KFKI-Projekt AMSeL

„Analyse von hochaufgelösten Tidewasserständen und Ermittlung des MSL an der deutschen Nordseeküste"

gefördert durch:	BMBF
Förderkennzeichen:	03KIS068
Bearbeitungszeitraum:	01.10.2007 - 30.09.2010
Auftragsnummer:	WBL 199D

Aufgestellt von:

Prof. Dr.-Ing. Jürgen Jensen
Dr.-Ing. Torsten Frank
Dipl.-Ing. Thomas Wahl
Dipl.-Ing. Sönke Dangendorf

Forschungsinstitut
Wasser und Umwelt (fwu)
an der Universität Siegen

Siegen, März 2011

Kontakt:

Forschungsinstitut Wasser und Umwelt (fwu)
der Universität Siegen
Univ.-Prof. Dr.-Ing. Jürgen Jensen

Paul-Bonatz-Str. 9-11
57076 Siegen
Fon +49 (0)271 740 2172
Fax +49 (0)271 740 2722
E-Mail juergen.jensen@uni-siegen.de
Web www.fwu.uni-siegen.de

Analyse von hochaufgelösten Tidewasserständen und Ermittlung des MSL an der deutschen Nordseeküste (AMSeL)

Zusammenfassung

In dem vorliegenden Abschlussbericht werden die Ergebnisse des KFKI-Forschungsvorhabens „AMSeL – *Analyse von hochaufgelösten Tidewasserständen und Ermittlung des MSL an der deutschen Nordseeküste*“ vorgestellt. Auf Basis hochaufgelöster Pegeldaten und den verfügbaren Scheitelwertzeitreihen für ausgewählte Pegelstandorte werden qualitativ hochwertige Mean Sea Level Zeitreihen generiert und analysiert. Gleichzeitig werden die hochaufgelösten Datenreihen für Analysen der Verweildauern der Tidewasserstände auf unterschiedlichen Höhenstufen herangezogen. Auf Basis der langjährigen Zeitreihen der Tidehoch- und Niedrigwasser werden Untersuchungen zu Tideketten (mehrere extreme Tidehoch- oder Tideniedrigwasser in Folge) durchgeführt. Die Ergebnisse der Mean Sea Level Untersuchungen deuten auf einen langfristigen Anstieg über die letzten ca. 170 Jahre hin. Eine Beschleunigungstendenz über die letzten Dekaden ist zu beobachten, kann jedoch nach heutigem Kenntnisstand unter Berücksichtigung aller verfügbaren Daten nicht als außergewöhnlich für die letzten 170 Jahren bezeichnet werden. Insgesamt können stärkere relative Anstiegsraten für die in Nord-Süd-Richtung verlaufende Küstenlinie (Schleswig-Holstein) als für die in Ost-West-Richtung verlaufende Küstenlinie (Niedersachsen) festgestellt werden, was vermutlich in erster Linie auf unterschiedlich stark ausgeprägte Vertikalbewegungen der Landoberfläche zurückzuführen ist. Aus dem Vergleich der Beobachtungen für die Deutsche Bucht mit Ergebnissen von großräumigeren Untersuchungen können Empfehlungen zur Berücksichtigung von Meeresspiegelszenarien im Rahmen regionaler Küstenschutzplanungen abgeleitet werden. Die Verteilung der Verweildauern der Wasserstände unterliegt ebenfalls regionalen Unterschieden. Während die Pegel der schleswig-holsteinischen Küste nördlich Husum eine unimodale (eingipfelige) Verteilung mit Schwerpunkt der Verweildauern nahe dem mittleren Tidehochwasser aufweisen, zeigen die übrigen Pegel eine bimodal ausgeprägte Verteilung mit Maxima nahe mittlerem Tidehoch- und Tideniedrigwasser. Die Trendentwicklung der durch Tideketten nicht unterschrittenen Scheitelhöhen bewegt sich auch für längere Ketten (bis zu 8 Tiden in ununterbrochener Folge) überwiegend über dem jeweiligen Trend der mittleren Tideniedrig- und Tidehochwasser sowie meist auch über dem Trend des Mean Sea Level. In den Jahren zwischen Mitte der 70er bis gegen Ende der 90er Jahre des letzten Jahrhunderts ist ein gehäuftes Auftreten von Kettenereignissen zu beobachten.

Summary

This final report focuses on presenting the results of the KFKI research project „AMSeL – Mean sea level and tidal analysis along the German North Sea coastline“. High frequency sea level data as well as tidal high and low water time series from selected tide gauges are used to construct and analyse high quality Mean Sea Level time series. At the same time, the high frequency data sets are used to analyse residence- or dwell-times of the tidal wave on different water level heights. Based on the long high and low water time series, successive highs and lows (i.e. specified number of extreme high or low waters in a row) are analysed. The results of the Mean Sea Level analyses point to a long term sea level rise over the last approximately 170 years. An acceleration could be observed over the last decades, but from today's knowledge and considering all available data sets it can not be denoted as unusual. Higher relative rates of sea level rise could be observed for the coastline in north-south direction (Schleswig-Hosltein) than for the coastline in east-west direction (Lower Saxony), which is most likely due to different rates of vertical land movement. From comparing the results for the German Bight with those from stud-

ies on wider regional scales, recommendations how to consider sea level scenarios for regional coastal protection planning purposes can be made. Residence time distribution also shows a north to south development from unimodal distributions with the peak near mean tidal highwater along the Schleswig-Holstein coastline to a bimodal distribution at Husum and along the Niedersachsen coastline. Trends of sustained reached and exceeded peak water levels predominantly are higher than respective trends of mean tidal low and mean tidal high water as well as mostly higher than the trend of the Mean Sea Level. Between the mid-1970s and mid to late-1990s an elevated count of successive tidal high and low water events are observed.

K e y w o r d s

Deutsche Bucht, Pegelzeitreihen, Mean Sea Level, Tideketten, Verweildauern

I n h a l t

1. Einführung 9
2. Datengrundlage 10
   2.1 Untersuchungsgebiet und ausgewählte Pegel 11
   2.2 Verfügbare Datensätze und Datenaufbereitung 12
   2.3 Berücksichtigung von Pegeloffsets 14
   2.4 Abschließende Beurteilung der Qualität der verfügbaren Datensätze 15
3. Methodisches Vorgehen 17
   3.1 Generierung von MSL-Zeitreihen auf Basis hochaufgelöster Pegeldaten 17
   3.2 Generierung von MSL-Zeitreihen auf Basis von Scheitelwerten mittels k-Wert Verfahren 19
      3.2.1 Problemstellung und Verfahrensbeschreibung 19
      3.2.2 Stationaritätstests 20
      3.2.3 Verifikation des k-Wert Verfahrens 28
   3.3 Ermittlung synthetischer Pegelzeitreihen 30
   3.4 Lineare Trendanalysen 32
   3.5 Nicht-lineare Trendanalysen 33
   3.6 Vertikale Landbewegungen 38
   3.7 Tideketten 40
      3.7.1 Begriffsbestimmung 41
      3.7.2 Häufigkeitsuntersuchung von Tnw- und Thw-Folgen 43
   3.8 Verweildauern 46
      3.8.1 Begriffsbestimmung 46
      3.8.2 Untersuchung der Verweildauern 47
4. Ergebnisse der Untersuchungen zur Entwicklung des RMSL in der Deutschen Bucht 49
   4.1 RMSL-Zeitreihen für die einzelnen Untersuchungspegel und ausgewählte synthetische Pegelzeitreihen 49
   4.2 Ergebnisse linearer Trendanalysen 51
   4.3 Ergebnisse nicht-linearer Trendanalysen 54
   4.4 Vertikale Landbewegungen im Bereich der Deutschen Bucht 59
   4.5 Globale und regionale Meeresspiegeländerungen und Szenarien für die zukünftige Entwicklung 62
5. Ergebnisse der Untersuchungen zum Auftreten von Tideketten in der Deutschen Bucht 69

5.1 Ergebnisse der Trenduntersuchung der maximalen Basishöhe der Tnw- und Thw-Ketten 70
5.2 Mittelwerte der maximal erreichten Basishöhe von n hintereinander auftretenden Tnw- und Thw-Folgen 74
5.3 Ereignisanzahl und Auftretensverteilung von n hintereinander auftretenden Tnw- und Thw-Folgen 77
6. Ergebnisse der Untersuchungen zur Entwicklung der Verweildauern der Tidewasserstände in der Deutschen Bucht 82
6.1 Ergebnisse der Verweildaueruntersuchungen der Pegel 82
6.2 Verweildauern von Sturmfluten am Pegel Hörnum und Cuxhaven 95
7. Fazit und weiterer Forschungsbedarf 99
8. Danksagung 102
9. Schriftenverzeichnis 103

Abbildungsverzeichnis

Abb. 1: Untersuchungsgebiet und für die Analysen ausgewählte Pegelstandorte 11
Abb. 2: Für die Analysen verfügbare Datensätze mit Unterscheidung zwischen hochaufgelösten Daten (mind. stündliche Werte) und Scheitelwerten (Thw und Tnw) und k-Werte, die für die einzelnen Pegel auf Basis der hochaufgelösten Daten ermittelt wurden 13
Abb. 3: Tidekurve mit ausgewählten Parametern zur Darstellung des Unterschiedes zwischen MSL und MT½w 17
Abb. 4: Unterschied zwischen RMSL-Jahreswerten, die aus Minutenwerten bzw. Stundenwerten generiert wurden 18
Abb. 5: Ergebnisse des KS-Tests für die k-Monatswertzeitreihe des Pegels Wilhelmshaven und den Zeitraum 1950-1974 unter Berücksichtigung 12-monatiger gleitender Zeitfenster; oben: Referenzzeitfenster am Anfang der Zeitreihe; unten: Referenzzeitfenster am Ende der Zeitreihe 22
Abb. 6: Ergebnisse des Sliding-Window-Tests für die k-Monatswertzeitreihe des Pegels Wilhelmshaven und den Zeitraum 1950-1974 unter Berücksichtigung 12-monatiger gleitender Zeitfenster; oben: Referenzzeitfenster am Anfang der Zeitreihe; unten: Referenzzeitfenster am Ende der Zeitreihe 23
Abb. 7: Ergebnis des Mann-Kendall-Tests für die k-Monatswertzeitreihe des Pegels Wilhelmshaven und den Zeitraum 1950-1974 24
Abb. 8: Ergebnis des SNHT für die k-Monatswertzeitreihe des Pegels Wilhelmshaven und den Zeitraum 1950-1974 26
Abb. 9: Mittlere k-Werte für unterschiedliche Zeiträume am Pegel Wilhelmshaven 26
Abb. 10: Mittlere k-Werte für unterschiedliche Zeiträume am Pegel Hörnum 27
Abb. 11: Vergleich von RMSL-Zeitreihen (ermittelt aus hochaufgelösten Daten und mit k = 0,4703) und der relativen MT½w-Zeitreihe (gleichbedeutend mit k = 0,5) für den Pegel Cuxhaven von 1918 bis 2008 28
Abb. 12: Mittlere Tidekurven sowie MSL und MT½w, für den Pegel Cuxhaven und die Jahre 1950 und 1995 29

Abb. 13: Oben: Mittlere RMSL-Anstiegsraten für benachbarte Jahre, ermittelt unter Berücksichtigung aller verfügbaren RMSL-Zeitreihen für die Deutsche Bucht. Mitte: Standardabweichung über dem Mittelwert, die sich bei der Berechnung der mittleren Anstiegsraten ergibt. Unten: Anzahl der Pegel, die für das betrachtete Jahr Daten bereitstellen. 31
Abb. 14: Wichtige Rechenschritte beim Monte-Carlo Autoregressive Padding exemplarisch dargestellt anhand der RMSL-Zeitreihe für den Pegel Cuxhaven: oben links: trendbereinigte RMSL-Zeitreihe; oben rechts: beispielhaftes Ergebnis aus dem AR1 Modell; unten links: Extrapolation der RMSL-Zeitreihe unter Verwendung der AR1 Modellergebnisse; unten rechts: Ergebnis der Extrapolation nach Berücksichtigung des zuvor eliminierten Trends 36
Abb. 15: Vergleich der SSA-Glättung unter Verwendung unterschiedlicher Ansätze zur Extrapolation im Vergleich zur „wahren" Glättung am Beispiel ausgewählter Intervalle der RMSL-Zeitreihe des Pegels Cuxhaven (oben links: 1843 bis 1980; oben rechts: 1843 bis 1960; unten links: 1843 bis 1940; unten rechts: 1843 bis 1920). 37
Abb. 16: Sielzug, schematisch (FRANK 2007) 41
Abb. 17: Schematischer Tideverlauf und Abgrenzung von Tnw- und Thw-Folgen 43
Abb. 18: Tnw-Häufigkeitsmatrix, Datenbasis: Tidepegel Cuxhaven, Zeitreihe 1918-2008 44
Abb. 19: Tnw-Folgen, Datenbasis: Tidepegel Cuxhaven, Zeitreihe 1918-2008 45
Abb. 20: Cuxhaven 1937-2008, maximal erreichte Basishöhe durch 1-8 aufeinanderfolgende Tnw 45
Abb. 21: Definitionsschema der Verweildauer 47
Abb. 22: Beispiel zur Verteilung von Verweilzeiten und Darstellung der Streuung aufgetretener Wasserstände in Bezug zum Tideverlauf, Pegel Cuxhaven, Kalenderjahr 2008 48
Abb. 23: Vergleich der Verweildauern resultierend aus unterschiedlichen Ausgangsdaten, 1-Minuten-Werte (rot), 60-Minuten-Werte (blau), 60-Minuten-Werte und Tidescheitel über Spline-Funktion zu 1-Minuten-Werten interpoliert (grün), 60-Minuten-Werte über Spline-Funktion zu 1-Minuten-Werten interpoliert (rosa) 49
Abb. 24: RMSL-Zeitreihen für alle Untersuchungspegel und synthetische Zeitreihen für die Bereiche Schleswig-Holstein (berücksichtigte Pegel sind mit (+) gekennzeichnet), Niedersachsen (berücksichtigte Pegel sind mit (-) gekennzeichnet) und die gesamte Deutsche Bucht (alle Pegel wurden berücksichtigt) 50
Abb. 25: Ergebnisse der Glättung mittels SSA und MCAP. Links: RMSL Jahreswertzeitreihen mit Glättungsfunktion und Ergebnissen der MCAP-Simulationen. Rechts: RMSL-Anstiegsraten, ermittelt aus der Differenzierung der Glättungsfunktionen. 56
Abb. 26: Ergebnisse der Glättung mittels SSA und MCAP der synthetischen Zeitreihe für die gesamte Deutsche Bucht. Oben: RMSL-Jahreswertzeitreihe mit Glättungsfunktion und Ergebnissen der MCAP-Simulationen. Unten: RMSL-Anstiegsraten, ermittelt aus der Differenzierung der Glättungsfunktionen aus den MCAP-Simulationen. 57
Abb. 27: Zeitreihen, die sich bei der Ermittlung gleitender linearer Trends (mit 95%-Konfidenzintervallen) über unterschiedliche Zeiträume (20, 30, 40

	und 50 Jahre) auf Basis der synthetischen Zeitreihe für die Deutsche Bucht ergeben. Die ermittelten Trends sind jeweils für das letzte Jahr der betrachteten Zeitperiode aufgetragen (siehe Pfeile in der Grafik).	57
Abb. 28:	Ergebnisse der Glättung mittels SSA und MCAP der synthetischen Zeitreihen für die Bereiche Niedersachsen (oben) und Schleswig Holstein (unten)	59
Abb. 29:	Landsenkungen, die für die Standorte der Untersuchungspegel auf Basis der RMSL-Zeitreihen ermittelt wurden und solche, die unter Verwendung eines globalen GIA-Modells ergeben haben.	61
Abb. 30:	Verschiedene MSL-Rekonstruktionen: Deutsche Bucht, Nord-Ost-Atlantik, Global.	64
Abb. 31:	Ergebnisse des Vergleichs unterschiedlicher MSL-Rekonstruktionen (Deutsche Bucht, Nord-Ost-Atlantik, Global). Oben: MSL-Anstiegsraten, Mitte: Differenzen der MSL-Anstiegsraten gebildet aus den Zeitreihenpaaren Deutsche Bucht - Global und Deutsche Bucht - Nord-Ost-Atlantik, Unten: 20-jährige gleitende Korrelationskoeffizienten für die Zeitreihenpaare Deutsche Bucht – Global und Deutsche Bucht – Nord-Ost-Atlantik.	65
Abb. 32:	Ausgewählte globale Meeresspiegelszenarien (alle gehen von einer globalen Erwärmung > 4°C aus) [nach Nicholls et al. 2011]	66
Abb. 33:	Ausgewählte regionale Meeresspiegelszenarien (Großbritannien und Nord-Ost-Atlantik) für das 21. Jahrhundert	67
Abb. 34:	MSL-Zeitreihe für die Deutsche Bucht mit Glättungsfunktion und verschiedene Meeresspiegelszenarien (IPCC, Katsman et al. 2008, Extrapolation der Beobachtung)	68
Abb. 35:	Lineare Trends für die maximal erreichte Basishöhe durch 1-8 aufeinanderfolgende Thw. Oben: für die einzelnen Pegel. Unten: zusammengeführt in Form synthetischer Reihen für Schleswig-Holstein, Niedersachsen und die Deutsche Bucht.	72
Abb. 36:	Lineare Trends für die maximal erreichte Basishöhe durch 1-8 aufeinanderfolgende Thw. Oben: für die einzelnen Pegel. Unten: zusammengeführt in Form synthetischer Reihen für Schleswig-Holstein, Niedersachsen und die Deutsche Bucht.	73
Abb. 37:	Mittelwerte der maximal erreichten Basishöhe von n hintereinander auftretenden Tnw und Thw (MHnTnw / MHnThw) in der Deutschen Bucht für den Zeitraum 1937-2008	76
Abb. 38:	Mittelwerte der maximal erreichten Basishöhe von n hintereinander auftretenden Tnw und Thw (MHnTnw / MHnThw) in der Deutschen Bucht für den Zeitraum 1954-2008	77
Abb. 39:	Cuxhaven 1937-2008, Überschreitungszahlen durch 1-3 aufeinanderfolgende Tnw (Folgen 4-8 unbesetzt). Links: ≥ $MTnw_{1937-2008}$ + 200 cm = 554 cm, Rechts: ≥ MSL + 50 cm des jeweiligen Jahres	79
Abb. 40:	List 1937-2008, Überschreitungszahlen durch 1-8 aufeinanderfolgende Tnw (Folgen 5-8 unbesetzt). Links: ≥ $MTnw_{1937-2008}$ + 200 cm = 603 cm, Rechts: ≥ MSL + 50 cm des jeweiligen Jahres	80
Abb. 41:	List 1937-2008, Überschreitungszahlen durch 1-4 aufeinanderfolgende Thw (Folgen 6-8 für MSL beschickte Reihe unbesetzt). Links: ≥ $MThw_{1937-2008}$ + 100 cm = 676 cm, Rechts: ≥ MSL + 200 cm des jeweiligen Jahres	80

Abb. 42: Pegel Cuxhaven: Verweildauer Verteilung für das Kalenderjahr 2008 (links), Mittlere Tide (durchgezogene Linie) und ausgedünnte Punktplots aller Einzeltiden (Punkte) des Kalenderjahr 2008 und Verlauf der jährlichen Mittleren Tide von 1918 bis 2008 (rechts) 83
Abb. 43: Pegel Cuxhaven, Darstellung der Kurvenfläche der jährlichen Mittleren Tide von 1918 bis 2008 (Links: Seitenansicht, Wasserstand bezogen auf Jahre, Rechts: Stirnansicht, Wasserstand bezogen auf Tidedauer) 83
Abb. 44: Verlauf der Mittleren Tidekurve für den Tidepegel Cuxhaven von 1918 bis 2008. Die Farbwerte geben den Wasserstand an. Schwarze Geraden zeigen den linearen Trend der mittleren Verweildauer oberhalb 600 cmPN, weisse Geraden zeigen den linearen Trend der mittleren Verweildauer über 400 cmPN 84
Abb. 45: Verlauf der Mittleren Tidekurve für den Tidepegel Cuxhaven für Sommerhalbjahre von 1918 bis 2008. Die Farbwerte geben den Wasserstand an. Schwarze Geraden zeigen den linearen Trend der mittleren Verweildauer oberhalb 600 cmPN, weisse Geraden zeigen den linearen Trend der mittleren Verweildauer über 400 cmPN 85
Abb. 46: Verlauf der Mittleren Tidekurve für den Tidepegel Cuxhaven für Winterhalbjahre von 1917/18 bis 2007/08. Die Farbwerte geben den Wasserstand an. Schwarze Geraden zeigen den linearen Trend der mittleren Verweildauer oberhalb 600 cmPN, weisse Geraden zeigen den linearen Trend der mittleren Verweildauer über 400 cmPN 85
Abb. 47: Verlauf der jährlichen Verweildauern für den Tidepegel Cuxhaven von 1918 bis 2008. Die Farbwerte geben die Verweilzeit in Stunden pro Jahr an (Isometrie) 86
Abb. 48: Verlauf der jährlichen Verweildauern für den Tidepegel Cuxhaven von 1918 bis 2008. Die Farbwerte geben die Verweilzeit in Stunden pro Jahr an (Aufsicht) 87
Abb. 49: Pegel Cuxhaven: Verteilung jährlicher Verweildauern ≥ 600 h/a in Bezug auf Höhenstufe und Jahr (Punkte) sowie lineare Trends (ungewichtet: rote Linie, gewichtet: blaue Linie) 87
Abb. 50: Pegel Cuxhaven: Verteilung jährlicher Verweildauern ≥ 450 h/a (für Höhenstufen unterhalb 500 cmPN) in Bezug auf Höhenstufe und Jahr (Punkte) sowie lineare Trends (ungewichtet: rote Linie, gewichtet: blaue Linie) 88
Abb. 51: Verweilzeitenverlauf einzelner Höhenstufen (620-640 cmPN, 640-660 cmPN und 660-680 cmPN, jeweils mit Stufenmitte gekennzeichnet) mit steigenden Trendverläufen, Cuxhaven, 1918-2008 89
Abb. 52: Verweilzeitenverlauf einzelner Höhenstufen (560-580 cmPN, 580-600 cmPN und 600-620 cmPN, jeweils mit Stufenmitte gekennzeichnet) mit fallenden Trendverläufen, Cuxhaven, 1918-2008 89
Abb. 53: Pegel List, Hörnum und Wyk. Verweildauer [h] für Kalender-, Sommerhalb- und Winterhalbjahr je 20 cm Höhenstufe (bezogen auf jeweiliges Pegelnull) 90
Abb. 54: Pegel Dagebüll, Wittdün, Husum und Helgoland. Verweildauer [h] für Kalender-, Sommerhalb- und Winterhalbjahr je 20 cm Höhenstufe (bezogen auf jeweiliges Pegelnull) 91

Abb. 55: Pegel Cuxhaven, Bremerhaven, LT Alte Weser und Wilhelmshaven. Verweildauer [h] für Kalender-, Sommerhalb- und Winterhalbjahr je 20 cm Höhenstufe (bezogen auf jeweiliges Pegelnull) 92
Abb. 56: Pegel Norderney und Emden. Verweildauer [h] für Kalender-, Sommerhalb- und Winterhalbjahr je 20 cm Höhenstufe (bezogen auf jeweiliges Pegelnull) 93
Abb. 57: Jährliche Verweildauern für die Untersuchungspegel (Kalenderjahr 2008) 94
Abb. 58: Entwicklung der kumulierten jährlichen Verweildauern für Sturmflut-Wasserstände am Pegel Hörnum 1936-2008. Grenzwert zur Definition einer Sturmflut zeitabhängig nachgeführt. 96
Abb. 59: Entwicklung der Sturmflutverweildauern für Einzelereignisse am Pegel Hörnum 97
Abb. 60: Entwicklung der kumulierten jährlichen Verweildauern für Sturmflut-Wasserstände am Pegel Cuxhaven 1901-2008. Grenzwert zur Definition einer Sturmflut zeitabhängig nachgeführt. 98
Abb. 61: Entwicklung der Sturmflutverweildauern für Einzelereignisse am Pegel Cuxhaven 98

Tabellenverzeichnis

Tab. 1: Übersicht über die für die Untersuchungspegel und unterschiedlichen Zeiträume erzielten Ergebnisse der Stationaritätstests der k-Wert-Zeitreihen 25
Tab. 2: Ergebnisse der linearen Trendanalysen auf Basis der RMSL-Zeitreihen für die Deutsche Bucht 52
Tab. 3: Ergebnisse der linearen Trendanalysen [mm/a] für die maximal erreichte Basishöhe von n hintereinander auftretenden Tnw und Thw für die Deutsche Bucht 71
Tab. 4: Mittelwerte der maximal erreichten Basishöhe von n hintereinander auftretenden Tnw und Thw (MHnTnw / MHnThw) in der Deutschen Bucht für die Zeiträume 1937-2008 und 1954-2008 75
Tab. 5: Ergebnisse der linearen Trendanalysen (Ereignisse/a) der Überschreitungszahl von n hintereinander auftretenden Tnw ≥ MSL + 100 cm in der Deutschen Bucht für die Zeiträume 1937-2008 und 1954-2008 81
Tab. 6: Ergebnisse der linearen Trendanalysen (Ereignisse/a) der Überschreitungszahl von n hintereinander auftretenden Thw ≥ MSL + 300 cm in der Deutschen Bucht für die Zeiträume 1937-2008 und 1954-2008 81
Tab. 7: Pegel Cuxhaven, mittlere Verweildauerzunahme 84
Tab. 8: Grenzwerte zur Definition einer Sturmflut 95
Tab. 9: Lineare Trends der jährlichen Sturmflutverweildauer für unterschiedliche Zeiträume 98

1. Einführung

Ein Ansteigen des mittleren Meeresspiegels (MSL) stellt eine der Hauptgefahren dar, der wir uns im Zuge eines sich erwärmenden Klimas ausgesetzt sehen. Derzeit leben weltweit ca. 200 Millionen Menschen in tief liegenden Gebieten und sind der potenziellen Gefahr von Überflutungen ausgesetzt. Aufgrund der Bevölkerungszunahme und der immer stärkeren Besiedlung der Küstengebiete wird diese Zahl in Zukunft weiter ansteigen und kann bis ca. 2080 eine Größenordnung von 800 Millionen erreichen (NICHOLLS 2010). Gleichzeitig beeinflusst ein erhöhter MSL die in unregelmäßigen Abständen auftretenden Sturmfluten, was die Gefahr für Überflutungen entlang der betroffenen Küstenabschnitte ansteigen lässt. Aus diesem Grund hatten viele in der jüngsten Vergangenheit durchgeführte Untersuchungen regionale und besonders globale Änderungen des MSL zum Gegenstand. Dabei wurden sowohl die bisher mit Hilfe von Pegeln und Satelliten beobachteten Änderungen (z.B. CAZENAVE ET AL. 2008; CHURCH AND WHITE 2006; CHURCH ET AL. 2008; DOMINGUES ET AL. 2008; HAIGH ET AL. 2009; HOLGATE, 2007; WAHL ET AL. 2010; WOODWORTH ET AL. 2008 AND 2009; WÖPPELMANN ET AL. 2008 AND 2009) analysiert, als auch Zukunftsszenarien mit Hilfe semi-empirischer (RAHMSTORF 2007; VERMEER AND RAHMSTORF 2009; GRINSTED ET AL. 2009; JEVREJEVA ET AL. 2010) und numerischer Modellstudien (zusammengefasst in MEEHL ET AL. 2007) abgeleitet. Eine umfangreiche Recherche zur Literatur der letzten ca. 10 Jahre zu dem Thema wurde von GÖNNERT ET AL. (2009) durchgeführt, Hinweise auf ältere und nicht weniger interessante Arbeiten sind u.a. in JENSEN (1984) zu finden.

Aus diversen Untersuchungen (z.B. CHURCH ET AL. 2004, 2008; MITROVICA ET AL. 2001, 2009) wird deutlich, dass es in der Vergangenheit räumlich gesehen signifikante Unterschiede in der Entwicklung des MSL gegeben hat. Neben der ungleichmässigen Verteilung von Schmelzwasser von Gletschern und Eisschilden, spielen in diesem Zusammenhang auch Gravitationseffekte, Ozeanzirkulation, ungleichmässige thermische Ausdehnung und Salinität eine Rolle. MILLER UND DOUGLAS (2007) und WOODWORTH ET AL. (2010) zeigen, dass auch grossräumige Variationen des atmosphärischen Drucks zu berücksichtigen sind.

Da davon ausgegangen werden muss, dass sich die in der Vergangenheit beobachtete ungleichmässige räumliche Entwicklung auch in Zukunft fortsetzen wird, stellt sich für den Küstenschutz die Frage, welche Änderungen in dem jeweiligen Gebiet zu erwarten sind und auf welche Weise vorausschauend auf diese reagiert werden kann. Derzeit wird den im 4. Sachstandsbericht (AR4) des Intergovernmental Panel on Climate Change (IPCC) veröffentlichten Szenarien (siehe MEEHL ET AL. 2007) zur Entwicklung des MSL am meisten Beachtung geschenkt. Dies hat dazu geführt, dass entsprechende Sicherheiten (bzw. Klimazuschläge) bei Bemessungsfragen im Küstenraum berücksichtigt werden. Da es sich jedoch bei den IPCC-Szenarien um globale Szenarien handelt, werden die zu erwartenden regionalen Unterschiede in der Entwicklung in keiner Weise berücksichtigt. Regionale Studien zur Ableitung entsprechender Zukunftsszenarien sind daher unerlässlich und stellen eine grosse Herausforderung für die Wissenschaft in den nächsten Jahren dar. Zur Validierung der Modelle, die bei solchen Untersuchungen genutzt werden, sind qualitativ hochwertige und möglichst lange Beobachtungszeitreihen für das betrachtete Gebiet erforderlich.

Im Falle der Deutschen Bucht haben in der Vergangenheit diverse Studien zur Entwicklung unterschiedlicher Tideparameter (Tidehoch- und Niedrigwasser, Tidenhub etc.) stattgefunden (z.B. FÜHRBÖTER UND JENSEN 1985; GÖNNERT ET AL. 2004; JENSEN 1984; TÖPPE

UND BROCKMANN 1992). Eine detaillierte Analyse der Änderungen im MSL unter Verwendung der verfügbaren hochaufgelösten Datensätze ist hingegen bis heute nicht erfolgt (hochaufgelöst meint hier mind. stündliche Wasserstandswerte). Neben den hochaufgelösten Datensätzen, die mit Ausnahme weniger Pegel seit Ende der 1990er Jahre verfügbar sind, stehen häufig sehr lange und i.d.R. lückenlose Zeitreihen der Tidehoch- und Niedrigwasser zur Verfügung. Somit ist die Datenlage für den Bereich der deutschen Nordseeküste in einem weltweiten Vergleich insgesamt als sehr gut zu bezeichnen (WAHL ET AL. 2008). Im Rahmen des hier vorliegenden Abschlussberichts des BMBF geförderten KFKI-Forschungsvorhabens „AMSeL – Analyse von hochaufgelösten Tidewasserständen und Ermittlung des MSL an der deutschen Nord-seeküste" wurden erstmals die heute verfügbaren hochaufgelösten Datensätze in die verschiedenen Analysen einbezogen. Neben den Untersuchungen zur langfristigen Entwicklung des MSL wurden auch weitergehende Analysen zu Tideketten und Verweildauern durchgeführt. Tideketten meint hier das Auftreten mehrerer besonders hoher oder auch besonders niedriger Tidehochwasser (Thw) bzw. Tideniedrigwasser (Tnw) in Folge. So besteht beispielsweise bei einer größeren Anzahl hintereinander auftretender hoher Tnw die Gefahr, dass die Binnenentwässerung nicht planmäßig erfolgen kann und es bei entsprechenden zeitgleich auftretenden extremen Hochwasserabflüssen zu Überflutungen im Hinterland kommt (z.B. FRANK 2007). Während für diese Art der Untersuchungen die langen Scheitelwertzeitreihen die Grundlage bilden, sind Analysen zu Variationen und Trends in den Verweilzeiten auf unterschiedlichen Höhenstufen nur auf Basis hochaufgelöster Datensätze möglich. Hieraus lassen sich Rückschlüsse darüber ziehen, ob Änderungen in der Form der Tidekurve in der Vergangenheit zu beobachten waren und ob tendenziell damit zu rechnen ist, dass sich die Hauptlast des Wellenangriffs in Zukunft auf bisher weniger geschützte Abschnitte des Küstenschutzsystems verlagert.

Im vorliegenden Abschlussbericht sind die Ergebnisse aus dem Forschungsvorhaben AMSeL folgendermaßen strukturiert dargestellt: Im Folgenden Kapitel 2 wird eine Übersicht über das gewählte Untersuchungsgebiet und die verfügbaren Datensätze gegeben, die von Dienststellen der Wasser- und Schifffahrtsverwaltung des Bundes (WSV) bereitgestellt und vor der weiteren Verwendung noch einmal einheitlich plausibilisiert wurden. In Kapitel 3 werden die genutzten und teilweise im Rahmen des Projektes neu entwickelten Methoden zur Analyse des MSL, sowie der Tideketten und Verweildauern im Detail beschrieben. Im Anschluss sind in Kapitel 4 die Ergebnisse der MSL-Analysen dargestellt, bevor die Kapitel 5 und 6 die Ergebnisse aus den Untersuchungen zu Tideketten und Verweildauern zusammenfassen. Der Beitrag schließt mit einem Fazit und einer Darstellung des identifizierten weiteren Forschungsbedarfs zu den behandelten Themenfeldern.

In Anhang 1 findet sich ein parallel zu diesem Bericht entstandenes Pegelprotokoll mit detaillierten Informationen zu den genutzten Daten und deren Aufbereitung. Anhang 2 stellt für die untersuchten Pegel die Auswertungen zum Auftreten von Tideketten in grafischer Form hinsichtlich der Anzahl aufgetretener Ereignisse sowie der maximal erreichten Basishöhen zusammen.

2. Datengrundlage

Im Folgenden soll das dem AMSeL-Vorhaben zugrunde liegende Untersuchungsgebiet inklusive der für die Analysen berücksichtigten Nordseepegel im Detail vorgestellt werden.

2.1 Untersuchungsgebiet und ausgewählte Pegel

Wie aus Abb. 1 hervorgeht, beschränkt sich das Untersuchungsgebiet des AMSeL-Projektes auf die Deutsche Bucht, den süd-östlichen Teil der Nordsee. Bei der Auswahl der zu untersuchenden Pegelstandorte bestand das Hauptziel darin, die gesamte deutsche Nordseeküste abzudecken und dabei ausschließlich Pegel zu berücksichtigen, von denen bekannt war bzw. im Vorfeld recherchiert wurde, dass ausreichend lange Zeitreihen für die geplanten Analysen zur Verfügung stehen.

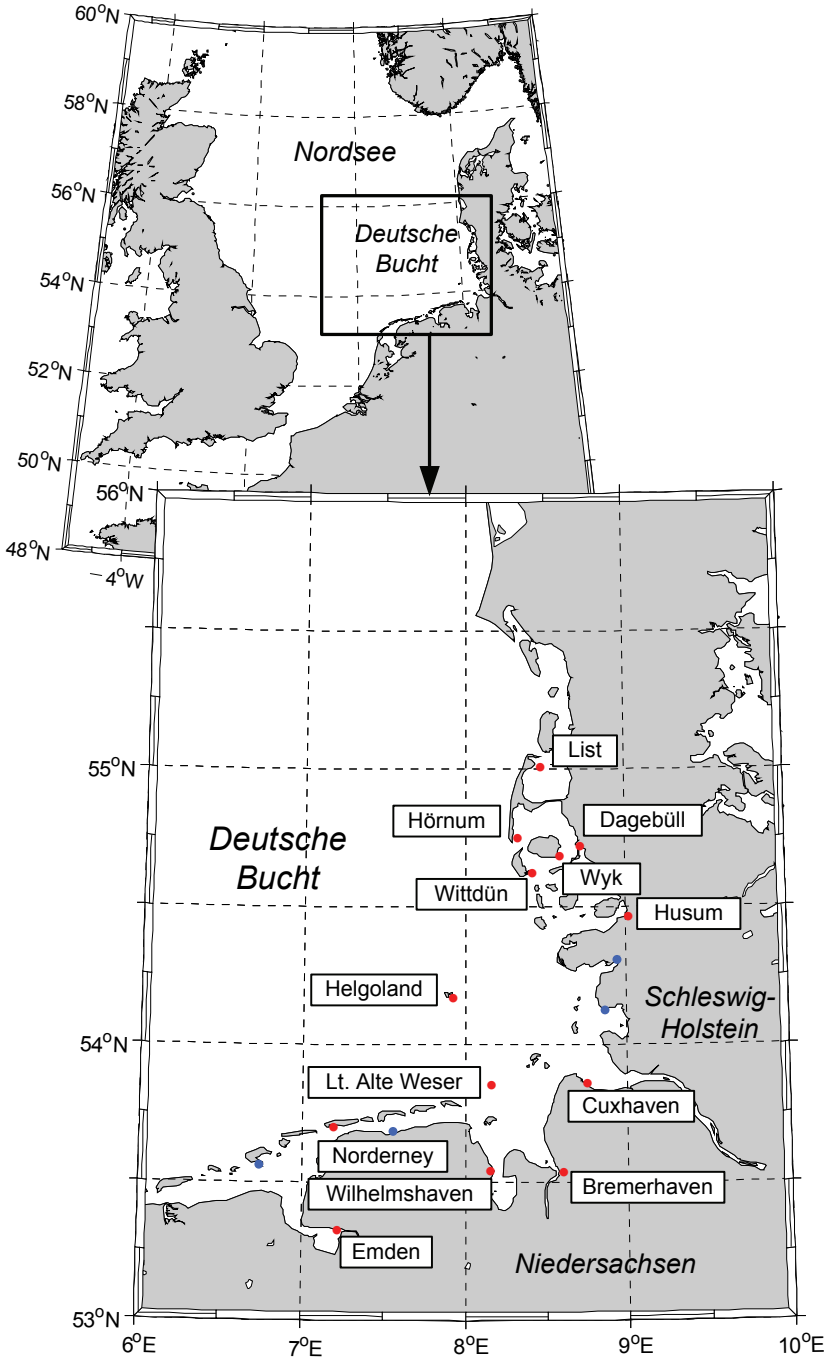


Abb. 1: Untersuchungsgebiet und für die Analysen ausgewählte Pegelstandorte

Es wurden ursprünglich 18 Pegel für die Analysen ausgewählt, die relativ gleich verteilt entlang der deutschen Nordseeküste angeordnet sind. Nachdem alle für die ausgewählten Pegel verfügbaren Daten aufwendig recherchiert und akquiriert wurden, stellte sich anhand von verschiedenen Analysen heraus, dass einige der zunächst ausgewählten Pegelstandorte für die geplanten Untersuchungen unbrauchbar waren. Bei diesen, in Abb. 1 in blau dargestellten Pegeln, handelt es sich um die Pegel Tönning, Büsum, Bensersiel, Schlüttsiel und Borkum.

Der Pegel Tönning wurde nicht weiter berücksichtigt, da sich hier durch den Bau des Eidersperrwerkes (Fertigstellung 1973) starke Beeinflussungen der Wasserstände ergeben haben, wodurch keine aussagekräftigen Ergebnisse bei den geplanten Analysen zu erwarten waren. Ähnliches gilt für den Pegel Büsum, dessen aufgezeichnete Wasserstände durch die Eindeichung der Meldorfer Bucht (Deichschluss 1978) nachweislich beeinflusst sind (MÜGGE UND JENSEN 1991). Die Standorte Bensersiel und Schlüttsiel sind aufgrund der Sielbeeinflussung und der dadurch entstehenden Verformungen der Tidekurven besonders für MSL Untersuchungen ungeeignet und wurden daher für die im Projekt AMSeL durchgeführten Analysen nicht weiter berücksichtigt. Für den Pegel Borkum (Fischerbalje) sind bisher nicht erklärbare Ungereimtheiten in den hochaufgelösten Datensätzen identifiziert worden (siehe Pegelprotokoll).

Die übrigen, in Abb. 1 in rot dargestellten 13 Pegel, stellen nach dem heutigen Kenntnisstand lange und qualitativ hochwertige Beobachtungsdaten bereit und wurden daher für die im Folgenden beschriebenen Untersuchungen herangezogen.

2.2 Verfügbare Datensätze und Datenaufbereitung

Wie oben bereits erwähnt, wurden die für die ausgewählten Pegel verfügbaren Datensätze zu Beginn recherchiert und von den Dienststellen der WSV für die geplanten Untersuchungen zur Verfügung gestellt. Abb. 2 enthält eine Übersicht über die bereitgestellten Datensätze für die 13 Untersuchungspegel. Hierbei wird unterschieden zwischen hochaufgelösten Daten und Scheitelwerten der Tidehoch- und Tideniedrigwasser. Hochaufgelöst bedeutet mind. stündliche Wasserstandswerte, wobei für alle Pegel ab Ende der 1990er Jahre sogar minütliche Beobachtungswerte verfügbar sind. Lediglich für die Pegel Helgoland, Cuxhaven und Wilhelmshaven standen vor Beginn der Arbeiten längere hochaufgelöste Zeitreihen zur Verfügung, wobei es sich dabei um halbstündliche und stündliche Werte handelt (näheres zur zeitlichen Auflösung der einzelnen Datensätze siehe Pegelprotokoll). Während der Projektlaufzeit wurden einige zusätzliche Daten digitalisiert und zur Reduktion der Unsicherheiten in die Analysen einbezogen. Für den Pegel Hörnum wurden die Daten der Jahre 1950, 1965, 1976 und 1987 durch den Landesbetrieb Straßen, Brücken und Gewässer in Hamburg (LSBG) digitalisiert und ebenso als minütliche Werte zur Verfügung gestellt, wie die durch den Landesbetrieb Küstenschutz, Nationalpark und Meeresschutz Schleswig-Holstein (LKN) digitalisierten Daten der Jahre 1951 und 1952 des Pegels Wyk.

Neben diesen hochaufgelösten Daten stehen, wie aus Abb. 2 zu sehen ist, Zeitreihen der Tidehoch- und Tideniedrigwasserscheitel für die meisten Pegel lückenlos ab 1936/1937 zur Verfügung. Längere Zeitreihen stellen lediglich die Pegel Cuxhaven (ab 1843), Norderney (ab 1901) und Lt. Alte Weser (ab 1903) bereit. Im Falle des Pegels Lt. Alte Weser sind vor 1930 einige Lücken vorhanden. Diese sind darauf zurückzuführen, dass für die betreffenden

Jahre zwar grundsätzlich Daten zur Verfügung stehen, diese jedoch nicht ausreichen, um MSL-Jahreswerte entsprechend der in Kapitel 3 beschriebenen Definition zu generieren.

Näheres zu den ebenfalls in Abb. 2 dargestellten k-Werten für die einzelnen Untersuchungspegel und die verschiedenen Zeiträume ist Kapitel 3.2 zu entnehmen.

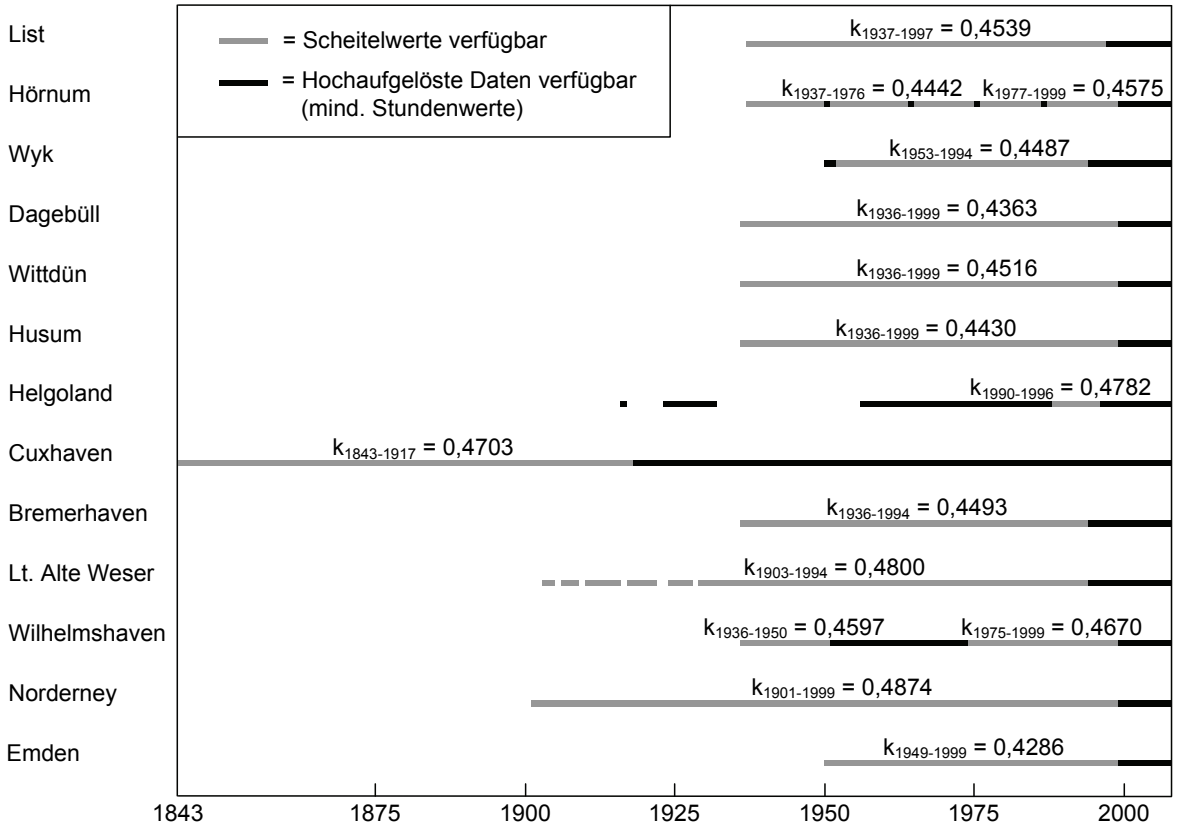


Abb. 2: Für die Analysen verfügbare Datensätze mit Unterscheidung zwischen hochaufgelösten Daten (mind. stündliche Werte) und Scheitelwerten (Thw und Tnw) und k-Werte, die für die einzelnen Pegel auf Basis der hochaufgelösten Daten ermittelt wurden

Zur Sicherstellung einer (zumindest näherungsweise) einheitlichen Qualität der akquirierten Daten, wurde zunächst eine zusätzliche und einheitliche Plausibilisierung durchgeführt. Das hierfür genutzte Programm wurde am Forschungsinstitut Wasser und Umwelt (fwu) entwickelt und auf alle verfügbaren Datensätze gleichermaßen angewendet. Dabei wurde nach folgenden Auffälligkeiten in den Zeitreihen der hochaufgelösten Daten und der Scheitelwerte gesucht:

- Grenzwertüberschreitungen, wobei sich die Grenzwerte an den höchsten Tidehochwassern (HHThw) und niedrigsten Tideniedrigwassern (NNTnw) aus den Deutschen Gewässerkundlichen Jahrbüchern (DGJ) orientieren.
- Zeiträume, in denen der Wasserstand sehr lange (> 60 Minuten) einen konstanten Wert angenommen hat.
- Datenlücken (diese in den Ursprungsdatensätzen häufig mit dem Wert -777 gekennzeichnet).

Im Falle einer Warnung wurden die entsprechenden Zeiträume in den Originaldatensätzen visuell geprüft und ggf. gelöscht. So wurden beispielsweise Tiden, die eine Lücke > 60 Minuten aufweisen, entnommen. D.h. die vorhandene Lücke wurde bis zu den umgebenden Tnw erweitert.

Die Ergebnisse der Plausibilisierung bzw. eine Übersicht der gelöschten Zeiträume für die einzelnen Datensätze enthält das Pegelprotokoll. Weitere aufwendige Tests zu kleineren ungewöhnlichen Verformungen einzelner Tidekurven sind nicht erfolgt, da solche Einzelfälle die hier im Wesentlichen genutzten Jahreswerte nicht beeinflussen.

2.3 Berücksichtigung von Pegeloffsets

Im Rahmen des KFKI-Forschungsverbundvorhabens *IKÜS – Aufbau eines integrierten Höhenüberwachungssystems in Küstenregionen durch Kombination höhenrelevanter Sensorik,* welches im Jahr 2008 abgeschlossen wurde, wurden detaillierte Untersuchungen zu höhenrelevanten Messverfahren im Bereich der deutschen Nordseeküste durchgeführt. Dabei hat sich der Teil IKÜS-B, bearbeitet durch die Bundesanstalt für Gewässerkunde (BfG), intensiv mit dem Thema Pegel befasst. Hierbei wurde festgestellt, dass es in der Vergangenheit teilweise zu Fehlinterpretationen der Pegelvorschrift (LAWA UND BMV 1997) gekommen ist, welche durch die Bund-/Länder-Arbeitsgemeinschaft Wasser (LAWA) und das Bundesministerium für Verkehr (BMV) veröffentlicht wurde. Dies hat sich in Form von manuellen Verschiebungen der Pegellatten und somit Änderungen in den Sollhöhenunterschieden zwischen Pegelnullpunkt und den (repräsentativen) Pegelfestpunkten geäußert. Im Rahmen von IKÜS wurden die geodätischen Pegelinformationen sehr aufwendig aufbereitet, so dass rückwirkend eine konstante Beziehung zwischen Pegelnullpunkt und repräsentativem Pegelfestpunkt hergestellt werden kann. Faktisch bedeutet dies, dass Korrekturen (im Folgenden als Offsets bezeichnet) an die verfügbaren Wasserstandszeitreihen anzubringen sind, um diese entsprechend zu homogenisieren. Detailliertere Informationen zu der kurz beschriebenen Problematik, den genutzten Verfahren zur Aufbereitung der erforderlichen Daten und eine umfangreiche Ergebnisdarstellung sind IKÜS (2008) oder WANNINGER ET AL. (2009) zu entnehmen.

Für das Projekt AMSeL wurden die in IKÜS ermittelten Offsets berücksichtigt, um eine möglichst hohe Qualität bei den für die Analysen genutzten Daten zu erzielen. Da auch im IKÜS-Projekt Untersuchungspegel zu wählen waren, wobei andere Ansprüche und Zielsetzungen im Vordergrund standen, stehen entsprechende Ergebnisse nicht für alle, jedoch die meisten der hier gewählten Untersuchungspegel zur Verfügung. Diese sind: Emden, Norderney, Bremerhaven, Wilhelmshaven, Cuxhaven, Helgoland, Hörnum und Dagebüll.

Für die Aufbereitung der Wasserstandsdaten im AMSeL-Projekt wurden die ermittelten Offsets (siehe IKÜS 2008) nicht in vollem Umfang berücksichtigt. Da die Offsets millimetergenau ermittelt wurden, die Wasserstandszeitreihen jedoch zentimetergenau zur Verfügung stehen, wurde beschlossen, nur Offsets > 1 cm zu berücksichtigen. Hierdurch wird vermieden, dass ohnehin in den Wasserstandszeitreihen vorhandene Rundungsfehler ggf. noch einmal vergrößert werden. Entsprechend aufbereitete Tabellen und Grafiken mit den berücksichtigten Offsets sind im Pegelprotokoll enthalten. Es kann festgehalten werden, dass die Auswirkungen durch das Anbringen der Offsets für die meisten Untersuchungspegel sehr gering sind. Hierdurch wird die Annahme gestützt, welche zwangsläufig zu treffen war und davon ausgeht, dass die Auswirkungen für die hier genutzten aber nicht in IKÜS

untersuchten Pegel ebenfalls gering wären, wenn entsprechende Offsets zur Verfügung stehen würden. Eine Ausnahme stellt der Pegel Norderney dar, für den teilweise Offsets in einer Größenordnung von 5 cm über längere Zeiträume hinweg ermittelt wurden.

2.4 Abschließende Beurteilung der Qualität der verfügbaren Datensätze

Wie in der Einführung bereits erwähnt wurde, ist die Verfügbarkeit von Wasserstandszeitreihen für die Deutsche Bucht im weltweiten Vergleich als sehr gut zu beurteilen. Dies betrifft sowohl die Dichte des betriebenen Messnetzes, als auch die Gesamtlänge der verfügbaren Zeitreihen und deren Vollständigkeit (für die meisten Pegel sind keinerlei oder nur kurze Lücken vorhanden). Im Vergleich zu anderen europäischen Küstenanrainern (z.B. England) ist die Verfügbarkeit von lange zurückreichenden hochaufgelösten Daten (mit Ausnahme weniger Pegel, wie z.B. Cuxhaven) hingegen als mittelmäßig zu bezeichnen. Analoge Pegelschriebe über lange Zeiträume (für die meisten Pegel mind. ab ca. 1935) liegen jedoch den entsprechenden Dienststellen vor. Dadurch besteht grundsätzlich die Möglichkeit, längere hochaufgelöste Zeitreihen im Nachhinein zu digitalisieren. Dabei handelt es sich um einen zeitaufwendigen und dementsprechend kostenintensiven Arbeitsschritt, der wie die folgenden Analysen zeigen werden, jedoch einen Mehrwert bzw. eine deutliche Qualitätsverbesserung der Untersuchungsergebnisse erwarten lässt.

Insgesamt sind die hier berücksichtigten Datensätze hinsichtlich ihrer Qualität differenziert zu beurteilen. Bei allen Datenreihen kann nach 1935 von einer sehr guten Qualität ausgegangen werden. Diese Annahme gründet sich zum Einen auf die Tatsache, dass seit 1935 Aufzeichnungen über regelmäßige Höhenkontrollen der Pegelfestpunkte vorliegen (WANNINGER ET AL. 2009). Zum Anderen zeigen Analysen, die im Rahmen früherer Untersuchungen (z.B. JENSEN 1984; SCHÖNFELD UND JENSEN 1991) und auch im Rahmen des AMSeL-Projektes durchgeführt wurden, einen sehr starken Zusammenhang zwischen den einzelnen Zeitreihen ab 1935. Für den Zeitraum vor 1935 stehen überhaupt nur für 4 Pegel Daten zur Verfügung, wobei es sich für Helgoland nur um wenige Jahre handelt, für die Stundenwerte aus Digitalisierarbeiten vorliegen. Somit können für den Zeitraum vor 1935 bei Trendanalysen nur die Pegel Cuxhaven, Lt. Alte Weser und Norderney genutzt werden (siehe Kapitel 3.4). Für alle drei Pegel ergeben sich für den genannten Zeitraum gewisse Unsicherheiten, die auf das Fehlen von detaillierten Informationen zu den verschiedenen Höhenbezügen zurückzuführen sind.

Im Falle des Pegels Norderney zeigen die Ergebnisse des IKÜS-Projektes, dass zur Homogenisierung der Zeitreihe viele Offsets anzubringen sind, die signifikante Auswirkungen auf die Gesamtzeitreihe haben. Aufgrund des Fehlens detaillierter Informationen für den Zeitraum vor 1935 konnten in IKÜS keine Offsets für diesen Zeitraum ermittelt werden. Dadurch ergibt sich für die im AMSeL-Projekt genutzten Datenreihen des Pegels Norderney eine gewisse Unsicherheit für den Zeitraum von 1901 bis 1935.

Im Falle des Pegels Lt. Alte Weser stammen die Daten vor 1964 ursprünglich vom Pegel Roter Sand und wurden mittels einer Regressionsbeziehung (siehe JENSEN ET AL. 1988) auf den Pegel Lt. Alte Weser übertragen. Gleichzeitig finden sich im Stammbuch des Pegels Roter Sand Hinweise auf u.U. stattgefundene und nicht eindeutig erfasste Verschiebungen des Pegelnullpunktes zu unterschiedlichen Zeiträumen vor 1935. Eine Überprüfung, ob

solche Verschiebungen stattgefunden haben und wenn ja zu welchen Zeitpunkten und in welchem Umfang konnte bisher nicht belastbar erfolgen. Grundsätzlich lassen die Untersuchungen von DANGENDORF (2010) zur Detektion von Bruchpunkten in Wasserstandszeitreihen, bei entsprechender Weiterentwicklung, jedoch darauf hoffen, dass eine ggf. erforderliche Homogenisierung der Zeitreihe in Zukunft erfolgen kann. Für die hier durchgeführten Analysen ergibt sich zunächst wiederum eine Unsicherheit für den Zeitraum vor 1935.

Für den Pegel Cuxhaven liegen Daten ab 1843 vor, wobei Stundenwerte aus aufwendigen Digitalisierarbeiten (veranlasst durch Dipl.-Ozean. Ralph Annutsch, i.R., ehemals BSH) ab 1918 verfügbar sind. Für den Zeitraum 1855 bis 1912 ermitteln LASSEN ET AL. (1984) auf Basis der Auswertung von historischen Nivellements eine Bauwerkssetzung des Leuchtturms Cuxhaven, an dem eine eingehauene Kerbe zur Höhenkontrolle des Pegelnullpunktes herangezogen wurde. Auf Grundlage der Ergebnisse geben SIEFERT UND LASSEN (1985) Korrekturfunktionen für unterschiedliche Zeiträume zwischen 1855 und 1900 an, die an die Daten aus den Gewässerkundlichen Jahrbüchern zur Homogenisierung angebracht werden sollen. Von JENSEN ET AL. (1988) (KFKI-Vorhaben zur „Wasserstandsentwicklung in der Deutschen Bucht") wurden die genannten Korrekturen in einem späteren Vorhaben mit Beteiligung von Herrn Prof. Siefert in der projektbegleitenden Gruppe jedoch nicht berücksichtigt. Zudem weisen LASSEN ET AL. (1984) darauf hin, dass Lentz, dessen Nivellement aus dem Jahr 1855 u.a. Grundlage für die Bestimmung der Senkungsraten war, selbst Zweifel an der Richtigkeit der von ihm ermittelten Höhen geäußert hat. Ohne die Berücksichtigung dieses Nivellements würden sich andere Senkungsraten ergeben, die zu berücksichtigen wären. Des Weiteren ist fraglich, ob die aus den Nivellements ermittelten Höhenunterschiede in vollem Umfang auf lokale Setzungen im Bereich des Leuchtturmes zurückzuführen sind. Aus den veröffentlichten Ergebnissen wird nicht eindeutig klar, ob nicht teilweise auch die Unterschiede in den großräumigeren Vertikalbewegungen zwischen den Ausgangspunkten der Nivellements (Bremen und Hamburg) und dem Bereich Cuxhaven in den Messungen erfasst wurden. Eine Korrektur der Pegelzeitreihen um diesen Anteil an Vertikalbewegungen wäre nicht korrekt, da hier die Analyse des relativen MSL (RMSL) im Vordergrund steht und auch keine Korrektur der restlichen Zeitreihe (nach 1900) erfolgt. Durch Anbringen der Korrekturen wären die Daten von 1843 bis 1855 nicht länger Nutzbar, da für diesen Zeitraum keinerlei Informationen aus weiteren Nivellements vorliegen. Aufgrund dieser Ausführungen wurde beschlossen, die von SIEFERT UND LASSEN (1985) empfohlenen Korrekturen im AMSeL-Projekt nicht zu berücksichtigen. Wie die Erläuterungen zeigen, ergibt sich auch hierdurch eine Unsicherheit, die in diesem Fall den Zeitraum 1843 bis 1900 betrifft. Da der Pegel Cuxhaven der einzige Pegel ist, für den Daten von vor 1900 verfügbar sind, sind die im späteren Verlauf dargestellten Ergebnisse für diesen Zeitraum entsprechend zu bewerten.

Aus Korrelationsanalysen zwischen den drei Pegeln (Lt. Alte Weser, Norderney und Cuxhaven) für den Zeitraum 1900 bis 1935 konnten trotz der erwähnten Unsicherheiten starke und signifikante Zusammenhänge ermittelt werden. Dies begründet die Entscheidung, hier nicht auf die historischen und wertvollen Informationen der wenigen langen Pegelzeitreihen zu verzichten. Trotz der beschriebenen Unsicherheiten ist davon auszugehen, dass auf Basis der späteren Analysen belastbare Ergebnisse für den fraglichen Zeitraum erzielt werden können.

3. Methodisches Vorgehen

Im Folgenden sollen die im Rahmen des AMSeL-Projektes genutzten und teilweise neu- bzw. weiterentwickelten Verfahren und Methoden im Detail vorgestellt werden. Zunächst wird die Art und Weise erläutert, mit der die zu analysierenden MSL-Zeitreihen generiert wurden, bevor intensiver auf die Analyseverfahren (für MSL, Verweildauern und Tideketten) eingegangen wird.

3.1 Generierung von MSL-Zeitreihen auf Basis hochaufgelöster Pegeldaten

Ziel ist es, für die ausgewählten Pegel möglichst lange und qualitativ hochwertige MSL-Zeitreihen zu generieren. Bei alleiniger Berücksichtigung der hochaufgelösten Daten würden für die meisten Pegel lediglich Zeitreihen mit einer Länge von ca. 10 Jahren zur Verfügung stehen. Wie aus Abb. 3 zu erkennen ist, kann der MSL, als Schwerelinie der Tidekurve, jedoch ausschließlich auf Basis solcher hochaufgelöster Daten ermittelt werden. Auf Basis der Scheitelwerte können lediglich Zeitreihen des mittleren Tidehalbwassers (MT½w) generiert werden, die, wie anhand der späteren Analysen zu erkennen sein wird, besonders im Bereich der Deutschen Bucht deutliche Unterschiede zum MSL aufweisen können. Es wurde daher eine Methode genutzt bzw. weiterentwickelt, die es ermöglicht MSL-Zeitreihen und MT½w-Zeitreihen zu kombinieren, ohne dabei die Analyseergebnisse zu verfälschen. Bevor diese Methode im nachfolgenden Kapitel im Detail erläutert wird, soll hier kurz beschrieben werden, auf welche Weise und unter Berücksichtigung welcher Definitionen MSL-Zeitreihen aus hochaufgelösten Daten im Rahmen des AMSeL-Projektes generiert wurden.

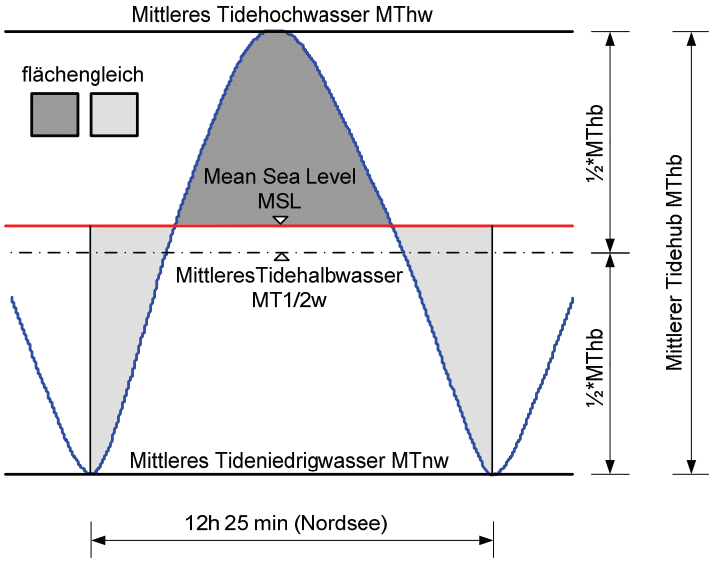


Abb. 3: Tidekurve mit ausgewählten Parametern zur Darstellung des Unterschiedes zwischen MSL und MT½w

Liegen hochaufgelöste Datensätze vor, errechnet sich der MSL als arithmetisches Mittel aller registrierten Werte über einen bestimmten Zeitraum. Dabei können Stundenwerte oder noch höher aufgelöste Datensätze genutzt werden (IOC 2002; PUGH 2004). Alternativ können Filterverfahren (z.B. Doodson X0 Filter) zum Einsatz kommen, um den Tideeinfluss zu

eliminieren und anschließend den MSL-Wert für den betrachteten Zeitraum (z.B. Monat) zu berechnen (IOC 2002). Beim Umgang mit Datenlücken wurden im AMSeL-Projekt die Definitionen des Permanent Service of Mean Sea Level (PSMSL, http://www.psmsl.org/) berücksichtigt, auf dessen Datenbank für die meisten international durchgeführten MSL-Untersuchungen zurückgegriffen wird. Demnach wird ein MSL-Monatswert nur dann berechnet, wenn für mind. 15 Tage des betrachteten Monats Wasserstandswerte vorliegen. Ein MSL-Jahreswert wird nur errechnet, wenn 11 bzw. 12 Monatswerte für das betreffende Jahr vorhanden sind. Dabei wird eine Gewichtung entsprechend der Anzahl der Tage, aus denen die jeweiligen Monatswerte ermittelt wurden, vorgenommen.

Wie aus dem vorigen Kapitel zu entnehmen ist, stehen für die hier geplanten Untersuchungen teilweise verschiedene hochaufgelöste Datensätze (1-, 30-, 60-Minutenwerte) für ein und denselben Pegel zur Verfügung (Cuxhaven, Helgoland, Wilhelmshaven). Um die MSL-Zeitreihen aus Minutenwerten mit denjenigen aus Stundenwerten verbinden zu können, muss geprüft werden, ob die Unterschiede in der zeitlichen Auflösung einen Einfluss auf die MSL-Jahreswerte besitzen. Letztere bilden die Grundlage für alle weiteren Analysen.

Abb. 4 zeigt einen Vergleich zwischen Jahreswerten, die auf Basis von Minutenwerten ermittelt wurden, mit solchen, die auf Basis von Stundenwerten errechnet wurden (jeweils für den Pegel Cuxhaven und den Zeitraum von 1998 bis 2008). Die in der Abbildung verwendete Abkürzung RMSL steht für relativer MSL und soll verdeutlichen, dass die durchgeführten Analysen (wie auch die meisten der nun folgenden) auf der Basis von direkt beobachteten Zeitreihen stattgefunden haben, die ggf. durch Vertikalbewegungen des Landes beeinflusst sind (näheres siehe Kapitel 3.6 und 4.4). Beide Zeitreihen verlaufen nahezu deckungsgleich und auch aus den abgebildeten Residuen lässt sich kein systematischer Unterschied feststellen.

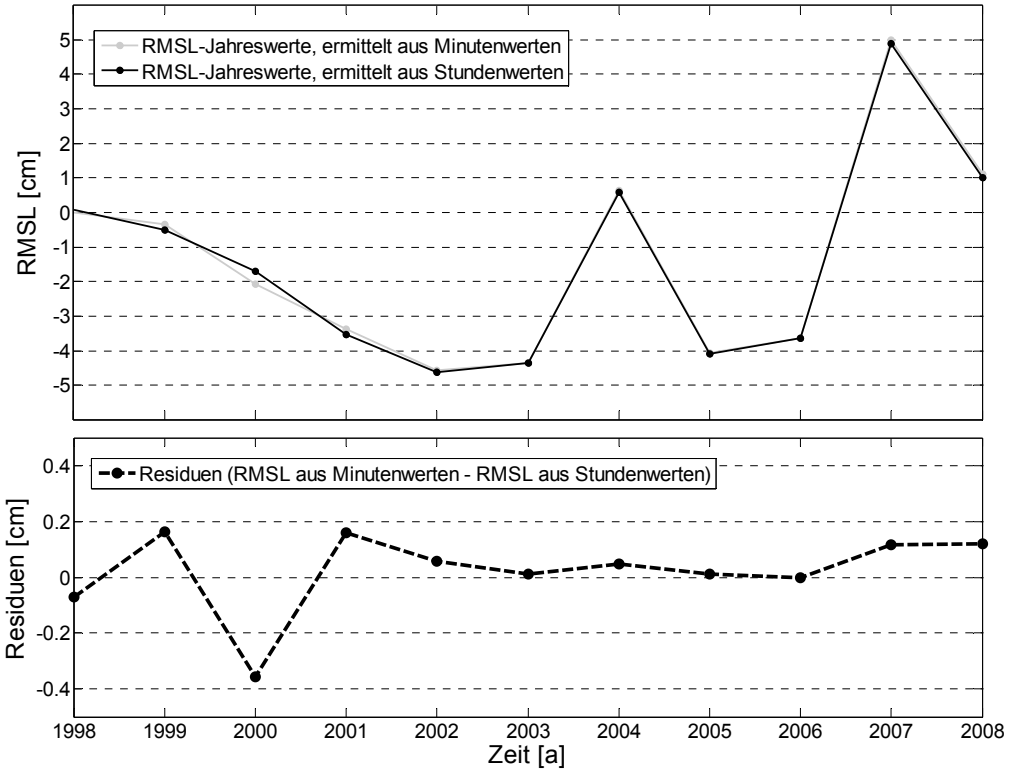


Abb. 4: Unterschied zwischen RMSL-Jahreswerten, die aus Minutenwerten bzw. Stundenwerten generiert wurden

Berücksichtigt man, dass die Wasserstände ohnehin lediglich zentimetergenau angegeben werden, ist der hier ermittelte Unterschied für alle berücksichtigten Jahre als Null anzusetzen. Somit können RMSL-Zeitreihen die aus Minutenwerten, stündlichen- oder halbstündlichen Werten generiert wurden ohne weitere Korrektur miteinander verbunden und analysiert werden.

3.2 Generierung von MSL-Zeitreihen auf Basis von Scheitelwerten mittels k-Wert Verfahren

Entsprechend der Informationen aus dem vorherigen Kapitel können RMSL-Zeitreihen (Landsenkungen nicht berücksichtigt) für alle in Abb. 2 dargestellten Zeiträume mit hochaufgelösten Daten ermittelt werden. Im Folgenden wird die Methodik beschrieben, die verwendet wurde, um auch die langen Scheitelwertzeitreihen für die geplanten Analysen nutzbar zu machen.

3.2.1 Problemstellung und Verfahrensbeschreibung

Wie aus Abb. 3 zu entnehmen ist, können MSL-Zeitreihen nicht durch alleinige Berücksichtigung von Scheitelwerten generiert werden. Die in der Abbildung dargestellte Differenz zwischen MSL (aus hochaufgelösten Daten) und MT½w (aus Scheitelwerten) wurde bereits von LENTZ (1879) beschrieben und ergibt sich aufgrund von Verformungen der Tidewelle im Flachwasserbereich. Die Größe der Differenz zwischen MSL und MT½w ist stark abhängig von der Topographie des lokalen Küstenvorfeldes und damit sehr pegelspezifisch. Im Bereich der Deutschen Bucht ist der Effekt aufgrund der vergleichsweise geringen Wassertiefen im Küstennahbereich sehr stark ausgeprägt. Aus Vergleichsuntersuchungen im AMSeL-Projekt ergaben sich Differenzen zwischen MSL und MT½w von ca. 3 cm (Norderney) bis ca. 23 cm (Emden).

Einen Ansatz zur Berücksichtigung dieser Differenzen durch die Ermittlung und Einbeziehung so genannter k-Werte beschreibt LASSEN (1989). Der k-Wert ist dabei ein dimensionsloser Parameter, der einen Rückschluss darüber zulässt, wie stark die Tidekurve an einem bestimmten Pegel verformt ist. Nach LASSEN (1989) errechnet sich der k-Wert für einen bestimmten Zeitraum über folgende Gleichung:

$$k = \frac{(MThw - MSL)}{MThb} \qquad (1)$$

Wobei MThw gleich der Zeitreihe des mittleren Tidehochwassers und MThb gleich der Zeitreihe des mittleren Tidehubs ist. Im Falle einer symmetrischen Tidekurve ergibt sich demnach ein k-Wert von 0,5. Je stärker der k-Wert nach unten abweicht, desto stärker die Verformung der Tidekurve am betrachteten Pegelstandort. Da auch der MSL in die Ermittlung der k-Werte einfließt, können beispielsweise k-Monatswerte ausschließlich für diejenigen Zeiträume ermittelt werden, für die hochaufgelöste Daten zur Verfügung stehen.

Nach der obigen Gleichung lässt sich der MSL für einen bestimmten Pegelstandort bei bekanntem k-Wert und verfügbarer Scheitelwerte über folgende Beziehung ermitteln:

$$MSL = MThw - k \cdot MThb \qquad (2)$$

Um über diese Beziehung im vorliegenden Fall lange zurückreichende RMSL-Zeitreihen aus den Scheitelwerten zu generieren (um diese mit den RMSL-Zeitreihen aus den hochaufgelösten Daten zu kombinieren) muss die Annahme getroffen werden, dass der k-Wert keinen signifikanten zeitabhängigen Änderungen unterworfen ist und eine konstante Größe für einen betrachteten Standort darstellt. Da diese Annahme ohne weitere Untersuchungen nicht belastbar getroffen werden kann, wurden im Rahmen des AMSeL-Projektes zunächst k-Monatswertzeitreihen für alle Zeiträume mit hochaufgelösten Daten ermittelt, die anschließend mit Hilfe verschiedener Tests auf Stationarität geprüft wurden (siehe Kapitel 3.2.2). Durch Berücksichtigung der Zeitabhängigkeit ergibt sich für die Bestimmung des k-Wertes nach Gleichung (1) folgende Beziehung:

$$k(t) = \frac{\left(MThw(t) - MSL(t)\right)}{MThb(t)} \qquad (3)$$

Wobei MThw(t) gleich der Zeitreihe des monatlichen MThw, MSL(t) gleich der Zeitreihe des monatlichen MSL und MThb(t) gleich der Zeitreihe des monatlichen MThb ist.

3.2.2 Stationaritätstests

Wie oben erwähnt, wurden im Rahmen des AMSeL-Projektes verschiedene Testverfahren angewendet, um zu prüfen, ob die aus den hochaufgelösten Daten ermittelten k-Monatswertzeitreihen als stationär angenommen werden können. Ist dies der Fall, kann der mittlere k-Wert eines Pegels genutzt werden, um lange zurückreichende RMSL-Zeitreihen aus den Scheitelwerten zu generieren. Im umgekehrten Fall müssen identifizierte Instationaritäten der k-Werte bei der Generierung von RMSL-Zeitreihen berücksichtigt werden. Nach SALAS (1993) gilt eine Zeitreihe als stationär, wenn sie frei von Trends, Sprüngen und Periodizitäten ist. Um dies nachzuweisen, wurden hier insgesamt drei verschiedene statistische Testverfahren, so genannte Stationaritätstests genutzt. Dabei handelt es sich um einen 2-dimensionalen Kolmogorov-Smirnov-Test, einen Sliding-Window-Test und den Mann-Kendall-Test. Die einzelnen Testverfahren werden im Folgenden kurz erläutert und die jeweiligen Ergebnisse anhand einer ausgewählten Zeitreihe detailliert und im Anschluss im Gesamtüberblick dargestellt. Für nähere Informationen zu den genutzten Testverfahren wird auf MUDERSBACH (2010) und die darin erwähnten Literaturquellen verwiesen.

Beim 2-dimensionalen Kolmogorov-Smirnov-Test (KS-Test) wird geprüft, ob ausgewählte Stichproben signifikante Unterschiede hinsichtlich ihrer kumulierten Wahrscheinlichkeiten bezogen auf eine als Referenzzeitreihe definierte Stichprobe aufweisen. Da hier immer nur eine einzelne k-Monatswertzeitreihe auf Stationarität geprüft werden soll, werden die ersten (bzw. letzten) 12 Monate als Referenzzeitreihe definiert und anschließend mit denjenigen Zeitreihen verglichen, die sich beim Verschieben des 12-monatigen Zeitfensters um je einen Monat ergeben. Da die Ergebnisse in diesem Fall relativ stark von den statistischen Eigenschaften der Referenzzeitreihe abhängen, wird der Test beidseitig durchgeführt, d.h. einmal bilden die ersten 12 Monatswerte die Referenzzeitreihe und einmal die letzten. Als Vergleichsgröße wird die maximale Differenz D_{ks} zwischen den kumulierten Wahrscheinlichkeitsverteilungen des jeweils betrachteten Zeitfensters und der Referenzzeitreihe ermit-

telt. Die Nullhypothese H_0 besagt dabei, dass die beiden zu vergleichenden Zeitreihen identisch sind. Sie wird beim überschreiten festgelegter Signifikanzniveaus (in Abhängigkeit einer gewählten Irrtumswahrscheinlichkeit und der Zeitfensterlänge) verworfen. Die Gegenhypothese H_1 besagt, dass die beiden zu vergleichenden Zeitreihen unterschiedlich sind. Im vorliegenden Fall werden viele 12-monatige Stichproben der verfügbaren k-Wert-Zeitreihe mit der Referenzzeitreihe (die ersten oder letzten 12 Monate) verglichen, wobei die Nullhypothese in einigen Fällen angenommen und in anderen verworfen wird. Die noch offene Frage besteht darin, ab welchem Anteil an Verwerfungen der Nullhypothese (Ablehnungsrate) eine Zeitreihe belastbar als instationär bezeichnet werden kann. Eine auf Monte-Carlo-Simulationen basierende Methode zur Bestimmung von Grenzwerten der Ablehnungsraten, bei deren Überschreiten Instationarität angenommen wird, ist in MUDERSBACH (2010) beschrieben. Dabei wurden Grenzwerte für die Ablehnungsraten im Bereich 20-30% in Abhängigkeit der Zeitfensterlänge und der Gesamtlänge der Zeitreihe ermittelt. Mit Hilfe von Sensitivitätsanalysen, bei denen das in MUDERSBACH (2010) beschrieben Vorgehen auf Basis von k-Wert-Zeitreihen wiederholt wurde, wurden ähnliche Ablehnungsraten ermittelt. Einer konservativen Abschätzung folgend, wurde festgelegt, dass eine k-Wert-Zeitreihe beim Überschreiten einer Ablehnungsrate von 20% als instationär zu bezeichnen ist. Aus Abb. 5 ist zu erkennen, dass sich für die k-Wert-Zeitreihe des Pegels Wilhelmshaven von 1950 bis 1974 unterschiedliche Ergebnisse ergeben, je nachdem welches Zeitfenster als Referenz herangezogen wird. Liegt das Referenzzeitfenster am Anfang der Stichprobe, so ist die Ablehnungsrate < 20% und die Zeitreihe wird als stationär angenommen. Umgekehrt, wird die Ablehnungsrate von 20% überschritten, wenn das Referenzzeitfenster am Ende der Zeitreihe liegt. Alleinig auf Basis dieser Ergebnisse, ist die Entscheidung, ob die zugrunde liegende Zeitreihe als stationär oder instationär anzunehmen ist, nur schwierig zu treffen. Um eine belastbare und objektive Entscheidung treffen zu können sind weitere Tests erforderlich.

Eine ähnliche, auf gleitenden Zeitfenstern basierende Vorgehensweise wie beim KS-Test wird auch beim Sliding-Window-Test genutzt (Abb. 6). In diesem Fall werden die Mittelwerte für die Referenzstrichproben (die ersten bzw. letzten 12 Monatswerte) inklusive der 95%-Konfidenzintervalle berechnet. Anschließend werden die Mittelwerte für die gleitenden 12-monatigen Zeitfenster berechnet und geprüft, wie groß der Anteil ist, der sich innerhalb der Konfidenzintervalle des Mittelwertes des Referenzzeitfensters befindet.

Auch hierzu wurden von MUDERSBACH (2010) umfangreiche Analysen basierend auf Monte-Carlo-Simulationen durchgeführt, mit deren Hilfe Grenzwerte für die Ablehnungsraten bzw. Überschreitungsraten bestimmt wurden. Demnach wird eine Zeitreihe als instationär angenommen, wenn die Überschreitungsrate > 60% ist. Auch dieser Wert konnte mit Hilfe von Sensitivitätsanalysen auf der Basis von k-Wert-Zeitreihen im Rahmen des AMSeL-Projektes bestätigt werden. Die Ergebnisse des Sliding-Window-Tests mit einer Zeitfensterlänge von 12 Monaten (Pegel Wilhelmshaven, 1950 bis 1974) sind in Abb. 6 dargestellt, wobei diese auch hier von der Lage des Referenzzeitfensters abhängen. Liegt das Referenzzeitfenster am Anfang der Zeitreihe, ergibt sich eine Überschreitungsrate < 60%, liegt es am Ende ist die Überschreitungsrate > 60% und die Zeitreihe als instationär zu bewerten.

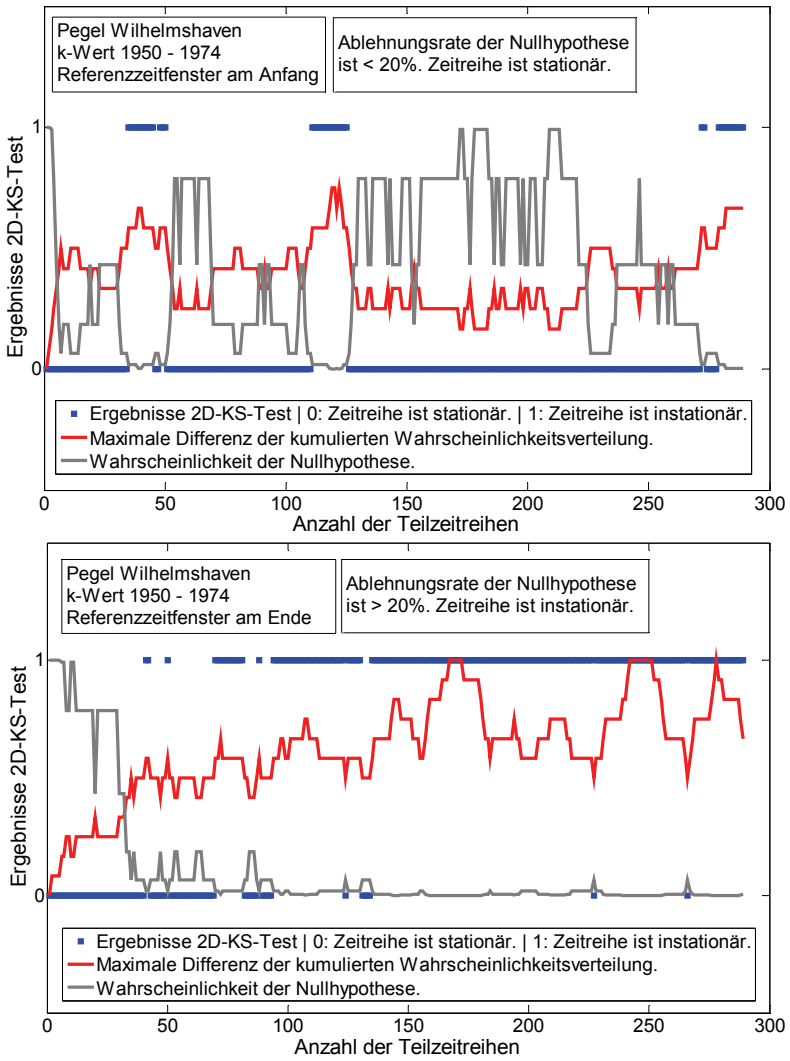


Abb. 5: Ergebnisse des KS-Tests für die k-Monatswertzeitreihe des Pegels Wilhelmshaven und den Zeitraum 1950-1974 unter Berücksichtigung 12-monatiger gleitender Zeitfenster; oben: Referenzzeitfenster am Anfang der Zeitreihe; unten: Referenzzeitfenster am Ende der Zeitreihe

Als weiterer und letzter Test wurde der Mann-Kendall-Test (MANN 1945) auf alle zur Verfügung stehenden k-Wert-Zeitreihen angewandt. Bei diesem Test wird geprüft, ob ein signifikanter Trend in der zugrunde liegenden Zeitreihe vorhanden ist. Dabei wird das Maß τ der Abhängigkeit zwischen einzelnen Datenpaaren ermittelt und über eine Teststatistik geprüft, ob dieses Maß als signifikant zu bezeichnen ist. Abb. 7 zeigt wiederum die Ergebnisse des Tests für die k-Wert-Zeitreihe des Pegels Wilhelmshaven und den Zeitraum 1950 bis 1974. In der Grafik ist die berücksichtigte Zeitreihe inkl. der linearen Trendfunktion dargestellt, wobei der ermittelte Trend im vorliegenden Fall gemäß Mann-Kendall-Test als signifikant zu bezeichnen ist. Würde man auf Basis dieses Tests entscheiden, wäre die Zeitreihe demnach als instationär anzunehmen.

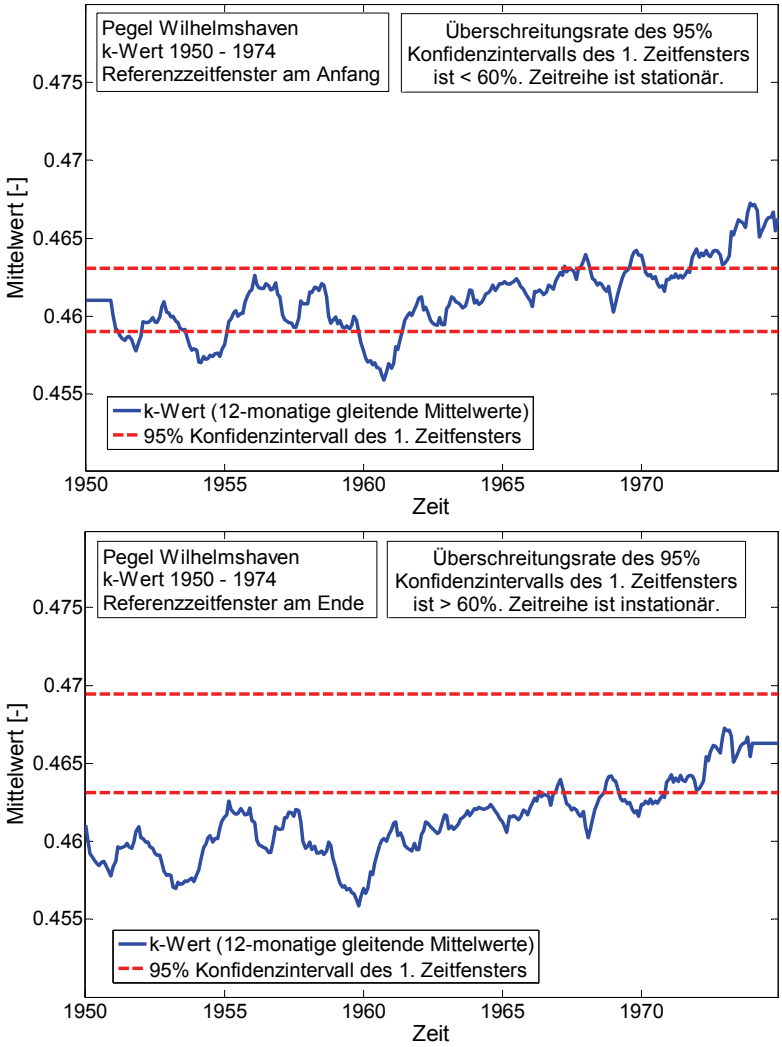


Abb. 6: Ergebnisse des Sliding-Window-Tests für die k-Monatswertzeitreihe des Pegels Wilhelmshaven und den Zeitraum 1950-1974 unter Berücksichtigung 12-monatiger gleitender Zeitfenster; oben: Referenzzeitfenster am Anfang der Zeitreihe; unten: Referenzzeitfenster am Ende der Zeitreihe

Betrachtet man alle für die k-Wert-Zeitreihe des Pegels Wilhelmshaven (1950 bis 1974) erzielten Ergebnisse der Stationaritätstests, so deuten drei der Tests auf Instationarität und zwei auf Stationarität der Zeitreihe hin. Nach MUDERSBACH (2010) sollte in diesem Fall eine Entscheidung entweder auf Basis des mehrheitlichen Ereignisses getroffen werden oder der Bearbeiter nimmt eine Gewichtung der verwendeten Tests vor. Gleichzeitig werden für eine schnelle Entscheidungsfindung in der Praxis der Mann-Kendall-Test und der Sliding-Window-Test empfohlen. Bei ausschließlicher Berücksichtigung dieser beiden Tests würde das Ergebnis im Falle Wilhelmshaven zwei zu eins zu Gunsten der Instationarität lauten. Dementsprechend wurde die Entscheidung getroffen, dass die hier für Beispielzwecke herangezogene k-Wert-Zeitreihe des Pegels Wilhelmshaven für den Zeitraum 1950 bis 1974 als instationär anzusehen ist (siehe auch Tab. 1), was für die spätere Ermittlung von RMSL-Zeitreihen auf Basis der Scheitelwerte zu berücksichtigen ist (siehe unten).

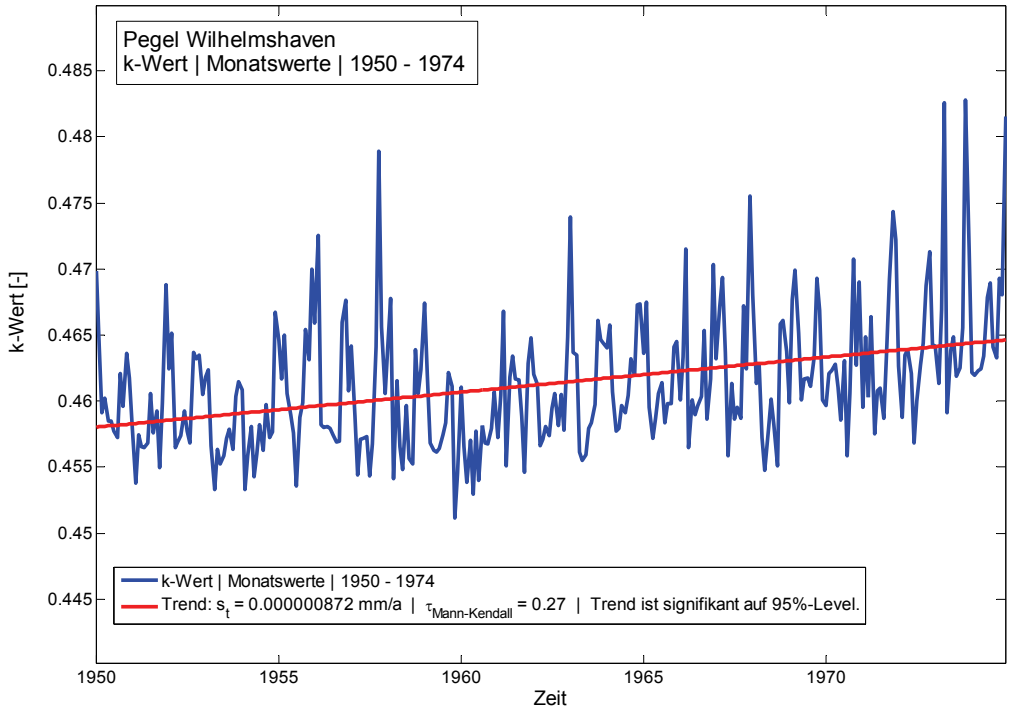


Abb. 7: Ergebnis des Mann-Kendall-Tests für die k-Monatswertzeitreihe des Pegels Wilhelmshaven und den Zeitraum 1950-1974

Tab. 1 enthält eine Gesamtübersicht über die Ergebnisse, die bei den Stationaritätstests aller hier berücksichtigten Pegel und den unterschiedlichen Zeiträumen erzielt wurden. Grundsätzlich wurde die Entscheidung, ob eine Zeitreihe als stationär oder instationär anzunehmen ist, auf Basis der mehrheitlichen Ereignisse getroffen. Diesem Ansatz folgend sind alle weiteren hier analysierten Zeitreihen als stationär anzunehmen. Das bedeutet, dass ein mittlerer k-Wert aus allen Monatswerten berechnet und zur Generierung langer RMSL-Zeitreihen nach Gleichung 2 genutzt werden kann.

Die Hauptunsicherheit in der beschriebenen Vorgehensweise besteht darin, dass für die meisten Pegel lediglich geprüft werden kann, ob der k-Wert über die letzten ca. 10 Jahre hinweg als stationäre Größe an dem betrachteten Ort angenommen werden kann. Wie am Beispiel Wilhelmshaven zu erkennen ist, kann es jedoch in der Vergangenheit (i.d.R. durch bauliche Eingriffe) zu Änderungen im k-Wert gekommen sein, die in diesen Fällen nicht erfasst werden. Die Digitalisierung weiterer historischer Daten in hochaufgelöster Form kann dazu Beitragen, diese Unsicherheit maßgeblich zu reduzieren. Die Ergebnisse in Kapitel 3.2.3 deuten darauf hin, dass die Anwendung der hier gewählten Vorgehensweise unter Berücksichtigung von auf Stationarität geprüften k-Werten gerechtfertigt ist. Es werden bessere Ergebnisse erzielt, als es der Fall wäre, wenn alternativ ausschließlich mit Tidehalbwasserzeitreihen gearbeitet würde.

In Abb. 2 sind die k-Werte dargestellt, welche für die verschiedenen Pegel ermittelt und zur Generierung von RMSL-Zeitreihen auf Basis der Scheitelwerte herangezogen wurden. Wie aus den vorangegangenen Analysen hervorgeht, wurde instationäres Verhalten der k-Werte am Pegel Wilhelmshaven festgestellt, was bei der Ermittlung von RMSL-Zeitreihen auf Basis der Scheitelwerte zu berücksichtigen ist.

Dazu wurde die Zeitreihe von 1950 bis 1974 mit Hilfe des Standard-Normal-Homogeneity Tests (SNHT), einem Verfahren zur Detektion von Bruchpunkten in Zeitreihen, auf Sprünge hin untersucht. Näheres zu dem Testverfahren und dessen Anwendbarkeit

im Zusammenhang mit Wasserstandszeitreihen der Deutschen Bucht ist in DANGENDORF (2010) zu finden. Die Ergebnisse in Abb. 8 deuten auf zwei Sprünge in der betrachteten Zeitreihe hin, die für die weiteren Analysen von Bedeutung sind. Diese traten im August 1972 und im September 1963 auf, wobei letzterer zumindest zeitlich mit der Ausbaggerung des Hafens 1959 bis 1963 in Verbindung gebracht werden kann (www.wsa-wilhemshaven.de).

Abb. 9 zeigt die gesamte k-Monatswertzeitreihe für Wilhelmshaven und die mittleren k-Werte, welche sich für unterschiedliche Zeiträume (gewählt nach Auswertung des SNHT) ergeben. Demnach wurde für die Generierung von RMSL-Zeitreihen aus den Scheitelwerten von 1975 bis 1999 ein mittlerer k-Wert von k = 0,4670 verwendet (siehe Abb. 2). Dieser ergibt sich aus der Mittelung der verfügbaren k-Monatswerte von August 1972 bis 2008 (siehe Abbildung 9). Für den Zeitraum vor 1950 wurde ein mittlerer k-Wert von k = 0,4597 zur Generierung von RMSL-Zeitreihen genutzt (siehe Abb. 2), welcher sich aus der Mittelung der k-Monatswerte von 1950 bis September 1963 ergibt (siehe Abb. 9).

Tab. 1: Übersicht über die für die Untersuchungspegel und unterschiedlichen Zeiträume erzielten Ergebnisse der Stationaritätstests der k-Wert-Zeitreihen

Pegel	Zeitraum	Mann-Kendall	Kolmogorov-Smirnov		Sliding-Window		Beurteilung des Verhaltens d. Zeitreihe
			Bezugszeitfenster				
		-	Anfang	Ende	Anfang	Ende	
Bremerhaven	1994-2008	o	x	x	x	x	stationär
Cuxhaven	1918-2008	x	o	x	x	x	stationär**
	1997-2008	x	x	x	x	x	stationär
Dagebüll	1997-2008	x	x	x	x	x	stationär
Emden	2000-2008	x	x	x	x	x	stationär
Helgoland	1952-1990	o	x	x	x	x	stationär**
	1997-2008	x	x	x	x	x	stationär
Hörnum	1999-2008	x	x	x	x	x	stationär*
Husum	1999-2008	x	x	x	x	x	stationär
List	1996-2008	o	x	x	x	x	stationär
LT Alte Weser	1994-2008	x	o	x	x	x	stationär
Norderney	2000-2009	x	x	x	o	x	stationär
Wilhelmshaven	1950-1974	o	x	o	x	o	***instationär****
	2000-2008	x	x	x	x	x	stationär
Wittdün	1999-2008	x	x	x	x	x	stationär
Wyk	1994-2008	x	x	x	x	x	stationär

x = stationär; o = instationär
* Siehe zusätzliche Erläuterung im Text
** Siehe zusätzliche Informationen im Pegelprotokoll

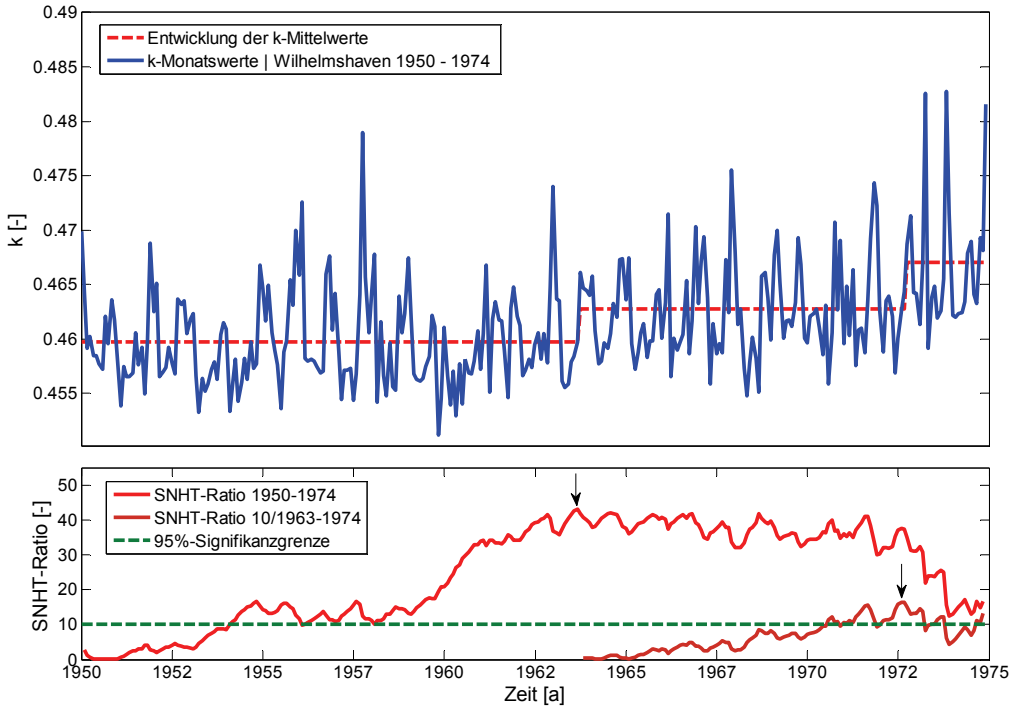


Abb. 8: Ergebnis des SNHT für die k-Monatswertzeitreihe des Pegels Wilhelmshaven und den Zeitraum 1950-1974

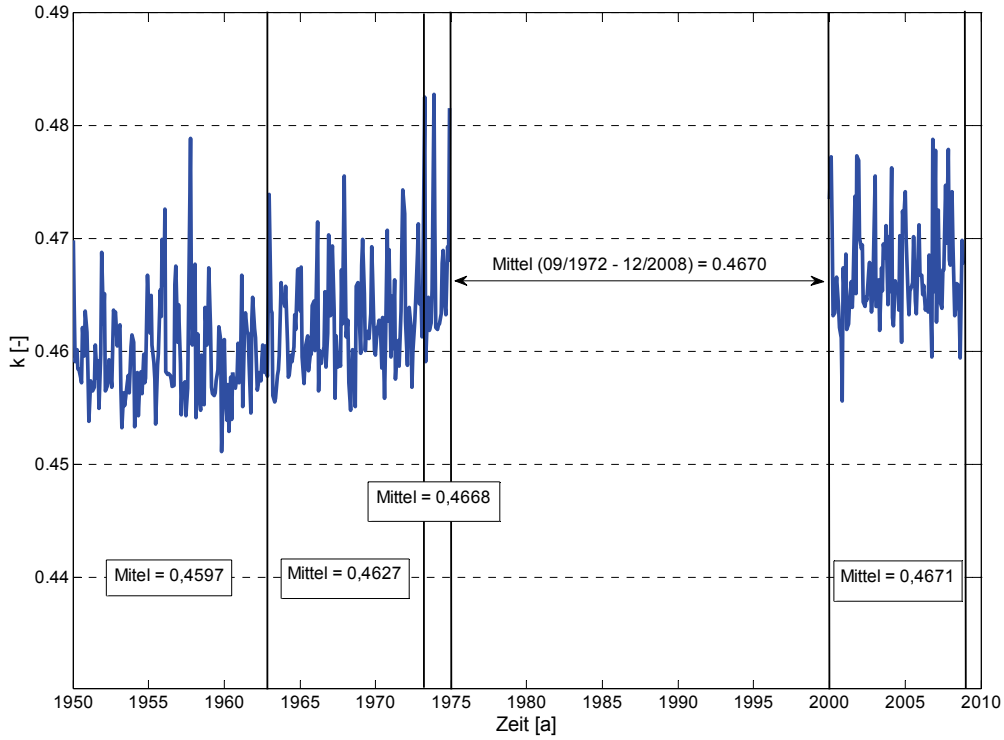


Abb. 9: Mittlere k-Werte für unterschiedliche Zeiträume am Pegel Wilhelmshaven

Neben Wilhelmshaven, ist der Pegel Hörnum der zweite Pegel, für den entsprechend der Abb. 2 unterschiedliche mittlere k-Werte für verschiedene Zeiträume berücksichtigt wurden. Wie oben erwähnt, wurden für diesen Pegel kürzlich die Daten für einzelne Jahre digitalisiert. Für diese einzelnen kurzen Zeiträume wurden keine Stationaritätstests durchgeführt, sondern visuell überprüft, ob sich ähnliche k-Werte ergeben, wie für die letzten ca. 10

Jahre. In Abb. 10 sind alle für den Pegel Hörnum ermittelten k-Monatswerte dargestellt. Es zeigt sich deutlich, dass die k-Werte für die Jahre 1950, 1965 und 1976 auf einem niedrigeren Niveau liegen, als die k-Werte für spätere Zeiträume (1987 und 1999 bis 2008). Für die Generierung von RMSL-Zeitreihen auf Basis der verfügbaren Scheitelwerte wurde ein mittlerer k-Wert von k = 0,4442 für den Zeitraum 1937 bis 1976 und von k = 0,4575 für den Zeitraum 1977 bis 1999 berücksichtigt (siehe auch Abb. 2). Zeitlich kann die Veränderung des k-Wertes, die zwischen 1977 und 1987 stattgefunden hat, mit dem Bau einer Mole im Hafenbereich (1974 bis 1978) in Verbindung gebracht werden. Ob dies der tatsächliche Grund für die festgestellten Änderungen ist, kann hier auf Basis der verfügbaren Daten nicht abschließend geprüft werden.

