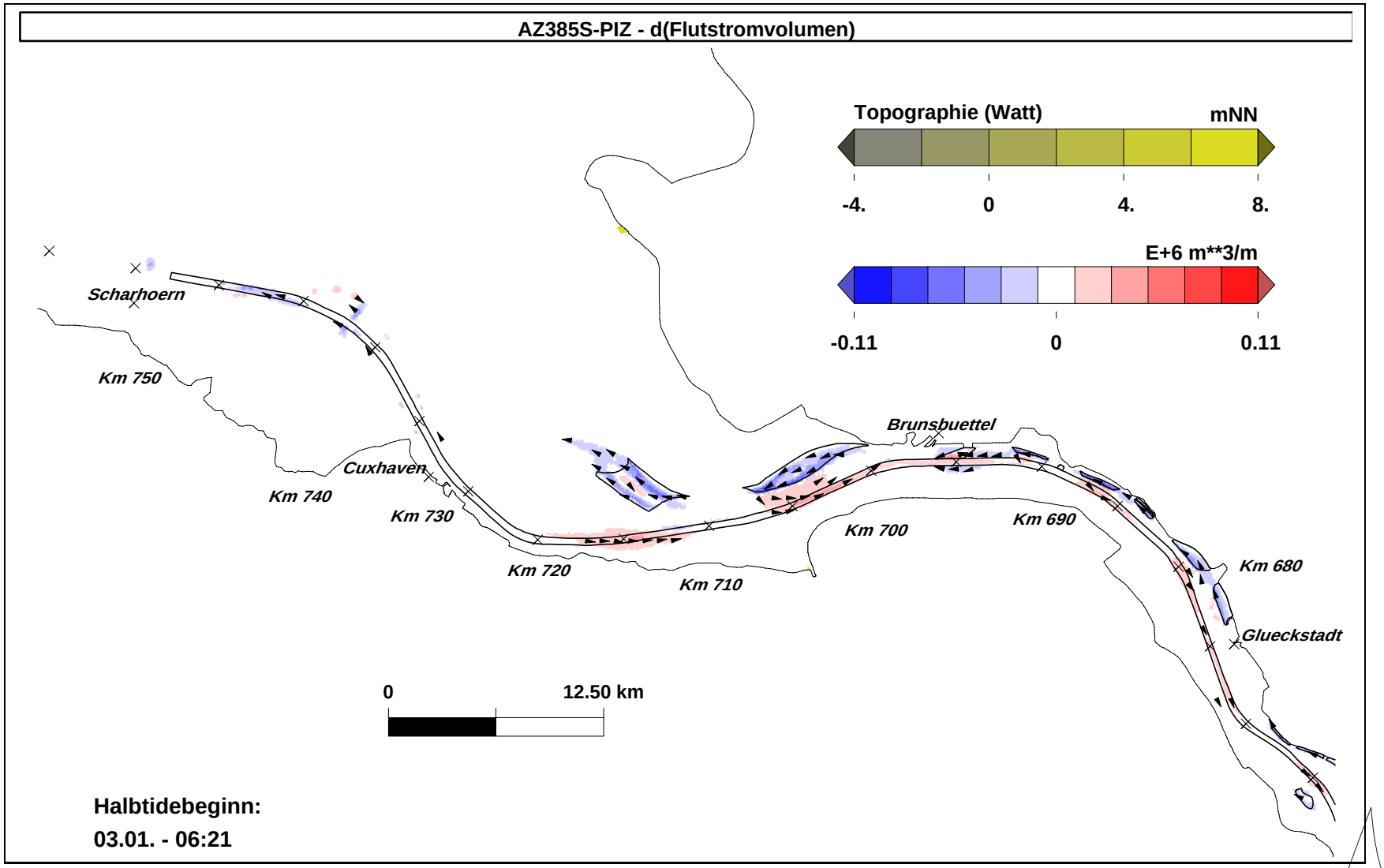

Bild H.16: *Änderung des Flutstromvolumens während der Sturmflut SFB im Teilgebiet West (AZ385S – PIZ). Eine Farbstufe entspricht ausbaubedingten Änderungen des Flutstromvolumens von 0,02 $\cdot 10^{+6} m^3/m$. In den weiß dargestellten Gebieten sind die Änderungen kleiner als $\pm 0{,}01 \cdot 10^{+6} m^3/m$.*