Mit Ausnahme der hier diskutierten Pegel Hörnum und Wilhelmshaven, zeigt Abb. 2 für alle anderen Pegel nur einen einzigen mittleren k-Wert, der jeweils als Stationär über die gesamten betrachteten Zeiträume angenommen wurde. Diese Annahme wurde basierend auf den Ergebnissen der Stationaritätstests getroffen, welche in Tabelle 1 in der Gesamtübersicht dargestellt sind. Wie aus der Tabelle ersichtlich ist, wurden für die Pegel Helgoland und Cuxhaven einige Auffälligkeiten bzgl. der k-Werte bzw. der zugrunde liegenden Daten festgestellt. Diese haben jedoch nicht dazu geführt, dass unterschiedliche k-Werte für unterschiedliche Zeiträume berücksichtigt wurden und werden daher an dieser Stelle nicht vertiefend erläutert. Detaillierte Informationen sind den entsprechenden Abschnitten des Pegelprotokolls zu entnehmen.

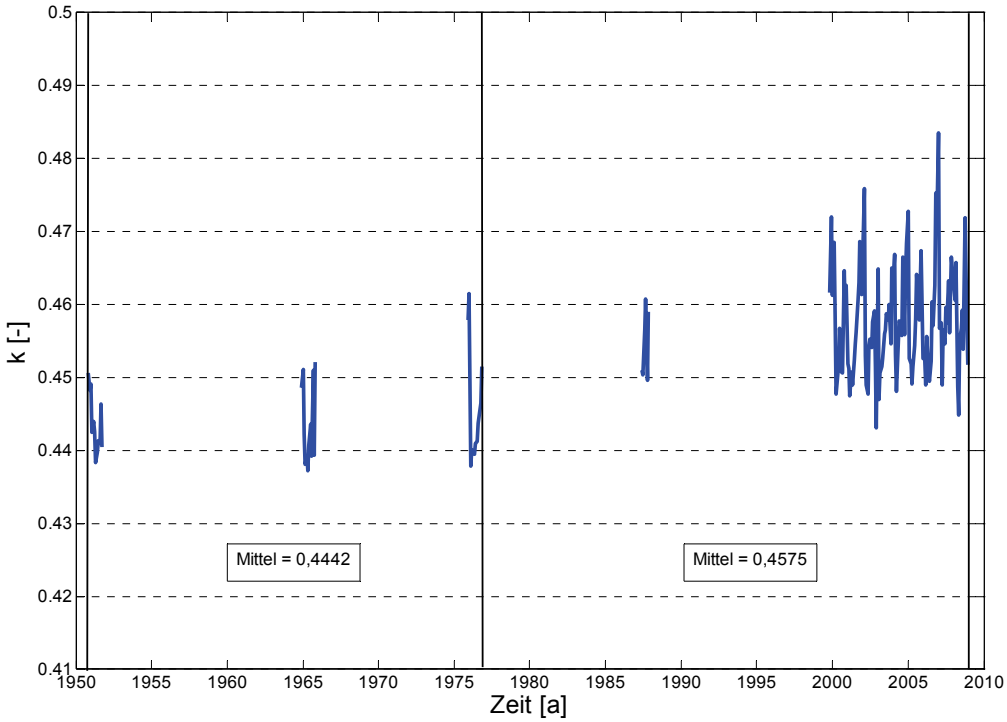


Abb. 10: Mittlere k-Werte für unterschiedliche Zeiträume am Pegel Hörnum

Mit den bis hierher dargestellten Ergebnissen und den entsprechenden Erläuterungen im Pegelprotokoll, konnten für alle Untersuchungspegel lange RMSL-Zeitreihen generiert werden, die im Folgenden für die verschiedenen Analysen genutzt werden. Obwohl auch für alle Pegel RMSL-Monatswerte generiert wurden, beschränken sich die Analysen zunächst auf die berechneten RMSL-Jahreswerte.

3.2.3 Verifikation des k-Wert Verfahrens

Bevor im nächsten Schritt die verschiedenen zur Anwendung gebrachten Analyseverfahren vorgestellt werden, soll hier der Nachweis erbracht werden, dass die oben beschriebene Vorgehensweise zur Generierung von langen RMSL-Zeitreihen zur Reduzierung der Unsicherheiten bei den späteren Analysen beiträgt.

Als alternative Vorgehensweise hätten lange relative Tidehalbwasserzeitreihen (aus Mittelung der Scheitelwerte) und/oder kurze RMSL-Zeitreihen (aus Mittelung der hochaufgelösten Daten) separat in den Analysen berücksichtigt werden können. Eine einfache Vermischung der beiden Parameter würde in jedem Fall zu falschen Ergebnissen und Rückschlüssen führen. Oben wurde bereits erwähnt, dass für die Untersuchungspegel Differenzen zwischen den beiden Parametern im Bereich 3 bis 23 cm, je nach Pegel, festgestellt wurden. Es steht außer Frage, dass ein Sprung von 23 cm, der bei der Vermischung der beiden Parameter im ungünstigsten Fall entstehen kann, die Ergebnisse (z.B. von linearen Trendanalysen) stark verfälschen würde. Bei alleiniger Berücksichtigung der meist kurzen Zeiträume mit hochaufgelösten Daten wären keine Rückschlüsse über die langfristige Entwicklung des RMSL in der Deutschen Bucht möglich. Eine zusätzliche Einbeziehung der Scheitelwerte war daher unerlässlich.

Abb. 11 zeigt beispielhaft den Vergleich von verschiedenen Zeitreihen für den Pegel Cuxhaven und den Zeitraum 1918 bis 2008, für den sowohl Scheitelwerte als auch hochaufgelöste Daten vorliegen. Zunächst wurde die „wahre“ RMSL-Zeitreihe auf Basis der hochaufgelösten Daten ermittelt. Diese ist zum einen der RMSL-Zeitreihe, welche sich aus dem k-Wert Verfahren (mit k = 0,4703) ergeben hat und zum anderen der relativen MT½w-Zeitreihe (gleichbedeutend mit k = 0,5) gegenübergestellt.

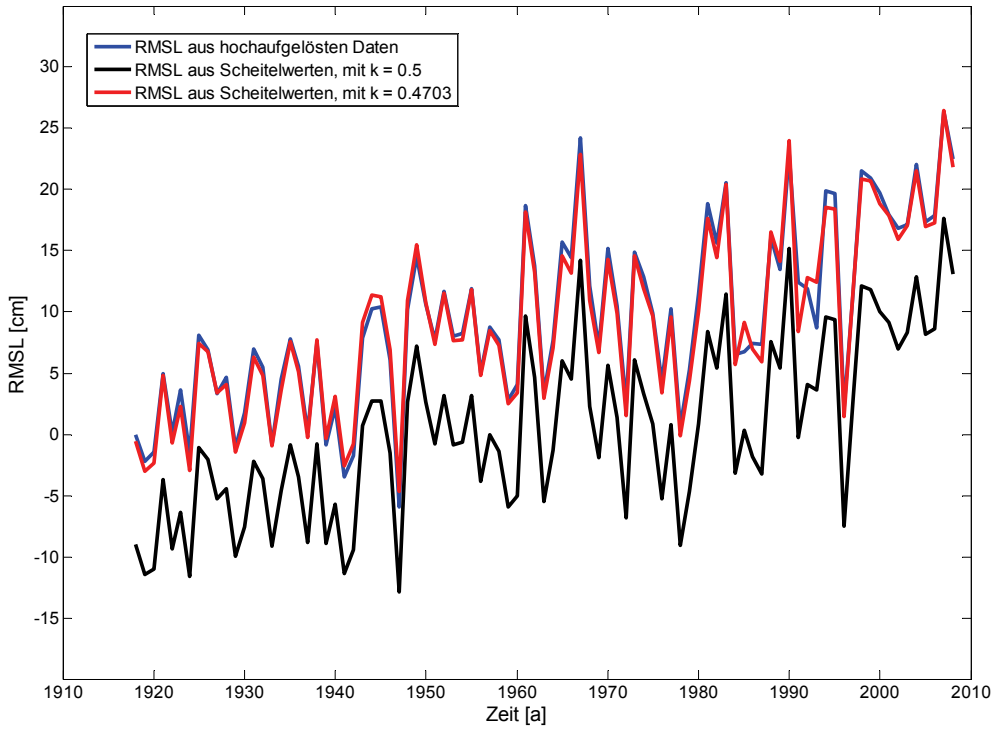


Abb. 11: Vergleich von RMSL-Zeitreihen (ermittelt aus hochaufgelösten Daten und mit k = 0,4703) und der relativen MT½w-Zeitreihe (gleichbedeutend mit k = 0,5) für den Pegel Cuxhaven von 1918 bis 2008

Die Abbildung zeigt deutlich den Versatz, der sich beim Vergleich der relativen MT½w-Zeitreihe und der „wahren“ RMSL-Zeitreihe ergibt. Gleichzeitig wird der Nutzen der hier gewählten Vorgehensweise unter Verwendung eines auf Stationarität geprüften k-Wertes deutlich. Die RMSL-Zeitreihe, welche mittels k-Wert Verfahren generiert wurde, zeigt eine gute Übereinstimmung zu derjenigen, die auf Basis der hochaufgelösten Daten ermittelt wurde. Die verbleibenden Differenzen sind darauf zurückzuführen, dass ein einziger als stationär angenommener mittlerer k-Wert für den gesamten Zeitraum berücksichtigt wurde. Die Kombination von relativen MT½w- und RMSL-Zeitreihen ist somit unter Berücksichtigung des k-Wert Verfahrens grundsätzlich möglich.

Stehen keine hochaufgelösten Daten zur Verfügung, können lediglich MT½w-Zeitreihen generiert und analysiert werden. Dabei wird davon ausgegangen, dass es sich bei einer Tidehalbwasserzeitreihe lediglich um eine Parallelverschiebung der zugehörigen MSL-Zeitreihe handelt, die außer dem Mittelwert die gleichen statistischen Eigenschaften (z.B. Standardabweichung, linearer Trend, nicht-linearer Trend etc.) aufweist. Dieselbe Annahme wird getroffen, wenn einer MT½w-Zeitreihe ein konstanter Wert hinzuaddiert wird, um diese anschließend mit einer MSL-Zeitreihe aus hochaufgelösten Daten zu kombinieren (z.B. RAY UND DOUGLAS 2011; WOODWORTH 1987; WÖPPELMANN ET AL. 2008). Dass eine MT½w-Zeitreihe nicht nur eine Parallelverschiebung der zugehörigen MSL-Zeitreihe darstellt, ergibt sich für den Bereich der Deutschen Bucht aufgrund der oben beschriebenen Verformungen der Tidekurve in Kombination mit den in der Vergangenheit stattgefundenen Änderungen in den unterschiedlichen Tideparametern. So berichten JENSEN UND MUDERSBACH (2007) von einer signifikanten Zunahme des Tidehubs in der gesamten Deutschen Bucht zwischen den 1950er und 1990er Jahren, welche auf eine starke Zunahme der Tidehochwasser bei gleichzeitig geringer Zunahme (oder sogar Abnahme) der Tideniedrigwasser zurückzuführen ist. Mit Blick auf Gleichung 2 wird klar, dass sich ein solches Verhalten in unterschiedlicher Weise auf den MSL auswirkt, je nachdem wie stark die Tidekurve an dem jeweils betrachteten Standort verformt ist. Dies lässt sich anhand der folgenden Abb. 12 veranschaulichen.

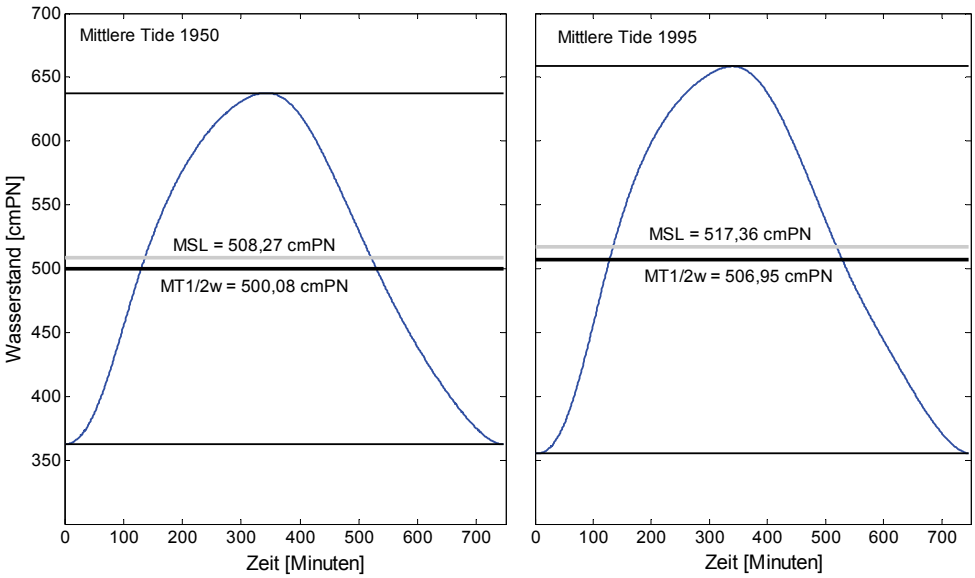


Abb. 12: Mittlere Tidekurven sowie MSL und MT½w, für den Pegel Cuxhaven und die Jahre 1950 und 1995

In der Abbildung sind die mittleren Tidekurven (ermittelt nach LAWA 2001) für die Jahre 1950 und 1995 und den Pegel Cuxhaven dargestellt. Auf Basis der beiden mittleren Tidekurven wurden jeweils die Parameter MSL und MT½w berechnet. Dabei zeigt sich, dass die Differenz zwischen den beiden Größen von 8,19 cm in 1950 auf ca. 10,41 cm in 1995 ansteigt (in etwa der Zeitraum der oben beschriebenen Tidehubzunahme). Hieraus ergibt sich zwangsläufig ein stärkerer Trend für den RMSL im Vergleich zum relativen MT½w. Berücksichtigt man die dargestellten Änderungen und den Zeitraum von 45 Jahren, so ergibt sich für den RMSL ein Trend von 2,02 mm/a und für das relative MT½w ein deutlich kleinerer Trend von 1,53 mm/a. Ermittelt man für beide mittlere Tidekurven zusätzlich den RMSL mittels k-Wert Verfahren (mit k = 0,4703), so ergibt sich ein Trend für den betrachteten Zeitraum von 1,71 mm/a. Damit kann einerseits erneut der Nutzen der oben beschriebenen Vorgehensweise zur Reduzierung der Unsicherheiten nachgewiesen werden, gleichzeitig wird auch hier deutlich, dass gewisse Restunsicherheiten bestehen bleiben, die sich auf Basis der heute verfügbaren Datengrundlage nicht eliminieren lassen. Hier besteht sowohl der Bedarf an weitergehenden analytischen Betrachtungen als auch, wie oben bereits erwähnt, an weiteren hochaufgelösten Datensätzen. Zusammenfassend kann die Aussage getroffen werden, dass die Frage nach der Nutzbarkeit des MT½w als Proxy für den MSL zumindest für den Bereich der Deutschen Bucht stark pegelspezifisch zu beantworten ist. Bei geringer Verformung der Tidekurve (wie z.B. in Helgoland) und einheitlicher Veränderung der Tidehoch- und Tideniedrigwasser (gleicher bzw. ähnlicher absoluter linearer Trend) können gute und für den MSL repräsentative Ergebnisse bei der Analyse von MT½w-Zeitreihen erzielt werden. Bei starker Verformung der Tidekurve (z.B. Emden) und stark unterschiedlicher Entwicklung der Tidehoch- und Tideniedrigwasser muss hingegen davon ausgegangen werden, dass eine Analyse von MT1/2-Zeitreihen zu anderen Ergebnissen führt, als es bei der Analyse von MSL-Zeitreihen für denselben Standort der Fall ist.

3.3 Ermittlung synthetischer Pegelzeitreihen

Neben der Analyse einzelner Pegelzeitreihen, die hier nach dem oben erläuterten Verfahren generiert wurden, kann zusätzlich die Ermittlung und Analyse einer so genannten synthetischen (oder virtuellen) Pegelzeitreihe erfolgen. Dabei handelt es sich um eine Zeitreihe, die aus einer bestimmten Anzahl von Einzelzeitreihen konstruiert wird und u.a. als repräsentativ für die stattgefundenen Änderungen in einem größeren Gebiet (oder auch global) angenommen werden kann. In der Literatur finden sich verschiedene Ansätze zur Generierung einer solchen synthetischen Zeitreihe, wobei diese auf EOF-Analysen (empirische Orthogonalfunktionen, z.B. ALBRECHT ET AL. 2011; RAY UND DOUGLAS 2011; SCHÖNFELD UND JENSEN 1991; WOODWORTH ET AL. 1999) oder auf Mittelungsverfahren (z.B. BARNETT 1984; CHURCH UND WHITE 2006; FÜHRBÖTER 1986; JEVREJEVA ET AL. 2006; JENSEN UND MUDERSBACH 2007) basieren. Bei nahezu gleicher räumlicher Verteilung der berücksichtigten Pegelstandorte führen die verschiedenen Verfahren zu sehr ähnlichen Ergebnissen. Im AMSeL-Projekt wurden synthetische Pegelzeitreihen mit Hilfe eines Mittelungsverfahrens generiert, welches anhand der Abb. 13 erläutert werden soll. Zunächst werden alle RMSL-Einzelzeitreihen differenziert, die bei der Konstruktion der synthetischen Zeitreihe berücksichtigt werden sollen. Hieraus ergeben sich jeweils die RMSL-Anstiegsraten zwischen zwei benachbarten Jahren und der Höhenbezug der einzelnen Zeitreihen, welcher u.U. unterschiedlich ist, hat keinen Einfluss auf das Ergebnis. Als nächstes wird für jedes

Jahr eine mittlere Anstiegsrate aus allen Anstiegsraten der Pegel, die Daten für das betrachtete Jahr bereitstellen, ermittelt. Abb. 13 (oben) zeigt das Ergebnis dieses Rechenschrittes, wenn alle verfügbaren RMSL-Zeitreihen für die Deutsche Bucht berücksichtigt werden. Abb. 13 (mitte) zeigt die Standardabweichung, die sich bezogen auf den Mittelwert ergibt. Für den Zeitraum vor 1900 ist die Standardabweichung gleich Null, was darauf zurückzuführen ist, dass ausschließlich der Pegel Cuxhaven für diesen frühen Zeitraum Daten bereitstellt. Dies bedeutet gleichzeitig, dass die synthetische Zeitreihe für die ersten Jahrzehnte der RMSL-Zeitreihe für Cuxhaven entspricht. Ab 1901 stehen zusätzlich Daten für Norderney und kurz darauf (mit einigen Lücken) für den Pegel Lt. Alte Weser zur Verfügung. Anschließend erhöht sich die Anzahl der Pegel für die Daten verfügbar sind sukzessive (siehe Abb. 13 (unten)). Mit Blick auf die Standardabweichungen zeigt sich auch hier die in Kapitel 2.4 beschriebene Unsicherheit, die in den Daten für den Zeitraum vor 1936/1937 enthalten ist. Die ermittelten Standardabweichungen sind tendenziell etwas höher und zeigen eine deutlichere Schwankungsbreite auf, als es für den Zeitraum nach 1936 der Fall ist.

Zur abschließenden Ermittlung der synthetischen Zeitreihe, welche als repräsentativ für die mittleren Änderungen des RMSL in der Deutschen Bucht angenommen wird, erfolgt eine Aufsummierung der zuvor berechneten mittleren Anstiegsraten (siehe auch Kapitel 4.1).

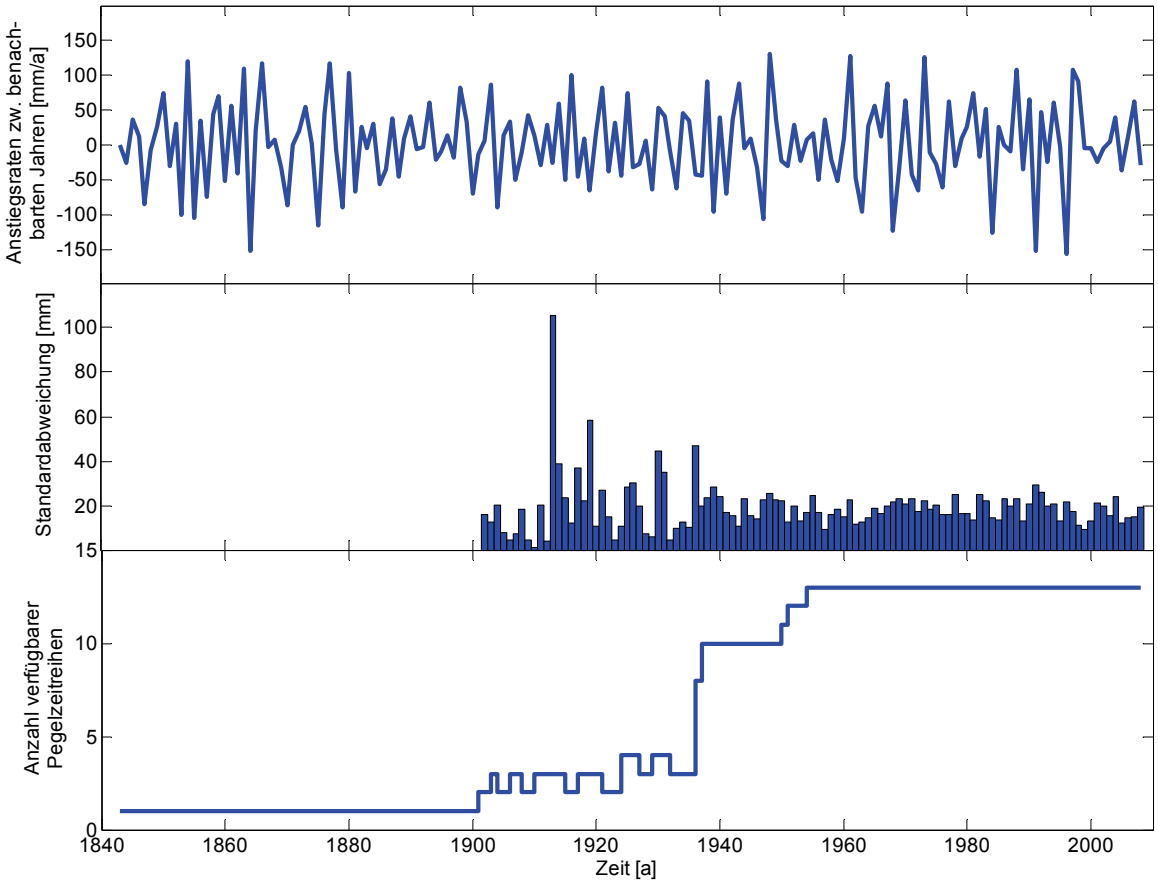


Abb. 13: Oben: Mittlere RMSL-Anstiegsraten für benachbarte Jahre, ermittelt unter Berücksichtigung aller verfügbaren RMSL-Zeitreihen für die Deutsche Bucht. Mitte: Standardabweichung über dem Mittelwert, die sich bei der Berechnung der mittleren Anstiegsraten ergibt. Unten: Anzahl der Pegel, die für das betrachtete Jahr Daten bereitstellen.

3.4 Lineare Trendanalysen

Nachdem die Datengrundlage für die Analysen in Form von qualitativ hochwertigen RMSL-Zeitreihen geschaffen ist, sollen in den folgenden Kapiteln die verschiedenen genutzten Analyseverfahren (betreffend dem RMSL, den Verweilzeiten und den Tideketten) erläutert werden.

Zur Auswertung der RMSL-Zeitreihen wurden zunächst lineare Trendanalysen durchgeführt, die dazu dienen, die Langzeitentwicklung des RMSL für die verschiedenen Pegel zu quantifizieren. Die Ergebnisse der Einzelpegel können untereinander verglichen, aber ebenso den Ergebnissen anderer nationaler und internationaler Studien vergleichend gegenübergestellt werden. Da die Ergebnisse solcher Studien i.d.R. stark von dem berücksichtigten Zeitraum abhängen, wurden hier verschiedene Zeiträume gewählt, für die lineare Trends für die Untersuchungspegel ermittelt wurden. Bei Analysen anderer Tideparameter in der Nordsee, wie dem Tideniedrigwasser, dem Tidehochwasser oder dem Tidehub erfolgen Trendanalysen i.d.R. über Zeiträume, die ein Vielfaches von 18,6 Jahren, der Periode der Nodaltide, darstellen. Bei einer Amplitude in der Größenordnung von ca. 3 - 4 cm (z.B. JENSEN ET AL. 1988; WAHL ET AL. 2008) können die Ergebnisse von Trendanalysen, besonders bei relativ kurzen Zeitreihen (z.B. < 50 Jahre), andernfalls stark verfälscht sein. Aus Analysen, die im Rahmen des AMSeL-Projektes durchgeführt wurden, konnte festgestellt werden, dass der Einfluss der Nodaltide auf den RMSL im Vergleich zu den oben genannten Parametern deutlich geringer ist. Gleichzeitig konnten zusätzliche Periodizitäten (mit Perioden im Bereich ca. 4 bis 11 Jahre) detektiert werden, die teilweise größeren Einfluss haben als die Nodaltide selbst. Aufgrund dieser Erkenntnis wurde bei der Auswahl der Zeiträume für die Trendanalysen nicht in erster Linie auf die Berücksichtigung der Nodaltide-Periode geachtet. Die verwendeten Zeiträume wurden zunächst anhand der Datenverfügbarkeit und mit Blick auf die Ergebnisse anderer aktueller internationaler Studien und den dabei berücksichtigten Zeiträumen ausgewählt. Danach ergaben sich folgende Zeiträume, die für Trendanalysen herangezogen wurden: 1843 bis 2008 (Gesamtzeitraum für den Daten zur Verfügung stehen); 1901 bis 2008 (Daten von 3 Pegeln verfügbar); 1937 bis 2008 (Daten von 10 Pegeln verfügbar); 1953 bis 2008 (Daten für alle Untersuchungspegel verfügbar); 1971 bis 2008 (zur Beantwortung der Frage, ob sich über die letzten Jahrzehnte höhere Trends ergeben). Betrachtet man die gewählten Zeiträume hinsichtlich ihrer Länge, so zeigt sich, dass es sich - obwohl nicht explizit berücksichtigt - in allen Fällen zumindest näherungsweise um ein vielfaches der Nodaltide-Periode von 18,6 Jahren handelt.

Es wurden keine Trends berechnet, wenn größere Lücken in der jeweiligen Zeitreihe für den betrachteten Zeitraum vorhanden sind. Dies ist lediglich am Pegel Helgoland der Fall, weshalb hier nur Trends für die kürzeren Zeiträume (1953 bis 2008 und 1971 bis 2008) angegeben werden. Für alle anderen Zeitreihen liegen immer mind. 93% der Jahreswerte für die betrachteten Zeiträume vor, so dass die angegeben Trends nicht durch fehlende Daten verfälscht sind. Zum Vergleich: HAIGH ET AL. (2009) verwenden einen Grenzwert von 75%, ab dem Trends für unterschiedliche Zeiträume ermittelt und als hinreichend genau angenommen werden. Zusätzlich zu den ermittelten Trends (in mm/a) sind jeweils die 1-σ Standardfehler angegeben, welche sich umgekehrt proportional zur Zeitreihenlänge verhalten. Detaillierte Analysen zum Zusammenhang zwischen Zeitreihenlänge und Unsicherheit bei der Trendermittlung haben HAIGH ET AL. (2009) am Beispiel einer großen Anzahl englischer Pegel durchgeführt.

3.5 Nicht-lineare Trendanalysen

Ein Nachteil der oben beschriebenen linearen Trendanalysen besteht darin, dass die zu analysierenden Zeitreihen häufig nicht sehr gut durch eine lineare Funktion beschrieben werden können. Die Güte der Anpassung einer Funktion an eine beliebige Zeitreihe kann grundsätzlich mittels RMSE (root mean squared error) quantifiziert werden. Ein großer RMSE deutet darauf hin, dass die gewählte Funktion nicht gut zu der zugrunde liegenden Zeitreihe passt. Eine Möglichkeit der Optimierung der Anpassung besteht darin, nicht-lineare Funktionen in die Betrachtungen einzubeziehen. Dabei muss die grundsätzliche Unterscheidung zwischen parametrischen und nicht-parametrischen Verfahren getroffen werden.

Aus der Gruppe der nicht-linearen parametrischen Funktionen kommen bei MSL-Analysen häufig Polynomfunktionen 2. Ordnung mit der folgenden Form zur Anwendung:

$$f(x) = ax^2 + bx + c \qquad (4)$$

Für Vergleichszwecke wird in diesem Fall der quadratische Koeffizient a angegeben, welcher einen Hinweis auf eine ggf. vorhandene Beschleunigung in der Gesamtzeitreihe gibt (siehe z.B. CHURCH AND WHITE 2006, JEVREJEVA ET AL. 2008, WAHL ET AL. 2011, WOODWORTH 1990, WOODWORTH ET AL. 2009). Die Anpassungsgüte ist dabei zwar i.d.R. besser, als es bei linearen Funktionen der Fall ist. Dennoch wird auch hier vorausgesetzt, dass die zu untersuchende Zeitreihe über den gesamten Zeitraum hinweg ein und derselben Funktion folgt.

Ein großer Vorteil bei der Verwendung parametrischer Funktionen (linear oder nicht-linear) besteht darin, dass eine Extrapolation möglich ist. D.h. es kann eine Abschätzung darüber erfolgen, welche Änderungen in der Zukunft (z.B. bis zu den Jahren 2050 oder 2100) zur erwarten sind. Dabei liegt wiederum die Annahme zugrunde, dass sich ein bisher beobachteter linearer Trend oder eine bisher beobachtete Beschleunigung in der Zukunft unverändert fortsetzen.

Ein Ziel des AMSeL-Vorhabens bestand darin, zu prüfen, ob sich anhand der Beobachtungsdaten eine Beschleunigung im RMSL über die letzten Dekaden hinweg nachweisen lässt, die u.U. einem anthropogen verursachten Klimawandel zuzuschreiben ist. Hierfür sind sowohl lineare Regressionsfunktionen als auch Polynomfunktionen nur bedingt geeignet und es kommen zusätzlich nicht-parametrische Ansätze (bzw. Glättungs- oder Filterverfahren) zur Anwendung. Letztere lassen eine sehr gute Anpassung an die zugrunde liegende Datenreihe zu und sind für die Detektion von Phasen mit besonders starken oder geringen (oder auch negativen) Anstiegen des RMSL gut geeignet. Neben dem Vorteil der sehr guten Anpassung ergibt sich der Nachteil, dass eine Extrapolation nicht möglich ist.

Aus der Gruppe der nicht-parametrischen Funktionen sind in der Vergangenheit sehr häufig gleitende Mittelwerte mit einem zuvor festgelegten Zeitfenster (z.B. 19 Jahre) genutzt worden (z.B. SIEFERT UND LASSEN 1985; HAIGH ET AL. 2009; HOLGATE UND WOODWORTH 2004; JENSEN UND MUDERSBACH 2007). Alternativ können verschieden geeignete Tiefpassfilter (z.B. BLASI 1991; WOODWORTH ET AL. 2009) oder Ansätze basierend auf empirischen Orthogonalfunktionen (EOFs), wie Hauptkomponentenanalysen (PCA) oder singuläre Systemanalysen (SSA) (z.B. ALBRECHT ET AL. 2011; SCHÖNFELD UND JENSEN 1991; JENSEN ET AL. 1993), zur Glättung von Wasserstandszeitreihen genutzt werden. Die SSA wird von MOORE ET AL. (2005) als besonders geeignet beschrieben, um nicht-lineare

Trends auf Basis von einzelnen Wasserstandszeitreihen zu bestimmen. Auch JEVEREJEVA ET AL. (2006, 2009) und RAHMSTORF ET AL. (2007) nutzen singuläre Systemanalysen um MSL-Zeitreihen zu analysieren. Im AMSeL-Projekt durchgeführte Vergleichsstudien haben zudem gezeigt, dass bei gleichen Randbedingungen eine bessere Anpassung mittels SSA als beispielsweise bei gleitenden Mitteln erzielt werden kann. Aus diesem Grund wurde hier die singuläre Systemanalyse zur Glättung der RMSL-Zeitreihen, sowohl der Einzelpegel, als auch der synthetischen Pegel, herangezogen. Detaillierte Informationen zur Methodik und den theoretischen Hintergründen sind z.B. GHIL ET AL. (2002) oder GOLYANDA ET AL. (2001) zu entnehmen. Ähnlich wie bei gleitenden Mitteln, bei denen eine Zeitfensterlänge zu wählen ist, muss bei der SSA eine sogenannte embedding dimension vorgegeben werden. Für die hier durchgeführten Analysen wurde für die Glättung aller Zeitreihen eine embedding dimension von 15 Jahren gewählt, damit ein direkter Vergleich der Ergebnisse möglich ist. Dementsprechend ergeben sich für jede Zeitreihe zunächst 15 EOFs, von denen ausschließlich diejenigen für die Rekonstruktion herangezogen werden, die Trendinformationen beinhalten. Zur Identifizierung dieser „Trend-EOFs“ werden die oben beschriebenen drei Stationaritätstests verwendet (i.d.R. wird nur die erste EOF zur Rekonstruktion genutzt).

Alle hier genannten nicht-parametrischen Verfahren weisen den Nachteil auf, dass die Glättung entsprechend der gewählten Fensterlänge (oder embedding dimension) nicht einheitlich über die gesamte Zeitreihenlänge erfolgen kann. Bei einer Fensterlänge von beispielsweise 10 Jahren können für 9 Jahre keine Werte angegeben werden. Diese 9 Jahre können am Anfang der Zeitreihe oder am Ende oder aufgeteilt sowohl am Anfang als auch am Ende liegen. Soll die Glättung bis an die Ränder geführt werden, muss eine Gewichtung vorgenommen werden, was zwangsläufig dazu führt, dass der letzte (erste) Wert der Ausgangszeitreihe immer auch den letzten (ersten) Wert der geglätteten Zeitreihe darstellt. Aufgrund der großen Varianz, die in den RMSL-Zeitreihen für die Deutsche Bucht enthalten ist (siehe z.B. Abb. 13), würde eine solche Gewichtung u.U. signifikante Auswirkungen auf den Verlauf der geglätteten Zeitreihe zu den Rändern hin nach sich ziehen. Dies wiederum kann zu Fehlinterpretationen führen, was z.B. das Vorhandensein von Beschleunigungstendenzen in der zugrunde liegenden Zeitreihe betrifft.

Ein alternatives und in den verschiedenen Bereichen der Klimaforschung häufig genutztes Verfahren, welches eine Glättung über die gesamte Zeitreihe zulässt und dabei keine Gewichtung einzelner Werte vorsieht, besteht darin, zunächst eine Extrapolation (*engl. padding*) der Zeitreihe vorzunehmen und anschließend die Glättung durchzuführen. Verschiedene Ansätze die zur Extrapolation potenziell instationärer Zeitreihen genutzt werden können stellen z.B. MANN (2004, 2008) und JEVREJEVA ET AL. (2006) vor. Diese oder ähnliche Ansätze werden u.a. auch von JANSEN ET AL. (2007), TRENBERTH ET AL. (2007) und RAHMSTORF ET AL. (2007) zur Glättung verschiedener Beobachtungszeitreihen genutzt. Die meisten Ansätze basieren darauf, dass in Abhängigkeit der gewählten Filterlänge eine einzige und entsprechend lange Extrapolation in die Zukunft bzw. Vergangenheit vorgenommen wird. Anschließend kann die Glättung der zugrunde liegenden Zeitreihe bis an die Ränder erfolgen. Dabei hängt der Verlauf der Glättung am Anfang und am Ende stark von der gewählten Extrapolation (z.B. nur horizontale, oder horizontale und vertikale Spiegelung der Werte im ersten/letzten Zeitfenster (MANN 2004); Mittelwert oder linearer Trend des ersten/letzten Zeitfensters (MANN 2004; JEVREJEVA ET AL. 2006)) ab. Je nach gewählter Extrapolationsmethode kann es zu einer guten aber auch schlechten Anpassung der Glättung am Anfang und/oder am Ende der Zeitreihe kommen. Bei dem von MANN (2008) beschriebenen An-

satz werden verschiedene Extrapolationsverfahren berücksichtigt und der mittlere quadratische Fehler (MSE) in die Betrachtungen einbezogen. Dadurch ist eine bessere Anpassung gewährleistet, als es bei der Berücksichtigung nur eines Extrapolationsansatzes der Fall ist.

Bei keinem in der obigen Literatur beschriebenen Verfahren wird der Tatsache Rechnung getragen, dass durch die Extrapolation Unsicherheiten in den geglätteten Zeitreihen enthalten sind, welche zu den Rändern hin zunehmen. Je mehr man sich den Rändern nähert, desto mehr Werte aus der Extrapolation gehen in die Berechnung der Glättungsfunktion ein (die Randwerte basieren zur Hälfte auf beobachteten und zur Hälfte auf extrapolierten Werten). Um diesen Effekt nicht unberücksichtigt zu lassen, wurde im Rahmen des AMSeL-Projektes ein alternativer Ansatz mit der Bezeichnung Monte-Carlo Autoregressive Padding (MCAP) entwickelt (siehe auch WAHL ET AL. 2010, 2011). Dieser wird in Kombination mit der singulären Systemanalyse zur Glättung der generierten RMSL-Zeitreihen genutzt. Hierdurch ist zum einen eine optimale Anpassung an die zugrunde liegenden Zeitreihen gewährleistet. Zum anderen lässt die im Folgenden beschriebene Vorgehensweise Rückschlüsse über die Unsicherheiten zu, welche durch die vorherige Extrapolation im Bereich der Ränder in der Glättungsfunktion enthalten sind.

Die wichtigsten Rechenschritte des MCAP-Verfahrens lassen sich anhand der Abb. 14 exemplarisch am Beispiel der RMSL-Zeitreihe des Pegels Cuxhaven erläutern. Zunächst wird die zu analysierende RMSL-Zeitreihe trendbereinigt (Abb. 14 oben links). Dazu wird jeweils eine lineare Trendfunktion, ein Polynom 2. Ordnung und eine Exponentialfunktion an die Gesamtzeitreihe angepasst. Zur Trendbereinigung wird diejenige Funktion genutzt, die den kleinsten MSE gegenüber der Beobachtungszeitreihe aufweist. Im nächsten Schritt wird eine große Anzahl an Zeitreihen mit denselben statistischen Eigenschaften wie die Ursprungszeitreihe über ein autoregressives Modell 1. Ordnung (AR1 Modell) von der Form

$$z_t = \theta \cdot z_{t-1} + \varepsilon_t \qquad (5)$$

generiert. Dabei ist θ der Autokorrelationsparameter und ε_t repräsentiert weißes Rauchen (siehe auch SALAS ET AL. 1980; BOX UND JENKINS 1976; STORCH UND ZWIERS 1999). Die simulierten Zeitreihen sind jeweils um das doppelte der gewählten Filterweite länger als die Ursprungszeitreihe. Abb. 14 (oben rechts) zeigt beispielhaft eine modellierte Zeitreihe, die sich aus dem AR-Modell für den Pegel Cuxhaven ergeben hat. Die Enden der modellierten Zeitreihen werden anschließend für die Extrapolation genutzt (Abb. 14, unten links), bevor der Eingangs eliminierte Trend wieder berücksichtigt wird (Abb. 14, unten rechts). Danach werden alle sich ergebenden Zeitreihen (i.d.R. 10.000) mittels SSA geglättet und in einem Ergebnisplot dargestellt, wobei diejenige Glättung hervorgehoben wird, die den geringsten MSE gegenüber der Beobachtungszeitreihe aufweist. Abschließend werden Anstiegsraten (in mm/a) aus der Differenzierung der geglätteten Zeitreihe ermittelt (siehe z.B. Abb. 25).

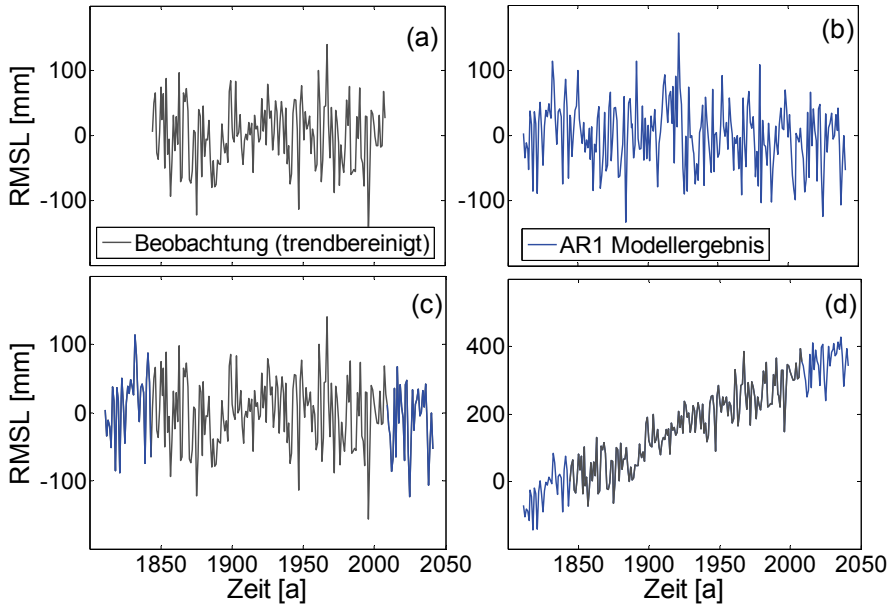


Abb. 14: Wichtige Rechenschritte beim Monte-Carlo Autoregressive Padding exemplarisch dargestellt anhand der RMSL-Zeitreihe für den Pegel Cuxhaven: oben links: trendbereinigte RMSL-Zeitreihe; oben rechts: beispielhaftes Ergebnis aus dem AR1 Modell; unten links: Extrapolation der RMSL-Zeitreihe unter Verwendung der AR1 Modellergebnisse; unten rechts: Ergebnis der Extrapolation nach Berücksichtigung des zuvor eliminierten Trends

Im Folgenden soll der Nachweis erbracht werden, dass die Anwendung des hier vorgestellten MCAP-Verfahrens eine Verbesserung gegenüber den in der Literatur verfügbaren Ansätzen hinsichtlich der Anpassungsgüte der geglätteten Zeitreihen darstellt. Hierzu wird erneut die RMSL-Zeitreihe des Pegels Cuxhaven herangezogen, wobei in diesem Fall ausgewählte Intervalle der Zeitreihe genutzt werden. Dadurch ist ein Vergleich mit der „wahren" Glättung aus der SSA-Analyse möglich, welche ausschließlich auf Beobachtungsdaten basiert. In Abb. 15 sind die Ergebnisse für 4 Intervalle der RMSL-Zeitreihe des Pegels Cuxhaven dargestellt. Die Zeitreihe wurde sukzessive verkürzt und endet in den Jahren 1980 (oben links), 1960 (oben rechts), 1940 (unten links) und 1920 (unten rechts). Zu Vergleichszwecken sind neben den Ergebnissen des MCAP-Verfahrens und der „wahren" Glättung die Ergebnisse dargestellt, die mit Hilfe zweier in der Literatur beschriebener Extrapolationsverfahren erzielt wurden. Beim ‚minimum slope' Ansatz (TRENBERTH ET AL. 2007) erfolgt die Extrapolation, in dem die Werte des ersten/letzten Zeitfensters der Ausgangszeitreihe horizontal gespiegelt an die Zeitreihe angehängt werden. Beim ‚mean padding' Ansatz erfolgt die Extrapolation mit Hilfe des Mittelwertes der sich für den ersten/letzten Teil (in Abhängigkeit der Filterlänge) der Ausgangszeitreihe ergibt.

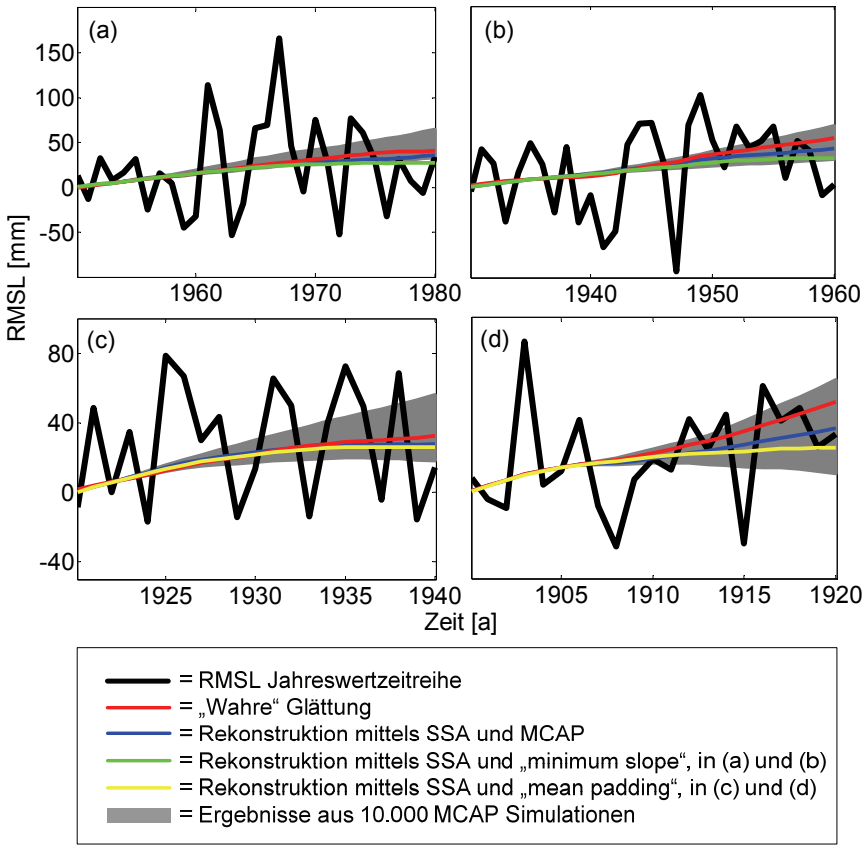


Abb. 15: Vergleich der SSA-Glättung unter Verwendung unterschiedlicher Ansätze zur Extrapolation im Vergleich zur „wahren“ Glättung am Beispiel ausgewählter Intervalle der RMSL-Zeitreihe des Pegels Cuxhaven (oben links: 1843 bis 1980; oben rechts: 1843 bis 1960; unten links: 1843 bis 1940; unten rechts: 1843 bis 1920).

Die Ergebnisse zeigen, dass die Glättung mittels MCAP-Verfahren in allen Fällen näher an der „wahren“ Glättung liegt, als es bei den hier vergleichend gegenübergestellten Ansätzen der Fall ist. Andere in der Literatur beschriebene Ansätze, die hier nicht für Vergleichszwecke genutzt wurden, führen ggf. zu ähnlichen Ergebnissen wie die MCAP-Methode. Rückschlüsse über die Unsicherheiten sind dabei jedoch grundsätzlich nicht möglich. In Abb. 15 sind als graues Band die Ergebnisse aller 10.000 MCAP-Simulationen dargestellt, wobei deutlich wird, dass der „wahre“ Verlauf der Glättung in allen hier betrachteten Fällen innerhalb dieses Bandes liegt. Es gilt jedoch zu beachten, dass der Verlauf dieses „Unsicherheitsbandes“ entsprechend der beschriebenen Vorgehensweise u.a. von der Funktion abhängt, welche zur Trendbereinigung der RMSL-Zeitreihe genutzt wird. Aus diesem Grund sind die dargestellten Unsicherheiten nicht mit Konfidenzintervallen zu verwechseln. Sie lassen über die Darstellung der Streubreite der Glättungen aus den MCAP-Simulationen lediglich einen Rückschluss über den Betrag der Unsicherheiten und dessen Änderung zu den Rändern hin zu.

Durch Anwendung der hier vorgestellten Methodik wird somit eine optimale (bezogen auf den MSE) Anpassung der Glättungsfunktionen an die zu analysierenden Zeitreihen erzielt und es sind Rückschlüsse über die Unsicherheiten möglich, welche sich aufgrund der Extrapolation der Zeitreihe ergeben.

Durch die Berücksichtigung sowohl linearer als auch nicht-linearer Analyseverfahren (sowohl parametrisch als auch nicht-parametrisch) konnten im Rahmen des AMSeL-

Projektes viele für den Küstenschutz relevante Ergebnisse die Entwicklung des RMSL betreffend erzielt werden (siehe Kapitel 4).

3.6 Vertikale Landbewegungen

Die im Rahmen von AMSeL durchgeführten Analysen zur langfristigen Änderung des mittleren Meeresspiegels in der Deutschen Bucht basieren auf den mittels k-Wert Verfahren generierten RMSL-Zeitreihen der Einzelpegel und verschiedenen synthetischen Pegelzeitreihen. Zweifellos handelt es sich beim RMSL, als relative Änderung des Meeresspiegels gegenüber dem Land, um den wichtigsten Parameter für den Küstenschutz. Der Anteil an vertikalen Landbewegungen, welcher ggf. in den beobachteten Zeitreihen enthalten ist, ist hierfür zunächst von sekundärer Bedeutung. Bei der Planung von Küstenschutzmaßnahmen ist die Summe der (regionalen) Änderungen aus Vertikalbewegung des Landes und Meeresspiegeländerung zu berücksichtigen. Um die aufwendig generierten RMSL-Zeitreihen zusätzlich für Vergleiche mit globalen Meeresspiegelrekonstruktionen (hier sind Landbewegungen i.d.R. zumindest näherungsweise berücksichtigt) und die Validierung regionaler Klimamodelle nutzbar zu machen, müssen die langfristigen Vertikalbewegungen im deutschen Nordseeraum in die Betrachtungen einbezogen werden.

Bei vielen Untersuchungen der jüngeren Vergangenheit (z.B. CHURCH UND WHITE 2006; HOLGATE UND WOODWORTH 2004; JEVEREJEVA ET AL. 2006, 2008) werden Vertikalbewegungen des Landes durch die Einbeziehung von GIA (Global Isostatic Adjustment) Modellergebnissen berücksichtigt. GIA stellt die Ausgleichsbewegung des Landes als Reaktion auf das Schmelzen großer Landeismassen im Anschluss an die letzte Eiszeit dar. Dieser Effekt kann über Modelle (z.B. PELTIER 2004) erfasst werden, repräsentiert jedoch regional ggf. nur einen kleinen Teil der tatsächlichen Vertikalbewegungen. Andere Effekte, wie z.B. Grundwasser- oder Gasentnahmen, Sedimentkompressionen oder tektonische Einflüsse können sich dem GIA-Effekt überlagern und diesen verstärken oder auch verringern. So sind für verschiedene Gebiete, wie z.B. die Megacities Tokyo, Osaka, Shanghai oder Bangkog Landsenkungen von mehreren Metern über das 20. Jahrhundert hinweg ermittelt worden (NICHOLLS 2010). Andere Bereiche, wie beispielsweise die Südküste Schwedens, sind hingegen Landhebungserscheinungen unterworfen, die einem Meeresspielanstieg entgegenwirken.

In aktuelleren Studien wird immer häufiger auf direkte Messergebnisse des Continuous Global Positioning System (CGPS) zurückgegriffen, wobei kontinuierliche Messungen der Vertikalbewegungen direkt oder in unmittelbarer Nähe der Pegel erfolgen (WÖPPELMANN 2007, 2009; SCHÖNE ET AL. 2009; SUDAU UND WEISS 2011). Hierüber sind sehr genaue Abschätzungen der stattfindenden Vertikalbewegungen möglich. Unter der Annahme, dass die Bewegungen über einen längeren Zeitraum hinweg annähernd linear verlaufen (SCHÖNE ET AL. 2009), können die verfügbaren Pegeldaten um die Vertikalbewegungen korrigiert werden (z.B. WOODWORTH ET AL. 2009). Dies lässt beispielsweise einen belastbareren Vergleich mit den Ergebnissen zur Meeresspiegelentwicklung zu, die mit Hilfe von Klimamodellen erzielt wurden (z.B. WÖPPELMANN ET AL. 2009). Voraussetzung ist, dass die verfügbaren Zeitreihen aus den CGPS-Messungen lang genug sind, um einen Trend mittels Regressionsfunktion hinreichend genau bestimmen zu können. Im Bereich des deutschen Küstenraumes wurden in den letzten Jahren viele Pegel durch die Bundesanstalt für Gewässerkunde mit CGPS ausgerüstet, um die am jeweiligen Ort stattfindenden Vertikalbewegungen zu messen. Auf-

grund der unzureichenden Zeitreihenlänge (bei gleichzeitig starker Varianz) können jedoch bis heute keine belastbaren und für Wasserstandsanalysen nutzbare Aussagen zu den längerfristigen Vertikalbewegungen abgeleitet werden. Für die nahe Zukunft sind hier jedoch qualitativ hochwertige Ergebnisse zu erwarten, die detaillierte Analysen des MSL (ohne Einfluss von Vertikalbewegungen) zulassen.

Neben den direkten Messverfahren oder der Modellierung des GIA-Effektes stellen auch geologische Untersuchungen (z.B. BUNGENSTOCK UND SCHÄFER 2009; SHENNAN UND WOODWORTH 1992) oder die Auswertungen historischer Nivellements (z.B. BEHRE 2003) häufig die Grundlage für die Ermittlung von Vertikalbewegungen dar. Zusätzlich besteht die Möglichkeit, die qualitativ hochwertigen RMSL-Zeitreihen selbst für die Bestimmung vorhandener Trends der Vertikalbewegungen heranzuziehen (z.B. HAIGH ET AL. 2009).

Hier soll ein einfacher Ansatz genutzt werden, um zumindest eine erste Abschätzung der Vertikalbewegungen für die einzelnen Pegelstandorte vorzunehmen. Dieser Ansatz basiert auf der Annahme, dass ein für den Bereich Großbritanniens aus einer mehr als 100 Jahre langen Beobachtungszeitreihe ermittelter Trend des MSL auf den Bereich der deutschen Nordseeküste übertragbar ist. WOODWORTH ET AL. (2009) geben auf Basis der Analyse von Pegeldaten für den Zeitraum 1901 bis 2006 einen Trend von 1,4 ± 0.2 mm/a für den Bereich Großbritannien an, wobei vertikale Landbewegungen darin nicht enthalten sind. Dabei ist anzumerken, dass bei den Analysen in erster Linie Pegelstandorte entlang der englischen Ostküste berücksichtigt wurden und das die Bestimmung der Vertikalbewegungen auf Basis langer Messreihen (seit Anfang der 1990er) und geologischer Studien vergleichsweise genau erfolgen konnte.

Bei dem hier genutzten Ansatz wird zunächst ein Vergleich des von WOODWORTH ET AL. (2009) ermittelten Trends mit denjenigen durchgeführt, die sich für die langen RMSL-Zeitreihen der Deutschen Bucht (Lt. Alte Weser, Norderney und Cuxhaven) für den Zeitraum 1901 bis 2006 ergeben. Unter Berücksichtigung der oben erläuterten Annahme kann hierdurch zunächst eine Abschätzung der vertikalen Trends für die drei langen „Referenzpegel“ in der Deutschen Bucht erfolgen. Durch den Vergleich von Trends (über gleiche Perioden), die sich für die „Referenzpegel“ und die anderen Pegel ergeben, können letztendlich vertikale Trends für alle hier berücksichtigten Untersuchungspegel angegeben werden. Die Ergebnisse können mit GIA-Modellergebnissen und denjenigen aus früheren Studien für den Bereich der deutschen Nordseeküste verglichen werden (siehe Kapitel 4.4).

Eine Unsicherheit bei der beschriebenen Vorgehensweise besteht darin, dass der Einfluss zusätzlicher atmosphärischer oder meteorologischer Prozesse unberücksichtigt bleibt. In der Literatur sind jedoch keine Hinweis darauf zu finden, dass hier Änderungen (z.B. im Luftdruck oder den Windstatistiken) über den betrachteten Zeitraum stattgefunden haben, welche sich aus physikalischen Gesichtspunkten in einer signifikant unterschiedlichen Entwicklung der langfristigen MSL-Trends (> 100 Jahre) in den beiden Gebieten (englische (Ost-)Küste und Deutsche Bucht) äußern würden. Nichts desto trotz handelt es sich wie oben erwähnt um einen sehr einfachen Ansatz, der zwar eine erste ortsspezifische Abschätzung der Vertikalbewegungen direkt im Bereich der Pegel zulässt, in der Zukunft jedoch einer Verifikation mit Hilfe langer CGPS-Zeitreihen bedarf.

3.7 Tideketten

Ziel ist es, für die ausgewählten Pegel möglichst lange und qualitativ hochwertige Tideketten-Zeitreihen zu generieren. Entgegen der Auswertungen für den MSL und auch für die Bestimmung von Verweildauern von Tidewasserständen genügen für die Ermittlung von Tideketten Zeitreihen von Tnw- und Thw-Scheiteln. Mit der Auswertung von Tideketten können unterschiedliche Beweggründe verbunden werden. Auskunft in Bezug auf Behinderung oder Verhinderung der Binnenentwässerung küstennaher Einzugsgebiete, Belastung auf Küsten, Strandabschnitte, Deckwerke, Deiche und andere Bauwerke, die Exposition von Watt und Vegetationsflächen, sowie Hinweise zur Häufigkeit und Länge von Sturmflutereignissen. Diese Beweggründe gelten konform für die im folgendem Kapitel 3.8 beschriebenen Verweildauerauswertung.

Der bei Sturmfluten, aber auch bei normalen Tiden an Deiche, Ufermauern oder ganz allgemein an die Küste angreifende Seegang wirkt im Maximum auf der Höhe des Ruhewasserspiegels. Daraus geht hervor, dass die potenzielle Gefahr des Energieeintrags aus dem Seegang an das Küstenbauwerk oder an den Strandabschnitt umso größer ist, je länger dieser auf einer bestimmten Höhenstufe angreifen kann. Die Feststellung von bestehenden Verweilzeiten des Wasserspiegels während Sturmtiden bzw. die Analyse, ob diese Verweilzeiten klare Trends aufweisen, ist deshalb von höchstem Interesse für den Küstenschutz. Diese Verweilzeiten können dabei in unterschiedlicher Form als Gesamtverweildauern oder relativer Zeitanteile in Bezug auf die Tidedauer aber auch als Folge von erhöhten Tiden, also Tideketten untersucht werden.

Küstenschutzbauwerke wie Deiche usw. werden im Wesentlichen durch einzelne Extremsturmfluten belastet, d.h. der Wasserstand ist maßgebend; Außensande oder die sandigen flachen Inseln werden insbesondere hinsichtlich der Sandabtragungen und des Angriffs auf den Inselsockel bzw. der Dünen vorrangig durch Seegang belastet. Daraus folgt, dass eine Vielzahl mittlerer Sturmfluten bzw. nur leicht erhöhter Tidescheitel mit entsprechenden Verweildauern für Wasserstand und Seegang deutlich größere Sandabtragungen und Erosionen des Inselsockels zur Folge haben, als eine einzelne Extremsturmflut. Solche Folgen von erhöhten Thw-Scheiteln, die die „Kante“ eines Strandabschnittes, oder an einer Hallig die Kante der Warften angreifen, werden auch als Kantenfluten bezeichnet.

Der Verlauf der Tidekurve und insbesondere die Abfolge von Tnw-Scheitelhöhen ist darüber hinaus von höchster Bedeutung für Entwässerungsmöglichkeit von küstennahen, tiefliegenden Einzugsgebieten, die über Sielentwässerung in freier Vorflut in ein tidebeeinflusstes Gewässer einmünden (Abb. 16). Falls kein Schöpfwerk eingesetzt ist, müssen auch höhere Abflussspenden während mehreren, evtl. ungünstigen, Tiden (d.h. hohe Tnw) schadlos zwischengespeichert werden können, da besonders im sturmflutträchtigen Winterhalbjahr nicht vorausgesetzt werden kann, dass die Tnw stets so niedrig auflaufen, dass ein Sielzug innerhalb einer Niedrigwasserperiode möglich ist.

Die Vorflutmöglichkeit solcher Einzugsgebiete ist direkt an den Verlauf der Tidekurve gekoppelt. Ungünstige Verläufe können den Abfluss aus dem sielgesteuerten Gewässer so weit reduzieren oder gänzlich verhindern, dass es auch bei nicht als extrem anzusehenden Tidewasserständen und Abflüssen aus dem Einzugsgebiet zu signifikanten Wasserstandserhöhungen hinter dem Siel kommen kann. Für durch Mündungsschöpfwerke entwässerte Gebiete bestimmt die Tidekurve den Verlauf der geodätischen Förderhöhen und somit den aufzuwendenden Energiebedarf für die Entwässerung.

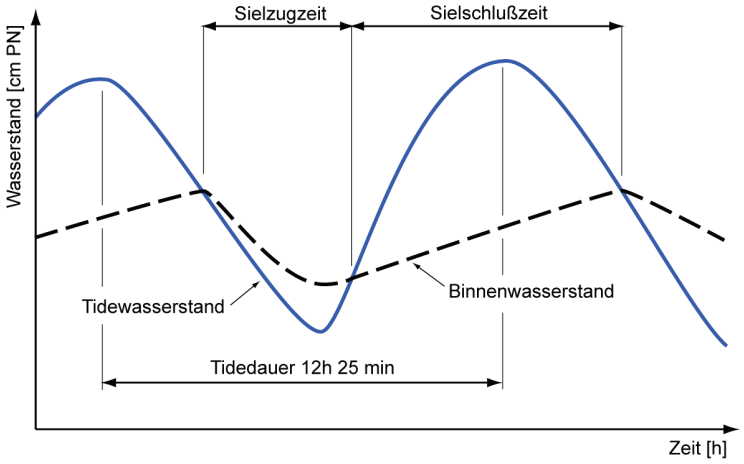


Abb. 16: Sielzug, schematisch (FRANK 2007)

Aufgrund lang anhaltender Windstau-Wetterlagen gegen die Küstenlinie kann es vorkommen, dass das Siel über eine oder sogar mehrere Tiden hinweg geschlossen bleiben muss. Während dieser Zeitspanne muss der Abfluss aus dem Einzugsgebiet vor dem Siel gespeichert werden. Dabei ist zu berücksichtigen, dass nach langjährigen Beobachtungen häufig großer Binnenwasserandrang mit Zeiten erhöhter Tidewasserstände zusammentrifft (KRAMER 1969), aber andererseits Siele und Schöpfwerke nicht für beliebige Extremfälle von höchsten Binnenwasserabflüssen (HHQ) und höchsten Sturmflutwasserständen (HHThw) bemessen werden können. Ebenso kann nicht eine beliebige Anzahl von anzusetzenden „Sperrtiden", während derer der Sielzug komplett ausfällt, angesetzt werden. Es würden sich nicht nur unwirtschaftliche Ausbaugrößen der Mündungsbauwerke, sondern auch des gesamten Vorfluternetzes ergeben.

Die Entwässerungssituation wird allerdings umso gravierender, je mehr Tiden mit erhöhten Tnw hintereinander auftreten und je größer die währenddessen in Folge überschrittenen Tnw-Höhen sind. Solche hintereinander auftretenden Folgen erhöhter Tnw-Wasserstände können als Tnw-Ketten bzw. Tnw-Folgen bezeichnet werden.

3.7.1 Begriffsbestimmung

Die Beweggründe für eine nähere Betrachtung von entsprechenden aufeinanderfolgenden Tidescheiteln, bzw. Tideketten, sind also zahlreich gegeben. Dennoch lassen sich nur sehr wenige verwertbare Arbeiten finden, welche sich diesem Thema in Gänze oder schwerpunktmäßig widmen (DREBES 1971, LÜDERS 1973, JENSEN U. SPIEß 1996, FRANK 2007). In anderen Veröffentlichungen oder Berichten finden sich vereinzelt Begrifflichkeiten wie Kettentide oder Tidenkette, bzw. ähnliche Sachverhalte betreffende Umschreibungen, es findet dabei aber keine klare und oft unterschiedliche Begriffsdefinition statt.

Aus diesem Grund sollen im Folgenden bisherige und in der vorliegenden Bearbeitung verwendete Tideketten-Definitionen, sowie die zu deren Analyse geprägten Begriffe erläutert werden.

Allgemein bezeichnet der Begriff Tidenkette eine Reihe von Tiden, die innerhalb einer bestimmten Zeitspanne auftreten und deren Scheitel ein bestimmtes Wasserstands-Niveau bzw. einen bestimmten Bezugshorizont überschreiten. Meist werden die Thw-Scheitel als

Kriterium herangezogen, die Bedingung lässt sich allerdings auch nur für die Tnw-Scheitel oder für Tnw-und Thw-Scheitel gleichzeitig anwenden.

Eine Sturmtidenkette ist eine Tidenkette, in der die entsprechenden Thw-Scheitel oberhalb des Definitionsniveaus für zumindest eine leichte Sturmflut liegen.

Die Zeitspanne, innerhalb derer diese Tidescheitel auftreten müssen, um zu einer Tidenkette zu gehören, bzw. das Kettenkriterium kann sowohl streng lückenlos aufeinanderfolgend definiert sein, als auch als Relation von der Anzahl aufgetretender (Sturm)tiden zur Zeitdauer vom ersten bis zum letzten Scheitel der so erkannten Tidenkette betrachtet werden.

Diese letzte Definition verwendet LÜDERS (1973). Motiviert durch die „ungewöhnlich langanhaltende Sturmwetterlage“ von Anfang November bis Mitte Dezember 1973 und die resultierenden Dünen- und Strandabbrüche, waren es spezifisch Häufungen von Sturmtiden, deren Auftreten untersucht werden sollte. Als solches war nicht das lückenlose aufeinanderfolgen, aber der engere zeitliche Zusammenhang der entsprechenden Sturmtiden gefordert. Praktische Erfahrungen und Erkenntnisse, die z.B. bei Untersuchungen der Ursache von Strand- und Dünenabbrüche gewonnen wurden, führten ihn zu der Auffassung, dass eine Sturmtidenkette mindestens 5 Sturmtiden enhalten muss. Diese müssen nach LÜDERS (1973) zeitlich so dicht aufeinander folgen, dass das Verhältnis der Dauer von der ersten bis zur letzten Sturmtide zur Anzahl der Sturmtiden einen Kennwert von 5 nicht überschreitet.

DREBES (1971) befasst sich mit Untersuchungen über die Bemessungsgrundlangen tideabhängiger Entwässerungssysteme und entwickelt auf Basis der Daten des Tidepegels Husum eine Systematik zur Häufigkeitsermittlung der Abfolge von hintereinander auftretenden, erhöhten Tnw-Scheiteln in Zusammenhang mit gleichzeitig auftretenden Abflüssen aus dem Binnenland. FRANK (2007) schließt sich der bei Drebes getroffenen Definition und Methodik an und erweitert diese im Hinblick auf numerische Auswertung sowie der integralen Betrachtung mit hydrodynamisch-numerischen Sieldurchflussmodellierung. Gerade im Hinblick der im vorhergehenden Kapitel erläuterten Entwässerungsproblematik ist nachvollziehbar, dass für das Abgrenzen einzelner Tidenkettenereignisse das strenge Kettenkriterium der lückenlosen Aufeinanderfolge der Tnw-Scheitel oberhalb des gewählten Bezugshorizonts herangezogen werden muss. Für die hier vorliegende Bearbeitung wird also der allgemeinere Begriff der Tidenkette als Oberbegriff für sogenannte Tnw- und Thw-Folgen benutzt. Die folgende Bearbeitung setzt darüber hinaus keine Sturmtidescheitel vorraus, sondern es werden bereits vom Niveau des jeweiligen NNTnw bis hin zu HHThw der Untersuchungspegel entsprechende Ereignisse ausgewertet. Aufgrund der unterschiedlichen Relevanz der Tnw und Thw für die Entwässerung küstennaher Einzugsgebiete und der weiteren beschriebenen Küstenschutzaspekte findet die Auswertung überdies getrennt für Tnw-Scheitel (Tnw-Folgen) und Thw-Scheitel (Thw-Folgen), allgemein Tidescheitel-Folgen statt. Hierbei wird keine Mindestzahl von Tidescheiteln gefordert, die eine Tidescheitel-Folge aufweisen muss, um als Tidenkette-Ereignis bzw. als Tidescheitel-Folge zu gelten. Es werden aber die Folgenlängen als Folgenzahl n bestimmt. Ein einzelner Tnw- oder Thw-Scheitel ist dabei zwar noch keine Tidekette als solches, im unteren Abschluss der Definition aber sehr wohl eine Tnw- bzw. Thw-Folge mit der Folgenzahl 1. Abb. 17 erläutert diese Definition schematisch anhand von 3 beliebig gewählten Niveaus, aus denen entsprechend dem dargestellten Tideverlauf verschiedene Tidescheitelfolgen resultieren:

Oberhalb oder genau auf dem ersten Bezugshorizont bzw. der Basishhöhe Niveau 1 liegen die Tnw-Scheitel Tnw 2 bis Tnw 4 (Abb. 17). Diese drei aufeinanderfolgenden Tnw-

Scheitel bilden damit eine Tnw-Folge der Folgenzahl 3. Darin eingeschlossen ist eine Tnw-Folge der Folgenzahl 2 (Tnw 2 und Tnw 3) sowie die drei einzelnen Tnw und damit Tnw-Folgen der Folgenzahl 1: Tnw 2, Tnw 3 und Tnw 4.

Oberhalb oder genau auf dem zweiten Bezugshorizont (Niveau 2) liegen nur die Tnw-Scheitel Tnw 2 und Tnw 3. Oberhalb dieses höheren Niveaus lässt sich im Auswertezeitraum damit eine maximale Tnw-Folgenzahl von n = 2 feststellen. Gleichzeitig schließt der Zeitraum zwei Tnw-Folgen der Folgezahl 1 ein; die beiden einzelnen Tnw 2 und 3.

Für die Thw-Scheitel findet die Abgrenzung gleichermaßen statt. Z.B. lässt sich bezogen auf das Niveau 3 als längstes Ereignis eine Thw-Folge der Folgenzahl 4, bestehend aus den Thw 2 bis Thw 5 bestimmen.

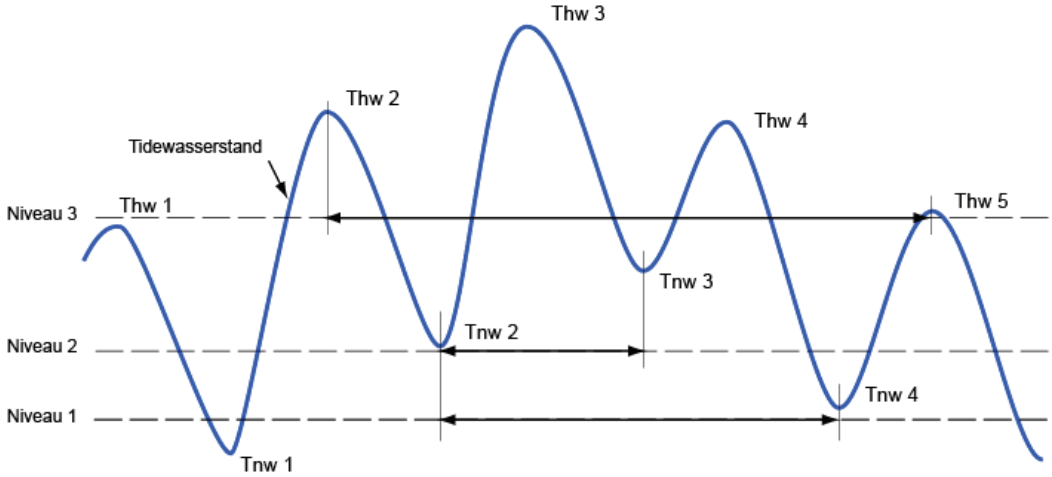


Abb. 17: Schematischer Tideverlauf und Abgrenzung von Tnw- und Thw-Folgen

3.7.2 Häufigkeitsuntersuchung von Tnw- und Thw-Folgen

Für eine Untersuchung der Häufigkeit von Tideketten werden für die zu untersuchenden Pegel Zeitreihen von täglichen Tnw-Scheitelwerten über mehrere Jahre benötigt. Basierend auf unterschiedlich vorgegebenen Höhenstufen ist nun anhand der vorgenannten Definition möglich, festzustellen, wie viele Tiden hintereinander die jeweiligen Tnw und Thw diese Basishöhe erreichen bzw. überschreiten.

Durchgeführt z.B. für das NNTnw, also das niedrigste aufgezeichnete Tideniedrigwasser, würden demzufolge alle Tnw des Untersuchungspegels oberhalb oder gleich diesen Wertes liegen und das Resultat wäre eine Tidekette, deren zugehörige Folgenzahl gleich dem Umfang der Untersuchungszeitreihe ist. Für ein einziges Jahr wären dies 705 Tnw. Durchgeführt für das HHTnw, also das höchste aufgezeichnete Tideniedrigwasser als Schwellwert, würde kein einziges Tnw darüber liegen, und das Ergebnis wäre eine „leere“ Kette. Mit den genannten Werten ist damit die maximale Spannweite einer solchen Untersuchung für die Tnw-Scheitel und sinngemäß für die Thw-Scheitel vorgegeben. Die Auflösung der Höhenstufen kann dabei beliebig fein sein und wurde für die vorliegende Untersuchung mit 1 cm sehr detailliert gewählt, um im Nachgang beliebige weitere, für die Bewertung der Binnenentwässerung oder des Küstenschutzes sinnvolle oder interessante Bezugshorizonte (konstant und zeitveränderlich), aus dieser Basisauswertung gewinnen zu können. Alle Bezugshorizonte beziehen sich dabei in der gesamten Auswertung auf die jeweiligen Pegelnullpunkte der untersuchten Pegel.

Es kann nun auf diese Weise eine Auszählung von hintereinander auftretenden Tiden durchgeführt werden, deren Tnw jeweils oberhalb einer vorgegebenen Höhenstufe liegen, und dies für alle Höhenstufen wiederholt werden. Das Ergebnis einer entsprechenden Auswertung ist eine Matrix von Ereigniszahlen, welche zeilenweise aufsteigend für die überschrittenen Höhenstufen und spaltenweise aufsteigend für die jeweiligen Folgenzahl aufgeführt sind. Eine solche Häufigkeitsmatrix ist in der folgenden Abb. 18 visualisiert. Diesem Beispiel liegt die Zeitreihe der täglichen Tnw-Scheitel des Tidepegels Cuxhaven von 1918 bis 2008 als Datenbasis zugrunde.

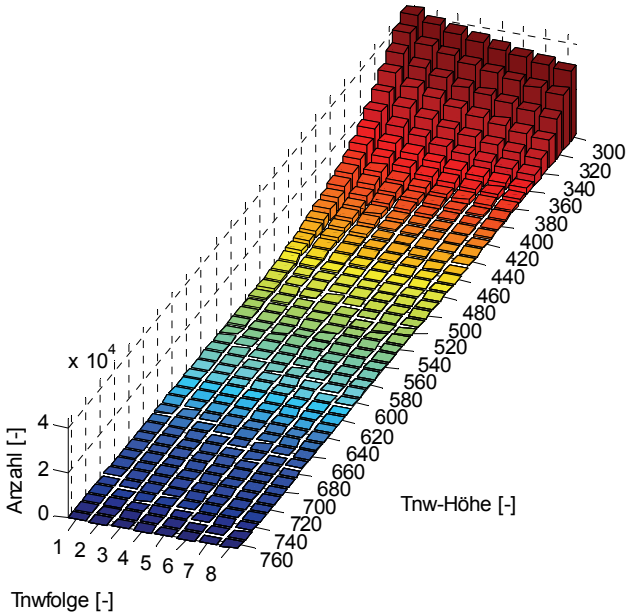


Abb. 18: Tnw-Häufigkeitsmatrix, Datenbasis: Tidepegel Cuxhaven, Zeitreihe 1918-2008

Werden nun die Zelleninhalte durch die Anzahl der Tiden pro Jahr dividiert, so wird eine Matrix von relativen Häufigkeiten pro Jahr erzeugt. Diese Reihen können entsprechend der Folgenzahl in ein Diagramm eingetragen werden, dessen Abszisse logarithmisch skaliert die Häufigkeiten, und dessen Ordinate linear die Tnw-Höhen, angeben. Das Resultat ist ein der Abb. 19 entsprechendes Ergebnis, welches Auskunft über die zu erwartende Basishöhe die durch n aufeinanderfolgende Tnw in entsprechender Häufigkeit pro Jahr zu erwarten ist, gibt, bzw. Ablesen lässt, wie häufig pro Jahr n aufeinanderfolgenden Tnw zu erwarten sind, die alle ein bestimmtes Niveau überschreiten.

Aufbauend auf diese Basisauswertung lassen sich die in Kapitel 5.1 und Kapitel 5.2 aufgeführten Auswertungen bezüglich der Höhenentwicklung der maximalen, jährlichen Basishöhen durchführen. So zeigt Abb. 20 am Beispiel des Pegels Cuxhaven die Entwicklung der pro Kalenderjahr jeweils maximalen Basishöhe, über der mindestens ein Kettenereignis der entsprechenden Folgezahl (von Folgenzahl 1 bis Folgenzahl 8) aufgetreten ist. Angelehnt an die übliche Konvention zur Benennung von Tideparametern bzw. Hauptwerten werden diese Jahresmaxima als HnTnw und HnThw bezeichnet. Der Buchstabe n steht dabei für die jeweilige Folgenzahl. Aus der Reihe der Jahres-HnTnw und HnThw lassen sich entsprechende Mittelwerte über unterschiedliche Auswertezeiträume bilden, welche dann als MHnTnw bzw. MHnThw bezeichnet werden (Kapitel 5.2).

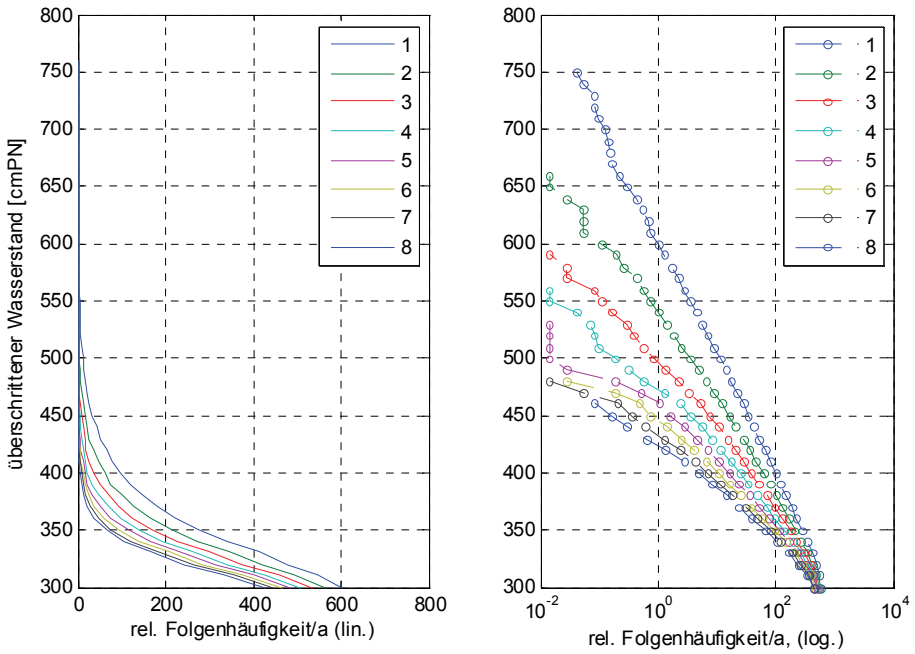


Abb. 19: Tnw-Folgen, Datenbasis: Tidepegel Cuxhaven, Zeitreihe 1918-2008

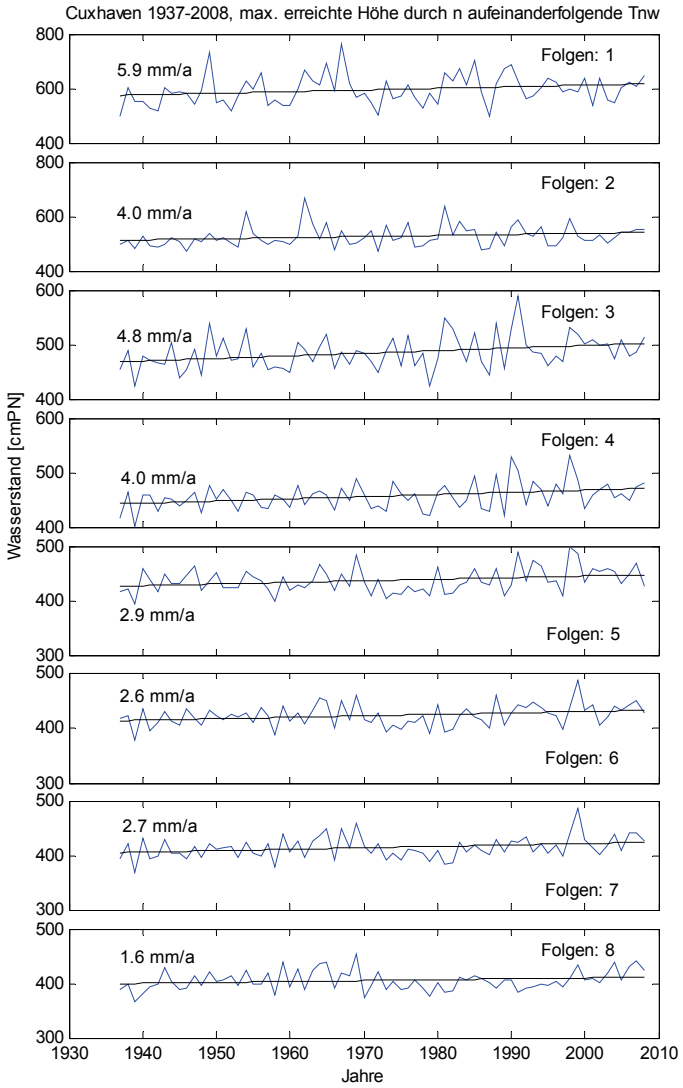


Abb. 20: Cuxhaven 1937-2008, maximal erreichte Basishöhe durch 1-8 aufeinanderfolgende Tnw

3.8 Verweildauern

Anfangs des Kapitels 3.7 wurde bereits ausgeführt, das für die dort genannten Fragestellungen oft gleichermaßen Tideketten und auch Verweildauern von Belang sind. Es wurde daher im Rahmen des Projektes untersucht, ob sich an den untersuchten Pegeln Veränderungen oder Verlagerungen interannueller oder intersaisonaler Art in den Verweildauern erkennen lassen und wie sich die Verweildauerverteilungen an den einzelnen Pegeln darstellen, bzw. ob und in welcher Form sich an ausgewählten Pegeln Trendentwicklungen bei der Betrachtung von Verweildauern von Sturmflutwasserständen ergeben.

3.8.1 Begriffsbestimmung

Wie auch bei den Tideketten, gibt es für Verweildauer-Untersuchungen sehr wenige verwertbare Arbeiten. FÜHRBÖTER hat sich 1979 mit Verweilzeiten und Wellenenergien befasst. Nach ihm ist die Verweildauer als diejenige Zeitdauer Δt definiert, in der sich ein Wasserstand H als Funktion der Zeit t in einem bestimmten Höhenbereich ΔH zwischen H und $H + \Delta H$ bewegt (FÜHRBÖTER 1979).

Abb. 21 zeigt am Beispiel eines kurzen Tideverlaufs, hier der Sturmflutverlauf am Pegel Cuxhaven am Beispiel des Orkantiefs Emma, wie die Verweildauer innerhalb einer bestimmten Höhenstufe definiert ist. Die Gesamtzeit, in welcher sich der Wasserstand innerhalb der Höhenstufe befindet, wird über den jeweiligen Betrachtungszeitraum aufsummiert. Der Betrachtungszeitraum kann dabei, wie im Beispiel gezeigt, ein einzelnes Sturmflutereignis oder auch beliebige, abgrenzbare Zeitabschnitte, z.B. Monate, Halbjahre, Kalender- oder hydrologische Jahre umfassen.

Die Höhe einzelner Höhenstufen ist dabei grundsätzlich frei wählbar. Sie sollte eine gute Auflösung in den interessierenden Höhenstufen bieten, dabei aber auch nicht zu fein werden. Als physikalisch begründeter Gesichtspunkt kann zusätzlich der Aspekt der Dissipation der Energie von angreifenden Wellen auf Küstenschutzelemente dienen. FÜHRBÖTER (1979) betrachtete für seine Untersuchungen an der Nordsee Höhenstufen von 0,25 und 0,50 m und an der Ostsee 0,10, 0,25 und 0,50 m. Er bevorzugte schließlich jeweils 0,25 m sowohl für Nord- und Ostsee. Diese Stufenhöhe von $\Delta H = 0{,}25$ m entspricht bei Deichböschungsneigungen von etwa 1:4 bis 1:6 Längen von rund 1 m. Er führt dazu an, dass auf Flächen von Quadratmetergröße genau die Anfangsschäden entstehen, die später dann u. U. zur völligen Zerstörung der Böschung führen können; mithin wird deshalb mit der Stufenhöhe $\Delta H = 0{,}25$ m eine optimale Unterteilung der Gefahrenbereiche zu den einzelnen Höhen H(t) erhalten.

Für die vorliegende Untersuchung wurde in gleichem Sinne eine etwas feinere Höhenstufenunterteilung von $\Delta H = 0{,}20$m gewählt, da modernere Deichprofile flachere Neigungen aufweisen. Andererseits sollte die Aufteilung auch nicht zu fein werden, um über die Bandbreite von NNTnw bis HHthw nicht zu viele Stufen zu erhalten.

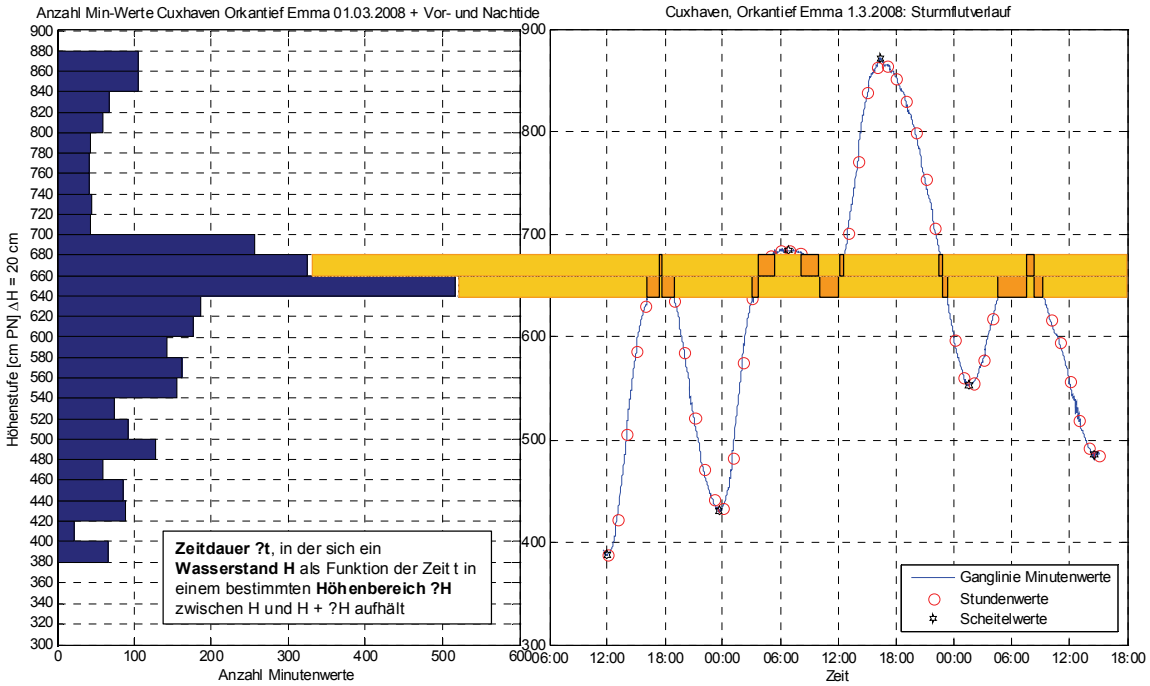


Abb. 21: Definitionsschema der Verweildauer

3.8.2 Untersuchung der Verweildauern

Es wurden aus den vorliegenden, vergleichsweise kurzen (10-12 Jahre), hoch aufgelösten Wasserstandsganglinien in Minutenauflösung Verweildauerkurven für unterschiedliche Zeiträume (Kalenderjahre, Wasserwirtschaftsjahre, Sommerhalbjahre, Winterhalbjahre) erzeugt. Abb. 22 zeigt am Beispiel des Pegels Cuxhaven im linken Teil die Verweildauern auf den unterschiedlichen Höhenstufen innerhalb eines Kalenderjahres. Im rechten Teil ist die Streuung der einzelnen Wasserstandswerte jeder Tide des gesamten Jahres dargestellt, die zu den entsprechenden Verweildauern beitragen. Um dabei noch die abnehmende Dichte von aufgetretenen Wasserständen am oberen und unteren Rand visuell erkennbar zu erhalten, wurde nur jede 25te Minute der gesamten Tide dargestellt (blaue Punkte). Die rote Linie stellt die daraus resultierende mittlere Tide dar.

Diese Auswertungen sind nur für Zeitreihenabschnitte möglich, für die hochaufgelöste Wasserstandsaufzeichnungen vorliegen. Entweder in Minutenauflösung, wie oben angeführt, oder aber mindestens in 60 Minuten-Auflösung; nur auf Basis einer Scheitelzeitreihe ist keine Bestimmung von Verweilzeiten möglich. Die Auswertung der Verweildauern beschränkt sich damit für fast alle untersuchten Pegel auf den Zeitraum von 1994, bzw. 1997, 1999 und 2000 bis 2008. Lediglich für den Pegel Cuxhaven liegen bis 1918 zurückreichend mindestens Stundenwerte zusammenhängend digital vor (Abb. 2). Aus diesem Grund konnten aussagekräftige Untersuchungen über den Verlauf der Verweildauern nur für den Pegel Cuxhaven durchgeführt werden. Auch hier wird also die Notwendigkeit weiterer Digitalisierkampagnen deutlich, um weitere Aussagen zu Trendverläufen von mittlerer Tide und Verweildauern für eine höhere Zahl von Pegeln ableiten zu können.

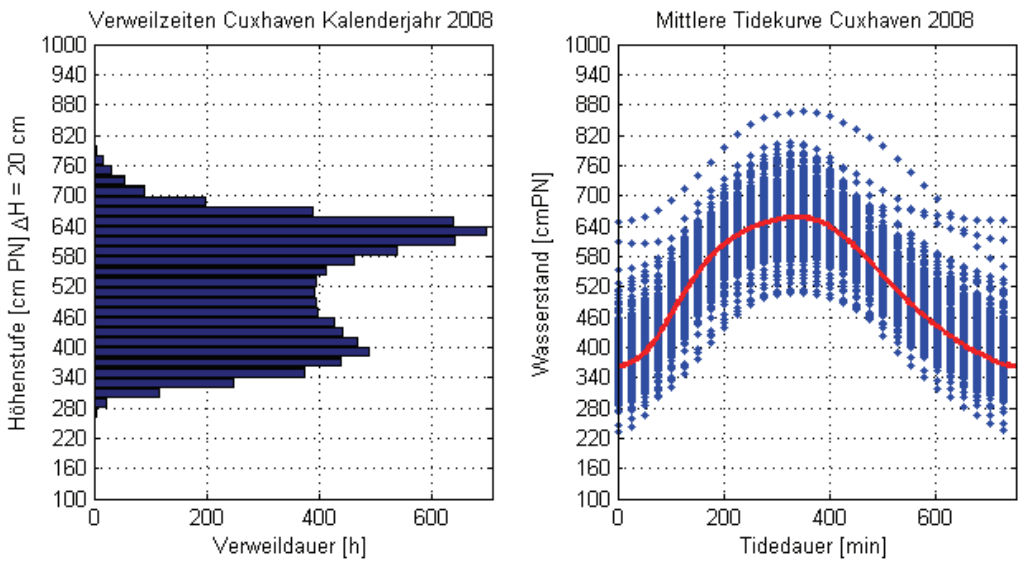


Abb. 22: Beispiel zur Verteilung von Verweilzeiten und Darstellung der Streuung aufgetretener Wasserstände in Bezug zum Tideverlauf, Pegel Cuxhaven, Kalenderjahr 2008

Um sicherzustellen, dass die aus 60-Minuten-Werten gewonnen Verweildauern möglichst gut mit Verweildauern gleicher Perioden, allerdings aus höher aufgelösten 1-Minuten-Werten, übereinstimmen, wurden verschiedene Untersuchungen zum Ansatz unterschiedlicher Interpolationsmethoden für die 60-Minuten-Werte durchgeführt. Abb. 23 zeigt am Beispiel des Pegels Cuxhaven die Unterschiede, welche für die Verweildauern des Kalenderjahres 2007 durch unterschiedlich zeitlich aufgelöste bzw. interpolierte Wasserstandswerte resultieren. Wie zu erkennen ist, liegen die Kurven für die hochaufgelösten 1-Minuten-Werte und die nur aus den 60-Minuten-Werten (ohne zusätzliche Berücksichtigung separater Scheitelwerte) über eine kubische Spline-Funktion interpolierten Werte nahezu deckungsgleich übereinander. Hingegen kommt es zu größeren Abweichungen, wenn bei der Interpolation auch Scheitelwerte berücksichtigt werden, die durch nahe zeitliche Lage an äquidistanten 60-Minuten-Werte Überschwingeffekte der Interpolationslösung verursachen können. Werden nur die Stundenwerte, ohne weitere Interpolation herangezogen, entstehen ebenfalls deutliche Differenzen. Aus diesem Grund wurden für die Untersuchung der Verweildauern des Pegels Cuxhaven alle Stundenwerte zunächst mittels kubischer Splinefunktion zu 1-Minuten-Werten interpoliert.

Für die Auswertung von Verweildauern von Sturmflutwasserständen konnte darüber hinaus auf durchgehend digitalisierte Ganglinien eines Sturmflutkollektivs von 311 Ereignissen für den Pegel Cuxhaven (Zeitraum 1901 bis 2008) und 199 Ereignissen für den Pegel Hörnum (Zeitraum 1936 bis 2008) aus dem Projekt XtremRisK zurückgegriffen werden. Die entsprechenden Auswertungen finden sich im Kapitel 6.

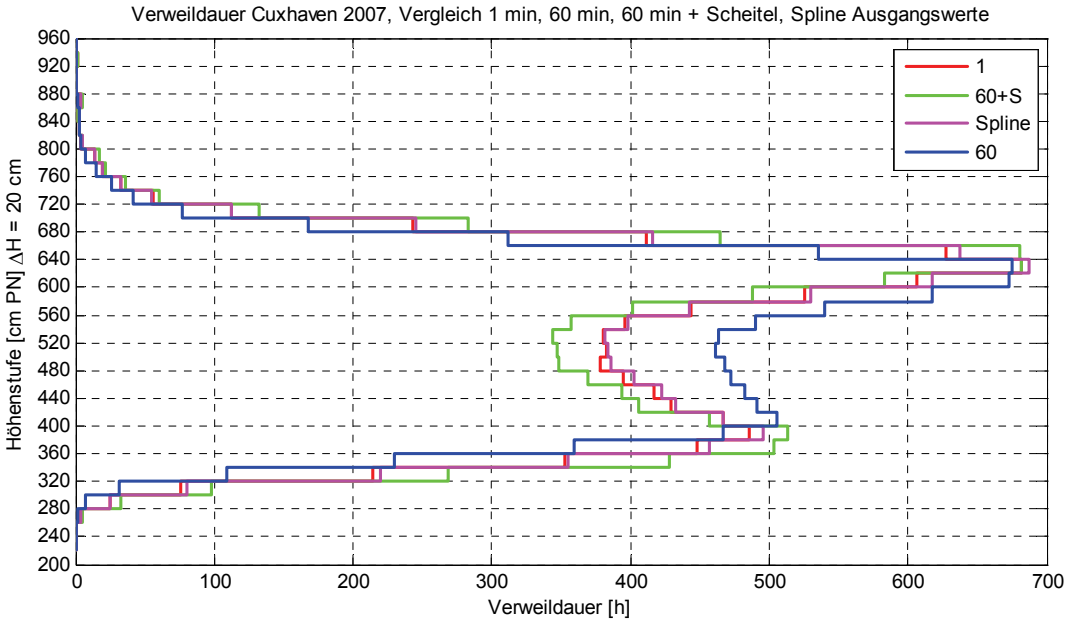


Abb. 23: Vergleich der Verweildauern resultierend aus unterschiedlichen Ausgangsdaten, 1-Minuten-Werte (rot), 60-Minuten-Werte (blau), 60-Minuten-Werte und Tidescheitel über Spline-Funktion zu 1-Minuten-Werten interpoliert (grün), 60-Minuten-Werte über Spline-Funktion zu 1-Minuten-Werten interpoliert (rosa)

4. Ergebnisse der Untersuchungen zur Entwicklung des RMSL in der Deutschen Bucht

Im Folgenden werden die Ergebnisse im Detail vorgestellt und diskutiert, die sich bei der Anwendung der in Kapitel 3 beschriebenen Analyseverfahren unter Berücksichtigung der RMSL-Zeitreihen für die Deutsche Bucht (siehe Kapitel 2) ergeben haben. Die Ergebnisse, die bei den Untersuchungen zu Tideketten und Verweildauern erzielt wurden sind in den nachfolgenden Kapiteln 5 und 6 detailliert beschrieben.

4.1 RMSL-Zeitreihen für die einzelnen Untersuchungspegel und ausgewählte synthetische Pegelzeitreihen

In Abb. 24 sind die RMSL-Zeitreihen für die ausgewählten Untersuchungspegel dargestellt, die unter Verwendung der in den Kapiteln 3.1 und 3.2 beschriebenen Methodik generiert wurden. Zudem sind verschiedene synthetische Zeitreihen dargestellt, die entsprechend des in Kapitel 3.3 vorgestellten Verfahrens konstruiert wurden. Neben einer synthetischen Zeitreihe für die gesamte Deutsche Bucht, wurden zwei weitere, zum einen für den Bereich Schleswig-Holstein und zum anderen für den Bereich Niedersachsen, ermittelt. Für die synthetische Zeitreihe für Schleswig-Holstein wurden die Pegeldaten von List, Hörnum, Wyk, Dagebüll, Wittdün und Husum berücksichtigt. Für die synthetische Zeitreihe für Niedersachsen die Daten der Pegel Cuxhaven, Bremerhaven, Lt. Alte Weser, Wilhelmshaven, Norderney und Emden. Der Pegel Helgoland wurde lediglich bei der Generierung der synthetischen Zeitreihe für die gesamte Deutsche Bucht berücksichtigt.

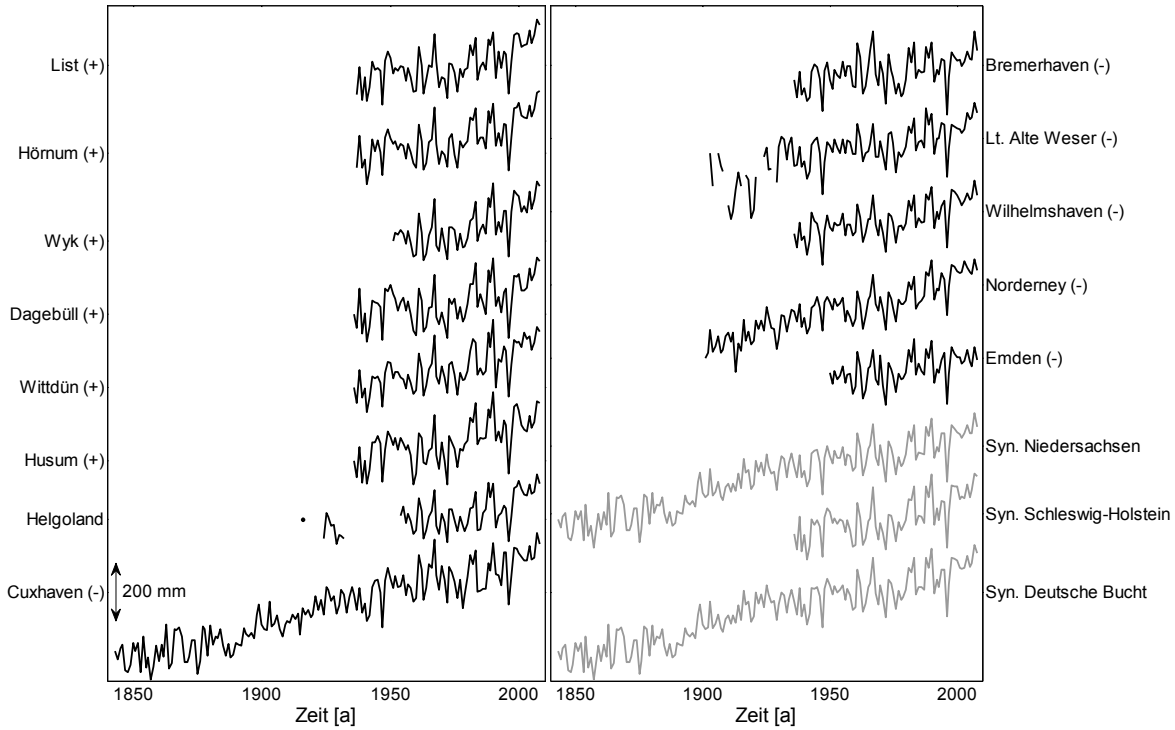


Abb. 24: RMSL-Zeitreihen für alle Untersuchungspegel und synthetische Zeitreihen für die Bereiche Schleswig-Holstein (berücksichtigte Pegel sind mit (+) gekennzeichnet), Niedersachsen (berücksichtigte Pegel sind mit (-) gekennzeichnet) und die gesamte Deutsche Bucht (alle Pegel wurden berücksichtigt)

Betrachtet man zunächst die Zeitreihen der Einzelpegel, so bestätigt sich die gute Datenqualität für den Zeitraum nach 1936 (siehe auch Kapitel 2.4). Für diese Periode sind besonders hohe (z.B. 1967) oder niedrige Werte (z.B. 1996) in allen Pegelzeitreihen in ähnlicher Weise zu erkennen. Für den frühen Zeitraum vor 1936 ist besonders für den Pegel Lt. Alte Weser die in Kapitel 2.4 beschriebene Unsicherheit bei den Höhenbezügen zu erkennen. Bei der Generierung der synthetischen Pegel fällt dies aufgrund der hier genutzten Vorgehensweise zur Konstruktion solcher Zeitreihen jedoch nicht ins Gewicht. Zudem erfolgt die Glättung dieser Zeitreihe aufgrund der ohnehin vorhandenen Lücken erst ab 1929 (siehe Kapitel 4.3). Die ermittelten linearen Trends, die den frühen Zeitraum mit einschließen, sind hingegen mit entsprechenden Unsicherheiten behaftet.

Mit Blick auf die drei generierten synthetischen Pegelzeitreihen fällt auf, dass alle Pegel für die Daten von vor 1936 verfügbar sind, entlang der niedersächsischen Küste angeordnet sind. Aus diesem Grund entspricht die synthetische Zeitreihe für Niedersachsen in diesem Zeitraum der synthetischen Zeitreihe für die gesamte Deutsche Bucht. Für den Bereich Schleswig-Holstein sind frühestens Daten ab 1936 verfügbar. Da einige der hier berücksichtigten Pegel jedoch bereits wesentlich früher (teilweise Ende des 19. Jahrhunderts; siehe Pegelprotokoll) installiert wurden, ist grundsätzlich die Möglichkeit zur Digitalisierung weiterer Daten gegeben. Nur so können Rückschlüsse über die RMSL-Entwicklung zum Ende des 19. und Anfang des 20. Jahrhunderts gezogen werden.

Die in Abb. 24 dargestellten Zeitreihen bilden die Grundlage für alle im AMSeL-Projekt durchgeführten Analysen zur Entwicklung des RMSL in der Deutschen Bucht.

4.2 Ergebnisse linearer Trendanalysen

In Tab. 2 sind die Ergebnisse der linearen Trenduntersuchungen zusammenfassend dargestellt. Wie in Kapitel 3.4 beschrieben, wurden Trends sowohl für die Einzelzeitreihen, als auch die drei synthetischen Zeitreihen, für unterschiedliche Zeitperioden ermittelt. Zudem sind jeweils die 1-σ Standardfehler dargestellt (entsprechen dem 68%-Konfidenzintervall). In Klammern sind für alle Pegel und die unterschiedlichen Zeiträume die Korrelationskoeffizienten r abgebildet, die sich zwischen dem jeweiligen Pegel und der synthetischen Zeitreihe für die gesamte Deutsche Bucht ergeben haben.

Zunächst sollen erneut die Ergebnisse näher betrachtet werden, die bei den Analysen der Einzelzeitreihen erzielt wurden. Für den langen Zeitraum ab 1843 kann nur für den Pegel Cuxhaven ein Trend von 2,3 ± 0,1 mm/a ermittelt werden und ein Vergleich zu anderen Pegeln ist in diesem Fall nicht möglich. Für den Zeitraum 1901 bis 2008 können zusätzlich Trends für die Pegel Norderney und Lt. Alte Weser angegeben werden. Der Trend, welcher sich für den Pegel Lt. Alte Weser ergibt, ist mit 1,9 ± 0,2 mm/a am geringsten, gefolgt von Norderney (2,2 ± 0,2 mm/a) und Cuxhaven (2,4 ± 0,1 mm/a). Die Ergebnisse für Norderney und Cuxhaven sind ähnlich. Betrachtet man zusätzlich die Korrelation mit dem synthetischen Pegel für die Deutsche Bucht, so ist diese für Cuxhaven und Norderney erneut ähnlich und für den Pegel Lt. Alte Weser mit r = 0,88 deutlich geringer. Für den Zeitraum von 1937 bis 2008 können für 10 der 13 berücksichtigten Pegel Trends ermittelt werden. Auch hier zeigen sich teilweise signifikante Unterschiede zwischen einzelnen Zeitreihen, die u.a. auf unterschiedliche Vertikalbewegungen an den Pegeln zurückzuführen sind. Die berechneten Trends liegen im Bereich von 1,2 bis 2,4 mm/a (Standardfehler ≈ ± 0,3 mm/a), wobei sich die höchsten Werte für Wittdün und Norderney und der niedrigste für Bremerhaven ergeben. Aus der Gesamtbetrachtung ist eine leichte Tendenz dahin gehend erkennbar, dass sich höhere Trends für den Bereich Schleswig-Holstein (den östlichen Teil der Deutschen Bucht) ergeben, als es für den Bereich Niedersachsen (südlicher Teil der Deutschen Bucht) der Fall ist. Gleiches gilt für die Korrelationen mit der synthetischen Zeitreihe. Insgesamt sind die ermittelten Korrelationskoeffizienten zwar sehr hoch (> 0,9), jedoch liegen auch diese im Mittel etwas höher für die Pegel entlang der Küste Schleswig-Holsteins.

Die zuletzt beschriebenen Effekte treten, zumindest die Trends betreffend, noch deutlicher für den Zeitraum 1951 bis 2008 zu Tage. Hier können für alle Untersuchungspegel Trends angegeben werden. Gleichzeitig nimmt die Streubreite zu, die ermittelten Trends liegen zwischen 1,0 mm/a (Bremerhaven) und 2,8 mm/a (Wyk). Das gleiche Bild, nämlich tendenziell höhere Trends und leicht bessere Korrelationen für den Bereich Schleswig-Holstein, ergibt sich auch für den kürzesten hier betrachteten Zeitraum von 1971 bis 2008. Die Trends, welche für diese Periode ermittelt wurden, sind deutlich höher, als für die längeren Zeiträume und liegen zwischen 2,1 mm/a (Emden) und 4,6 mm/a (Wyk). Die Standardfehler bewegen sich um ± 0,8 mm/a.

Tab. 2: Ergebnisse der linearen Trendanalysen auf Basis der RMSL-Zeitreihen für die Deutsche Bucht

Pegel	Lineare trends des RMSL für verschiedene Zeitfenster ± 1-σ Standardfehler [mm/a] (Korrelation mit der synthetischen Zeitreihe - Deutsche Bucht)				
	1843-2008	1901-2008	1937-2008	1951-2008	1971-2008
List (+)	-	-	2,0 ± 0,3 (0,98)	2,4 ± 0,4 (0,98)	4,2 ± 0,8 (0,98)
Hörnum (+)	-	-	1,8 ± 0,3 (0,98)	2,1 ± 0,4 (0,98)	3,7 ± 0,8 (0,98)
Wyk (+)	-	-	-	2,8 ± 0,5 (0,98)	4,6 ± 0,8 (0,97)
Dagebüll (+)	-	-	1,7 ± 0,4 (0,95)	2,2 ± 0,5 (0,96)	3,7 ± 0,9 (0,97)
Wittdün (+)	-	-	2,4 ± 0,3 (0,97)	2,6 ± 0,4 (0,97)	3,9 ± 0,8 (0,97)
Husum (+)	-	-	2,2 ± 0,3 (0,96)	2,5 ± 0,5 (0,96)	3,6 ± 0,9 (0,97)
Helgoland		-	-	2,1 ± 0,4* (0,96)	3,5 ± 0,7 (0,96)
Cuxhaven (-)	2,3 ± 0,1 (0,99)	2,2 ± 0,2 (0,96)	2,1 ± 0,3 (0,95)	2,0 ± 0,4 (0,94)	3,6 ± 0,8 (0,94)
Bremerhaven (-)	-	-	1,2 ± 0,3 (0,92)	1,0 ± 0,5 (0,90)	2,5 ± 0,8 (0,94)
Lt. Alte Weser (-)	-	1,9 ± 0,2* (0,88)	1,7 ± 0,3 (0,95)	1,7 ± 0,4 (0,95)	3,1 ± 0,8 (0,96)
Wilhelmshaven (-)	-	-	1,9 ± 0,3 (0,98)	2,0 ± 0,4 (0,99)	3,4 ± 0,7 (0,99)
Norderney (-)	-	2,4 ± 0,1 (0,95)	2,4 ± 0,3 (0,96)	2,8 ± 0,4 (0,95)	4,2 ± 0,6 (0,96)
Emden (-)	-	-	-	1,3 ± 0,4 (0,94)	2,1 ± 0,7 (0,94)
synthetische Zeitreihe (Schleswig-Holstein)	-	-	2,2 ± 0,3 (0,99)	2,5 ± 0,4 (0,99)	4,1 ± 0,8 (1,00)
synthetische Zeitreihe (Niedersachsen)	2,0 ± 0,1 (1,00)	1,7 ± 0,1 (0,99)	1,8 ± 0,3 (0,99)	1,8 ± 0,4 (0,99)	3,2 ± 0,7 (0,99)
synthetische Zeitreihe (Deutsche Bucht)	2,0 ± 0,1	1,7 ± 0,1	2,0 ± 0,3	2,1 ± 0,4	3,6 ± 0,7

* Für einige Jahre des berücksichtigten Zeitraumes liegen keine Daten vor, es sind aber mind. 93% verfügbar

Mit Blick auf die synthetischen Pegel bestätigen sich die anhand der Einzelpegel beschriebenen Änderungen. Für die längeren Zeiträume (1843-2008, 1901-2008, 1937-2008 und 1951-2008) ergeben sich keine nennenswerten Unterschiede in den ermittelten Trends. Lediglich für den Zeitraum 1971 bis 2008 sind signifikant höhere Trends berechnet worden. Dabei ist auch hier zu beobachten, dass sich tendenziell höhere Werte für den Bereich Schleswig-Holstein ergeben. Dies deutet darauf hin, dass entlang der in Nord-Süd-Richtung verlaufenden Küstenlinie andere bzw. ausgeprägtere Vertikalbewegungen vorherrschen als es bei der in Ost-West-Richtung verlaufenden Küstenlinie der Fall ist (siehe auch Kapitel 4.4).

Wie in Kapitel 3.4 beschrieben, können solche Ergebnisse aus linearen Trendanalysen direkt mit denjenigen aus anderen Untersuchungen verglichen werden. Dabei ist zum einen zu beachten, welche Zeiträume zugrunde liegen und zum anderen, ob Vertikalbewegungen in irgendeiner Weise berücksichtigt wurden oder nicht. So geben CHURCH UND WHITE (2006) einen Trend von 1,7 ± 0,2 mm/a (1-σ Standardfehler) für den globalen Meeresspiegel für das 20. Jahrhundert an. Dieser Wert wurde im Rahmen verschiedener Studien bestätigt (z.B. HOLGATE 2007). Vertikale Landbewegungen sind näherungsweise durch die Einbeziehung von GIA-Modellergebnissen (siehe auch CHURCH ET AL. 2004) berücksichtigt. WÖPPELMANN ET AL. (2009) ermitteln unter Einbeziehung von CGPS-Daten zur Berücksichtigung von Vertikalbewegungen einen Wert von 1,61 ± 0,19 mm/a.

Für einen Vergleich mit den hier vorgestellten Ergebnissen ist am ehesten die synthetische Zeitreihe für die gesamte Deutsche Bucht geeignet, welche die mittleren RMSL-

Änderungen repräsentiert. Unter Verwendung dieser Zeitreihe und Berücksichtigung des Zeitraumes von 1901 bis 2000 ergibt sich ein Trend von 1,5 ± 0,2 mm/a. Dieser ist etwas niedriger, als der von CHURCH UND WHITE (2006) ermittelte Wert für den globalen MSL und beinhaltet gleichzeitig noch die Landsenkungen (im Bereich von ca. 0,5 ± 0,4 mm/a, siehe Kapitel 4.4), welche von CHURCH UND WHITE (2006) bereits (zumindest näherungsweise) berücksichtigt sind. Daraus kann geschlussfolgert werden, dass sich über das 20. Jahrhundert hinweg tendenziell ein geringerer MSL-Anstieg im Bereich der Deutschen Nordsee vollzogen hat, als es im globalen Mittel der Fall war.

Für die erste Hälfte des 20. Jahrhunderts (1904 bis 1953) ermittelt HOLGATE (2007) eine Anstiegsrate des globalen MSL (Landsenkungen durch GIA (PELTIER 2001) berücksichtigt) von 2,03 ± 0,35 mm/a und für die die zweite Hälfte des Jahrhunderts (1954 bis 2003) von 1,45 ± 0,34 mm/a. Für dieselben Zeiträume ergibt sich unter Verwendung der synthetischen Zeitreihe für die Deutsche Bucht jeweils ein Trend von 2,0 ± 0,5 mm/a. Auch hier gilt es zu berücksichtigen, dass die vertikalen Landbewegungen in der synthetischen Zeitreihe der Deutschen Bucht noch enthalten sind. Berücksichtigt man erneut die in Kapitel 4.4 dargestellten Senkungsraten, so zeigt sich, dass die Änderungen in der Deutschen Bucht in der ersten Hälfte des 20. Jahrhunderts geringer, in der 2. Hälfte des 20. Jahrhunderts in etwa gleich den Änderungen waren, welche im globalen Mittel beobachtet wurden. Für die letzten 15 Jahre geben MITCHUM ET AL. (2010) einen Trend von 3,5 ± 0,4 mm/a an, welcher auf der Auswertung von Altimeterdaten beruht und somit nicht durch vertikale Landbewegungen beeinflusst ist. Aus der synthetischen Zeitreihe für die Deutsche Bucht ergibt sich ein Trend von 7,3 ± 2,1 mm/a (siehe Abb. 26). D.h. für die letzten ca. 1,5 Dekaden zeigt sich auch bei Berücksichtigung der Vertikalbewegungen die Tendenz, dass ein stärkerer MSL-Anstieg im der Bereich der deutschen Nordsee stattgefunden hat, als es im globalen Mittel der Fall war.

Für den Pegel Brest, der im engeren räumlichen Zusammenhang mit den hier untersuchten Pegeln steht, geben WÖPPELMANN ET AL. (2006) RMSL Trends von 1,3 ± 0,15 mm/a (1890 bis 1980) und 3,0 ± 0,5 mm/a (1980 bis 2004) an. Für die Deutsche Bucht ergeben sich für dieselben Zeiträume Trends von 1,6 ± 0,2 bzw. 2,0 ± 1,5 mm/a. Da vertikale Landbewegungen in beiden Fällen unberücksichtigt sind, kann lediglich ein Vergleich der relativen Änderungen erfolgen, wobei die Unterschiede für den Zeitraum ab 1980 deutlicher sind als für den Zeitraum von 1890 bis 1980. Für die niederländische Küste geben KATSMANN ET AL. (2008) eine konstante Anstiegsrate über das 20. Jahrhundert von 2,5 ± 0,6 mm/a an. Eine Beschleunigung ist demnach in den Beobachtungsdaten nicht zu erkennen. Darüber, ob Landsenkungen bei den Analysen berücksichtigt wurden wird keine Aussage getroffen, weshalb vermutet werden kann, dass dies nicht der Fall ist. Damit ergibt sich auch hier (relativ gesehen) ein stärkerer Anstieg, als es für denselben Zeitraum im Bereich der Deutschen Bucht der Fall war.

Weitere Vergleiche sollen an dieser Stelle nicht erfolgen, obwohl sich in der Literatur die Ergebnisse einer Vielzahl weiterer Studien finden, welche dies zulassen würden. Wie die Ausführungen jedoch deutlich gezeigt haben, ist es unerlässlich bei solchen Vergleichsbetrachtungen die zugrunde liegenden Zeiträume zu beachten und jeweils zu prüfen, ob es sich um Analysen des RMSL oder des MSL (Landsenkungen berücksichtigt) handelt. Nur so können Rückschlüsse darüber gezogen werden, ob die Änderungen, die in zwei unterschiedlichen Gebieten beobachtet wurden ähnlich oder signifikant unterschiedlich waren.

Aus dem Vergleich einzelner Pegel entlang derselben Küstenlinie können über die Vergleiche der relativen Anstiegsraten zumindest erste Rückschlüsse darüber gezogen werden, in

welchen Bereichen von stärkeren Vertikalbewegungen auszugehen ist, was eine wichtige Information für den regionalen bzw. lokalen Küstenschutz darstellt.

4.3 Ergebnisse nicht-linearer Trendanalysen

Im Folgenden sollen die Ergebnisse im Detail vorgestellt werden, die sich bei den im AMSeL-Projekt durchgeführten nicht-linearen Trendanalysen ergeben haben. Dabei soll in erster Linie geprüft werden, ob und welche Beschleunigungstendenzen (zu unterschiedlichen Zeiträumen) in den untersuchten Zeitreihen vorhanden sind. Dazu werden einige Ergebnisse aus der Anpassung von Polynomen 2. Ordnung denjenigen aus anderen Studien vergleichend gegenübergestellt, bevor die Glättungsfunktionen, die mittels SSA und MCAP für die Einzelzeitreihen und die verschiedenen synthetischen Zeitreihen bestimmt wurden (siehe Kapitel 3.5) dargestellt und diskutiert werden. Zudem wurden gleitende lineare Trends für unterschiedliche Zeitperioden auf Basis der synthetischen Zeitreihe für die gesamte Deutsche Bucht ermittelt. Während im vorangegangenen Kapitel die Trends für ungleich lange Zeitperioden ermittelt und verglichen wurden, werden nun also Trends über gleichlange, zeitlich gegeneinander verschobene Zeiträume berücksichtigt.

Aus ihren Analysen der globalen MSL-Änderungen, wobei sowohl Pegel- als auch Altimeterdaten berücksichtigt wurden, ermitteln CHURCH UND WHITE (2006) einen quadratischen Koeffizienten von 0,0065 ± 0,006 mm/a² aus der Anpassung eines Polynoms 2. Ordnung. Der zugrunde liegende Zeitraum ist 1870 bis 2001. Für die synthetische Zeitreihe für die gesamte Deutsche Bucht ergibt sich für den gleichen Zeitraum ein negativer quadratischer Koeffizient von -0,011 ± 0,003 mm/a². Der Annahme folgend, dass Vertikalbewegungen über die hier betrachteten Zeiträume hinweg als linear angenommen werden können, spielt es für den Vergleich keine Rolle, ob diese berücksichtigt wurden oder nicht. Während die globale Rekonstruktion in dem betrachteten Zeitraum also eine positive Beschleunigung aufweist, ergibt sich für die Rekonstruktion für die Deutsche Bucht eine negative Beschleunigung. Dies entspricht den Ergebnissen von WOODWORTH ET AL. (2008), die für die meisten langen europäischen Pegelzeitreihen (mit Daten ab 1870) keine oder eine leicht negative Beschleunigung feststellen. Für den Zeitraum von 1901 bis 2006 ermitteln WOODWORTH ET AL. (2009) einen Koeffizienten von 0,0055 ± 0,003 mm/a² auf Basis einer synthetischen Zeitreihe, die aus Pegelzeitreihen für den Bereich Großbritannien (hauptsächlich englische Ostküste) konstruiert wurde. Für die Deutsche Bucht ergibt sich ein geringerer, aber auch positiver Koeffizient von 0,0016 ± 0,005 mm/a². Einige weitere Vergleiche quadratischer Koeffizienten, die sich bei der Anpassung von Polynomfunktionen an unterschiedliche Beobachtungszeitreihen ergeben haben, sind in WAHL ET AL. (zur Veröffentl. angenommen) zu finden.

Abb. 25 zeigt die Ergebnisse, die sich bei der Glättung (mittels SSA und MCAP) der Einzelzeitreihen ergeben haben. Links sind die jeweiligen RMSL-Jahreswertzeitreihen, die zugehörigen Glättungsfunktionen (mit kleinstem MSE gegenüber den Beobachtungen) und die Ergebnisse aller MCAP-Simulationen dargestellt. Die auf der rechten Seite abgebildeten Zeitreihen repräsentieren die (jährlichen) RMSL-Anstiegsraten, welche über die Differenzierung der jeweiligen Glättungsfunktionen bestimmt wurden.

Für die Pegel Helgoland und Lt. Alte Weser erfolgte die Glättung nur für die Zeiträume, in denen keine Lücken in den Zeitreihen vorhanden sind (Helgoland ab 1953, Lt. Alte Weser ab 1929). Anhand der Glättungsfunktionen kann für fast alle Einzelzeitreihen eine Beschleu-

nigungstendenz seit ca. 1970 festgestellt werden, die für einige Pegel in den 1980ern nachlässt oder sich sogar umkehrt, bevor sie ab den 1990ern deutlicher als zuvor wieder einsetzt. Aus diesem Grund sind die zuletzt ermittelten Anstiegsraten für viele der berücksichtigten Pegel die höchsten, die jemals beobachtet wurden. Dies gilt in erster Linie für die Pegel, die erst ab 1936/1937, oder noch später, Daten bereitstellen. Mit Blick auf die wenigen langen Zeitreihen (in erster Linie Cuxhaven, aber auch Norderney) zeigt sich, dass um 1900 herum bereits schon einmal zumindest ähnlich hohe Anstiegsraten wie zuletzt beobachtet wurden. Hier stellt sich erneut der Bedarf an weiteren Daten dar, die dazu beitragen können, dieses Verhalten des RMSL in dem frühen Zeitraum vor 1936 genauer untersuchen zu können.

Abb. 26 zeigt dieselben Ergebnisse für die synthetische Zeitreihe der Deutschen Bucht. Auch hier zeigen sich gegen Ende sehr hohe Anstiegsraten in der Größenordnung von ca. 5 mm/a, die das Resultat einer Beschleunigung im RMSL-Anstieg ab ca. 1970 mit einer Intensivierung nach 1990 sind. Für den Zeitraum um 1900 zeigen sich erneut ähnlich hohe Anstiegsraten wie die aktuell beobachteten. Aus diesem Grund ist die zuletzt beobachtete Beschleunigung ebenso wie die daraus resultierenden Anstiegsraten derzeit nicht als ungewöhnlich zu bezeichnen. Dennoch sind regelmäßige Aktualisierungen der hier vorgestellten Ergebnisse erforderlich, um zeitnah zu überprüfen, ob eine weitere Beschleunigung stattfindet oder gleichbleibende oder niedrigere Anstiegsraten zu beobachten sind.

Abschließend sei nochmals darauf hingewiesen, dass es sich bei den hier dargestellten Raten um jährliche Anstiegsraten handelt, welche aus den jeweiligen Glättungsfunktionen mit minimalem MSE gegenüber den Beobachtungszeitreihen ermittelt wurden. Bereits in Kapitel 3.5 wurde verdeutlicht, dass die grau hinterlegten Bänder nicht mit Konfidenzintervallen o.ä. zu verwechseln sind und das sie lediglich über die Streubreite aus den MCAP-Simulationen Rückschlüsse auf den Betrag der Unsicherheiten zulassen, welche sich aus der vorherigen Extrapolation ergeben.

Die bisher beschriebenen Ergebnisse bestätigen sich auch mit Blick auf die in Abb. 27 dargestellten Ergebnisse aus den Analysen gleitender linearer Trends auf Basis der synthetischen Zeitreihe für die Deutsche Bucht. Dargestellt sind die Zeitreihen, die sich bei der Ermittlung 20-, 30-, 40- und 50-jähriger gleitender linearer Trends ergeben. Ebenfalls abgebildet sind die 95%-Konfidenzintervalle.

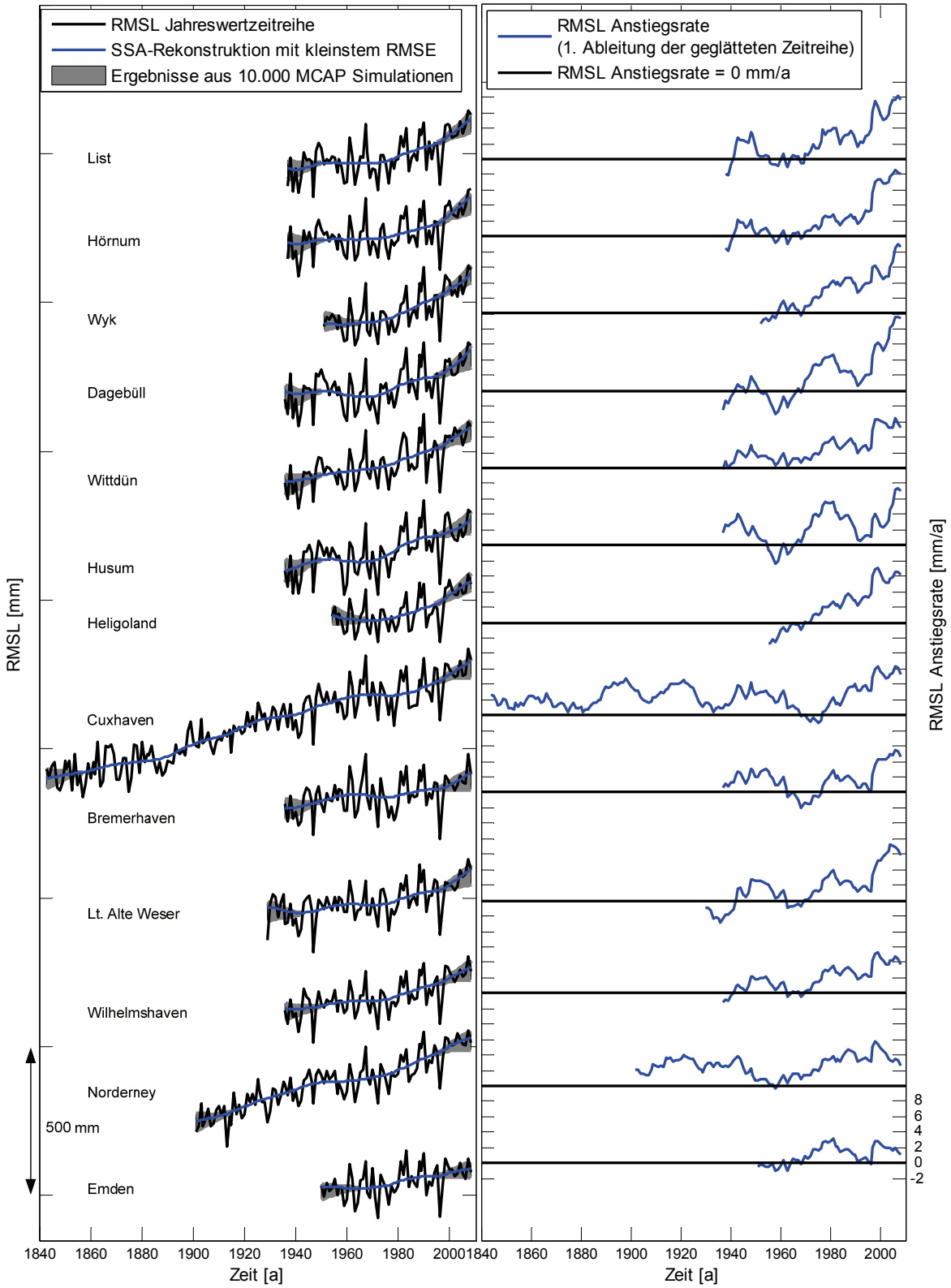


Abb. 25: Ergebnisse der Glättung mittels SSA und MCAP. Links: RMSL Jahreswertzeitreihen mit Glättungsfunktion und Ergebnissen der MCAP-Simulationen. Rechts: RMSL-Anstiegsraten, ermittelt aus der Differenzierung der Glättungsfunktionen.

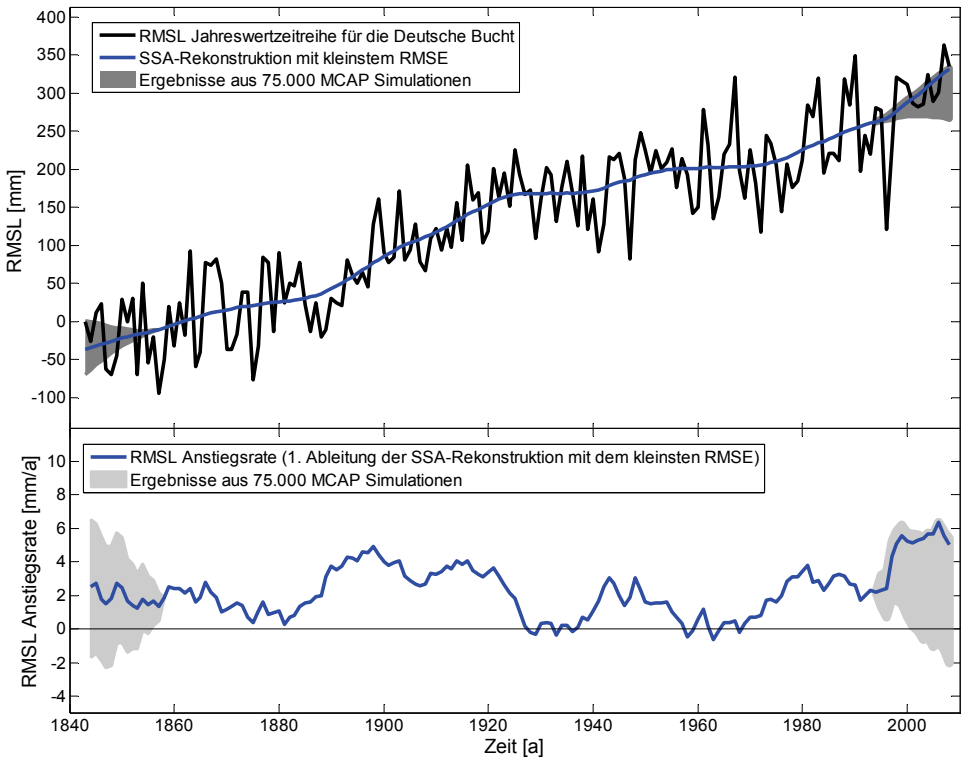


Abb. 26: Ergebnisse der Glättung mittels SSA und MCAP der synthetischen Zeitreihe für die gesamte Deutsche Bucht. Oben: RMSL-Jahreswertzeitreihe mit Glättungsfunktion und Ergebnissen der MCAP-Simulationen. Unten: RMSL-Anstiegsraten, ermittelt aus der Differenzierung der Glättungsfunktionen aus den MCAP-Simulationen.

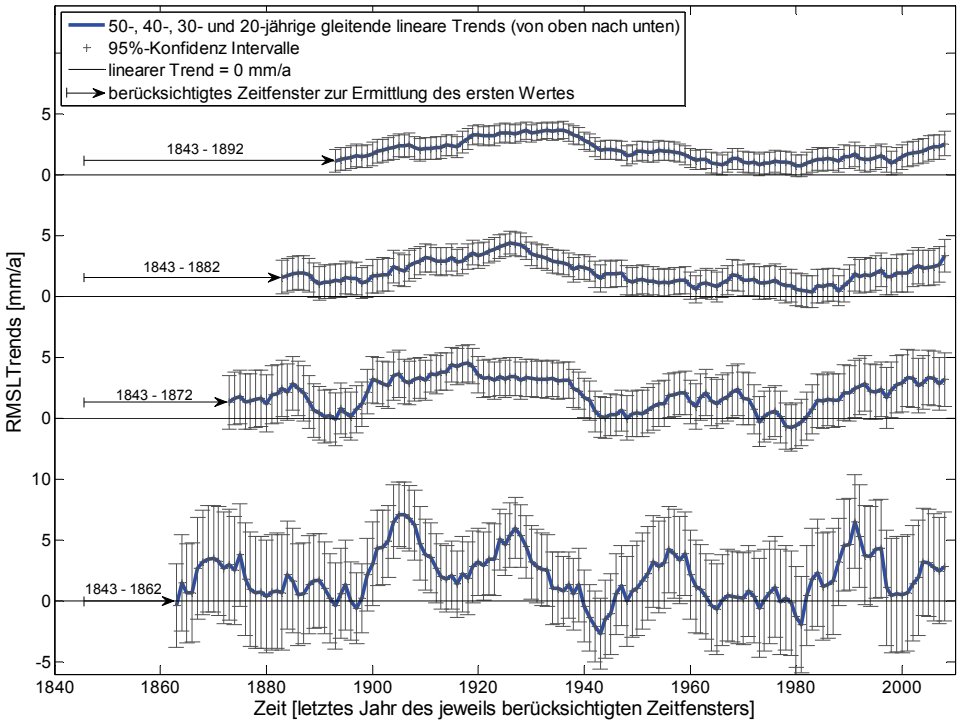


Abb. 27: Zeitreihen, die sich bei der Ermittlung gleitender linearer Trends (mit 95%-Konfidenzintervallen) über unterschiedliche Zeiträume (20, 30, 40 und 50 Jahre) auf Basis der synthetischen Zeitreihe für die Deutsche Bucht ergeben. Die ermittelten Trends sind jeweils für das letzte Jahr der betrachteten Zeitperiode aufgetragen (siehe Pfeile in der Grafik).

Die Zeitreihe, welche sich auf Basis 20-jähriger gleitender linearer Trends ergibt, zeigt sehr deutlich die ausgeprägte dekadische Variabilität, welche in den RMSL-Zeitreihen für die Deutsche Bucht vorhanden ist. Hinweise auf auffällige Beschleunigungsphasen ergeben sich in diesem Fall nicht. Für die anderen dargestellten Zeitreihen gilt ähnliches wie für die bereits diskutierten Glättungsfunktionen. Es zeigt sich gegen Ende die Tendenz zu höheren Trends, die jedoch in einer ähnlichen Größenordnung liegen, wie diejenigen, die bereits früher aufgetreten sind. Bei der zeitlichen Zuordnung muss hier die Art und Weise berücksichtigt werden, wie die Ergebnisse dargestellt sind (jeweils für das letzte Jahr des verwendeten Zeitfensters).

Abschließend sind in Abb. 28 die Ergebnisse dargestellt, welche sich bei der Glättung (mittels SSA und MCAP) der synthetischen Zeitreihen für die Bereiche Niedersachsen und Schleswig-Holstein ergeben haben. Dass eine solch separate Betrachtung sinnvoll ist, haben bereits die Ergebnisse gezeigt, die im vorangegangenen Kapitel vorgestellt wurden. Zum einen liegen für den Bereich der östlichen Deutschen Bucht (Schleswig-Holstein) deutlich kürzere Zeitreihen vor, als es für zumindest einige Pegel entlang der südlichen Deutschen Bucht (Niedersachsen) der Fall ist. Zum anderen konnten auch Unterschiede in den RMSL-Trends festgestellt werden, welche darauf hindeuten, dass die Zeitreihen für den Bereich Schleswig-Holstein stärker durch vertikale Landbewegungen beeinflusst sind.

Zunächst zeigt sich auch in Abb. 28 die stark unterschiedliche Datenverfügbarkeit. Während die Rekonstruktion für Niedersachsen (aufgrund des Pegels Cuxhaven) über den gesamten Zeitraum seit 1843 analysiert werden kann, beginnt die Rekonstruktion für den Bereich Schleswig-Holstein erst im Jahr 1936. Hier wird deutlich, dass ohne Berücksichtigung der Daten von vor 1936 völlig andere Rückschlüsse zu ziehen wären. Betrachtet man nur die Ergebnisse in der unteren Grafik, so muss die Beschleunigung im RMSL-Anstieg, die über die letzten Jahrzehnte hinweg stattgefunden hat, sehr wohl als auffällig und ungewöhnlich bezeichnet werden. An die Stelle eines Verzichts auf die Einbeziehung der historischen Daten aufgrund vorhandener Unsicherheiten (z.B. wegen unzureichender Höheninformationen) sollten demnach weitere Untersuchungen treten, die eine Verbesserung bzw. Verifikation der Daten zulassen (z.B. DANGENDORF 2010 und die darin aufgeführte Literatur). Gleichzeitig zeigen auch die Ergebnisse in Abb. 28, dass sich stärkere RMSL-Trends entlang der in Nord-Süd-Richtung verlaufenden deutschen Nordseeküste ergeben. Während die zuletzt beobachteten Anstiegsraten für den Bereich Niedersachsen im Bereich von 4 bis 6 mm/a liegen, wurden für den Bereich Schleswig-Holstein Anstiegsraten im Bereich von 7 bis 8 mm/a ermittelt. Es sei nochmals darauf hingewiesen, dass es sich um jährliche Anstiegsraten handelt, die zwar aus einer Glättungsfunktion abgeleitet wurden, aber dennoch nicht mit einem Langzeittrend zu vergleichen oder gar für Extrapolationen über längere Zeiträume hinweg nutzbar sind.

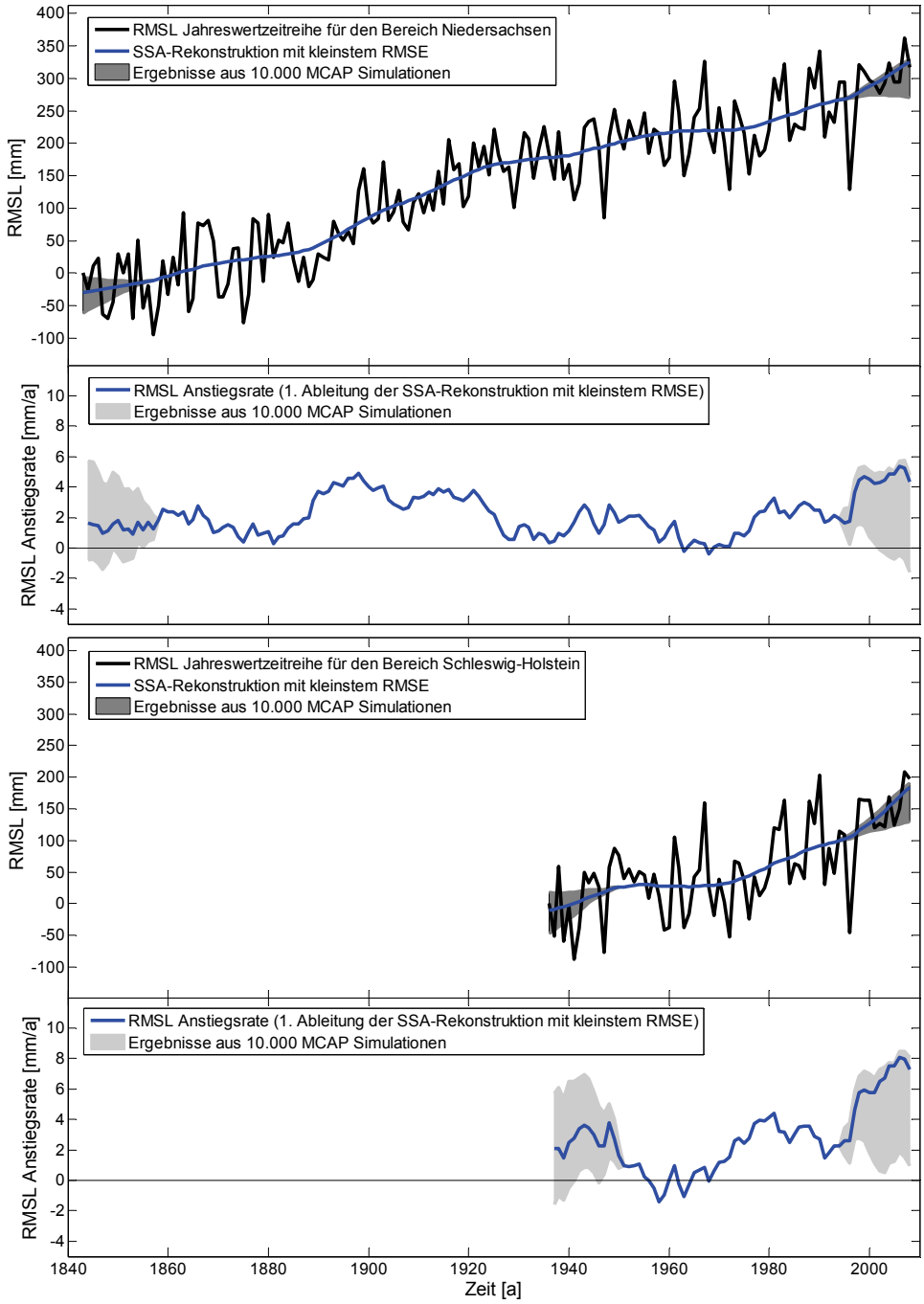


Abb. 28: Ergebnisse der Glättung mittels SSA und MCAP der synthetischen Zeitreihen für die Bereiche Niedersachsen (oben) und Schleswig Holstein (unten)

4.4 Vertikale Landbewegungen im Bereich der Deutschen Bucht

Nachdem in den vorangegangenen Kapiteln die Ergebnisse der RMSL-Analysen im Detail vorgestellt und diskutiert wurden, sollen hier die Ergebnisse der Ermittlung der Vertikalbewegungen auf Basis der RMSL-Zeitreihen dargestellt werden. Der einfache Ansatz, der den Analysen zugrunde liegt, ist in Kapitel 3.6 beschrieben.

Entsprechend dieser Herangehensweise wurden zunächst Vertikalbewegungen für die Pegel Cuxhaven, Lt. Alte Weser und Norderney ermittelt. Dazu wurden die RMSL-Trends für den Zeitraum 1901 bis 2006, der auch von WOODWORTH ET AL. (2009) berücksichtigt wurde, von den dort angegebenen 1,4 mm/a subtrahiert. Hieraus ergeben sich für die drei „Referenzpegel" Trends für die Vertikalbewegungen von -0,7 ± 0,2 mm/a (Cuxhaven), -0,5 ± 0,1 mm/a (Lt. Alte Weser) und -0,5 ± 0,2 mm/a (Norderney) (negative Vorzeichen deuten auf Landsenkung hin). Unter Berücksichtigung dieser Information können alle RMSL-Trends, die für die „Referenzpegel" und die unterschiedlichen Zeiträume in Tabelle 2 dargestellt sind, um den Einfluss der Vertikalbewegungen korrigiert werden. Aus der Mittelung der jeweils drei RMSL-Trends ergeben sich nach der Korrektur Werte von 1,4 ± 0,3 mm/a für den Zeitraum von 1937 bis 2008 und von 1,5 ± 0,3 mm/a für den Zeitraum von 1951 bis 2008. Aus dem Vergleich mit den RMSL-Trends, die sich für die anderen Pegel und die entsprechenden Zeiträume ergeben, können Rückschlüsse über die dort vorherrschenden vertikalen Landbewegungen gezogen werden. Dabei wird jeweils der längste Zeitraum genutzt, für den in Tabelle 2 ein Wert angegeben ist. Im Falle des Pegels List beispielsweise wurde ein RMSL-Trend von 2,0 ± 0,3 mm/a für den Zeitraum von 1937 bis 2008 ermittelt. Aus dem Vergleich mit dem gemittelten und um die Vertikalbewegungen korrigierten Trend für die „Referenzpegel" (1,4 ± 0,3 mm/a) errechnet sich ein Trend für die Vertikalbewegungen am Pegel List (in diesem Fall Landsenkung) von -0,6 ± 0,5 mm/a. Der angegebene Fehler ergibt sich aus der Summe des Fehlers, der für den Pegel List in Tabelle 2 angeben ist und dem mittleren Fehler, der in den ermittelten Trends der Vertikalbewegungen für die drei „Referenzpegel" enthalten ist. Analog zu List wurden Trends der Vertikalbewegungen für alle anderen hier berücksichtigten Pegelstandorte abgeleitet. Die Ergebnisse sind in Abb. 29 dargestellt und denjenigen Trends der Vertikalbewegungen gegenübergestellt, die mit Hilfe eines globalen GIA-Modells ermittelt wurden (PELTIER 2004; Daten stehen zum Download unter www.psmsl.org zur Verfügung). Für die GIA-Ergebnisse können keine Unsicherheiten angegeben werden. Aus dem Vergleich zeigt sich, dass die alleinige Berücksichtigung des GIA-Effektes für den Bereich der Deutschen Bucht nur bedingt geeignet ist. Für einige Pegel ergeben sich deutliche Unterschiede, wobei in den meisten Fällen stärkere Landsenkungsraten mit Hilfe des hier verwendeten Ansatzes ermittelt werden. Dies weist darauf hin, dass zusätzliche Effekte, wie z.B. Sedimentkompressionen, Grundwasser- oder Gasförderung, Tektonik etc., eine Rolle spielen. Mit Ausnahme der Pegel Bremerhaven und Emden wurden für alle hier berücksichtigten Pegelstandorte Landsenkungen festgestellt, mit dem stärksten Trend von -1,3 ± 0,6 mm/a für den Pegel Wyk. Insgesamt ergeben sich (wie auf Basis der vorherigen Analysen zu erwarten war) stärkere Senkungstendenzen für den Bereich Schleswig-Holstein im Vergleich zum Bereich Niedersachsen.

Bereits in der Vergangenheit wurden diverse Untersuchungen zu den vorherrschenden vertikalen Landbewegungen im deutschen Küstenbereich durchgeführt. So konnte SCHÜTTE (1908) zwar eine Relativbewegung zwischen Land und Wasserspiegel im Bereich der Deutschen Bucht feststellen, schreibt diese jedoch alleinig den Küstensenkungserscheinungen zu. FÜHRBÖTER UND JENSEN (1985) gehen bei ihren Analysen der mittleren Tidewasserstände in der Deutschen Bucht davon aus, dass Vertikalbewegungen eine untergeordnete Rolle bei den Größenordnungen der ermittelten Trends spielen. Diese Annahme bestätigen die Untersuchungen von BEHRE (2003). Er gibt einen Trend von -0,1 mm/a für die deutsche Nordseeküste an, welchen er auf Basis der Auswertung der verschiedenen Nordseeküstennivellements (NKN) abgeleitet hat und auf tektonische Einflüsse zurückführt.

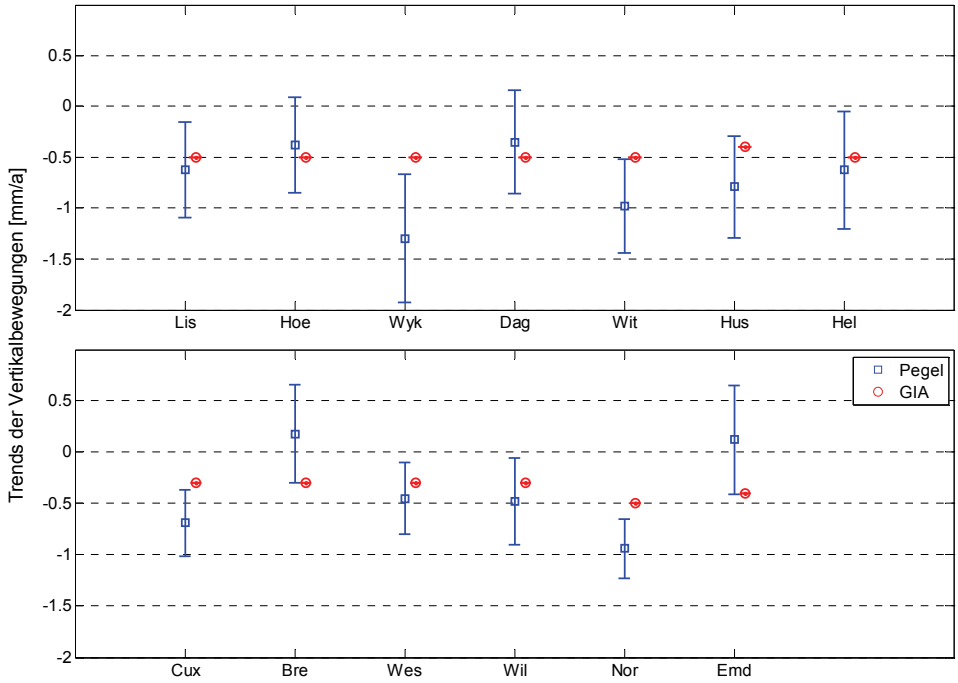


Abb. 29: Landsenkungen, die für die Standorte der Untersuchungspegel auf Basis der RMSL-Zeitreihen ermittelt wurden und solche, die unter Verwendung eines globalen GIA-Modells ergeben haben.

AUGATH (1993) ermittelt für den Bereich Langeoog einen deutlich stärkeren Landsenkungstrend in der Größenordnung -0,5 bis -0,7 mm/a (siehe auch BUNGENSTOCK UND SCHÄFER 2009). Ähnliche Werte von -0,57 ± 0,11 und -0,68 ± 0,08 mm/a geben SHENNAN UND WOODWORTH (1992) für die Bereiche Eider-Ästuar bzw. Cuxhaven an. Noch einmal deutlich höhere Landsenkungsraten von bis zu -2,5 mm/a ermitteln WANNINGER ET AL. (2009) auf Basis der Auswertungen von Nivellements und GPS-Daten und unter Berücksichtigung radialer Basisfunktionen.

Der Wert, der mit dem hier genutzten Ansatz für Cuxhaven bestimmt wurde, entspricht mit -0,7 mm/a dem von SHENNAN UND WOODWORTH (1992) angegebenen Trend von -0,68 mm/a. Der Pegel, welcher der Eidermündung am nächsten liegt und hier berücksichtigt wurde, ist der Pegel Husum. Hier wurde im Vergleich zu dem von SHENNAN UND WOODWORTH (1992) für das Eider-Ästuar angegeben Wert eine etwas stärkere Landsenkungsrate von -0,8 ± 0,5 mm/a ermittelt. Der direkt im Eider-Ästuar angeordnete Pegel Tönning konnte, wie in Kapitel 2.1 beschrieben, aufgrund von Sperrwerksbeeinflussungen nicht genutzt werden. Der Mittelwert für die gesamte Deutsche Bucht ergibt sich nach den Ergebnissen aus Abbildung 19 zu -0,6 ± 0,5 mm/a (Mittelwert für Schleswig-Holstein ist -0,7 mm/a, für Niedersachsen -0,4 mm/a). Insgesamt entsprechen die hier vorgestellten Ergebnisse denjenigen von SHENNAN UND WOODWORTH (1992) und AUGATH (1993).

Im Folgenden soll das überraschende Ergebnis für den Pegel Emden kurz diskutiert werden. Die hier durchgeführten Analysen deuten in diesem Fall auf eine leichte Landhebung hin. Aufgrund der Gasentnahmen im Bereich Groningen (siehe BEHRE 2003 und WANNINGER ET AL. 2009) konnte erwartet werden, dass die RMSL-Zeitreihe für Emden einen vergleichsweise starken positiven Trend und der Pegel selbst somit eine deutliche Landsenkungstendenz aufweist. Die Tatsache, dass hier das Gegenteil der Fall ist, lässt verschiedene Vermutungen zu. Zum einen kann die Frage aufgeworfen werden, ob sich die durch die Gasentnahmen hervorgerufenen Landsenkungen überhaupt bis zum Pegelstandort

in Emden erstrecken und ob hier ggf. lokale Effekte dieser entgegenwirken. Gleichzeitig können Zweifel an dem hier genutzten Verfahren, welches auf diversen Annahmen beruht, geäußert werden. Die Tatsache jedoch, dass für alle anderen Pegel insgesamt plausible Ergebnisse erzielt wurden, die teilweise sehr gut mit Angaben aus der Literatur übereinstimmen, deutet daraufhin, dass die genutzte Methodik grundsätzlich anwendbar ist. Zum anderen besteht die Möglichkeit, dass die Daten des Pegels Emden verfälscht sind, was zunächst zu falschen RMSL-Trends und bei dem genutzten Verfahren schließlich zu falschen Landsenkungsraten führen würde. Aus Vergleichsbetrachtungen hat sich gezeigt, dass sich die MTnw am Pegel Emden über die letzten ca. 20 Jahre anders entwickelt haben, als beispielsweise an den Pegeln Helgoland und Cuxhaven. Die MThw weisen hingegen für alle drei Pegel eine nahezu identische Veränderung auf. Ob dies die alleinige Ursache für das überraschende Ergebnis bei den Vertikalbewegungen ist und ob es sich um eine anthropogen beeinflusste oder natürliche Veränderung handelt, kann nur auf Basis weiterer detaillierter Analysen geklärt werden.

Insgesamt geht aus den obigen Ausführungen deutlich hervor, dass es sich bei dem Problem der Berücksichtigung von Vertikalbewegungen bei Wasserstandsanalysen um eine komplexe Fragestellung handelt, die derzeit nur mit gewissen Unsicherheiten beantwortet werden kann. Wie bereits erwähnt wurde, lassen Auswertungen langer Zeitreihen aus CGPS-Messungen direkt an den Pegelstandorten in naher Zukunft wesentlich genauere Ergebnisse erwarten. Damit können die vorgestellten Ergebnisse, die lediglich eine erste Abschätzung darstellen, verifiziert werden. Schon die genaue Kenntnis über die stattgefundenen Vertikalbewegungen an einem einzigen Pegelstandort im Bereich der Deutschen Bucht würde eine deutlich genauere Abschätzung für alle anderen Standorte zulassen. Das hier beschriebene Verfahren könnte in diesem Fall wiederholt werden, wobei auf die Annahme verzichtet werden könnte, dass die langfristigen MSL-Änderungen im Bereich Großbritanniens mit denen im Bereich der Deutschen Bucht vergleichbar sind. Stattdessen würde dem Ansatz die belastbarere Annahme zugrunde liegen, dass die „absoluten“ langfristigen MSL-Änderungen in dem vergleichsweise kleinen Untersuchungsgebiet der Deutschen Bucht als räumlich konstant anzunehmen sind.

4.5 Globale und regionale Meeresspiegeländerungen und Szenarien für die zukünftige Entwicklung

In den vorangegangenen Kapiteln wurden in erster Linie die Ergebnisse aus Untersuchungen der RMSL-Zeitreihen für die Deutsche Bucht vorgestellt und diskutiert. Vereinzelt wurden Vergleiche zu Ergebnissen anderer Studien in anderen Untersuchungsgebieten hergestellt. Dabei konnten teilweise recht gute, teilweise auch sehr schlechte Übereinstimmungen beobachtet werden. Im Hinblick auf die Frage zur zukünftigen Entwicklung des MSL, gestaltet sich der Vergleich zwischen den Ergebnissen für die Deutsche Bucht mit Ergebnissen aus globalen Studien zunächst am interessantesten. Dies ist darin begründet, dass die vom IPCC veröffentlichten Meeresspiegelszenarien (MEEHL ET AL. 2007) derzeit häufig die einzige Grundlage für zukünftige Planungsstrategien darstellen. Detaillierte Recherchen zu den in der Literatur verfügbaren globalen und regionalen Szenarien finden vereinzelt oder in begrenztem Umfang statt. Auf Basis einer solchen Literaturstudie leiten GÖNNERT ET AL. (2009) beispielsweise ein Meeresspiegelszenario für das Jahr 2100 und die Metropolregion Hamburg von + 40 bis + 80 cm ab.

Mit der nun als Ergebnis des AMSeL-Projektes verfügbaren und qualitativ hochwertigen RMSL-Rekonstruktion für den Bereich der Deutschen Bucht, können weitergehende Vergleiche mit globalen Rekonstruktionen oder Rekonstruktionen aus anderen regionalen Studien erfolgen. Hieraus können Rückschlüsse darüber gezogen werden, ob sich beispielsweise der globale MSL in den vergangenen ca. 100 Jahren ähnlich verhalten hat wie der MSL im Bereich der Deutschen Bucht. Für solche Vergleichszwecke wird hier neben der Rekonstruktion für die Deutsche Bucht zum einen eine globale MSL-Rekonstruktion und zum anderen eine Nord-Ost-Atlantik Rekonstruktion berücksichtigt (JEVREJEVA ET AL. 2006) (globale Rekonstruktion zum Download verfügbar unter www.psmsl.org; Nord-Ost-Atlantik Rekonstruktion zur Verfügung gestellt von Svetlana Jevrejeva). Beide Rekonstruktionen basieren ausschließlich auf Pegeldaten und es gilt anzumerken, dass die von JEVREJEVA ET AL. (2006) genutzten Daten zunächst um den GIA-Effekt (PELTIER 2001) korrigiert wurden. Um einen belastbaren Vergleich anstellen zu können, wurde derselbe Arbeitsschritt für die Einzelzeitreihen der Untersuchungspegel in der Deutschen Bucht durchgeführt und darauf basierend eine um den GIA-Effekt korrigierte synthetische Zeitreihe generiert. Alle drei MSL-Rekonstruktionen sind in Abb. 30 für den Zeitraum 1843 bis 2001 dargestellt. Dabei handelt es sich um den Zeitraum, für den alle drei Rekonstruktionen Daten bereitstellen. Anhand der Abbildung ist zunächst der Glättungseffekt deutlich erkennbar, welcher sich einstellt, wenn eine synthetische Zeitreihe auf Basis vieler Pegel aus unterschiedlichen Gebieten erzeugt wird. In solch einem Fall ist i.d.R. kein signifikanter Zusammenhang zwischen den einzelnen Zeitreihen gegeben, wie es beispielsweise im Bereich der Deutschen Bucht der Fall ist. Es kommt zu einer deutlichen Reduzierung der Varianz in der synthetischen Zeitreihe im Vergleich zu den Einzelzeitreihen. Dementsprechend zeigt die Rekonstruktion für die Deutsche Bucht die größte Varianz auf, gefolgt von der Rekonstruktion für den Nord-Ost-Atlantik und der globalen Rekonstruktion. Bei den beiden letzteren ist lediglich zu Beginn der Zeitreihen eine stärkere Varianz erkennbar, was darauf hindeutet, dass für diesen Zeitraum nur Daten von wenigen Pegeln nutzbar waren und der Glättungseffekt damit geringer war (vergleichbar mit dem Pegel Cuxhaven für die Deutsche Bucht). Betrachtet man den Gesamtanstieg, so zeigen die Rekonstruktionen für den Nord-Ost-Atlantik und die Deutsche Bucht ein ähnliches Verhalten, mit einem Gesamtanstieg über den Zeitraum von 1843 bis 2001 von ca. 30 cm. Die globale Rekonstruktion weist einen etwas geringeren Gesamtanstieg von ca. 25 cm über den betrachteten Zeitraum auf. Dabei ist erneut zu berücksichtigen, dass die Vertikalbewegungen lediglich in Form des GIA-Effektes berücksichtigt sind. Dies mag im globalen Mittel eine gute Abschätzung darstellen, was für die Bereiche Deutsche Bucht bzw. Nord-Ost-Atlantik aber nicht der Fall sein muss. Die Ergebnisse aus Kapitel 4.4 deuten zumindest für den Bereich Deutsche Bucht daraufhin, dass die alleinige Berücksichtigung des GIA-Effektes eine Unterschätzung der tatsächlichen Vertikalbewegungen darstellt.

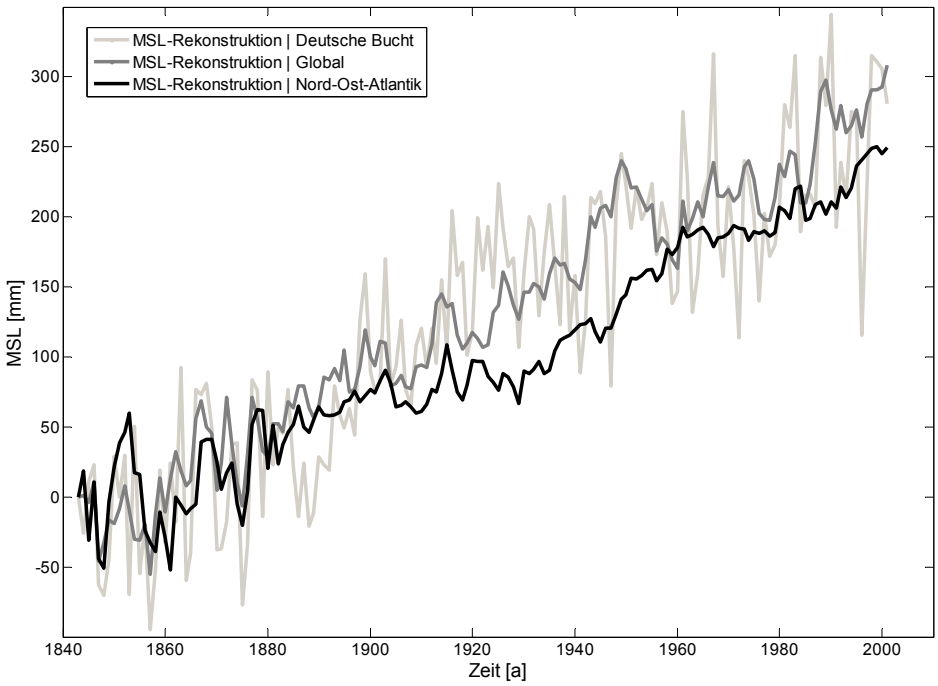


Abb. 30: Verschiedene MSL-Rekonstruktionen: Deutsche Bucht, Nord-Ost-Atlantik, Global.

Im nächsten Schritt sollen einige Analyseergebnisse, die auf Basis der MSL-Rekonstruktionen aus Abb. 30 erzielt wurden, vorgestellt und diskutiert werden. Dazu zeigt Abb. 31 (oben) zunächst die MSL-Anstiegsraten, die sich für die drei Zeitreihen nach der SSA-MCAP-Glättung und der Differenzierung der Glättungsfunktion mit dem kleinsten MSE gegenüber der Beobachtungen ergeben haben. Abb. 31 (mitte) zeigt die Differenzen, die sich beim Vergleich der MSL-Anstiegsraten der Zeitreihenpaare Deutsche Bucht – Global und Deutsche Bucht – Nord-Ost-Atlantik ergeben. Aus den Abbildungen lassen sich grundsätzlich unterschiedliche Muster in den MSL-Anstiegsraten der drei Rekonstruktionen erkennen. Im Bereich der Deutschen Bucht zeigen sich höhere Anstiegsraten für den Zeitraum um 1900 und für die letzten Jahre, wohingegen die beiden anderen Rekonstruktionen höhere Werte für den Zeitraum ca. 1860 bis 1880 und 1920 bis 1960 (hier besonders die globale Rekonstruktion) aufweisen. Insgesamt zeigt sich, dass die Nord-Ost-Atlantik Rekonstruktion eine bessere Übereinstimmung mit der Rekonstruktion für die Deutsche Bucht aufweist, als es bei der globalen Rekonstruktion der Fall ist. Besonders für den Zeitraum nach 1936, für den die Unsicherheiten in den Wasserstandszeitreihen für die Deutsche Bucht gering sind, kann ein ähnliches Verhalten festgestellt werden. Dies bestätigt sich auch mit Blick auf die Ergebnisse in Abb. 31 (unten). Hier sind 20-jährige gleitende Korrelationskoeffizienten dargestellt, die sich zwischen den MSL-Rekonstruktionen Deutsche Bucht – Nord-Ost-Atlantik und Deutsche Bucht – Global ergeben haben. Zusätzlich sind die mittels t-Test bestimmten 95%-Signifikanzgrenzen dargestellt.

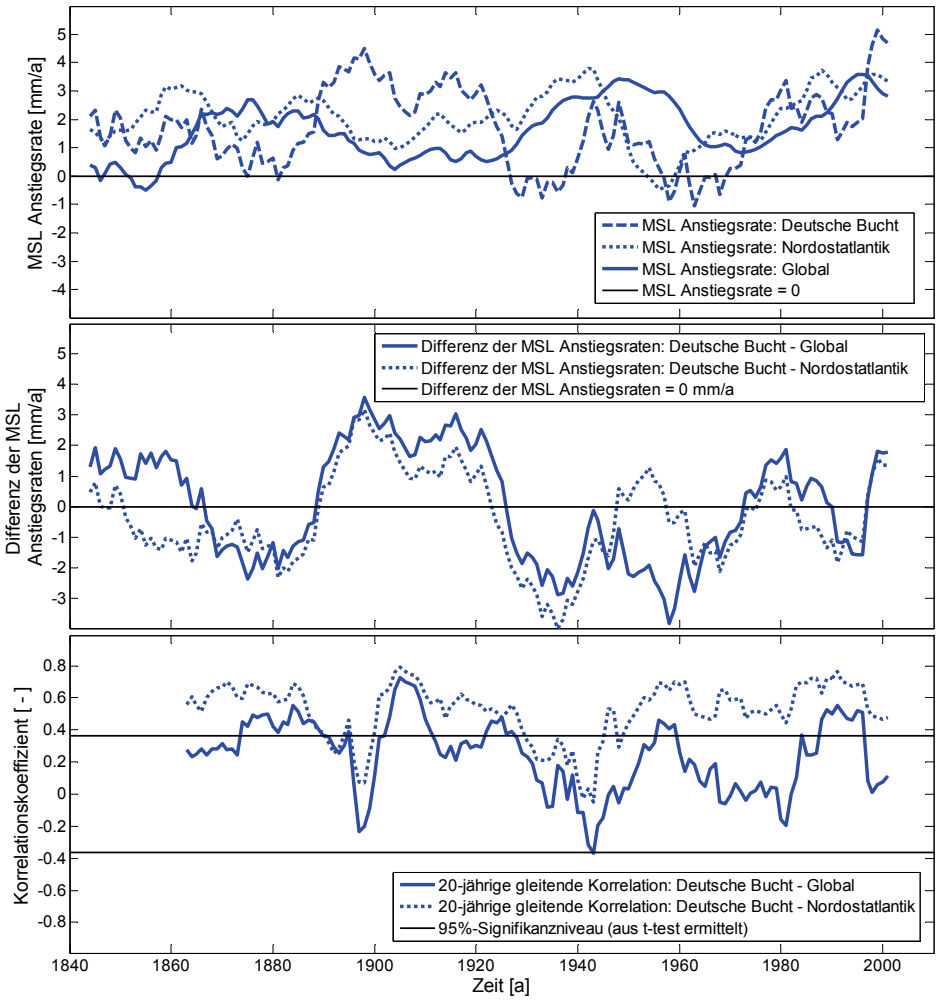


Abb. 31: Ergebnisse des Vergleichs unterschiedlicher MSL-Rekonstruktionen (Deutsche Bucht, Nord-Ost-Atlantik, Global). Oben: MSL-Anstiegsraten, Mitte: Differenzen der MSL-Anstiegsraten gebildet aus den Zeitreihenpaaren Deutsche Bucht - Global und Deutsche Bucht - Nord-Ost-Atlantik, Unten: 20-jährige gleitende Korrelationskoeffizienten für die Zeitreihenpaare Deutsche Bucht – Global und Deutsche Bucht – Nord-Ost-Atlantik.

Danach sind lediglich 34% aller ermittelten Korrelationskoeffizienten für die Rekonstruktionen Deutsche Bucht – Global als signifikant zu bewerten, wohingegen dies auf 83% der Korrelationskoeffizienten für die Rekonstruktionen Deutsche Bucht – Nord-Ost-Atlantik zutrifft. Für den Zeitraum ab Anfang der 1940er Jahre, für den Daten von nahezu allen Pegeln in der Deutschen Bucht verfügbar und die Unsicherheiten gering sind, ergeben sich ausschließlich signifikante 20-jährige Korrelationskoeffizienten zwischen den MSL-Rekonstruktionen für die Deutsche Bucht und den Nord-Ost-Atlantik. Mit Blick auf diese Ergebnisse kann die Frage aufgeworfen werden, in wie weit globale Meeresspiegelszenarien, wie sie beispielsweise vom IPCC veröffentlicht werden, für die Entwicklung regionaler Küstenschutzstrategien nutzbar sind. Der MSL im Bereich der Deutschen Bucht hat über weite Strecken der letzten eineinhalb Jahrhunderte ein deutlich anderes Verhalten aufgewiesen, als der globale MSL. Aus diesem Grund muss zunächst davon ausgegangen werden, dass dies auch in Zukunft der Fall sein wird. Hier wird der dringende Bedarf an belastbaren regionalen Meeresspiegelszenarien deutlich, welche einen unerlässlichen Beitrag für die Planung zukünftiger regionaler und lokaler Küstenschutzmaßnahmen darstellen.

Bevor einige Ergebnisse aus kürzlich erfolgten Studien zur Ableitung von regionalen MSL-Szenarien vorgestellt werden, gibt Abb. 32 zunächst einen Überblick über ausgewählte globale MSL-Szenarien für das 21. Jahrhundert (siehe auch NICHOLLS ET AL. 2011). Allen dargestellten MSL-Szenarien liegt die Annahme einer mittleren globalen Temperaturzunahme von >4 °C im 21. Jahrhundert zugrunde. Es zeigt sich, dass die IPCC-Szenarien (MEEHL ET AL. 2007) im Vergleich zu den später veröffentlichten Arbeiten von geringeren Anstiegsraten über das 21. Jahrhundert hinweg ausgehen, obwohl Unsicherheiten bezogen auf die Instabilität der Eisschilde im vorliegenden Fall bereits berücksichtigt sind. Während alle Szenarien die MSL-Änderungen für das 21. Jahrhundert angeben, sind teilweise keine eindeutigen Informationen über das Bezugsjahr (z.B. 1990 oder heute) verfügbar. Obwohl den Untersuchungen zumindest ähnliche Randbedingungen zugrunde liegen, zeigt die enorm große Streubreite (> 2m) an, dass nach wie vor sehr große Unsicherheiten, auch in den globalen MSL-Szenarien enthalten sind. Dabei sind regionale Besonderheiten, die einen zusätzlichen oder auch geringeren Anstieg bedeuten können, aber auch ggf. die Unsicherheiten nochmals erhöhen, noch in keiner Weise berücksichtigt.

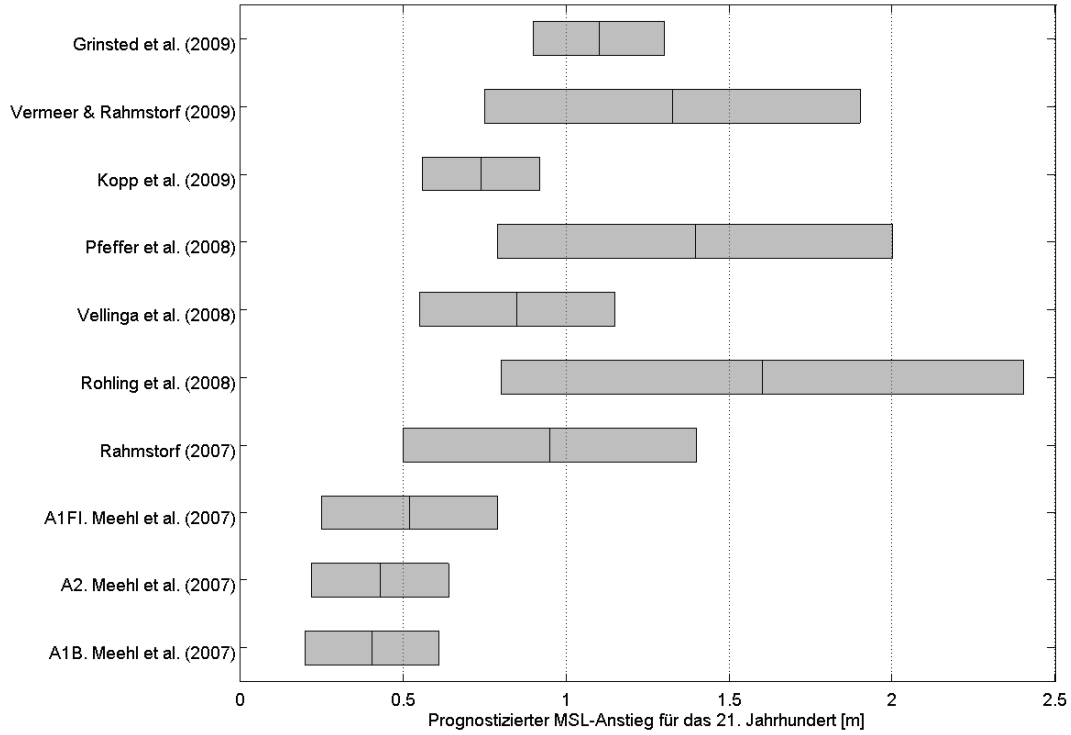


Abb. 32: Ausgewählte globale Meeresspiegelszenarien (alle gehen von einer globalen Erwärmung > 4°C aus) [nach Nicholls et al. 2011]

Zur Ermittlung regionaler Szenarien müssen die für den globalen MSL projizierten Änderungen mit den räumlichen Mustern der MSL-Änderungen relativ zum globalen Mittel kombiniert werden. Während die zu erwartenden Änderungen im globalen Mittel vorrangig durch thermische Ausdehnung hervorgerufen werden, sind die räumlichen Muster in erster Linie durch Zirkulationsvorgänge und Dichtevariationen bedingt (LOWE ET AL. 2009).

Aus diesem Grund wurden in den letzten Jahren vermehrt Anstrengungen unternommen, regionalisierte Meeresspiegelszenarien auf Basis der verfügbaren Ergebnisse aus den globalen Studien abzuleiten. Aufgrund des engen räumlichen Zusammenhangs, sollen hier die Ergebnisse zweier solcher Untersuchungen vorgestellt werden. Während KATSMAN ET

AL. (2008, 2011) Meeresspiegelszenarien für den Nord-Ost-Atlantik Bereich erarbeitet haben, geben LOWE ET AL. (2009) Szenarien für den Bereich Großbritannien an. Die Ergebnisse sind in Abb. 33 dargestellt. Dabei ist zu erkennen, dass jeweils Wertebereiche für zwei unterschiedliche Szenarien angegeben werden. In beiden Fällen wurden zunächst „wahrscheinliche Szenarien" untersucht, bevor zusätzlich so genannte „High End Szenarien" (in Abb. 33 mit H++ gekennzeichnet) abgeleitet wurden. Letztere gehen von einer sehr ungünstigen, aber auch sehr unwahrscheinlichen zukünftigen Entwicklung aus. Auf Basis solcher Untersuchungen können jedoch wichtige Erkenntnisse über den quantitativen Einfluss einzelner Faktoren gewonnen und Vulnerabilitätsstudien durchgeführt werden. Die „wahrscheinlichen" MSL-Anstiegsszenarien liegen mit 0,12 bis 0,76 m (Großbritannien) und 0,3 bis 0,8 m (Nord-Ost-Atlantik) im 21. Jahrhundert etwa in dem Bereich der IPCC-Szenarien (0,18 bis 0,79 m).

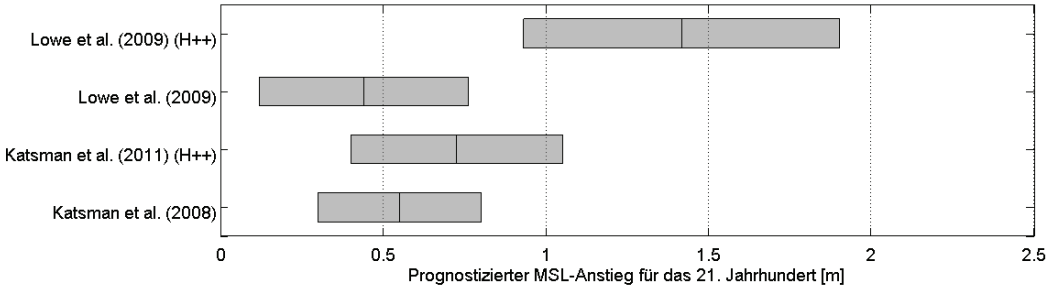


Abb. 33: Ausgewählte regionale Meeresspiegelszenarien (Großbritannien und Nord-Ost-Atlantik) für das 21. Jahrhundert

Die „High End Szenarien" führen zu wesentlich stärkeren Anstiegen von 0,93 bis 1,9 m für Großbritannien und 0,4 bis 1,05 m für den Bereich Nord-Ost-Atlantik. LOWE ET AL. (2009) stellen zusätzlich Untersuchungen zu den vorherrschenden Landsenkungen an und können somit sowohl absolute als auch relative Szenarien angeben. Demnach ergibt sich z. B. für den Bereich London ein relatives Szenario von 0,21 bis 0,68 m und für den Bereich Edinburgh von 0,17 bis 0,54 m. Somit wird der Tatsache Rechnung getragen, dass für den Küstenschutz vorrangig die relativen Änderungen von Bedeutung sind.

Alle hier vorgestellten Szenarien beziehen sich, ebenso wie die meisten in der Literatur verfügbaren, auf die Änderungen im 21. Jahrhundert und es werden häufig nur Wertebereiche für das Jahr 2100 (oder 2095) angegeben. Teilweise werden auch längerfristige Entwicklungen, wie zum Beispiel bis zu den Jahren 2200 (z.B. KATSMAN ET AL. 2011) oder 2300 (z.B. WBGU 2006), untersucht. Dabei erhöhen sich die Unsicherheiten noch einmal deutlich. Wesentlich seltener finden sich Angaben für Zeithorizonte in der näheren Zukunft (z.B. 2040 oder 2050), obwohl solche Informationen für diverse Fragestellungen eine wichtige und ggf. übergeordnete Rolle spielen. Auch im 4. Sachstandsbericht des IPCC (AR4) werden ausschließlich Wertebereiche für die unterschiedlichen Szenarien für Ende des 21. Jahrhunderts relativ zum Bezugsjahr 1990 angegeben, während im 3. Sachstandsbericht (TAR) (CHURCH ET AL. 2001) Projektionen für das gesamte 21. Jahrhundert in Form von Zeitreihen abgebildet sind. Ein Versuch, diese Zeitreihen mit den im AR4 angegeben Werten zu kombinieren und entsprechend zu skalieren wurde kürzlich von HUNTER (2010) unternommen. Die Zeitreihen, die sich dabei für das niedrigste Szenario B1 und das höchste Szenario A1FI ergeben, sind in Abb. 34 gemeinsam mit der MSL-Rekonstruktion für die Deutsche Bucht und deren Glättungsfunktion dargestellt. Dabei starten die Szenarienzeitreihen im Jahr 1990

auf der Höhe der Glättungsfunktion für die Deutsche Bucht. Demnach verläuft die Glättungsfunktion derzeit oberhalb der IPCC-Szenarien, was jedoch zum einen auf die starke Varianz und einige hohe Werte am Ende der MSL-Zeitreihe für die Deutsche Bucht und zum anderen auf die sehr geringe Streubreite der Szenarien am Anfang zurückzuführen ist. Würden die Szenarienzeitreihen direkt an dem für das Jahr 1990 beobachteten Wert anschließen, ergäbe sich ein anderes Bild, da es sich bei dem Beobachtungswert für 1990 um einen relativ hohen Wert handelt. Würde man das Jahr 1989 oder 1991 als Bezugsjahr verwenden ergäben sich in diesem Fall wieder andere Rückschlüsse. Das Verbinden der Szenarienzeitreihen mir der Glättungsfunktion aus der SSA-MCAP-Analyse erscheint demnach am sinnvollsten (siehe auch RAHMSTORF ET AL. 2007).

Unabhängig von dieser Fragestellung, ergibt sich aus den IPCC-Szenarien (MEEHL ET AL. 2007) ein Wertebereich für den Anstieg bis 2050 relativ zu 1990 von ca. 10 bis 30 cm und bezogen auf das Jahr 2010 von ca. 8 bis 22 cm.

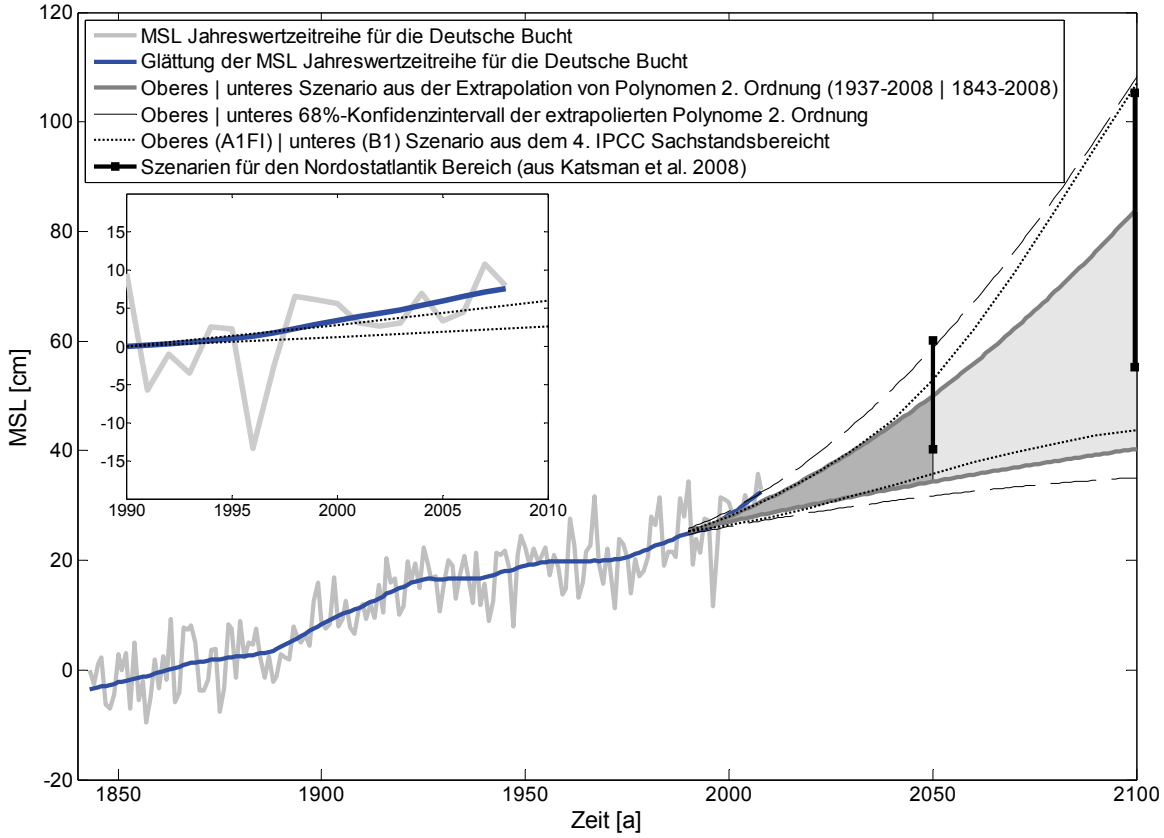


Abb. 34: MSL-Zeitreihe für die Deutsche Bucht mit Glättungsfunktion und verschiedene Meeresspiegelszenarien (IPCC, Katsman et al. 2008, Extrapolation der Beobachtung)

Ebenfalls in Abb. 34 dargestellt sind die Ergebnisse von KATSMAN ET AL. (2008) für den Nord-Ost-Atlantik-Bereich, die neben dem Jahr 2100 auch Ergebnisse für das Jahr 2050 angeben. Für 2050 ergeben sich etwas höhere Werte für den Nord-Ost-Atlantik, für 2100 sind die Ergebnisse (besonders was den oberen Grenzwert betrifft) vergleichbar mit den IPCC-Szenarien.

Neben den beschriebenen Szenarien, die im Wesentlichen auf Modellstudien beruhen, sind in Abb. 34 zusätzlich die Ergebnisse einfacher Extrapolationen der heute verfügbaren Beobachtungszeitreihe für die Deutsche Bucht abgebildet. Dazu wurden Polynome 2. Ordnung an zwei ausgewählte Zeiträume der MSL-Rekonstruktion (1843 bis 2008 und 1937 bis

2008) angepasst und inklusive der 95%-Konfidenzintervalle bis 2100 fortgeschrieben. Der Zeitraum ab 1843 wurde ausgewählt, da es sich um den längsten Zeitraum handelt für den Daten verfügbar sind und, wie in Kapitel 4.3 festgestellt wurde, eine negative Beschleunigungstendenz vorhanden ist. Beim Zeitraum 1937 bis 2008 handelt es sich um denjenigen, für den Daten von fast allen Pegeln verfügbar und die Unsicherheiten wie bereits mehrfach erwähnt gering sind. Die Extrapolationen führen ohne Berücksichtigung der Konfidenzintervalle für das Jahr 2050 zu ähnlichen Ergebnissen wie die IPCC-Szenarien und liegen etwas niedriger als die von KATSMAN ET AL. (2008) ermittelten Werte. Für 2100 liegen sowohl die IPCC-Szenarien, als auch die Ergebnisse von KATSMAN ET AL. (2008) etwas höher. Berücksichtigt man zusätzlich die 95%-Konfidenzintervalle, so schließen die Extrapolationen die anderen Szenarien (sowohl für 2050, als auch 2100) ein, ohne dabei deutlich abzuweichen. An dieser Stelle sei darauf hingewiesen, dass die Extrapolationen hier zunächst für Vergleichszwecke erfolgt und dargestellt sind. Besonders für längere Zeithorizonte (> einige Dekaden) können auf Basis solch einfacher Ansätze keine belastbaren Ergebnisse erzielt werden. Die gute Übereinstimmung mit den Szenarien und die Tatsache, dass es sich beim MSL um einen Parameter handelt, der keinen sprunghaften Änderungen (innerhalb weniger Jahre) unterworfen ist, verdeutlicht dennoch den Wert langer und qualitativ hochwertiger MSL-Zeitreihen. Diese sind demnach nicht nur unerlässlich zu Validierung regionaler Klimamodelle, sondern sollten auch beim Erarbeiten von Szenarien über wenige Dekaden hinweg berücksichtigt werden. Weitergehende Ansätze, als der hier verwendete, für die Extrapolation unter Berücksichtigung einer fast 170 Jahre langen Beobachtungszeitreihe sind zu erarbeiten.

Abschließend kann auf Basis der hier vorgestellten Ergebnisse festgehalten werden, dass sich der MSL im Bereich der Deutschen Bucht und der globale MSL über die letzten eineinhalb Jahrhunderte hinweg teilweise deutlich unterschiedlich verhalten haben. Beim Vergleich mit einer Nord-Ost-Atlantik-Rekonstruktion konnten (besonders ab ca. 1940) deutlich bessere Übereinstimmungen festgestellt werden. Aus diesem Grund sollte den heute verfügbaren und hier vorgestellten regionalen MSL-Szenarien, die im räumlichen Zusammenhang mit der Deutschen Bucht stehen, bei der Erarbeitung zukünftiger Küstenschutzstrategien eine deutlich höhere Gewichtung zuteil werden, als den aktuell verfügbaren globalen Szenarien. Forschungsbedarf zur Erarbeitung weiterer und belastbarerer regionaler MSL-Szenarien mit Fokus auf den Nordseebereich ist gegeben.

5. Ergebnisse der Untersuchungen zum Auftreten von Tideketten in der Deutschen Bucht

Im Folgenden werden die Ergebnisse im Detail vorgestellt und diskutiert, die bei der Anwendung der in Kapitel 3 beschriebenen Auswertemethoden zur Analyse von Tideketten erhalten wurden. Allgemein können Tideketten bzw. Folgen von jeweils einen bestimmten Wasserstand überschreitenden Tidescheiteln als Indikator von Sturmtätigkeit bzw. Auftreten von vorrangig Windstauereignissen, aber auch Fernwellen und weiterer die Astronomie überlagernder Effekte, aufgefasst werden. Sie geben darüber hinaus aber auch direkt Auskunft über Auftreten, Ereignislänge und Häufigkeit von ununterbrochen in Folge überschrittenen Tidescheitelniveaus. Im Falle von Tnw-Scheiteln weiterhin auch des ununterbrochen in Folge überschrittenen Wasserstands.

Diese Informationen sind für verschiedene Aspekte von Interesse. Die Abfolge von Tnw-Ketten oberhalb bestimmter Niveaus ist von unmittelbarer Bedeutung für die Entwässerungssituation von tiefliegenden Einzugsgebieten, z.B. über freien Sielzug. Bei geschöpften Einzugsgebieten geben sie Auskunft über zu erwartende Pumpkosten. Schließlich ist es auch für die Belastung der Küsten von Interesse, Informationen über Häufigkeit und Niveau von Zeiten zu erhalten, wo über mehrere Tiden ein entsprechender Wasserstand nicht unterschritten wird. Die Betrachtung der Thw-Ketten vervollständigt dieses Bild für die maximalen Scheitelhöhen.

Aus diesen Gründen werden sowohl die Tnw-Scheitel, als auch die Thw-Scheitel einer separaten Untersuchung zugeführt. Für beide sind darüber hinaus grundsätzlich sowohl die Höhenentwicklung als auch die Auftretensanzahl für unterschiedlich lange Tideketten von Interesse. Die jeweiligen Ergebnisgrafiken der untersuchten Pegel sind in Anhang 2 zusammengestellt.

Im Folgenden sind zunächst die Auswertungen bezüglich Trends (Kapitel 5.1) und Höhenentwicklung der maximalen Basishöhen (Kapitel 5.2) dargestellt. Kapitel 5.3 beinhaltet die Ergebnisse zur Analyse von Ereignisanzahl und Auftretensverteilung von n hintereinander auftretenden Tnw- und Thw-Folgen. Mit zunehmender Höhe des Bezugshorizonts treten weniger und zunehmend kürzere Tnw- und Thw-Folgen auf. Die maximale Folgenzahl für die höchsten in der Auswertung untersuchten Bezugshorizonte betrug n = 7. Aus diesem Grund wurde für die gesamten Auswertungen für bis zu 8 in Folge auftretenden Tidescheiteln durchgeführt.

5.1 Ergebnisse der Trenduntersuchung der maximalen Basishöhe der Tnw- und Thw-Ketten

Zunächst sollen die Ergebnisse der Trendentwicklung der maximalen Basishöhe der Tnw- und Thw-Ketten näher betrachtet werden. In Tab. 3 sind die ermittelten linearen Trends derjenigen Zeitreihen aufgeführt, welche von 1 bis 8 Tiden in Folge hintereinander einen bestimmten Wasserstand (Basishöhe) erreicht oder überschritten haben. Für jede Folgenzahl wird die maximal erreichte Basishöhe für jedes Jahr bestimmt und so je Folgenzahl, Pegel, Tnw- und Thw-Auswertung eine Zeitreihe ermittelt (siehe Kapitel 3.7, Abb. 20). Die entsprechenden Zeitreihen und ihre Trends geben Auskunft, ob und wie sich die Trends des gleichzeitig von Folgen von 2 und mehr hintereinander auftretenden Tnw- oder Thw-Scheiteln erreichten oder überschrittenen Wasserstands von dem Trendverlauf der Einzeltidescheitel unterscheiden. Diese Information kann z.B. für die Entwässerungssicherheit von sielentwässerten Einzugsgebieten von Relevanz sein, deren Speicherkapazität für eine unterschiedliche Anzahl von Sperrtiden ausreicht.

In Übereinstimmung mit der MSL-Auswertung wurden die beiden Zeiträume 1937-2008 und 1954-2008 für die Auswertung herangezogen. Der zweite, kurze Zeitraum musste allerdings auf den spätesten gemeinsam verfügbaren Startzeitpunkt der drei kürzeren Scheitelzeitreihen Emden, Wyk und Helgoland gesetzt werden, da anders als bei der RMSL-Trendanalyse jeweils vollständige Jahreszeitreihen benötigt werden (vgl. Fußnote in Tab. 1). Daher beginnt der zweite Vergleichszeitraum nicht 1951, sondern 1954.

Tab. 3: Ergebnisse der linearen Trendanalysen [mm/a] für die maximal erreichte Basishöhe von n hintereinander auftretenden Tnw und Thw für die Deutsche Bucht

Pegel / Folgenzahl		1937-2008								1954-2008							
		1	2	3	4	5	6	7	8	1	2	3	4	5	6	7	8
List	Tnw	4,5	4,5	5,9	3,9	2,5	2,0	1,9	2,9	2,7	0,8	6,0	3,6	3,2	2,1	1,6	2,3
	Thw	8,0	7,0	5,7	4,6	4,3	3,8	3,8	4,0	5,1	3,9	2,3	4,2	4,1	2,7	3,5	3,6
Hörnum	Tnw	4,6	3,9	5,1	3,4	1,7	1,1	1,6	2,3	2,8	-0,1	5,2	3,4	2,8	1,5	1,4	2,1
	Thw	8,0	7,2	5,8	5,3	5,0	5,5	4,8	5,0	4,4	3,9	1,8	4,5	3,9	3,9	3,6	3,9
Wyk	Tnw	-	-	-	-	-	-	-	-	4,3	3,8	2,0	4,8	5,0	4,1	3,4	4,0
	Thw	-	-	-	-	-	-	-	-	3,2	-0,4	4,1	3,6	2,9	1,8	1,1	2,0
Dagebüll	Tnw	7,5	5,4	4,9	3,1	1,4	0,7	1,0	1,3	4,2	0,4	3,5	2,6	2,7	1,8	0,6	1,7
	Thw	8,8	8,9	7,5	6,3	6,3	6,3	5,8	5,7	4,6	4,2	3,3	5,4	5,2	4,3	4,2	4,8
Wittdün	Tnw	4,6	4,0	4,9	4,0	1,8	1,2	1,8	2,1	1,5	-0,6	5,3	3,6	2,9	1,8	1,3	2,1
	Thw	8,1	7,1	5,9	5,5	5,0	5,6	5,0	4,8	4,7	3,5	2,1	4,2	4,0	3,9	3,3	3,7
Husum	Tnw	6,7	4,9	6,8	3,9	3,0	1,9	2,5	1,6	3,1	-2,0	3,6	2,0	2,3	-0,1	-0,2	-0,9
	Thw	8,5	8,5	5,4	5,7	5,1	5,1	4,3	4,2	4,3	2,4	0,6	3,9	4,1	3,0	2,4	3,9
Helgoland	Tnw	-	-	-	-	-	-	-	-	0,8	0,3	4,4	3,6	4,2	2,8	1,7	1,5
	Thw	-	-	-	-	-	-	-	-	5,7	3,0	1,7	2,4	2,4	2,4	1,5	2,7
Cuxhaven	Tnw	5,9	4,0	4,8	4,0	2,9	2,6	2,7	1,6	1,0	-0,6	5,1	4,2	4,4	2,7	2,5	0,8
	Thw	8,8	6,2	3,7	3,6	3,1	3,8	3,2	4,1	5,4	3,2	0,3	2,3	2,3	2,9	2,0	4,2
Bremerhaven	Tnw	5,0	2,1	2,1	2,3	0,4	1,1	0,6	-0,7	1,0	-1,7	2,8	3,2	1,7	1,4	0,2	-1,8
	Thw	8,4	5,9	4,3	3,9	3,7	4,8	4,4	4,7	5,8	3,0	2,2	2,9	3,1	4,5	4,9	5,2
LT Alte Weser	Tnw	3,3	3,1	3,5	3,4	3,1	2,7	2,2	2,0	1,4	1,2	5,4	4,5	4,2	3,0	1,9	1,1
	Thw	7,6	4,7	2,9	2,7	2,4	3,1	2,5	3,0	4,9	2,3	1,1	1,4	1,7	2,4	1,7	3,4
Wilhelmshaven	Tnw	5,2	3,5	3,4	3,6	2,8	3,0	2,1	1,7	2,6	0,6	4,2	4,8	4,5	3,4	2,2	0,6
	Thw	8,6	6,1	3,8	4,0	3,9	5,1	4,4	5,0	6,5	3,1	3,6	2,6	2,8	4,9	4,5	5,1
Norderney	Tnw	4,9	5,5	4,0	4,3	2,6	3,3	2,5	2,0	3,0	3,4	4,4	5,0	4,5	3,8	2,6	1,7
	Thw	7,9	4,4	4,3	3,5	3,0	3,7	2,5	3,2	6,2	2,1	3,4	3,2	3,1	4,2	2,1	4,0
Emden	Tnw	-	-	-	-	-	-	-	-	2,1	2,6	3,0	3,6	2,1	0,3	-0,3	-1,7
	Thw	-	-	-	-	-	-	-	-	8,9	4,3	5,0	4,1	4,6	5,3	3,8	3,3
synth. Zeitreihe (Schleswig-Holstein)	Tnw	5,6	4,5	5,5	3,7	2,1	1,4	1,8	2,0	3,1	0,4	4,3	3,3	3,2	1,9	1,4	1,9
	Thw	8,3	7,7	6,1	5,5	5,1	5,3	4,7	4,7	4,4	2,9	2,4	4,3	4,0	3,3	3,0	3,7
synth. Zeitreihe (Niedersachsen)	Tnw	4,9	3,6	3,6	3,5	2,4	2,5	2,0	1,3	1,9	0,9	4,2	4,2	3,6	2,4	1,5	0,1
	Thw	8,3	5,5	3,8	3,5	3,2	4,1	3,4	4,0	6,3	3,0	2,6	2,8	2,9	4,0	3,2	4,2
synth. Zeitreihe (Deutsche Bucht)	Tnw	5,2	4,1	4,5	3,6	2,2	2,0	1,9	1,7	2,3	0,6	4,2	3,8	3,4	2,2	1,5	1,0
	Thw	8,3	6,6	4,9	4,5	4,2	4,7	4,1	4,4	5,4	3,0	2,4	3,4	3,4	3,6	3,0	3,8

Die Trendverläufe sind im Einzelnen und im Vergleich zu den jeweiligen Trends der MTnw/MThw, bzw. HTnw/HThw im Anhang 2 beschrieben. Bis auf wenige Ausnahmen stimmen dabei die generellen Ausprägungen der Trendverläufe über zunehmende, hintereinander die jeweilige Basishöhe mindestens erreichende, Tnw- und Thw-Folgenzahlen überein:

Tendenziell nimmt der Trend der maximal erreichten Basishöhe von n aufeinanderfolgenden Tnw mit zunehmender Folgenzahl ab (Abb. 35).

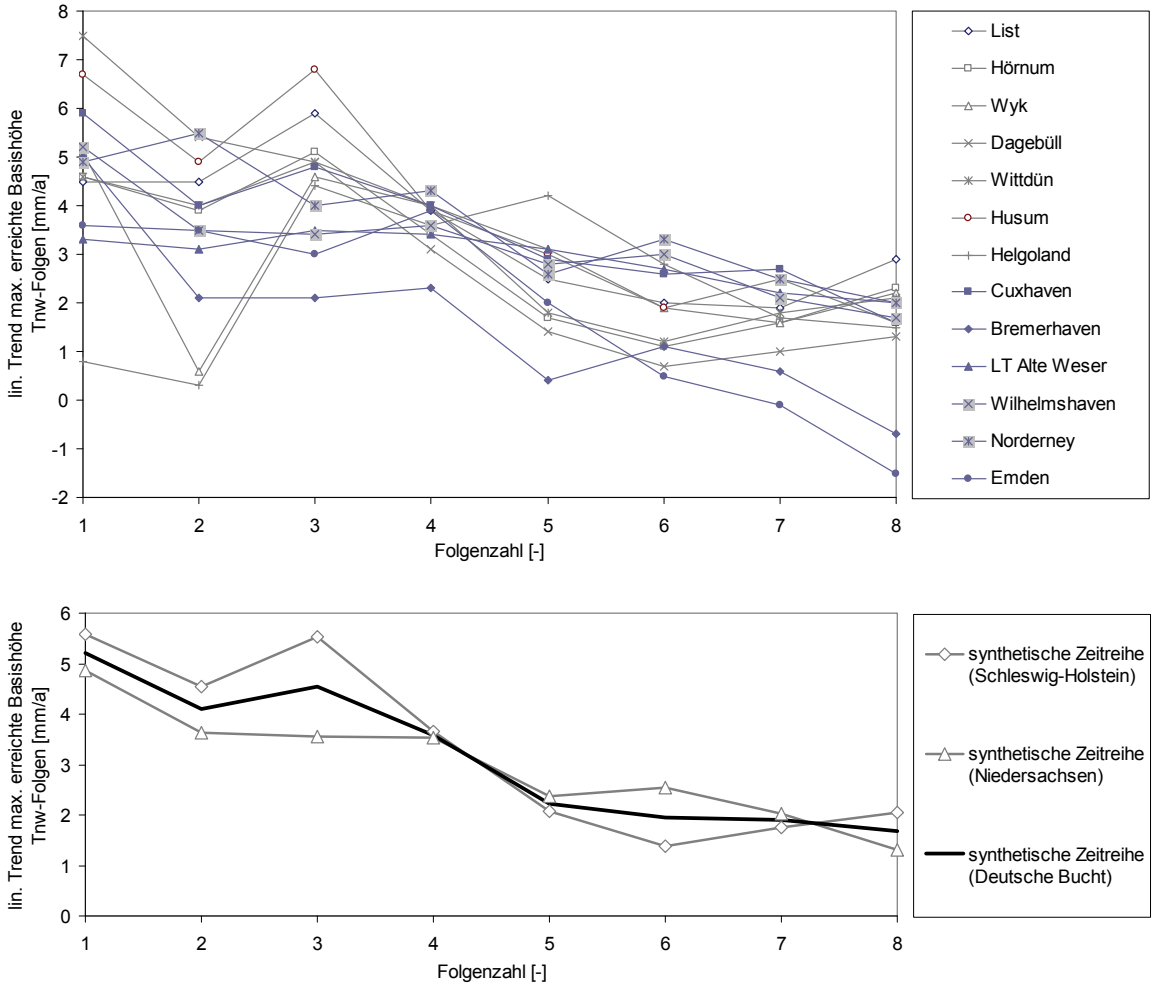


Abb. 35: Lineare Trends für die maximal erreichte Basishöhe durch 1-8 aufeinanderfolgende Thw. Oben: für die einzelnen Pegel. Unten: zusammengeführt in Form synthetischer Reihen für Schleswig-Holstein, Niedersachsen und die Deutsche Bucht.

Das Maximum wird meist für die Folgenzahl 1, welche gleichzeitig unabhängige Einzeltiden und damit die Reihe der HTnw darstellt, erreicht; oft aber auch bei 3 aufeinanderfolgenden Tnw. Im Überwiegenden liegen dabei alle Trends über dem Trend des jeweiligen MTnw des Pegels. Der niedrigste Trend wird oft, aber nicht immer, für 8 aufeinanderfolgende Tnw erreicht. Die 1-σ-Standardfehler liegen für alle Pegel und für Tnw- und Thw-Folgen der Folgenzahl 8 im Bereich von ± 0,7 bis ± 1,2 mm/a zunehmend bis zur Folgenzahl 2 im Bereich von ± 1,8 bis ± 2,3 mm/a. Für die Folgenzahl 1, d.h. Einzeltiden liegen die 1-σ-Standardfehler im Bereich von ± 2,3 bis ± 3,2 mm/a.

Die Trends für die Tnw-Folgen Basishöhen liegen dabei im Maximum zwischen 3,5 mm/a (LT Alte Weser, Folgenzahl 3) und 7,5 mm/a (Dagebüll, Folgenzahl 1) und im Minimum zwischen -1,5 mm/a (Emden, Folgenzahl 8) und 2 mm/a (LT Alte Weser und Norderney, beide Folgenzahl 8). Signifikante Unterschiede zum generellen Verhalten der Tnw-Folgen Basishöhen-Trends zeigen Bremerhaven und Emden mit negativen Trendwerten für Folgenzahl 8 bzw. 7 und 8 und Helgoland. Dort zeigt die Trendentwicklung der maximalen Basishöhe der Tnw-Ketten einen zunächst niedrigen Verlauf für Folgenzahlen 1 und 2, dann

einen hohen Verlauf für mittlere Folgenzahlen von 3 bis 5 aufeinanderfolgende Tiden und schließlich wieder ein mit weiter zunehmender Folgenzahl abnehmenden Verlauf.