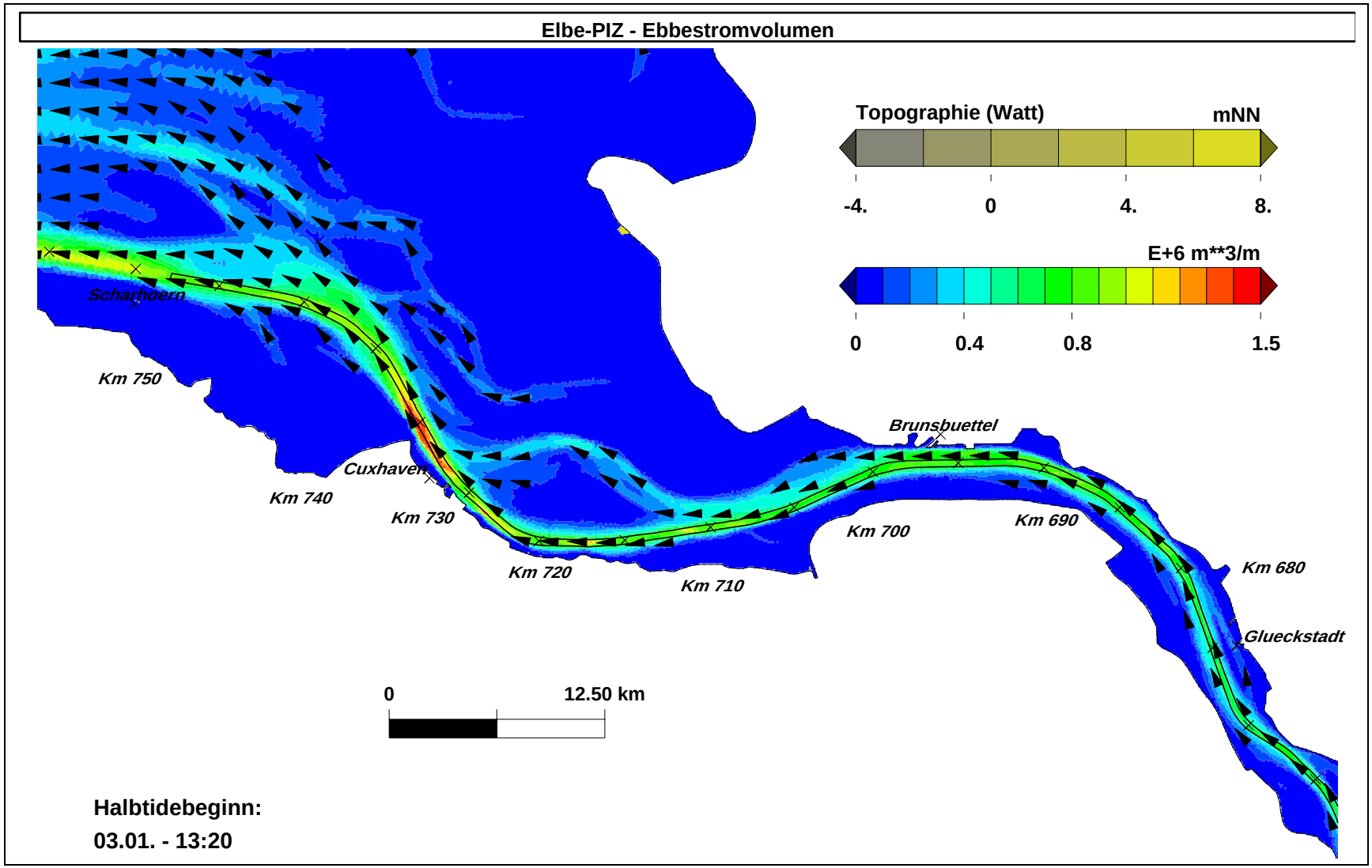

Bild H.17: *Ebbestromvolumen der am 3. 1. um 13:20 Uhr bei Elbe km 748 beginnenden Ebbe während der Sturmflut SFB im Teilgebiet West für den planerischen Ist – Zustand* PIZ. *Eine Farbstufe entspricht einem Volumen von* $1 \cdot 10^{+6} m^3/m$.