Der obere Teil der Abb. 35 zeigt dabei die übereinander gezeichneten Trendverläufe der Einzelpegel, um einen Eindruck der Streuung zwischen den Pegeln und des Gesamtverlaufs zu geben. Der untere Kasten zeigt weiterhin den Trendverlauf der in synthetischen Pegeln zusammengefassten Einzelzeitreihen der maximal erreichten Basishöhen der Tnw, jeweils für die schleswig-holsteinischen Pegel, für die niedersächsischen Pegel und für die gesamte Deutsche Bucht. Helgoland ist dabei nur in der synthetischen Reihe für die Deutsche Bucht enthalten.

In gleicher Art sind die Trendverläufe der Thw-Folgen in Abb. 36 dargestellt. Auch die Thw zeigen weitestgehend ähnliche Trendverläufe. Tendenziell nimmt der Trend der maximal erreichten Basishöhe von n aufeinanderfolgenden Thw ebenfalls wie für die Tnw mit zunehmender Folgenzahl ab. Der Abfall ist dabei meist für die ersten 2 bis 4 Folgenzahlen gleichmäßig, um für weiter zunehmende Kettenlängen nur noch wenig abzufallen, auf relativ konstantem Niveau zu verharren oder leicht wieder zu steigen.

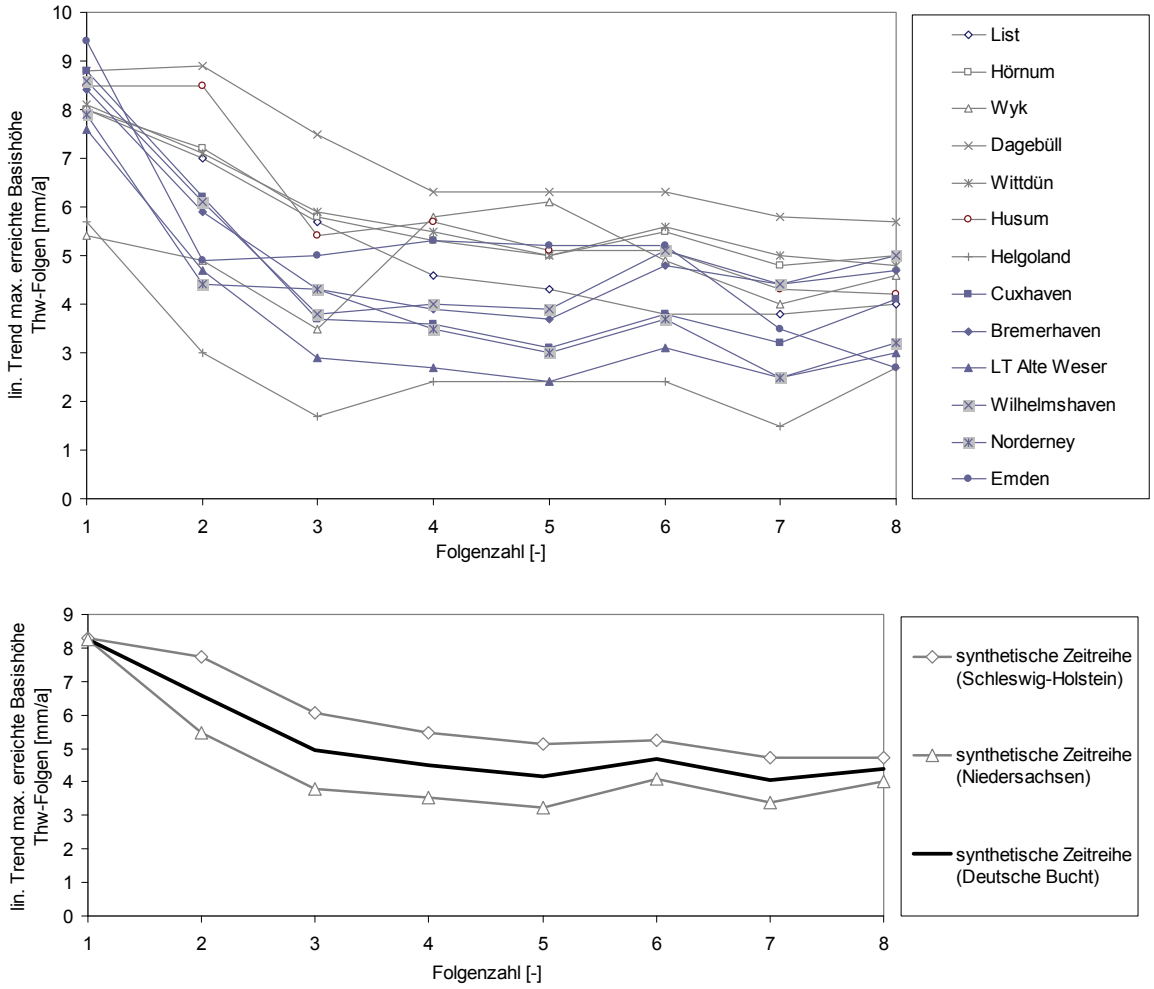


Abb. 36: Lineare Trends für die maximal erreichte Basishöhe durch 1-8 aufeinanderfolgende Thw. Oben: für die einzelnen Pegel. Unten: zusammengeführt in Form synthetischer Reihen für Schleswig-Holstein, Niedersachsen und die Deutsche Bucht.

Das Maximum wird meist für die Folgenzahl 1, welche gleichzeitig unabhängige Einzeltiden und damit die Reihe der HThw darstellt, erreicht. Nur für zwei Pegel sind es zwei

aufeinanderfolgende Thw, die den maximalen Trend aufweisen oder gleich dem Trend der HThw verlaufen. Dies ist der Pegel Dagebüll, wo der Trend für die Folgenzahl 2 mit 8,9 mm/a nur leicht und innerhalb des 1-σ-Standardfehlers über dem Trend der HThw liegt und der Pegel Husum, der sowohl für Folgenzahl 1 und 2 den Trend von 8,5 mm/a aufweist. Auch für die Thw-Ketten liegen die Trends meist über dem Trend des MThw; Ausnahme ist hier der Pegel Helgoland. Dort ist es umgekehrt: bis auf die Folgenzahl 1 und 2 verlaufen die Trends aller übrigen Folgenzahlen unter dem Trend des MThw des Pegels Helgoland. Für alle Pegel werden die niedrigsten Trends meist für 7 oder 8 aufeinanderfolgende Thw erreicht.

Die Trends liegen dabei im Maximum zwischen 7,6 mm/a (LT Alte Weser, Folgenzahl 1) und 9,4 mm/a (Emden, Folgenzahl 1) und im Minimum zwischen 1,5 mm/a (Helgoland, Folgenzahl 7) und 5,7 mm/a (Dagebüll, Folgenzahl 8).

5.2 Mittelwerte der maximal erreichten Basishöhe von n hintereinander auftretenden Tnw- und Thw-Folgen

Wie hoch die jeweiligen Mittelwerte der den Trendbestimmungen zugrunde liegenden Zeitreihen der maximal erreichten Basishöhe von n hintereinander auftretenden Tnw und Thw über den Auswertezeitraum sind, wird in Tab. 4, Abb. 37 und Abb. 38 dargestellt. Angelehnt an die übliche Konvention zur Benennung von Tideparametern bzw. Hauptwerten werden diese Mittelwerte in ihrer Gesamtheit als MHnTnw und MHnThw bezeichnet. Das $MHThw_{1937\text{-}2008}$ ist also wie bekannt das Mittel der HThw des entsprechenden Zeitraums und in diesem Sinne sind die $MHnThw_{1937\text{-}2008}$ die Mittel der maximal erreichten Basishöhe n hintereinander auftretender Thw des entsprechenden Zeitraums. Aus den Zusammenstellungen kann daher entnommen werden, welche Scheitelwerte (für die Thw) bzw. welches Wasserstandsniveau (für die Tnw) in Bezug auf den jeweiligen Pegelnullpunkt im Mittel einmal pro Jahr für 1 bis 8 Tiden in Folge nicht unterschritten wird.

Insbesondere in der grafischen Darstellung (Abb. 37 für den Zeitraum 1937-2008, 10 Pegel, und Abb. 38 für den Zeitraum 1954-2008, alle 13 Pegel) kann dabei der zu erwartende monotone Abfall der MHnTnw und MHnThw mit zunehmender Kettenlänge, respektive Folgenzahl und der zumindest für die MHnThw relativ gleichartige, nahezu parallele Verlauf der einzelnen Pegel ersehen werden.

Bei den MHnTnw bestehen etwas größere Unterschiede zwischen den einzelnen Pegeln. Die Höhendifferenz unter den einzelnen Pegeln ändert sich stärker mit steigender Folgenzahl. Es finden auch stärkere Wechsel in der Höhenrangfolge der Pegel zwischen verschiedenen Folgenzahlen statt. Dies ist für die MHnThw nur in geringem Maße und geringer Höhendifferenz für die Pegel Husum, Bremerhaven und Wilhelmshaven, aber auch für Norderney und Wittdün der Fall. Bei den MHnTnw trifft dieses Verhalten allerdings für die meisten der betrachteten Pegel zu. Lediglich List weist stets für alle Folgenzahlen das höchste MHnTnw und Wilhelmshaven für alle Folgenzahlen das niedrigste MHnTnw, jeweils bezogen auf den Pegelnullpunkt der einzelnen Pegel, auf. Husum hingegen weist für die Folgenzahl 1, also Einzel-Tnw, den dritthöchsten Wert auf, fällt dann aber für drei und mehr aufeinanderfolgende Tnw relativ zu anderen Pegeln auf den drittletzten Platz ab.

Für den Zeitraum 1954-2008 kann ein grundsätzlich ähnliches Verhalten, wie für den Zeitraum 1937-2008 ausgeführt, beobachtet werden. Bei den MHnThw ist es lediglich Emden, welches zwar nicht die Rangfolge mit den darüber und darunter liegenden Pegeln wech-

selt, aber im Vergleich etwas stärker zwischen Folgenzahl 1 und 8 in der Höhe abfällt. Ebenso Helgoland, welches bei den Folgenzahl 1, also dem $MHThw_{1954-2008}$ den vergleichsweise niedrigsten Wert aufweist, dann mit zunehmender Kettenlänge weniger stark abfällt, und so bis zur Folgenzahl 8 den drittletzten Rang einnimmt.

Tab. 4: Mittelwerte der maximal erreichten Basishöhe von n hintereinander auftretenden Tnw und Thw (MHnTnw / MHnThw) in der Deutschen Bucht für die Zeiträume 1937-2008 und 1954-2008

Pegel / Folgezahl		1937-2008								1954-2008							
		1	2	3	4	5	6	7	8	1	2	3	4	5	6	7	8
List	Tnw	616,5	564,5	527,8	503,9	488,7	475,0	466,6	456,8	621,8	571,0	532,7	507,5	490,3	476,7	468,5	459,7
	Thw	762,8	709,9	677,3	656,1	642,5	631,4	623,4	618,1	772,1	718,3	684,6	660,4	646,4	635,5	626,8	621,9
Hörnum	Tnw	605,4	553,5	519,1	495,7	480,9	468,5	459,8	449,7	610,7	559,6	523,4	498,8	481,7	469,3	461,3	451,8
	Thw	776,0	723,6	692,6	672,4	658,7	647,2	639,5	633,5	786,0	732,1	700,5	677,7	663,8	653,1	644,4	638,6
Wyk	Tnw	-	-	-	-	-	-	-	-	610,9	548,1	503,9	476,1	455,4	441,8	432,8	420,4
	Thw	-	-	-	-	-	-	-	-	824,8	767,1	733,4	709,5	696,5	684,8	676,5	668,4
Dagebüll	Tnw	613,7	546,9	503,6	475,6	455,6	440,3	428,4	415,8	622,6	554,9	508,9	478,8	455,9	440,6	429,4	416,6
	Thw	828,2	768,5	735,9	712,9	700,2	686,7	678,6	670,9	839,3	779,5	745,3	719,2	706,5	693,7	684,7	676,5
Wittdün	Tnw	596,0	539,2	502,2	476,8	460,3	447,1	438,1	426,0	602,1	545,6	506,1	480,6	461,2	447,7	440,0	427,7
	Thw	791,8	738,6	707,6	688,5	676,1	665,0	657,9	651,3	801,6	747,3	715,6	694,2	681,2	671,1	663,3	656,2
Husum	Tnw	606,7	519,2	466,7	436,2	411,8	398,5	388,9	379,8	614,8	528,0	474,8	441,0	414,8	401,5	392,9	383,0
	Thw	884,1	818,1	778,1	751,8	736,6	722,7	713,4	704,1	894,9	829,6	786,4	758,3	742,0	728,5	718,4	707,7
Helgoland	Tnw	-	-	-	-	-	-	-	-	577,3	527,0	490,2	467,3	452,7	441,0	434,7	426,0
	Thw	-	-	-	-	-	-	-	-	769,0	721,5	693,0	673,4	661,1	653,9	646,5	641,3
Cuxhaven	Tnw	595,7	527,3	485,2	456,7	437,0	422,6	414,3	405,4	603,8	533,9	488,8	459,9	438,4	424,6	416,7	407,2
	Thw	853,8	790,8	754,8	730,4	712,4	701,5	692,5	685,9	864,0	798,3	760,6	734,9	715,9	705,6	696,1	689,3
Bremerhaven	Tnw	573,9	493,0	448,0	417,9	395,7	380,3	372,2	362,4	580,7	497,5	449,1	419,1	394,9	380,9	373,0	362,4
	Thw	871,8	812,5	774,4	752,2	734,2	723,4	715,1	708,7	881,0	820,0	779,6	756,7	738,1	727,7	718,6	712,2
LT Alte Weser	Tnw	561,4	504,4	469,1	443,4	426,2	413,1	406,7	398,7	565,4	508,1	470,4	445,3	427,9	415,1	408,7	400,9
	Thw	795,7	748,1	717,8	697,8	684,4	675,9	668,5	662,7	804,4	753,9	721,8	701,3	687,2	679,2	671,3	665,0
Wilhelmshaven	Tnw	547,3	478,1	438,0	409,3	390,5	376,4	367,9	357,0	553,4	483,1	440,0	411,4	391,3	378,2	369,4	358,5
	Thw	870,2	810,2	771,2	750,7	734,3	724,1	715,7	710,2	879,0	817,8	775,1	755,3	738,3	728,6	719,4	714,0
Norderney	Tnw	590,0	534,6	498,7	473,1	456,0	442,4	434,9	427,9	595,7	541,0	501,7	476,3	456,7	444,8	437,0	429,7
	Thw	790,6	743,9	707,5	688,1	673,3	663,4	656,2	650,6	798,9	749,3	711,9	691,6	676,1	666,3	658,6	652,7
Emden	Tnw	-	-	-	-	-	-	-	-	579,3	508,3	465,3	436,1	409,8	396,8	388,7	379,0
	Thw	-	-	-	-	-	-	-	-	855,1	796,0	748,7	724,7	706,7	695,1	686,1	679,1

Bei dieser Betrachtung muss die Tatsache berücksichtigt werden, dass jeweils Wasserstandshöhen, bezogen auf den jeweiligen Pegelnullpunkt betrachtet werden. Ein absoluter Bezugshorizont ist daher aufgrund der in Kapitel 3.6 erwähnten Problematik von Landsenkungsraten bzw. Offsetkorrekturen nicht gegeben. Dennoch geben die gemeinsam dargestellten erreichten Basishöhen der verschiedenen Pegel einen sehr guten Überblick über den unterschiedlichen Verlauf von Tnw- und Thw-Scheiteln mit jeweils zunehmenden Kettenlängen.

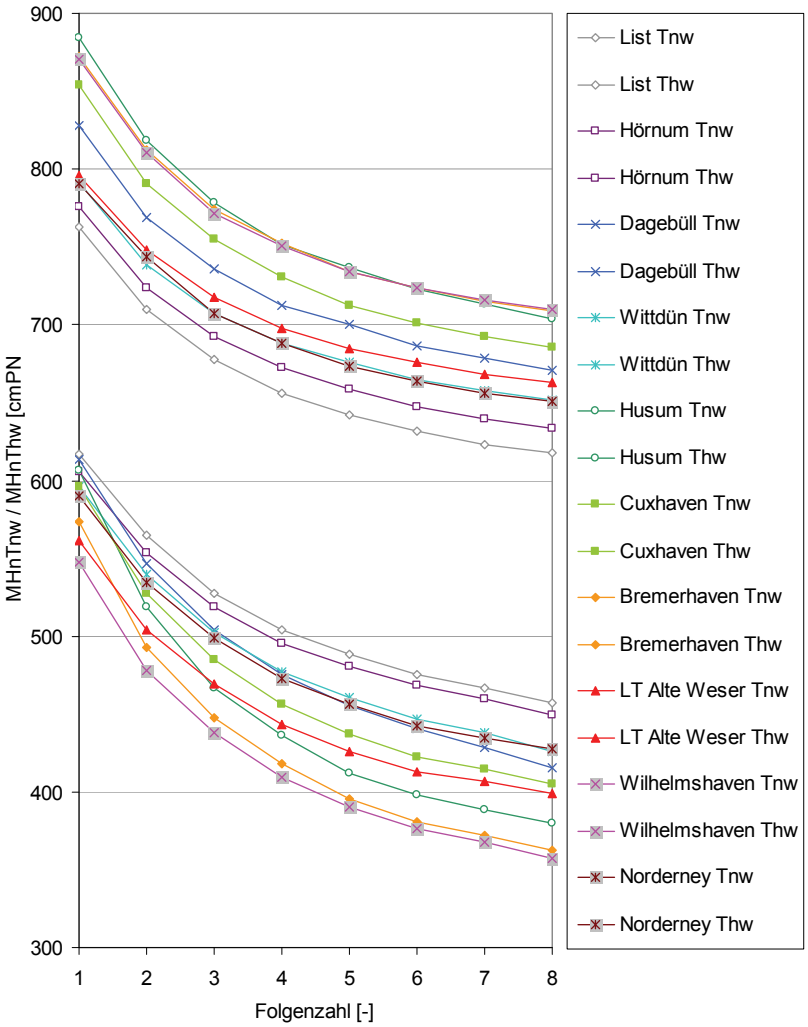


Abb. 37: Mittelwerte der maximal erreichten Basishöhe von n hintereinander auftretenden Tnw und Thw (MHnTnw / MHnThw) in der Deutschen Bucht für den Zeitraum 1937-2008

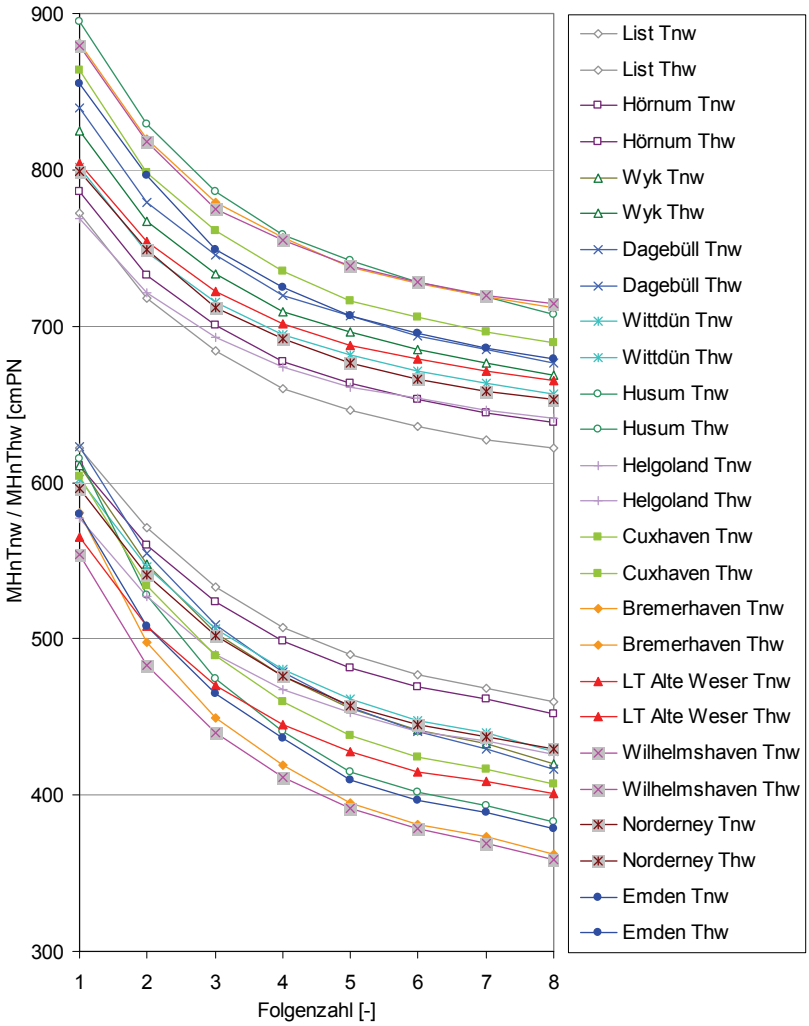


Abb. 38: Mittelwerte der maximal erreichten Basishöhe von n hintereinander auftretenden Tnw und Thw (MHnTnw / MHnThw) in der Deutschen Bucht für den Zeitraum 1954-2008

5.3 Ereignisanzahl und Auftretensverteilung von n hintereinander auftretenden Tnw- und Thw-Folgen

Hinsichtlich der Anzahl und Verteilung der aufgetretenen Ereignisse von 1-8 Tiden in Folge nicht unterschrittener Tidescheitel bzw. Wasserstände wurden separate Auswertungen der Tidekettenbestimmung für die Tnw- und Thw für jedes Jahr des Auswertezeitraums durchgeführt. In der Folge wurden aus diesen Häufigkeitsmatritzen Zeitreihen von Überschreitungszahlen durch 1-8 aufeinanderfolgende Tnw oberhalb verschiedener Bezugshorizonte ermittelt.

Um eine Vergleichbarkeit zwischen den unterschiedlichen Pegelzeitreihen zu gewähren, sind diese Bezugshorizonte zum einen auf die jeweiligen MTnw und MThw der Pegel und des Gesamtauswertezeitraums und zum anderen auf den jeweiligen Jahres-MSL bezogen. Erstere Auszählung bezieht sich also auf ein über den Auswertezeitraum konstantes Niveau. Trends des MSL bzw. Trends der Tnw oder Thw (jeweils für Tnw- und für Thw-Folgen) oder eine erhöhte Sturmtätigkeit sollten sich also in dieser Auswertung ebenfalls in einer Zunahme entsprechender Kettenereignisse darstellen. Um die Auswirkungen des ansteigen-

den Meeresspiegels auf die Auftretenshäufigheit von Tideketten zu eliminieren, wurde in einem zweiten Schritt die Auswertung unter Anwendung eines zeitabhängigen Grenzniveaus in Bezug auf den Jahres-MSL des jeweiligen Pegels durchgeführt. Die parallele Betrachtung von konstanten und zeitabhängig auf den MSL bezogenen Bezugshorizonten ist aus einem weiteren Grund wichtig. In Bezug auf konstante Niveaus kann ersehen werden, mit welcher Häufigkeit und welchem Trend Tidekettenereignisse entsprechender Basishöhe Strandabschnitte, Kliffs, Deckwerke, Warftkanten o.ä. in diesem Höhenbereich besonders belasten. In Bezug auf den jeweiligen Jahres-MSL wird ersichtlich, in wie weit das Verhalten von Tidekettenereignissen gegebenenfalls bei zukünftigen Bauwerksbemessungen gesondert in Bezug auf den Trend des MSL berücksichtig werden muss.

Die Gesamtauswertung umfasst dabei alle Wasserstände zwischen NNTnw und HHTnw bzw. zwischen NNThw und HHThw der Bezugszeiträume in 1 cm Stufen. Für die Übersichtsdarstellungen in Anhang 2 sowie für die Trendübersichten wurden jeweils drei Bezugshorizonte ausgewählt. Für die

- Tnw: konstant: MTnw +150 cm, MTnw + 200 cm, MTnw + 250 cm,
- Tnw zeitabhängig: MSL + 0 cm, MSL + 50 cm, MSL + 100 cm,
- Thw konstant: MThw + 0 cm, MThw +100 cm, MThw +200 cm,
- Thw zeitabhängig: MSL + 100 cm, MSL +200 cm, MSL + 300 cm.

Mit der Auswahl dieser Niveaus für die Übersichtsdarstellung sollen dabei jeweils die extremen Tnw- und Thw-Kettenereignisse sowie die für Fragestellungen der Binnenentwässerung bei den Tnw bzw. küstenverteidigungsrelevanter Höhen bei den Thw abgedeckt werden. Andererseits wäre es auch nicht zweckmäßig, als Bezugshorizont beispielsweise für die Abrenzung von Tnw-Ketten einen Wert von MTnw + 0 cm zu wählen, da sich die Mehrzahl aller normalen Tnw in dieser Größenordnung bewegen und so sehr hohe Überschreitungszahlen aller Folgenlängen auftreten, welche zudem keine praktische Relevanz z.B. für die Sielentwässerung aufweisen. Für die Thw-Ketten wurde zur unteren Abgrenzung allerdings das entsprechende Niveau MThw + 0 cm in die Übersicht mit aufgenommen.

Aufgrund dieser Herangehensweise sind jeweils die verschiedenen Auswertungen, basierend auf den konstanten Bezugniveaus, zwischen den Pegel vergleichbar. Ebenso die Auswertungen, basierend auf den zeitabhängigen Bezugsniveaus. Nicht notwendigerweise direkt vergleichbar sind jedoch konstantes und zeitabhängiges Bezugsniveau innerhalb eines Pegels. Dies ist darin begründet, dass die MThw bzw. MTnw der verschiedenen Pegel unterschiedliche Differenzen zum entsprechenden MSL aufweisen (unabhängig davon, dass zudem der MSL des jeweiligen Jahres genutzt wird). Nur wenn z.B. das MTnw des Bezugszeitraums in der Größenordnung von 150 cm unterhalb des MSL des Bezugszeitraums liegt, lässt sich mit hoher Berechtigung der Unterschied zwischen konstantem und zeitabhängigem Bezugshorizont darstellen. Dies trifft beispielsweise für die Tnw-Folgen des Pegels Cuxhaven und LT Alte Weser zu.

Der Pegel Cuxhaven ist exemplarisch für die vergleichbaren Bezugshorizonte MTnw + 200 cm (konstant) und MSL + 50 cm (zeitabhängig) für Folgenzahlen von 1-3 in Abb. 39 abgebildet. Die Überschreitungszahlen bzw. Ereignishäufigkeit von entsprechenden Tnw-Folgen ist in Form der roten Säulen dargestellt. Wie zu erkennen ist, reichen die Überschreitungszahlen von 0 bis 10 Ereignisse pro Jahr für die Folgenzahl 1, 0 bis 2 Ereignisse pro Jahr für die Folgenzahl 2 und für Tideketten mit 3 Tnw in Folge ≥ MTnw + 200 bzw ≥ MSL +

50 cm wurde nur 1991 ein einziges Ereignis ermittelt. Weiterhin ist über die Ereigniszahl ein linearer Trend ermittelt worden, dessen Anstieg jeweils in der linken Hälfte der Zeitreihendarstellung aufgeführt ist. Die nominellen Werte sind dabei von der jeweiligen Ereignisanzahl des untersuchten Bezugshorizonts und der untersuchten Folgenzahl abhängig. Daher ist es ebenfalls nur zulässig, Trendzahlen jeweils gleicher Bezugshorizonte bzw. vergleichbarer Bezugsniveaus zu vergleichen. Eine Interpretation hat vorsichtig zu geschehen, da die entsprechenden Trendanstiege durch nur sehr wenige Ereignisse gestützt werden. Dies zeigen auch die 1-σ-Standardfehler, welche jeweils in der gleichen Größenordnung der angegebenen Trends liegen (rund 50% bis 150% der Trendwerte). Die zu Beginn des Kapitels erwähnte Annahme, dass sich aus der zeitabhängigen Wahl des Bezugshorizonts auf Basis des jeweiligen Jahres-MSL im Vergleich zu einem konstanten Niveau eine Reduktion des Trends des Auftretens von Tideketten ergibt, kann am Beispiel der Tnw-Folgen des Pegels Cuxhaven bestätigt werden.

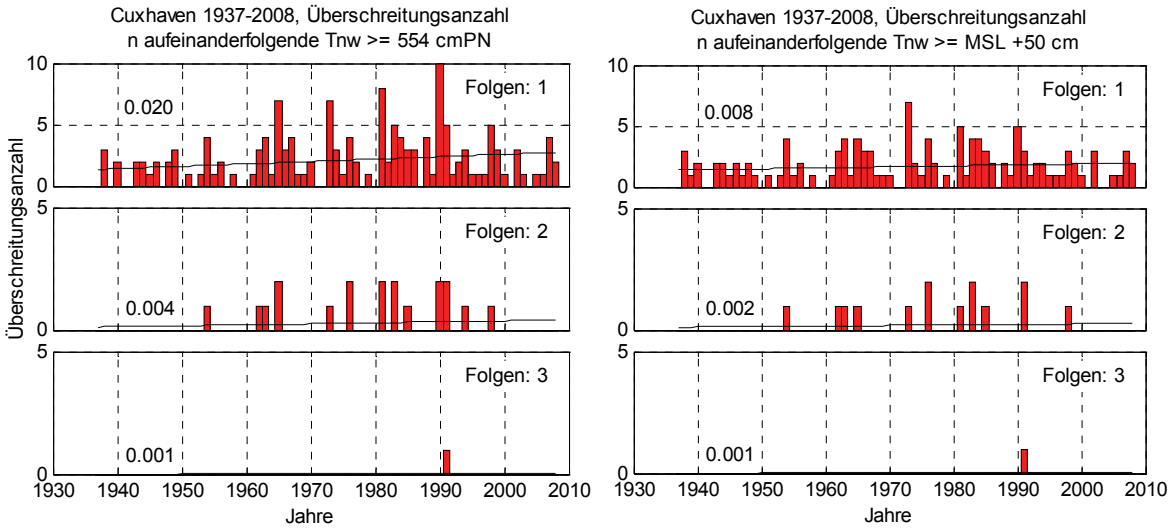


Abb. 39: Cuxhaven 1937-2008, Überschreitungszahlen durch 1-3 aufeinanderfolgende Tnw (Folgen 4-8 unbesetzt). Links: ≥ $MTnw_{1937-2008}$ + 200 cm = 554 cm, Rechts: ≥ MSL + 50 cm des jeweiligen Jahres

Auch, wenn der verbleibende nominelle Trend für den zeitabhängigen Bezugshorizont am Pegel Cuxhaven (Zeitraum 1937-2008) sehr gering und nahe Null ist, finden sich die höheren Ereigniszahlen in der zweiten Hälfte des Untersuchungszeitraums. Mit Ereigniszahlen von 1 bzw. 2 Ketten pro Jahr ist diese Betrachtung allerdings nicht signifikant.

Wie für die Tnw und Thw des Pegels Cuxhaven, zeigt sich auch für die Tnw des Pegels LT Alte Weser, die Tnw des Pegels Wilhelmshaven, die Thw des Pegels Emden und die Tnw des Pegels Husum ein ausgeglichenes Bild ohne signifikante Trends, bzw. mit Ausnahmen (Husum, LT Alte Weser) bei den Tnw auch mit negativen Trends. Für alle übrigen Pegel und die jeweils nicht genannten Parameter der gerade aufgeführten Pegel ergibt sich jedoch eine erkennbare Häufung von Ereignissen, welche pegelübergreifend zwischen etwa Mitte der 70er bis Mitte/Ende der 90er Jahre zu beobachten ist. Diese Häufung ist dabei sowohl für die konstanten Bezugshorizonte als auch für die zeitabhängigen Bezugshorizonte vorhanden. Abb. 40 und Abb. 41 sollen dies exemplarisch anhand der mittleren der drei Bezugshorizonte für Tnw- und Thw-Folgen des Pegels List verdeutlichen.

In Tab. 5 und Tab. 6 sind die entsprechenden Trendwerte aufgeführt. Aus Gründen der Übersichtlichkeit wurde sich dabei auf den jeweils höchsten Bezugshorizont der zeitabhängigen MSL-Beschickung beschränkt. Alle Trendwerte der übrigen Bezugshorizonte finden sich

in den Überschreitungsgrafiken innerhalb des Anhang 2. Zur besseren Lesbarkeit wurde die führende Null vor dem Dezimaltrennzeichen nicht aufgeführt.

In Tab. 5 sind die Ergebnisse der linearen Trendanalysen auf Basis der Überschreitungszahl von n hintereinander auftretenden Tnw ≥ MSL + 100 cm des jeweiligen Jahres in der Deutschen Bucht für die Zeiträume 1937-2008 und 1954-2008 für alle Pegel zusammengestellt und in Tab. 6 finden sich die entsprechenden Ergebnisse für Thw-Ereignisse ≥ MSL + 300 cm des jeweiligen Jahres.

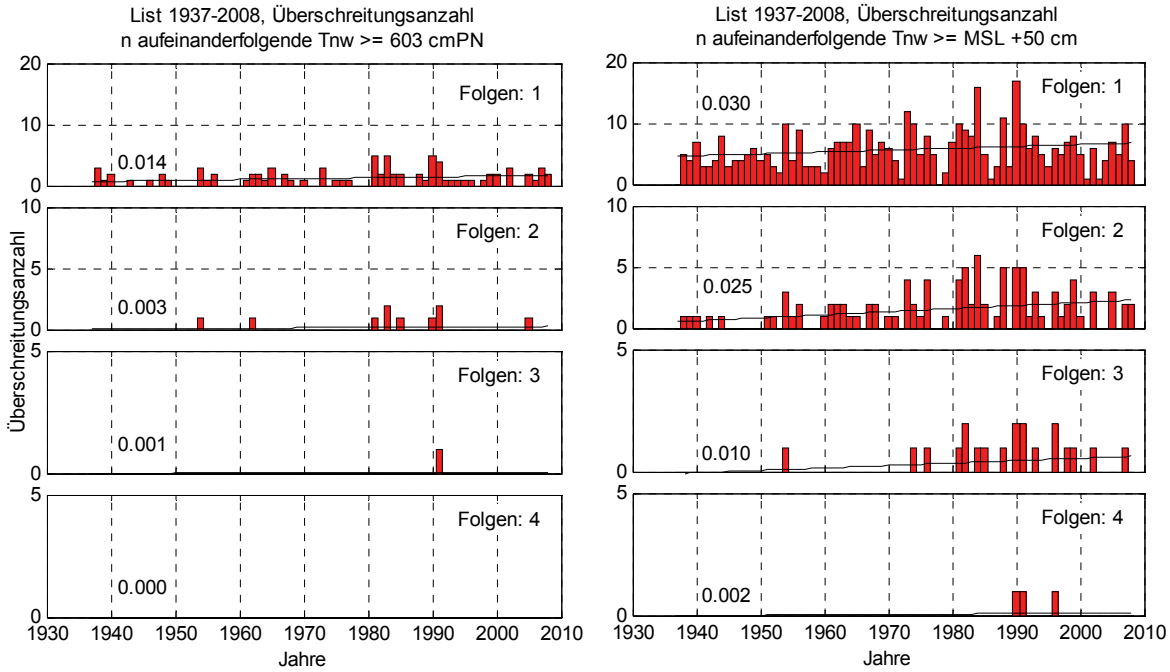


Abb. 40: List 1937-2008, Überschreitungszahlen durch 1-8 aufeinanderfolgende Tnw (Folgen 5-8 unbesetzt). Links: ≥ $MTnw_{1937-2008}$ + 200 cm = 603 cm, Rechts: ≥ MSL + 50 cm des jeweiligen Jahres

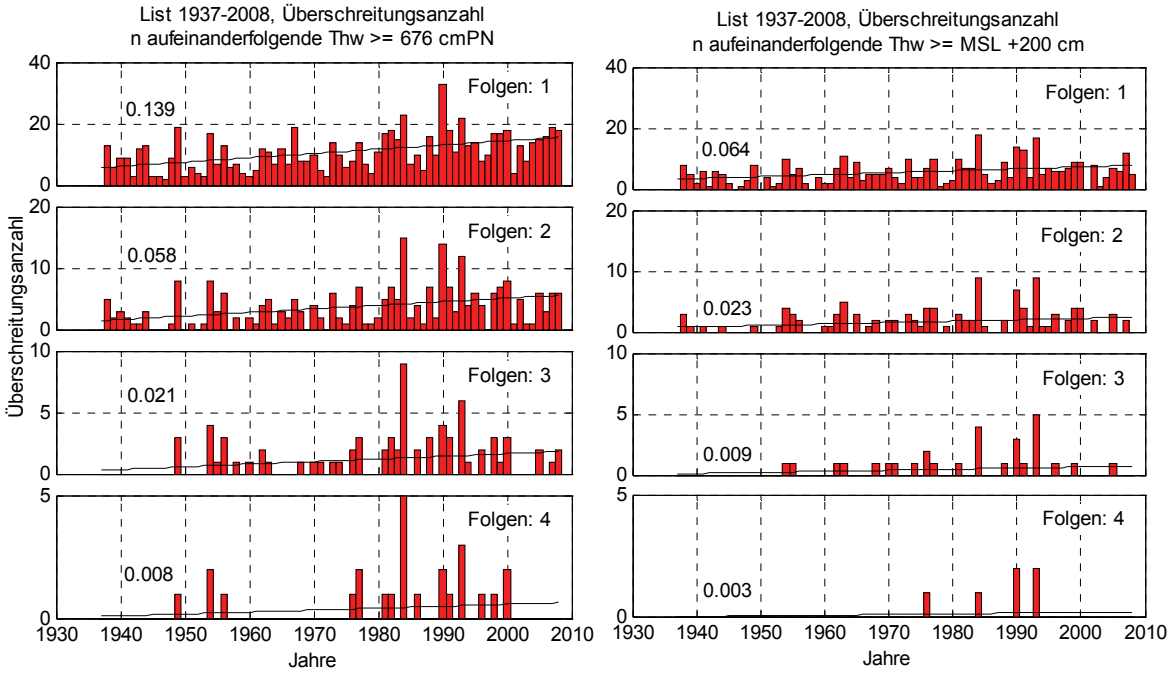


Abb. 41: List 1937-2008, Überschreitungszahlen durch 1-4 aufeinanderfolgende Thw (Folgen 6-8 für MSL beschickte Reihe unbesetzt). Links: ≥ $MThw_{1937-2008}$ + 100 cm = 676 cm, Rechts: ≥ MSL + 200 cm des jeweiligen Jahres

Tab. 5: Ergebnisse der linearen Trendanalysen (Ereignisse/a) der Überschreitungszahl von n hintereinander auftretenden Tnw ≥ MSL + 100 cm in der Deutschen Bucht für die Zeiträume 1937-2008 und 1954-2008

Pegel / Ereigniszahl		1937-2008								1954-2008							
		1	2	3	4	5	6	7	8	1	2	3	4	5	6	7	8
List	Tnw	,012	,002	,001						,004	-,002	,001					
Hörnum	Tnw	,004	,001	,001						-,005	-,002	,001					
Wyk	Tnw	-	-	-	-	-	-	-	-	,004	-,002	,001					
Dagebüll	Tnw	,010	,000							,001	-,002						
Wittdün	Tnw	,006	,001	,001						-,004	-,002	,001					
Husum	Tnw	,008	-,001							-,002	-,004						
Helgoland	Tnw	-	-	-	-	-	-	-	-	-,004	-,003						
Cuxhaven	Tnw	,006	-,001							-,007	-,003						
Bremerhaven	Tnw	,003								-,004	-,001						
LT Alte Weser	Tnw	-,001	-,000							-,003	-,001						
Wilhelmshaven	Tnw	,000	,000							-,003	,000						
Norderney	Tnw	,000	-,000							-,008	-,001						
Emden	Tnw	-	-	-	-	-	-	-	-	-,002	,000						
synth. Zeitreihe (S-H)	Tnw	,008	,001	,001						-,000	-,002	,001					
synth. Zeitreihe (Niedersachsen)	Tnw	,002	-,000							-,004	-,001						
synth. Zeitreihe (Dt. Bucht)	Tnw	,005	,000	,001						-,003	-,002	,001					

Tab. 6: Ergebnisse der linearen Trendanalysen (Ereignisse/a) der Überschreitungszahl von n hintereinander auftretenden Thw ≥ MSL + 300 cm in der Deutschen Bucht für die Zeiträume 1937-2008 und 1954-2008

Pegel / Ereigniszahl		1937-2008								1954-2008							
		1	2	3	4	5	6	7	8	1	2	3	4	5	6	7	8
List	Thw	,005	,001							,005	,001						
Hörnum	Thw	,009								,004							
Wyk	Thw	-	-	-	-	-	-	-	-	,010	-,001	,001	,001				
Dagebüll	Thw	,034	,006	,002	,001					,015	,001	,002	,000				
Wittdün	Thw	,011	,001							,008	,001	,000	,000				
Husum	Thw	,053	,026	,007	,003	,001				,034	,013	,003	,002	,002			
Helgoland	Thw	-	-	-	-	-	-	-	-	,001							
Cuxhaven	Thw	,016	,004	,002	,001	,001				-,001	-,002	-,000	,001	,001			
Bremerhaven	Thw	,035	,014	,004	,002	,001				,007	,004	,002	,002	,001			
LT Alte Weser	Thw	,011	,003	,000						,009	,002	-,000					
Wilhelmshaven	Thw	,037	,014	,004	,002	,001				,009	,004	,001	,001	,001			
Norderney	Thw	,010	,002							,005	,002						
Emden	Thw	-	-	-	-	-	-	-	-	,012	,004	,002	,001				
synth. Zeitreihe (S-H)	Thw	,022	,009	,004	,002	,001				,013	,003	,001	,001	,002			
synth. Zeitreihe (Niedersachsen)	Thw	,022	,007	,003	,002	,001				,007	,002	,001	,001	,001			
synth. Zeitreihe (Dt. Bucht)	Thw	,022	,008	,003	,002	,001				,009	,002	,001	,001	,001			

6. Ergebnisse der Untersuchungen zur Entwicklung der Verweildauern der Tidewasserstände in der Deutschen Bucht

Nach den Auswertungen zur Entwicklung des MSL und der Tideketten sollen hier nun die Ergebnisse zu den Betrachtungen der Verweildauern der Tidewasserstände dargestellt und diskutiert werden. Die zugrunde liegende Auswertemethodik wurde in Kapitel 3.8 beschrieben.

Die Verweildauer definiert die Zeit, in der sich ein Wasserstand innerhalb vorgegebener Grenzen bewegt. Für die Auswertung der Verweildauern in der Deutschen Bucht werden die Grenzbereiche als Höhenstufen definiert, die jeweils 20 cm umfassen. Die Entwicklung der Verweildauern wird in unterschiedlichen Zeitabschnitten analysiert. Um saisonale Differenzen ausfindig zu machen, werden daher sowohl Kalenderjahre, als auch Sommerhalbjahre und Winterhalbjahre ausgewertet. Die entsprechenden Untersuchungen ermöglichen einen Überblick über die jeweiligen Verläufe der Exposition von Watt und Vegetation, der potenziellen Belastung von Küsten, Stränden, Deckwerken, Deichen etc. sowie ebenso wie die Tideketten über potenzielle Be- oder Verhinderung der Binnenentwässerung.

Diese Auswertungen sind nur für Zeitreihenabschnitte möglich, für die mindestens stündliche Wasserstandsaufzeichnungen vorliegen; nur auf Basis einer Scheitelzeitreihe ist keine Bestimmung von Verweilzeiten möglich. Die Auswertung der Verweildauern beschränkt sich damit für fast alle untersuchten Pegel auf den Zeitraum von 1994, bzw. 1997, 1999 und 2000 bis 2008. Lediglich für den Pegel Cuxhaven liegen bis 1918 zurückreichend mindestens Stundenwerte lückenlos digital vor (Abb. 2). Aus diesem Grund konnten aussagekräftige Untersuchungen über den Verlauf der Verweildauern nur für den Pegel Cuxhaven durchgeführt werden.

Für die Auswertung von Verweildauern von Sturmflutwasserständen konnte darüber hinaus auf durchgehend digitalisierte Ganglinien eines Sturmflutkollektivs von 311 Ereignissen für den Pegel Cuxhaven (Zeitraum 1901 bis 2008) und 199 Ereignissen für den Pegel Hörnum (Zeitraum 1936 bis 2008) aus dem Projekt XtremRisK zurückgegriffen werden.

6.1 Ergebnisse der Verweildaueruntersuchungen der Pegel

Für den Pegel Cuxhaven liegt über das gesamte verfügbare Datenkollektiv die einzige, langjährig durchlaufende Zeitreihe von Stundenwerten vor. Abb. 42 zeigt die Entwicklung der Auswertung von allen Wasserstandswerten eines Jahres über mittlere Tiden und Verweildauern von Einzeljahren (Abb. 42 Mitte und Links) und schließlich zur Aneinanderreihung der jährlichen mittleren Tide vom Start des Gesamtauswertezeitraums 1918 bis zum Ende 2008 in Form einer durchlaufenden Kurvenfläche (Abb. 42 Rechts). Mit dieser durchlaufenden, dreidimensionalen Kurvenfläche sind verschiedene Betrachtungen möglich. Anhand der Kontourlinien ist bereits in der isometrischen Perspektive ein ansteigender Trend des Gesamtniveaus der mittleren Tide erkennbar. Abb. 43 stellt diese Kurvenfläche der jährlichen Mittleren Tide auf der linken Hälfte als Seitenansicht dar und zeigt damit den bereits aus übrigen Zeitreihenuntersuchungen bekannten Verlauf der MThw- als auch der MTnw-Scheitel. Auf der rechten Hälfte der Abb. 43 ist die Kurvenfläche von der Stirnseite dargestellt und zeigt damit die Umhüllende aller mittleren Jahrestiden.

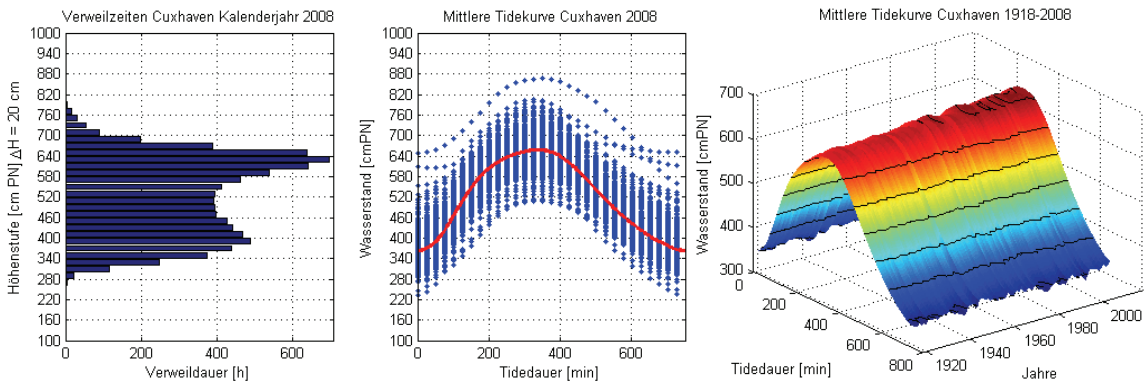


Abb. 42: Pegel Cuxhaven: Verweildauer Verteilung für das Kalenderjahr 2008 (links), Mittlere Tide (durchgezogene Linie) und ausgedünnte Punktplots aller Einzeltiden (Punkte) des Kalenderjahr 2008 und Verlauf der jährlichen Mittleren Tide von 1918 bis 2008 (rechts)

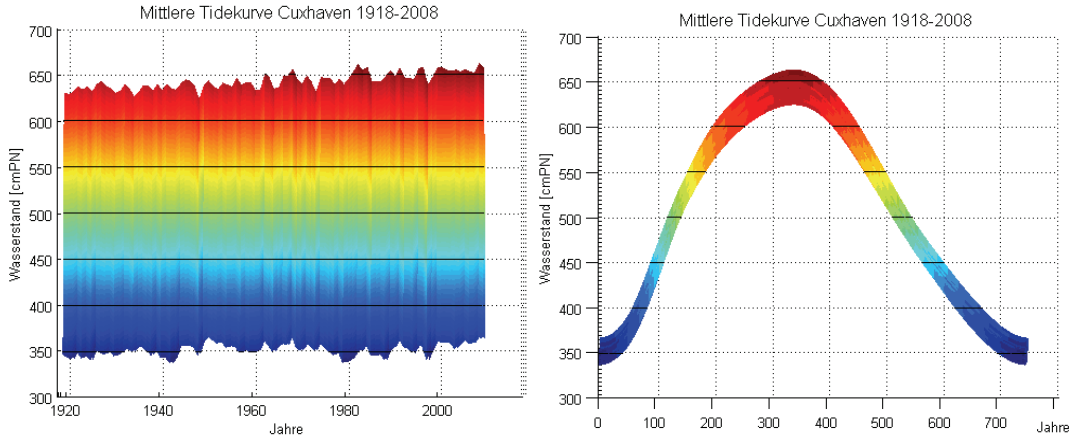


Abb. 43: Pegel Cuxhaven, Darstellung der Kurvenfläche der jährlichen Mittleren Tide von 1918 bis 2008 (Links: Seitenansicht, Wasserstand bezogen auf Jahre, Rechts: Stirnansicht, Wasserstand bezogen auf Tidedauer)

Eine weitere Art der Darstellung ergibt sich in Form einer senkrechten Draufsicht (Abb. 44). Auf der Ordinate ist die Tidedauer in Minuten und auf der Abszisse ist die Zeit aufgetragen. Die Wasserstände, bezogen auf den Pegelnullpunkt, sind als Kontourflächen und -linien im Abstand von 50 cm dargestellt. Anhand der Kontourflächen kann der Verlauf der durch jeweils gleiche Wasserstände eingenommene Anteil an der Gesamtdauer einer Tide nachvollzogen werden. Sie geben damit Auskunft über die Zunahme mittlerer Verweildauern des Wasserstands oberhalb verschiedener Niveaus, bezogen auf den Pegelnullpunkt und ohne Berücksichtigung des MSL-Verlaufs.

Um diese Zunahme zu quantifizieren, wurden an die Kontourlinien des Wasserstands von 400 cmPN und 600 cmPN jeweils für den Flutast (jeweils obere Trendlinie in Abb. 44) und den Ebbast (jeweils untere Trendlinie in Abb. 44) lineare Trends angepasst. Die schwarzen Trendgeraden spannen so den Anteil der Tidedauer auf, in der der Wasserstand am Pegel Cuxhaven oberhalb 600 cmPN verweilt. Während diese Verweildauer 1918 180 min betrug, lag sie 2008 bei 244 min und weist somit eine Zunahme von 36% bei einem mittleren jährlichen Trend von 0,7 min/a auf. Analog spannen die weissen Linien den Anteil der Tidedauer auf, in der der Wasserstand am Pegel Cuxhaven oberhalb 400 cmPN verweilt. 1918 betrug diese Verweildauer 559 min und sie wächst bis 2008 auf 598 min. Eine Erhöhung und Aufsteilung der mittleren Tidekurve zeigt sich also auch in Form der Verweildauerzunahme, die für niedrigere Tidewasserstände einen geringeren Wert annimmt. Hier mit einer Zunah-

me von 7% der mittleren Verweildauer über 400 cmPN, entsprechend einem mittleren jährlichen Trend von 0,43 min/a. In den Verweildauern innerhalb der Tidedauer lässt sich also für den Pegel Cuxhaven ein ähnlicher Effekt wie für die in JENSEN U. MUDERSBACH (2007) beschriebene Zunahme des Tidehubs durch unterschiedliche Anstiege von MTnw und MThw zeigen.

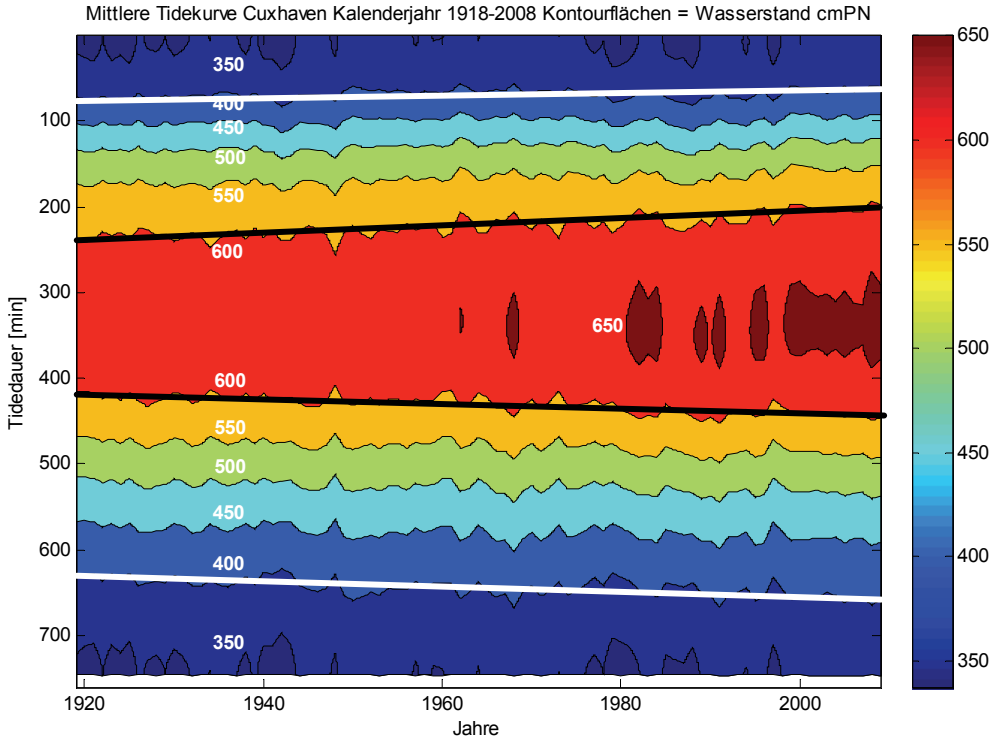


Abb. 44: Verlauf der Mittleren Tidekurve für den Tidepegel Cuxhaven von 1918 bis 2008. Die Farbwerte geben den Wasserstand an. Schwarze Geraden zeigen den linearen Trend der mittleren Verweildauer oberhalb 600 cmPN, weisse Geraden zeigen den linearen Trend der mittleren Verweildauer über 400 cmPN

Die Zeitreihen für die Sommerhalbjahre 1918-2008 und Winterhalbjahre 1917/18-2007/08 wurden auf gleiche Weise ausgewertet. Die entsprechenden Ergebnisse sind gemeinsam mit den vorgenannten Werten für die Kalenderjahre in Tab. 7 zusammengestellt.

Tab. 7: Pegel Cuxhaven, mittlere Verweildauerzunahme

	Kalenderjahre	Sommerhalbjahre	Winterhalbjahre
Verweildauer ≥ 400 cmPN 1918	559 min	562 min	549 min
Verweildauer ≥ 400 cmPN 2008	598 min	588 min	599 min
Verweildauer ≥ 600 cmPN 1918	180 min	187 min	165 min
Verweildauer ≥ 600 cmPN 2008	244 min	239 min	232 min
Prozentuale Zunahme Verweildauer ≥ 400cmPN	7%	5%	9%
Prozentuale Zunahme Verweildauer ≥ 600cmPN	36%	28%	41%
linearer Trend Zunahme Verweildauer ≥ 600cmPN	0,70 min/a	0,29 min/a	0,55 min/a
linearer Trend Zunahme Verweildauer ≥ 400cmPN	0,43 min/a	0,57 min/a	0,74 min/a

Wie diesen Ergebnissen zu entnehmen ist, sind sowohl für die Verweildauern oberhalb 400 cmPN als auch 600 cmPN die weitaus stärksten Zunahmen im Winterhalbjahr zu ver-

zeichnen. Auch die Darstellung der Kontourflächen für die Sommerhalbjahre (Abb. 45) und Winterhalbjahre (Abb. 46) zeigt die stark unterschiedlichen Verläufe, die sich bei den Winterhalbjahren insbesondere durch eine deutlich höhere interannuelle Varianz der Verweildauern auszeichnet.

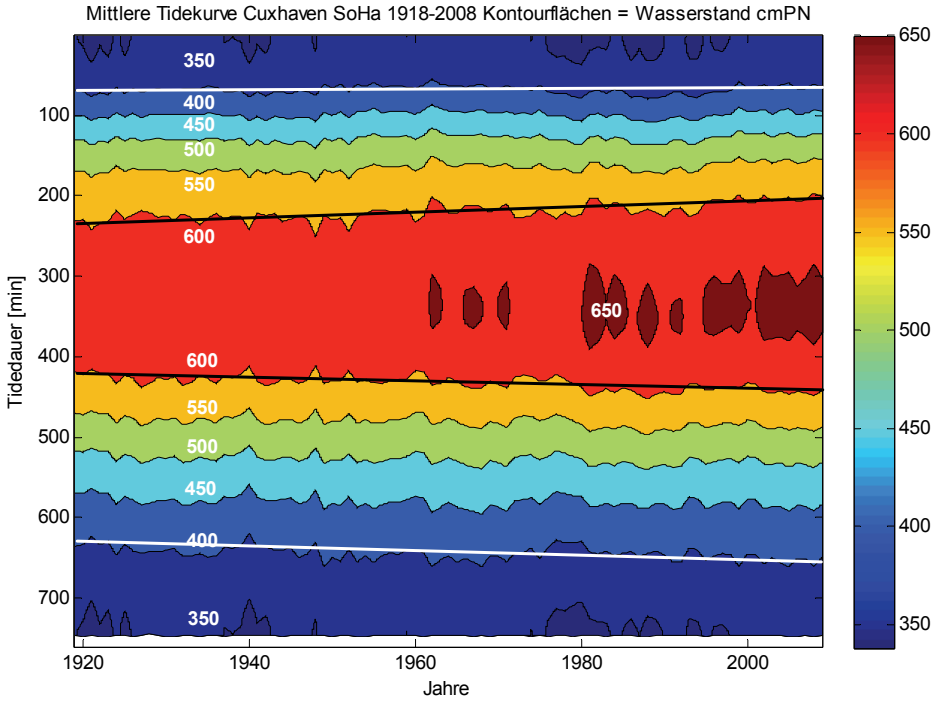


Abb. 45: Verlauf der Mittleren Tidekurve für den Tidepegel Cuxhaven für Sommerhalbjahre von 1918 bis 2008. Die Farbwerte geben den Wasserstand an. Schwarze Geraden zeigen den linearen Trend der mittleren Verweildauer oberhalb 600 cmPN, weisse Geraden zeigen den linearen Trend der mittleren Verweildauer über 400 cmPN

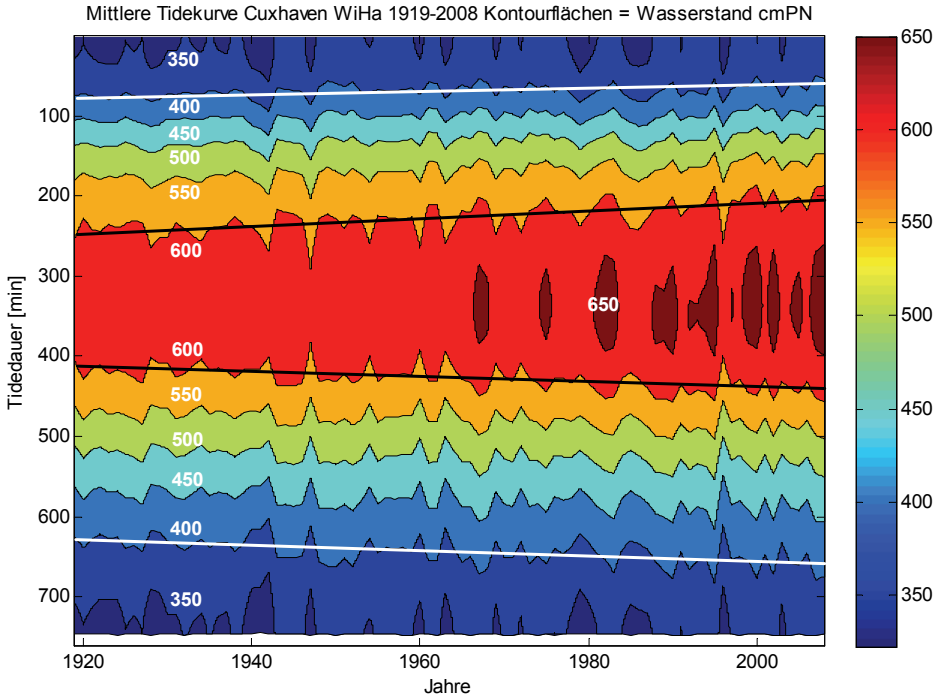


Abb. 46: Verlauf der Mittleren Tidekurve für den Tidepegel Cuxhaven für Winterhalbjahre von 1917/18 bis 2007/08. Die Farbwerte geben den Wasserstand an. Schwarze Geraden zeigen den linearen Trend der mittleren Verweildauer oberhalb 600 cmPN, weisse Geraden zeigen den linearen Trend der mittleren Verweildauer über 400 cmPN

Analog zur Herangehensweise der Zusammenstellung eines Flächenverlaufs der mittleren Tidekurve über den Gesamtbetrachtungszeitraum, kann der Verlauf der Verweildauern über den Gesamtzeitraum erstellt und visualisiert werden. Es werden also nicht die mittleren Tidekurven der einzelnen Jahre (Abb. 42, Mitte), sondern die Verweildauern je Höhenstufe der einzelnen Jahre (Abb. 42, Links) aneinander gereiht. Es resultiert die in Abb. 47 in isometrischer Perspektive dargestellte Folge von Verweildauersäulen. Jede einzelne Säule zeigt dabei, wie lang sich der Wasserstand im jeweiligen Jahr innerhalb der jeweiligen Höhenstufe aufgehalten hat.

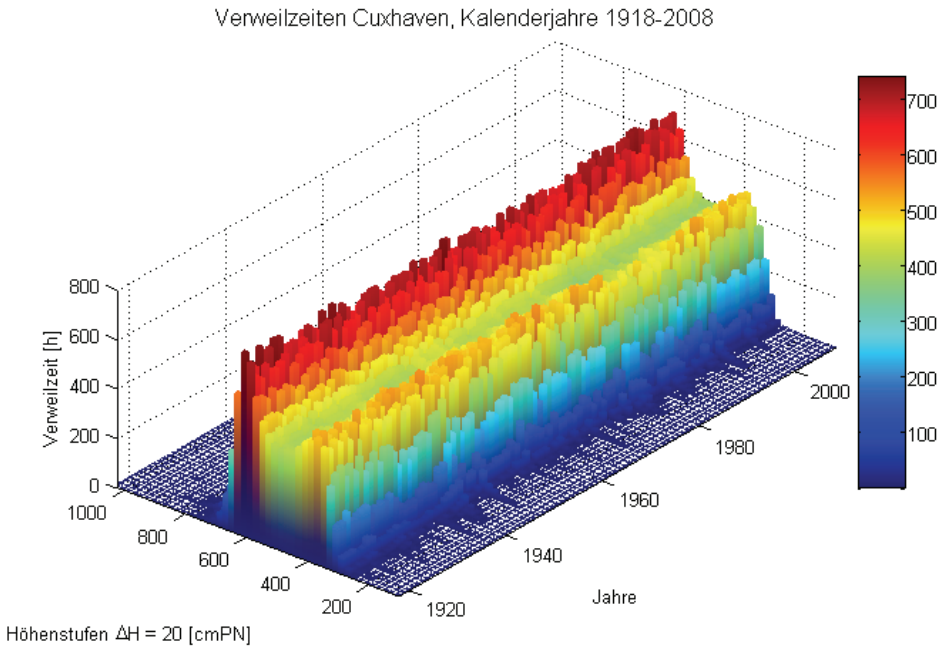


Abb. 47: Verlauf der jährlichen Verweildauern für den Tidepegel Cuxhaven von 1918 bis 2008. Die Farbwerte geben die Verweilzeit in Stunden pro Jahr an (Isometrie)

In der Aufsicht, welche in der Ordinate die Höhenstufen oberhalb des Pegelnullpunkts und in der Abszisse die Jahre zeigt, wird der Verlauf der Höhenverteilungen deutlicher (Abb. 48). Der Farbwert der einzelnen Elemente gibt wie in Abb. 47 die Verweildauer in Stunden an; in leeren Elementen hielt sich der Wasserstand während des gesamten Jahres nicht auf. Somit sind in dieser Ansicht Jahre mit extremen Scheitelwasserständen einfach durch die Verteilung der Randelemente gut erkennbar. Weiterhin kann die bimodale Verteilung der Verweildauerkurve mit zwei deutlichen Scheiteln, einmal um die Thw und einmal um die Tnw herum gut in Form der zwei „Gipfelkämme“ verfolgt werden. Die obere Kammlinie kann aufgrund der hohen Verweildauern von 600 und mehr Minuten durch die rotschattierten Elemente in Abb. 48 sehr einfach wahrgenommen werden. Die untere Kammlinie weist niedrigere Verweildauerspitzen auf und tritt im Vergleich in der Aufsicht nicht ganz so deutlich hevor. Beide Gipfelkämme wurden daraufhin auf ihre Trends untersucht und die entsprechenden Ausgleichslinien ebenfalls in Form der gestrichelten schwarzen Linie in Abb. 48 dargestellt.

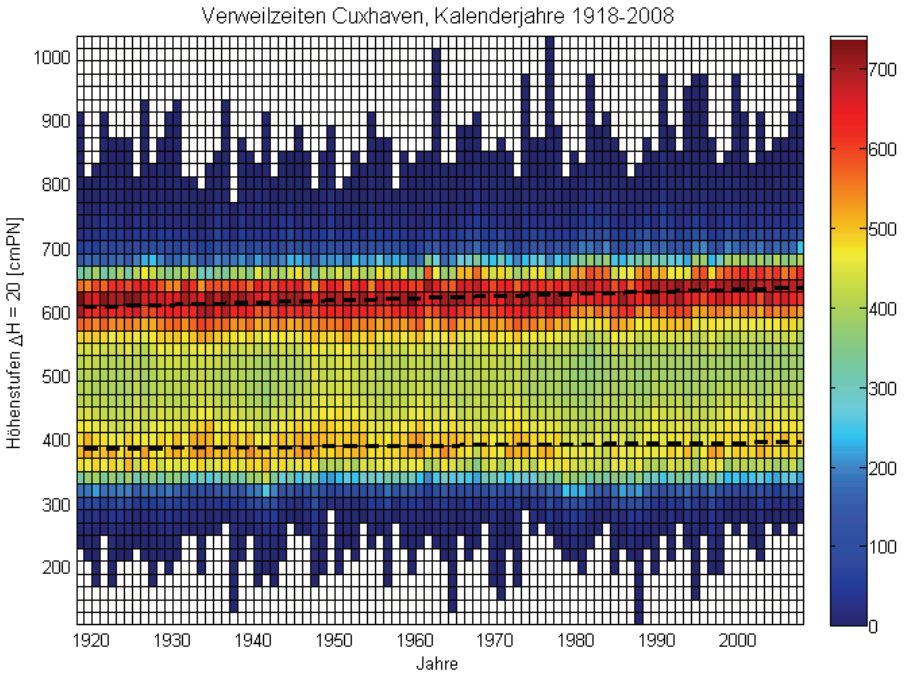


Abb. 48: Verlauf der jährlichen Verweildauern für den Tidepegel Cuxhaven von 1918 bis 2008. Die Farbwerte geben die Verweilzeit in Stunden pro Jahr an (Aufsicht)

Um diese Anstiegsraten der Höhenstufen der höchsten Verweildauern zu bestimmen, wurde eine entsprechende Teilmenge aller Verweildauerelemente ≥ 600 h/a erzeugt und diesen Elementen als Gewichtungswert die Verweildauer oberhalb des Grenzwertes von 600 h/a zugeordnet.. Aus dieser Teilmenge, die in Abb. 49 dargestellt ist, wurde durch lineare Regression sowohl eine ungewichtete als auch gewichtete Trendgerade bestimmt. Die gewichtete Trendgerade ergibt somit eine Anstiegsrate von 0,25 cm/a für Verweilzeiten ≥ 600 h/a am Pegel Cuxhaven an.

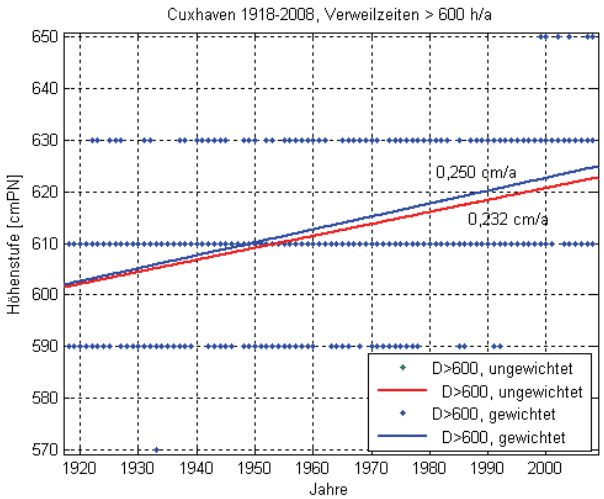


Abb. 49: Pegel Cuxhaven: Verteilung jährlicher Verweildauern ≥ 600 h/a in Bezug auf Höhenstufe und Jahr (Punkte) sowie lineare Trends (ungewichtet: rote Linie, gewichtet: blaue Linie)

In ähnlicher Weise wurden die Anstiegsraten der Höhenstufen der Verweildauern untersucht, die den unteren, weniger ausgeprägten Kamm der Wasserstände um den Tnw herum bilden (Abb. 50). Eine Separation aller Verweildauerelemente ≥ 450 h/a, welche den unteren

Gipfelbereich definieren, würde ohne Nebenbedingung auch alle Verweildauern des oberen, in Abb. 49 dargestellten Kamms um die Thw-Wasserstände herum erfassen. Daher wurde zusätzlich die Nebenbedingung herangezogen, dass nur Höhenstufen unterhalb 500 cmPN zu der Teilmenge zugelassen werden. Die ermittelte Anstiegsrate für für Verweilzeiten ≥ 450 h/a und Höhenstufen < 500 cmPN beträgt 0,1 cm/a.

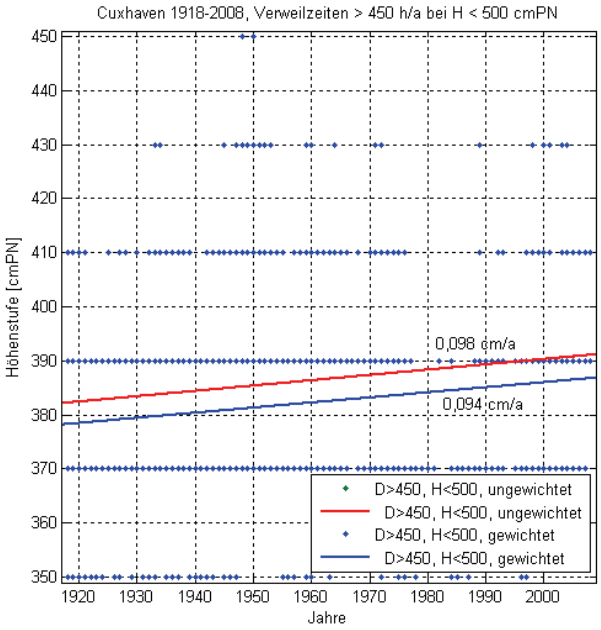


Abb. 50: Pegel Cuxhaven: Verteilung jährlicher Verweildauern ≥ 450 h/a (für Höhenstufen unterhalb 500 cmPN) in Bezug auf Höhenstufe und Jahr (Punkte) sowie lineare Trends (ungewichtet: rote Linie, gewichtet: blaue Linie)

Auch in den jährlichen Verweildauern schlägt sich also der Anstieg der Tidewasserstände, der für Thw und Tnw zudem unterschiedlich ausfällt, nieder. Während es 1918 ein Niveau von 602,1 cmPN war, welches im Mittel länger als 600 h/a durch den Wasserstand erreicht wurde, hat sich dieses Niveau bis zum Jahr 2008 auf 624,9 cmPN erhöht. Dies entspricht einer Erhöhung von 3,8%, bzw. einem Anstieg von 0,25 cm/a. Für Verweildauern niedriger Wasserstände hat sich das Niveau von 378,2 cmPN, welches 1918 im Mittel länger als 450 h/a durch den Wasserstand eingenommen wurde, auf 386,8 cmPN bis zum Jahr 2008 erhöht. Dies entspricht einer Erhöhung von 2,3%, bzw. einem Anstieg von 0,09 cm/a.

Entsprechend des betrachteten Verhaltens muss es also Höhenstufen geben, in welcher die Verweilzeit des Wasserstandes einen ansteigenden Trend aufweist. Aber ebenso Höhenstufen, wo die Verweilzeiten absteigenden Trend aufweisen. Dies kann gezeigt werden, wenn für beliebige Höhenstufen Jahreszeitreihen der entsprechenden Verweildauern separiert und dargestellt werden. So zeigt Abb. 51 den Verweilzeitenverlauf der Höhenstufen von 620-640 cmPN, 640-660 cmPN und 660-680 cmPN von 1918-2008 (Benennung in der Grafik jeweils durch die Mitte der Höhenstufen). Die ebenfalls dargestellten, ermittelten linearen Trends weisen unterschiedliche Anstiegsraten zwischen 1,24 h/a (Höhenstufe 620-640 cmPN) und 2,71 h/a (Höhenstufe 660-680 cmPN) auf. Demgegenüber zeigt Abb. 52 für die Höhenstufen von 560-580 cmPN, 580-600 cmPN und 600-620 cmPN abfallende Trends zwischen -0,61 h/a (Höhenstufe 600-620 cmPN) und -1,266 h/a (Höhenstufe 580-600 cmPN).

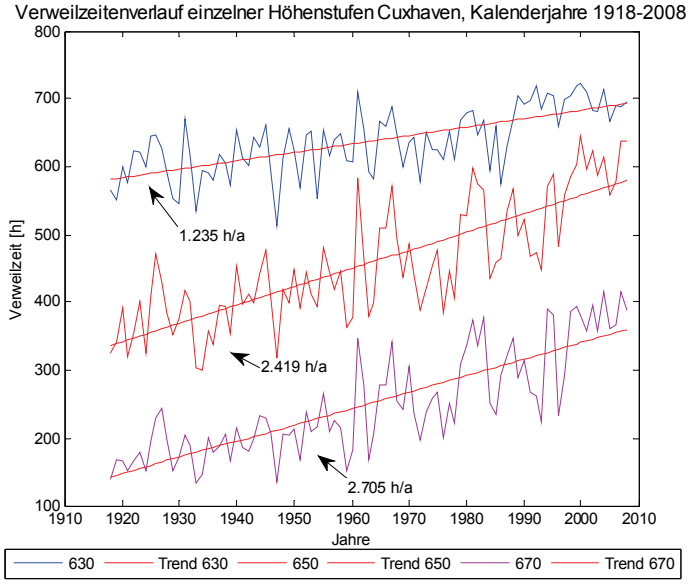


Abb. 51: Verweilzeitenverlauf einzelner Höhenstufen (620-640 cmPN, 640-660 cmPN und 660-680 cmPN, jeweils mit Stufenmitte gekennzeichnet) mit steigenden Trendverläufen, Cuxhaven, 1918-2008

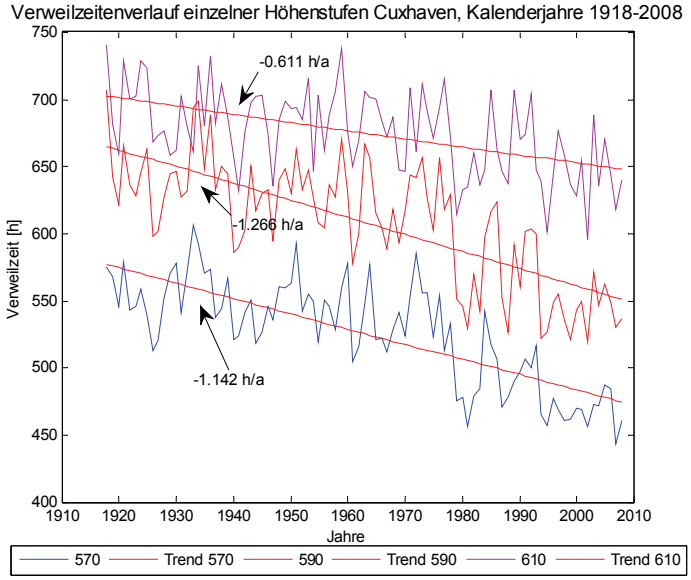


Abb. 52: Verweilzeitenverlauf einzelner Höhenstufen (560-580 cmPN, 580-600 cmPN und 600-620 cmPN, jeweils mit Stufenmitte gekennzeichnet) mit fallenden Trendverläufen, Cuxhaven, 1918-2008

Insgesamt ist für den Pegel Cuxhaven festzuhalten, dass durch die Auswertung langjährig vorliegender Aufzeichnungen des Wasserstands in wenigstens Stundenintervallen aussagekräftige Trendaussagen sowohl zu anteiligen Veränderungen von Verweildauern und Wasserstandshöhen innerhalb der mittleren Tide (Abb. 44) als auch bezogen auf die mittlere Verweildauer innerhalb eines Jahres (Abb. 48) gewinnen lassen.

Für die übrigen untersuchten Pegel wurden, wie eingangs des Kapitels erwähnt, ohne Trendbetrachtungen die jährlichen Verweildauern bestimmt und über den für alle Pegel gemeinsam verfügbaren Zeitraum 2000 bis 2008 als Mittlere Verweildauern jeweils für Kalenderjahre (KJ), Sommerhalbjahre (SoHaJ, 1.5.-31.10.) und Winterhalbjahre (WiHaJ, 1.11.-30.4.) dargestellt. Da verfügbare Stundenwerte für die beiden Pegel Norderney und Emden

erst mit Beginn des Kalenderjahrs 2000 vorlagen, ist für diese beiden Pegel der Auswertezeitraum der Winterhalbjahre um 1 Jahr verkürzt von 2001 bis 2008. Diese Auswertung zeigt dabei die Form der Verteilung der Verweildauern über unterschiedliche Höhenstufen für alle untersuchten Pegel und die Unterschiede zwischen Kalenderjahren und den Teilzeiträumen Sommer- und Winterhalbjahr. Auf den folgenden Seiten sind die entsprechenden Verweildauern von Abb. 53 bis Abb. 56 dargestellt, entsprechende Zahlenwerte sind tabellarisch in Anhang 2 aufgeführt.

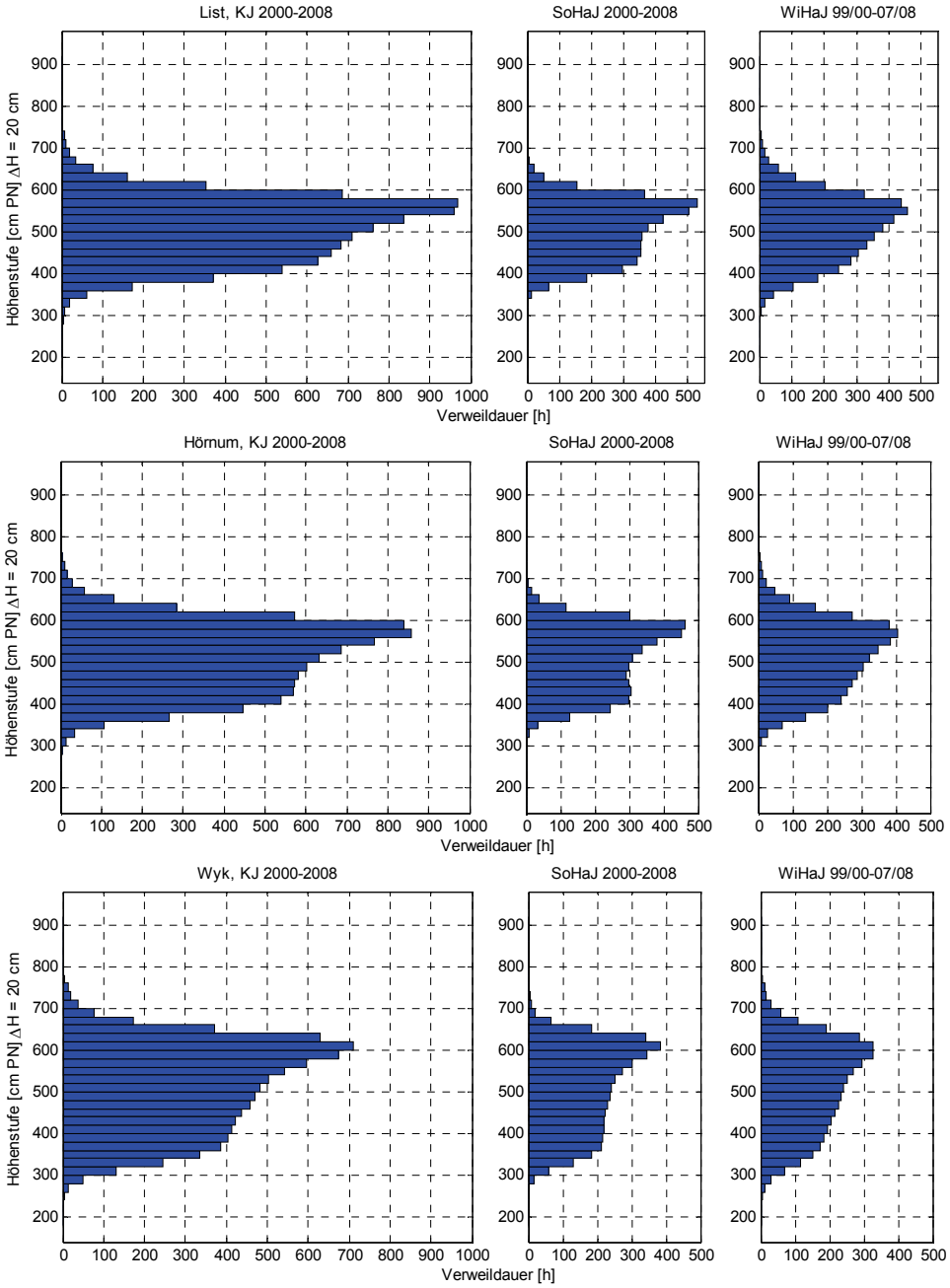


Abb. 53: Pegel List, Hörnum und Wyk. Verweildauer [h] für Kalender-, Sommerhalb- und Winterhalbjahr je 20 cm Höhenstufe (bezogen auf jeweiliges Pegelnull)

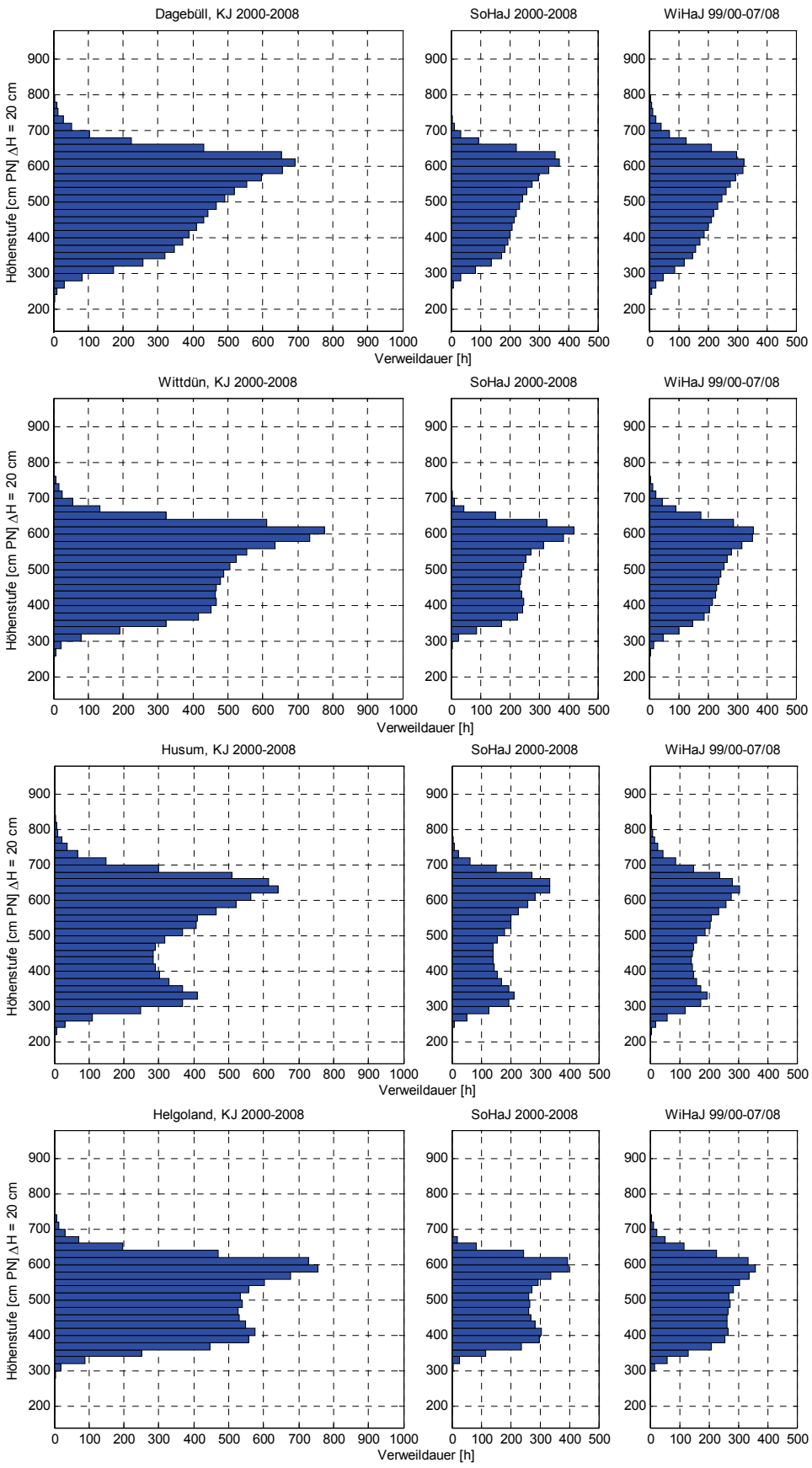


Abb. 54: Pegel Dagebüll, Wittdün, Husum und Helgoland. Verweildauer [h] für Kalender-, Sommerhalb- und Winterhalbjahr je 20 cm Höhenstufe (bezogen auf jeweiliges Pegelnull)

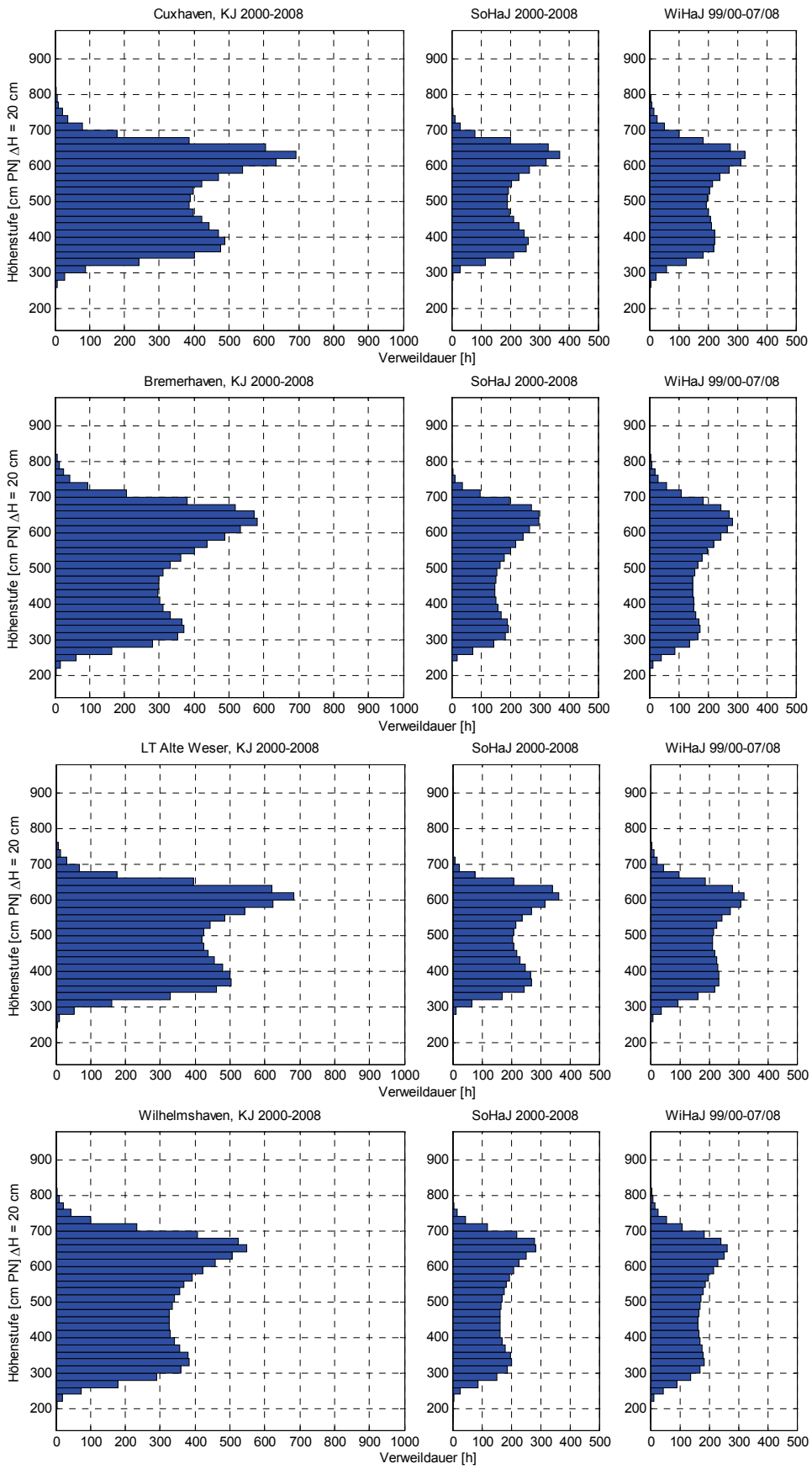


Abb. 55: Pegel Cuxhaven, Bremerhaven, LT Alte Weser und Wilhelmshaven. Verweildauer [h] für Kalender-, Sommerhalb- und Winterhalbjahr je 20 cm Höhenstufe (bezogen auf jeweiliges Pegelnull)

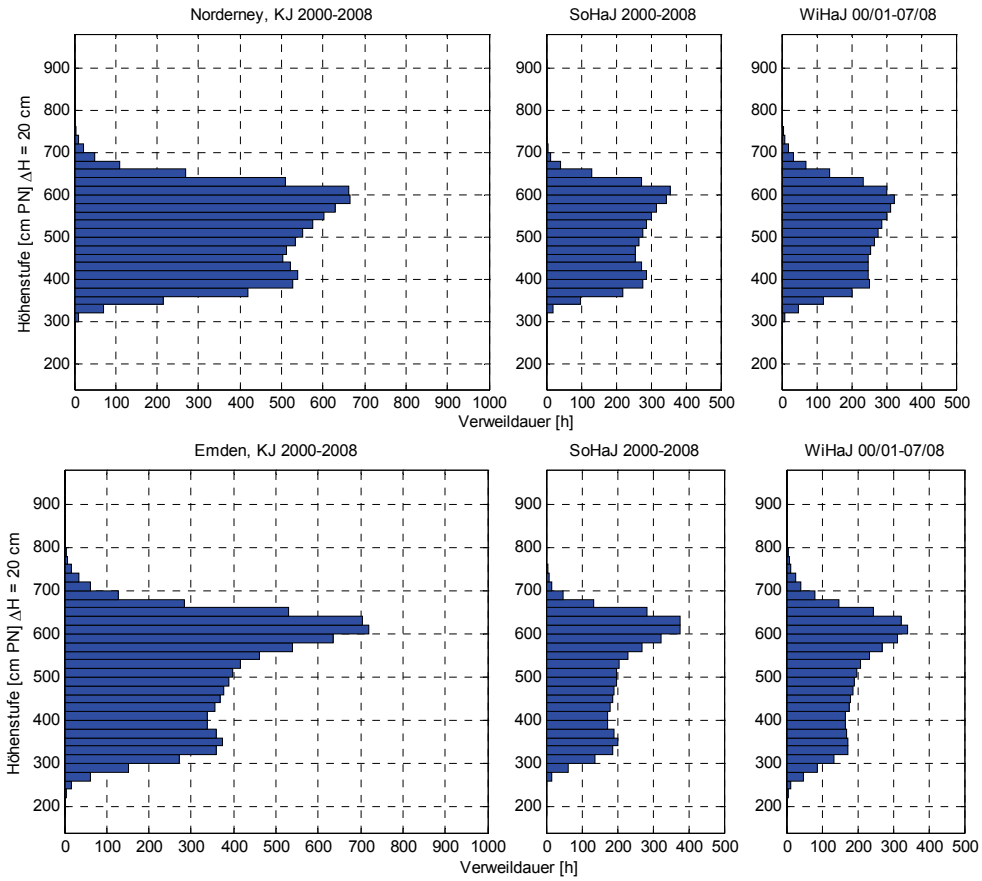


Abb. 56: Pegel Norderney und Emden. Verweildauer [h] für Kalender-, Sommerhalb- und Winterhalbjahr je 20 cm Höhenstufe (bezogen auf jeweiliges Pegelnull)

In Abb. 57 sind die Jährlichen Verweildauern (2008) der einzelnen Pegel entsprechend ihrer geographischen Verteilung um eine Übersichtskarte der Deutschen Bucht angeordnet. Hier wird deutlich, dass die Verteilung der Verweildauern der Wasserstände einem Nord-Süd Unterschied unterliegt. Während die Pegel der schleswig-holsteinischen Küste bis auf Husum eine unimodale Verteilung mit Schwerpunkt der Verweildauern nahe dem mittleren Tidehochwasser aufweisen, zeigen die niedersächsischen Pegel und Husum eine stark bimodal ausgeprägte Verteilung mit Maxima jeweils nahe dem mittlerem Tidehoch- und Tideniedrigwasser.

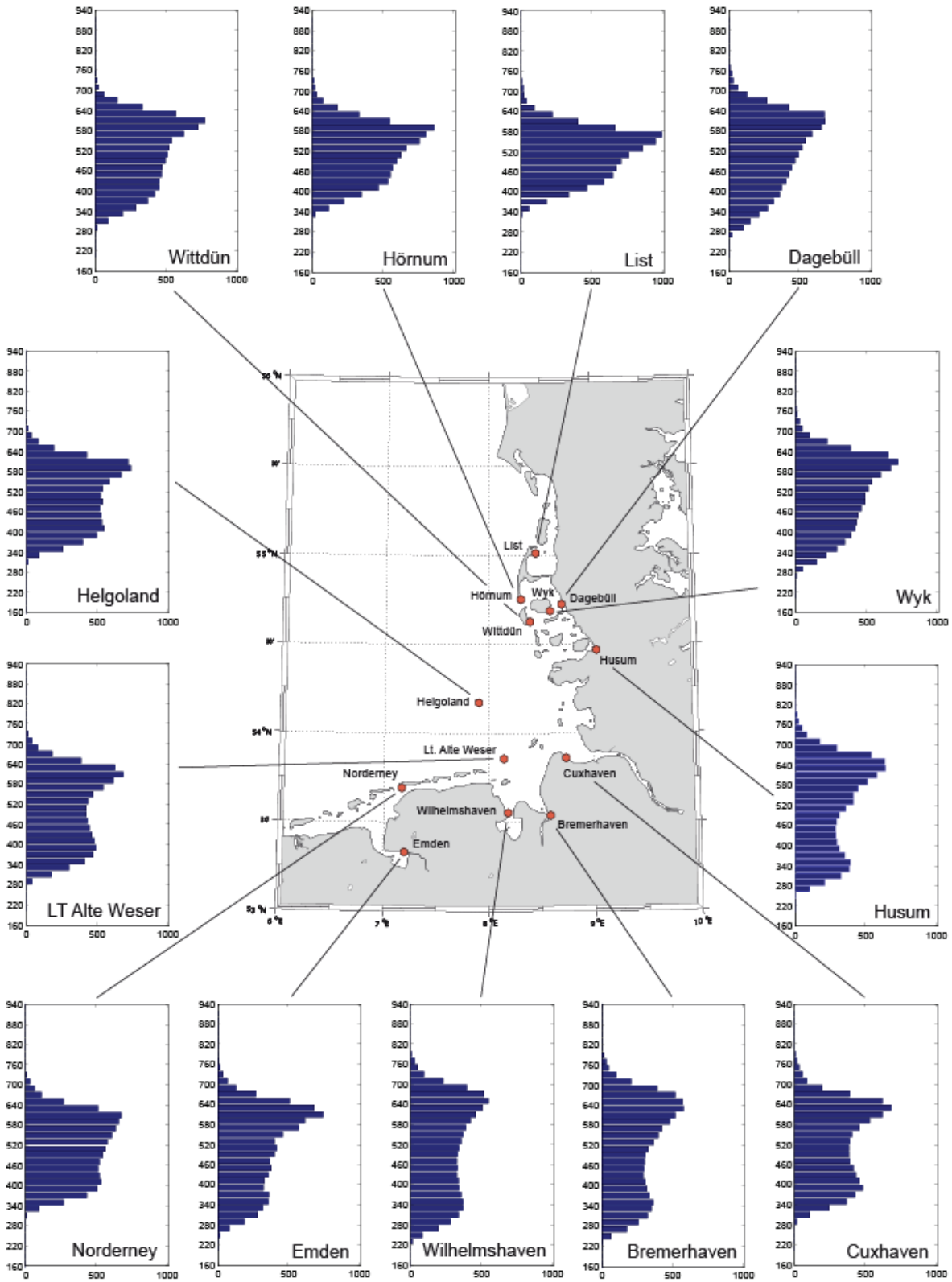


Abb. 57: Jährliche Verweildauern für die Untersuchungspegel (Kalenderjahr 2008)

6.2 Verweildauern von Sturmfluten am Pegel Hörnum und Cuxhaven

Wie in Kapitel 6 erwähnt, konnte für die Auswertung von Verweildauern über die Zeiträume hinaus, für die durchgehende digitalisierte Wasserstandsaufzeichnungen vorliegen, auf durchgehend digitalisierte Ganglinien eines Sturmflutkollektivs von 311 Ereignissen für den Pegel Cuxhaven (Zeitraum 1901 bis 2008) und 199 Ereignissen für den Pegel Hörnum (Zeitraum 1936 bis 2008) aus dem Projekt XtremRisK (OUMERACI et al. 2009) zurückgegriffen werden. In der Folge können also auch die Ausprägungen der Sturmfluttätigkeit für diese beiden Pegel hinsichtlich des Parameters Verweildauer untersucht werden.

Für die Auswertung der Verweildauern von Sturmflutwasserständen in der Deutschen Bucht werden alle Sturmfluten seit 1901 für den Pegel Cuxhaven bzw. seit 1936 für den Pegel Hörnum ausgewertet. Die Ereignisse wurden anhand der allgemeinen Sturmflutdefinition des BSH ausgewählt uns ausgewertet. Eine Sturmflut definiert sich nach den in Tab. 8 aufgeführten Grenzwerten über dem MThw eines Pegels. Die Grenzwerte zur Definition variieren also von Jahr zu Jahr und sind abhängig von den lokalen Verhältnissen an einem Pegelstandort. Dies beinhaltet, dass an einem Pegel ein Sturmflutereignis auftritt, welches an einem anderen Pegel nicht der Definition entspricht und somit nicht im Kollektiv auftritt. Für die Auswahl der Sturmfluten am Pegel Cuxhaven wurden alle Sturmflutereignisse untersucht, die einen Wasserstand größer 1,5 m über dem jeweiligen Jahres-MThw erreicht haben; für den Pegel Hörnum wurde gemäß dem Projekt XtremRisk ein entsprechender Äquivalenzwert über einen quantilsbasierten Ansatz von 1,4 m über dem jewweiligen Jahres-MThw herangezogen.

Tab. 8: Grenzwerte zur Definition einer Sturmflut

Definition	Wasserstandsgrenzwert
Sturmflut	1,5 bis 2,5 m über MThw
schwere Sturmflut	2,5 bis 3,5 m über MThw
sehr schwere Sturmflut	mehr als 3,5 m über MThw

Aufgrund der größeren Datendichte ergeben sich somit 311 Sturmflutereignisse für den Pegel Cuxhaven zwischen 1901 und 2008, während am Pegel Hörnum lediglich 199 Ereignisse aus dem Zeitraum zwischen 1936 und 2008 Berücksichtigung finden. Zur Entwicklung der Sturmflutverweildauern innerhalb dieser Zeitspanne werden die Verweildauern als Jahreswerte ausgewertet. Damit gehen also pro Jahr unterschiedlich viele Sturmflutereignisse mit in die Untersuchung ein, wodurch in einigen Jahren mehrere Sturmflutereignisse und in anderen Jahren gar keine Sturmflutereignisse zu verzeichnen sind. Die Sturmflutverweildauer eines einzelnen Jahres ist demnach definiert als die Anzahl der Überschreitungen eines definierten Grenzwasserstands pro Jahr. Für die Auswertung wird die Verweildauer in der Folge in Stunden analysiert.

Abb. 58 zeigt die Entwicklung der kumulierten jährlichen Sturmflutverweildauern für den Pegel Hörnum zwischen 1936 und 2007. Die Entwicklung der jährlichen Verweildauern ist sehr großen Schwankungen unterworfen. Trotz dieser erheblichen Schwankungen lässt sich eine kontinuierliche Zunahme der Sturmflutverweildauern von Beginn der Untersuchungen bis Anfang der 90er Jahre festhalten, welche sich sowohl in der linearen Regressionsgeraden (grün dargestellt) als auch in zentrisch aufgetragenen 19-jährigen gleitenden Mittel manifestiert. In den beiden darauffolgenden Jahrzehnten ist dann eine eher gegenläu-

fige Entwicklung zu beobachten, die zu einer leichten Abnahme der Sturmflutverweildauern führt. Dieser Verlauf stimmt mit den Erkenntnissen von HOFSTEDE (2009) überein, der die Verweildauern für die Pegel List und Husum untersuchte. Die Untersuchungen beinhalten dabei jedoch nicht die Entwicklung des säkularen Meeresspiegelanstiegs, der in dieser Arbeit in der Auswahl der Sturmfluten Berücksichtigung findet und zu leicht verringerten Tendenzen innerhalb der Stichprobe führt.

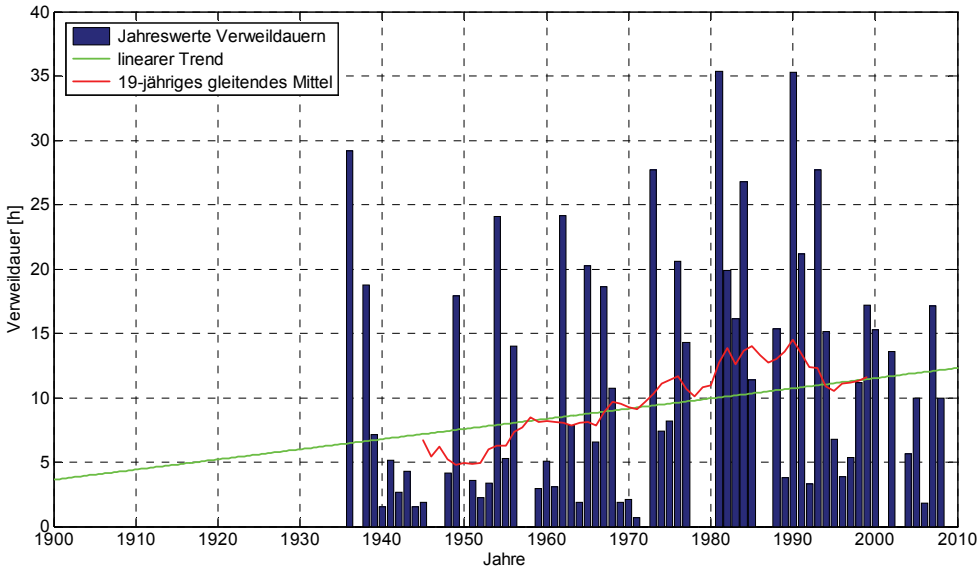


Abb. 58: Entwicklung der kumulierten jährlichen Verweildauern für Sturmflut-Wasserstände am Pegel Hörnum 1936-2008. Grenzwert zur Definition einer Sturmflut zeitabhängig nachgeführt.

Da bei dieser Betrachtung Einzelereignisse zu Jährlichkeiten aufsummiert werden, muss die begriffliche Verknüpfung der Verweildauer mit der Intensität differenziert betrachtet werden. Kommt es in einer jährlichen Periode zu mehreren kleinen Sturmflutereignissen, summiert sich die jährliche Verweildauer zu ähnlich hohen Werten auf, wie es bei es nur ein oder zwei sehr extremen Sturmfluten gegeben ist. Daher ist der Begriff der Sturmflutintensität in diesem Fall nur im Zusammenhang mit der zeitlichen Überschreitung eines definierten Sturmflutgrenzwertes zu sehen. Die Grafiken geben dagegen keinerlei Informationen darüber, ob die Sturmfluten auch höher aufgelaufen sind als in den Jahren zuvor. Da mit der Intensität einer Sturmflut häufig vordergründig die Höhe einer Sturmflut assoziiert wird, muss auch für die Einzelereignisse eine getrennte Betrachtung durchgeführt werden.

In Abb. 59 sind daher alle Einzelereignisse in ihrer zeitlichen Reihenfolge mit den tatsächlichen Sturmflutverweildauern dargestellt. Während es in der Periode zwischen 1936 und 1991 zu insgesamt zu 8 Ereignissen gekommen ist, bei denen die Wasserstände einen Sturmflutgrenzwert um mehr als 10 Stunden überschritten haben, verzeichnet die Periode zwischen 1992 und 2007 kein einziges Ereignis dieser Größenordnung. Sturmflutereignisse mit geringerer Verweildauer treten dagegen häufiger auf als zuvor. Wird eine lineare Regressionsgerade durch das Streuungsdiagramm gelegt, zeichnet sich eine insgesamt eher rückläufige Entwicklung bezüglich der Länge der Sturmflutverweildauern ab. Eine Approximation der Verweildauern durch ein Polynom 4. Grades zeigt eine periodische Entwicklung. Aus der Abbildung lässt sich also schlussfolgern, dass die Sturmfluten im letzten Drittel des Untersuchungszeitraums zwar gehäuft auftreten, die Verweildauer einzelner Sturmfluten hierbei

aber nicht an die Werte des bisherigen Beobachtungszeitraums, insbesondere zwischen Mitte der 70er bis Mitte der 90er Jahre, heranreicht.

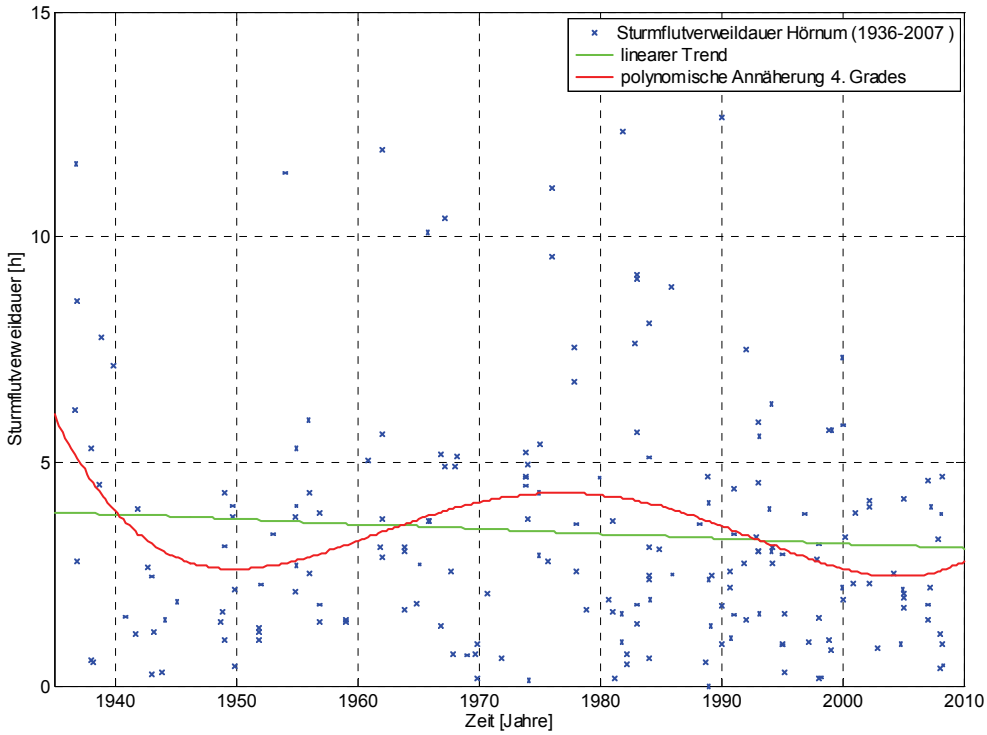


Abb. 59: Entwicklung der Sturmflutverweildauern für Einzelereignisse am Pegel Hörnum

Eine ähnliche Entwicklung bezüglich der jährlichen Verweildauern kann auch am Pegel Cuxhaven in Abb. 60 für diesen Zeitraum beobachtet werden. Allerdings steht hier ein etwas größeres Datenkollektiv zur Verfügung. Die Mehrinformation, die sich aus dem größeren Datenkollektiv gewinnen lässt, relativiert die Erkenntnisse vom Pegel Hörnum ein wenig, da die Verweildauern vor 1936 auf einem etwas höheren Niveau liegen, als in den Jahren zuvor. Dadurch fällt der lineare Trend für die Periode 1901 bis 2008 etwas geringer aus, als für den Zeitraum 1936 bis 2008 am Pegel Hörnum. Betrachtet man die Ergebnisse der Untersuchungen von HOFSTEDE (2009) für den Pegel Husum, welche eine Periode von 1868-2006 umfassen, lässt sich feststellen, dass auch hier ähnliche Entwicklungen in den Daten beobachtet wurden. In diesem Datensatz lässt sich weiterhin eine zyklische Entwicklung erkennen, die die etwas höheren Werte zu Beginn des 20. Jahrhunderts erklären. Sie deutet die Entwicklung von weniger intensiven Sturmfluten Ende des 19. Jahrhunderts zu intensiveren Sturmfluten Anfangs des 20. Jahrhunderts mit einer Abschwächung in der Mitte und einem Wiederanstieg Ende des 20. Jahrhunderts relativ gut an. Wie für den Pegel Hörnum, sind in Abb. 61 auch für den Pegel Cuxhaven alle Einzelereignisse in ihrer zeitlichen Reihenfolge mit den tatsächlichen Sturmflutverweildauern dargestellt.

Um Tendenzen im Zusammenhang mit der Entwicklung der MSL abschätzen zu können werden für die Trenduntersuchungen die selben Zeiträume gewählt wie in den Untersuchungen zum MSL. Die Zeiträume umfassen die Perioden zwischen 1901-2008, 1937-2008, 1951-2008 und 1970-2008 (siehe Tab. 9). Im Gegensatz zum MSL, bei dem ein verstärkter Anstieg im Zeitraum zwischen 1971 und 2008 zu verzeichnen ist, deutet sich für den gleichen Zeitraum eine Beruhigungsphase hinsichtlich der Sturmflutintensität an.

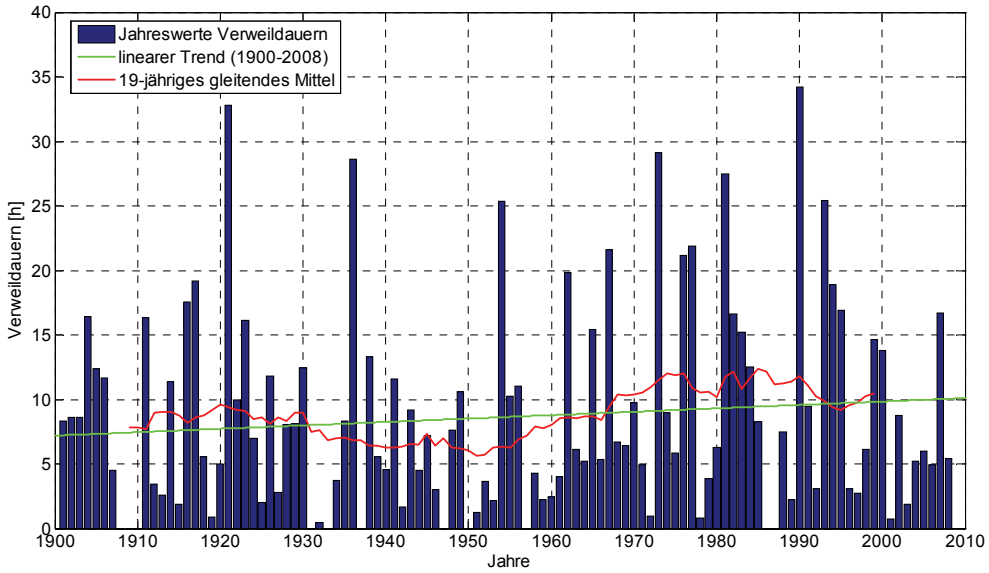


Abb. 60: Entwicklung der kumulierten jährlichen Verweildauern für Sturmflut-Wasserstände am Pegel Cuxhaven 1901-2008. Grenzwert zur Definition einer Sturmflut zeitabhängig nachgeführt.

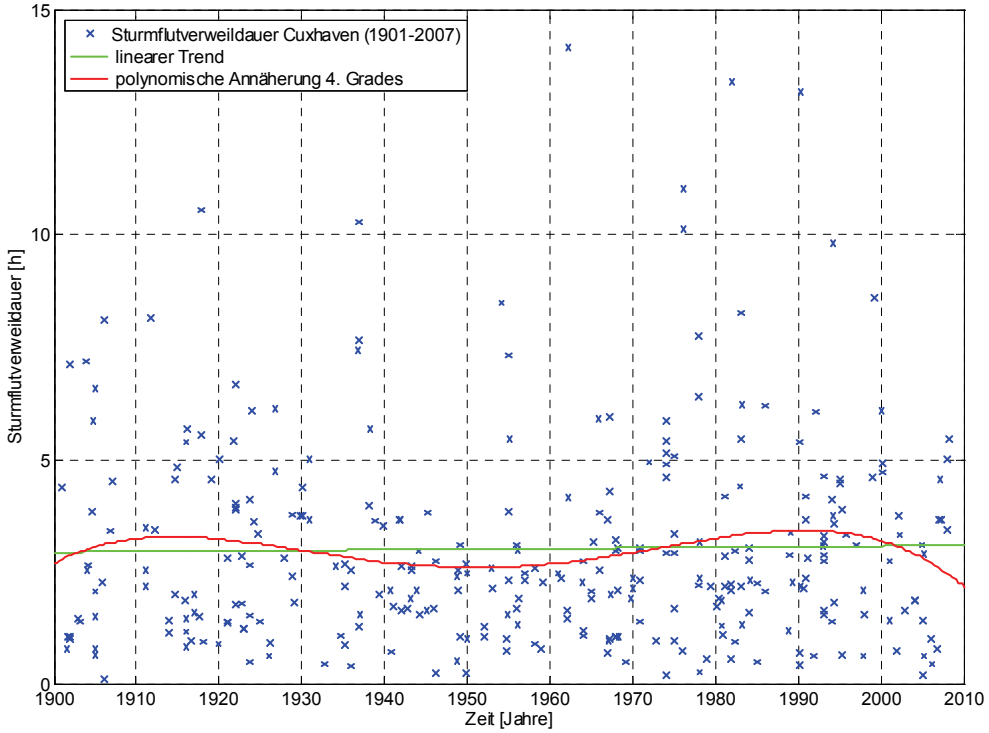


Abb. 61: Entwicklung der Sturmflutverweildauern für Einzelereignisse am Pegel Cuxhaven

Tab. 9: Lineare Trends der jährlichen Sturmflutverweildauer für unterschiedliche Zeiträume

Pegel	Lineare Trends [min/Jahr] für unterschiedliche Zeiträume (incl. Standardfehler)			
	1901-2008	1937-2008	1951-2008	1971-2008
Hörnum	-	6,34 ± 0,21	4,08 ± 9,03	-1,20 ± 20,25
Cuxhaven	1,36 ± 2,89	3,77 ± 5,33	1,44 ± 7,97	-6,99 ± 29,32

7. Fazit und weiterer Forschungsbedarf

Ziel des Forschungsvorhabens AMSeL war es, die Entwicklung des mittleren Meeresspiegels in der Deutschen Bucht über einen möglichst langen Zeitraum auf Basis hochaufgelöster Pegeldaten zu analysieren und gleichzeitig Untersuchungen zu Verweildauern und Tideketten durchzuführen. Einer der Arbeitsschwerpunkte bestand in der Datenrecherche und Aufbereitung qualitativ hochwertiger Zeitreihen. Dabei konnten Qualitätsunterschiede zwischen den historischen (vor 1936) und neueren Datensätzen (ab 1936) festgestellt werden. Bei der Generierung langer Zeitreihen des relativen Mean Sea Levels (RMSL) wurden sowohl hochaufgelöste Daten, als auch Scheitelwerte in Kombination mit dem k-Wert Verfahren genutzt. Dabei kamen verschiedene Stationaritätstests zur Anwendung, wodurch eine hohe Qualität der generierten RMSL-Zeitreihen gewährleistet ist. Aus den Analysen dieser Zeitreihen hat sich ergeben, dass ein langfristiger Meeresspiegelanstieg zu verzeichnen ist. Über die letzten Jahrzehnte hinweg konnte eine Beschleunigung im Anstieg identifiziert werden, welche jedoch unter Berücksichtigung aller verfügbaren Daten nach heutigem Kenntnisstand nicht als außergewöhnlich in den letzten 170 Jahren bezeichnet werden kann. Eine signifikante zusätzliche Beschleunigung im RMSL-Anstieg im Bereich der Deutschen Bucht, welche als anthropogen verursacht bezeichnet oder dem Klimawandel zugeschrieben werden kann, ist demnach nicht eindeutig nachweisbar. Die aktuell hohen Anstiegsraten verdeutlichen gleichzeitig die Notwendigkeit der regelmäßigen Aktualisierung der hier vorgestellten Ergebnisse. Dies wird auf Basis der erarbeiteten Methoden und den entstandenen Softwarelösungen zukünftig mit weniger Aufwand verbunden sein, als es in der hier zugrunde liegenden Bearbeitung der Fall war. Aus dem Vergleich der ermittelten Anstiegsraten für die Bereiche Schleswig-Holstein und Niedersachsen haben sich höhere relative Anstiegsraten für den Bereich Schleswig-Holstein ergeben, welche vermutlich in erster Linie auf stärkere vertikale Landbewegungen (in diesem Fall Landsenkung) zurückzuführen sind. Ein einfacher Ansatz zur Ermittlung der vorherrschenden Vertikalbewegungen an den hier berücksichtigten Pegelstandorten auf Basis der RMSL-Zeitreihen wurde vorgestellt und führte insgesamt zu plausiblen Ergebnissen. Aus dem Vergleich der MSL-Rekonstruktion für die Deutsche Bucht mit einer globalen und einer Nord-Ost-Atlantik Rekonstruktion konnten zunächst neue Erkenntnisse bezüglich der Entwicklung des MSL in der Vergangenheit erzielt werden. Gleichzeitig konnten wichtige Erkenntnisse für den Umgang mit möglichen zukünftigen Meeresspiegelentwicklungen im Rahmen der regionalen Küstenschutzplanung gezogen werden. Bei den Vergleichsbetrachtungen konnten deutliche Unterschiede in der MSL-Entwicklung über die letzten ca. 150 Jahre in der Deutschen Bucht und im globalen Mittel festgestellt werden. Beim Vergleich der MSL-Rekonstruktionen für die Deutsche Bucht und den Nord-Ost-Atlantik konnte über größere Zeitabschnitte des betrachteten Zeitraumes ein ähnliches Verhalten nachgewiesen werden. Auf Basis dieser Ergebnisse konnte die Empfehlung abgeleitet werden, für aktuelle Küstenschutzfragen auf die verfügbaren regionalisierten Meeresspiegelszenarien zurückzugreifen, wie sie beispielsweise von KATSMAN ET AL. (2008 und 2011) und LOWE ET AL. (2009) abgeleitet wurden. Gleichzeitig wurde die Möglichkeit aufgezeigt und diskutiert, die nun verfügbare lange MSL-Rekonstruktion für die Deutsche Bucht direkt zur Ableitung von Szenarien über wenige Dekaden hinweg zu nutzen.

Aus den Analysen zu Verweildauern und Tideketten geht hervor, dass für die jeweils abzuleitenden Parameter positive Trends zu verzeichnen sind. Für die durch unterschiedlich lange Tnw-Ketten erreichten Wasserstände liegen die Trends in der Mehrzahl über den Trends des jeweiligen MTnw und oft auch über dem Trend des jeweiligen MSL. Auch für

die Thw-Ketten liegen die Trends meist über dem Trend des MThw, was in diesem Fall gleichbedeutend mit einer Überschreitung der Anstiegsrate des MSL ist.

Bezüglich der Auftretenshäufigkeit solcher Kettenereignisse erscheint eine signifikante Trendbestimmung aufgrund der geringen Anzahl entsprechender extremer Ereignisse sowie der Beeinflussbarkeit des Trends durch unterschiedlich entlang der Zeitachse angeordneter Einzelereignisse schwierig. Generell wird jedoch die Schlussfolgerung gestützt, dass eine Berücksichtigung des Jahres-MSL (zeitabhängig) sinnvoll und trendreduzierend ist, aber dass dennoch ein gehäuftes Auftreten von Ereignissen, sowohl von Tnw- als auch Thw-Ketten, in den Jahren zwischen Mitte der 70er bis Mitte/Ende der 90er zu beobachten ist. Die Bestimmung des MSL als Referenz für das Auftreten und den Trendverlauf von Kettenereignissen ist damit eine wichtige, jedoch allein nicht hinreichende Größe.

Auch bei den Verweildauern, die langjährig nur für den Pegel Cuxhaven analysiert werden konnten, ist festzuhalten, dass durch die Auswertung langjährig vorliegender Aufzeichnungen des Wasserstands in mindestens Stundenintervallen aussagekräftige Trendaussagen sowohl zu anteiligen Veränderungen von Verweildauern und Wasserstandshöhen innerhalb der mittleren Tide als auch bezogen auf die mittlere Verweildauer innerhalb eines Jahres gewinnen lassen.

Während im Rahmen des dreijährigen Forschungsvorhabens viele interessante und für die Praxis relevante Fragestellungen bearbeitet und teilweise abschließend beantwortet werden konnten, so haben sich während der Bearbeitung auch viele weitere Fragen ergeben. Im Nachfolgenden soll der aus Sicht der Autoren bestehende Forschungsbedarf zu den hier behandelten Themen dargestellt werden. Hierdurch sind weitere unverzichtbare Erkenntnisse zur Verbesserung des Verständnisses des komplexen Systems Ozean und dessen dynamischen Verhaltens zu erwarten.

Beginnend bei den Wasserstandsdaten, welche die Grundlage für die hier vorgestellten Ergebnisse liefern, hat sich bei verschiedenen Arbeitsschritten die Notwendigkeit weiterer Digitalisierkampagnen von Pegeldaten für ein besseres Verständnis der stattgefundenen Änderungen und der Reduzierung der Unsicherheiten gezeigt. Neben längeren Zeitreihen mit hochaufgelösten Daten sind auch die historischen Daten unverzichtbar, um belastbarere Aussagen ableiten zu können. Trotz der bekannten Unsicherheiten bei diesen Daten aus dem 19. und von Anfang des 20. Jahrhunderts, können sie einen wichtigen Beitrag zur Reduzierung der Gesamtunsicherheit leisten. Je mehr lange Zeitreihen verfügbar sind, desto eher sind statistische Verfahren, wie sie beispielsweise in DANGENDORF (2010) beschrieben sind, für die Homogenisierung der Zeitreihen anwendbar.

Bei der Generierung der RMSL-Zeitreihen für die gewählten Untersuchungspegel konnte zwar einerseits der Nutzen des k-Wert Verfahrens (besonders in Kombination mit Stationaritätstests) nachgewiesen werden. Andererseits konnte festgestellt werden, dass auch durch Berücksichtigung dieses Ansatzes nicht dieselbe Qualität bei den RMSL-Zeitreihen erzielt werden kann, wie es auf Basis hochaufgelöster Daten der Fall ist. Hier gilt es weitere Optimierungsansätze zu prüfen.

Beim Vergleich mit der MSL-Rekonstruktion für den Nord-Ost-Atlantik konnte zwar eine gute Übereinstimmung mit der MSL-Rekonstruktion für die deutsche Nordseeküste festgestellt werden, dennoch ergeben sich auch hier, besonders in Bezug auf die ermittelten Anstiegsraten, gewisse Unterschiede. Eine Ausdehnung des hier berücksichtigten Untersuchungsgebietes auf die gesamte Nordsee lässt wichtige Hinweise darüber zu, ob zumindest innerhalb dieses Gebietes ein vergleichbares Verhalten in der MSL-Entwicklung in der Ver-

gangenheit zu beobachten war. Die Beantwortung dieser Frage spielt eine entscheidende Rolle, wenn es darum geht, den Begriff „regional“ genauer zu definieren, wenn über „regionale“ Meerspiegelszenarien diskutiert wird. Stellt sich bei einer solchen großräumigeren Untersuchung heraus, dass auch innerhalb des Nordseebeckens signifikant unterschiedliche Entwicklungen stattgefunden haben, muss über noch kleinräumigere Betrachtungen für die Ableitung von Szenarien nachgedacht werden.

Neben den Pegeldaten können bei zukünftigen Studien auch Satellitendaten berücksichtigt werden, die heute eine Länge > 15 Jahre aufweisen und damit länger zurückreichen als viele der verfügbaren hochaufgelösten Pegelzeitreihen. Hierdurch lassen sich Rückschlüsse über die langfristige Entwicklung des MSL im Küstenbereich im Vergleich zum offenen Ozean ziehen (siehe z.B. WHITE ET AL. 2005). Gleichzeitig können weitere Parameter (wie z.B. atmosphärischer Luftdruck) oder abgeleitete Indizes wie die Nord-Ost-Atlantik-Zirkulation in die Untersuchungen einfließen und zu einem besseren Verständnis der stattfindenden Prozesse beitragen.

Aus Sicht des deutschen Küstenschutzes ist eine Ausdehnung der Untersuchungen auf den Bereich der Ostsee ein unverzichtbarer nächster Schritt, um auch hier wichtige Erkenntnisse zunächst für die stattgefundene, aber auch für die zukünftige Entwicklung des MSL abzuleiten.

Obwohl die hier vorgestellten Analysen und Ergebnisse alle auf Jahreswerten basieren, sind im Rahmen der Projektbearbeitung zusätzlich RMSL-Monatswerte für alle Untersuchungspegel generiert worden. Diese können die Grundlage für detaillierte Analysen der interannuellen Variabilität und deren Entwicklung bilden, wobei gleichzeitig weitere periodische Anteile, die hier nur ansatzweise berücksichtigt wurden, näher betrachtet und untersucht werden können.

Es wurde mehrfach auf die Notwendigkeit der Entwicklung regionaler MSL-Szenarien auf Basis von Modellstudien hingewiesen, welche bei der Planung regionaler Küstenschutzstrategien genutzt werden können. Um die Ergebnisse solcher Studien mit Hilfe von Beobachtungsdaten validieren zu können, sind lange und qualitativ hochwertige Beobachtungszeitreihen des MSL erforderlich, die um den Effekt der vertikalen Landbewegungen korrigiert sind. Während hier ein einfacher Ansatz für eine erste Abschätzung der Trends der Landbewegungen genutzt wurde, sind in Zukunft die Ergebnisse aus CGPS-Messungen (Continuous Global Positioning System) für diesen Zweck heranzuziehen. Bei der Ableitung von Szenarien über wenige Dekaden hinweg kann auf Basis der hier erzielten Ergebnisse empfohlen werden, auch direkt auf lange und qualitativ hochwertige MSL-Rekonstruktionen zurückzugreifen und Extrapolationsverfahren anzuwenden. Geeignete Methoden, die u.a. eine Abschätzung der Unsicherheiten zulassen sind zu entwickeln.

Unter dem Gesichtspunkt des Überflutungsrisikos sind vergleichende Untersuchungen zur Entwicklung der Extremwasserstände und des RMSL im Bereich der Deutschen Nordseeküste zu empfehlen. Diese lassen Erkenntnisse darüber erwarten, ob die beobachten Trends in den Extremwasserständen (z.B. JENSEN 1985; MUDERSBACH 2010) sich einzig durch Änderungen im RMSL erklären lassen, oder ob ggf. andere Faktoren eine Rolle spielen, die in diesem Fall zu identifizieren sind (MUDERSBACH ET AL., in prep.).

8. Danksagung

Das Forschungsvorhaben AMSeL wurde vom Bundesministerium für Bildung und Forschung (BMBF) unter der Leitung des Projektträgers Jülich (PTJ) gefördert (Fördernummer: 03KIS068). Das Vorhaben wurde fachlich vom Kuratorium für Forschung im Küsteningenieurwesen (KFKI) begleitet. Im Rahmen der regelmäßigen Treffen mit der projektbegleitenden Gruppe wurden wichtige Hinweise für die Erarbeitung der hier dargestellten Ergebnisse aus den Reihen der Teilnehmer gegeben. Mitglieder der projektbegleitenden Gruppe waren:

Christoph Blasi, Stefanie Dibbern, Dr. Gabriele Gönnert, Marko Kastens, Dr. Sylvin Müller-Navarra, Dietrich Rupert, Dr. Astrid Sudau, Frank Thorenz (Obmann), als Gast: Detlef Schaller.

Wir bedanken uns außerdem bei den Dienststellen der Wasser- und Schifffahrtsverwaltung des Bundes für die Bereitstellung der benötigten Daten und die Unterstützung bei Rückfragen jeglicher Art zu den verwendeten Datensätzen.

Siegen, März 2011

(Prof. Dr.-Ing. J. Jensen)

(Dr.-Ing. Torsten Frank) (Dipl.-Ing. Thomas Wahl)

(Dipl.-Ing. Sönke Dangendorf)

9. Schriftenverzeichnis

ALBRECHT, F., WAHL, T., JENSEN J., WEISSE , R.: Regional mean sea level changes in the German Bight in the 20th century, Ocean dynamics (in press), 2011.

AUGATH, W.:Stand und Weiterentwicklung der Höhenüberwachung der niedersächsischen Nordseeküste. Nachrichten der Niedersächsischen Vermessungs- und Katasterverwaltung 43: 78-92, 1993.

BARNETT, T. P.: The estimation of global sea level change: a problem of uniqueness. J. Geophys. Res., 89, C5, 7980–7988, 1984.

BEHRE, K.-E.: Eine neue Meeresspiegelkurve für die südliche Nordsee. Probleme der Küstenforschung im südlichen Nordseegebiet 28, 9-63, 2003.

BLASI, C.: Anwendung des Gaußschen Tiefpassfilters auf mittlere Tidehochwasserstände zur Evaluierung der Wasserstandsentwicklung an vier ausgewählten Pegeln der deutschen Nordseeküste. In: Deutsche Gewässerkundliche Mitteilungen, 35, S. 22-28, 1991.

BOX, G.E.P., JENKINS, G.M.: Time Series Analysis- forecasting and control, Holden-Day, London, 1976.

BUNGENSTOCK, F., SCHÄFER, A.: The Holocene relative sea-level curve for the tidal basin of the barrier island Langeoog, German Bight, Southern North Sea. Global and Planetary Change 66(1-2):34-51, 2009.

CAZENAVE, A., DOMINH, K., GUINEHUT, S., BERTHIER, E., LLOVEL, W., RAMILLIEN, G., ABLAIN, M., LARNICOL, G.: Sea level budget over 2003–2008: A reevaluation from GRACE space gravimetry, satellite altimetry and Argo. Global and Planetary Change 65:83–88, 2008.

CHURCH, J.A., GREGORY, J.M., HUYBRECHTS, P., KUHN, M., LAMBECK, K., NHUAN, M.T., QIN, D. AND WOODWORTH, P.L.:'Changes in Sea Level' , in Climate Change 2001: The Scientific Basis, eds. Houghton and Ding, Cambridge Univ. Press, Cambridge, 2001.

CHURCH, J.A., WHITE, N.J., COLEMAN, R., LAMBECK, K., MITROVICA, J.X.: Estimates of the regional distribution of sea level rise over the 1950-2000 period. Journal of Climate 17: 2609-2625, 2004.

CHURCH, J.A., WHITE, N.J.: A 20th century acceleration in global sea-level rise. Geophys. Res. Lett., 33, L01602. doi:10.1029/2005GL024826, 2006.

CHURCH, J.A., WHITE, N.J., AARUP, T., WILSON, S.W., WOODWORTH, P.L., DOMINGUES, C.M., HUNTER, J.R., LAMBECK, K.: Understanding global sea levels: past, present and future. Sustain Sci 3(1):9–22. doi: 10.1007/s11625-008-0042-4, 2008.

DANGENDORF, S.: Anwendung analytischer Verfahren zur Detektion von Instationaritäten in Wasserstandszeitreihen am Beispiel der Deutschen Bucht, Diplomarbeit, Forschungsinstitut Wasser und Umwelt (fwu), Universität Siegen (unveröffentlicht), 2010.

DOMINGUES, C.M., CHURCH, J.A., WHITE, N.J., GLECKLER, P.J., WIJFFELS, S.E., BARKER, P.M., DUNN, J.R.: Improved estimates of upper-ocean warming and multi-decadal sea-level rise. Nature 453:1090-1093. doi:10.1038/nature07080, 2008.

DREBES, H.: Untersuchungen über die Bemessungsgrundlagen tideab-hängiger Ent¬wässerungssysteme. Mitteilungen aus dem Institut für Was-serwirtschaft, Hydrologie u. landwirtschaftlichen Wasserbau der Techni-schen Universität Hannover. Bd. 22. Hannover:, S. 123-249, 1971

FRANK, T.: Hochwassersicherheit in sielbeeinflussten Gewässersystemen am Beispiel des Bongsieler Kanals, Dresdner Wasserbauliche Mitteilungen Heft 34, Dissertation, Dresden, 2007.

FÜHRBÖTER, A., JENSEN, J.: Säkularänderungen der mittleren Tidewasserstände in der Deutschen Bucht, Die Küste, Heft 42, 78-100, 1985 .

FÜHRBÖTER, A.: Über Verweilzeiten und Wellenenergien, Mitteilungen des Leichtweiss-Instituts für Wasserbau, Heft 65/1979

FÜHRBÖTER, A.: Veränderungen des Säkularanstieges an der deutschen Nordseeküste, Wasser und Boden, Heft 9, 1986.

GHIL, M., ALLEN, M.R., DETTINGER, M. D., IDE, K., KONDRASHOV, D., MANN, M. E., ROBERTSON, A. W., SAUNDERS, A., TIAN, Y., VARADI, F. AND YIOU, P.: Advanced spectral methods for climatic time series, Rev. Geophys., 40(1), 1003, doi:10.1029/2000RG000092, 2002.

GOLYANDINA, N., NEKRUTKIN, K., AND ZHIGLËIÌAVSKIÆI, A.A.: Analysis of time series structure. SSA and related techniques, Chapman & Hall/CRC (Monographs on statistics and applied probability, 90), Boca Raton, Florida, 2001.

GÖNNERT, G.; ISERT, K., GIESE, H., PLÜß, A.: Charakterisierung der Tidekurve, In: Die Küste, Heft 68, 2004.

GÖNNERT, G., JENSEN, J., VON STORCH, H., THUMM, S., WAHL, T., WEISSE, R.: Der Meeresspiegelanstieg - Ursachen, Tendenzen und Risikobewertung. In: Die Küste, Heft 76, 2009.

GRINSTED, A., MOORE, J.C., JEVREJEVA, S.: Reconstructing sea level from paleo and projected temperatures 200 to 2100 AD. In: Climate Dynamics, Jg. 34, S. 461–472. Online verfügbar unter doi: 10.1007/s00382-008-0507-2., 2009.

HAIGH I.D., NICHOLLS, R.J., WELLS, N.C.: Mean sea-level trends around the English Channel over the 20th century and their wider context. Continental Shelf Research 29:2083-2098, 2009.

HOFSTEDE, J.: Entwicklung des Meeresspiegels und der Sturmflutwasserstände an den deutschen Küsten: Rückblick und Ausblick. In: Schüttrumpf, Holger (Hg.): 39. Internationales Wasserbau-Symposium Aachen 2009. Wasserwirtschaft und Klimawandel - Fakten, Folgen, Aufgaben, 2009.

HOLGATE, S. J., WOODWORTH, P. L.: Evidence for enhanced coastal sea level rise during the 1990s, Geophysical Research Letters, 31, L07305, 2004.

HOLGATE, S. J.: On the decadal rates of sea level change during the twentieth century, Geophys. Res. Lett., 34, L01602, doi:10.1029/2006GL028492, 2007.

HUNTER, J.R.: Estimating Sea-Level Extremes Under Conditions of Uncertain Sea-Level Rise. Climatic Change, 99, 331-350, 2010.

IKÜS: Aufbau eines integrierten Höhenüberwachungssystems in Küstenregionen durch Kombation höhenrelevanter Sensorik, Abschlussbericht, 2008 (zum Download verfügbar unter: http://tu-dresden.de/die_tu_dresden/fakultaeten/fakultaet_forst_geo_und_hydrowissenschaften/fachrichtung_geo wissenschaften/gi/gg/forschung/ikues)

IOC: Manual on sea-level measurement and interpretation. Volume 3 - Reappraisals and recommendations as of the year 2000. Intergovernmental Oceanographic Commission Manuals and Guides No. 14. IOC, Paris, 2002.

JANSEN, E., OVERPECK, J., BRIFFA, K. R., DUPLESSY, J.-C., JOOS, F., MASSON-DELMOTTE, V., OLAGO, D., OTTO-BLIESNER, B., PELTIER, W. R., RAHMSTORF, S., RAMESH, R., RAYNAUD, D., RIND, D., SOLOMINA, O., VILLALBA, R., ZHANG, D.: Palaeoclimate. In: Climate Change 2007: The Physical Science Basis. Contribution of Working Group I to the Fourth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change [Solomon, S., Qin, D., Manning, M., Chen, Z., Marquis, M., Averyt, K.B., Tignor, M., Miller, H. L. (eds.)]. Cambridge University Press, Cambridge, United Kingdom and New York, NY, USA, 2007.

JENSEN, J.: Änderungen der mittleren Tidewasserstände an der Nordseeküste', Mitteilungen Leichtweiß-Institut der TU Braunschweig, vol. 83, pp. 441-550, 1984.

JENSEN, J.: Über instationäre Entwicklungen der Wasserstände an der deutschen Nordseeküste. (Dissertation) TU Braunschweig, 1985.

JENSEN, J., MÜGGE, H.E., VISSCHER, G.: Untersuchungen zur Wasserstandsentwicklung in der Deutschen Bucht. Die Küste, Heft 47, 1988.

JENSEN, J., HOFTEDE, J. , KUNZ, H., DE RONDE, J., HEINEN, P., SIEFERT, W.: Long Term Water Level Observations and Variations. Coastal Zone '93, Special Volume "Coastlines of the Southern North Sea", 1993.

JENSEN, J.; SPIEß, V.: Untersuchungen zur Häufigkeit von Tnw-Sprüngen und Tnw-Ketten-Erhöhungen an der Westküste Schleswig-Holsteins, Bericht, Forschungsinstitut Wasser und Umwelt (fwu), Universität Siegen (unveröffentlicht), 1996.

JENSEN, J., MUDERSBACH, C.: Zeitliche Änderungen in den Wasserstandszeitreihen an den Deutschen Küsten, in: Glaser R., Schenk, W., Vogt, J., Wießner, R., Zepp, H. und Wardenga, U. (Hrsg.), Berichte zur Deutschen Landeskunde, Themenheft: Küstenszenarien, Band 81, Heft 2, S. 99-112, Selbstverlag Deutsche Akademie für Landeskunde e.V., Leipzig, 2007.

JEVREJEVA, S., GRINSTED, A., MOORE, J.C., HOLGATE, S.: Nonlinear trends and multiyear cycles in sea level records. J. Geophys. Res., 111, C09012. doi:10.1029/2005JC003229, 2006.

JEVREJEVA, S., MOORE, J. C., GRINSTED, A., WOODWORTH, P. L.: Recent global sea level acceleration started over 200 years ago?, Geophys. Res. Lett., 35, L08715, doi:10.1029/2008GL033611, 2008.

JEVREJEVA, S., MOORE, J.C., GRINSTED, A.: How will sea level respond to changes in natural and anthropogenic forcings by 2100. In: Geophysical Research Letters, Jg. 37, L07703. Online verfügbar unter doi:10.1029/2010GL042947., 2010.

KATSMAN, C.A., HAZELEGER, W., DRIJFHOUT, S.S., VAN OLDENBORGH, G.J., BURGERS, G.J.H.: Climate scenarios of sea level rise for the northeast Atlantic Ocean: a study including the effects of ocean dynamics and gravity changes induced by ice melt Climatic Change, 2008.

KATSMAN, C.A., STERL, A., BEERSMA , J.J., VAN DEN BRINK, H.W., HAZELEGER, W. AND 15 CO-AUTHORS: Exploring high-end scenarios for local sea level rise to develop flood protection strategies for a low-lying delta - the Netherlands as an example, Climatic Change (in press), 2011.

KRAMER, J.: Neue Siele und Schöpfwerke in Ostfriesland, Die Küste 18, S. 47-74, 1969.

LASSEN, H., LINKE, G., Braasch, G.: Säkularer Meeresspiegelanstieg und tektonische Senkungsvorgänge an der Nordseeküste. Zeitschr. f. Vermessungsw. und Raumordng., H. 2, 1984.

LASSEN, H.: Örtliche und zeitliche Variationen des Meeresspiegels in der südöstlichen Nordsee, Die Küste, 50, 65-96, 1989.

LENTZ, H.: Fluth und Ebbe und die Wirkungen des Windes auf den Meeresspiegel, Otto Meissner, Hamburg, 1879.

LAWA UND BMV (HG.): Pegelvorschrift. Berlin und Bonn. 26, 27, 28, 31., 1997.

LAWA: Weitergehende Auswertung von Tidekurven und deren Standardisierung. 1. Aufl. Kulturbuchverlag, Berlin, 18 S., 2001.

LOWE, J. A., HOWARD, T. P., PARDAENS, A., TINKER, J., HOLT, J., WAKELIN, S., MILNE, G., LEAKE, J., WOLF, J., HORSBURGH, K., REEDER, T., JENKINS, G., RIDLEY, J., DYE, S., BRADLEY, S.: UK Climate Projections science report: Marine and coastal projections. Met Office Hadley Centre, Exeter, UK, 2009.

LÜDERS, K.: Sturmtidenketten. Jahresbericht 1973 der Forschungsstelle für Insel- und Küstenschutz der Niedersächsischen Wasserwirtschaftsverwaltung, Band XXV, 1973

MANN, H. B.: Nonparametric Test Against Trend, Econometrica, Journal of the Econometric Society, 13, 245–259, 1945.

MANN, M. E.: On smoothing potentially non-stationary climate time series, Geophys. Res. Lett., 31, L07214, doi:10.1029/2004GL019569, 2004.

MANN, M. E.: Smoothing of climate time series revisited, Geophys. Res. Lett., 35, L16708, doi:10.1029/2008GL034716, 2008.

MEEHL, G.A., STOCKER, T.F., COLLINS, W.D., FRIEDLINGSTEIN. P., GAYE, A.T., GREGORY, J.M., KITOH, A., KNUTTI, R., MURPHY, J.M., NODA, A., RAPER, S.C.B., WATTERSON, I.G., WEAVER, A.J., ZHAO, Z.C.: Global Climate Projections. In: Climate Change 2007: The Physical Science Basis. Contribution of Working Group I to the Fourth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change [Solomon, S., Qin, D., Manning, M., Chen, Z., Marquis, M., Averyt, K.B., Tignor, M., Miller, H.L. (eds.)]. Cambridge University Press, Cambridge, United Kingdom and New York, NY, USA, 2007.

MILLER, L., DOUGLAS, B.C.: Gyre-scale atmospheric pressure variations and their relation to 19th and 20th century sea level rise. Geophys. Res. Lett., 34, L16602. doi:10.1029/2007GL030862, 2007.

MITCHUM, G. T., NEREM, R. S., MERRIFIELD, M. A. GEHRELS, W. R.: Modern Sea-Level-Change Estimates, in Understanding Sea-Level Rise and Variability (eds J. A. Church, P. L. Woodworth, T. Aarup, W. S. Wilson), Wiley-Blackwell, Oxford, UK, 2010.

MITROVICA, J.X., TAMISIEA, M.E., DAVIS, J.L., MILNE, J.L.: Recent mass balance of polar ice sheets inferred from patterns of global sea level change. Nature 409, 1026–1029, 2001.

MITROVICA, J.X., GOMEZ, N., CLARK, P.U.: The Sea-Level Fingerprint of West Antarctic Collapse, Science, 323, 753, doi: 10.1126/science.1166510, 2009.

MOORE, J. C., GRINSTED, A., JEVREJEVA S.: The new tools for analyzing the time series relationships and trends, Eos Trans. AGU, 86-24, 2005.

MUDERSBACH, C.: Untersuchungen zur Ermittlung von hydrologischen Bemessungsgrößen mit Verfahren der instationären Extremwertstatistik – Methoden und Anwendungen auf Pegelwasserstände an der Deutschen Nord- und Ostseeküste, Mitteilungen des Forschungsinstituts Wasser und Umwelt der Universität Siegen, Band 1, ISSN 1868-6613, 2010.

MUDERSBACH, C., WAHL, T., JENSEN, J.: Trends in extreme sea levels along the German North Sea coastline compared to regional mean sea level changes (in prep.)

MÜGGE, H.E., JENSEN, J.: Untersuchungen zum Pegelstandort Büsum. Deutsche Gewässerkundliche Mitteilungen DGM, 35. Jahrgang, Heft 1, 1991.

NICHOLLS, R.J.: Impacts of and Responses to Sea-Level Rise, in Understanding Sea-Level Rise and Variability (eds J. A. Church, P. L. Woodworth, T. Aarup and W. S. Wilson), Wiley-Blackwell, Oxford, UK. doi: 10.1002/9781444323276.ch5, 2010.

NICHOLLS, R.J., MARINOVA, N., LOWE, J.A., BROWN, S., VELLINGA, P.: Sea-level rise and its possible impacts given a 'beyond 4°C world' in the twenty-first century. Phil. Trans. R. Soc. A 2011 369, 161-181, 2011.

OUMERACI, H.; JENSEN, J.; GÖNNERT, G.; PASCHE, E.; KORTENHAUS, A.; NAULIN, M.; WAHL, T.; THUMM, S.; UJEYL, G.; BURZEL, A.: Extremsturmfluten an offenen Küsten und in Ästuargebieten: Risikoermittlung und -beherrschung im Klimawandel. Vortrag anlässlich des 14. KFKI-Seminars zur Küstenforschung, Bremerhaven, 2009.

PELTIER, W. R.: Global glacial isostatic adjustment and modern instrumental records of relative sea level history, in Sea Level Rise, edited by B. C. Douglas, M. S. Kearney, and S. P. Leatherman, Elsevier, New York., 2001.

PELTIER, W. R.: Global Glacial Isostasy and the Surface of the Ice-Age Earth: The ICE-5G(VM2) model and GRACE, Ann. Rev. Earth. Planet. Sci., 32, 111–149, doi: 10.1146/annurev.earth.32.082503.144359, 2004.

PUGH, D.T. : Changing sea levels. Effects of tides, weather and climate. Cambridge University Press, 2004.

RAHMSTORF, S.: A Semi-Empirical Approach to Projecting Future Sea-Level Rise, Science, 315, 5810, 368–370. doi: 10.1126/science.1135456, 2007.

RAHMSTORF, S., CAZENAVE, A., CHURCH, J. A., HANSEN, J. E., KEELING, R. F., PARKER, D. E., SOMERVILLE, R. C. J.: Recent climate observations compared to projections. Science 316:709, 2007.

RAY, R.D., DOUGLAS, B.C.: Experiments in Reconstructing Twentieth-Century Sea Levels, Progress in Oceanography (in press), 2011.

ROHLING, E., GRANT, K., HEMLEBEN, C., SIDDALL, M., HOOGAKKER, B., BOLSHAW, M., KUCERA, M.: High rates of sea-level rise during the last interglacial period. Nat. Geosci. 1, 38–42, 2008.

SALAS, J. D., DELLEUR, J. W., YEVJEVICH, V. M., LANE, W. L.: Applied modeling of hydrologic time series. Water Resources Publications, Littlton, United States, 1980.

SALAS J.D.: ANALYSIS AND MODELLING OF HYDROLOGIC TIME SERIES. IN: D.R.Maidment, ed. Handbook of hydrology. New York: McGraw-Hill Inc., 19.1–19.72, 1993.

SCHÖNE, T., SCHÖN, N., THALLER, D.: IGS Tide Gauge Benchmark Monitoring Pilot Project (TIGA): scientific benefits, Journal of Geodesy, 83:249–261, 2009.

SCHÖNFELD, W., JENSEN, J.: Anwendung der Hauptkomponentenanalyse auf Wasserstandszeitreihen von deutschen Nordseepegeln. Die Küste, Heft 52, 1991.

SCHÜTTE, H.: Neuzeitliche Senkungs erscheinungen an unserer Nordseeküste. Jb. Oldenburg, Ver. Altertumskunde Landesgesch. 16, Oldenburg, 1908.

SHENNAN, I., WOODWORTH, P. L.: A comparison of late Holocene and twentieth-century sea-level trends from the UK and North Sea region. Geophysical Journal International, 109: 96–105, 1992.

SIEFERT, W., LASSEN, H.: Gesamtdarstellung der Wasserstandsverhältnisse im Küstenvorfeld der Deutschen Bucht nach neuen Pegelaufzeichnungen. Die Küste, Heft 42, 1985.

VON STORCH, H., ZWIERS, F.W.: Statistical Analysis in Climate Research, Cambridge University Press, ISBN 0 521 45071 3, 494 pp, 1999.

SUDAU, A., WEISS, R.: Der Einfluss vertikaler Landbewegungen auf langwellige Wasserstandsbeobachtungen, In: Mitteilungen des IWW - 40. IWASA, Internationales Wasserbausymposium Aachen (in press), 2011.

TÖPPE, A., BROCKMANN, T.: Tidewasserstände am Pegel Bensersiel seit 1825. Mitteilungen des Leichtweiss-Instituts für Wasserbau, H. 120, Braunschweig, 1992.

TRENBERTH, K. E., JONES, P. D., AMBENJE, P., BOJARIU, R., EASTERLING, D., KLEIN TANK, A., PARKER, D., RAHIMZADEH, F., RENWICK, J. A., RUSTICUCCI, M., SODEN, B., ZHAI, P.: Observations: Surface and Atmospheric Climate Change. In: Climate Change 2007: The Physical Science Basis. Contribution of Working Group I to the Fourth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change [Solomon, S., Qin, D., Manning, M., Chen, Z., Marquis, M., Averyt, K. B., Tignor, M., Miller, H. L. (eds.)]. Cambridge University Press, Cambridge, United Kingdom and New York, NY, USA, 2007.

VELLINGA, P. UND 19 CO-AUTOREN.: Exploring high-end climate change scenarios for flood protection of The Netherlands. International Scientific Assessment carried out at request of the Delta Committee. Scientific report WR-2009-05. KNMI, Alterra, The Netherlands, 2008.

VERMEER, M., RAHMSTORF, S.: Global sea level linked to global temperature. In: Proceedings of the National Academy of Sciences, Jg. 106, H. 51, S. 21527–21532. Online verfügbar unter DOI: 10.1073/pnas.0907765106., 2009.

WAHL, T., JENSEN, J., FRANK, T.: Changing Sea Level and Tidal Dynamics at the German North Sea Coastline. Proc. of the Coastal Cities Summit 2008 – Values and Vulnerabilities, St. Petersburg, Florida, USA, 2008 .

WAHL, T., JENSEN, J., FRANK, T.: On analysing sea level rise in the German Bight since 1844. Nat. Hazards Earth Syst. Sci. 10:171-179. doi:10.5194/nhess-10-171-2010, 2010.

WAHL, T., JENSEN, J., FRANK, T., HAIGH, I.D.: Improved estimates of mean sea level changes in the German Bight over the last 166 years, Ocean Dynamics DOI: 10.1007/s10236-011-0383-x (online first), 2011.

WAHL, T., FRANK, T., JENSEN, J.: Regional patterns of sea level change in the German North Sea related to global patterns – Are IPCC projections reliable for regional planning purposes, 34th IAHR world congress, Brisbane, Australia, 2011 (zur Veröffentlichung angenommen).

WANNINGER, L., ROST, C.; SUDAU, A., WEISS, R., NIEMEIER, W., TENGEN, D., HEINERT, M., JAHN, C. H., HOST, S., SCHENK, A.: Bestimmung von Höhenänderungen im Küstenbereich durch Kombination geodätischer Messtechniken, Die Küste, Heft 76, 2009.

WISSENSCHAFTLICHER BEIRAT DER BUNDESREGIERUNG, GLOBALE UMWELTVERÄNDERUNGEN (WBGU): Die Zukunft der Meere – zu warm, zu hoch, zu sauer. Sondergutachten, Berlin, 2006.

WHITE, N.J., CHURCH, J.A., GREGORY, J.M.: Coastal and global averaged sea level rise for 1950 to 2000. Geophysical Research Letters, 32, L01601, 2005.

WOODWORTH, P.L.: Trends in UK mean sea level, Mar. Geod., 11, 57– 87., 1987.

WOODWORTH, P.L.: A search for accelerations in records of European mean sea level, Int. J. Climat., 10, 129–143, 1990.

WOODWORTH, P.L., TSIMPLIS, M.N., FLATHER, R.A., SHENNAN, I.: A reviewof the trends observed in British Isles mean sea level data measured by tide gauges. Geophys. J. Int., 136, 651–670, 1999.

WOODWORTH, P., WHITE, N.J., JEVREJEVA, S., HOLGATE, S.J., CHUCH, J.A., GEHRELS, W.R.: Evidence for the accelerations of sea level on multi-decade and century time scales. Int. J. Climatol. 29:777-789, doi:10.1002/joc.1771, 2008.

WOODWORTH, P.L., TEFERLE, .FN., BINGLEY, R.M., SHENNAN, I., WILLIAMS, S.D.P.: Trends in UK mean sea level revisited. Geophys. J. Int. 176(22):19–30. doi: 10.1111/j.1365-246X.2008.03942.x, 2009.

WOODWORTH, P.L., POUVREAU, N., WÖPPELMANN, G.: The gyre-scale circulation of the North Atlantic and sea level at Brest. Ocean Sci. 6:185-190, 2010.

WÖPPELMANN, G., POUVREAU, N., SIMON, B.: Brest sea level record: A time series construction back to the early eighteenth century, Ocean Dynamics, 56(5-6), 487–497, doi: 10.1007/s10236-005-0044-z, 2006.

WÖPPELMANN, G., MIGUEZ, B.M., BOUIN, M.N., ALTAMIMI, Z.: Geocentric sea-level trend estimates from GPS analyses at relevant tide gauges world-wide. Global and Planetary Change 57:369-406, 2007.

WÖPPELMANN, G., POUVREAU, N., COULOMB, A., SIMON, B., WOODWORTH, P.L.: Tide gauge datum continuity at Brest since 1711: France's longest sea-level record, Geophys. Res. Lett., 35, L22605, 2008.

WÖPPELMANN, G., LETETREL, C., SANTAMARIA, A., BOUIN, M.N., COLLILIEUX, X., ALTAMIMI, Z., WILLIAMS, S.D.P., MIGUEZ, B.M.: Rates of sea-level change over the past century in a geocentric reference frame. Geophys. Res. Lett., 36, L12607, 2009.

Anhang 1: Pegelprotokoll

Inhalt

1	Einführung	4
2	List	6
3	Hörnum	8
4	Wyk	14
5	Dagebüll	17
6	Wittdün	20
7	Husum	22
8	Helgoland	24
9	Cuxhaven	28
10	Bremerhaven	33
11	Leuchtturm Alte Weser	37
12	Wilhelmshaven	39
13	Norderney	41
14	Emden	45
15	Borkum	48
16	Literatur	52

Abbildungsverzeichnis

Abbildung 1:	Grafische Darstellung der Offsets aus IKÜS am Pegel Hörnum	12
Abbildung 2:	Grafische Darstellung der Offsets aus IKÜS am Pegel Dagebüll	18
Abbildung 3:	Grafische Darstellung der Offsets aus IKÜS am Pegel Helgoland	26
Abbildung 4:	Vergleich der amtlichen Scheitelwertzeitreihen mit verfügbaren hochaufgelösten Daten (Stundenwerte) am Pegel Helgoland (Januar 1960)	27
Abbildung 5:	Grafische Darstellung der Offsets aus IKÜS am Pegel Cuxhaven	30
Abbildung 6:	Vergleich der Stundenwerte mit den amtlich gemessenen Scheitelwerten am Pegel Cuxhaven für den Zeitraum von Januar bis April 1990	31
Abbildung 7:	Oben: k-Wert-Zeitreihe am Pegel Cuxhaven unter Verwendung von hochaufgelösten Daten und amtlichen Scheitelwerten. Mitte: k-Wert-Zeitzreihen für den Zeitraum 1980-2000 unter Berücksichtigung von amtlichen und auf Basis der hochaufgelösten Daten generierter Scheitel. Unten: Im AMSeL-Projekt genutzte k-Wert-Zeitreihe für den Pegel Cuxhaven.	32
Abbildung 8:	Grafische Darstellung der Offsets aus IKÜS am Pegel Bremerhaven Alter Leuchtturm	34
Abbildung 9:	Regressionsbeziehung im Thw zwischen Bremerhaven Doppelschleuse und Alter Leuchtturm	35
Abbildung 10:	Regressionsbeziehung im Tnw zwischen Bremerhaven Doppelschleuse und Alter Leuchtturm	35
Abbildung 11:	Grafische Darstellung der Offsets aus IKÜS am Pegel Wilhelmshaven	40
Abbildung 12:	Grafische Darstellung der Offsets aus IKÜS am Pegel Norderney Riffgat	43
Abbildung 13:	Grafische Darstellung der Offsets aus IKÜS	46
Abbildung 14:	Grafische Darstellung der Offsets aus IKÜS am Pegel Borkum	49
Abbildung 15:	Regressionsbeziehung für Stundenwerte zwischen Borkum Fischerbalje und Südstrand	50
Abbildung 16:	Entwicklung des k-Werts am Pegel Borkum zwischen 1952 und 2008 mit auffälligem Verhalten Ende der 1980er Jahre und zu Beginn dieses Jahrhunderts	51

Tabellenverzeichnis

Tabelle 1:	Überblick über die angebrachten Offsets aus IKÜS für den Pegel Hörnum	12
Tabelle 2:	Überblick über die angebrachten Offsets aus IKÜS für den Pegel Dagebüll	18
Tabelle 3:	Überblick über die angebrachten Offsets aus IKÜS für den Pegel Helgoland	25
Tabelle 4:	Überblick über die angebrachten Offsets aus IKÜS für den Pegel Cuxhaven	29
Tabelle 5:	Überblick über die angebrachten Offsets aus IKÜS für den Pegel Bremerhaven	33
Tabelle 6:	Überblick über die angebrachten Offsets aus IKÜS für den Pegel Wilhelmshaven	39
Tabelle 7:	Überblick über die angebrachten Offsets aus IKÜS für den Pegel Norderney Hafen	42
Tabelle 8:	Überblick über die angebrachten Offsets aus IKÜS für den Pegel Norderney Riffgat	42
Tabelle 9:	Überblick über die angebrachten Offsets aus IKÜS für den Pegel Emden	46
Tabelle 10:	Überblick über die angebrachten Offsets aus IKÜS für den Pegel Borkum	49

1. Einführung

In dem vorliegenden Pegelprotokoll zum Forschungsvorhaben AMSeL sind die wichtigsten Informationen zu den im Projekt berücksichtigten Pegeldaten und deren Aufbereitung dargestellt. Obwohl für die Analysen insgesamt 13 Pegel berücksichtigt wurden, sind hier Informationen für 14 Pegel enthalten. Neben den tatsächlichen Untersuchungspegeln sind zusätzlich Informationen für den Pegel Borkum dargestellt, welcher aufgrund der hier beschriebenen Ungereimtheiten zunächst nicht weiter genutzt werden konnte. Betrachtet man jedoch Länge und zeitliche Auflösung der verfügbaren Daten, so ist zu hoffen, dass der Pegel in Zukunft durch die Einbeziehung entsprechender weiterführender Informationen zusätzlich zu den bisherigen Untersuchungspegeln genutzt werden kann.

Die Daten, die für das Projekt AMSeL genutzt wurden, wurden zu großen Teilen von den Dienststellen der Wasser- und Schifffahrtsverwaltung des Bundes (WSV) zur Verfügung gestellt. In wenigen Fällen wurde auf verfügbare Daten (ausschließlich Scheitelwerte) aus dem Archiv des Forschungsinstituts Wasser und Umwelt (im Folgenden: fwu-Archiv) zurückgegriffen. Letztere wurden im Rahmen eines früheren KFKI-Forschungsvorhabens „Wasserstandsentwicklung in der Deutschen Bucht“ ebenfalls bei den Dienststellen der WSV abgefragt und für die geplanten Analysen aufbereitet. Es sei angemerkt, das alle in dem früheren Projekt angebrachten Änderungen zur Herstellung eines einheitlichen Höhenbezugsniveaus von NN-5,00m (JENSEN ET AL. 1991a,b) zunächst rückgängig gemacht wurden. In den Fällen, in denen für ein und denselben Pegel Datensätze aus unterschiedlichen Quellen genutzt und ggf. für die Analysen miteinander verbunden wurden, erfolgte immer eine Überprüfung der Konsistenz der beiden Datensätze anhand eines Überlappungszeitraumes.

Im Folgenden soll die Struktur des Pegelprotokolls näher erläutert und dargestellt werden, welche Informationen für die einzelnen Pegel enthalten sind:

- **Pegelnummer:** Pegelnummer des Pegels gemäß DGJ
- **Datenquelle:** Hier sind die Bezugsquellen aufgelistet, von denen die entsprechenden Datensätze für die Analysen im AMSeL-Projekt zur Verfügung gestellt wurden.
- **Pegelbetrieb:** Hier sind Informationen über das Einrichtungsdatum des jeweiligen Pegels dargestellt. Es wird dabei zwischen Lattenpegel und Schreibpegel unterschieden. Dies lässt Rückschlüsse darüber zu, ab wann bei zukünftig ggf. stattfindenden Digitalisierkampagnen hochaufgelöste Daten generiert werden können und ab wann grundsätzlich Daten (in Form von Scheitelwerten) zur Verfügung stehen. Informationen darüber, ob seit Einrichtung des Pegels noch einmal größere Lücken vorhanden sind, sind den Pegelstammbüchern zu entnehmen.
- **Umfang der Dateien:** Hieraus geht hervor, für welche Zeiträume hochaufgelöste Daten und für welche Zeiträume Scheitelwerte zur Verfügung stehen und wieviele Datensätze die einzelnen Dateien enthalten. Die genaue zeitliche Auflösung der hochaufgelösten Daten ist angegeben.
- **Korrekturen:**
    - Bevor die eigentlichen Analysen im AMSeL-Projekt durchgeführt wurden, wurden alle verfügbaren Daten noch einmal einer einheitlichen Plausibilisie-

rung unterzogen (siehe Bericht). Im vorliegenden Pegelprotokoll sind die Zeiträume aufgelistet, die aufgrund der dabei erzielten Ergebnisse aus den einzelnen Dateien (mit unterschiedlicher zeitlicher Auflösung) gelöscht wurden. Es handelt sich dabei immer um ganze Tiden (von Tideniedrigwasser bis Tideniedrigwasser).

- Zudem sind die im AMSeL-Projekt berücksichtigten Pegeloffsets (siehe Bericht und IKÜS 2008) grafisch und tabellarisch dargestellt. In den Grafiken repräsentieren die blauen Punkte alle im IKÜS-Projekt ermittelten Offsets, wobei die meisten im Millimeterbereich liegen und daher im AMSeL-Projekt nicht berücksichtigt wurden. Hier wurden ausschließlich Offsets > 1cm angebracht. Offests können nur für diejenigen Pegel angegeben werden, die sowohl in IKÜS, als auch in AMSeL als Untersuchungspegel berücksichtigt wurden.
- Falls sonstige Korrekturen für den jeweiligen Pegel erfolgt sind (z.B. Umrechnung von altem auf neuen Pegelstandort mittels Regression), sind diese im Detail beschrieben.

- **Ermittlung des MSL:** Hier sind wichtige Informationen zu den mittleren k-Werten dargestellt, die für die Generierung von relativen MSL-Zeitreihen auf Basis von Scheitelwerten berücksichtigt wurden. Es ist dargestellt, für welche Zeiträume der relative MSL direkt aus hochaufgelösten Daten ermittelt werden konnte und für welche Zeiträume auf Scheitelwerte zurückgegriffen werden musste.
- **Anmerkungen zum Pegel:** Hier sind nur dann Informationen enthalten, wenn sich für den jeweiligen Pegel Besonderheiten im Rahmen der Analysen im AMSeL-Projekt ergeben haben.

Weitergehende Informationen zu den einzelnen Pegeln und deren Historie können den jeweiligen Pegelstammbüchern entnommen werden, welche von den Wasser- und Schifffahrtsämtern (WSÄ) vorgehalten werden.

2. List

Pegelnummer (DGJ): 95700700

Datenquelle: WSA Tönning, BFG

Pegelbetrieb:

1. Lattenpegelablesungen seit 07.04.1898
2. Schreibpegel seit 07.04.1898

Umfang der Dateien:

1. Scheitelwerte	01.06.1936 bis 31.12.2007	101042	Datensätze
2. Minutenwerte	28.02.1997 bis 31.12.2008	6226561	Datensätze

Korrekturen:

1. Korrekturen nach Plausibilisierung im Projekt AMSeL

   gelöscht: Minutenwerte:

   03.12.1996 13:44 bis 05.12.1996 02:38
   20.12.1996 16:34 bis 01.11.1997 08:59
   30.11.1997 20:43 bis 01.12.1997 09:08
   21.07.1998 06:23 bis 21.07.1998 18:55
   22.10.2000 15:50 bis 23.10.2000 04:07
   01.05.2001 01:42 bis 01.05.2001 14:11
   22.12.2002 21:46 bis 23.12.2002 10:33
   12.05.2003 04:42 bis 12.05.2003 17:00
   20.09.2003 14:17 bis 21.09.2003 02:33
   19.10.2003 13:56 bis 20.10.2003 02:30
   03.11.2003 02:43 bis 03.11.2003 15:43
   11.01.2004 10:53 bis 11.01.2004 22:31
   09.06.2004 01:05 bis 09.06.2004 13:06
   25.06.2004 00:49 bis 25.06.2004 12:35
   06.11.2004 14:38 bis 07.11.2004 03:01

19.12.2004 14:40 bis 20.12.2004 02:41

07.01.2005 04:33 bis 07.01.2005 17:21

29.06.2005 02:08 bis 29.06.2005 13:57

25.11.2005 01:59 bis 26.11.2005 03:47

12.01.2006 07:00 bis 12.01.2006 19:22

09.02.2006 05:36 bis 09.02.2006 17:56

26.02.2006 07:03 bis 26.02.2006 19:39

09.03.2006 15:44 bis 10.03.2006 04:42

02.02.2007 08:58 bis 02.02.2007 20:49

11.02.2007 13:19 bis 12.02.2007 01:14

14.03.2007 02:40 bis 14.03.2007 15:22

12.04.2007 02:25 bis 12.04.2007 14:48

21.08.2007 00:58 bis 21.08.2007 13:17

06.10.2007 17:07 bis 07.10.2007 05:21

18.01.2008 02:38 bis 18.01.2008 15:24

16.02.2008 15:25 bis 17.02.2008 04:13

07.07.2008 23:53 bis 08.07.2008 11:51

2. keine Offsets für diesen Pegel vorhanden

Ermittlung des MSL:

1. Ermittlung der k-Werte aus Minutenwerten von 1997-2008
2. Stationaritätsbetrachtung: k-Wert stationär
3. Ermittlung der MSL Reihe 1997-2008 und Rekonstruktion der MSL Reihe 1936-1997 mit mittlerem k = 0,4539

Anmerkungen zum Pegel:

Es wurden keine besonderen Auffälligkeiten im Rahmen der Untersuchungen festgestellt.

3. Hörnum

Pegelnummer (DGJ): 95700506

Datenquelle: WSA Tönning, BFG, LSBG

Pegelbetrieb:

1. Schreibpegel seit 1913

Umfang der Dateien:

1.	Scheitelwerte	01.06.1936 bis 31.12.2008	102456	Datensätze
2.	Minutenwerte	31.10.1999 bis 31.12.2008	4832999	Datensätze
3.	Stundenwerte	28.10.1950 bis 31.10.1951	8857	Datensätze
		01.12.1964 bis 05.12.1965	8857	Datensätze
		30.11.1975 bis 03.12.1976	8857	Datensätze
		30.11.1986 bis 04.12.1987	8856	Datensätze

Korrekturen:

1. Korrekturen nach Plausibilisierung im Projekt AMSeL

   gelöscht: Minutenwerte:

   15.11.1999 11:53 bis 15.11.1999 23:57

   21.02.2000 09:31 bis 21.02.2000 21:28

   06.04.2000 09:13 bis 06.04.2000 21:30

   07.04.2000 09:56 bis 07.04.2000 22:11

   28.04.2000 02:09 bis 25.04.2000 14:01

   03.05.2000 19:47 bis 04.04.2000 08:12

   10.05.2000 12:21 bis 11.05.2000 01:06

   08.07.2000 00:50 bis 08.07.2000 12:52

   23.07.2000 00:02 bis 23.07.2000 12:04

   14.09.2000 20:42 bis 15.09.2000 08:45

   26.09.2000 19:01 bis 27.09.2000 07:04

   29.09.2000 21:16 bis 30.09.2000 09:25

03.10.2000 23:28 bis 04.10.2000 11:31

17.11.2000 23:31 bis 18.11.2000 12:18

20.12.2000 15:50 bis 21.12.2000 03:51

30.01.2000 11:29 bis 30.01.2001 23:28

07.05.2001 08:04 bis 07.05.2001 20:19

08.05.2001 08:42 bis 08.05.2001 20:59

12.05.2001 23:25 bis 13.05.2001 11:24

15.05.2001 00:37 bis 15.05.2001 12:32

23.05.2001 08:12 bis 24.05.2001 08:43

17.10.2001 20:39 bis 18.10.2001 08:48

13.12.2001 06:33 bis 13.12.2001 19:10

21.04.2002 13:21 bis 22.04.2002 02:19

12.10.2002 23:54 bis 13.10.2002 12:33

14.12.2002 15:51 bis 15.12.2002 04:30

15.02.2003 19:11 bis 16.02.2003 07:51

10.04.2003 00:42 bis 10.04.2003 12:45

16.04.2003 07:42 bis 16.04.2003 19:54

17.08.2003 23:41 bis 18.08.2003 11:34

16.10.2003 11:10 bis 16.10.2003 23:17

18.10.2003 12:14 bis 19.10.2003 00:22

22.10.2003 04:43 bis 22.10.2003 17:32

20.02.2004 20:45 bis 21.02.2004 09:05

09.04.2004 10:42 bis 09.04.2004 22:58

12.04.2004 12:42 bis 13.04.2004 01:35

09.07.2004 00:57 bis 09.07.2004 12:52

03.08.2004 22:23 bis 04.08.2004 10:25

25.08.2004 01:25 bis 25:08.2004 13:56

26.01.2005 09:10 bis 26.01.2005 21:12

31.03.2005 23:45 bis 01.04.2005 11:59

19.04.2005 03:48 bis 20.04.2005 05:11

13.05.2005 23:35 bis 14.05.2005 11:34

10.07.2005 22:53 bis 11.07.2005 10:53

03.09.2005 20:37 bis 04.09.2005 08:32

04.09.2005 20:57 bis 05.09.2005 08:56

04.10.2005 21:04 bis 05.10.2005 09:11

15.10.2005 18:38 bis 16.10.2005 06:46

17.10.2005 07:32 bis 17.10.2005 20:10

07.01.2006 13:42 bis 08.01.2006 01:47

30.01.2006 08:49 bis 30.01.2006 20:55

12.03.2006 06:59 bis 12.03.2006 19:05

03.05.2006 23:54 bis 04.05.2006 12:00

02.07.2006 00:07 bis 02.07.2006 12:02

14.07.2006 23:11 bis 15.07.2006 11:05

11.10.2006 22:53 bis 12.10.2006 11:00

24.12.2006 10:39 bis 24.12.2006 22:46

20.02.2007 10:04 bis 20.02.2007 22:10

26.03.2007 00:59 bis 27.03.2007 01:48

27:03.2007 14:03 bis 28.03.2007 03:16

28.03.2007 15:43 bis 29.03.2007 04:56

31.03.2007 07:07 bis 31.03.2007 19:17

05.04.2007 21:53 bis 06.04.2007 10:09

29.04.2007 18:36 bis 30.04.2007 07:10

01.05.2007 19:52 bis 02.05.2007 08:10

16.05.2007 07:13 bis 16.05.2007 19:25

02.08.2007 22:39 bis 03.08.2007 10:50

05.08.2007 00:01 bis 05.08.2007 12:04

08.08.2007 15:12 bis 09.08.2007 03:42

23.08.2007 01:58 bis 24.08.2007 16:05

02.10.2007 23:53 bis 03.10.2007 12:19

24.10.2007 18:45 bis 25.10.2007 06:46

20.12.2007 03:16 bis 20.12.2007 16:06

21.12.2007 17:08 bis 22.12.2007 05:36

02.01.2008 02:08 bis 03.01.2008 03:05

15.02.2008 01:17 bis 15.02.2008 13:48

05.03.2008 06:48 bis 05.03.2008 18:36

28.03.2008 11:21 bis 28.03.2008 23:57

20.04.2008 08:12 bis 20.04.2008 20:22

22.04.2008 21:32 bis 23.04.2008 09:35

23.04.2008 21:56 bis 24.04.2008 09:59

04.05.2008 19:05 bis 05.05.2008 07:36

06.05.2008 08:23 bis 06.05.2008 20:46

16.05.2008 05:21 bis 16.05.2008 17:34

19.05.2008 07:33 bis 19.05.2008 19:57

20.05.2008 08:14 bis 21.05.2008 08:44

23.05.2008 09:44 bis 23.05.2008 22:15

05.06.2008 21:16 bis 06.06.2008 09:23

06.06.2008 22:15 bis 07.06.2008 10:18

22.07.2008 22:56 bis 23.07.2008 10:54

27.07.2008 01:31 bis 27.07.2008 13:59

28.07.2008 02:38 bis 28.07.2008 15:07

09.08.2008 00:39 bis 09.08.2008 12:54

17.08.2008 20:44 bis 18.08.2008 08:43

23.08.2008 11:55 bis 24.08.2008 00:10

14.09.2008 19:50 bis 15.09.2008 20:28

20.09.2008 11:07 bis 21.09.2008 11:41

23.09.2008 13:44 bis 24.09.2008 02:00

04.11.2008 11:19 bis 04.11.2008 23:16

05.11.2008 12:03 bis 05.11.2008 23:54

13.12.2008 20:23 bis 14.12.2008 20:57

29.12.2008 21:23 bis 30.12.2008 09:46

2. Anbringung der Offsets aus dem Projekt IKÜS (IKÜS 2008)

Tabelle 1: Überblick über die angebrachten Offsets aus IKÜS für den Pegel Hörnum

Zeitraum	Offsets [cm]
07.06.1963	1

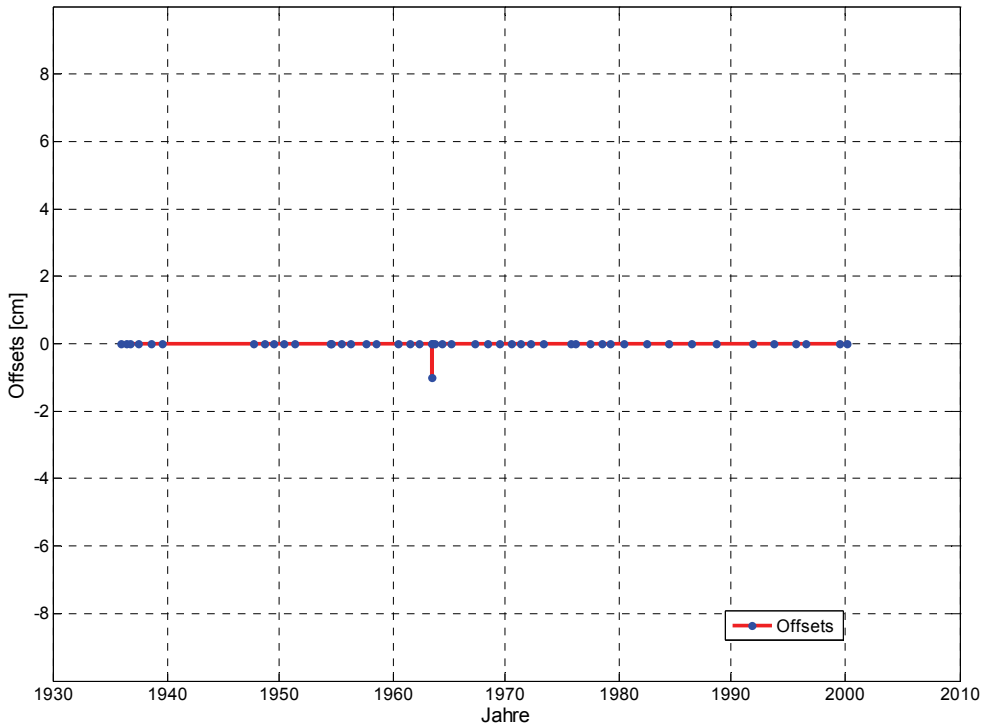


Abbildung 1: Grafische Darstellung der Offsets aus IKÜS am Pegel Hörnum

Ermittlung des MSL:

1. Ermittlung der k-Werte aus den Minutenwerten von 1999-2008
2. Stationaritätsbetrachtung: k-Wert stationär
3. Ermittlung der MSL Reihen 1950-1951, 1964-1965, 1974-1975, 1986-1987 und 1999-2008 und Rekonstruktion 1987-1999 mit mittlerem k = 0,4575 und vor 1987 mit mittlerem k = 0,4442

Anmerkungen zum Pegel:

Für den Pegel Hörnum haben sich vergleichsweise viele „Folgewertfehler“ ergeben, was bedeutet, dass der Wasserstand häufig über einen längeren Zeitraum (> 60 Minuten) ein und denselben Wert annimmt. Der Pegel liegt im Südosten der Insel Sylt und ist in einem kleinen Hafenbecken auf der Rückseite der Hafenmauer, vor Seegang und Brandung geschützt, angeordnet. Es liegt die Vermu-

tung nahe, dass aufgrund dieser Lage die Wasserstände längere Zeit auf ein und demselben Niveau verharren, da ein Abfließen aus dem Hafenbecken bei länger anhaltenden Ostwindlagen nur beding möglich ist. Die Anzahl der gelöschten Tiden ist unter Berücksichtigung aller verfügbaren Daten dennoch gering und es konnten relative MSL-Werte für alle Jahre ermittelt werden.

Nähere Informationen zu den beiden unterschiedlichen k-Werten, die für die Rekonstruk-tion des relativen MSL für verschiedene Zeiträume genutzt wurden, sind dem Bericht zu entnehmen.

4. Wyk

Pegelnummer (DGJ): 95710303

Datenquelle: LKN Husum

Pegelbetrieb:

1. Schreibpegel seit 01.11.1938

Korrekturen:

1. Korrekturen nach Plausibilisierung im Projekt AMSeL

   gelöscht: Minutenwerte:

   03.04.1951 18:48 bis 04.04.1951 07:09

   01.03.1994 10:29 bis 01.03.1994 22:33

   24.01.1995 12:52 bis 26.01.1995 02:27

   27.05.1995 06:57 bis 29.05.1995 20:43

   22.08.1995 17:36 bis 24.08.1995 19:28

   30.09.1995 11:59 bis 01.10.1995 12:23

   11.10.1995 09:37 bis 11.10.1995 22:06

   14.02.1996 02:05 bis 14.02.1996 14:45

   27.02.1996 13:43 bis 28.02.1996 02:22

   24.05.1996 00:12 bis 24.05.1996 12:10

   30.09.1996 22:55 bis 01.10.1996 10:58

   19.03.1997 04:15 bis 20.03.1997 05:46

   30.09.1997 20:07 bis 01.10.1997 08:09

   10.11.1997 02:52 bis 10.11.1997 15:50

   28.07.1998 11:17 bis 28.07.1998 23:40

   03.08.1998 15:52 bis 04.08.1998 04:40

   30.09.1998 13:59 bis 01.10.1998 02:12

   20.08.1999 01:35 bis 20.08.1999 13:56

   30.09.1999 23:35 bis 01.10.1999 11:30

   15.02.2000 15:33 bis 16.02.2000 16:49

11.06.2000 03:17 bis 12.06.2000 04:27

30.09.2000 22:17 bis 01.10.2000 10:27

16.03.2001 12:54 bis 18.03.2001 01:34

08.09.2001 23:54 bis 12.09.2001 14:02

30.09.2001 19:23 bis 01.10.2001 07:31

06.11.2001 23:39 bis 08.11.2001 12:47

09.09.2002 22:15 bis 11.09.2002 10:17

12.09.2002 23:20 bis 16.09.2002 15:36

30.09.2002 13:01 bis 01.10.2002 14:11

23.12.2002 22:36 bis 24.12.2002 22:47

16.08.2003 01:31 bis 22:08.2003 02:06

30.09.2003 23:23 bis 01.10.2003 11:43

01.11.2003 12:51 bis 01.12.2003 11:24

01.11.2005 07:40 bis 01.11.2005 19:55

07.11.2005 23:39 bis 08.11.2005 12:14

11.11.2005 02:50 bis 11.11.2005 15:48

20.01.2006 11:47 bis 22.01.2006 12:38

15.02.2006 21:42 bis 16.02.2006 22:27

07.02.2006 15:03 bis 08.02.2006 15:29

2. keine Offsets für diesen Pegel vorhanden
3. sonstige Korrekturen/Anpassungen:

   Für die letzten beiden Monate des Jahres 2008, lagen zum Zeitpunkt der Bearbeitung keine Scheitelwertinformationen, sondern ausschließlich hochaufgelöste Daten vor. Um dennoch die k-Monatswerte ermitteln zu können, wurden die Scheitelwerte für Nov./Dez. 2008 auf Basis der hochaufgelösten Daten mittels Min./Max.-Verfahren generiert. Aus Kontrollrechnungen für den Überschneidungszeitraum konnten maximale Abweichungen in der Höhe von ± 3cm und in den Eintrittszeiten von ±10 Minuten festgestellt werden. Die Eintrittszeiten sind bei der Ermittlung von Monatswerten von untergeordneter Bedeutung und die erzielte Höhengenauigkeit kann für die hier durchgeführten Analysen als Ausreichend angesehen werden.

Ermittlung des MSL:

1. Ermittlung der k-Werte aus den Minutenwerten von 1994-2008
2. Stationaritätsbetrachtung: k-Wert stationär
3. Ermittlung der MSL Reihen 1951-1952 und 1994-2008 und Rekonstruktion der MSL Reihe 1952-1994 mit mittlerem k = 0,4487

Anmerkungen zum Pegel:

Es wurden keine besonderen Auffälligkeiten im Rahmen der Untersuchungen festgestellt.

5. Dagebüll

Pegelnummer (DGJ): 95700404

Datenquelle: WSA Tönning, BfG

Pegelbetrieb:

1. Lattenpegelablesungen seit Januar 1873
2. Schreibpegel ab 15.07.1914

Umfang der Dateien:

1. Scheitelwerte 01.11.1935 bis 31.12.2007 101804 Datensätze
2. Minutenwerte 28.02.1997 bis 31.12.2008 6226561 Datensätze

Korrekturen:

1. Korrekturen nach Plausibilisierung im Projekt AMSeL

   gelöscht: Minutenwerte:

   20.03.1997 18:25 bis 22.03.1997 07:59

   26.03.1997 22:29 bis 28.03.1997 11:16

   01.04.1997 13:45 bis 31.10.1999 00:33

   08.01.2002 00:00 bis 08.01.2002 00:02

   10.01.2002 00:00 bis 10.01.2002 00:02

   11.01.2002 00:00 bis 11.01.2002 00:02

   09.01.2003 00:00 bis 09.01.2002 00:03

   07.08.2007 02:04 bis 08.08.2007 02:50

   01.02.2000 05:18 bis 01.02.2000 17:45

   11.05.2008 00:21 bis 12.05.2008 01:16

2. Anbringung der Offsets aus dem Projekt IKÜS (IKÜS 2008)

Tabelle 2: Überblick über die angebrachten Offsets aus IKÜS für den Pegel Dagebüll

Zeitraum	Offsets [cm]
10.06.1948 bis 11.05.1950	-1
13.07.1955 bis 16.04.1956	3
14.06.1963 bis 14.06.1963	-2
07.03.1964 bis 07.03.1964	-4
25.03.1970 bis 17.08.1971	-1
21.05.1973 bis 05.05.1974	1
17.03.1975 bis 24.10.1976	6
25.10.1976 bis 27.06.1977	2
28.06.1977 bis 23.07.1978	-1
21.05.1996 bis 16.06.1997	1

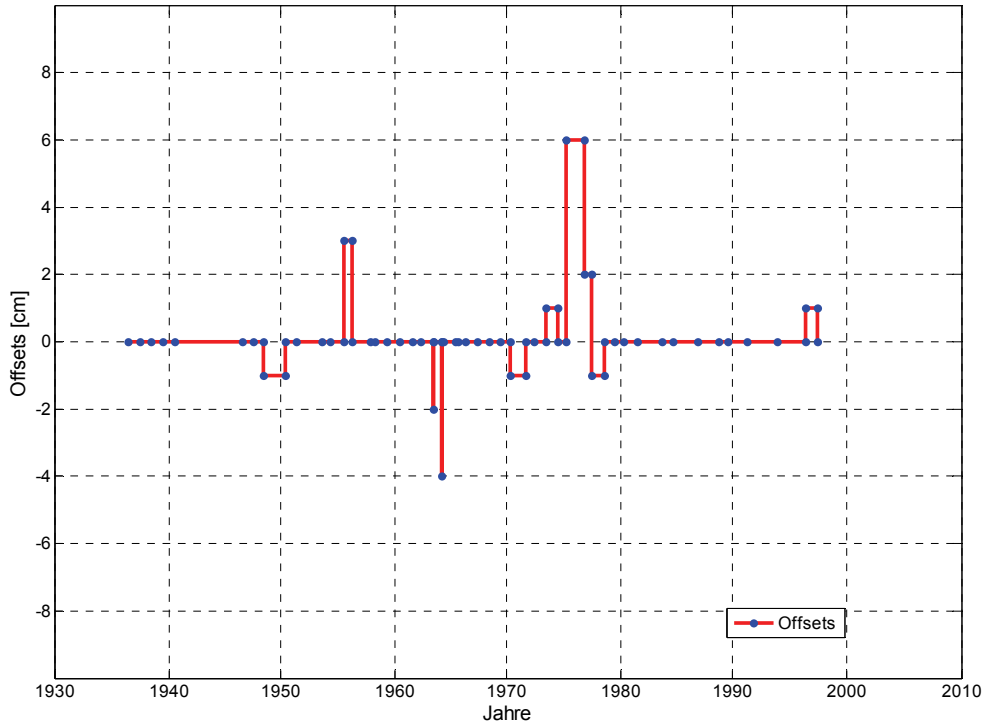


Abbildung 2: Grafische Darstellung der Offsets aus IKÜS am Pegel Dagebüll

Ermittlung MSL:

1. Ermittlung der k-Werte aus den Minutenwerten von 1999-2008
2. Stationaritätsbetrachtungen (k-Wert stationär)
3. Ermittlung der MSL Reihe 1999-2008 und Rekonstruktion der MSL-Reihe 1936-1998 mit mittlerem k = 0,4363

Anmerkungen zum Pegel:

Es wurden keine besonderen Auffälligkeiten im Rahmen der Untersuchungen festgestellt.

6. Wittdün

Pegelnummer (DGJ): 95700109

Datenquelle: WSA Tönning, BfG

Pegelbetrieb:

1. Schreibpegel seit 03.07.1914

Umfang der Dateien:

1.	Scheitelwerte	01.11.1935 bis 31.12.2007	101865	Datensätze
2.	Minutenwerte	05.10.1999 bis 31.12.2008	4861440	Datensätze

Korrekturen:

1. Korrekturen nach Plausibilisierung im Projekt AMSeL

   gelöscht: Minutenwerte:

   13.10.1999 10:01 bis 15.10.1999 23:05

   27.10.1999 21:37 bis 28.10.1999 22:18

   05.09.2008 10:59 bis 05.09.2008 23:18

   06.09.2008 23:30 bis 07.09.2008 11:45

   27.06.2008 01:07 bis 27.06.2008 13:08

   25.08.2008 13:26 bis 26.08.2008 01:41

   09.09.2008 13:36 bis 10.09.2008 15:21

2. keine Offsets für diesen Pegel vorhanden

Ermittlung des MSL

1. Ermittlung der k-Werte aus den Minutenwerten von 1999-2008
2. Stationaritätsbetrachtung: k-Wert stationär
3. Ermittlung der MSL Reihe von 1999-2008 und Rekonstruktion der MSL Reihe von 1935-1999 mit mittlerem k = 0,4516

Anmerkungen zum Pegel:

Es wurden keine besonderen Auffälligkeiten im Rahmen der Untersuchungen festgestellt.

7. Husum

Pegelnummer (DGJ): 95300202

Datenquelle: WSA Tönning, BFG

Pegelbetrieb:

1. Lattenpegelablesungen seit 01.04.1867
2. Schreibpegel seit 15.07.1905

Umfang der Dateien:

1. Scheitelwerte	01.11.1935 bis 31.12.2007	101865	Datensätze
2. Minutenwerte	01.10.1999 bis 31.12.2008	4865582	Datensätze

Korrekturen:

1. Korrekturen nach Plausibilisierung im Projekt AMSeL

   gelöscht: Minutenwerte:

   04.10.1999 02:26 bis 04.10.1999 14:41

   07.10.1999 00:00 bis 07.10.1999 00:01

   13.10.1999 10:21 bis 14.10.1999 10:35

   20.10.1999 02:10 bis 22.10.1999 17:57

   14.03.2002 21:55 bis 15.03.2002 10:40

   19.08.2002 16:20 bis 20.08.2002 18:10

   03.10.2002 16:30 bis 05.10.2002 06:40

   12.02.2003 15:00 bis 13.02.2003 03:50

   12.03.2003 13:02 bis 13.03.2003 13:16

   18.04.2003 22:04 bis 20.04.2003 10:50

   21.08.2006 18:48 bis 22.08.2006 19:12

   16:01.2007 04:48 bis 16.01.2007 17:20

   11.02.2007 13:03 bis 12.02.2007 00:20

   23.08.2007 05:21 bis 27.08.2007 07:05

   21.09.2007 13:09 bis 22.09.2007 14:34

25.09.2007 18:30 bis 26.09.2007 19:49

11.01.2008 15:39 bis 11.01.2008 15:52

13.01.2008 23:37 bis 14.01.2009 11:46

15.01.2008 05:59 bis 15.01.2008 06:01

28.01.2008 09:03 bis 28.01.2008 09:05

07.03.2008 19:50 bis 08.03.2008 20:56

27.05.2008 14:53 bis 27.05.2008 14:55

2. keine Offsets für diesen Pegel vorhanden

Ermittlung des MSL:

1. Ermittlung der k-Werte aus den Minutenwerten von 1999-2008
2. Stationaritätsbetrachtung: k-Wert stationär
3. Ermittlung der MSL Reihe 1999-2008 und Rekonstruktion der MSL Reihe 1935-1999 mit mittlerem k = 0,4430

Anmerkungen zum Pegel:

Es wurden keine besonderen Auffälligkeiten im Rahmen der Untersuchungen festgestellt.

8. Helgoland

Pegelnummer (DGJ): 95100702

Datenquelle: WSA Tönning, BFG, BAW

Pegelbetrieb:

1. Lattenpegelablesung seit September 1880
2. Schreibpegel seit 01.08.1909

Umfang der Dateien:

1.	Scheitelwerte	01.11.1953 bis 31.12.1999	65164	Datensätze
2.	Minutenwerte	31.10.1999 bis 31.12.2008	4813079	Datensätze
3.	Stundenwerte	01.01.1886 bis 31.12.1886	7568	Datensätze
		26.03.1952 bis 02.01.1975	199468	Datensätze
4.	30-Minutenwerte	27.08.1915 bis 04.11.1917	37282	Datensätze
		29.12.1923 bis 14.01.1933	156589	Datensätze
		30.12.1974 bis 01.01.1990	263116	Datensätze

Korrekturen:

1. Korrekturen nach Plausibilisierung im Projekt AMSeL

   gelöscht: 30-Minutenwerte:

   27.08.1915 09:00 bis 28.08.1915 08:30

   24.10.1915 19:30 bis 03.11.1995 00:30

   15.01.1916 01:30 bis 26.01.1996 21:30

   15.09.1916 21:30 bis 17.09.1916 22:30

   04.11.1917 21:30 bis 05.11.1917 23:00

   29.12.1923 11:00 bis 30.12.1923 11:00

   02.02.1924 00:00 bis 04.02.1924 05:30

   18.08.1925 19:00 bis 26.08.1925 22:30

   23.03.1923 13:00 bis 30.03.1926 18:30

   06.05.1926 00:00 bis 06.05.1926 00:30

   13.10.1926 21:00 bis 16.10.1926 00:30

25.11.1926 21:30 bis 28.11.1926 00:00

25.06.1927 02:30 bis 02.07.1927 20:30

01.11.1928 09:00 bis 03.11.1928 22:00

28.11.1932 05:30 bis 07.12.1932 01:30

14.01.1933 08:00 bis 14.01.1933 23:00

Stundenwerte:

15.05.1886 17:00 bis 12.06.1886 01:00

16.06.1886 19:00 bis 08.07.1886 23:00

11.04.1952 07:30 bis 12.04.1952 07:30

13.04.1952 05:30 bis 14.04.1952 21:30

16.06.1952 12:30 bis 18.06.1952 13:30

16.11.1952 17:30 bis 18.11.1952 06:30

Minutenwerte

03.10.2007 10:29 bis 05.10.2007 13:25

25.10.2007 05:13 bis 26.10.2007 05:52

19.01.2008 01:29 bis 20.01.2008 03:41

21.01.2008 04:42 bis 21.01.2008 17:21

07.03.2008 18:32 bis 08.03.2008 06:59

24.03.2008 19:58 bis 25.03.2008 20:25

15.06.2008 03:20 bis 16.06.2008 04:33

08.07.2008 09:50 bis 08.07.2008 22:30

13.08.2008 02:49 bis 17.08.2008 06:28

2. Anbringung der Offsets aus dem Projekt IKÜS (IKÜS 2008)

Tabelle 3: Überblick über die angebrachten Offsets aus IKÜS für den Pegel Helgoland

Zeitraum	Offsets [cm]
31.05.1989 bis 23.11.1992	-1
11.11.1993 bis 26.08.1998	-1
16.04.2003 bis 31.12.2008	-2

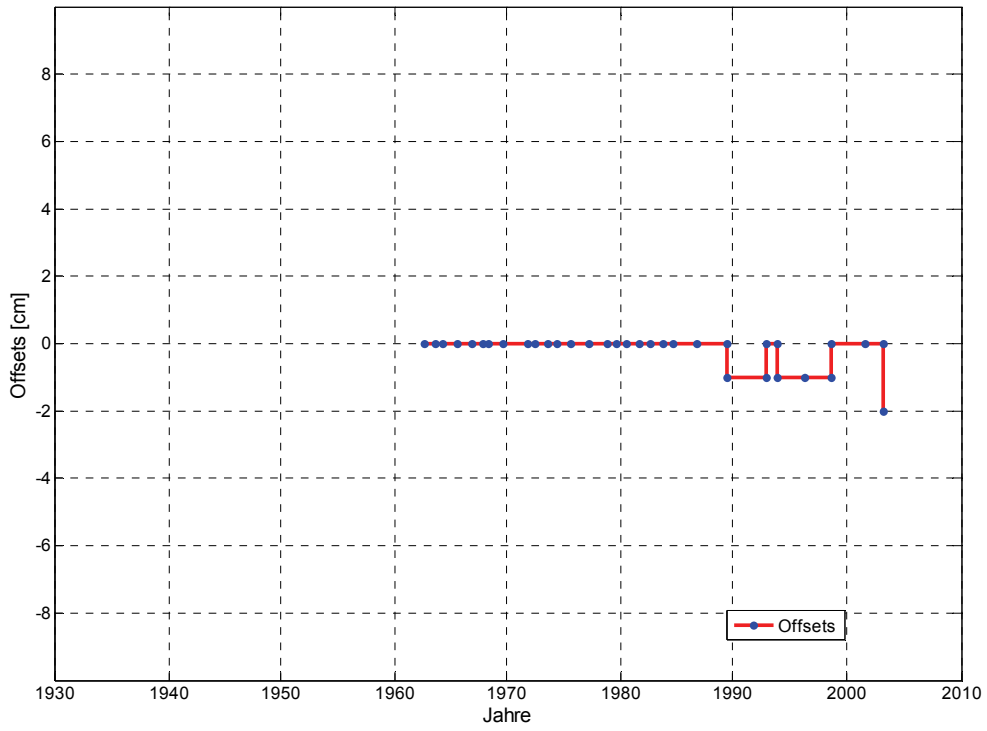


Abbildung 3: Grafische Darstellung der Offsets aus IKÜS am Pegel Helgoland

3. sonstige Korrekturen/Anpassungen:

Entsprechend einer Mitteilung vom WSA Tönning vom 17.10.2000 erfolgte EINE Anpassung aller Daten vor dem 31.10.2000 20:17:00 um +27cm (Umrechnung von Helgoländer Null zu Normal Null)

Ermittlung des MSL

1. Ermittlung der k-Werte aus den Stundenwerten von 1952-1974, den 30-Minutenwerten von 1974-1990 und den Minutenwerten von 1999-2008
2. Stationaritätsbetrachtung: k-Wert stationär für die Zeiträume 1952-1990 und 1999-2008
3. Ermittlung der MSL Reihen 1953-1990 und 1999-2008 und Rekonstruktion der MSL Reihe 1990-1999 mit mittlerem k = 0,4782

Anmerkungen zum Pegel:

In die Ermittlung der k-Monatswertzeitreihen gehen neben dem MSL auch die mittleren Tidehoch- und Tideniedrigwasser (MThw und MTnw) ein. Für den Pegel Helgoland wurden für verschiedene Zeiträume (hauptsächlich in den 1960er Jahren) Diskrepanzen zwischen den hochaufgelösten Daten und den Scheitelwerten festgestellt (siehe Abbildung 4 als Beispiel).

Die Thw liegen tendenziell höher als die höchsten Stundenwerte der jeweiligen Tiden, die Tnw sollten dementsprechend tendenziell etwas niedriger liegen, als die jeweils niedrigsten Stundenwerte. Letzteres ist jedoch nicht der Fall, sondern die Tnw liegen tendenziell höher als die niedrigsten Stundenwerte. Diese Tatsache schlägt sich in einer sehr starken Varianz der k-Wert-Zeitreihe nieder. Um die Konsistenz sicher zu stellen, wurden für die k-Wert-Bestimmung die hochaufgelösten Daten und daraus abgeleitete Scheitel genutzt. Hierdurch reduziert sich die Varianz in der k-Wert-Zeitreihe für die betreffenden Zeiträume und entspricht derjenigen, die sich für die Rest der Zeitreihe ergeben hat (siehe auch Pegel Cuxhaven).