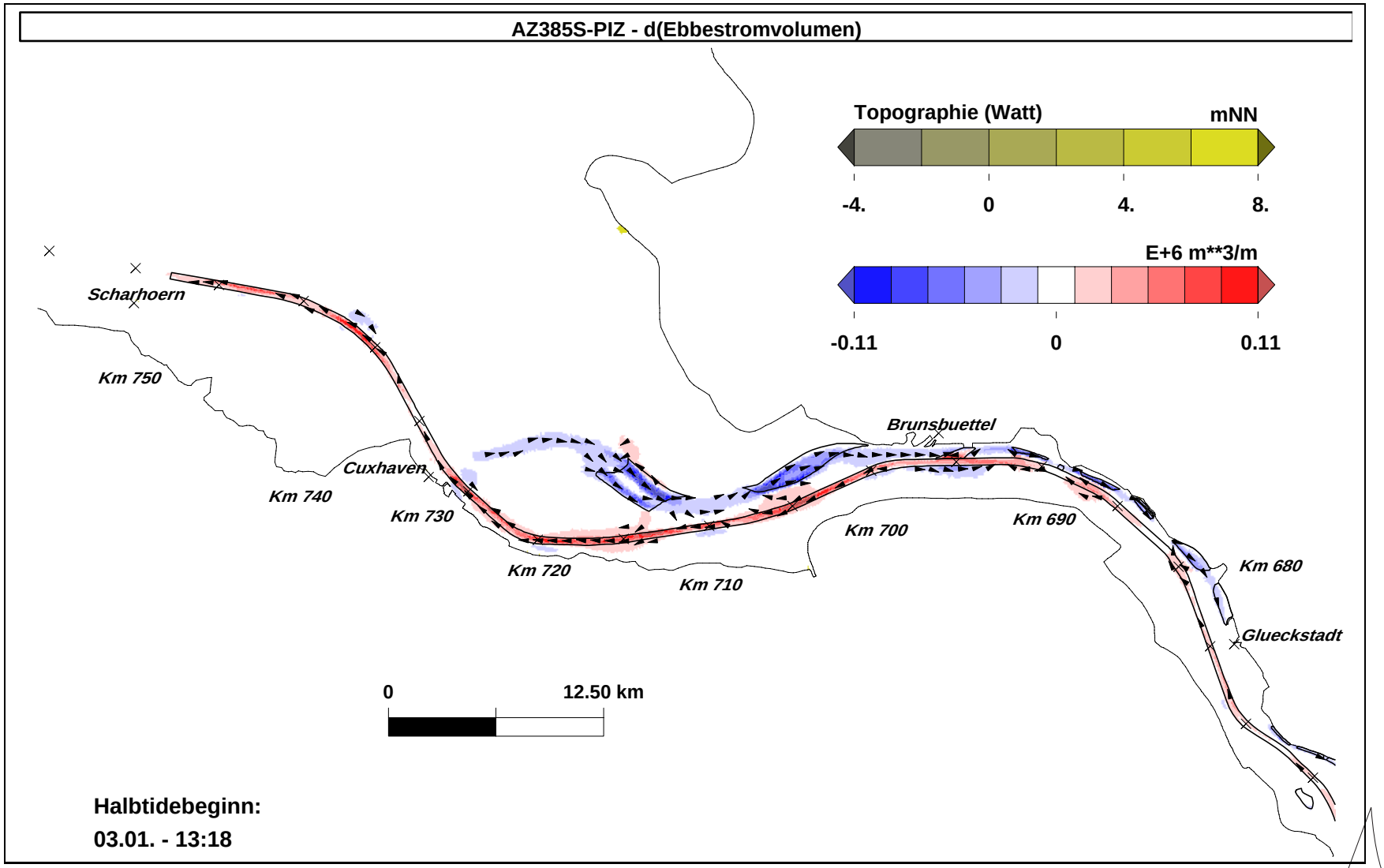

Bild H.18: *Änderung des Ebbestromvolumens während der Sturmflut SFB im Teilgebiet West (AZ385S – PIZ). Eine Farbstufe entspricht ausbaubedingten Änderungen des Ebbestromvolumens von 0,02 $\cdot 10^{+6} m^3/m$. In den weiß dargestellten Gebieten sind die Änderungen kleiner als $\pm$ 0,01 $\cdot 10^{+6} m^3/m$.*