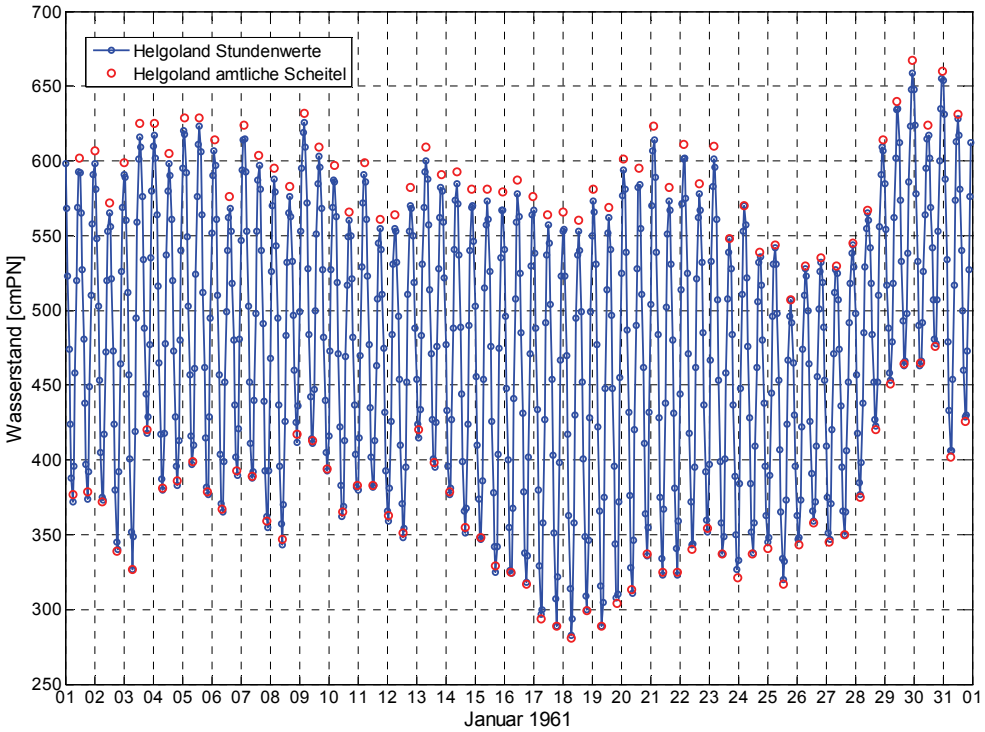


Abbildung 4: Vergleich der amtlichen Scheitelwertzeitreihen mit verfügbaren hochaufgelösten Daten (Stundenwerte) am Pegel Helgoland (Januar 1960)

9. Cuxhaven

Pegelnummer (DGJ): 59900206

Datenquelle: WSA Cuxhaven, BFG, fwu-Archiv

Pegelbetrieb:

1. Lattenpegelablesung seit 01.01.1843
2. Schreibpegel seit 01.01.1899

Umfang der Dateien:

1.	Scheitelwerte	01.01.1843 bis 31.12.2007	210571 Datensätze
2.	Minutenwerte	01.11.1997 bis 31.12.2008	5860385 Datensätze
3.	Stundenwerte	01.01.1918 bis 31.12.2008	797712 Datensätze
4.	30-Minutenwerte	01.01.1975 bis 31.12.1986	210261 Datensätze

Korrekturen:

1. Korrekturen nach Plausibilisierung im Projekt AMSeL

   gelöscht: Stundenwerte:

   27.12.1998 00:15 bis 27.12.1998 14:09

   14.03.1999 16:59 bis 16.03.1999 06:38

   14.06.2003 18:47 bis 15.06.2003 08:02

   07.01.2007 04:11 bis 07.01.2007 08:56

   08.02.2007 11:20 bis 08.02.2007 23:01

   13.08.2008 14:07 bis 16.08.2008 20:20

   Minutenwerte:

   27.12.1998 00:15 bis 27.12.1998 14:09

   14.03.1999 16:59 bis 16.3.1999 06:38

   13.06.2003 18:47 bis 15.06.2003 08:02

   08.02.2007 11:20 bis 28.02.2007 23:01

   13.08.2008 04:26 bis 17.08.2008 08:48

2. Anbringung der Offsets aus dem Projekt IKÜS (IKÜS 2008)

Tabelle 4: Überblick über die angebrachten Offsets aus IKÜS für den Pegel Cuxhaven

Zeitraum	Offsets [cm]
20.07.1949 bis 10.06.1952	2
11.06.1952 bis 05.02.1953	1
19.11.1954 bis 16.08.1955	2
17.08.1955 bis 19.04.1956	1
27.05.1963 bis 19.10.1965	2
05.06.1973 bis 13.04.1976	-1
17.03.1977 bis 29.03.1978	-1
30.03.1978 bis 09.11.1978	-12
10.11.1978 bis 10.05.1979	-3
11.05.1979 bis 26.07.1979	-5
27.03.1981 bis 13.09.1981	-2
14.09.1981 bis 18.03.1982	3
23.09.1982 bis 08.04.1984	-1
09.04.1984 bis 21.09.1989	-2
26.10.1993 bis 27.04.1994	1
05.03.1996 bis 27.10.1996	1

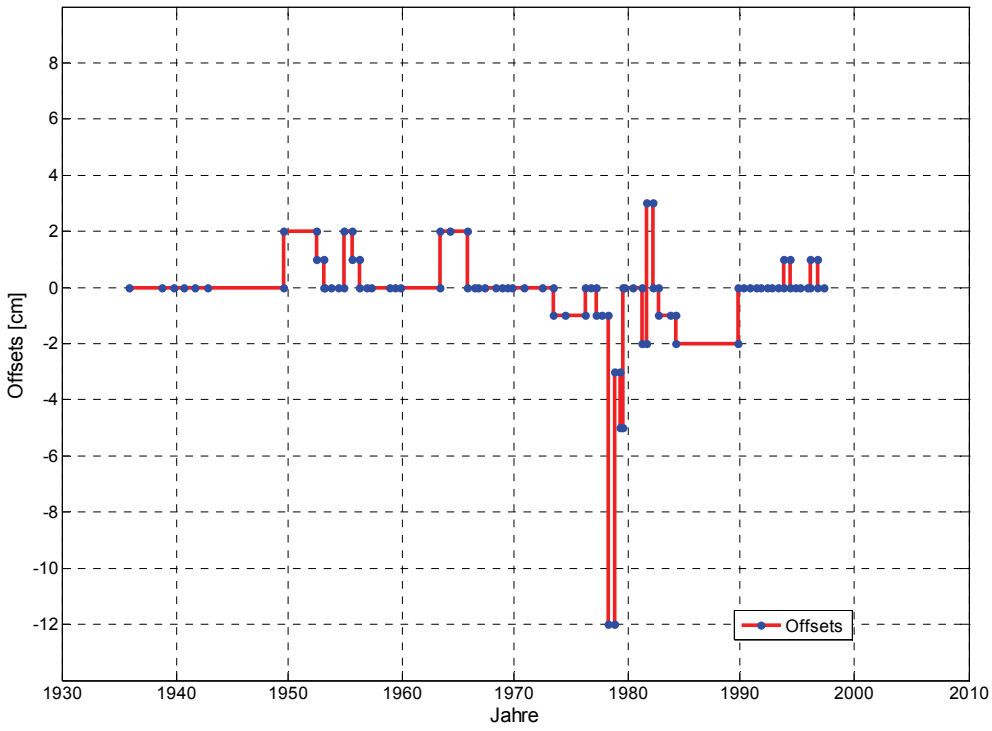


Abbildung 5: Grafische Darstellung der Offsets aus IKÜS am Pegel Cuxhaven

Ermittlung des MSL:

1. Ermittlung der k-Werte aus den Stundenwerten von 1918-1975 und 1986-1997, den 30-Minutenwerten von 1975-1986 und den Minutenwerten von 1997-2008
2. Stationaritätsbetrachtung: k-Wert stationär
3. Ermittlung der MSL Reihe 1918-2008 und Rekonstruktion der MSL Reihe 1843-1917 mit mittlerem k = 0,4703

Anmerkungen zum Pegel:

In die Ermittlung der k-Monatswertzeitreihen gehen neben dem MSL auch die mittleren Tidehoch- und Tideniedrigwasser (MThw und MTnw) ein. Für den Pegel Cuxhaven wurden für verschiedene Zeiträume (zwischen 1960 und 1980) Diskrepanzen zwischen den hochaufgelösten Daten und den Scheitelwerten festgestellt (siehe Abbildung 6 als Beispiel). Die Thw liegen tendenziell höher als die höchsten Stundenwerte der jeweiligen Tiden, die Tnw sollten dementsprechend tendenziell etwas niedriger liegen, als die jeweils niedrigsten Stundenwerte. Letzteres ist jedoch nicht der Fall, sondern die Tnw liegen tendenziell höher als die niedrigsten Stundenwerte. Diese Tatsache schlägt sich in einer sehr starken Varianz der k-Wert-Zeitreihe nieder (siehe Abbildung 7, oben). Um die Konsistenz sicher zu stellen, wurden für die k-Wert-Bestimmung die hochaufgelösten Daten und daraus abgeleitete Scheitel genutzt.

Hierdurch reduziert sich die Varianz in der k-Wert-Zeitreihe für die betreffenden Zeiträume und entspricht derjenigen, die sich für die Rest der Zeitreihe ergeben hat (siehe Abbildung 7, mitte und unten).

In der letztendlich im AMSeL-Projekt genutzten k-Wertzeitreihe (Abbildung 7, unten) fällt ein Kurvenförmige Verlauf zwischen Ende der 1930er und Anfang der 1950er Jahre auf. Es kann die Vermutung geäußert werden, dass diese Veränderung auf die Aussetzung von Bagger- und sonstigen Arbeiten im Tideästuar während und kurz nach den Kriegsjahren zurückzuführen ist. Auf Basis der Stationaritätstests ist die Zeitreihe dennoch als Stationär zu beurteilen und ohne weitere Informationen wird zunächst davon ausgegangen, dass sich für den Zeitraum vor 1918 ein solch kurviger Verlauf nicht ergeben würde, lägen die entsprechenden Daten vor.

Nähere Informationen zu Unsicherheiten in der relativen MSL-Zeitreihe des Pegels Cuxhaven für den Zeitraum vor 1935 sind dem Bericht (Kapitel 2.4) zu entnehmen.

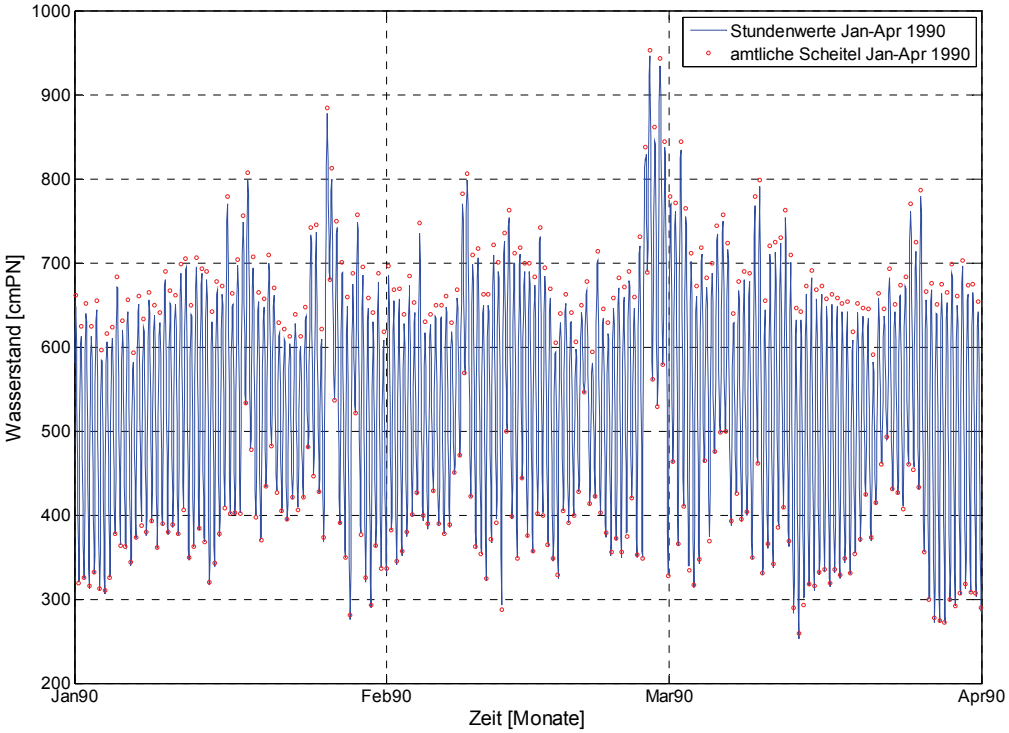


Abbildung 6: Vergleich der Stundenwerte mit den amtlich gemessenen Scheitelwerten am Pegel Cuxhaven für den Zeitraum von Januar bis April 1990

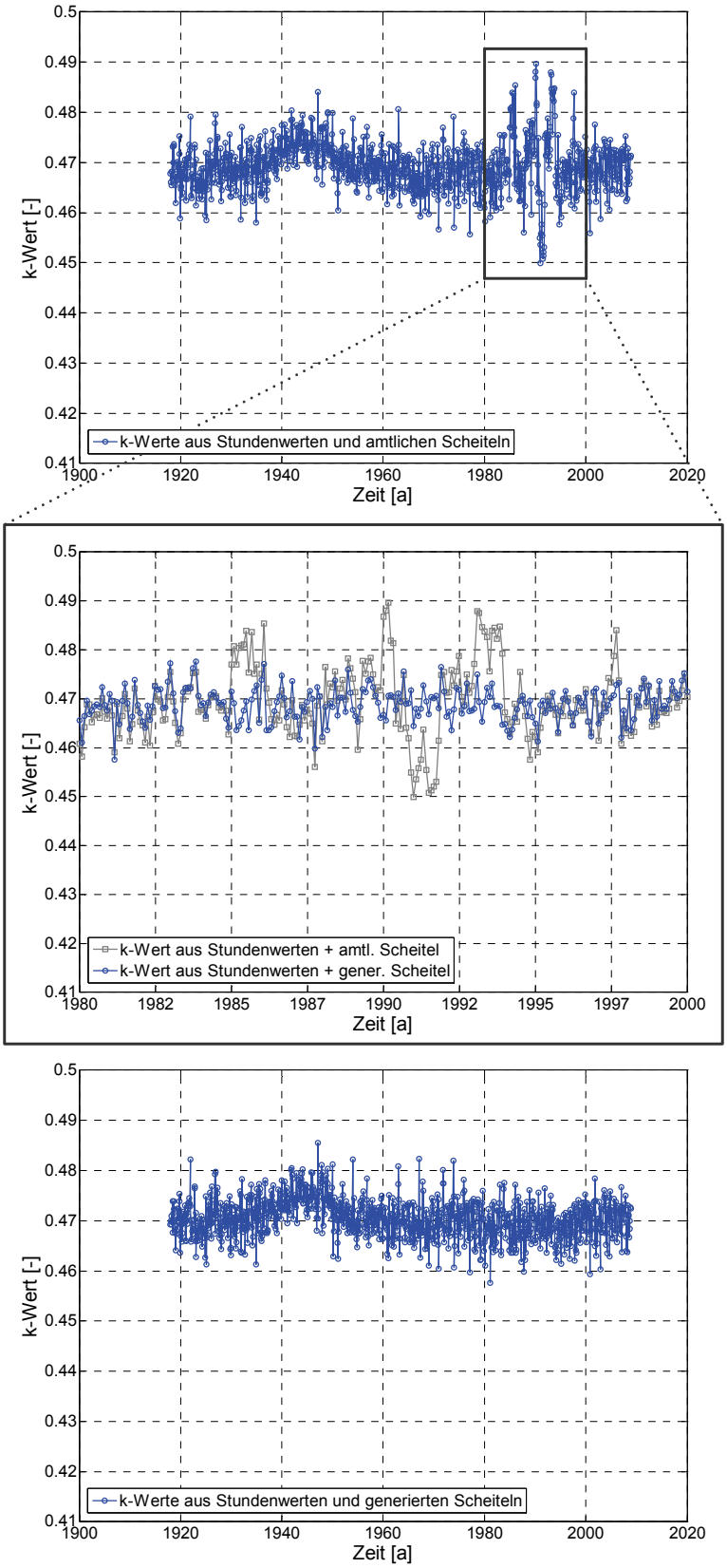


Abbildung 7: Oben: k-Wert-Zeitreihe am Pegel Cuxhaven unter Verwendung von hochaufgelösten Daten und amtlichen Scheitelwerten. Mitte: k-Wert-Zeitzreihen für den Zeitraum 1980-2000 unter Berücksichtigung von amtlichen und auf Basis der hochaufgelösten Daten generierter Scheitel. Unten: Im AMSeL-Projekt genutzte k-Wert-Zeitreihe für den Pegel Cuxhaven.

10. Bremerhaven

Pegelnummer (DGJ): 49900108

Datenquelle: WSA Bremerhaven, BFG, fwu-Archiv

Pegelbetrieb:

1. Latten- und Schreibpegel Bremerhaven Doppelschleuse seit 1925
2. Schreibpegel Bremerhaven Alter Leuchtturm seit 02.08.1965

Pegelname (Standort):

1. Bremerhaven Doppelschleuse 01.01.1935 bis 31.10.1965
2. Bremerhaven Alter Leuchtturm 01.11.1965 bis 31.12.2008

Korrekturen:

1. Korrekturen nach Plausibilisierung im Projekt AMSeL

   gelöscht: Minutenwerte:

   28.01.2002 18:45 bis 29.01.2002 07:49

   21.05.2002 13:32 bis 22.05.2002 15:14

   27.10.2002 10:12 bis 28.10.2002 23:20

   21.03.2004 20:19 bis 22.03.2004 21:02

2. Anbringung der Offsets aus dem Projekt IKÜS (IKÜS 2008)

Tabelle 5: Überblick über die angebrachten Offsets aus IKÜS für den Pegel Bremerhaven

Zeitraum	Offsets [cm]
13.09.1976 bis 02.07.1980	-3

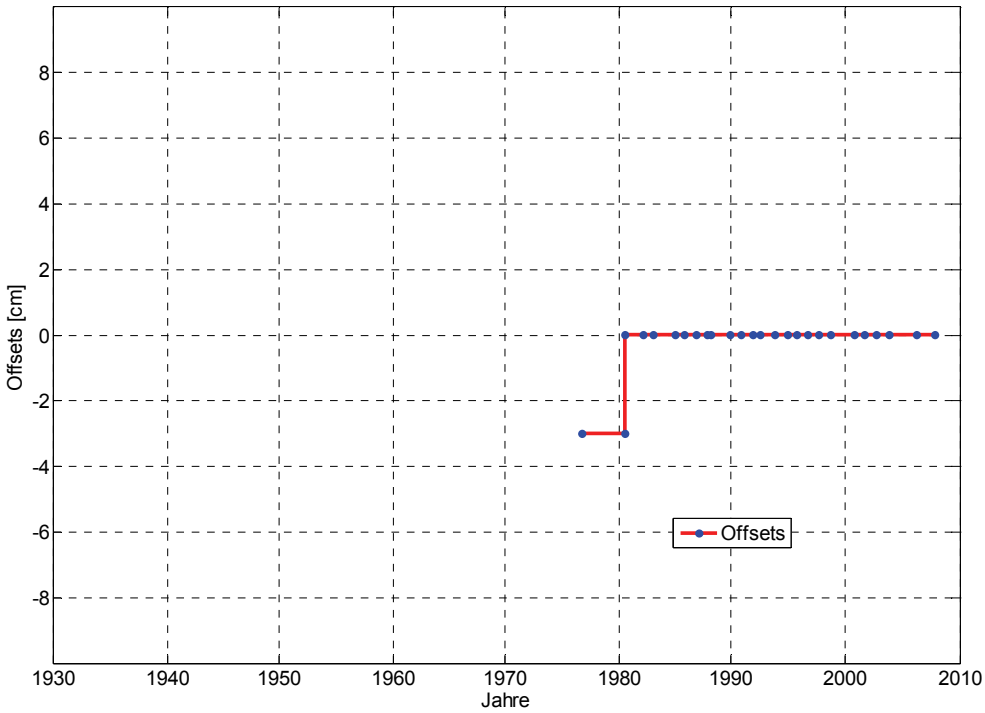


Abbildung 8: Grafische Darstellung der Offsets aus IKÜS am Pegel Bremerhaven Alter Leuchtturm

3. sonstige Korrekturen/Anpassungen:

Die Daten für Bremerhaven liegen getrennt für die Pegel Doppelschleuse (1935 bis 1980) und Alter Leuchtturm (1995 bis 2008) vor. Um eine konsistente Zeitreihe für den Gesamtzeitraum von 1935 bis 2008 zu generieren, wurden Regressionsbeziehungen, getrennt nach Tnw und Thw, für den Überlappungszeitraum 1965 bis 1980 aufgestellt (siehe Abbildung 9 und Abbildung 10). Aus den Grafiken starke Korrelationen zwischen den beiden Pegeln für die Parameter Thw und Tnw zu erkennen. Dementsprechend wurden die Tnw des Pegels Doppelschleuse um -4cm und die Thw um -2cm korrigiert und auf den Pegel Alter Leuchtturm angepasst.

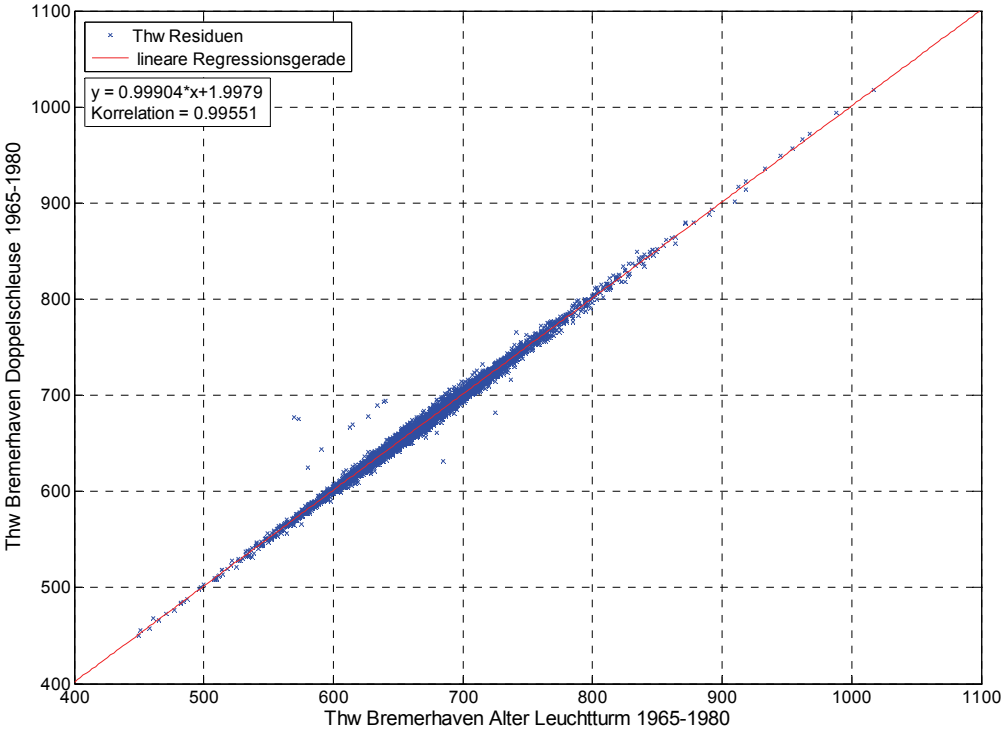


Abbildung 9: Regressionsbeziehung im Thw zwischen Bremerhaven Doppelschleuse und Alter Leuchtturm

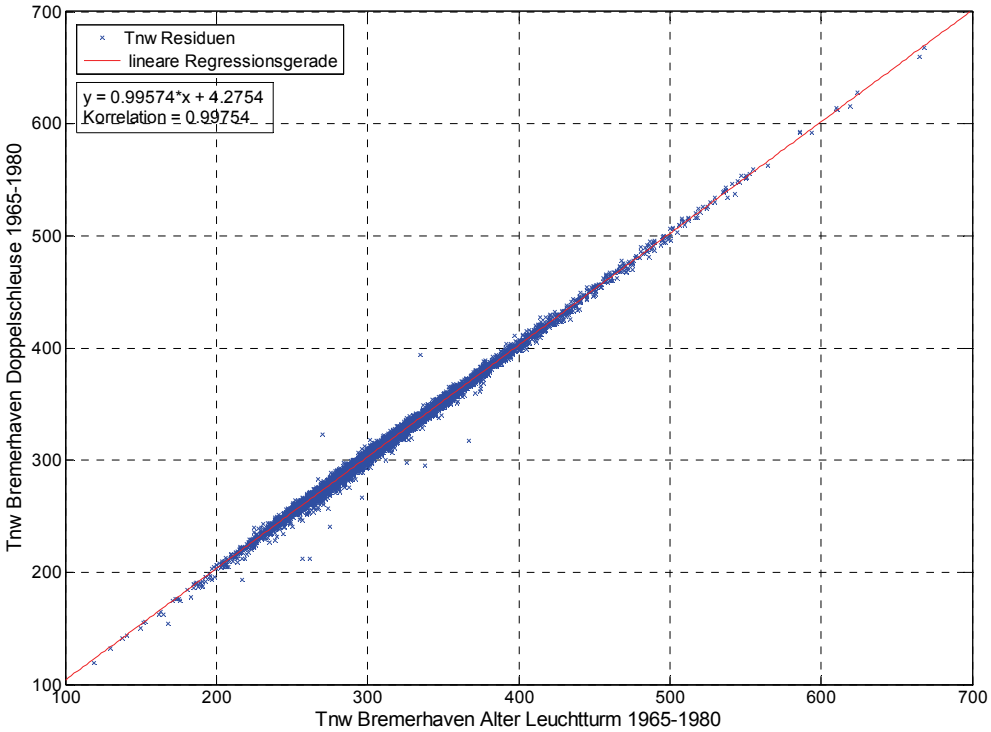


Abbildung 10: Regressionsbeziehung im Tnw zwischen Bremerhaven Doppelschleuse und Alter Leuchtturm

Ermittlung des MSL:

1. Ermittlung der k-Werte aus den Minutenwerte von 1994-2008
2. Stationaritätsbetrachtung: k-Wert stationär
3. Ermittlung des MSL Reihe von 1994-2008 und Rekonstruktion der MSL Reihe von 1935-1994 mit mittlerem k = 0,4493

Anmerkungen zum Pegel:

Es wurden keine besonderen Auffälligkeiten im Rahmen der Untersuchungen festgestellt.

11. Leuchtturm Alte Weser

Pegelnummer (DGJ): 94600404

Datenquelle: WSA Bremerhaven, BFG, fwu-Archiv

Pegelbetrieb:

1. Schreibpegel: Roter Sand seit 03.01.1887, Alte Weser seit 01.11.1964

Umfang der Dateien:

1.	Scheitelwerte	01.11.1900 bis 31.12.2007	136470	Datensätze
2.	Minutenwerte	04.07.1994 bis 31.12.2008	7624799	Datensätze

Korrekturen:

1. Korrekturen nach Plausibilisierung im Projekt AMSeL

   gelöscht: Minutenwerte:

   31.12.1999 23:59 bis 01.01.2000 00:00

   21.11.2001 09:53 bis 22.11.2001 23:11

   18.02.2002 09:54 bis 19.02.2002 10:12

   29.11.2003 10:07 bis 01.12.2003 12:02

2. keine Offsets für diesen Pegel vorhanden
3. sonstige Korrekturen/Anpassungen

   Die Daten für den Pegel Roter Sand wurden im KFKI-Projekt „Wasserstandsentwicklung in der Deutschen Bucht“ mittels linearer Regression , getrennt für Thw und Tnw, auf den Standort Lt. Alte Weser umgerechnet (siehe JENSEN ET AL. 1991a,b).

Ermittlung des MSL:

1. Ermittlung der k-Werte aus den Minutenwerten von 1994-2008
2. Stationaritätsbetrachtung: k-Wert stationär
3. Ermittlung der MSL Reihe 1994-2008 und Rekonstruktion der MSL Reihe 1900-1994 mit mittlerem k = 0,4800

Anmerkungen zum Pegel:

Nähere Informationen zu Unsicherheiten in der relativen MSL-Zeitreihe des Pegels Lt. Alte Wesesr für den Zeitraum vor 1935 sind dem Bericht (Kapitel 2.4) zu entnehmen.

12. Wilhelmshaven

Pegelnummer (DGJ): 94400201

Datenquelle: WSA Wilhelmshaven, BFG, fwu-Archiv

Pegelbetrieb:

1. Lattenpegelablesungen seit 01.06.1854
2. Schreibpegel ab 07.12.1912

Umfang der Dateien:

1.	Scheitelwerte	01.11.1935 bis 31.12.2000	93163	Datensätze
2.	Stundenwerte	01.01.1951 bis 31.12.1974	219143	Datensätze
3.	Minutenwerte	04.07.1994 bis 31.12.2008	7624799	Datensätze

Korrekturen:

1. Korrekturen nach Plausibilisierung im Projekt AMSeL

   gelöscht: Stundenwerte:

   16.02.1962 17:00 bis 17.02.1962 05:00

   Minutenwerte:

   12.10.2000 18:31 bis 13.10.2000 13:00

2. Anbringung der Offsets aus dem Projekt IKÜS (IKÜS 2008)

Tabelle 6: Überblick über die angebrachten Offsets aus IKÜS für den Pegel Wilhelmshaven

Zeitraum	Offsets [cm]
02.11.1949 bis 05.02.1950	2
08.11.1951 bis 13.06.1952	-2
14.06.1952 bis 08.07.1953	1
09.07.1953 bis 20.04.1954	1
21.04.1954 bis 02.05.1955	1
17.04.1957 bis 21.04.1958	1
27.04.1959 bis 23.04.1960	1

Zeitraum	Offsets [cm]
19.09.1970 bis 25.04.1971	1
10.05.1972 bis 15.11.1976	1
21.10.1982 bis 05.05.1983	1

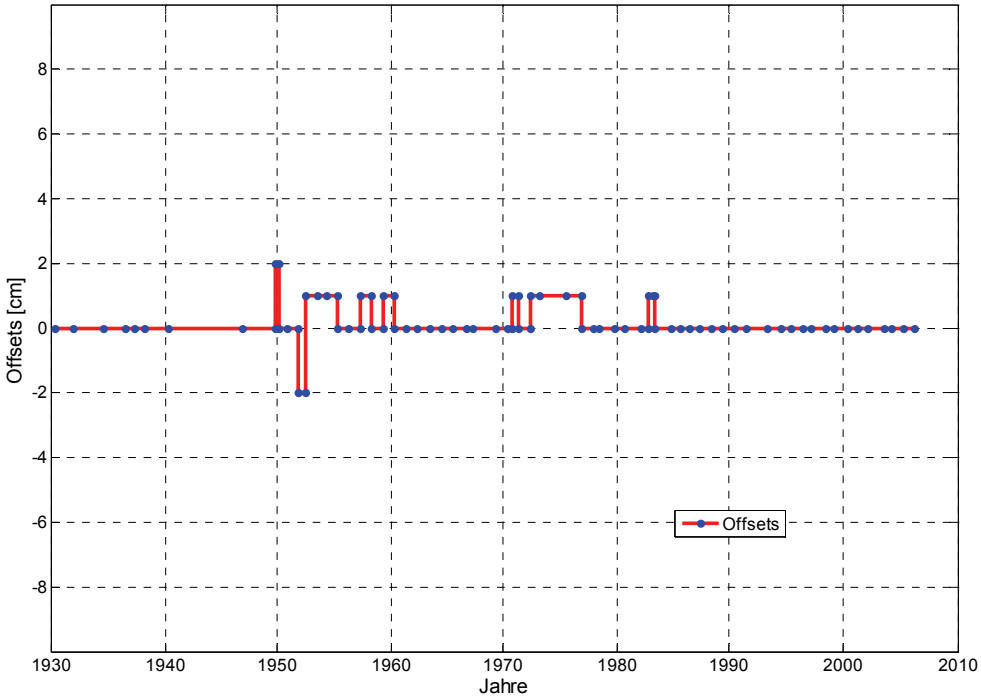


Abbildung 11: Grafische Darstellung der Offsets aus IKÜS am Pegel Wilhelmshaven

Ermittlung des MSL:

1. Ermittlung der k-Werte aus den Stundenwerten von 1951-1974 und den Minutenwerten von 2000-2008
2. Stationaritätsbetrachtung: k-Wert instationär für 1951-1974

   k-Wert stationär für 2000-2008
3. Ermittlung der MSL Reihen 1951-1974 aus Stundenwerten und 2000-2008 aus Minutenwerten und Rekonstruktion der MSL Reihen 1975-1999 mit mittlerem k = 0,4670 und 1935-1950 mit mittlerem k = 0,4597

Anmerkungen zum Pegel:

Nähere Informationen zum Instationären Verhalten der k-Wert Zeitreihe für den Zeitraum 1951-1974 sind dem Bericht zu entnehmen.

13. Norderney

Pegelnummer (DGJ): 93600103

Datenquelle: WSA Emden, BfG, fwu-Archiv

Pegelbetrieb

1. Lattenpegelablesung seit 1888
2. Schreibpegel seit 28.04.1900

Umfang der Datei

1.	Scheitelwerte	01.11.1900 bis 31.12.2007	54231	Datensätze
2.	Minutenwerte	01.01.2000 bis 31.12.2008	4731817	Datensätze

Korrekturen:

1. Korrekturen nach Plausibilisierung im Projekt AMSeL

gelöscht: Minutenwerte:

04.01.2000 03:33 bis 05.01.2000 16:56

20.03.2000 06:07 bis 21.03.2000 18:52

23.08.2000 10:34 bis 25.08.2000 00:15

23.09.2000 12:32 bis 25.09.2000 15:35

31.07.2002 21:59 bis 14.08.2002 22:07

20.04.2003 08:15 bis 08.05.2003 21:16

11.01.2004 19:57 bis 05.02.2004 05:19

12.04.2004 10:08 bis 13.04.2004 11:14

01.07.2004 03:47 bis 06.07.2004 20:58

23.07.2004 21:24 bis 25.07.2004 10:26

01.08.2004 18:28 bis 02.08.2004 19:19

09.01.2005 03:29 bis 12.01.2005 18:28

11.03.2005 18:30 bis 13.03.2005 07:50

04.04.2000 05:22 bis 05.04.2000 06:25

25.07.2003 14:16 bis 26.07.2003 15:31

07.08.2003 12:10 bis 11.08.2003 17:16

06.01.2004 16:31 bis 07.01.2004 17:39

09.10.2004 01:00 bis 10.10.2004 01:25

20.02.2005 02:48 bis 21.02.2005 04:05

03.03.2005 22:32 bis 04.03.2005 22:48

05.03.2005 11:16 bis 06.03.2005 13:08

13.04.2005 20:52 bis 14.04.2005 08:42

18.06.2005 01:33 bis 19.06.2005 02:45

19.06.2005 15:01 bis 20.06.2005 15:34

26.06.2005 21:15 bis 27.06.2005 21:58

2. Anbringung der Offsets aus dem Projekt IKÜS (IKÜS 2008)

Tabelle 7: Überblick über die angebrachten Offsets aus IKÜS für den Pegel Norderney Hafen

Zeitraum	Offsets[cm]
13.07.1956 bis 12.08.1959	-1

Tabelle 8: Überblick über die angebrachten Offsets aus IKÜS für den Pegel Norderney Riffgat

Zeitraum	Offsets [cm]
01.11.1963 bis 21.07.1965	2
22.07.1965 bis 26.07.1966	1
27.07.1966 bis 08.11.1967	2
09.11.1967 bis 13.07.1971	1
28.06.1973 bis 14.08.1974	1
20.09.1977 bis 28.08.1978	1
02.10.1979 bis 03.11.1983	1
04.11.1983 bis 31.09.1987	2
01.10.1987 bis 31.11.1992	5
01.12.1992 bis 08.11.1993	4
09.11.1993 bis 21.10.1997	5
22.10.1997 bis 30.08.1998	4
01.09.1998 bis 13.09.1999	5

Zeitraum	Offsets [cm]
14.09.1999 bis 25.06.2001	4
26.06.2001 bis 11.10.2005	5
12.10.2005 bis 19.09.2007	6
20.09.2007 bis ...	5

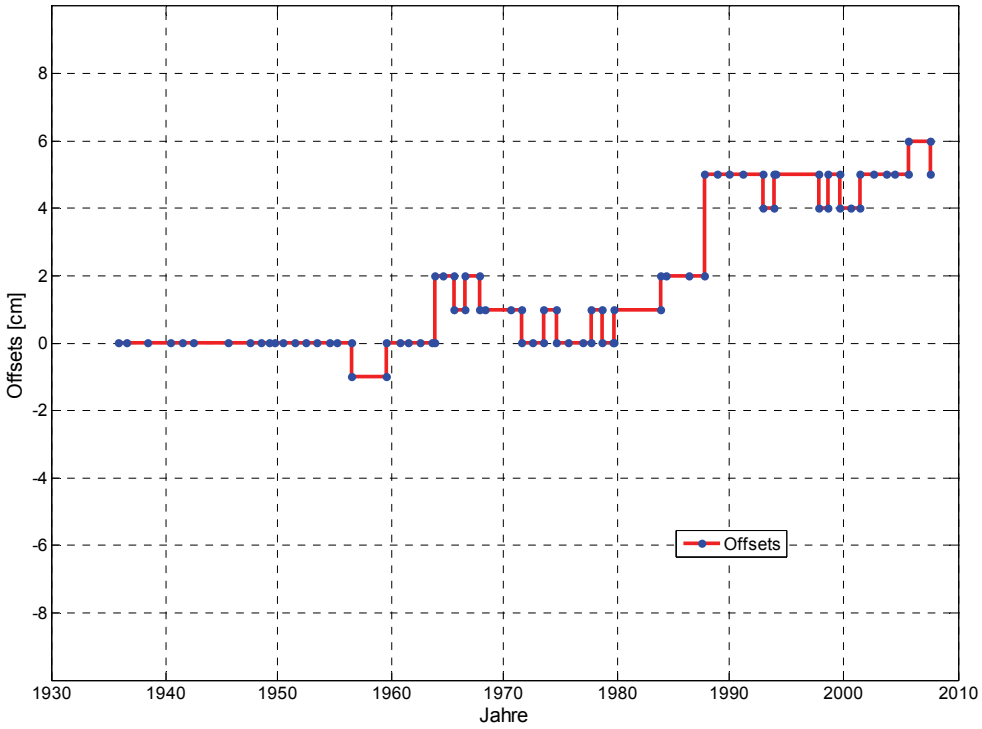


Abbildung 12: Grafische Darstellung der Offsets aus IKÜS am Pegel Norderney Riffgat

3. sonstige Korrekturen/Anpassungen

   Die Daten des Pegels Norderney entstammen zum Teil dem Pegel Norderney Hafen (1901 bis 1963) und zum Teil dem Pegel Norderney Riffgat (1964 bis 2008). Die Daten des Pegels Norderney Hafen wurden von JENSEN ET AL. 1991a,b mittels linearer Regression, getrennt für Tnw und Thw, auf den Standort Riffgat umgerechnet. Die unterschiedlichen Pegelstandorte wurden auch bei der Anbringung der Pegeloffsets berücksichtigt.

Ermittlung des MSL:

1. Ermittlung der k-Werte aus den Minutenwerten von 2000-2008
2. Stationaritätsbetrachtung: k-Wert stationär

3. Ermittlung der MSL Reihe 2000-2008 und Rekonstruktion der MSL Reihe 1900-1999 mit mittlerem k = 0,4874

Anmerkungen zum Pegel:

Es wurden keine besonderen Auffälligkeiten im Rahmen der Untersuchungen festgestellt.

14. Emden

Pegelnummer (DGJ): 39700102

Datenquelle: WSA Emden, BFG, fwu-Archiv

Pegelbetrieb:

1. Lattenpegelablesungen seit 01.01.1855
2. Schreibpegel seit 18.03.1920

Umfang der vorhandenen Daten:

1.	Scheitelwerte	01.10.1949 bis 31.12.2008	83637 Datensätze
2.	Minutenwerte	01.01.2000 bis 31.12.2008	4734720 Datensätze

Korrekturen:

1. Korrekturen nach Plausibilisierung im Projekt AMSeL

gelöscht: Minutenwerte:

04.01.2000 04:37 bis 05.01.2000 17:47

23.08.2000 11:28 bis 24.08.2000 12:05

27.04.2004 23:02 bis 28.04.2004 23:55

02.06.2004 17:56 bis 03.06.2004 18:52

23.07.2004 22:32 bis 25.07.2004 11:21

16.04.2005 10:28 bis 16.04.2005 22:55

09.10.2005 09:43 bis 10.10.2005 10:25

11.10.2005 23:23 bis 12.10.2005 12:20

24.04.2006 02:46 bis 04.05.2005 22:45

22.05.2006 01:00 bis 31.05.2006 08:57

16.07.2007 07:41 bis 18.07.2007 08:47

28.01.2009 20:06 bis 29.01.2009 20:41

01.01.2004 00:16 bis 02.01.2004 00:44

18.01.2004 01:23 bis 19.01.2004 02:46

13.04.2004 11:55 bis 16.04.2004 16:28

14.11.2004 07:30 bis 15.11.2004 20:18

21.11.2004 00:58 bis 22.11.2004 01:45

11.01 2005 06:59 bis 12.01.2005 07:51

16.07.2007 20:28 bis 18.07.2007 08:47

2. Anbringung der Offests aus dem Projekt IKÜS (IKÜS 2008)

Tabelle 9: Überblick über die angebrachten Offsets aus IKÜS für den Pegel Emden

Zeitraum	Offsets [cm]
06.06.1949 bis 18.06.1950	-1
19.06.1950 bis 14.03.1951	-2
12.07.1989 bis 24.10.1990	1
10.05.1995 bis 25.03.1996	1

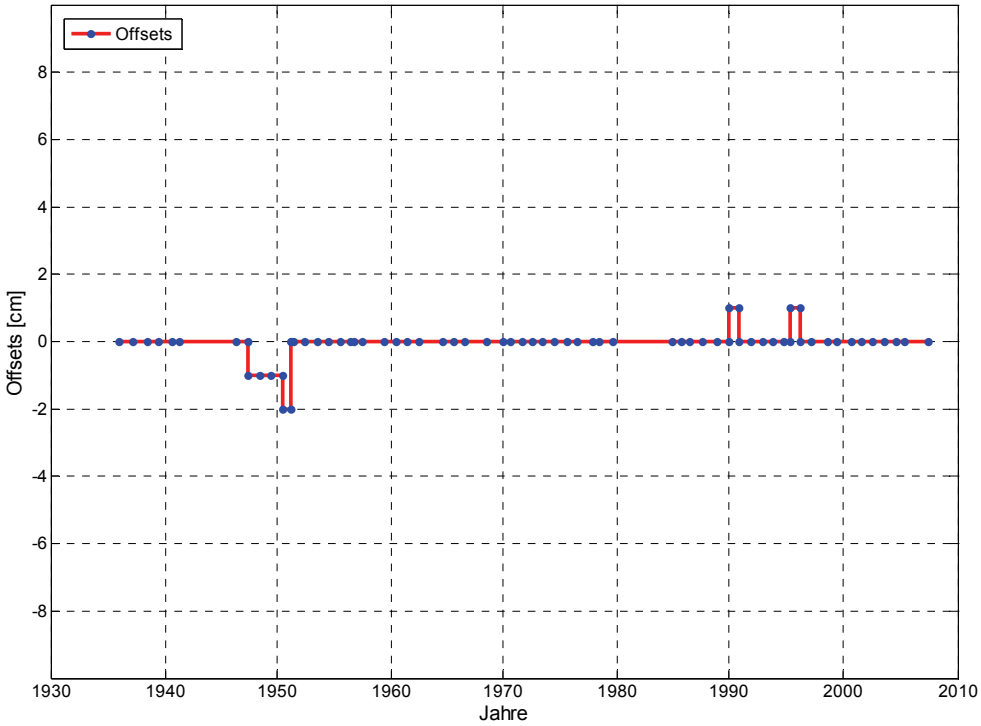


Abbildung 13: Grafische Darstellung der Offsets aus IKÜS

Ermittlung MSL:

1. Ermittlung der k-Werte aus den Minutenwerten von 2000-2008
2. Stationaritätsbetrachtungen: k-Wert stationär

3. Ermittlung der MSL Reihe 2000-2008 und Rekonstruktion der MSL Reihe 1949-1999 mit mittlerem k = 0,429

Anmerkungen zum Pegel:

Es wurden keine besonderen Auffälligkeiten im Rahmen der Untersuchungen festgestellt.

15. Borkum

Pegelnummer (DGJ): 93400206

Datenquelle: WSA Emden, BFG, fwu-Archiv

Pegelbetrieb:

1. Lattenpegelablesungen seit 1909
2. Schreibpegel (Südstrand) seit 1931

Umfang der vorhandenen Daten:

1.	Scheitelwerte	SS 01.11.1974 bis 31.12.2007	46816 Datensätze
2.	Stundenwerte	SS 30.12.1951 bis 01.01.1975	201688 Datensätze
3.	30-Minutenwerte	SS 30.12.1973 bis 01.01.1975	17633 Datensätze
4.	Scheitelwerte	FB 01.11.1935 bis 31.12.2007	90338 Datensätze
5.	Stundenwerte	FB 30.12.1970 bis 02.01.1974	26399 Datensätze
6.	30-Minutenwerte	FB 21.12.1973 bis 02.01.1989	263598 Datensätze
7.	Minutenwerte	FB 01.01.2000 bis 31.12.2008	4734720 Datensätze

Korrekturen:

1. Korrekturen nach Plausibilisierung im Projekt AMSeL

   gelöscht: Minutenwerte:

   29.11.1976 11:30 bis 29.11.1976 22:30

   24.10.1978 22:30 bis 25.10.1978 11:00

   31.12.1980 12:30 bis 31.12.1980 23:30

   07.10.1981 10:30 bis 07.10.1981 22:30

   09.12.1981 15:30 bis 10.12.1981 03:00

   05.01.1983 22:00 bis 06.01.1983 22:00

   04.01.2000 02:50 bis 05.01.2000 16:25

   23.08.2000 10:09 bis 24.08.2000 23:48

   07.03.2002 23:20 bis 13.03.2002 17:32

   23.07.2004 21:00 bis 24.07.2004 09:18

24.07.2004 21:49 bis 25.07.2004 10:01

11.04.2006 03:45 bis 12.04.2006 04:26

24.04.2006 01:42 bis 02.05.2006 07:46

28.05.2006 18:06 bis 31.05.2006 07:20

15.06.2006 07:21 bis 16.06.2006 08:09

29.06.2007 03:40 bis 02.07.2007 18:24

25.07.2007 12:10 bis 26.07.2007 00:55

2. Anbringung der Offsets aus dem Projekt IKÜS (IKÜS 2008)

Tabelle 10: Überblick über die angebrachten Offsets aus IKÜS für den Pegel Borkum

Zeitraum	Offsets[cm]
21.08.2000 bis 26.08.2001	1

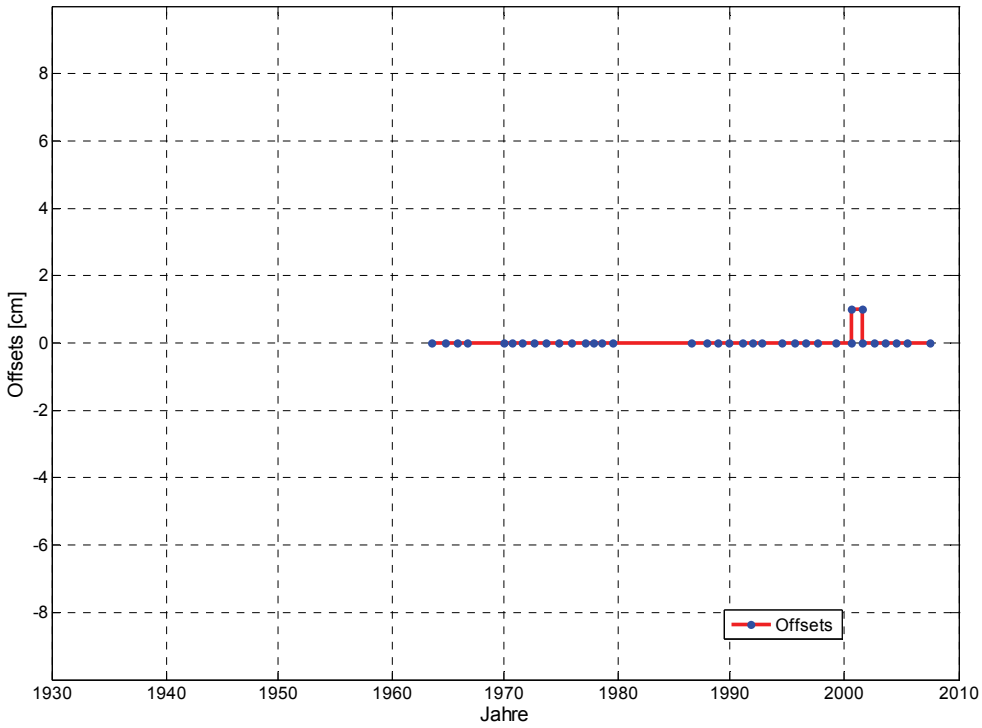


Abbildung 14: Grafische Darstellung der Offsets aus IKÜS am Pegel Borkum

3. Die verfügbaren Stundenwerte vom 01.01.1952 bis zum 30.12.1970 des Pegels Südstrand wurden über eine Regressionsbeziehung auf den Standort Fischerbalje übertragen. Die Übertragungsfunktion wurde auf Basis des Überlappungszeitraumes (1970-1974) ermittelt: y=1,0137x-4,1982 (siehe Abbildung 15)

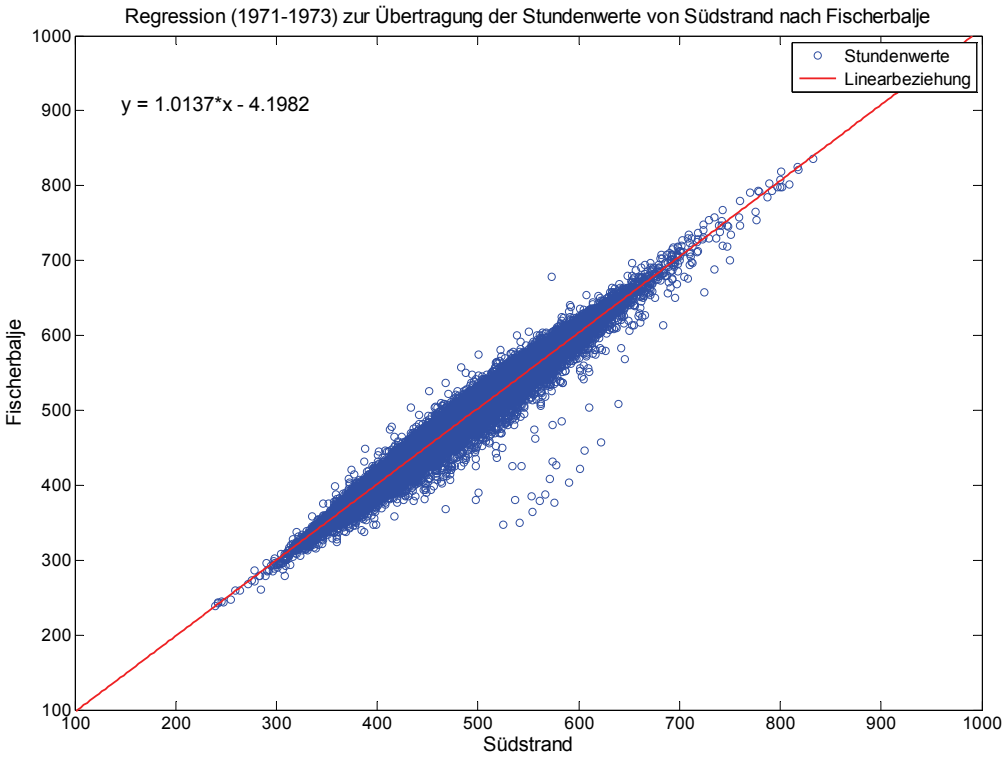


Abbildung 15: Regressionsbeziehung für Stundenwerte zwischen Borkum Fischerbalje und Südstrand

Ermittlung MSL:

Pegel wurde für die Analysen nicht berücksichtigt (s. Anmerkungen zum Pegel).

Anmerkungen zum Pegel:

Abbildung 16 zeigt die für den Pegel Borkum ermittelten k-Monatswerte, die auf Basis der hochaufgelösten Daten berechnet wurden. Es fällt auf, dass ungewöhnlich niedrige k-Werte für einen Zeitraum Ende der 1980er Jahre ermittelt wurden. Zu Beginn dieses Jahrhunderts ergeben sich hingegen auffällig hohe Werte. Ohne die Einbeziehung weiterer Informationen, kann eine relative MSL-Zeitreihe für den Zeitraum 1989-2000 auf Basis der Scheitelwerte und einem mittleren k-Wert nur mit großen Unsicherheiten generiert werden. Entsprechende Informationen lagen zum Zeitpunkt der Bearbeitung (auch nach Rücksprache mit der projektbegleitenden Gruppe) nicht vor. Für einen Zeitraum in den 1960er Jahren zeigt sich zudem eine große Varianz in der k-Wert Zeitreihe.

Aufgrund der hier beschriebenen Umstände, wurde die Entscheidung getroffen, den Pegel Borkum für die weiteren Analysen im Rahmen des Projektes AMSeL zunächst nicht zu berücksichtigen. Sollten in der Zukunft entsprechende Zusatzinformationen oder weitere Daten aus Digitalisierkampagnen verfügbar sein, kann der Pegel nachträglich in die Betrachtungen einbezogen werden.

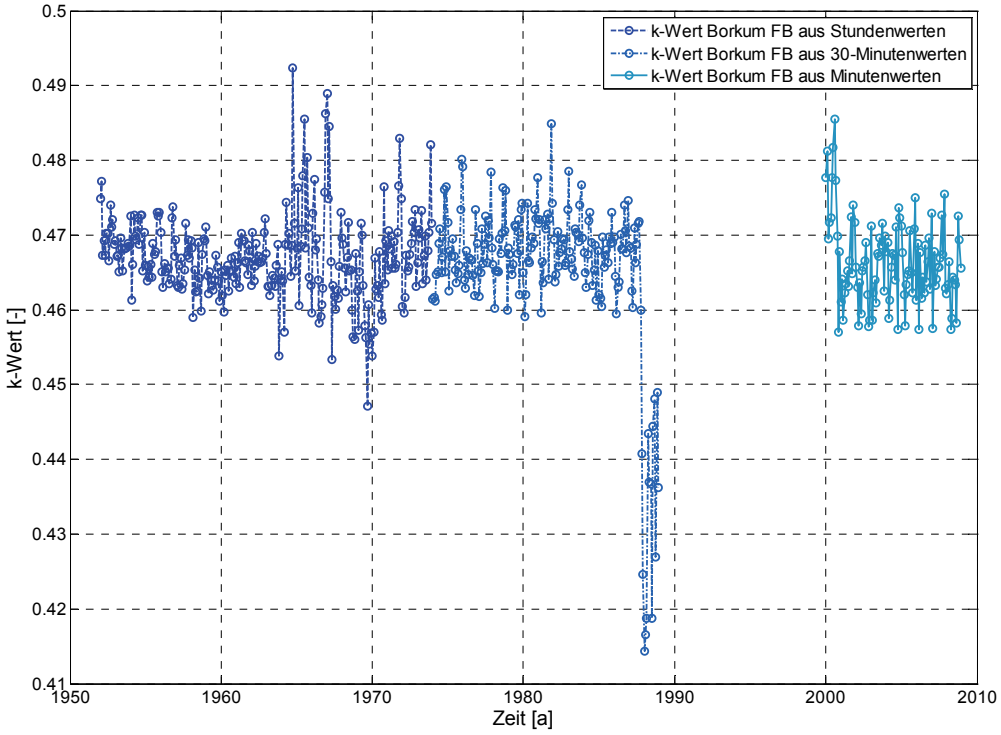


Abbildung 16: Entwicklung des k-Werts am Pegel Borkum zwischen 1952 und 2008 mit auffälligem Verhalten Ende der 1980er Jahre und zu Beginn dieses Jahrhunderts

16. Literatur

JENSEN J., MÜGGE, H.-E., SCHÖNFELD, W., VISSCHER, G.: Ablussbericht zum KFKI-Forschungsprojekt „Wasserstandsentwicklung in der Deutschen Bucht“ – Textband, Hamburg, 1991a (unveröffentlicht)

JENSEN J., MÜGGE, H.-E., SCHÖNFELD, W., VISSCHER, G.: Ablussbericht zum KFKI-Forschungsprojekt „Wasserstandsentwicklung in der Deutschen Bucht“ – Anlagenband, Hamburg, 1991b (unveröffentlicht)

IKÜS: Aufbau eines integrierten Höhenüberwachungssystems in Küstenregionen durch Kombation höhenrelevanter Sensorik, Abschlussbericht, 2008 (Download: http://tu-dresden.de/die_tu_dresden/fakultaeten/fakultaet_forst_geo_und_hydrowissenschaften/fachrichtung_geowissenschaften/gi/gg/forschung/ikues)

Anhang 2: Tidekettenauswertung

Inhalt

1 Einführung 14

2 List 15
- 2.1 Tideniedrigwasser 15
- 2.2 Tidehochwasser 21

3 Hörnum 27
- 3.1 Tideniedrigwasser 27
- 3.2 Tidehochwasser 33

4 Wyk 39
- 4.1 Tideniedrigwasser 39
- 4.2 Tidehochwasser 45

5 Dagebüll 51
- 5.1 Tideniedrigwasser 51
- 5.2 Tidehochwasser 57

6 Wittdün 63
- 6.1 Tideniedrigwasser 63
- 6.2 Tidehochwasser 69

7 Husum 75
- 7.1 Tideniedrigwasser 75
- 7.2 Tidehochwasser 81

8 Helgoland 87
- 8.1 Tideniedrigwasser 87
- 8.2 Tidehochwasser 93

9 Cuxhaven 99
- 9.1 Tideniedrigwasser 99
- 9.2 Tidehochwasser 105

10 Bremerhaven 111
- 10.1 Tideniedrigwasser 111
- 10.2 Tidehochwasser 117

11 Leuchtturm Alte Weser 123
- 11.1 Tideniedrigwasser 123

11.2 Tidehochwasser 129

12 Wilhelmshaven 135
12.1 Tideniedrigwasser 135
12.2 Tidehochwasser 141

13 Norderney 147
13.1 Tideniedrigwasser 147
13.2 Tidehochwasser 153

14 Emden 159
14.1 Tideniedrigwasser 159
14.2 Tidehochwasser 165

15 Mittlere Verweildauern 171

Abbildungsverzeichnis

Abb. 2.1: Tnw + MSL Trends List 1937 – 2008 15

Abb. 2.2: List 1937-2008, Trendentwicklung max. Basishöhe Tnw mit zunehmender Folgezahl 16

Abb. 2.3: List 1937-2008, maximal erreichte Basishöhe durch 1-8 aufeinanderfolgende Tnw 16

Abb. 2.4: List 1937-2008, Überschreitungszahlen durch 1-8 aufeinanderfolgende Tnw. Links: ≥ $MTnw_{1937-2008}$ + 150 cm = 553 cm, Rechts: ≥ MSL + 0 cm des jeweiligen Jahres 17

Abb. 2.5: List 1937-2008, Überschreitungszahlen durch 1-8 aufeinanderfolgende Tnw. Links: ≥ $MTnw_{1937-2008}$ + 200 cm = 603 cm, Rechts: ≥ MSL + 50 cm des jeweiligen Jahres 18

Abb. 2.6: List 1937-2008, Überschreitungszahlen durch 1-8 aufeinanderfolgende Tnw. Links: ≥ $MTnw_{1937-2008}$ + 200 cm = 653 cm, Rechts: ≥ MSL + 100 cm des jeweiligen Jahres 19

Abb. 2.7: List 1937-2008, relative Häufigkeiten aufeinanderfolgender Tnw 20

Abb. 2.8: List 1937-2008, Tnw-Folgezahlen 20

Abb. 2.9: Thw + MSL Trends List 1937 – 2008 21

Abb. 2.10: List 1937-2008, Trendentwicklung max. Basishöhe Thw mit zunehmender Folgezahl 22

Abb. 2.11: List 1937-2008, maximal erreichte Basishöhe durch 1-8 aufeinanderfolgende Thw 22

Abb. 2.12: List 1937-2008, Überschreitungszahlen durch 1-8 aufeinanderfolgende Thw. Links: ≥ $MThw_{1937-2008}$ + 0 cm = 576 cm, Rechts: ≥ MSL + 100 cm des jeweiligen Jahres 23

Abb. 2.13: List 1937-2008, Überschreitungszahlen durch 1-8 aufeinanderfolgende Thw. Links: ≥ $MThw_{1937-2008}$ + 100 cm = 676 cm, Rechts: ≥ MSL + 200 cm des jeweiligen Jahres 24

Abb. 2.14: List 1937-2008, Überschreitungszahlen durch 1-8 aufeinanderfolgende Thw. Links: ≥ $MThw_{1937-2008}$ + 200 cm = 776 cm, Rechts: ≥ MSL + 300 cm des jeweiligen Jahres 25

Abb. 2.15: List 1937-2008, relative Häufigkeiten aufeinanderfolgender Thw 26

Abb. 2.16: List 1937-2008, Thw-Folgezahlen 26

Abb. 3.1: Tnw + MSL Trends Hörnum 1937 - 2008 27

Abb. 3.2: Hörnum 1937-2008, Trendentwicklung max. Basishöhe der Tnw mit zunehmender Folgezahl 28

Abb. 3.3: Hörnum 1937-2008, maximal erreichte Basishöhe durch 1-8 aufeinanderfolgende Tnw 28

Abb. 3.4: Hörnum 1937-2008, Überschreitungszahlen durch 1-8 aufeinanderfolgende Tnw. Links: ≥ $MTnw_{1937-2008}$+150 cm = 544 cm, Rechts: ≥ MSL + 0 cm des jeweiligen Jahres 29

Abb. 3.5:	Hörnum 1937-2008, Überschreitungszahlen durch 1-8 aufeinanderfolgende Tnw. Links: ≥ $MTnw_{1937-2008}$+200 cm = 594 cm, Rechts: ≥ MSL + 50 cm des jeweiligen Jahres	30
Abb. 3.6:	Hörnum 1937-2008, Überschreitungszahlen durch 1-8 aufeinanderfolgende Tnw. Links: ≥ $MTnw_{1937-2008}$+250 cm = 644 cm, Rechts: ≥ MSL + 100 cm des jeweiligen Jahres	31
Abb. 3.7:	Hörnum 1937-2008, relative Häufigkeiten aufeinanderfolgender Tnw	32
Abb. 3.8:	Hörnum 1937-2008, Tnw-Folgezahlen	32
Abb. 3.9:	Thw + MSL Trends Hörnum 1937 – 2008	33
Abb. 3.10:	Hörnum 1937-2008, Trendentwicklung max. Basishöhe der Thw mit zunehmender Folgezahl	34
Abb. 3.11:	Hörnum 1937-2008, maximal erreichte Basishöhe durch 1-8 aufeinanderfolgende Thw	34
Abb. 3.12:	Hörnum 1937-2008, Überschreitungszahlen durch 1-8 aufeinanderfolgende Thw. Links: ≥ $MThw_{1937-2008}$+ 0 cm = 589 cm, Rechts: ≥ MSL + 100 cm des jeweiligen Jahres	35
Abb. 3.13:	Hörnum 1937-2008, Überschreitungszahlen durch 1-8 aufeinanderfolgende Thw. Links: ≥ $MThw_{1937-2008}$+ 100 cm = 689 cm, Rechts: ≥ MSL + 200 cm des jeweiligen Jahres	36
Abb. 3.14:	Hörnum 1937-2008, Überschreitungszahlen durch 1-8 aufeinanderfolgende Thw. Links: ≥ $MThw_{1937-2008}$+ 200 cm = 789 cm, Rechts: ≥ MSL + 300 cm des jeweiligen Jahres	37
Abb. 3.15:	Hörnum 1937-2008, relative Häufigkeiten aufeinanderfolgender Thw	38
Abb. 3.16:	Hörnum 1937-2008, Thw-Folgezahlen	38
Abb. 4.1:	Tnw + MSL Trends Wyk 1952 – 2008	39
Abb. 4.2:	Wyk 1952-2008, Trendentwicklung max. Basishöhe Tnw mit zunehmender Folgezahl	40
Abb. 4.3:	Wyk 1952-2008, maximal erreichte Basishöhe durch 1-8 aufeinanderfolgende Tnw	40
Abb. 4.4:	Wyk 1952-2008, Überschreitungszahlen durch 1-8 aufeinanderfolgende Tnw. Links: ≥ $MTnw_{1952-2008}$ + 150 cm = 501 cm, Rechts: ≥ MSL + 0 cm des jeweiligen Jahres	41
Abb. 4.5:	Wyk 1952-2008, Überschreitungszahlen durch 1-8 aufeinanderfolgende Tnw. Links: ≥ $MTnw_{1952-2008}$ + 200 cm = 551 cm, Rechts: ≥ MSL + 50 cm des jeweiligen Jahres	42
Abb. 4.6:	Wyk 1952-2008, Überschreitungszahlen durch 1-8 aufeinanderfolgende Tnw. Links: ≥ $MTnw_{1952-2008}$ + 250 cm = 601 cm, Rechts: ≥ MSL + 100 cm des jeweiligen Jahres	43
Abb. 4.7:	Wyk 1952-2008, relative Häufigkeiten aufeinanderfolgender Tnw	44
Abb. 4.8:	Wyk 1952-2008, Tnw-Folgezahlen	44
Abb. 4.9:	Thw + MSL Trends Wyk 1952 – 2008	45

Abb. 4.10: Wyk 1952-2008, Trendentwicklung max. Basishöhe Thw mit zunehmender Folgezahl 46

Abb. 4.11: Wyk 1952-2008, maximal erreichte Basishöhe durch 1-8 aufeinanderfolgende Thw 46

Abb. 4.12: Wyk 1952-2008, Überschreitungszahlen durch 1-8 aufeinanderfolgende Thw. Links: ≥ $MThw_{1952-2008}$ + 0 cm = 624 cm, Rechts: ≥ MSL + 100 cm des jeweiligen Jahres 47

Abb. 4.13: Wyk 1952-2008, Überschreitungszahlen durch 1-8 aufeinanderfolgende Thw. Links: ≥ $MThw_{1952-2008}$ + 100 cm = 724 cm, Rechts: ≥ MSL + 200 cm des jeweiligen Jahres 48

Abb. 4.14: Wyk 1952-2008, Überschreitungszahlen durch 1-8 aufeinanderfolgende Thw. Links: ≥ $MThw_{1952-2008}$ + 200 cm = 824 cm, Rechts: ≥ MSL + 300 cm des jeweiligen Jahres 49

Abb. 4.15: Wyk 1952-2008, relative Häufigkeiten aufeinanderfolgender Thw 50

Abb. 4.16: Wyk 1952-2008, Thw-Folgezahlen 50

Abb. 5.1: Tnw + MSL Trends Dagebüll 1937 - 2008 51

Abb. 5.2: Dagebüll 1937-2008, Trendentwicklung max. Basishöhe der Tnw mit zunehmender Folgezahl 52

Abb. 5.3: Dagebüll 1937-2008, maximal erreichte Basishöhe durch 1-8 aufeinanderfolgende Tnw 52

Abb. 5.4: Dagebüll 1937-2008, Überschreitungszahlen durch 1-8 aufeinanderfolgende Tnw. Links: ≥ $MTnw_{1937-2008}$+150 cm = 496 cm, Rechts: ≥ MSL des jeweiligen Jahres 53

Abb. 5.5: Dagebüll 1937-2008, Überschreitungszahlen durch 1-8 aufeinanderfolgende Tnw. Links: ≥ $MTnw_{1937-2008}$+200 cm = 546 cm, Rechts: ≥ MSL + 50 cm des jeweiligen Jahres 54

Abb. 5.6: Dagebüll 1937-2008, Überschreitungszahlen durch 1-8 aufeinanderfolgende Tnw. Links: ≥ $MTnw_{1937-2008}$+250 cm = 596 cm, Rechts: ≥ MSL + 100 cm des jeweiligen Jahres 55

Abb. 5.7: Dagebüll 1937-2008, relative Häufigkeiten aufeinanderfolgender Tnw 56

Abb. 5.8: Dagebüll 1937-2008, Tnw-Folgezahlen 56

Abb. 5.9: Thw + MSL Trends Dagebüll 1937 - 2008 57

Abb. 5.10: Dagebüll 1937-2008, Trendentwicklung max. Basishöhe Thw mit zunehmender Folgezahl 58

Abb. 5.11: Dagebüll 1937-2008, maximal erreichte Basishöhe durch 1-8 aufeinanderfolgende Thw 58

Abb. 5.12: Dagebüll 1937-2008, Überschreitungszahlen durch 1-8 aufeinanderfolgende Thw. Links: ≥ $MThw_{1937-2008}$ + 0 cm = 626 cm, Rechts: ≥ MSL + 100 cm des jeweiligen Jahres 59

Abb. 5.13: Dagebüll 1937-2008, Überschreitungszahlen durch 1-8 aufeinanderfolgende Thw. Links: ≥ $MThw_{1937-2008}$ + 100 cm = 726 cm, Rechts: ≥ MSL + 200 cm des jeweiligen Jahres 60

Abb. 5.14: Dagebüll 1937-2008, Überschreitungszahlen durch 1-8 aufeinanderfolgende Thw. Links: ≥ $MThw_{1937-2008}$ + 200 cm = 826 cm, Rechts: ≥ MSL + 300 cm des jeweiligen Jahres 61

Abb. 5.15: Dagebüll 1937-2008, relative Häufigkeiten aufeinanderfolgender Thw 62

Abb. 5.16: Dagebüll 1937-2008, Thw-Folgezahlen 62

Abb. 6.1: Tnw + MSL Trends Wittdün 1937 – 2008 63

Abb. 6.2: Wittdün 1937-2008, Trendentwicklung max. Basishöhe Tnw mit zunehmender Folgezahl 64

Abb. 6.3: Wittdün 1937-2008, maximal erreichte Basishöhe durch 1-8 aufeinanderfolgende Tnw 64

Abb. 6.4: Wittdün 1937-2008, Überschreitungszahlen durch 1-8 aufeinanderfolgende Tnw. Links: ≥ $MTnw_{1937-2008}$ + 150 cm = 513 cm, Rechts: ≥ MSL + 0 cm des jeweiligen Jahres 65

Abb. 6.5: Wittdün 1937-2008, Überschreitungszahlen durch 1-8 aufeinanderfolgende Tnw. Links: ≥ $MTnw_{1937-2008}$ + 200 cm = 563 cm, Rechts: ≥ MSL + 50 cm des jeweiligen Jahres 66

Abb. 6.6: Wittdün 1937-2008, Überschreitungszahlen durch 1-8 aufeinanderfolgende Tnw. Links: ≥ $MTnw_{1937-2008}$ + 250 cm = 613 cm, Rechts: ≥ MSL + 100 cm des jeweiligen Jahres 67

Abb. 6.7: Wittdün 1937-2008, relative Häufigkeiten aufeinanderfolgender Tnw 68

Abb. 6.8: Wittdün1937-2008, Tnw-Folgezahlen 68

Abb. 6.9: Thw + MSL Trends Wittdün 1937 – 2008 69

Abb. 6.10: Wittdün 1937-2008, Trendentwicklung max. Basishöhe Thw mit zunehmender Folgezahl 70

Abb. 6.11: Wittdün 1937-2008, maximal erreichte Basishöhe durch 1-8 aufeinanderfolgende Thw 70

Abb. 6.12: Wittdün 1937-2008, Überschreitungszahlen durch 1-8 aufeinanderfolgende Thw. Links: ≥ $MThw_{1937-2008}$ + 0 cm = 614 cm, Rechts: ≥ MSL + 100 cm des jeweiligen Jahres 71

Abb. 6.13: Wittdün 1937-2008, Überschreitungszahlen durch 1-8 aufeinanderfolgende Thw. Links: ≥ $MThw_{1937-2008}$ + 100 cm = 714 cm, Rechts: ≥ MSL + 200 cm des jeweiligen Jahres 72

Abb. 6.14: Wittdün 1937-2008, Überschreitungszahlen durch 1-8 aufeinanderfolgende Thw. Links: ≥ $MThw_{1937-2008}$ + 200 cm = 814 cm, Rechts: ≥ MSL + 300 cm des jeweiligen Jahres 73

Abb. 6.15: Wittdün 1937-2008, relative Häufigkeiten aufeinanderfolgender Thw 74

Abb. 6.16: Wittdün 1937-2008, Thw-Folgezahlen 74

Abb. 7.1: Tnw + MSL Trends Husum 1937 – 2008 75

Abb. 7.2: Husum 1937-2008, Trendentwicklung max. Basishöhe Tnw mit zunehmender Folgezahl 76

Abb. 7.3: Husum 1937-2008, maximal erreichte Basishöhe durch 1-8 aufeinanderfolgende Tnw 76

Abb. 7.4: Husum 1937-2008, Überschreitungszahlen durch 1-8 aufeinanderfolgende Tnw. Links: ≥ $MTnw_{1937-2008}$ + 150 cm = 468 cm, Rechts: ≥ MSL + 0 cm des jeweiligen Jahres 77

Abb. 7.5: Husum 1937-2008, Überschreitungszahlen durch 1-8 aufeinanderfolgende Tnw. Links: ≥ $MTnw_{1937-2008}$ + 200 cm = 518 cm, Rechts: ≥ MSL + 50 cm des jeweiligen Jahres 78

Abb. 7.6: Husum 1937-2008, Überschreitungszahlen durch 1-8 aufeinanderfolgende Tnw. Links: ≥ $MTnw_{1937-2008}$ + 250 cm = 568 cm, Rechts: ≥ MSL + 100 cm des jeweiligen Jahres 79

Abb. 7.7: Husum 1937-2008, relative Häufigkeiten aufeinanderfolgender Tnw 80

Abb. 7.8: Husum 1937-2008, Tnw-Folgezahlen 80

Abb. 7.9: Thw + MSL Trends Husum 1937 – 2008 81

Abb. 7.10: Husum 1937-2008, Trendentwicklung max. Basishöhe Thw mit zunehmender Folgezahl 82

Abb. 7.11: Husum 1937-2008, maximal erreichte Basishöhe durch 1-8 aufeinanderfolgende Thw 82

Abb. 7.12: Husum 1937-2008, Überschreitungszahlen durch 1-8 aufeinanderfolgende Thw. Links: ≥ $MThw_{1937-2008}$ + 0 cm = 658 cm, Rechts: ≥ MSL + 100 cm des jeweiligen Jahres 83

Abb. 7.13: Husum 1937-2008, Überschreitungszahlen durch 1-8 aufeinanderfolgende Thw. Links: ≥ $MThw_{1937-2008}$ + 100 cm = 758 cm, Rechts: ≥ MSL + 200 cm des jeweiligen Jahres 84

Abb. 7.14: Husum 1937-2008, Überschreitungszahlen durch 1-8 aufeinanderfolgende Thw. Links: ≥ $MThw_{1937-2008}$ + 200 cm = 858 cm, Rechts: ≥ MSL + 300 cm des jeweiligen Jahres 85

Abb. 7.15: Husum 1937-2008, relative Häufigkeiten aufeinanderfolgender Thw 86

Abb. 7.16: Husum 1937-2008, Thw-Folgezahlen 86

Abb. 8.1: Tnw + MSL Trends Helgoland 1954 – 2008 87

Abb. 8.2: Helgoland 1954-2008, Trendentwicklung max. Basishöhe Tnw mit zunehmender Folgezahl 88

Abb. 8.3: Helgoland 1954-2008, maximal erreichte Basishöhe durch 1-8 aufeinanderfolgende Tnw 88

Abb. 8.4: Helgoland 1954-2008, Überschreitungszahlen durch 1-8 aufeinanderfolgende Tnw. Links: ≥ $MTnw_{1954-2008}$ + 150 cm = 524 cm, Rechts: ≥ MSL + 0 cm des jeweiligen Jahres 89

Abb. 8.5: Helgoland 1954-2008, Überschreitungszahlen durch 1-8 aufeinanderfolgende Tnw. Links: ≥ $MTnw_{1954-2008}$ + 200 cm = 574 cm, Rechts: ≥ MSL + 50 cm des jeweiligen Jahres 90

Abb. 8.6: Helgoland 1954-2008, Überschreitungszahlen durch 1-8 aufeinanderfolgende Tnw. Links: ≥ $MTnw_{1954-2008}$ + 250 cm = 624 cm, Rechts: ≥ MSL + 100 cm des jeweiligen Jahres 91

Abb. 8.7: Helgoland 1954-2008, relative Häufigkeiten aufeinanderfolgender Tnw 92

Abb. 8.8:	Helgoland 1954-2008, Tnw-Folgezahlen	92
Abb. 8.9:	Thw + MSL Trends Helgoland 1954 – 2008	93
Abb. 8.10:	Helgoland 1937-2008, Trendentwicklung max. Basishöhe Thw mit zunehmender Folgezahl	94
Abb. 8.11:	Helgoland 1954-2008, maximal erreichte Basishöhe durch 1-8 aufeinanderfolgende Thw	94
Abb. 8.12:	Helgoland 1954-2008, Überschreitungszahlen durch 1-8 aufeinanderfolgende Thw. Links: ≥ $MThw_{1954-2008}$ + 0 cm = 609 cm, Rechts: ≥ MSL + 100 cm des jeweiligen Jahres	95
Abb. 8.13:	Helgoland 1954-2008, Überschreitungszahlen durch 1-8 aufeinanderfolgende Thw. Links: ≥ $MThw_{1954-2008}$ + 100 cm = 709 cm, Rechts: ≥ MSL + 200 cm des jeweiligen Jahres	96
Abb. 8.14:	Helgoland 1954-2008, Überschreitungszahlen durch 1-8 aufeinanderfolgende Thw. Links: ≥ $MThw_{1954-2008}$ + 200 cm = 809 cm, Rechts: ≥ MSL + 300 cm des jeweiligen Jahres	97
Abb. 8.15:	Helgoland 1954-2008, relative Häufigkeiten aufeinanderfolgender Thw	98
Abb. 8.16:	Helgoland 1954-2008, Thw-Folgezahlen	98
Abb. 9.1:	Tnw + MSL Trends Cuxhaven 1937 – 2008	99
Abb. 9.2:	Cuxhaven 1937-2008, Trendentwicklung max. Basishöhe Tnw mit zunehmender Folgezahl	100
Abb. 9.3:	Cuxhaven 1937-2008, maximal erreichte Basishöhe durch 1-8 aufeinanderfolgende Tnw	100
Abb. 9.4:	Cuxhaven 1937-2008, Überschreitungszahlen durch 1-8 aufeinanderfolgende Tnw. Links: ≥ $MTnw_{1937-2008}$ + 150 cm = 504 cm, Rechts: ≥ MSL + 0 cm des jeweiligen Jahres	101
Abb. 9.5:	Cuxhaven 1937-2008, Überschreitungszahlen durch 1-8 aufeinanderfolgende Tnw. Links: ≥ $MTnw_{1937-2008}$ + 200 cm = 554 cm, Rechts: ≥ MSL + 50 cm des jeweiligen Jahres	102
Abb. 9.6:	Cuxhaven 1937-2008, Überschreitungszahlen durch 1-8 aufeinanderfolgende Tnw. Links: ≥ $MTnw_{1937-2008}$ + 250 cm = 604 cm, Rechts: ≥ MSL + 100 cm des jeweiligen Jahres	103
Abb. 9.7:	Cuxhaven 1937-2008, relative Häufigkeiten aufeinanderfolgender Tnw	104
Abb. 9.8:	Cuxhaven 1937-2008, Tnw-Folgezahlen	104
Abb. 9.9:	Tnw + MSL Trends Cuxhaven 1937 – 2008	105
Abb. 9.10:	Cuxhaven 1937-2008, Trendentwicklung max. Basishöhe Thw mit zunehmender Folgezahl	106
Abb. 9.11:	Cuxhaven 1937-2008, maximal erreichte Basishöhe durch 1-8 aufeinanderfolgende Thw	106
Abb. 9.12:	Cuxhaven 1937-2008, Überschreitungszahlen durch 1-8 aufeinanderfolgende Thw. Links: ≥ $MThw_{1937-2008}$ + 0 cm = 646 cm, Rechts: ≥ MSL + 100 cm des jeweiligen Jahres	107

Abb. 9.13: Cuxhaven 1937-2008, Überschreitungszahlen durch 1-8 aufeinanderfolgende Thw. Links: ≥ $MThw_{1937-2008}$ + 100 cm = 746 cm, Rechts: ≥ MSL + 200 cm des jeweiligen Jahres 108

Abb. 9.14: Cuxhaven 1937-2008, Überschreitungszahlen durch 1-8 aufeinanderfolgende Thw. Links: ≥ $MThw_{1937-2008}$ + 200 cm = 846 cm, Rechts: ≥ MSL + 300 cm des jeweiligen Jahres 109

Abb. 9.15: Cuxhaven 1937-2008, relative Häufigkeiten aufeinanderfolgender Thw 110

Abb. 9.16: Cuxhaven 1937-2008, Thw-Folgezahlen 110

Abb. 10.1: Tnw + MSL Trends Bremerhaven 1937 – 2008 111

Abb. 10.2: Bremerhaven 1937-2008, Trendentwicklung max. Basishöhe Tnw mit zunehmender Folgezahl 112

Abb. 10.3: Bremerhaven 1937-2008, maximal erreichte Basishöhe durch 1-8 aufeinanderfolgende Tnw 112

Abb. 10.4: Bremerhaven 1937-2008, Überschreitungszahlen durch 1-8 aufeinanderfolgende Tnw. Links: ≥ $MTnw_{1937-2008}$ + 150 cm = 461 cm, Rechts: ≥ MSL + 0 cm des jeweiligen Jahres 113

Abb. 10.5: Bremerhaven 1937-2008, Überschreitungszahlen durch 1-8 aufeinanderfolgende Tnw. Links: ≥ $MTnw_{1937-2008}$ + 200 cm = 511 cm, Rechts: ≥ MSL + 50 cm des jeweiligen Jahres 114

Abb. 10.6: Bremerhaven 1937-2008, Überschreitungszahlen durch 1-8 aufeinanderfolgende Tnw. Links: ≥ $MTnw_{1937-2008}$ + 250 cm = 561 cm, Rechts: ≥ MSL + 100 cm des jeweiligen Jahres 115

Abb. 10.7: Bremerhaven 1937-2008, relative Häufigkeiten aufeinanderfolgender Tnw 116

Abb. 10.8: Bremerhaven 1937-2008, Tnw-Folgezahlen 116

Abb. 10.9: Thw + MSL Trends Bremerhaven 1937 – 2008 117

Abb. 10.10: Bremerhaven 1937-2008, Trendentwicklung max. Basishöhe Thw mit zunehmender Folgezahl 118

Abb. 10.11: Bremerhaven 1937-2008, maximal erreichte Basishöhe durch 1-8 aufeinanderfolgende Thw 118

Abb. 10.12: Bremerhaven 1937-2008, Überschreitungszahlen durch 1-8 aufeinanderfolgende Thw. Links: ≥ $MThw_{1937-2008}$ + 0 cm = 669 cm, Rechts: ≥ MSL + 100 cm des jeweiligen Jahres 119

Abb. 10.13: Bremerhaven 1937-2008, Überschreitungszahlen durch 1-8 aufeinanderfolgende Thw. Links: ≥ $MThw_{1937-2008}$ + 100 cm = 769 cm, Rechts: ≥ MSL + 200 cm des jeweiligen Jahres 120

Abb. 10.14: Bremerhaven 1937-2008, Überschreitungszahlen durch 1-8 aufeinanderfolgende Thw. Links: ≥ $MThw_{1937-2008}$ + 200 cm = 869 cm, Rechts: ≥ MSL + 300 cm des jeweiligen Jahres 121

Abb. 10.15: Bremerhaven 1937-2008, relative Häufigkeiten aufeinanderfolgender Thw 122

Abb. 10.16: Bremerhaven 1937-2008, Thw-Folgezahlen 122

Abb. 11.1: Tnw + MSL Trends LT Alte Weser 1937 – 2008 123

Abb. 11.2: LT Alte Weser 1937-2008, Trendentwicklung max. Basishöhe Tnw mit zunehmender Folgezahl 124

Abb. 11.3 LT Alte Weser 1937-2008, maximal erreichte Basishöhe durch 1-8 aufeinanderfolgende Tnw 124

Abb. 11.4: LT Alte Weser 1937-2008, Überschreitungszahlen durch 1-8 aufeinanderfolgende Tnw. Links: ≥ $MTnw_{1937-2008}$ + 150 cm = 495 cm, Rechts: ≥ MSL + 0 cm des jeweiligen Jahres 125

Abb. 11.5: LT Alte Weser 1937-2008, Überschreitungszahlen durch 1-8 aufeinanderfolgende Tnw. Links: ≥ $MTnw_{1937-2008}$ + 200 cm = 545 cm, Rechts: ≥ MSL + 50 cm des jeweiligen Jahres 126

Abb. 11.6: LT Alte Weser 1937-2008, Überschreitungszahlen durch 1-8 aufeinanderfolgende Tnw. Links: ≥ $MTnw_{1937-2008}$ + 250 cm = 595 cm, Rechts: ≥ MSL + 100 cm des jeweiligen Jahres 127

Abb. 11.7: LT Alte Weser 1937-2008, relative Häufigkeiten aufeinanderfolgender Tnw 128

Abb. 11.8: LT Alte Weser 1937-2008, Tnw-Folgezahlen 128

Abb. 11.9: Thw + MSL Trends LT Alte Weser 1937 – 2008 129

Abb. 11.10: LT Alte Weser 1937-2008, Trendentwicklung max. Basishöhe Thw mit zunehmender Folgezahl 130

Abb. 11.11: LT Alte Weser 1937-2008, maximal erreichte Basishöhe durch 1-8 aufeinanderfolgende Thw 130

Abb. 11.12: LT Alte Weser 1937-2008, Überschreitungszahlen durch 1-8 aufeinanderfolgende Thw. Links: ≥ $MThw_{1937-2008}$ + 0 cm = 628 cm, Rechts: ≥ MSL + 100 cm des jeweiligen Jahres 131

Abb. 11.13: LT Alte Weser 1937-2008, Überschreitungszahlen durch 1-8 aufeinanderfolgende Thw. Links: ≥ $MThw_{1937-2008}$ + 100 cm = 728 cm, Rechts: ≥ MSL + 200 cm des jeweiligen Jahres 132

Abb. 11.14: LT Alte Weser 1937-2008, Überschreitungszahlen durch 1-8 aufeinanderfolgende Thw. Links: ≥ $MThw_{1937-2008}$ + 200 cm = 828 cm, Rechts: ≥ MSL + 300 cm des jeweiligen Jahres 133

Abb. 11.15: LT Alte Weser 1937-2008, relative Häufigkeiten aufeinanderfolgender Thw 134

Abb. 11.16: LT Alte Weser 1937-2008, Thw-Folgezahlen 134

Abb. 12.1: Tnw + MSL Trends Wilhelmshaven 1937 – 2008 135

Abb. 12.2: Wilhelmshaven 1937-2008, Trendentwicklung max. Basishöhe Tnw mit zunehmender Folgezahl 136

Abb. 12.3 Wilhelmshaven 1937-2008, maximal erreichte Basishöhe durch 1-8 aufeinanderfolgende Tnw 136

Abb. 12.4: Wilhelmshaven 1937-2008, Überschreitungszahlen durch 1-8 aufeinanderfolgende Tnw. Links: ≥ $MTnw_{1937-2008}$ + 150 cm = 451 cm, Rechts: ≥ MSL + 0 cm des jeweiligen Jahres 137

Abb. 12.5: Wilhelmshaven 1937-2008, Überschreitungszahlen durch 1-8 aufeinanderfolgende Tnw. Links: ≥ $MTnw_{1937-2008}$ + 200 cm = 501 cm, Rechts: ≥ MSL + 50 cm des jeweiligen Jahres 138

Abb. 12.6: Wilhelmshaven 1937-2008, Überschreitungszahlen durch 1-8 aufeinanderfolgende Tnw. Links: ≥ $MTnw_{1937-2008}$ + 250 cm = 551 cm, Rechts: ≥ MSL + 100 cm des jeweiligen Jahres 139

Abb. 12.7: Wilhelmshaven 1937-2008, relative Häufigkeiten aufeinanderfolgender Tnw 140

Abb. 12.8: Wilhelmshaven 1937-2008, Tnw-Folgezahlen 140

Abb. 12.9: Thw + MSL Trends Wilhelmshaven 1937 – 2008 141

Abb. 12.10: Wilhelmshaven 1937-2008, Trendentwicklung max. Basishöhe Thw mit zunehmender Folgezahl 142

Abb. 12.11: Wilhelmshaven 1937-2008, maximal erreichte Basishöhe durch 1-8 aufeinanderfolgende Thw 142

Abb. 12.12: Wilhelmshaven 1937-2008, Überschreitungszahlen durch 1-8 aufeinanderfolgende Thw. Links: ≥ $MThw_{1937-2008}$ + 0 cm = 673 cm, Rechts: ≥ MSL + 100 cm des jeweiligen Jahres 143

Abb. 12.13: Wilhelmshaven 1937-2008, Überschreitungszahlen durch 1-8 aufeinanderfolgende Thw. Links: ≥ $MThw_{1937-2008}$ + 100 cm = 773 cm, Rechts: ≥ MSL + 200 cm des jeweiligen Jahres 144

Abb. 12.14: Wilhelmshaven 1937-2008, Überschreitungszahlen durch 1-8 aufeinanderfolgende Thw. Links: ≥ $MThw_{1937-2008}$ + 200 cm = 873 cm, Rechts: ≥ MSL + 300 cm des jeweiligen Jahres 145

Abb. 12.15: Wilhelmshaven 1937-2008, relative Häufigkeiten aufeinanderfolgender Thw 146

Abb. 12.16: Wilhelmshaven 1937-2008, Tnw-Folgezahlen 146

Abb. 13.1: Tnw + MSL Trends Norderney 1937 – 2008 147

Abb. 13.2: Norderney 1937-2008, Trendentwicklung max. Basishöhe Tnw mit zunehmender Folgezahl 148

Abb. 13.3: Norderney 1937-2008, maximal erreichte Basishöhe durch 1-8 aufeinanderfolgende Tnw 148

Abb. 13.4: Norderney 1937-2008, Überschreitungszahlen durch 1-8 aufeinanderfolgende Tnw. Links: ≥ $MTnw_{1937-2008}$ + 150 cm = 527 cm, Rechts: ≥ MSL + 0 cm des jeweiligen Jahres 149

Abb. 13.5: Norderney 1937-2008, Überschreitungszahlen durch 1-8 aufeinanderfolgende Tnw. Links: ≥ $MTnw_{1937-2008}$ + 200 cm = 577 cm, Rechts: ≥ MSL + 50 cm des jeweiligen Jahres 150

Abb. 13.6: Norderney 1937-2008, Überschreitungszahlen durch 1-8 aufeinanderfolgende Tnw. Links: ≥ $MTnw_{1937-2008}$ + 250 cm = 627 cm, Rechts: ≥ MSL + 100 cm des jeweiligen Jahres 151

Abb. 13.7: Norderney 1937-2008, relative Häufigkeiten aufeinanderfolgender Tnw 152

Abb. 13.8: Norderney 1937-2008, Tnw-Folgezahlen 152

Abb. 13.9: Thw + MSL Trends Norderney 1937 – 2008 153

Abb. 13.10: Norderney 1937-2008, Trendentwicklung max. Basishöhe Thw mit zunehmender Folgezahl 154

Abb. 13.11: Norderney 1937-2008, maximal erreichte Basishöhe durch 1-8 aufeinanderfolgende Thw 154

Abb. 13.12: Norderney 1937-2008, Überschreitungszahlen durch 1-8 aufeinanderfolgende Thw. Links: ≥ $MThw_{1937-2008}$ + 0 cm = 616 cm, Rechts: ≥ MSL + 100 cm des jeweiligen Jahres 155

Abb. 13.13: Norderney 1937-2008, Überschreitungszahlen durch 1-8 aufeinanderfolgende Thw. Links: ≥ $MThw_{1937-2008}$ + 100 cm = 716 cm, Rechts: ≥ MSL + 200 cm des jeweiligen Jahres 156

Abb. 13.14: Norderney 1937-2008, Überschreitungszahlen durch 1-8 aufeinanderfolgende Thw. Links: ≥ $MThw_{1937-2008}$ + 200 cm = 816 cm, Rechts: ≥ MSL + 300 cm des jeweiligen Jahres 157

Abb. 13.15: Norderney 1937-2008, relative Häufigkeiten aufeinanderfolgender Thw 158

Abb. 13.16: Norderney 1937-2008, Thw-Folgezahlen 158

Abb. 14.1: Tnw + MSL Trends Emden 1951 – 2008 159

Abb. 14.2: Emden 1951-2008, Trendentwicklung max. Basishöhe Tnw mit zunehmender Folgezahl 160

Abb. 14.3: Emden 1951-2008, maximal erreichte Basishöhe durch 1-8 aufeinanderfolgende Tnw 160

Abb. 14.4: Emden 1951-2008, Überschreitungszahlen durch 1-8 aufeinanderfolgende Tnw. Links: ≥ $MTnw_{1937-2008}$ + 150 cm = 479 cm, Rechts: ≥ MSL + 0 cm des jeweiligen Jahres 161

Abb. 14.5: Emden 1951-2008, Überschreitungszahlen durch 1-8 aufeinanderfolgende Tnw. Links: ≥ $MTnw_{1951-2008}$ + 200 cm = 529 cm, Rechts: ≥ MSL + 50 cm des jeweiligen Jahres 162

Abb. 14.6: Emden 1951-2008, Überschreitungszahlen durch 1-8 aufeinanderfolgende Tnw. Links: ≥ $MTnw_{1951-2008}$ + 200 cm = 579 cm, Rechts: ≥ MSL + 100 cm des jeweiligen Jahres 163

Abb. 14.7: Emden 1951-2008, relative Häufigkeiten aufeinanderfolgender Tnw 164

Abb. 14.8: Emden 1951-2008, Tnw-Folgezahlen 164

Abb. 14.9: Thw + MSL Trends Emden 1951 – 2008 165

Abb. 14.10: Emden 1951-2008, Trendentwicklung max. Basishöhe Thw mit zunehmender Folgezahl 166

Abb. 14.11: Emden 1951-2008, maximal erreichte Basishöhe durch 1-8 aufeinanderfolgende Thw 166

Abb. 14.12: Emden 1951-2008, Überschreitungszahlen durch 1-8 aufeinanderfolgende Thw. Links: ≥ $MThw_{1951-2008}$ + 0 cm = 640 cm, Rechts: ≥ MSL + 100 cm des jeweiligen Jahres 167

Abb. 14.13: Emden 1951-2008, Überschreitungszahlen durch 1-8 aufeinanderfolgende Thw. Links: ≥ $MThw_{1951-2008}$ + 100 cm = 740 cm, Rechts: ≥ MSL + 200 cm des jeweiligen Jahres 168

Abb. 14.14: Emden 1951-2008, Überschreitungszahlen durch 1-8 aufeinanderfolgende Thw. Links: ≥ $MThw_{1951-2008}$ + 200 cm = 840 cm, Rechts: ≥ MSL + 300 cm des jeweiligen Jahres 169

Abb. 14.15: Emden 1951-2008, relative Häufigkeiten aufeinanderfolgender Thw 170

Abb. 14.16: Emden 1951-2008, Thw-Folgezahlen 170

Tabellenverzeichnis

Tab. 15.1: Mittlere Verweildauern [h] des Zeitraums 2000-2008, Pegel List, Hörnum, Wyk, Dagebüll, jeweils für Kalenderjahre (KJ), Sommerhalbjahre (SoHaJ, 1.5.-31.10.) und Winterhalbjahre (WiHaJ, 1.11.-30.4.) (für Norderney und Emden: Winterhalbjahre von 2001-2008) 171

Tab. 15.2: Mittlere Verweildauern [h] des Zeitraums 2000-2008, Pegel Wittdün, Husum, Helgoland, Cuxhaven, jeweils für Kalenderjahre (KJ), Sommerhalbjahre (SoHaJ, 1.5.-31.10.) und Winterhalbjahre (WiHaJ, 1.11.-30.4.) (für Norderney und Emden: Winterhalbjahre von 2001-2008) 172

Tab. 15.3: Mittlere Verweildauern [h] des Zeitraums 2000-2008, Pegel Bremerhaven, LT Alte Weser, Wilhelmshaven, Norderney, jeweils für Kalenderjahre (KJ), Sommerhalbjahre (SoHaJ, 1.5.-31.10.) und Winterhalbjahre (WiHaJ, 1.11.-30.4.) (für Norderney und Emden: Winterhalbjahre von 2001-2008) 173

Tab. 15.4: Mittlere Verweildauern [h] des Zeitraums 2000-2008 Pegel Emden, jeweils für Kalenderjahre (KJ), Sommerhalbjahre (SoHaJ, 1.5.-31.10.) und Winterhalbjahre (WiHaJ, 1.11.-30.4.) (für Norderney und Emden: Winterhalbjahre von 2001-2008) 174

1 Einführung

In folgenden Anhang sind für alle im Projekt AMSeL untersuchten Pegel die Auswertungen zum Auftreten von Tnw- und Thw-Folgen in grafischer Form aufgeführt und hinsichtlich der Anzahl aufgetretener Ereignisse sowie der maximal erreichten Basishöhen im Vergleich zu den Trends der MTnw/MThw, NTnw/NThw, HTnw/HThw und des MSL bewertet.

2 List

2.1 Tideniedrigwasser

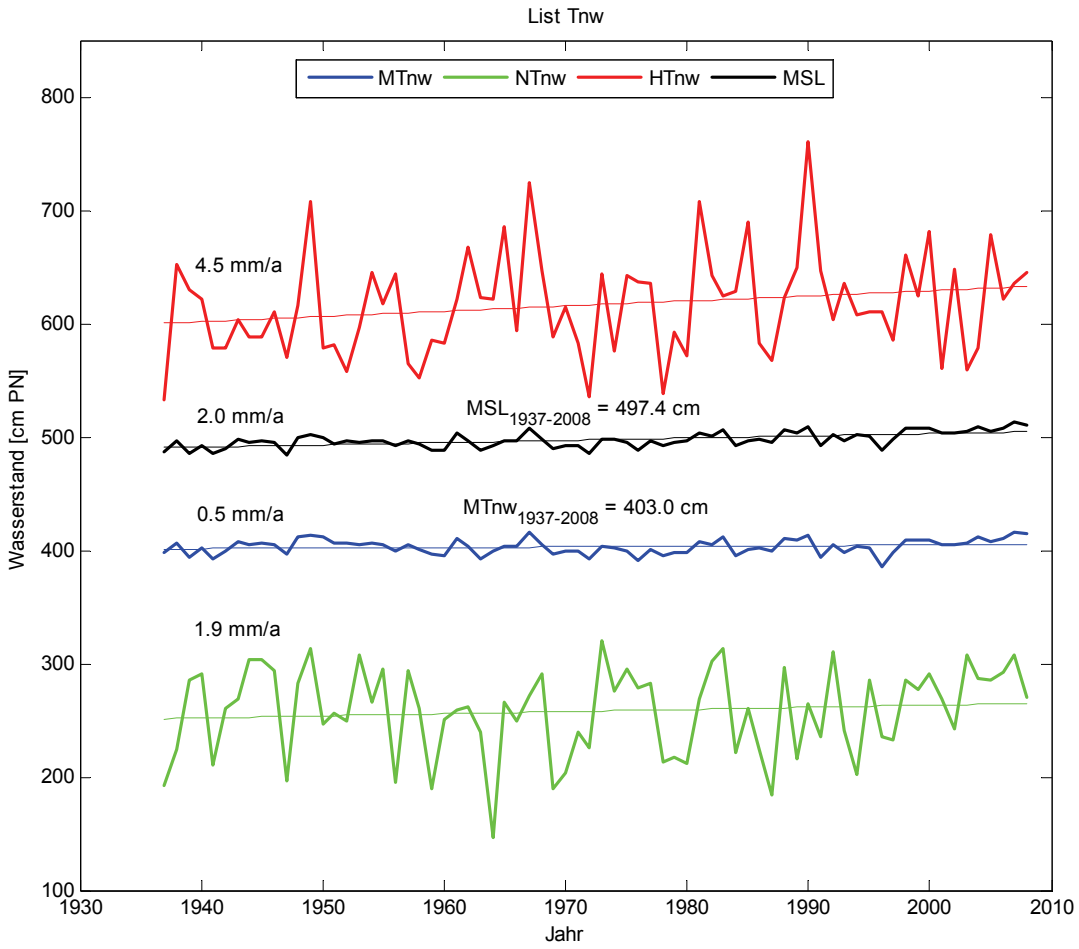


Abb. 2.1: Tnw + MSL Trends List 1937 – 2008

Tendenziell nimmt der Trend der maximal erreichten Basishöhe von n aufeinanderfolgenden Tnw mit zunehmender Folgenzahl ab (Abb. 2.2, Abb. 2.3). Das Maximum wird aber bei 3 aufeinanderfolgenden Tnw erreicht mit einem Trend von 5,9 mm/a. Dieser Trend ist größer als der Trend der HTnw = 4,5 mm/a. Alle Trends liegen deutlich über dem Trend des MTnw = 0,5 mm/a. Der niedrigste Trend beträgt 1,9 mm/a und wird für 7 aufeinanderfolgende Tnw erreicht.

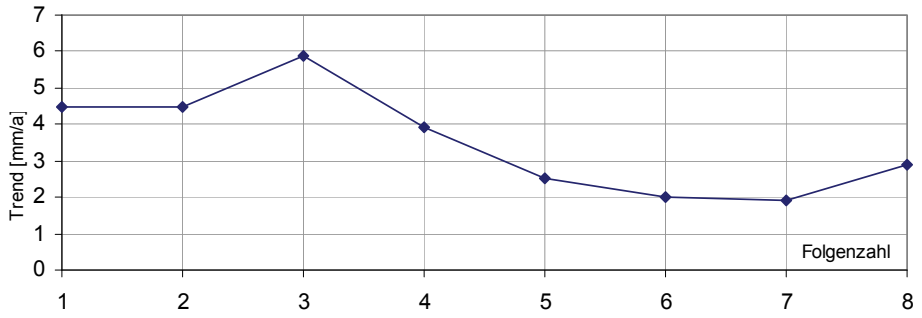


Abb. 2.2: List 1937-2008, Trendentwicklung max. Basishöhe Tnw mit zunehmender Folgezahl

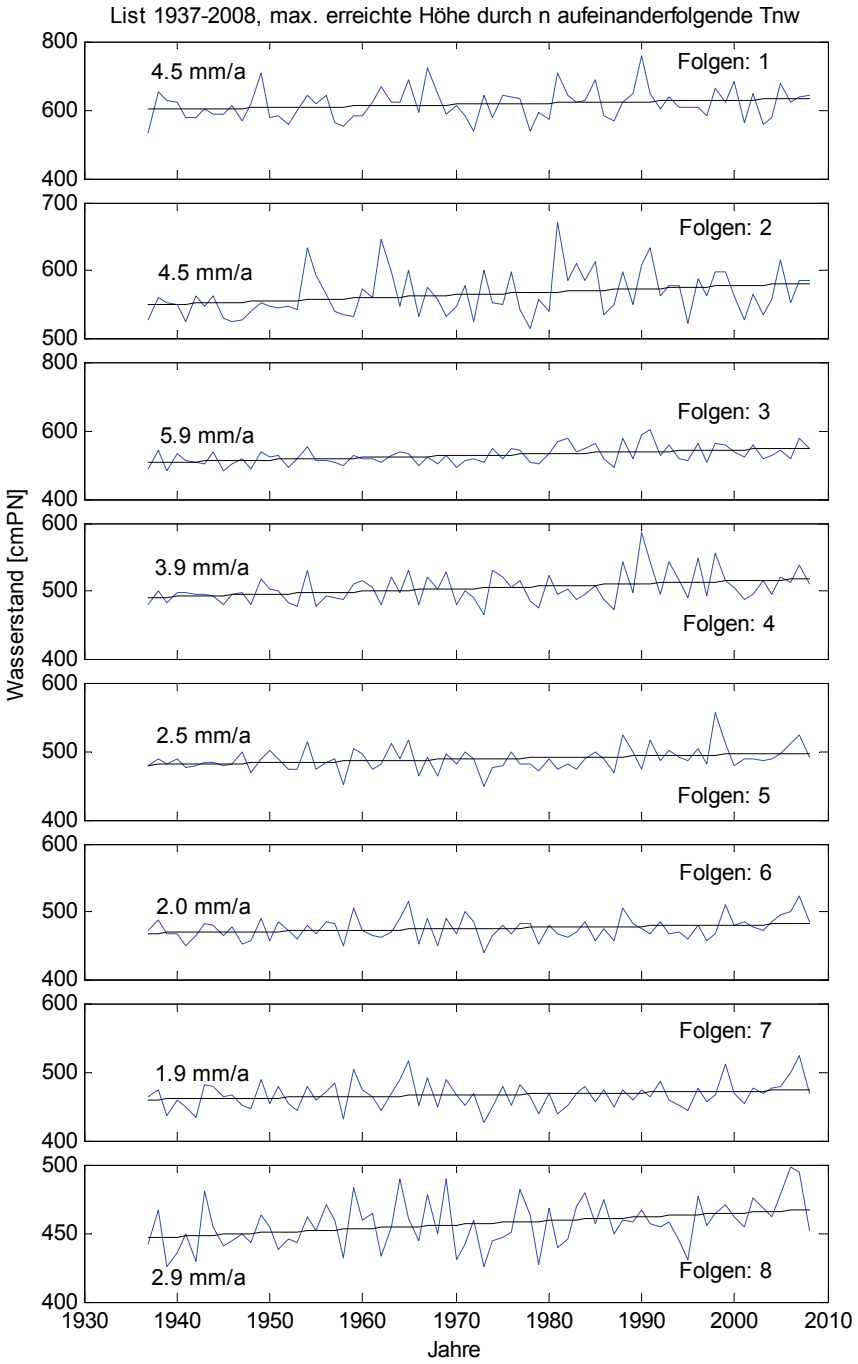


Abb. 2.3: List 1937-2008, maximal erreichte Basishöhe durch 1-8 aufeinanderfolgende Tnw

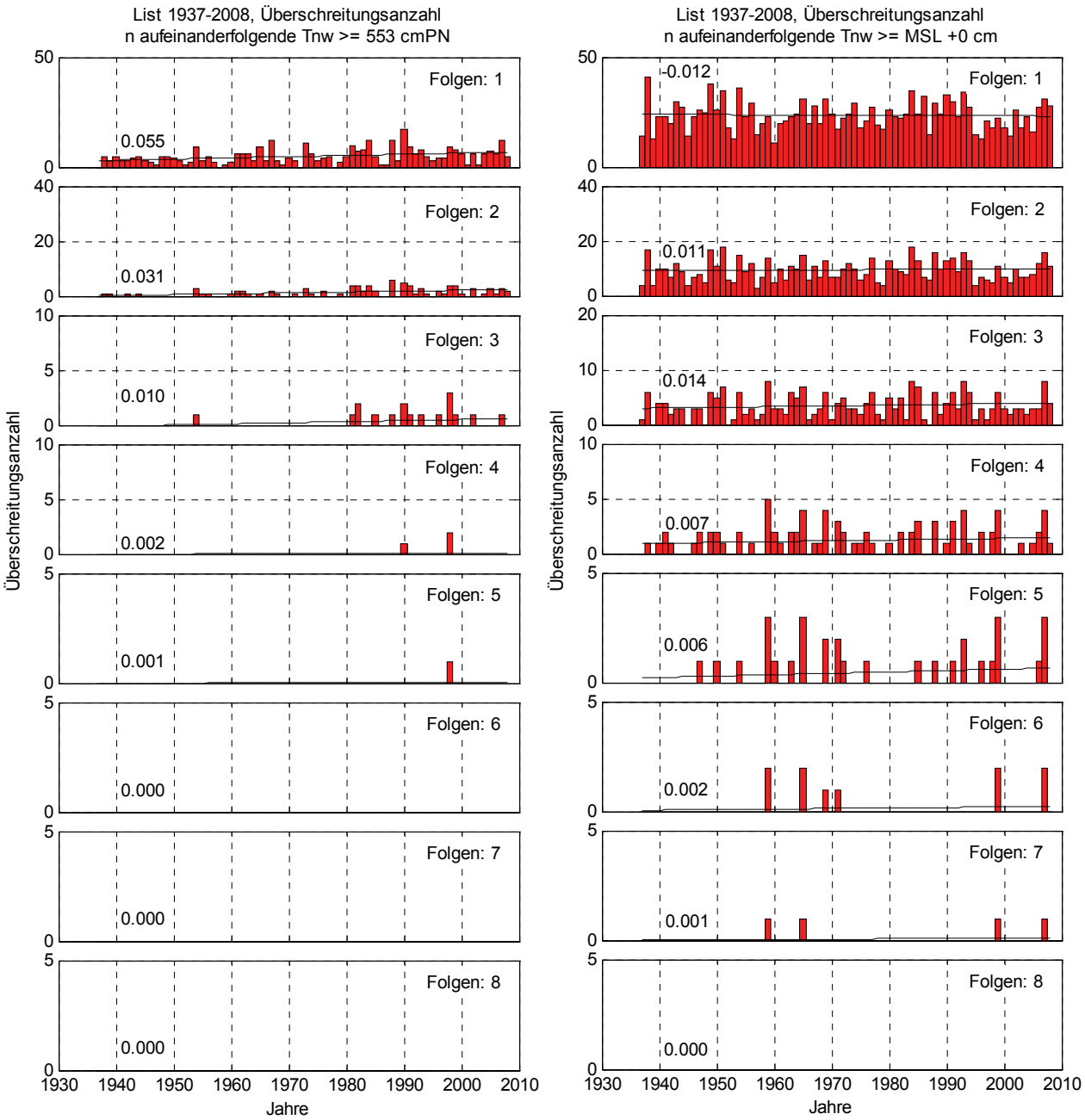


Abb. 2.4: List 1937-2008, Überschreitungszahlen durch 1-8 aufeinanderfolgende Tnw. Links: ≥ $MTnw_{1937\text{-}2008}$ + 150 cm = 553 cm, Rechts: ≥ MSL + 0 cm des jeweiligen Jahres

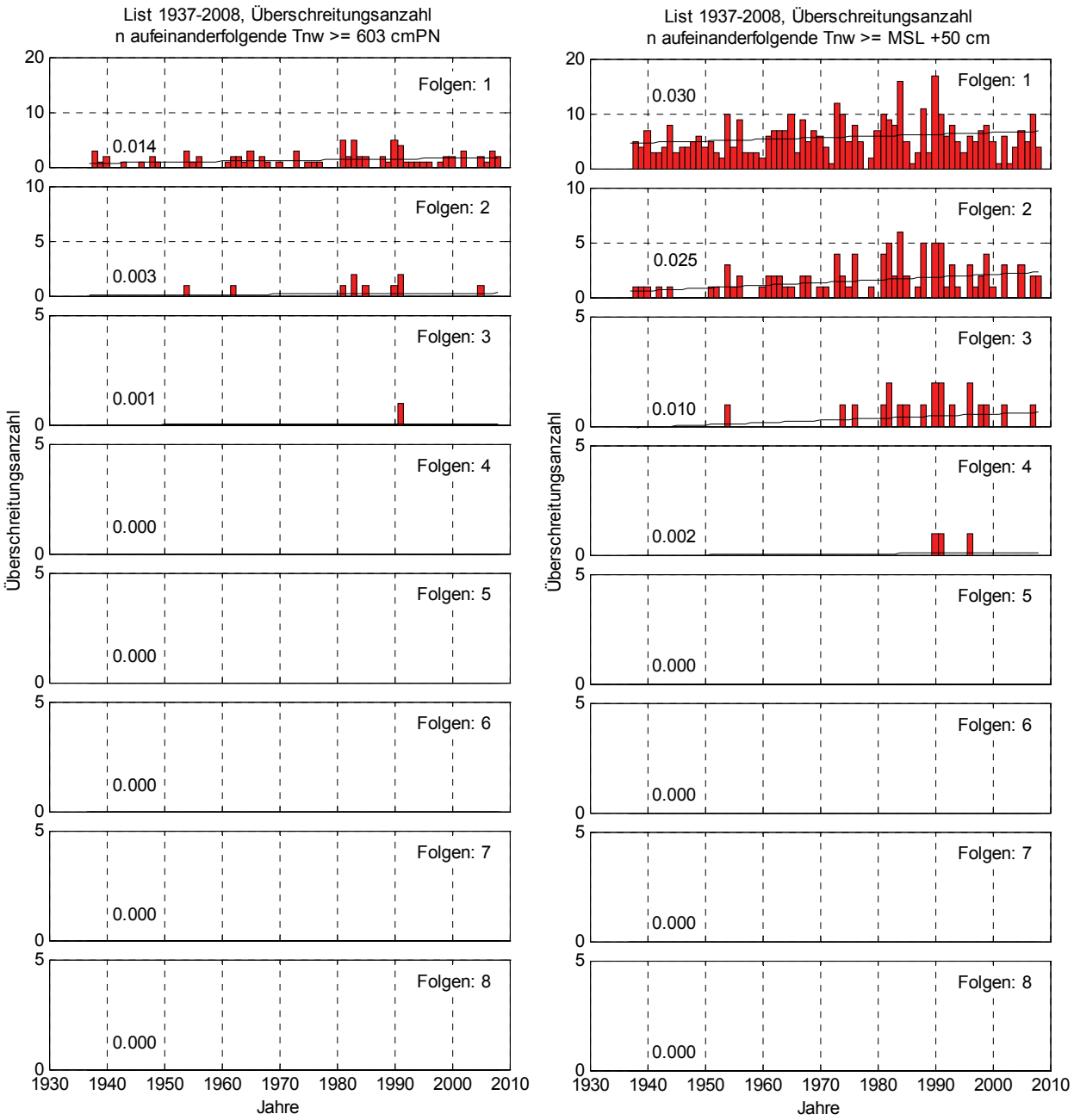


Abb. 2.5: List 1937-2008, Überschreitungszahlen durch 1-8 aufeinanderfolgende Tnw. Links: ≥ $MTnw_{1937\text{-}2008}$ + 200 cm = 603 cm, Rechts: ≥ MSL + 50 cm des jeweiligen Jahres

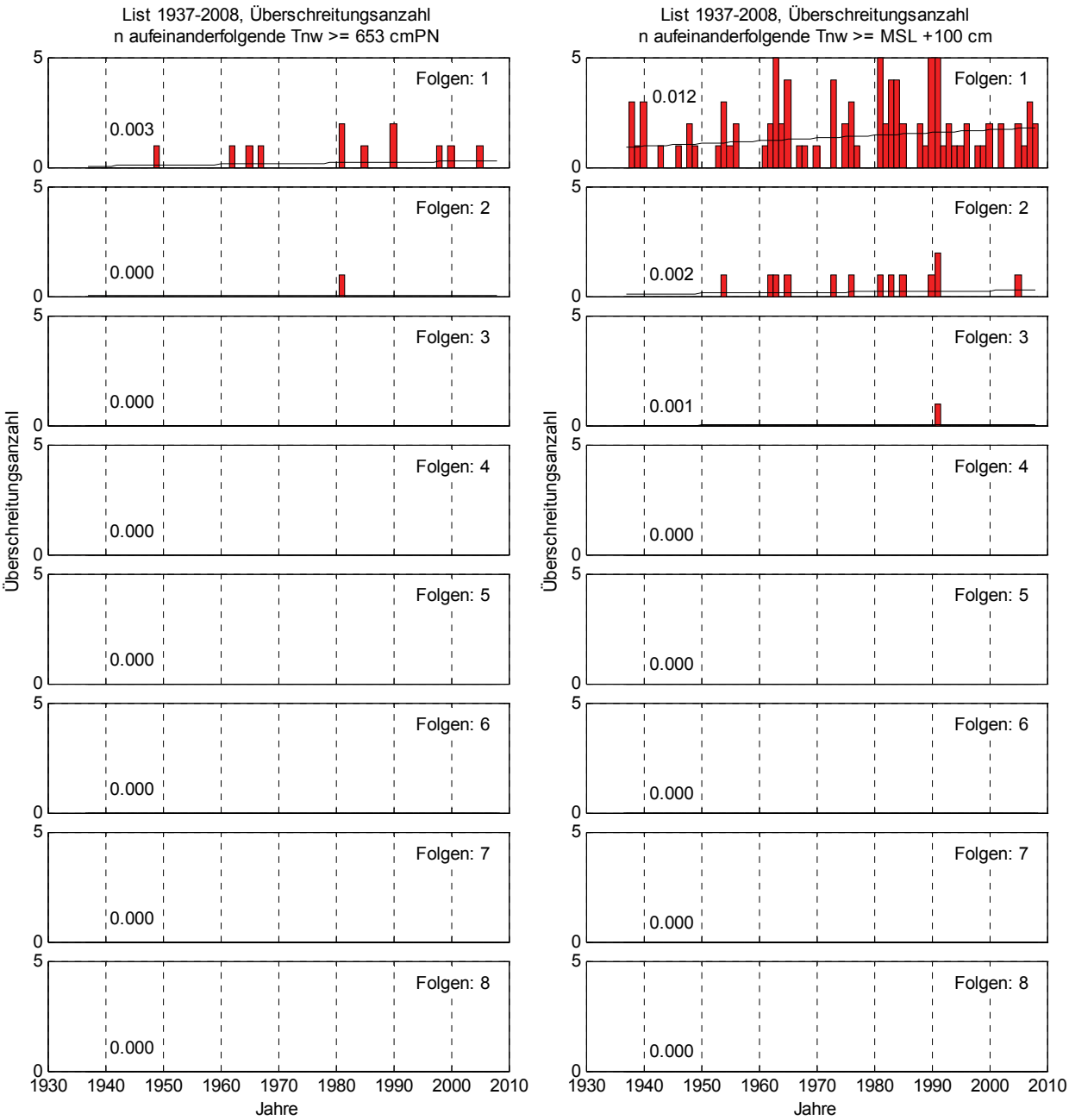


Abb. 2.6: List 1937-2008, Überschreitungszahlen durch 1-8 aufeinanderfolgende Tnw. Links: ≥ $MTnw_{1937\text{-}2008}$ + 200 cm = 653 cm, Rechts: ≥ MSL + 100 cm des jeweiligen Jahres

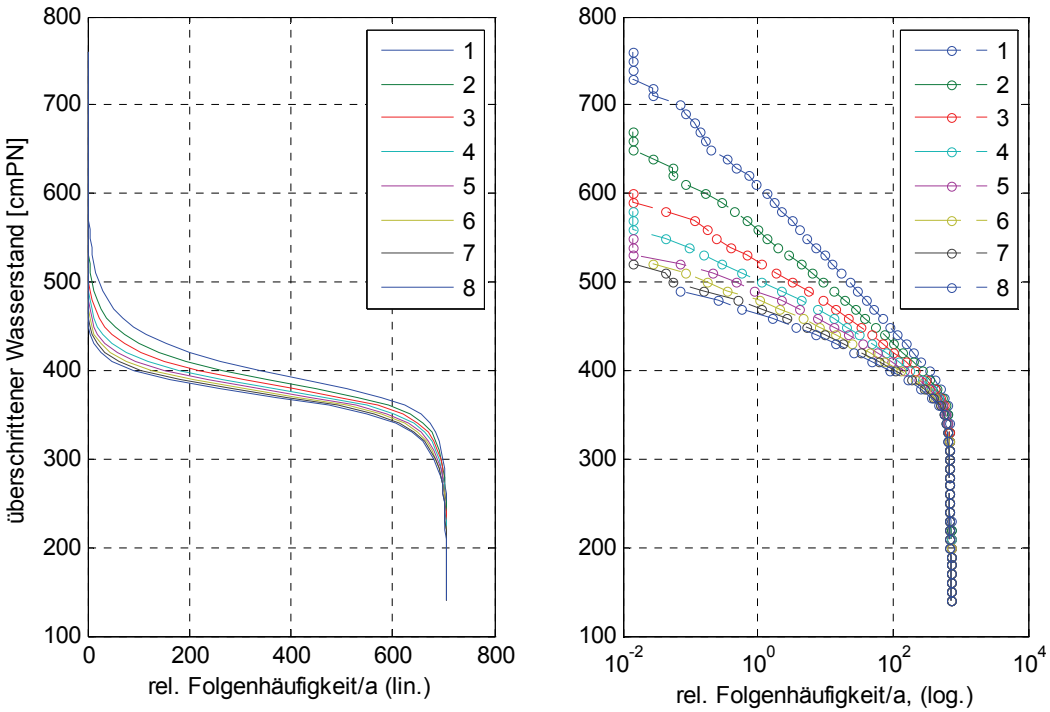


Abb. 2.7: List 1937-2008, relative Häufigkeiten aufeinanderfolgender Tnw

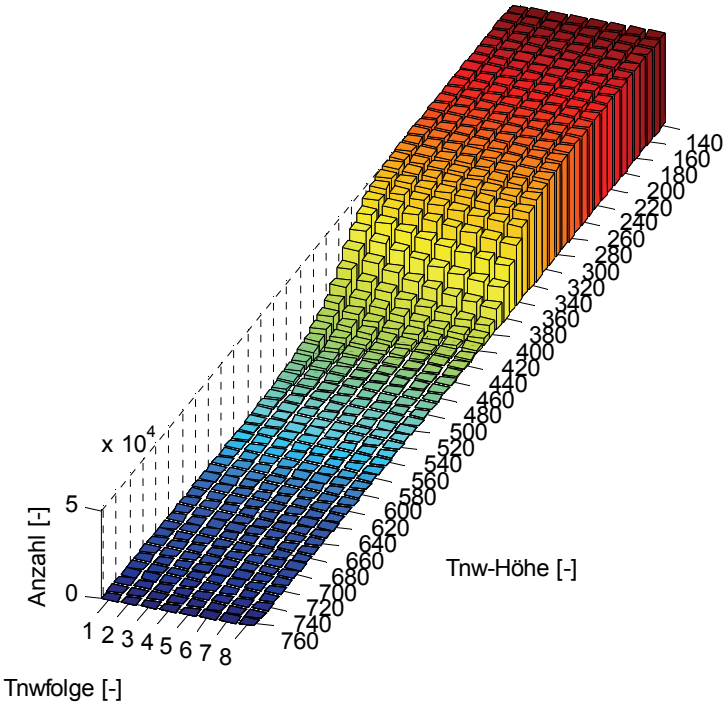


Abb. 2.8: List 1937-2008, Tnw-Folgezahlen

2.2 Tidehochwasser

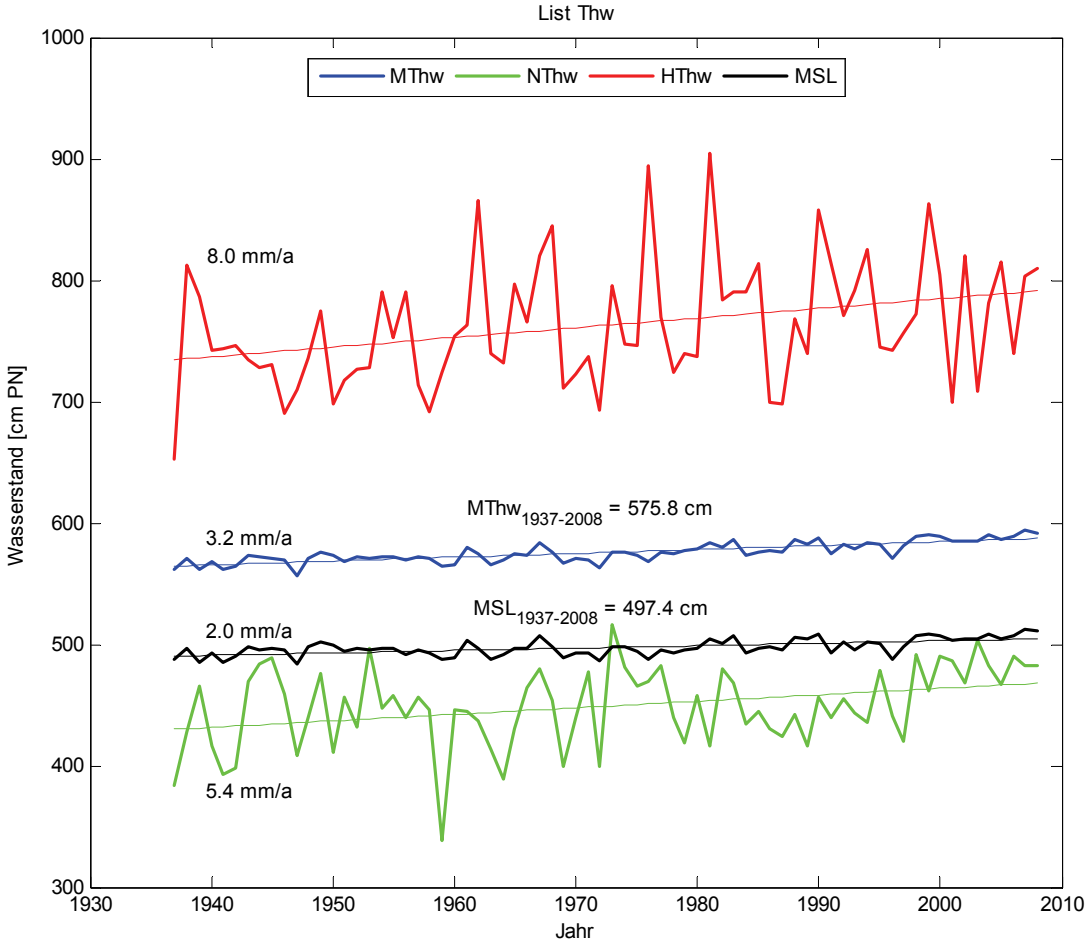


Abb. 2.9: Thw + MSL Trends List 1937 – 2008

Tendenziell nimmt der Trend der maximal erreichten Basishöhe von n aufeinanderfolgenden Thw mit zunehmender Folgenzahl ab (Abb. 2.10, Abb. 2.11). Der Abfall ist dabei von Folgenzahl 1 bis 4 sehr gleichmäßig, um dann zwischen Folge 4 und Folge 8 kaum noch geringer zu werden, sondern auf nahezu gleichbleibendem Trend von etwa 4 mm/a zu verbleiben. Das Maximum wird für die Folgenzahl 1, welche gleichzeitig unabhängige Einzeltiden und damit die Reihe der HThw darstellt, mit einem Trend von 8 mm/a erreicht. Alle Trends liegen über dem Trend des MThw = 3,2 mm/a. Trends für Folgenzahlen von 1 bis 3 liegen über dem Trend der NThw = 5,4 mm/a. Der niedrigste Trend beträgt 3.8 mm/a und wird für 7 und für 8 aufeinanderfolgende Thw erreicht.

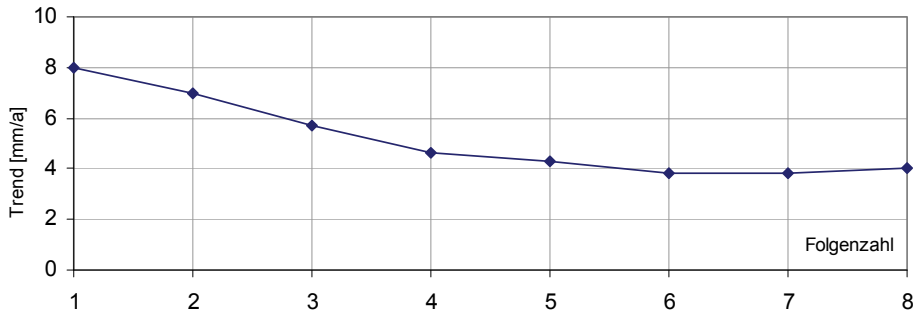


Abb. 2.10: List 1937-2008, Trendentwicklung max. Basishöhe Thw mit zunehmender Folgezahl

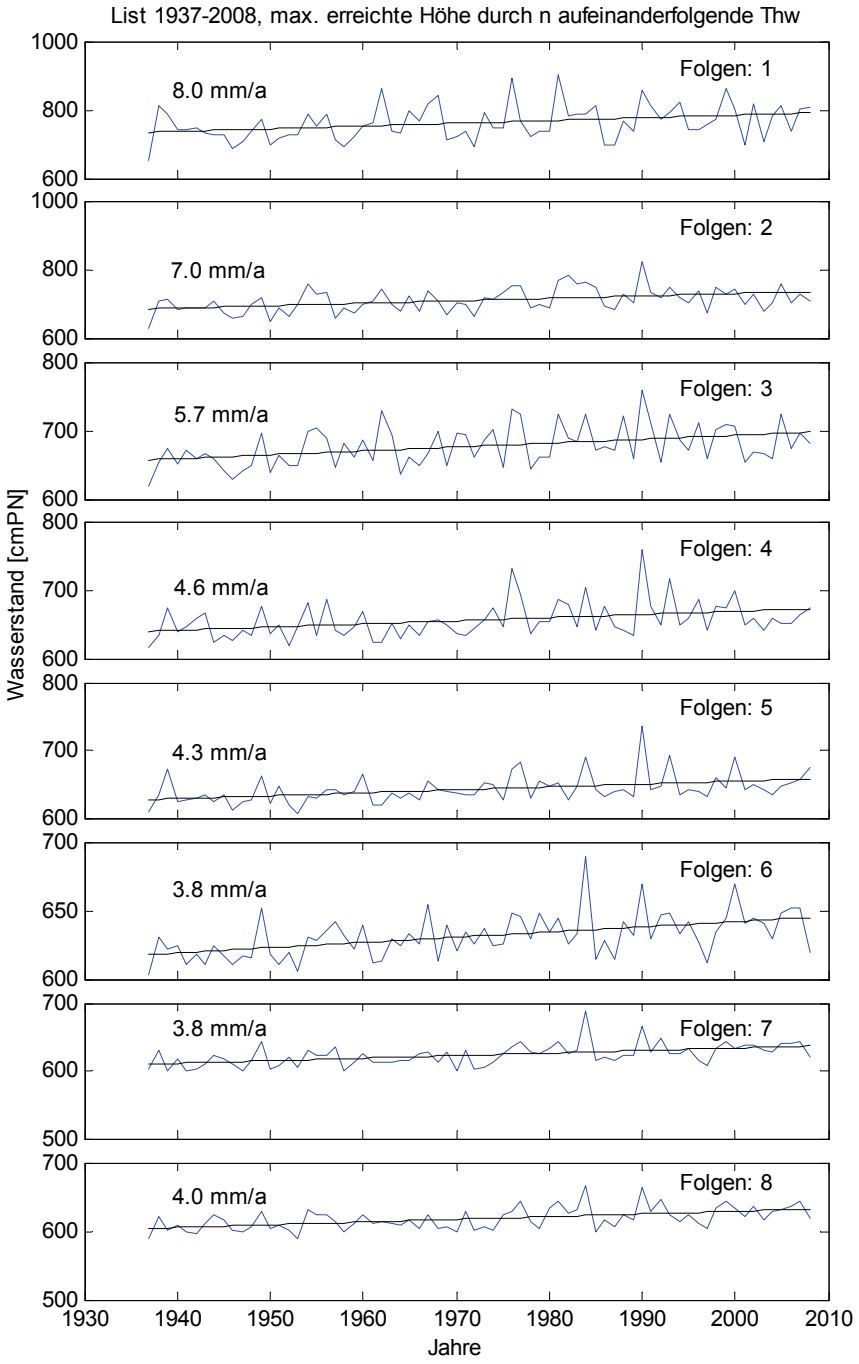


Abb. 2.11: List 1937-2008, maximal erreichte Basishöhe durch 1-8 aufeinanderfolgende Thw

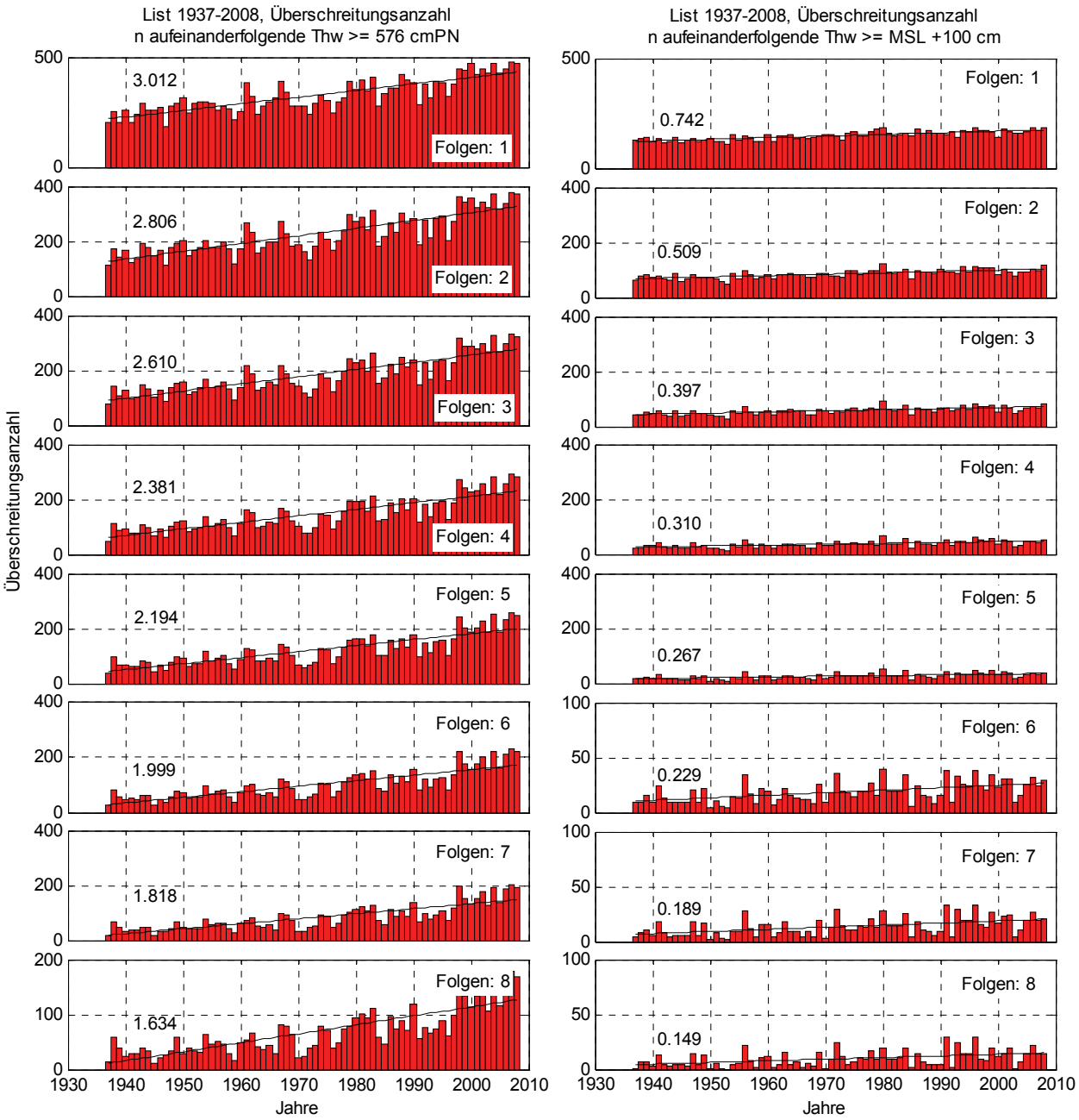


Abb. 2.12: List 1937-2008, Überschreitungszahlen durch 1-8 aufeinanderfolgende Thw. Links: ≥ $MThw_{1937\text{-}2008}$ + 0 cm = 576 cm, Rechts: ≥ MSL + 100 cm des jeweiligen Jahres

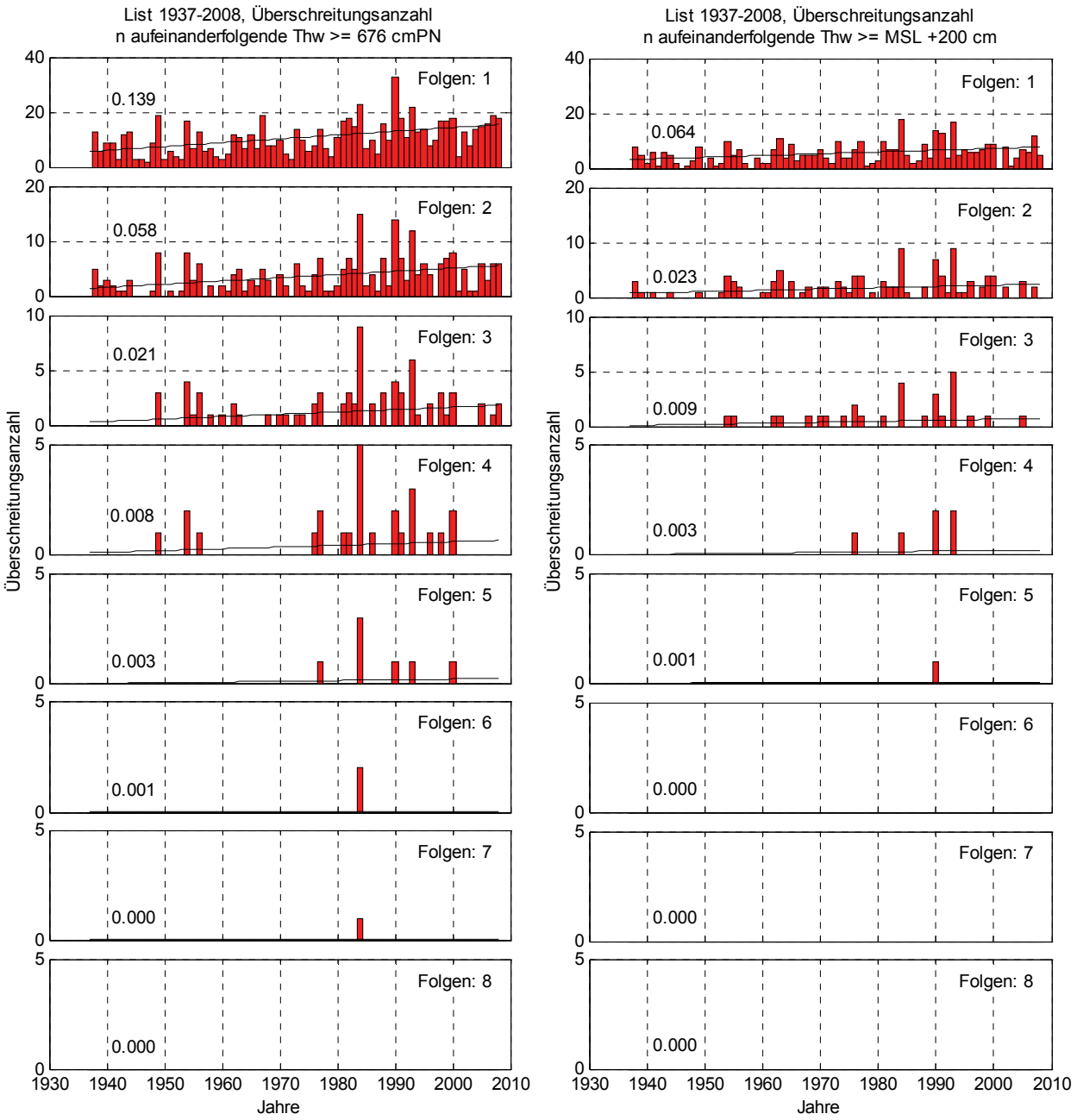


Abb. 2.13: List 1937-2008, Überschreitungszahlen durch 1-8 aufeinanderfolgende Thw. Links: ≥ $MThw_{1937-2008}$ + 100 cm = 676 cm, Rechts: ≥ MSL + 200 cm des jeweiligen Jahres

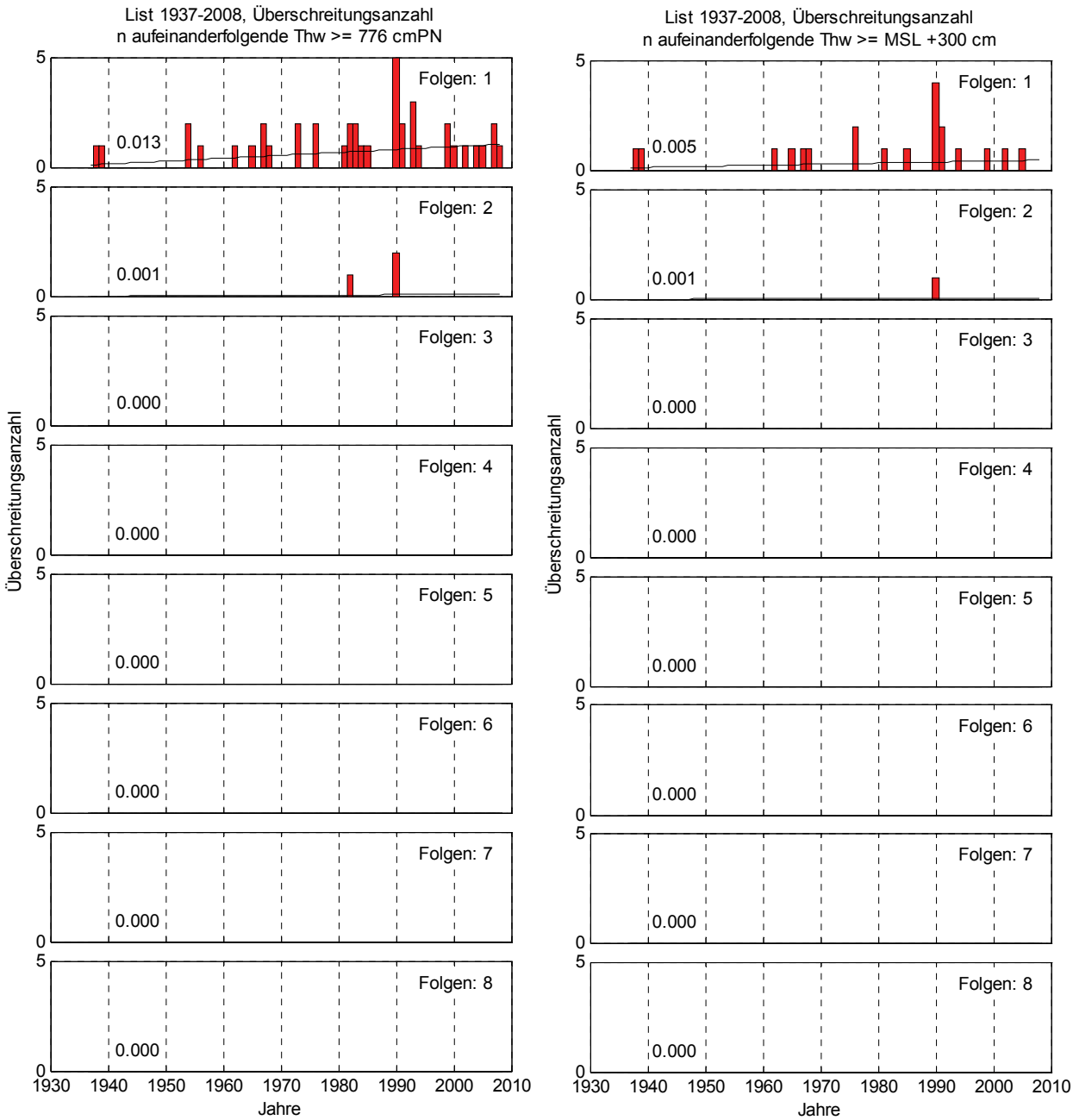


Abb. 2.14: List 1937-2008, Überschreitungszahlen durch 1-8 aufeinanderfolgende Thw. Links: ≥ $MThw_{1937\text{-}2008}$ + 200 cm = 776 cm, Rechts: ≥ MSL + 300 cm des jeweiligen Jahres

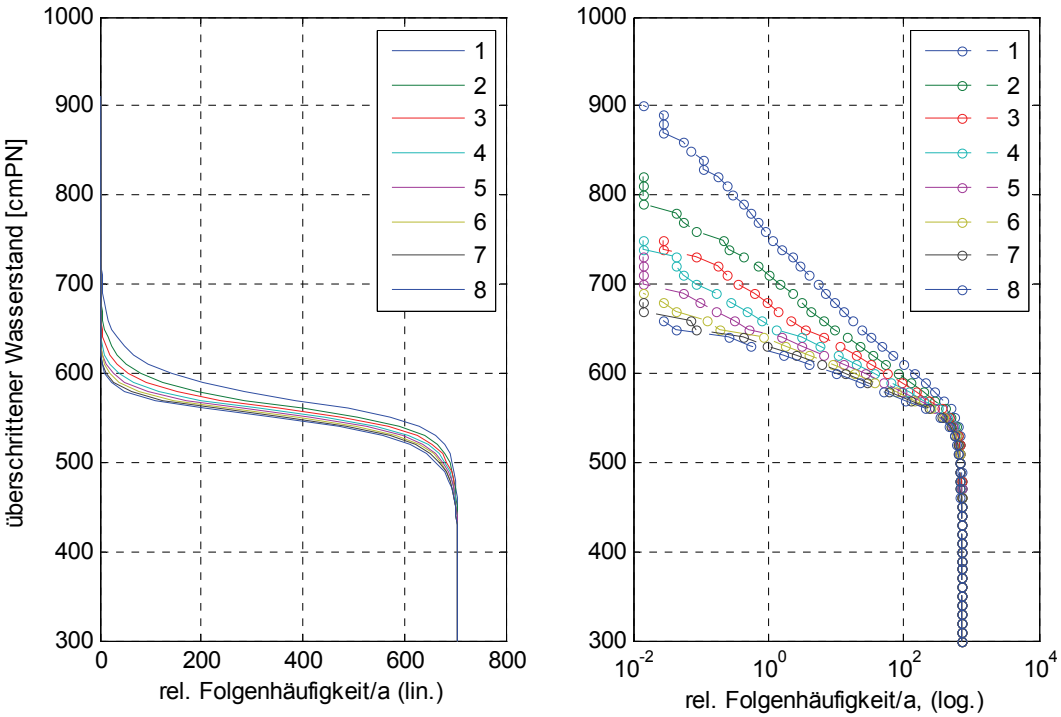


Abb. 2.15: List 1937-2008, relative Häufigkeiten aufeinanderfolgender Thw

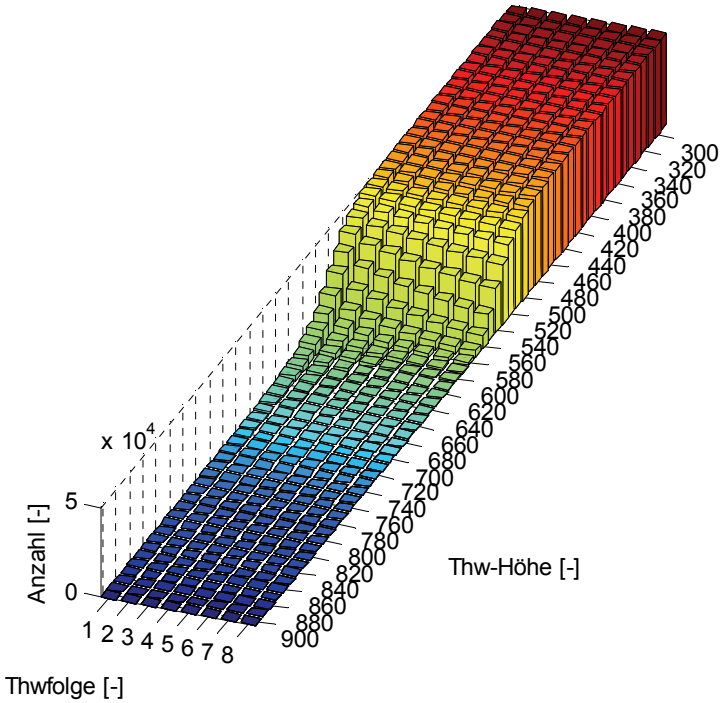


Abb. 2.16: List 1937-2008, Thw-Folgezahlen

3 Hörnum

3.1 Tideniedrigwasser

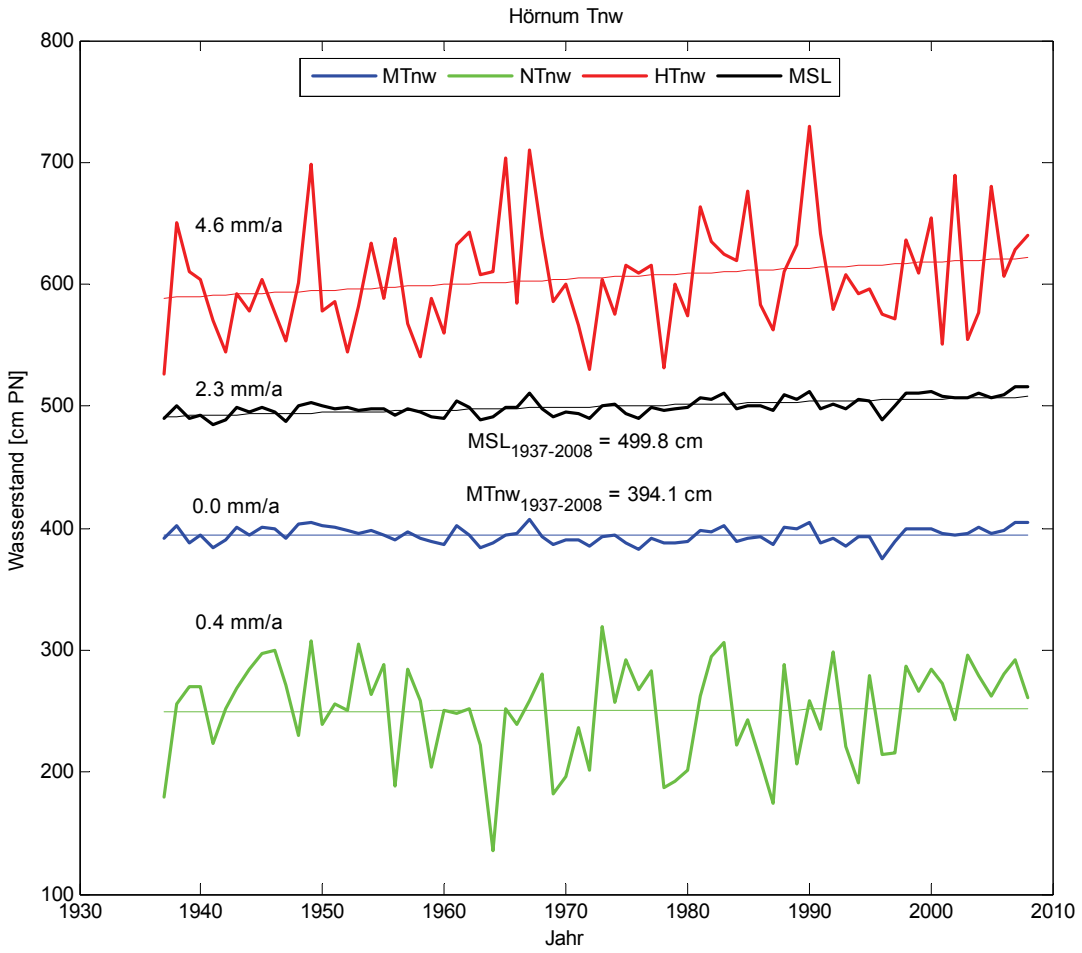


Abb. 3.1: Tnw + MSL Trends Hörnum 1937 - 2008

Tendenziell nimmt der Trend der maximal erreichten Basishöhe von n aufeinanderfolgenden Tnw mit zunehmender Folgenzahl ab (Abb. 3.2, Abb. 3.3). Der Verlauf weist aber auch gegenläufige Tendenzen auf. Das Maximum wird aber bei 3 aufeinanderfolgenden Tnw erreicht mit einem Trend von 5,1 mm/a. Dieser Trend ist größer als der Trend der HTnw = 4,6 mm/a. Alle Trends liegen deutlich über dem Trend des MTnw = 0,0 mm/a. Der niedrigste Trend beträgt 1,1 mm/a und wird für 6 aufeinanderfolgende Tnw erreicht. Nach der Folgenzahl 6 steigt der Trend allerdings wieder bis auf einen Wert von 2,3 mm/a.

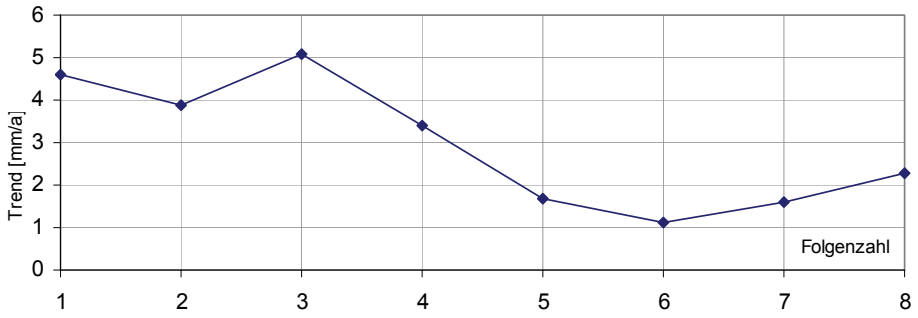


Abb. 3.2: Hörnum 1937-2008, Trendentwicklung max. Basishöhe der Tnw mit zunehmender Folgezahl

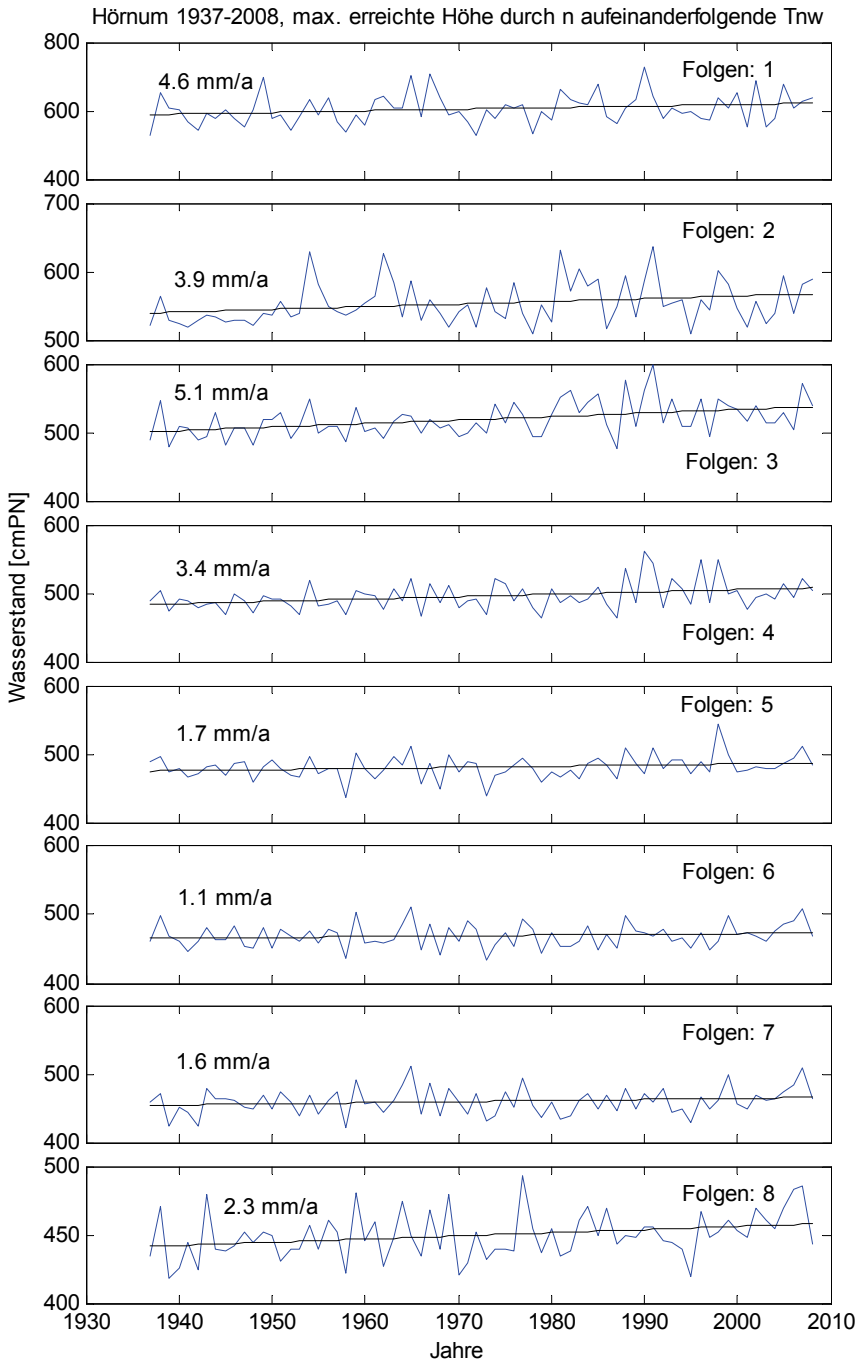
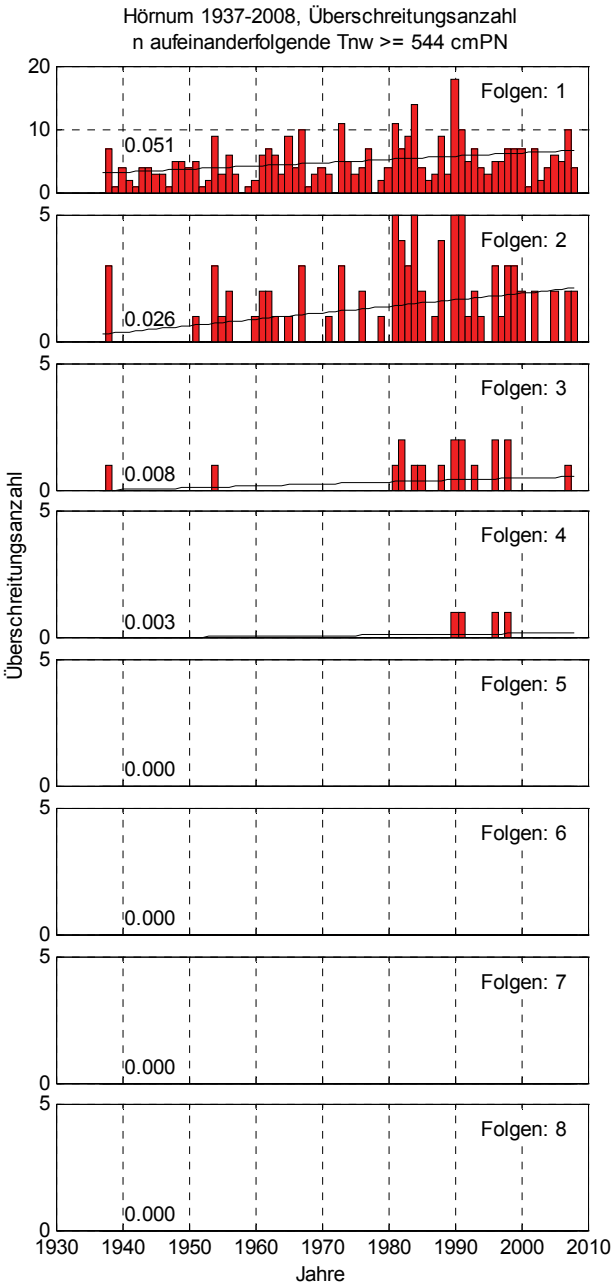


Abb. 3.3: Hörnum 1937-2008, maximal erreichte Basishöhe durch 1-8 aufeinanderfolgende Tnw



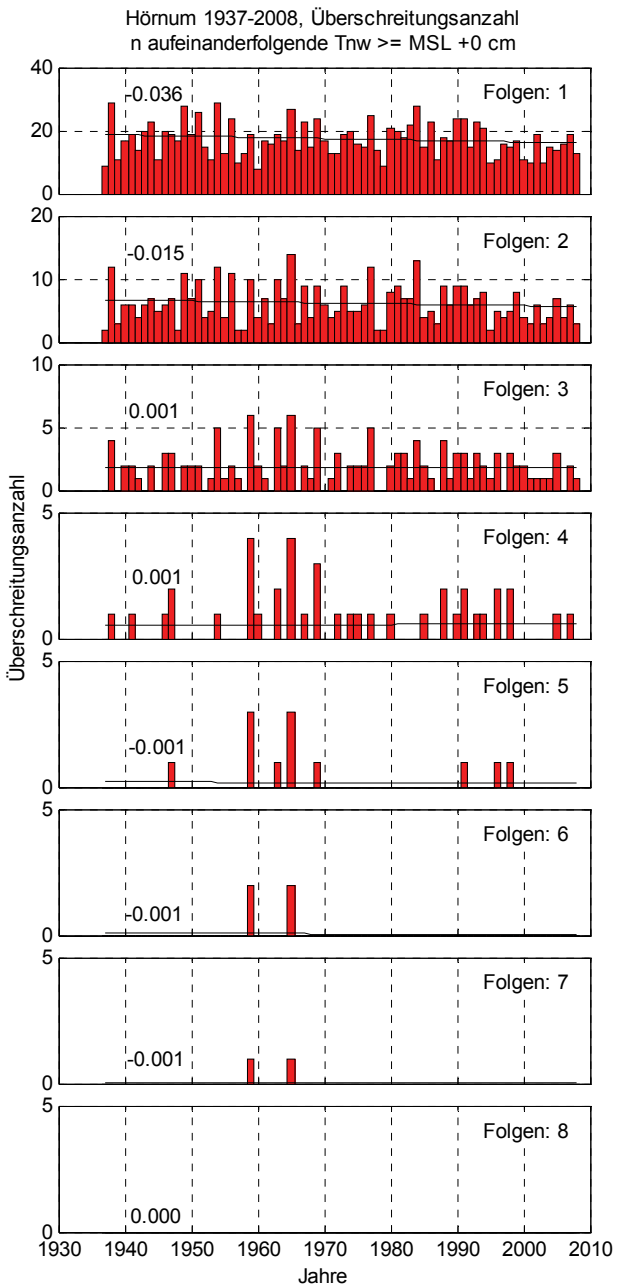


Abb. 3.4: Hörnum 1937-2008, Überschreitungszahlen durch 1-8 aufeinanderfolgende Tnw. Links: ≥ $MTnw_{1937\text{-}2008}$+150 cm = 544 cm, Rechts: ≥ MSL + 0 cm des jeweiligen Jahres

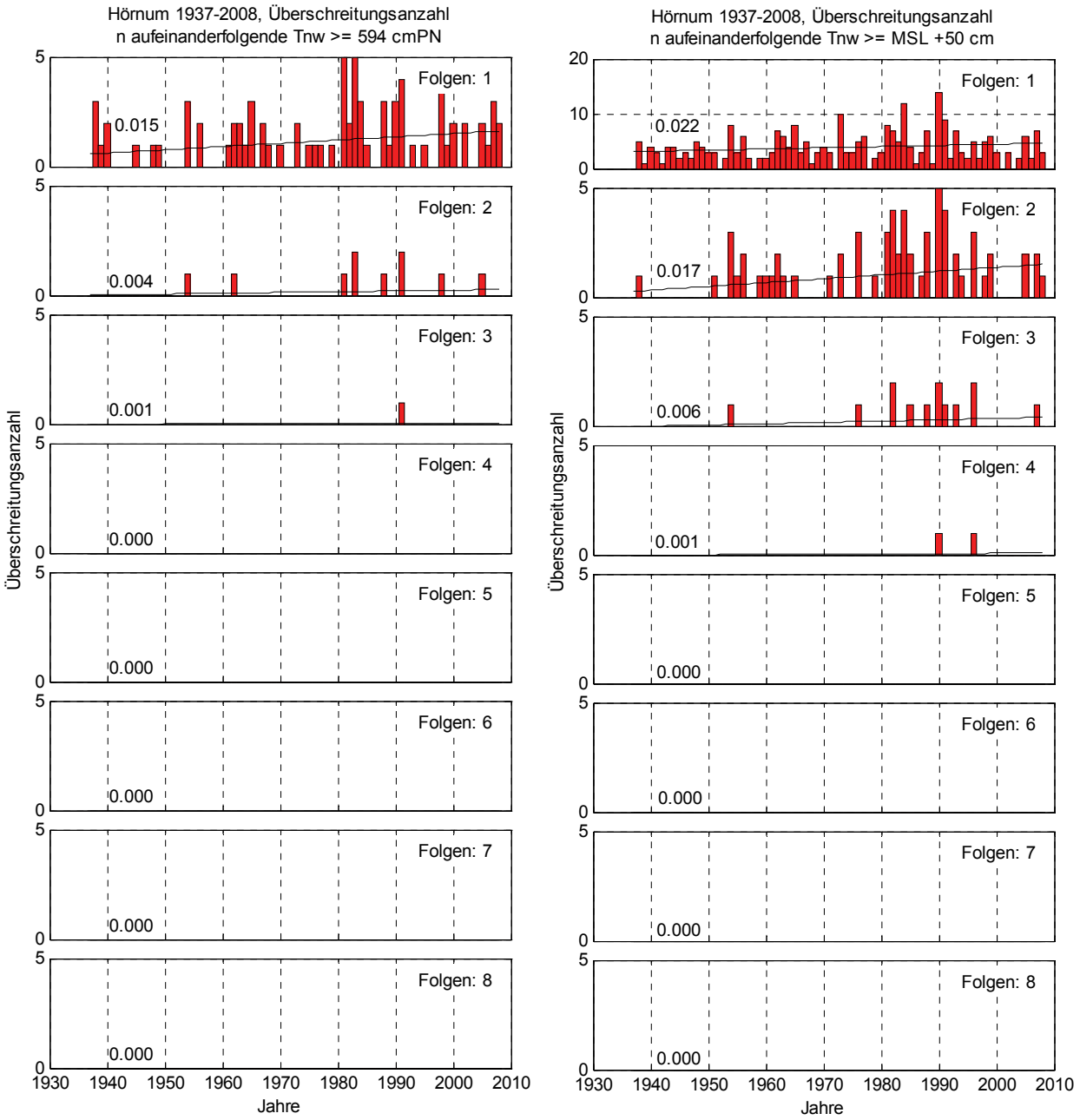


Abb. 3.5: Hörnum 1937-2008, Überschreitungszahlen durch 1-8 aufeinanderfolgende Tnw. Links: ≥ $MTnw_{1937\text{-}2008}$+200 cm = 594 cm, Rechts: ≥ MSL + 50 cm des jeweiligen Jahres

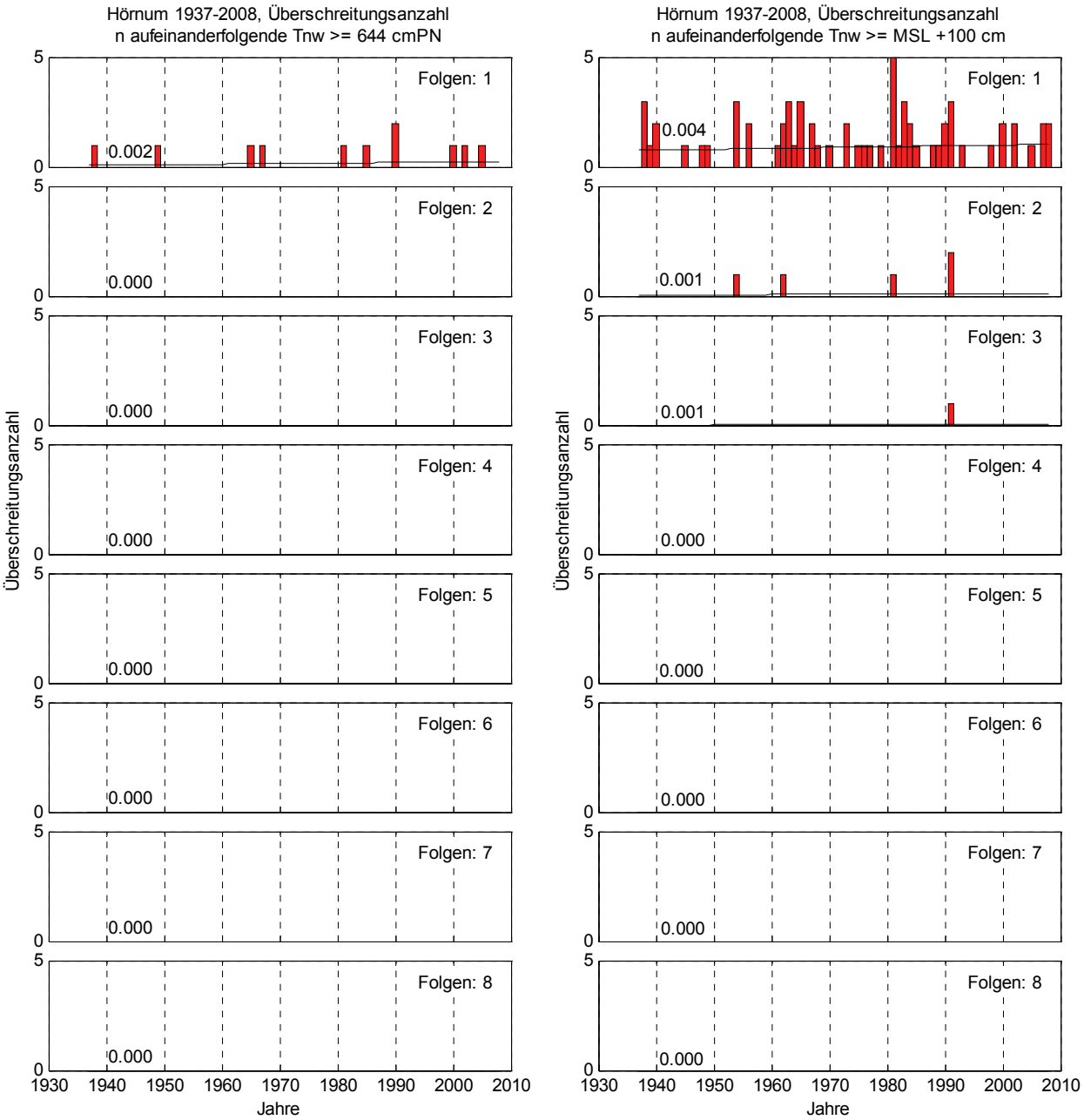


Abb. 3.6: Hörnum 1937-2008, Überschreitungszahlen durch 1-8 aufeinanderfolgende Tnw. Links: ≥ $MTnw_{1937\text{-}2008}$+250 cm = 644 cm, Rechts: ≥ MSL + 100 cm des jeweiligen Jahres

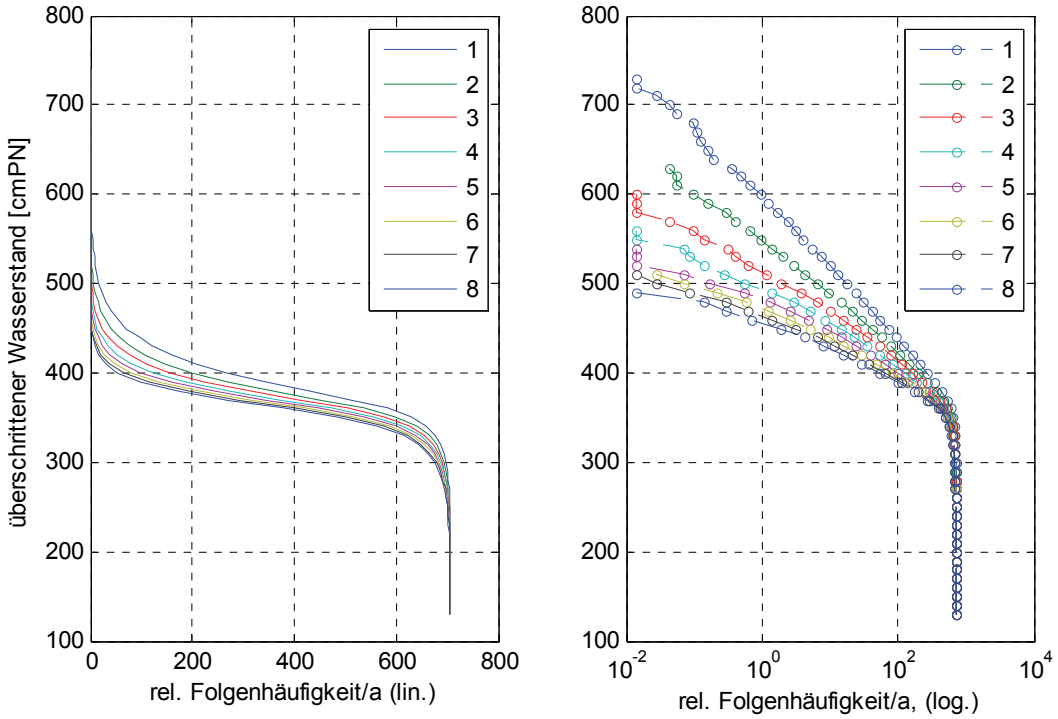


Abb. 3.7: Hörnum 1937-2008, relative Häufigkeiten aufeinanderfolgender Tnw

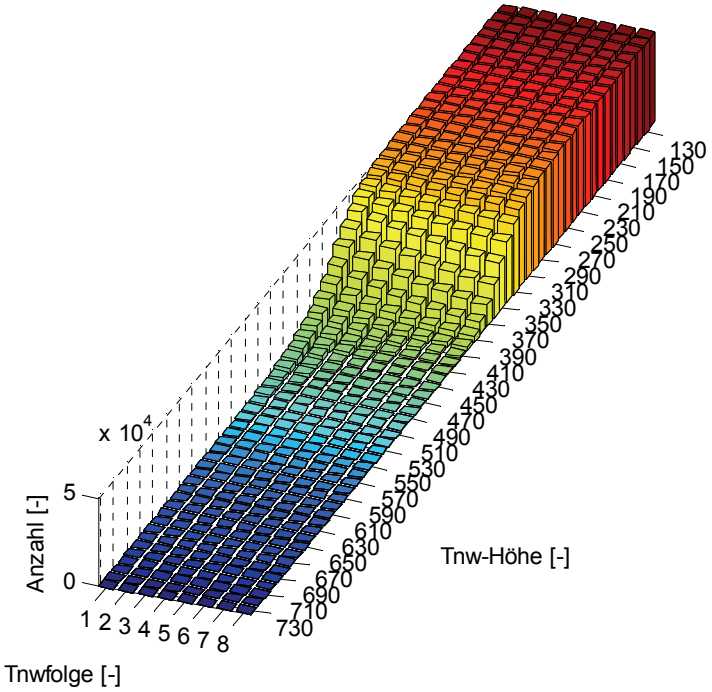


Abb. 3.8: Hörnum 1937-2008, Tnw-Folgezahlen

3.2 Tidehochwasser

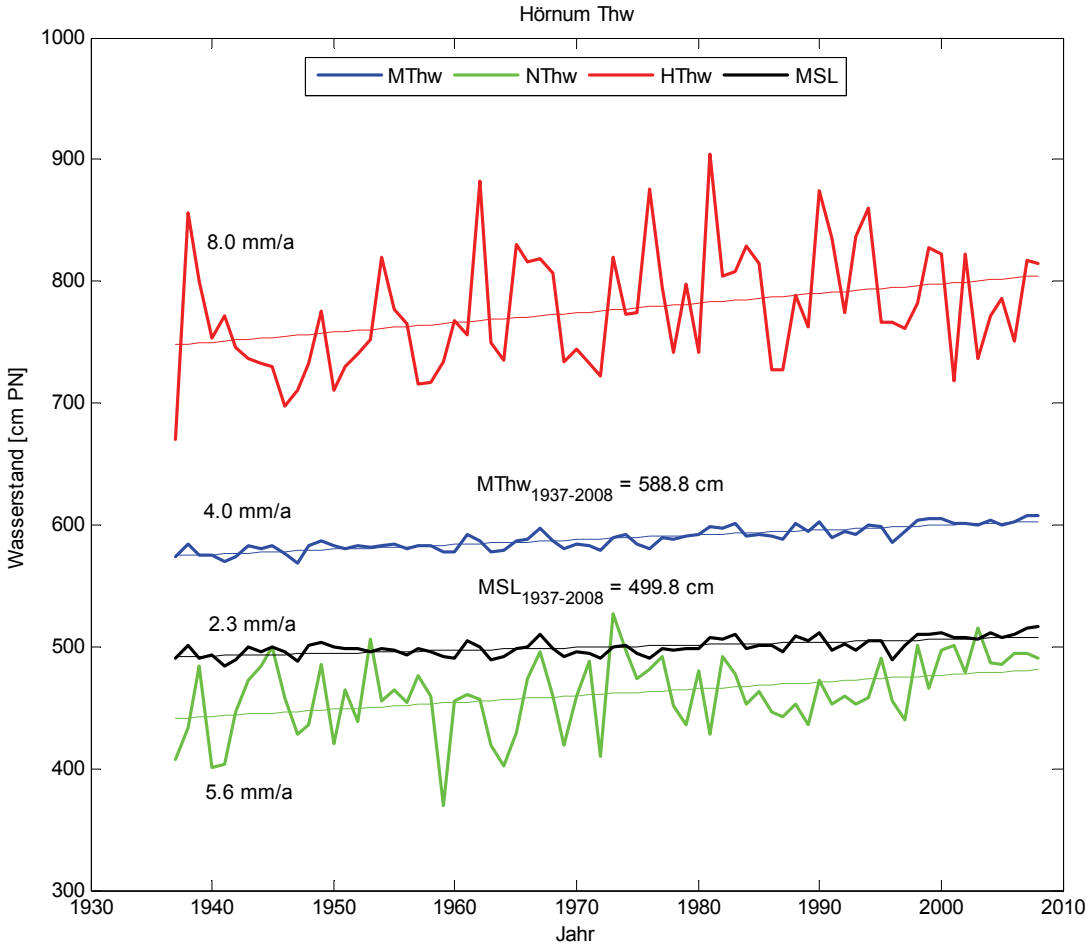


Abb. 3.9: Thw + MSL Trends Hörnum 1937 – 2008

Tendenziell nimmt der Trend der maximal erreichten Basishöhe von n aufeinanderfolgenden Thw mit zunehmender Folgenzahl ab (Abb. 3.10, Abb. 3.11). Das Maximum wird für die Folgenzahl 1, welche gleichzeitig unabhängige Einzeltiden und damit die Reihe der HThw darstellt, mit einem Trend von 8 mm/a erreicht. Alle Trends liegen über dem Trend des MThw = 4,0 mm/a. Trends für Folgenzahlen von 1 bis 3 liegen über dem Trend der NThw = 5,6 mm/a. Der niedrigste Trend beträgt 4,8 mm/a und wird für 7 und für 8 aufeinanderfolgende Thw erreicht.

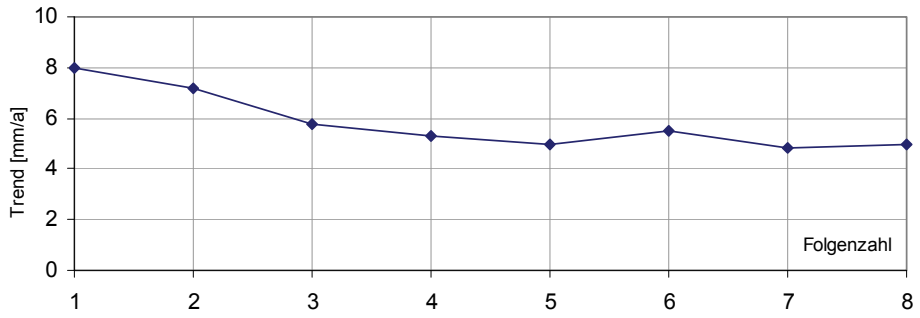


Abb. 3.10: Hörnum 1937-2008, Trendentwicklung max. Basishöhe der Thw mit zunehmender Folgezahl

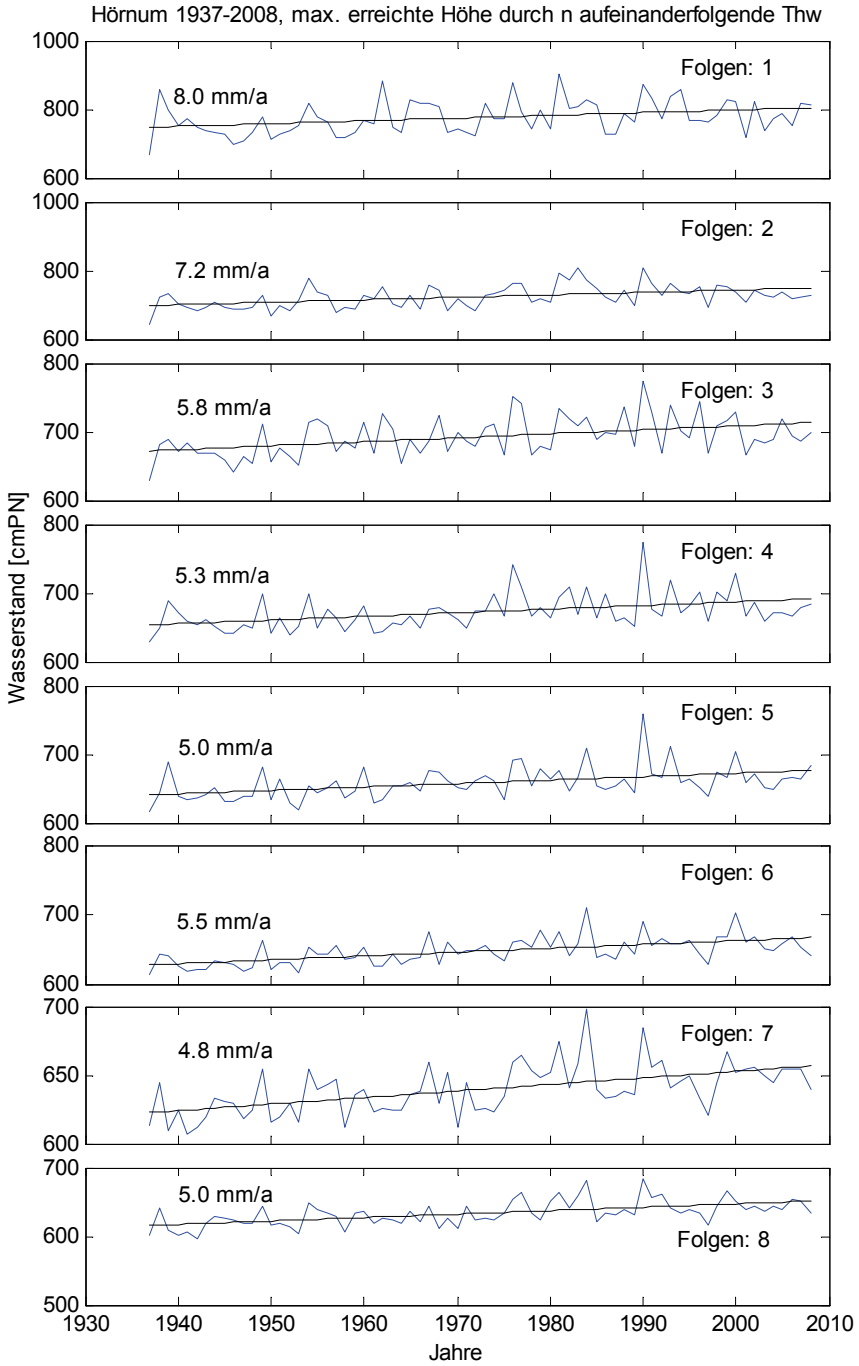


Abb. 3.11: Hörnum 1937-2008, maximal erreichte Basishöhe durch 1-8 aufeinanderfolgende Thw

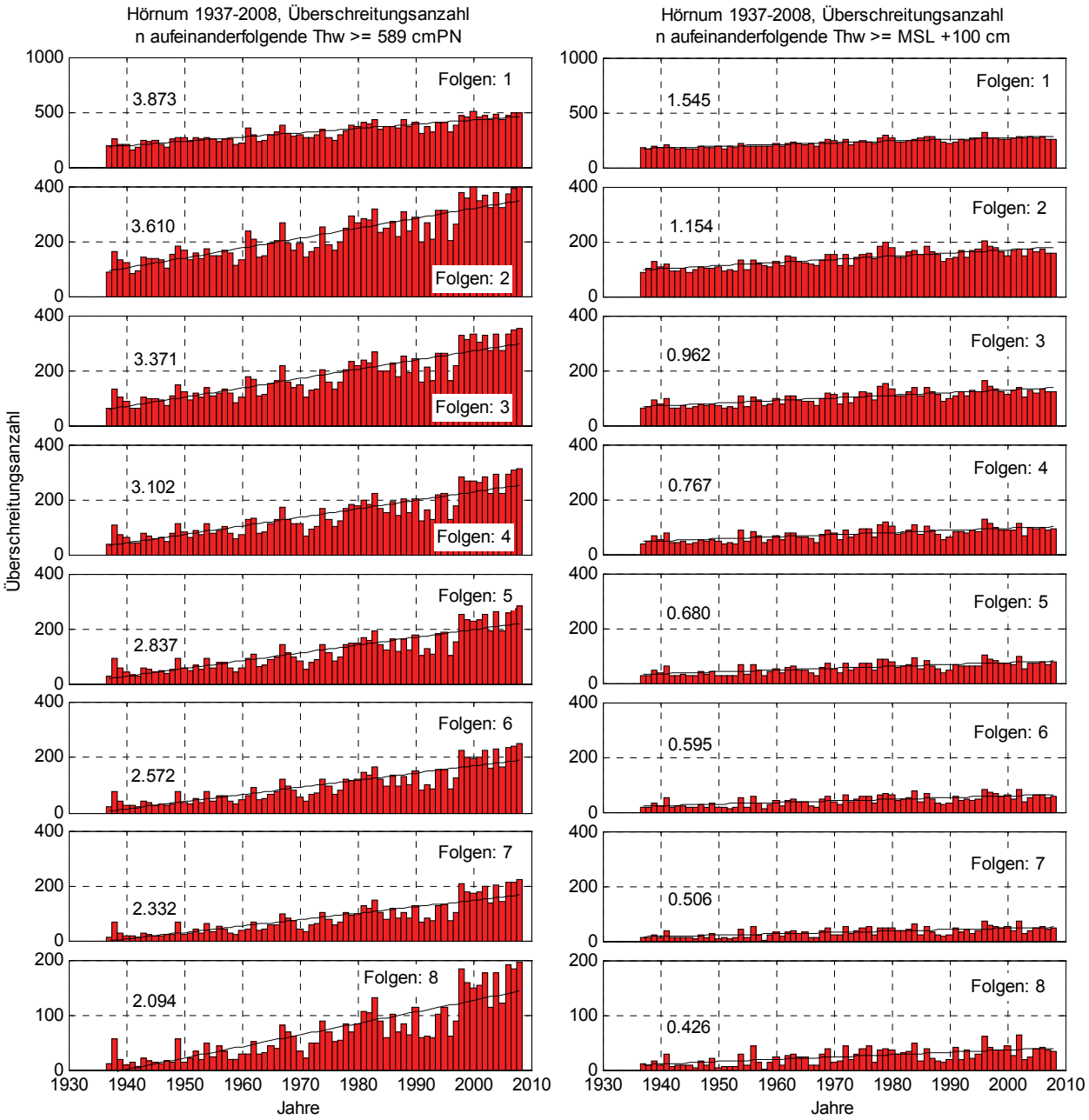


Abb. 3.12: Hörnum 1937-2008, Überschreitungszahlen durch 1-8 aufeinanderfolgende Thw. Links: ≥ $MThw_{1937\text{-}2008}$+ 0 cm = 589 cm, Rechts: ≥ MSL + 100 cm des jeweiligen Jahres

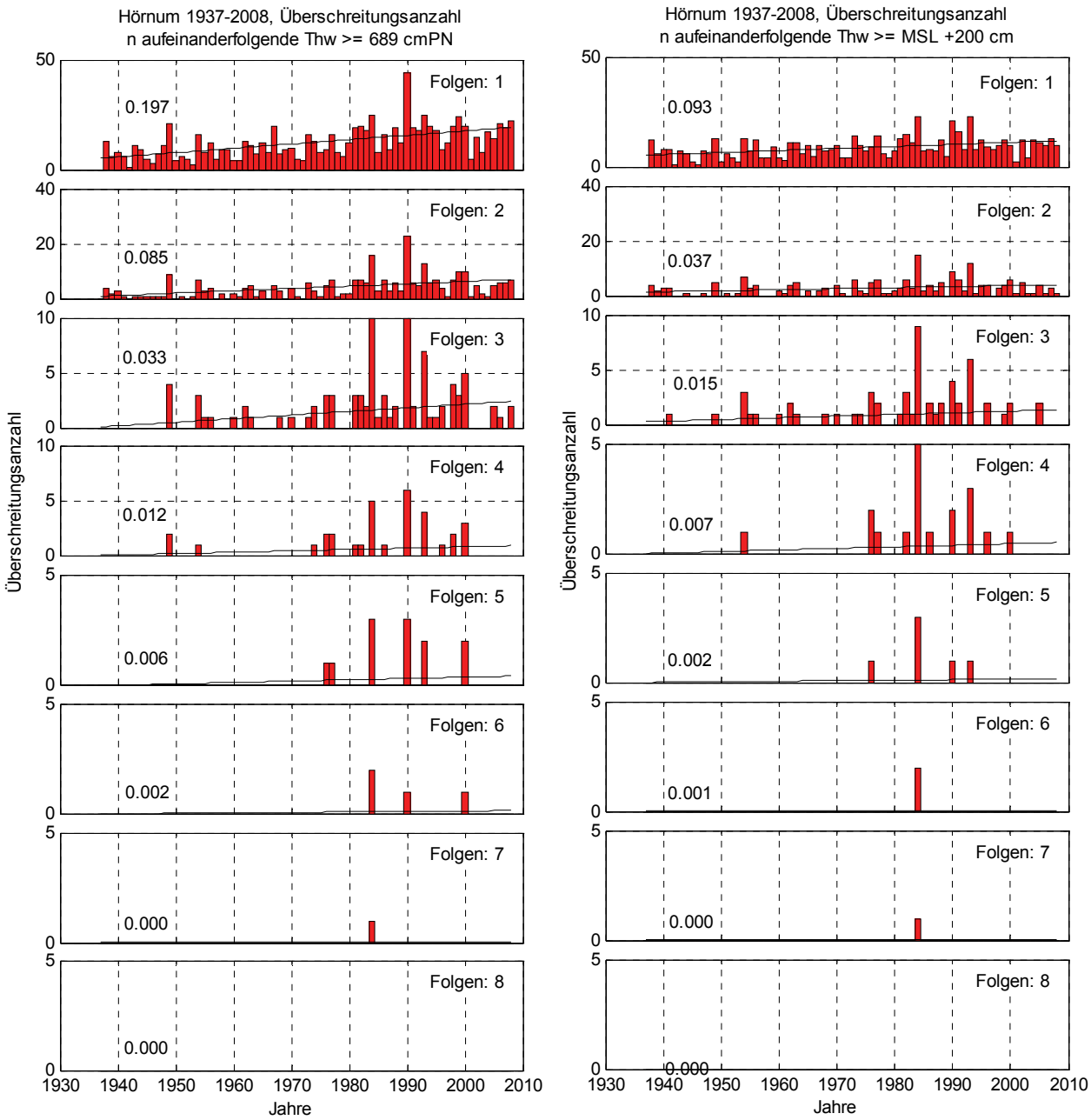


Abb. 3.13: Hörnum 1937-2008, Überschreitungszahlen durch 1-8 aufeinanderfolgende Thw. Links: ≥ $MThw_{1937-2008}$+ 100 cm = 689 cm, Rechts: ≥ MSL + 200 cm des jeweiligen Jahres

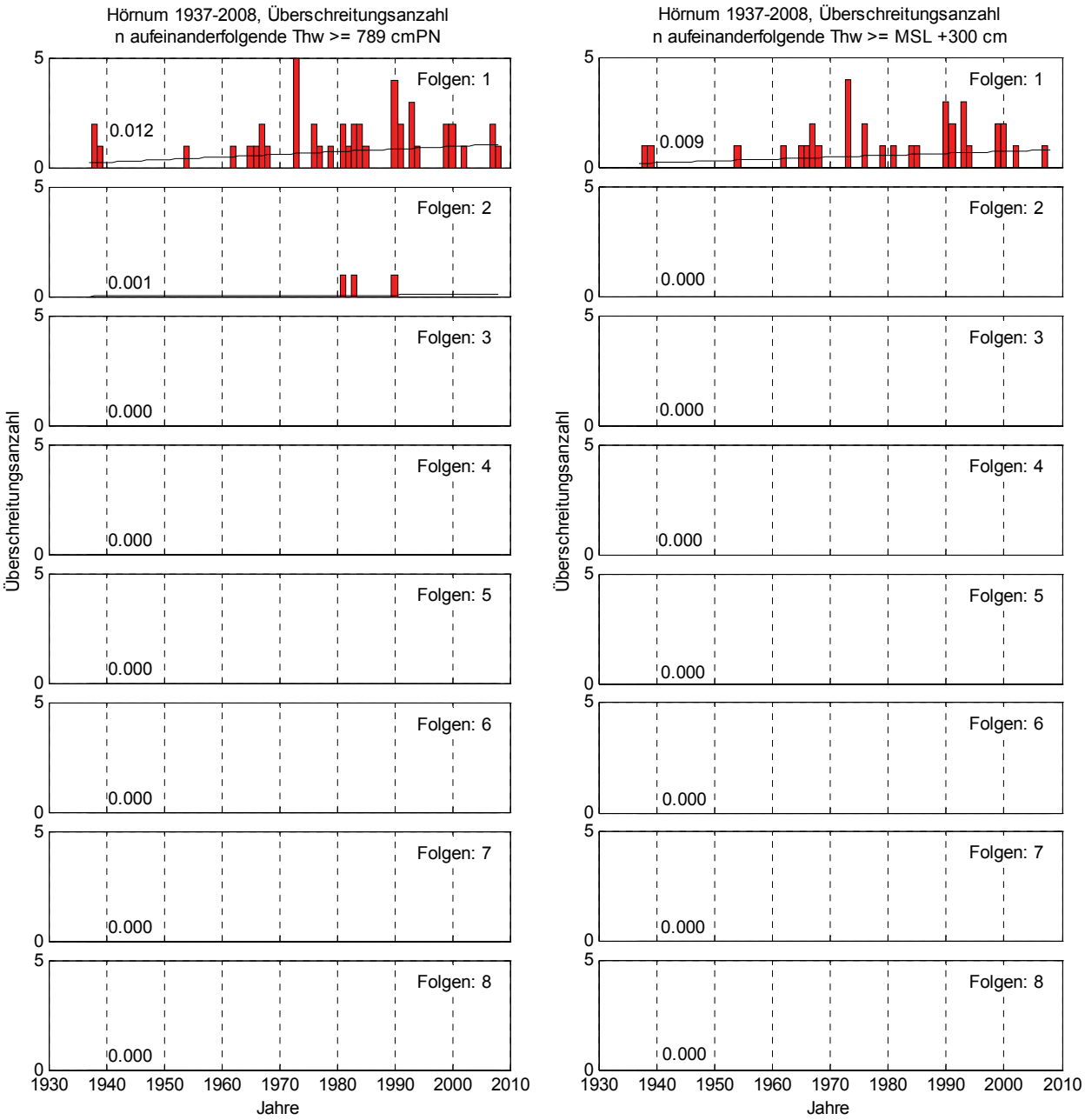


Abb. 3.14: Hörnum 1937-2008, Überschreitungszahlen durch 1-8 aufeinanderfolgende Thw. Links: ≥ $MThw_{1937-2008}$+ 200 cm = 789 cm, Rechts: ≥ MSL + 300 cm des jeweiligen Jahres

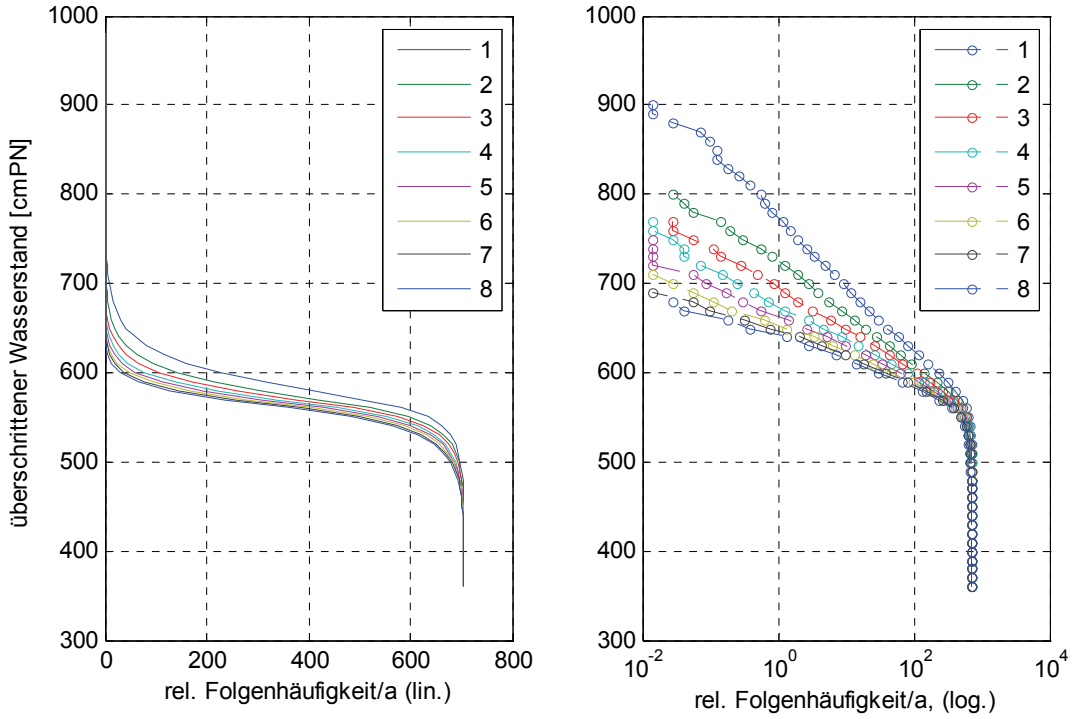


Abb. 3.15: Hörnum 1937-2008, relative Häufigkeiten aufeinanderfolgender Thw

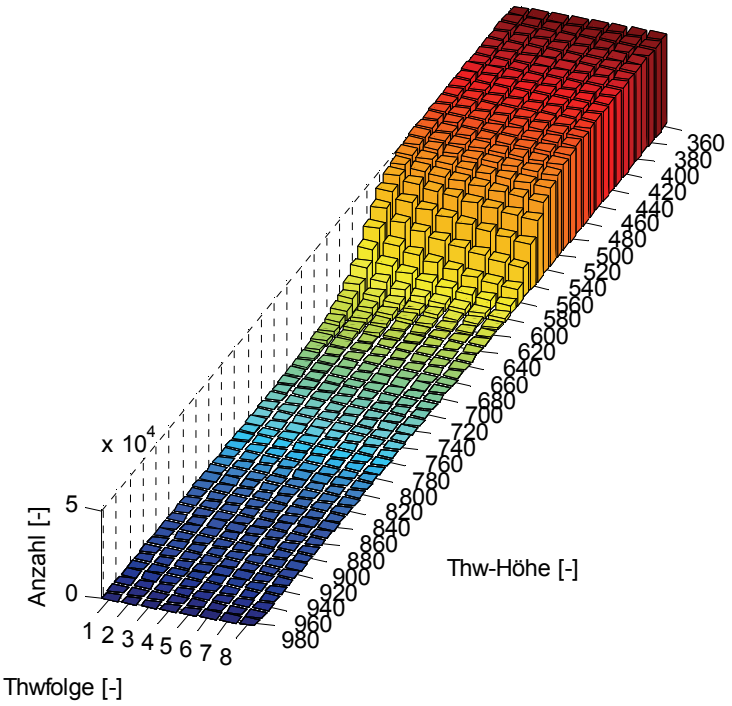


Abb. 3.16: Hörnum 1937-2008, Thw-Folgezahlen

4 Wyk

4.1 Tideniedrigwasser

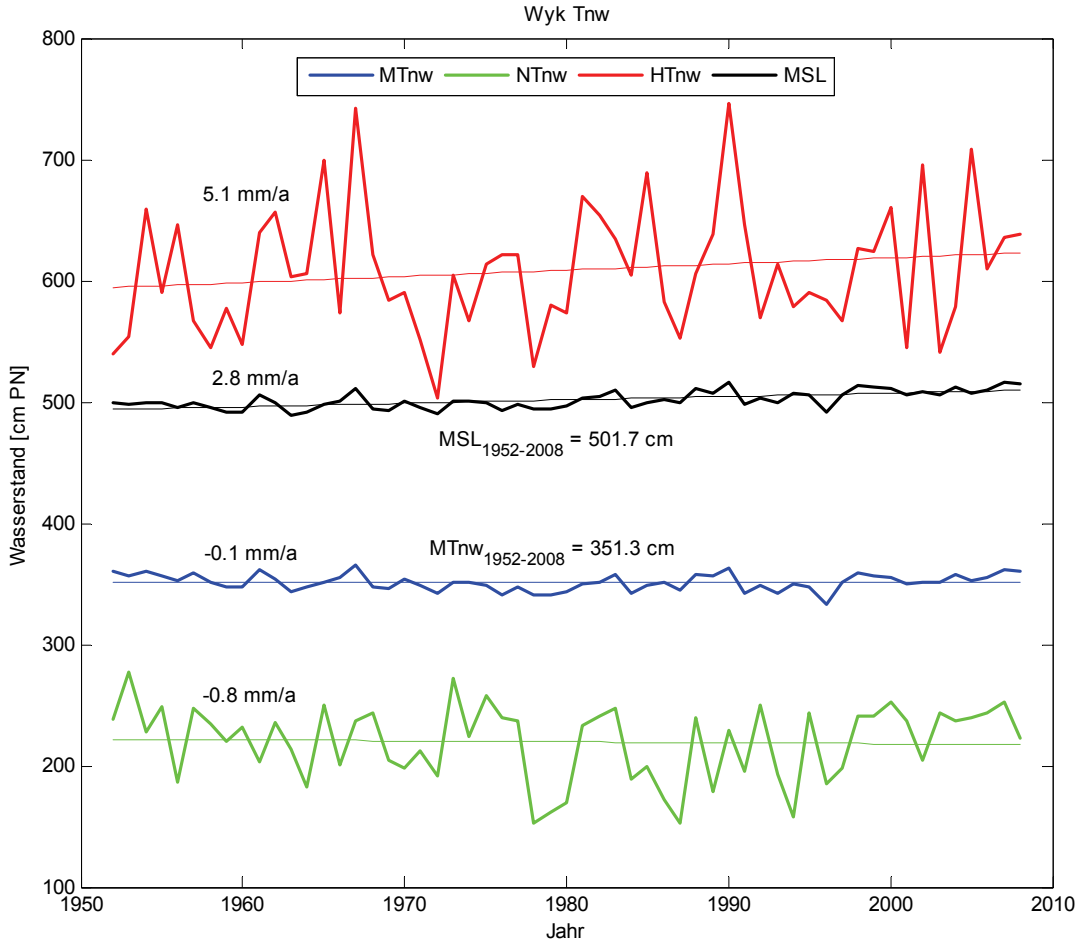


Abb. 4.1: Tnw + MSL Trends Wyk 1952 – 2008

Zwar nimmt auch für Wyk der Trend der maximal erreichten Basishöhe von n aufeinanderfolgenden Tnw mit tendenziell mit zunehmender Folgenzahl ab (Abb. 4.2, Abb. 4.3), der Verlauf weist jedoch einen bemerkenswerten Sprung bei der Folgenzahl 2 auf. Dort wird gleichzeitig der niedrigste Trend mit 0,6 mm/a erreicht. Das Maximum wird für die Folgenzahl 1, welche gleichzeitig unabhängige Einzeltiden und damit die Reihe der HThw darstellt, mit einem Trend von 5,1 mm/a erreicht. Dieser Trend ist größer als der Trend der HTnw = 5,1 mm/a. Alle Trends liegen deutlich über dem Trend des MTnw = -0,1 mm/a. Der zweitniedrigste Trend neben dem Sprung für die Folgezahl 2 beträgt 1,6 mm/a und wird für 7 aufeinanderfolgende Tnw erreicht.

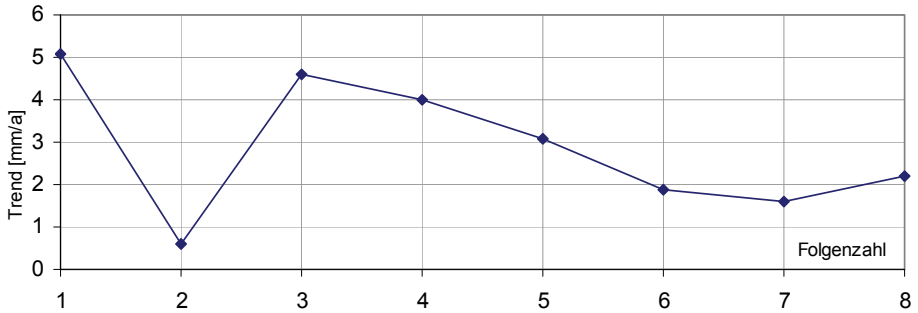


Abb. 4.2: Wyk 1952-2008, Trendentwicklung max. Basishöhe Tnw mit zunehmender Folgezahl

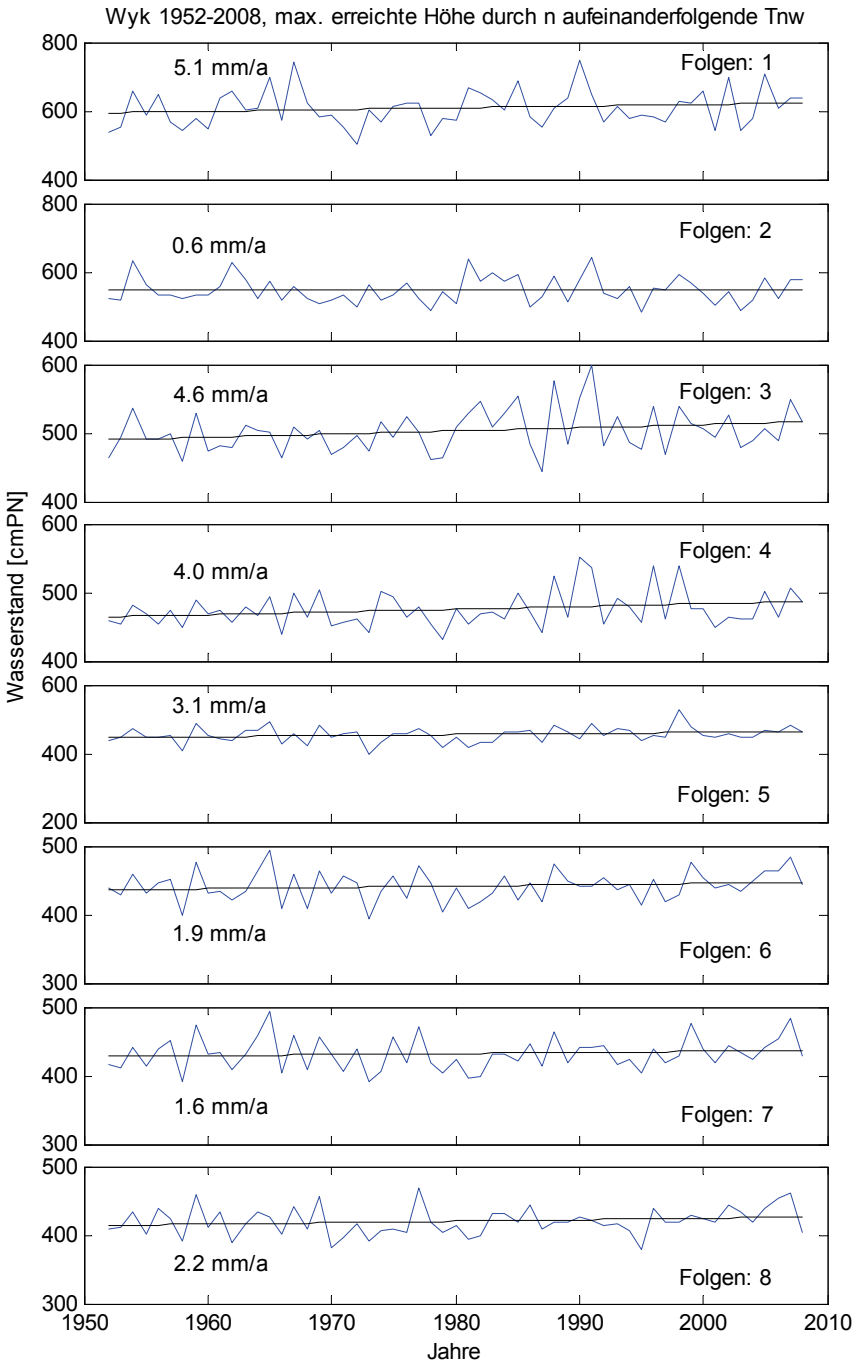


Abb. 4.3: Wyk 1952-2008, maximal erreichte Basishöhe durch 1-8 aufeinanderfolgende Tnw

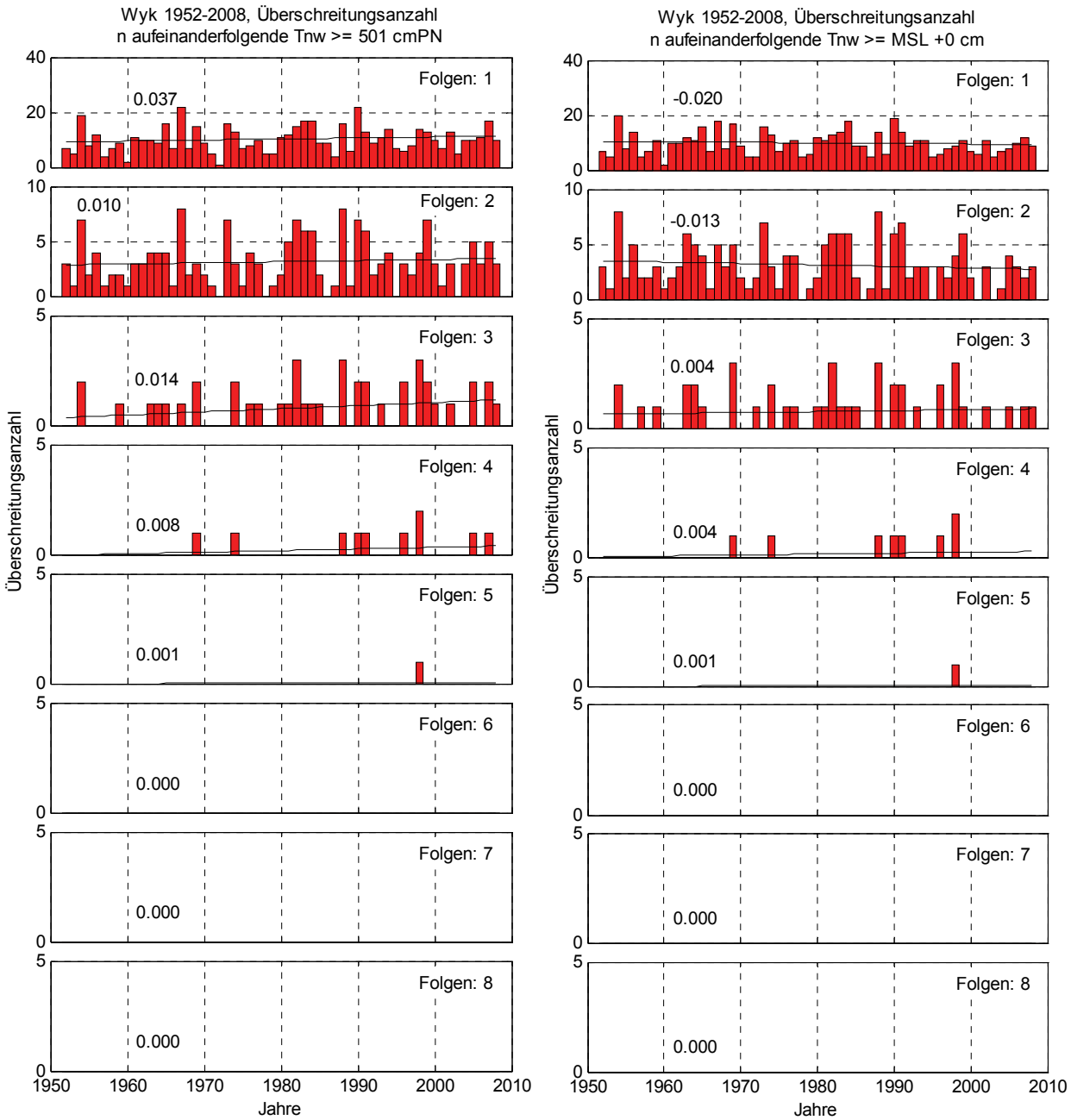


Abb. 4.4: Wyk 1952-2008, Überschreitungszahlen durch 1-8 aufeinanderfolgende Tnw. Links: ≥ $MTnw_{1952\text{-}2008}$ + 150 cm = 501 cm, Rechts: ≥ MSL + 0 cm des jeweiligen Jahres

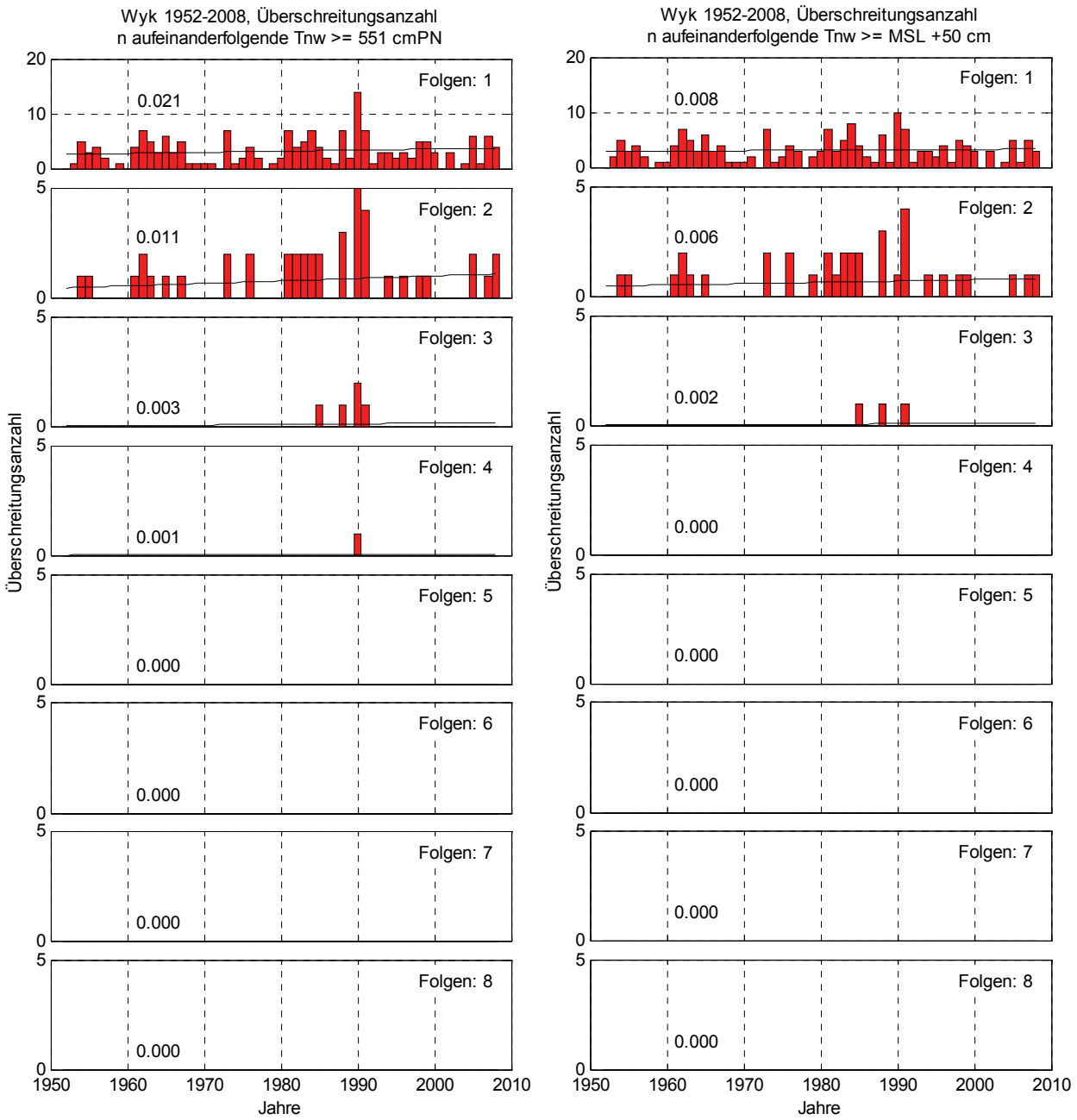


Abb. 4.5: Wyk 1952-2008, Überschreitungszahlen durch 1-8 aufeinanderfolgende Tnw. Links: ≥ $MTnw_{1952-2008}$ + 200 cm = 551 cm, Rechts: ≥ MSL + 50 cm des jeweiligen Jahres

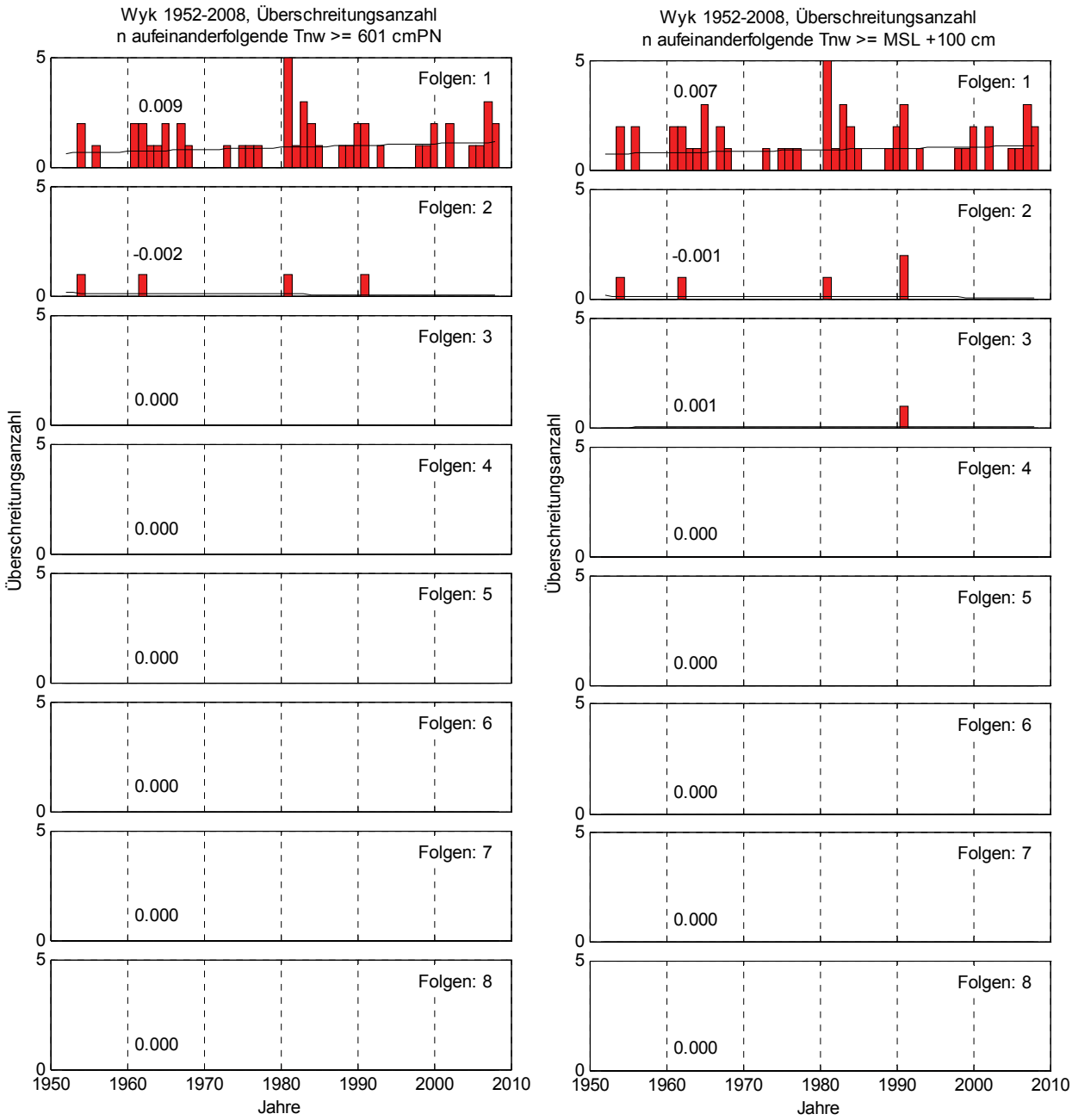


Abb. 4.6: Wyk 1952-2008, Überschreitungszahlen durch 1-8 aufeinanderfolgende Tnw. Links: ≥ $MTnw_{1952\text{-}2008}$ + 250 cm = 601 cm, Rechts: ≥ MSL + 100 cm des jeweiligen Jahres

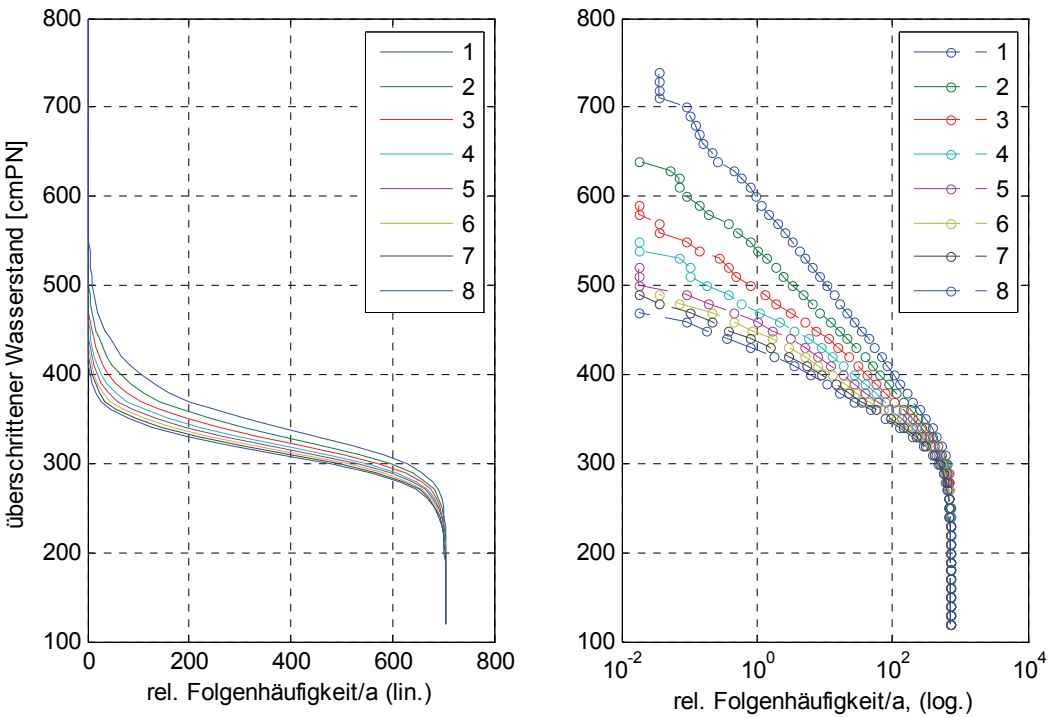


Abb. 4.7: Wyk 1952-2008, relative Häufigkeiten aufeinanderfolgender Tnw

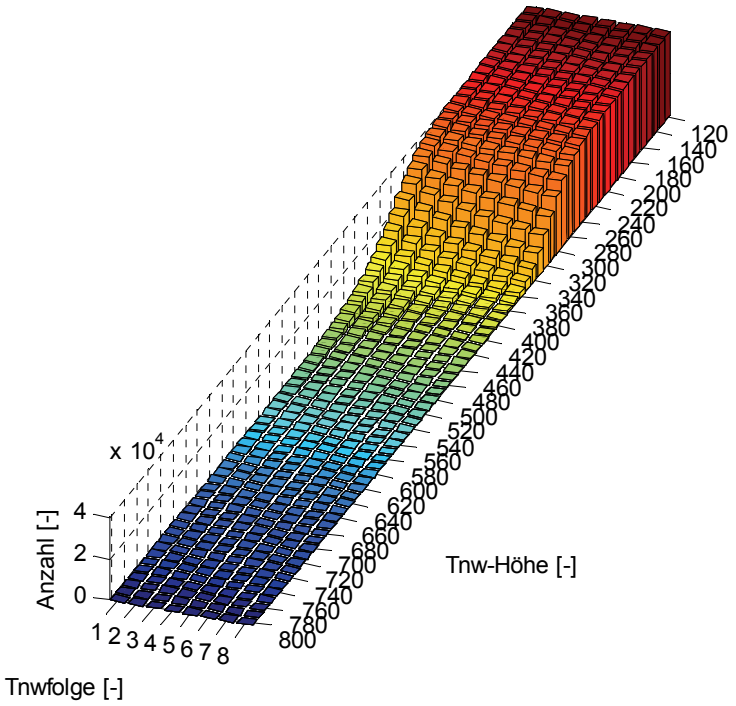


Abb. 4.8: Wyk 1952-2008, Tnw-Folgezahlen

4.2 Tidehochwasser

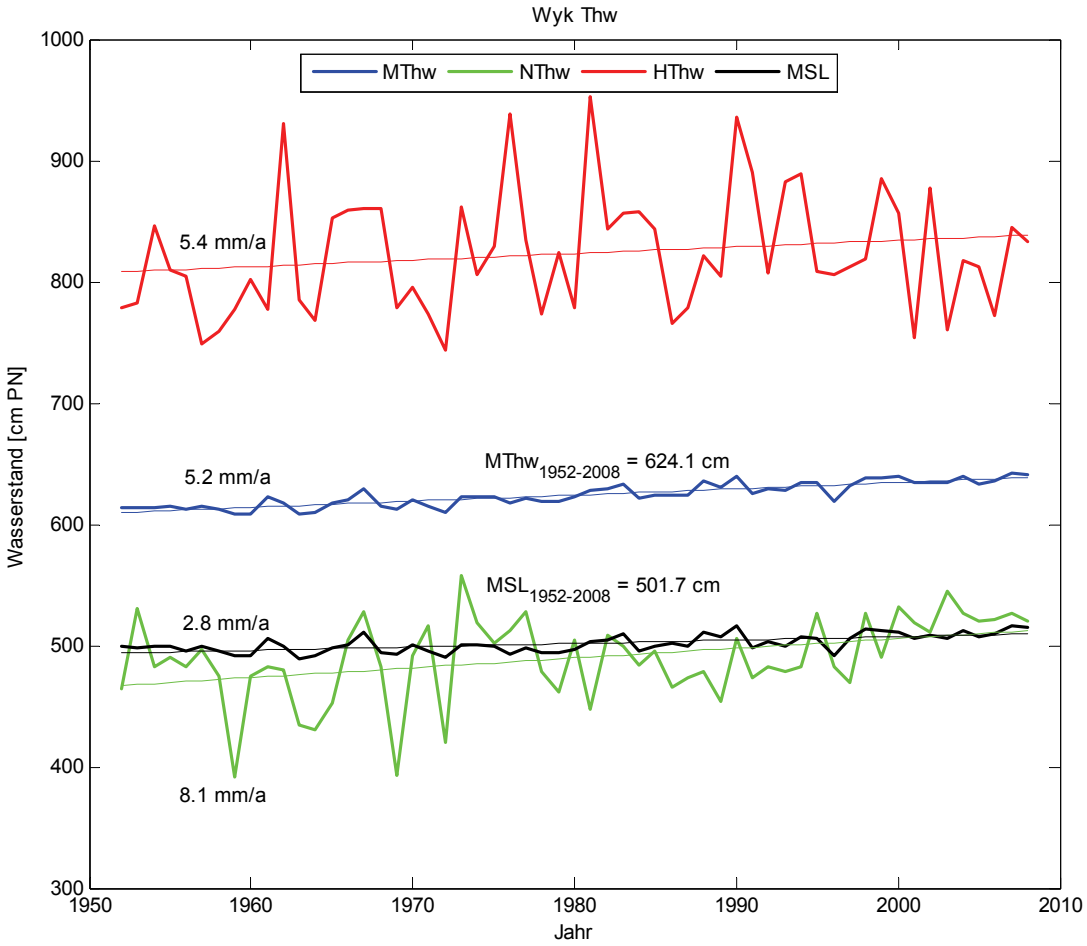


Abb. 4.9: Thw + MSL Trends Wyk 1952 – 2008

Tendenziell verbleibt der Trend der maximal erreichten Basishöhe von n aufeinanderfolgenden Thw auf etwa gleichbleibenden Niveau zwischen etwa 4 bis 6 mm/a. mit zunehmender Folgenzahl ab (Abb. 4.10, Abb. 4.11). Das Maximum wird für die Folgenzahl 5 mit einem Trend von 6,1 mm/a erreicht. Nur die Trends der Folgenzahlen 1, 4 und 6 liegen über dem Trend des MThw = 5,2 mm/a. Der niedrigste Trend beträgt 3,5 mm/a und wird für 3 aufeinanderfolgende Thw erreicht.

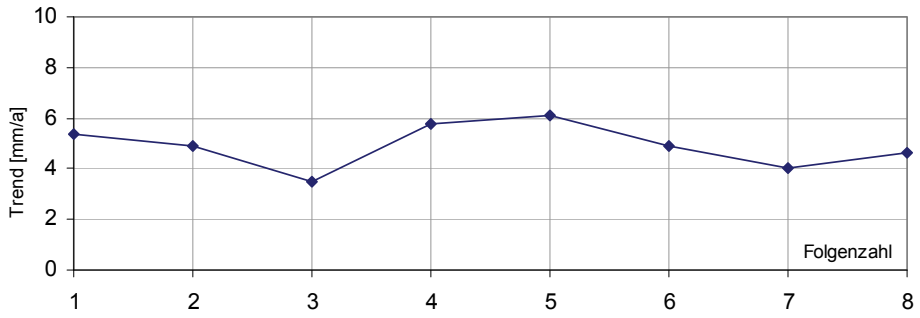


Abb. 4.10: Wyk 1952-2008, Trendentwicklung max. Basishöhe Thw mit zunehmender Folgezahl

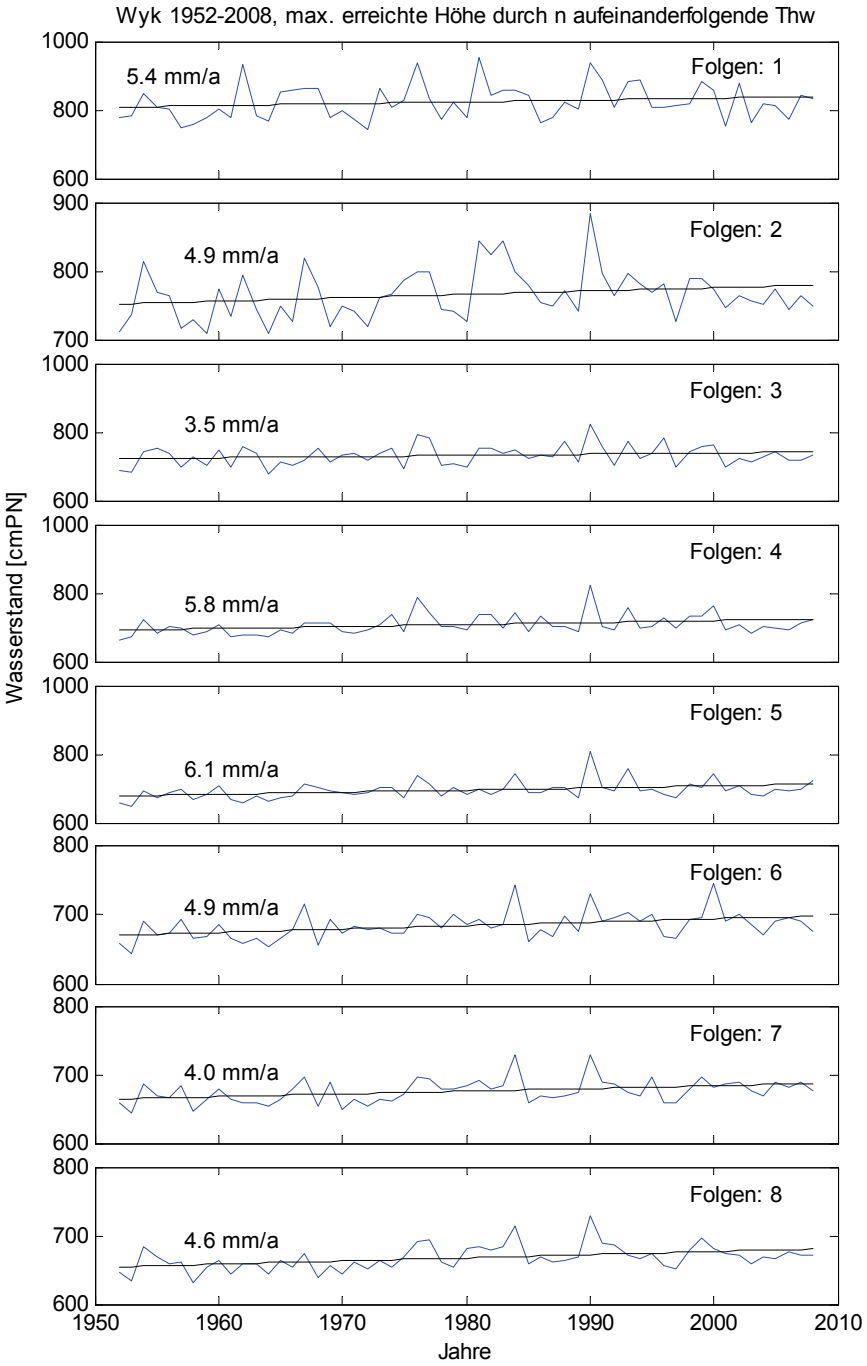


Abb. 4.11: Wyk 1952-2008, maximal erreichte Basishöhe durch 1-8 aufeinanderfolgende Thw

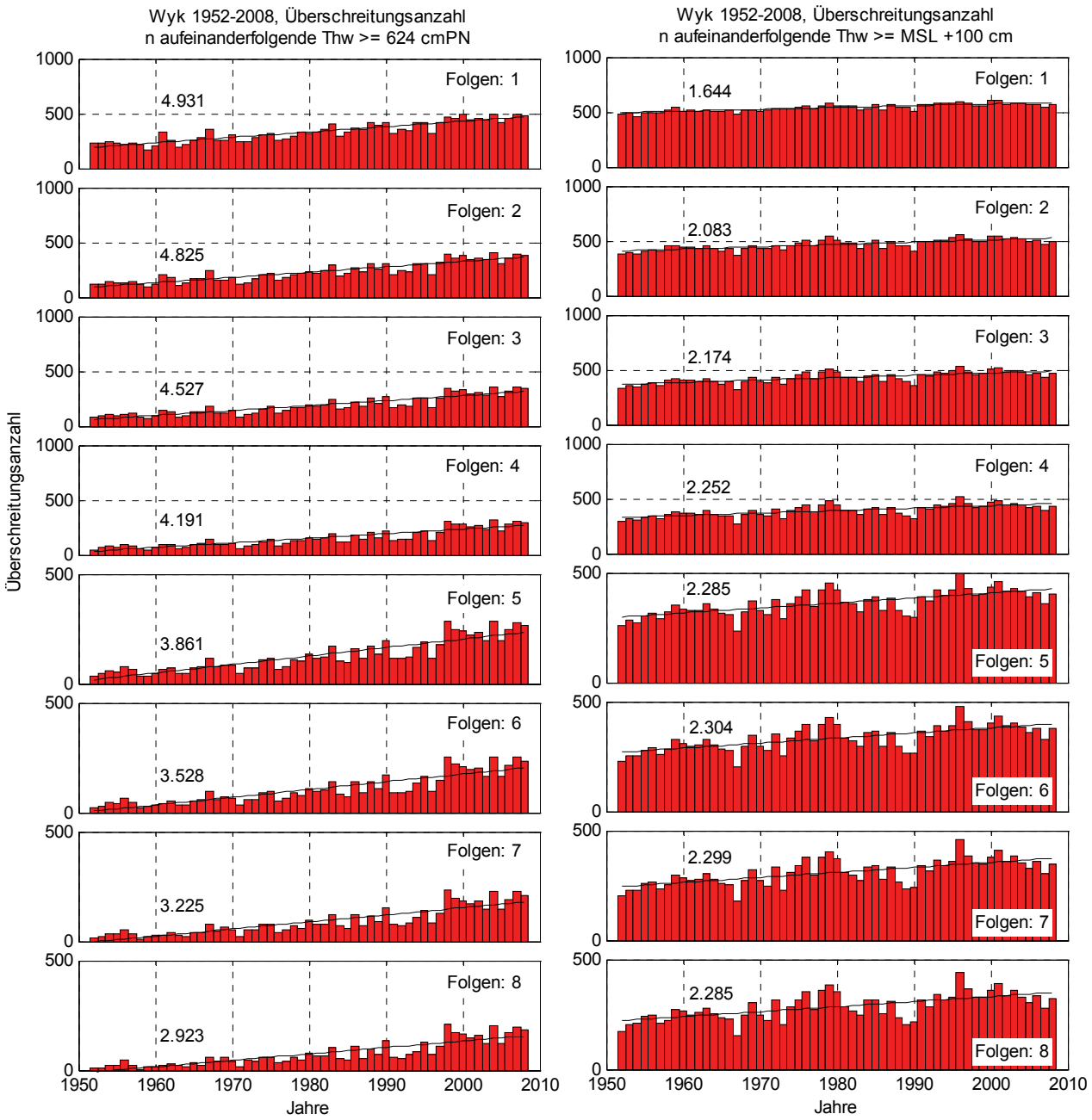


Abb. 4.12: Wyk 1952-2008, Überschreitungszahlen durch 1-8 aufeinanderfolgende Thw. Links: ≥ $MThw_{1952-2008}$ + 0 cm = 624 cm, Rechts: ≥ MSL + 100 cm des jeweiligen Jahres

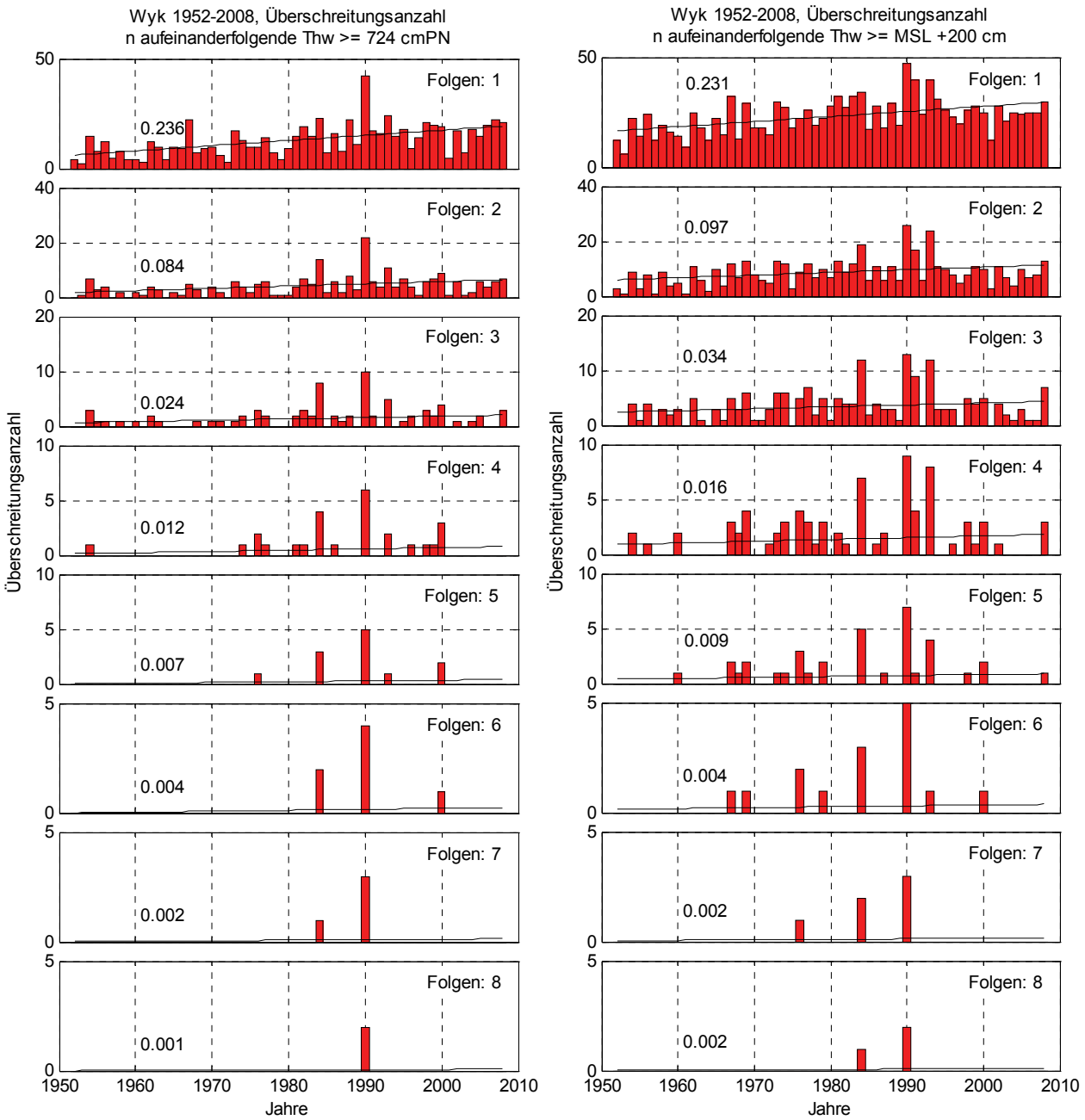


Abb. 4.13: Wyk 1952-2008, Überschreitungszahlen durch 1-8 aufeinanderfolgende Thw. Links: ≥ $MThw_{1952-2008}$ + 100 cm = 724 cm, Rechts: ≥ MSL + 200 cm des jeweiligen Jahres

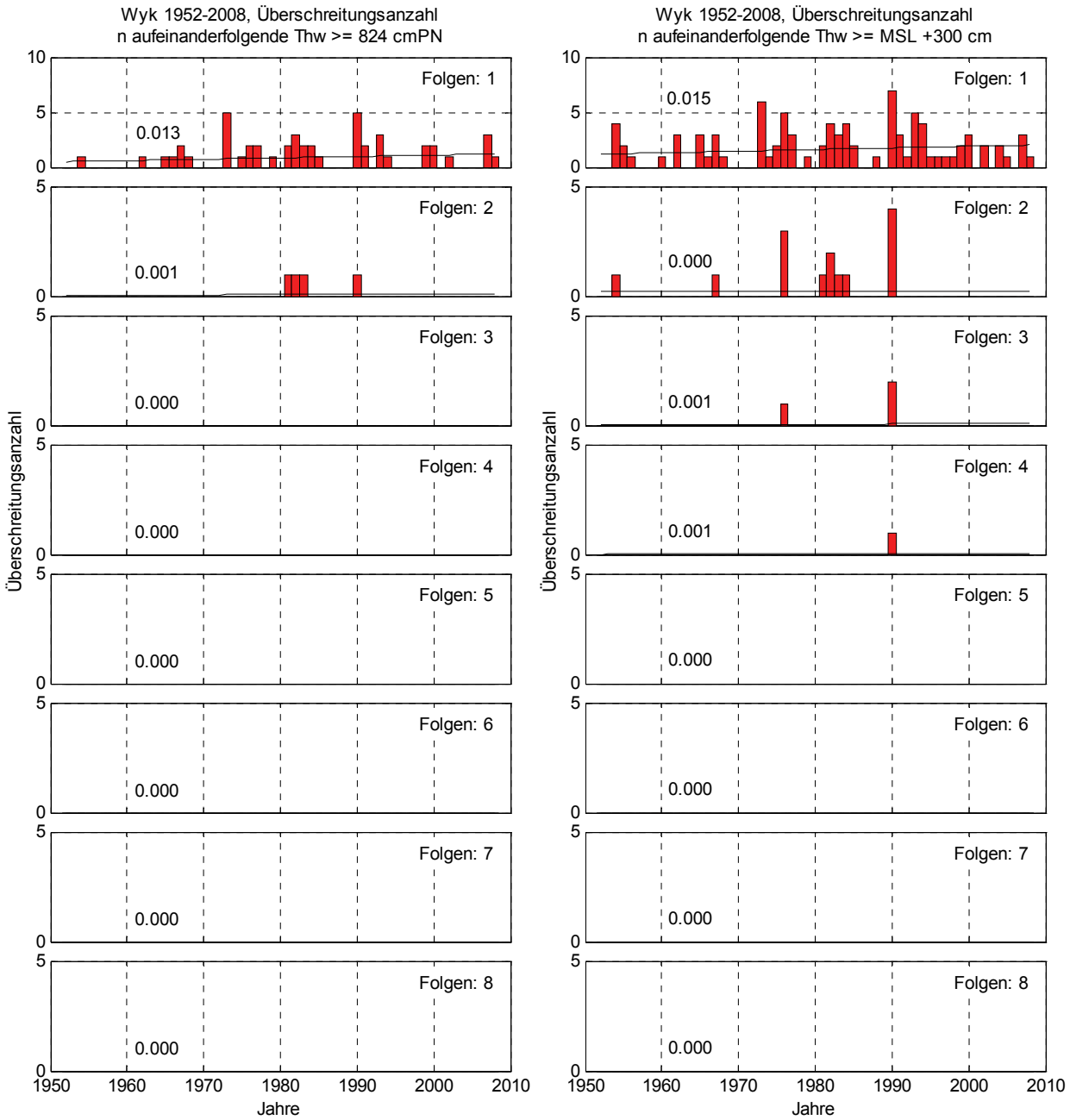


Abb. 4.14: Wyk 1952-2008, Überschreitungszahlen durch 1-8 aufeinanderfolgende Thw. Links: ≥ $MThw_{1952-2008}$ + 200 cm = 824 cm, Rechts: ≥ MSL + 300 cm des jeweiligen Jahres

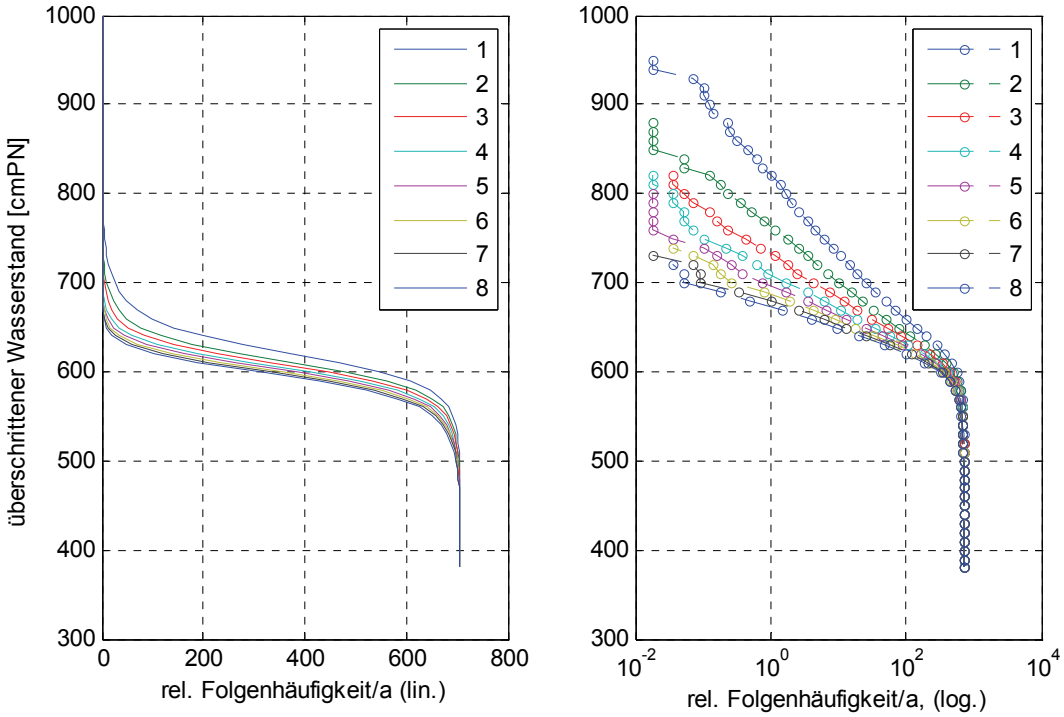


Abb. 4.15: Wyk 1952-2008, relative Häufigkeiten aufeinanderfolgender Thw

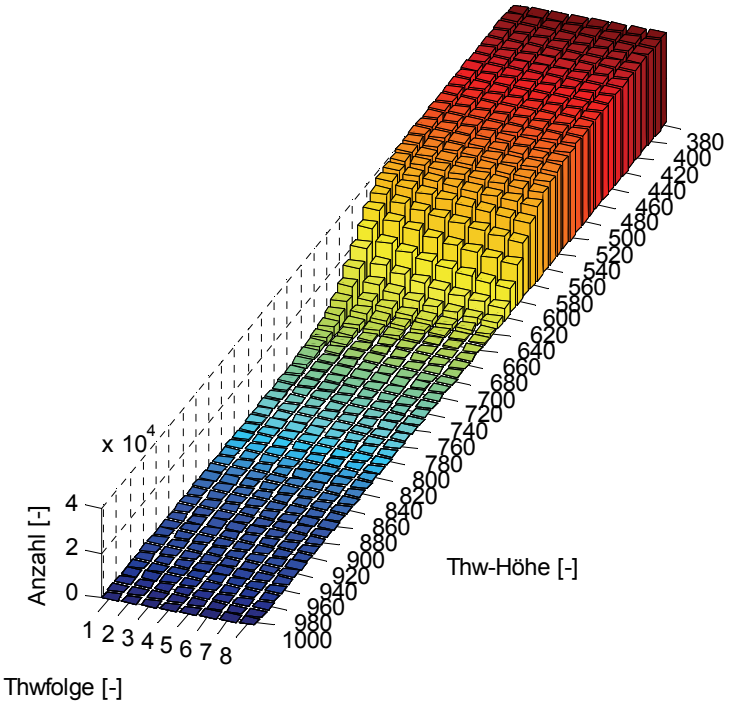


Abb. 4.16: Wyk 1952-2008, Thw-Folgezahlen

5 Dagebüll

5.1 Tideniedrigwasser

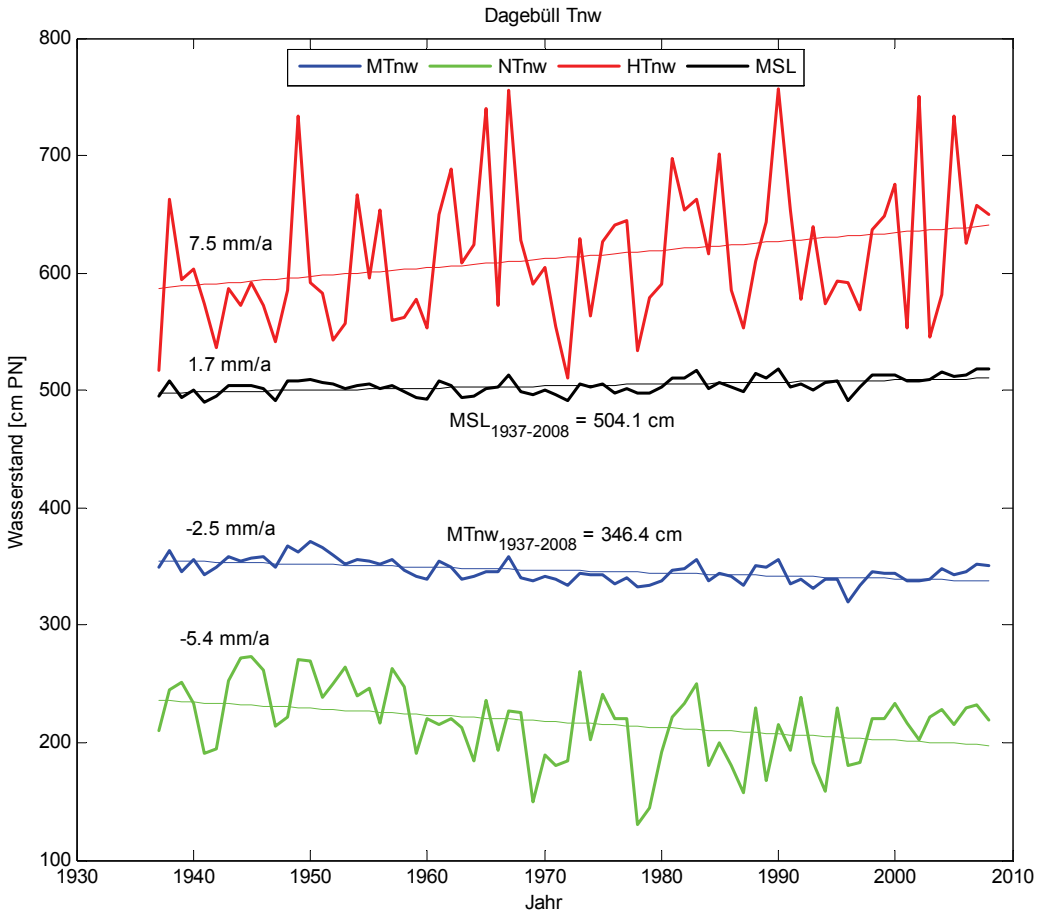


Abb. 5.1: Tnw + MSL Trends Dagebüll 1937 - 2008

Tendenziell nimmt der Trend der maximal erreichten Basishöhe von n aufeinanderfolgenden Tnw mit zunehmender Folgenzahl ab (Abb. 5.2, Abb. 5.3). Das Maximum wird für die Folgenzahl 1, welche gleichzeitig unabhängige Einzeltiden und damit die Reihe der HTnw darstellt, mit einem Trend von 7,5 mm/a erreicht. Alle Trends sind positiv und liegen damit deutlich und mit entgegengesetztem Vorzeichen über dem Trend des MTnw = -2,5 mm/a. Gleiches gilt für den Trend des NTnw = 0,54 mm/a. Der niedrigste Trend beträgt 0,7 mm/a und wird für 6 aufeinanderfolgende Tnw erreicht.

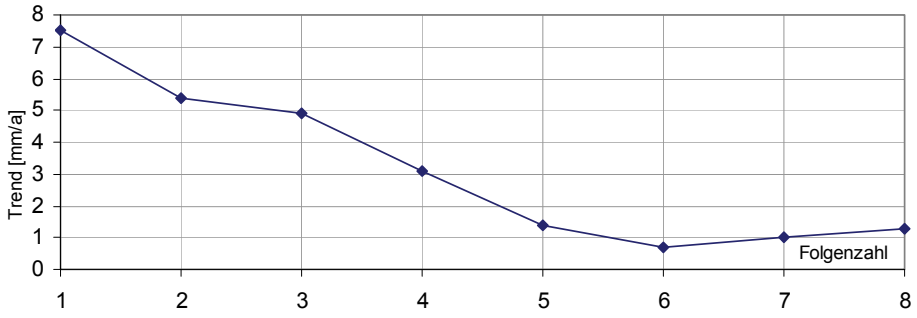


Abb. 5.2: Dagebüll 1937-2008, Trendentwicklung max. Basishöhe der Tnw mit zunehmender Folgezahl

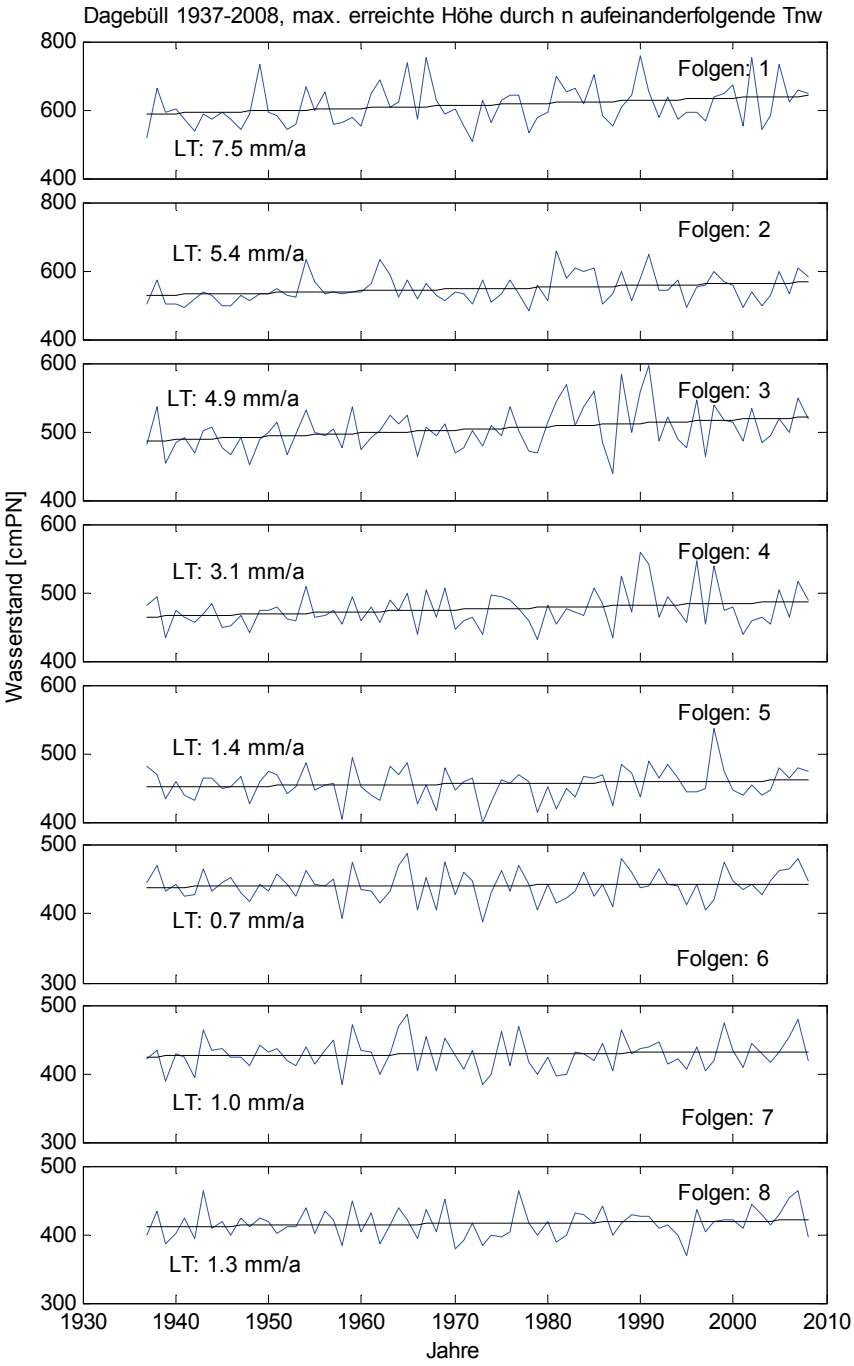


Abb. 5.3: Dagebüll 1937-2008, maximal erreichte Basishöhe durch 1-8 aufeinanderfolgende Tnw

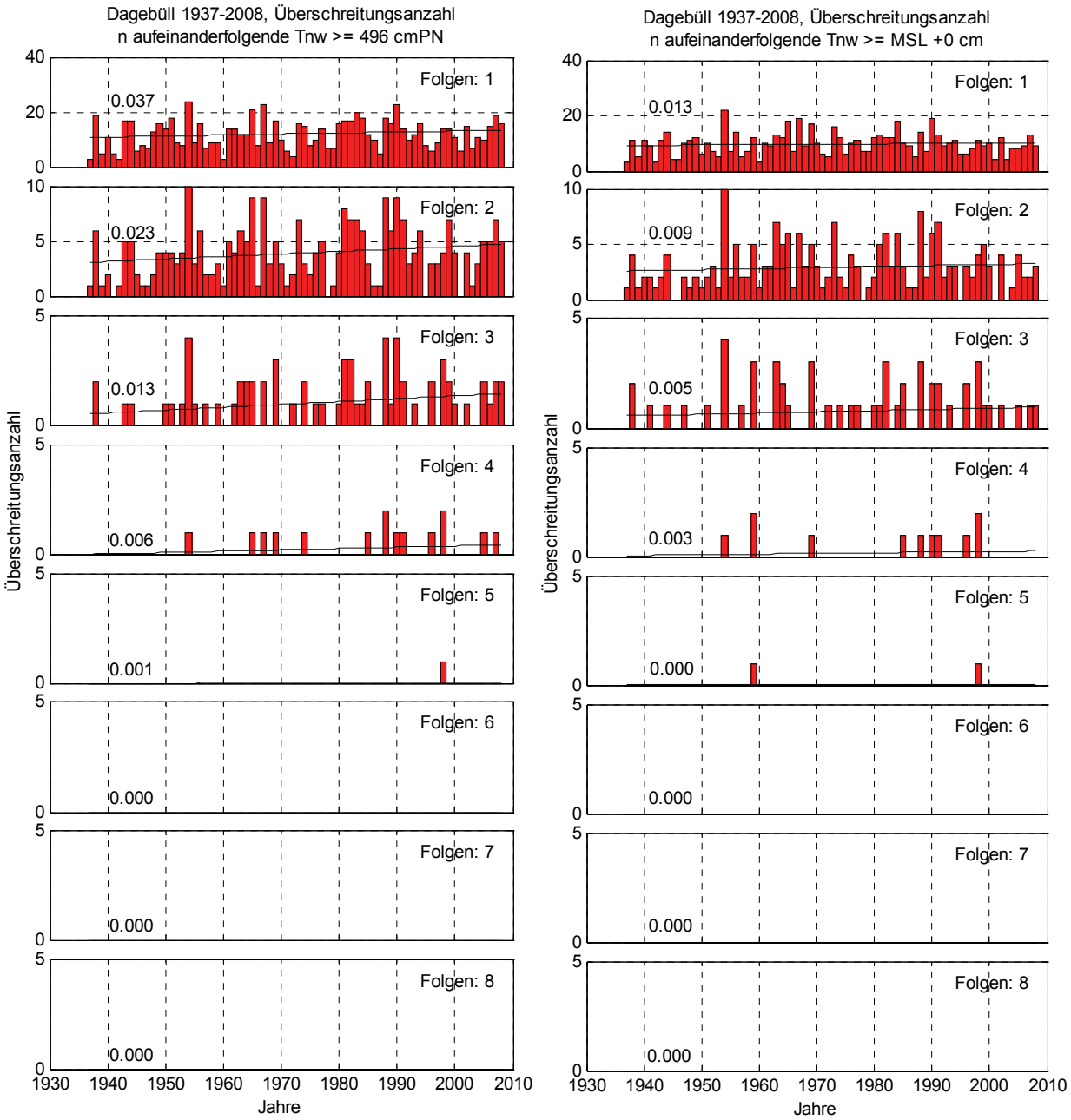


Abb. 5.4: Dagebüll 1937-2008, Überschreitungszahlen durch 1-8 aufeinanderfolgende Tnw. Links: ≥ $MTnw_{1937\text{-}2008}$+150 cm = 496 cm, Rechts: ≥ MSL des jeweiligen Jahres

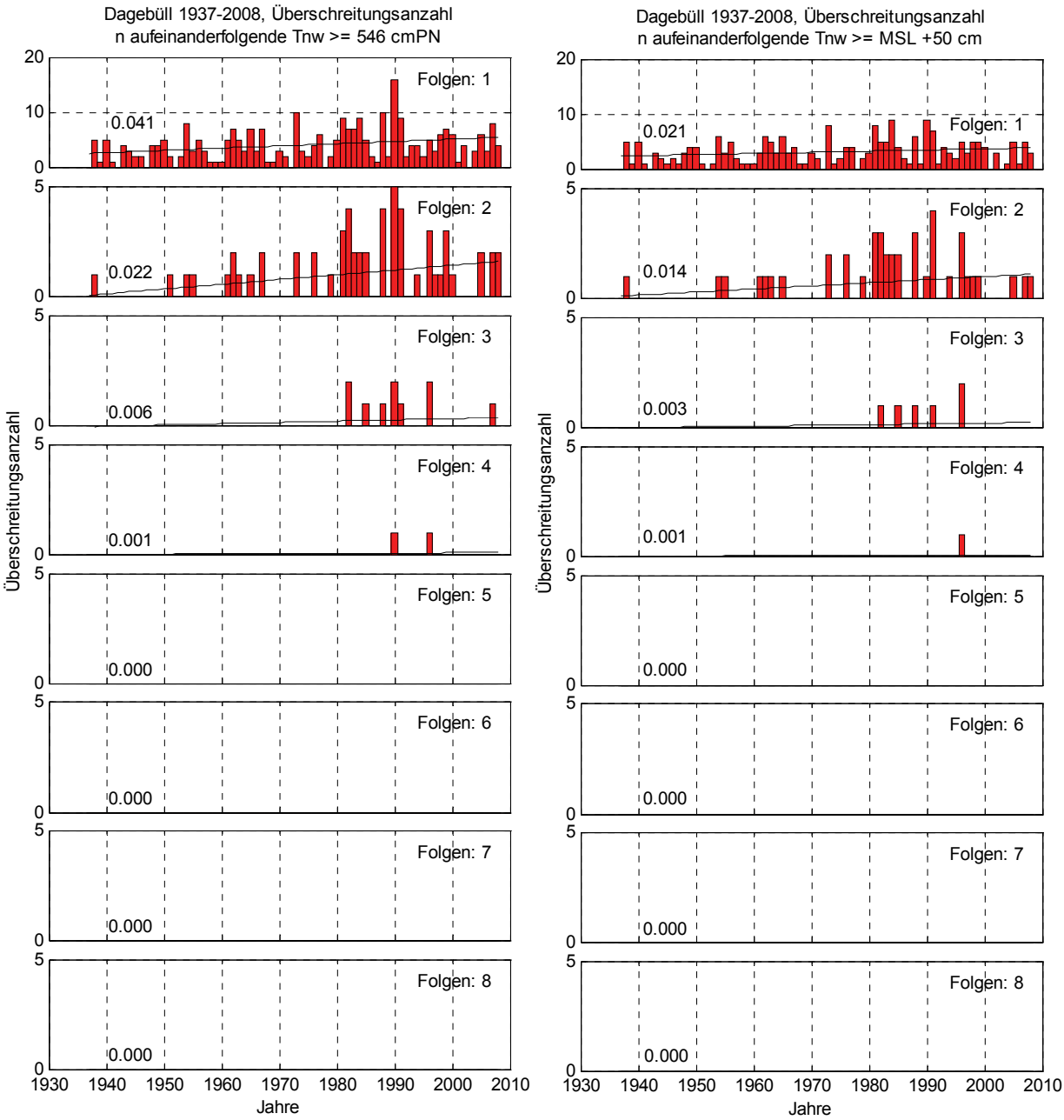
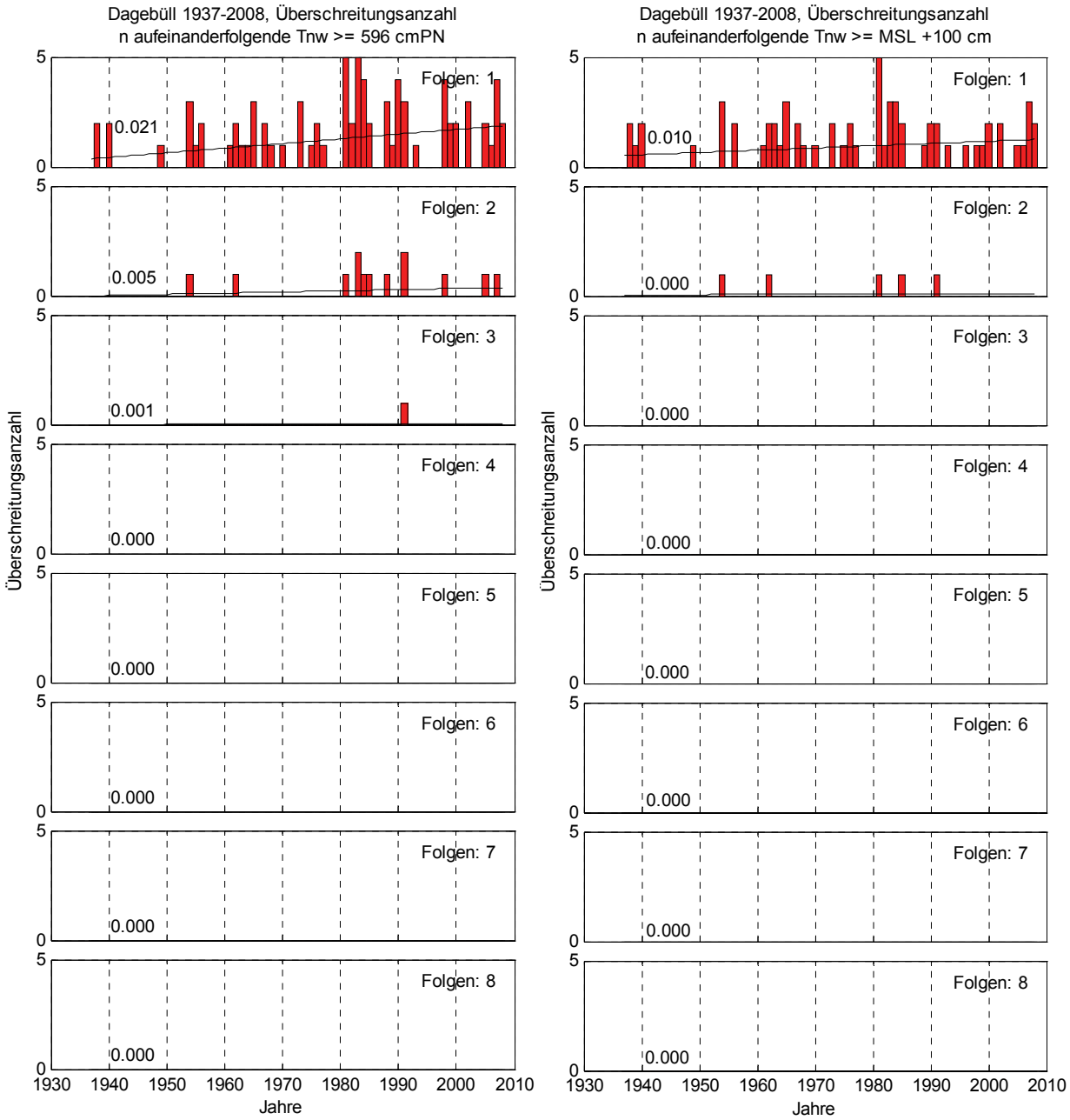


Abb. 5.5: Dagebüll 1937-2008, Überschreitungszahlen durch 1-8 aufeinanderfolgende Tnw. Links: ≥ $MTnw_{1937\text{-}2008}$+200 cm = 546 cm, Rechts: ≥ MSL + 50 cm des jeweiligen Jahres


Dagebüll 1937-2008, Überschreitungsanzahl
n aufeinanderfolgende Tnw >= 596 cmPN
Dagebüll 1937-2008, Überschreitungsanzahl
n aufeinanderfolgende Tnw >= MSL +100 cm
Überschreitungsanzahl
Folgen: 1
Folgen: 2
Folgen: 3
Folgen: 4
Folgen: 5
Folgen: 6
Folgen: 7
Folgen: 8
0.021
0.005
0.001
0.000
0.010
0.000
0.000
0.000

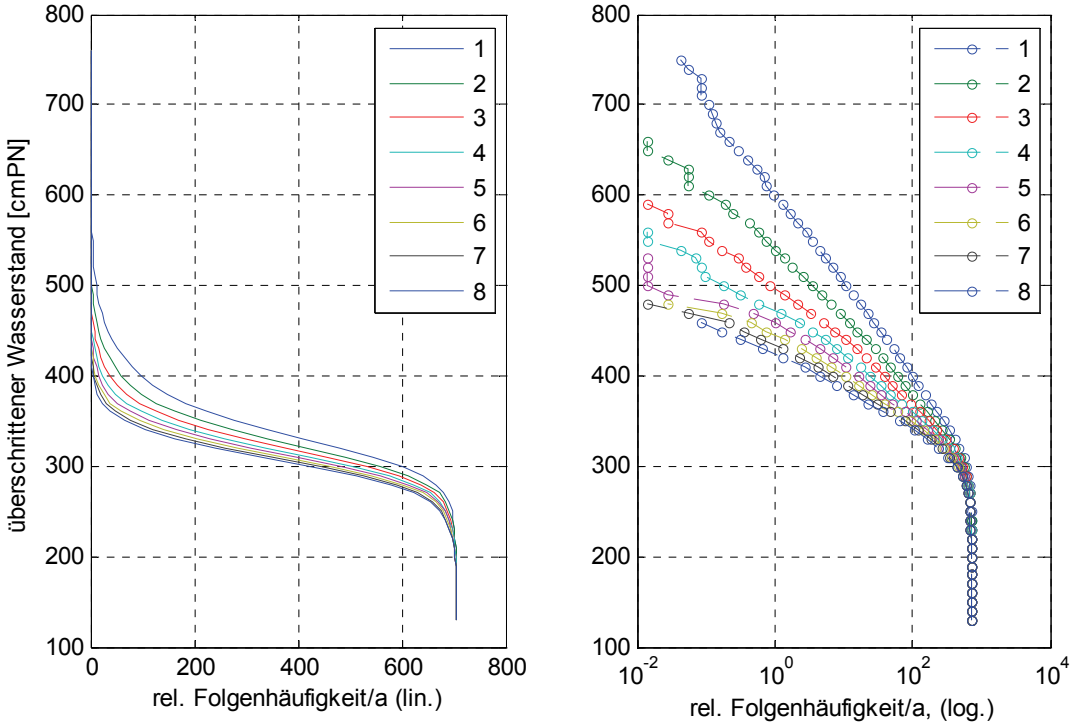


Abb. 5.7: Dagebüll 1937-2008, relative Häufigkeiten aufeinanderfolgender Tnw

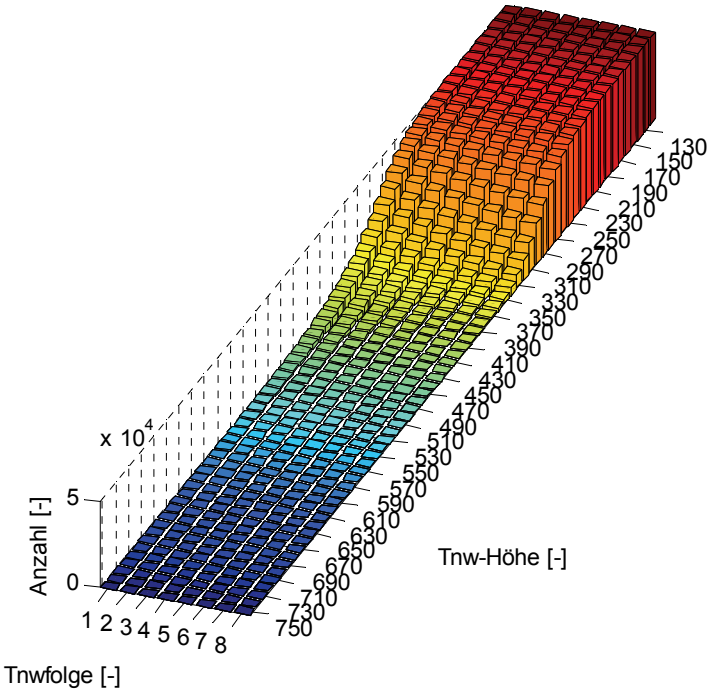


Abb. 5.8: Dagebüll 1937-2008, Tnw-Folgezahlen

5.2 Tidehochwasser

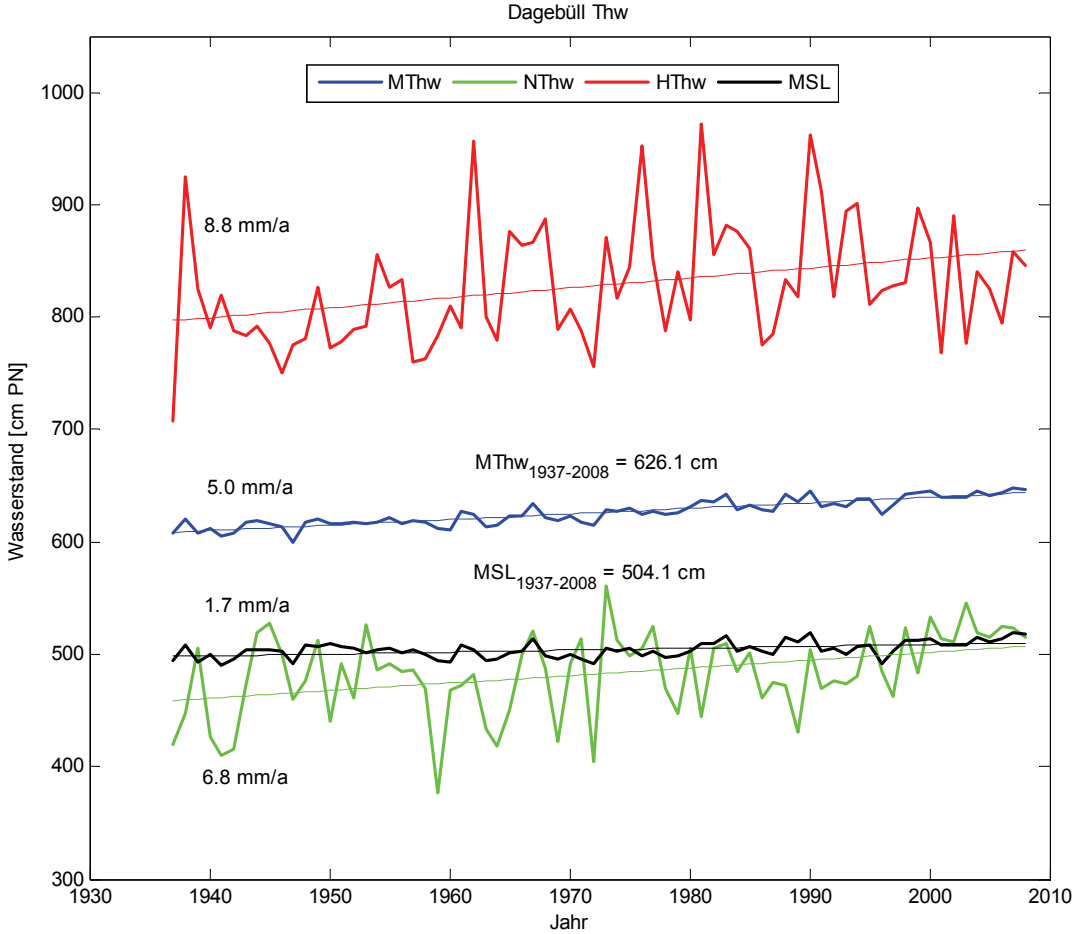


Abb. 5.9: Thw + MSL Trends Dagebüll 1937 - 2008

Tendenziell nimmt der Trend der maximal erreichten Basishöhe von n aufeinanderfolgenden Thw mit zunehmender Folgenzahl ab (Abb. 5.10, Abb. 5.11). Das Maximum wird für die Folgenzahl 2 mit einem Trend von 8,9 mm/a erreicht. Dieser Trend liegt lediglich 0,1 mm/a über dem Trend der Folgezahl 1, welcher gleichzeitig den Trend der HThw = 8,8 mm/a darstellt. Alle Trends liegen über dem Trend des MThw = 5,0 mm/a. Der niedrigste Trend beträgt 5,7 mm/a und wird für 8 aufeinanderfolgende Tnw erreicht.

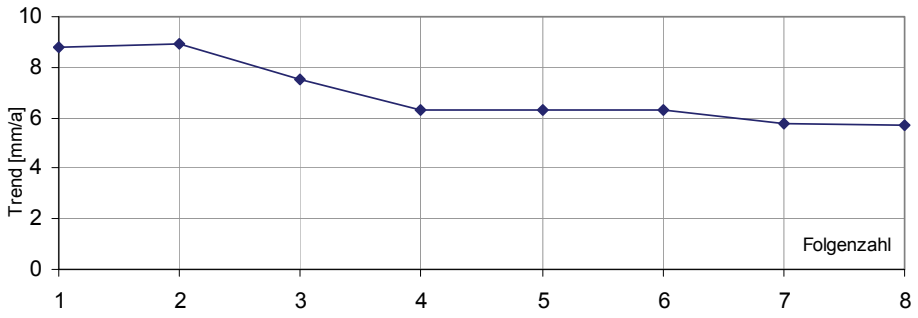


Abb. 5.10: Dagebüll 1937-2008, Trendentwicklung max. Basishöhe Thw mit zunehmender Folgezahl

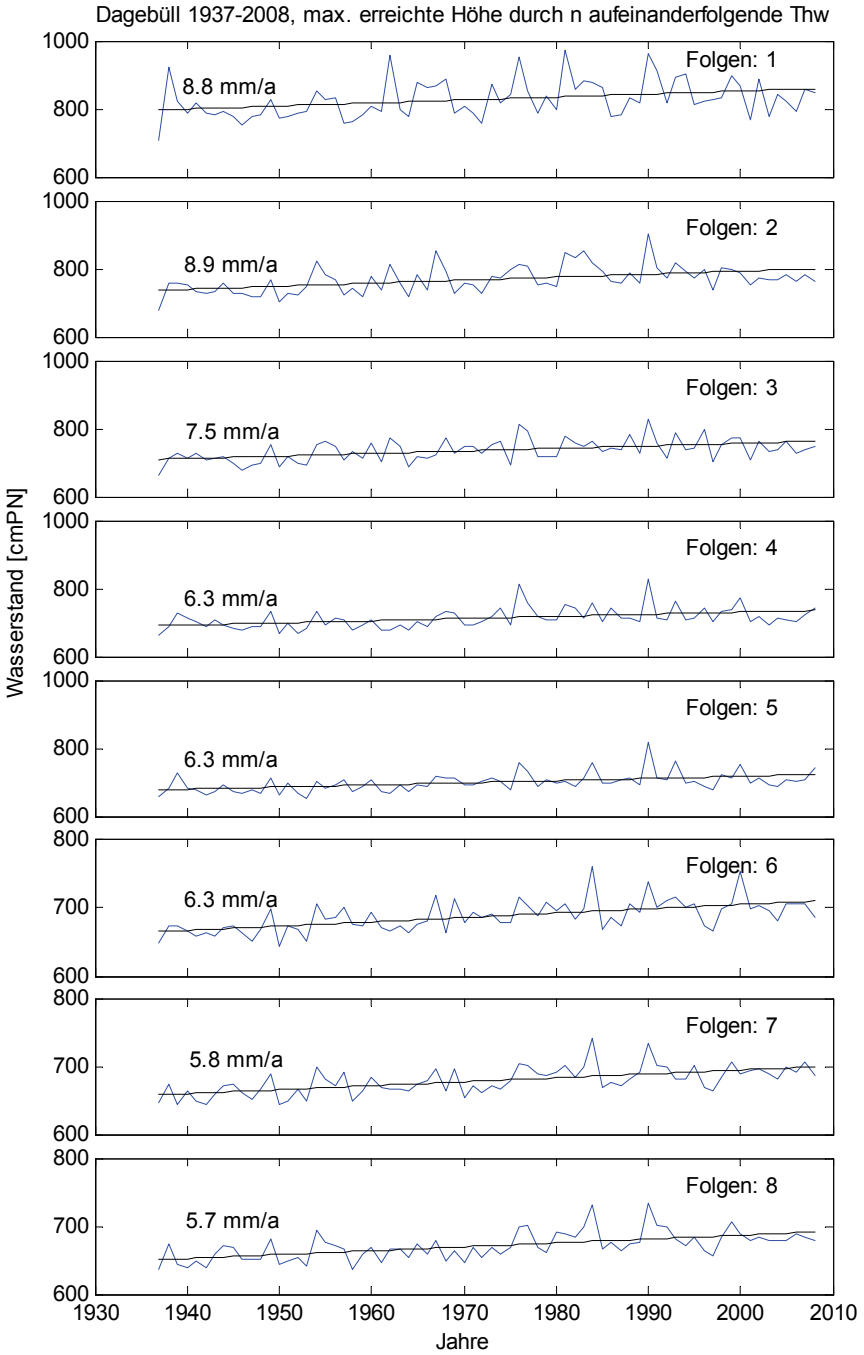


Abb. 5.11: Dagebüll 1937-2008, maximal erreichte Basishöhe durch 1-8 aufeinanderfolgende Thw

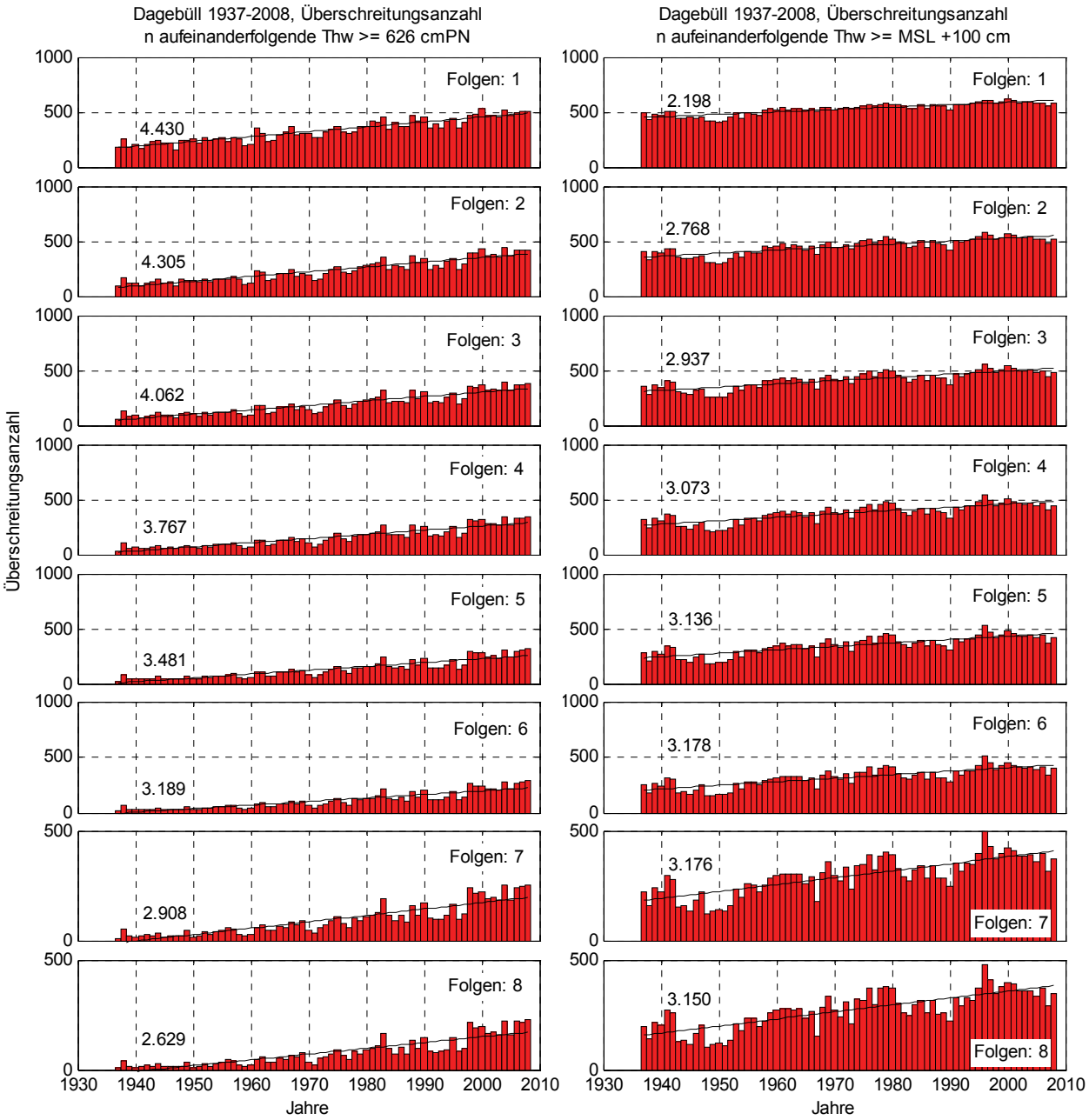


Abb. 5.12: Dagebüll 1937-2008, Überschreitungszahlen durch 1-8 aufeinanderfolgende Thw. Links: ≥ $MThw_{1937-2008}$ + 0 cm = 626 cm, Rechts: ≥ MSL + 100 cm des jeweiligen Jahres

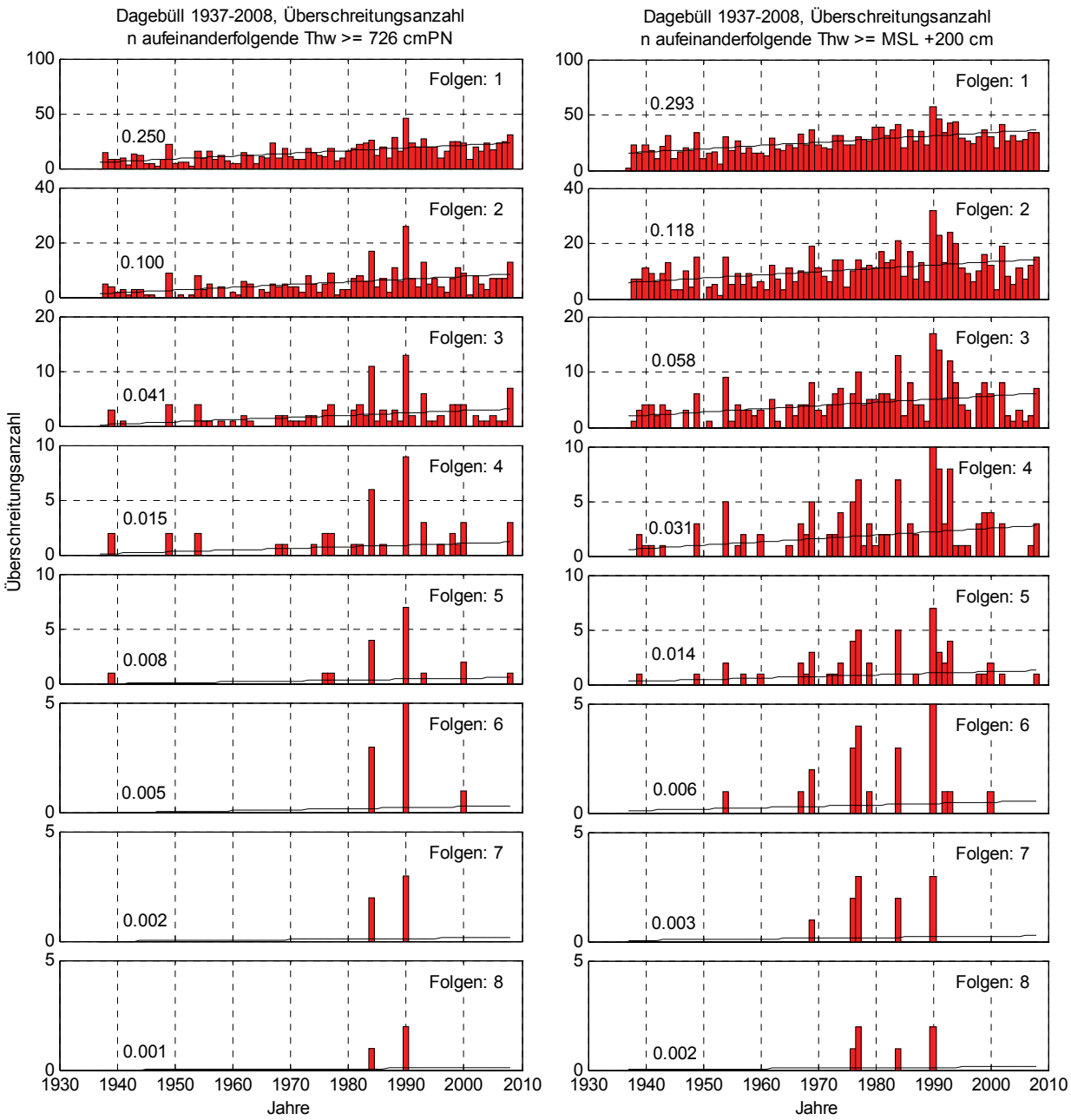


Abb. 5.13: Dagebüll 1937-2008, Überschreitungszahlen durch 1-8 aufeinanderfolgende Thw. Links: ≥ $MThw_{1937\text{-}2008}$ + 100 cm = 726 cm, Rechts: ≥ MSL + 200 cm des jeweiligen Jahres

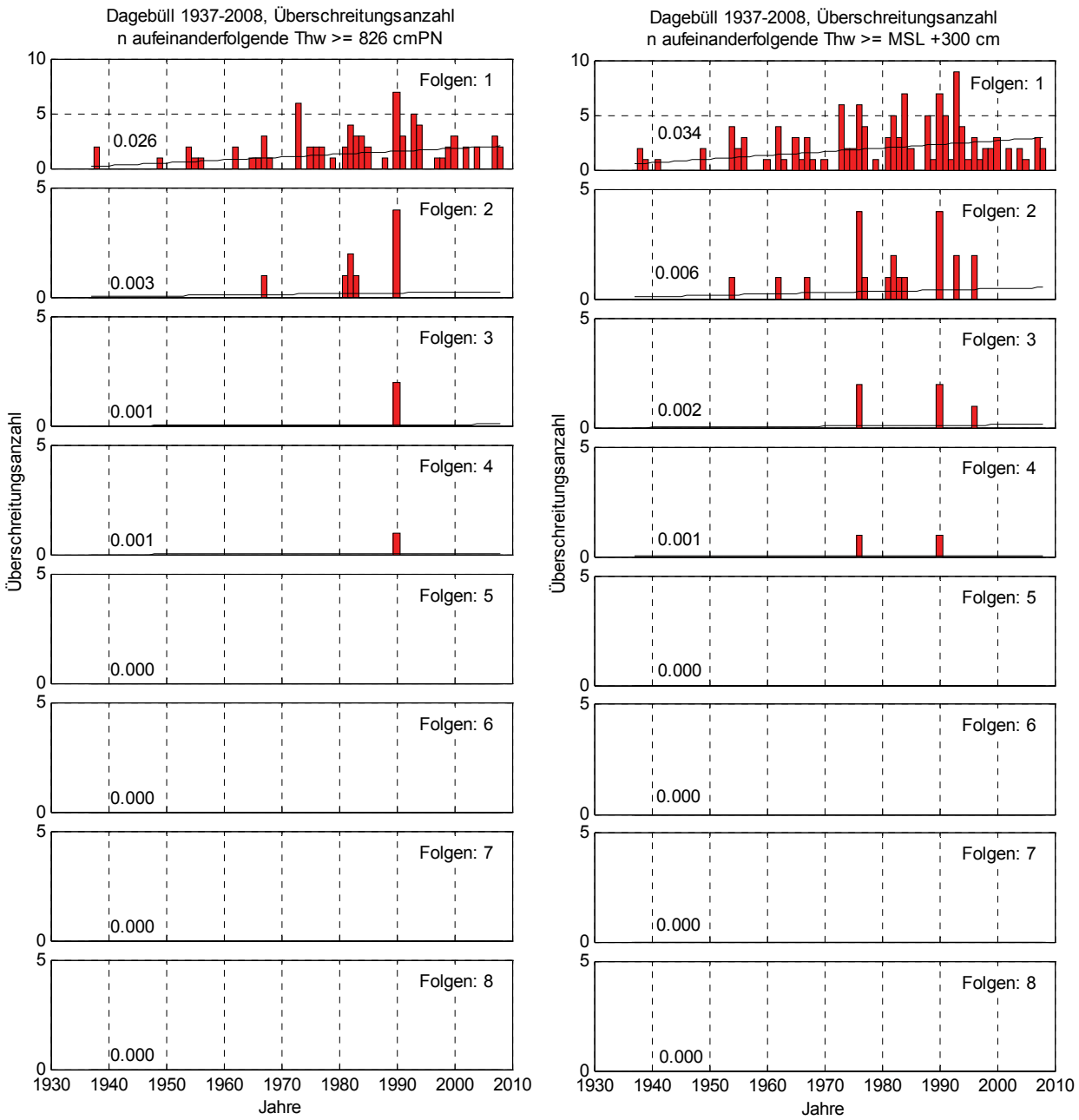


Abb. 5.14: Dagebüll 1937-2008, Überschreitungszahlen durch 1-8 aufeinanderfolgende Thw. Links: ≥ $MThw_{1937\text{-}2008}$ + 200 cm = 826 cm, Rechts: ≥ MSL + 300 cm des jeweiligen Jahres

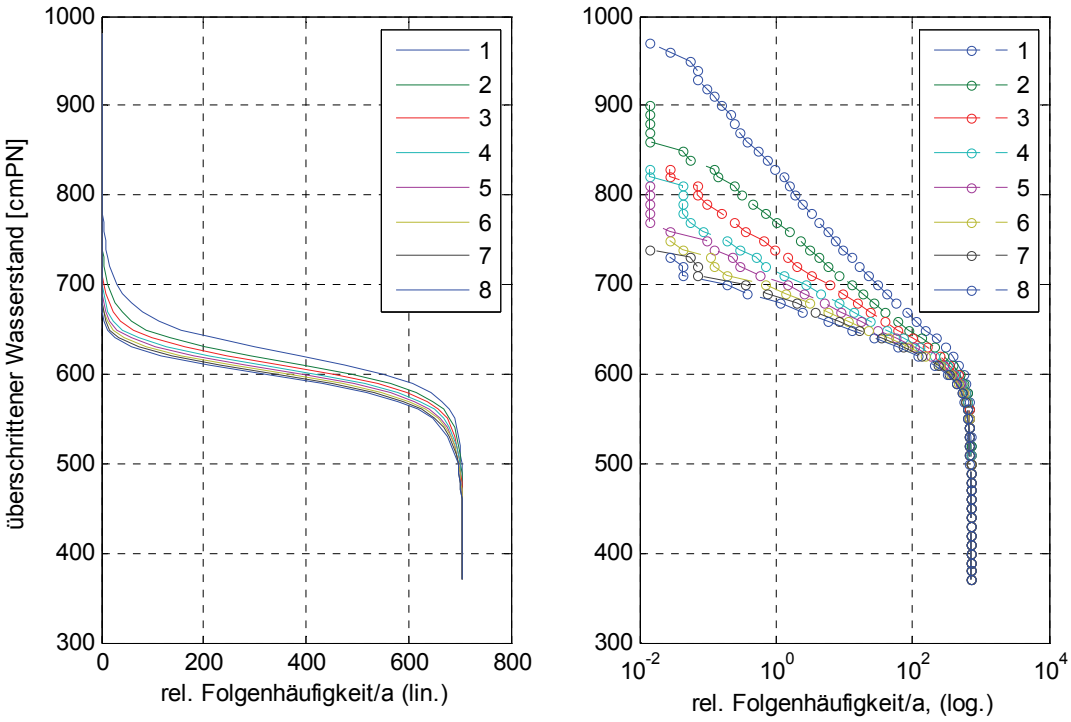


Abb. 5.15: Dagebüll 1937-2008, relative Häufigkeiten aufeinanderfolgender Thw

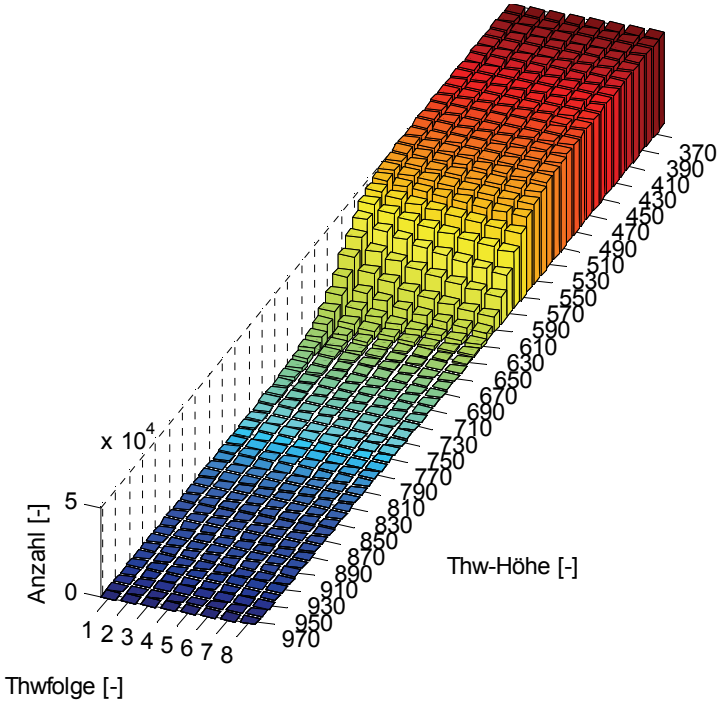


Abb. 5.16: Dagebüll 1937-2008, Thw-Folgezahlen

6 Wittdün

6.1 Tideniedrigwasser

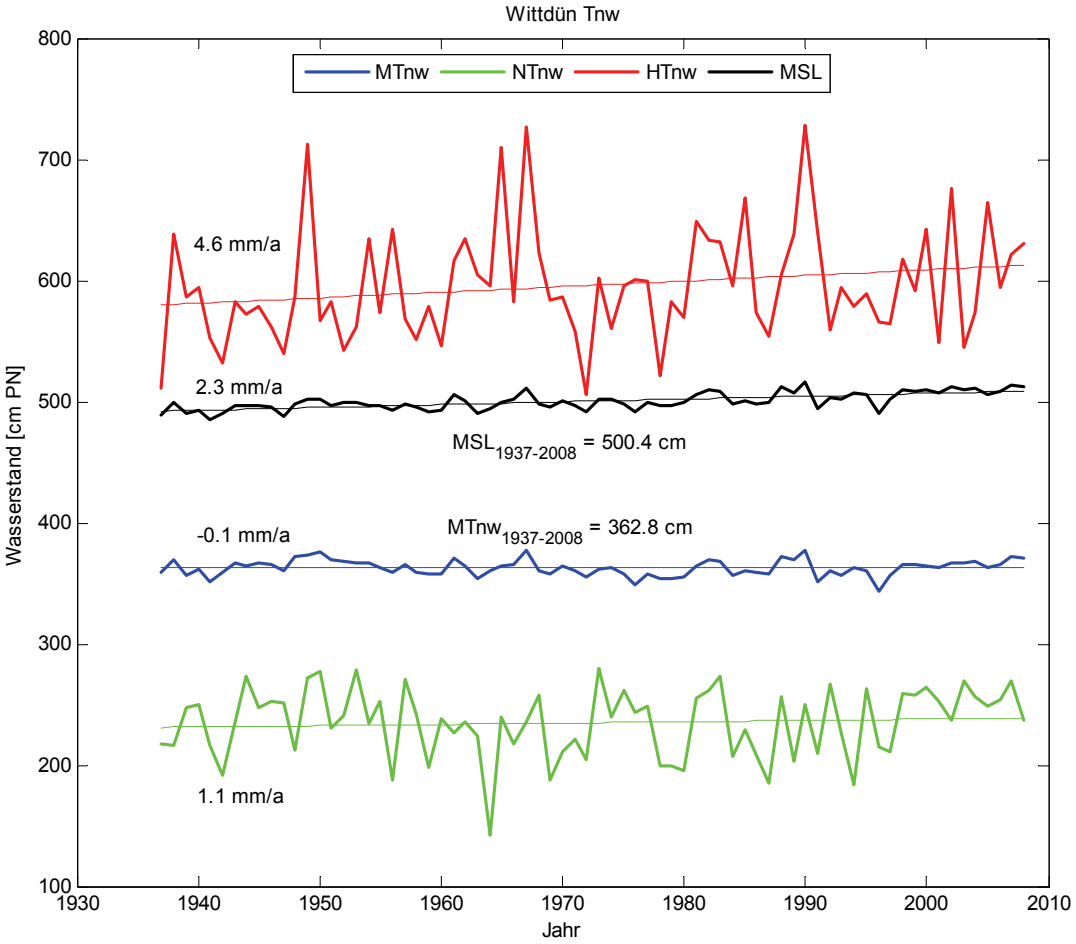


Abb. 6.1: Tnw + MSL Trends Wittdün 1937 – 2008

Tendenziell nimmt der Trend der maximal erreichten Basishöhe von n aufeinanderfolgenden Tnw mit zunehmender Folgenzahl ab (Abb. 6.2, Abb. 6.3). Der Verlauf kann dabei aber auch in zwei gleichbleibende Trendniveaus mit einem Trend von etwa 4 – 5 mm/a für Folgezahlen 1-4 und von etwa 1-2 mm/a für Folgezahlen von 5-8 unterteilt werden. Das Maximum wird bei 3 aufeinanderfolgenden Tnw mit einem Trend von 4,9 mm/a erreicht. Dieser Trend ist größer als der Trend der HTnw = 4,6 mm/a. Alle Trends liegen deutlich über dem Trend des MTnw = -0,1 mm/a. Der niedrigste Trend beträgt 1,2 mm/a und wird für 6 aufeinanderfolgende Tnw erreicht. Nach der Folgenzahl 6 steigt der Trend allerdings wieder bis auf einen Wert von 2,1 mm/a.

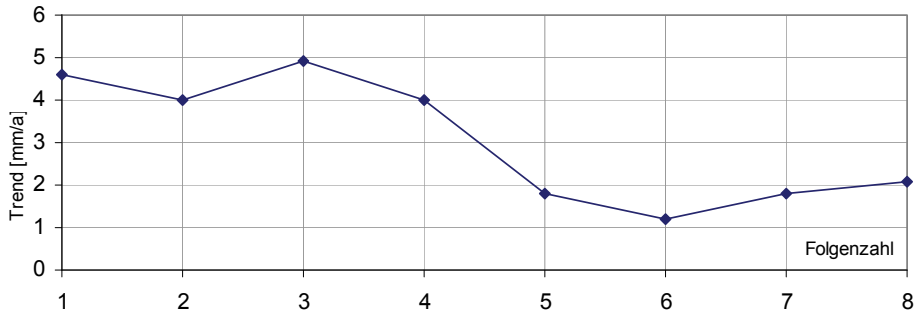


Abb. 6.2: Wittdün 1937-2008, Trendentwicklung max. Basishöhe Tnw mit zunehmender Folgezahl

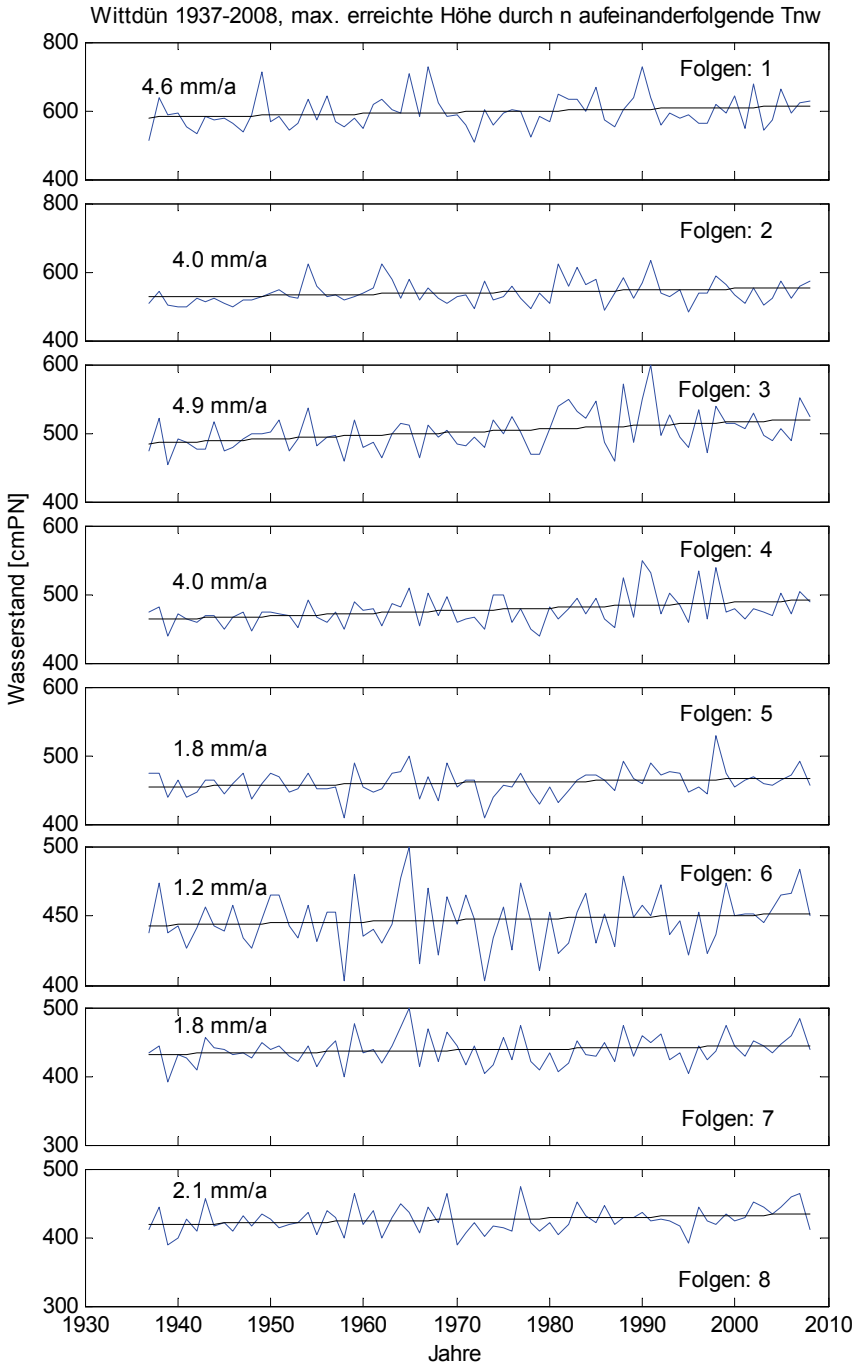


Abb. 6.3: Wittdün 1937-2008, maximal erreichte Basishöhe durch 1-8 aufeinanderfolgende Tnw

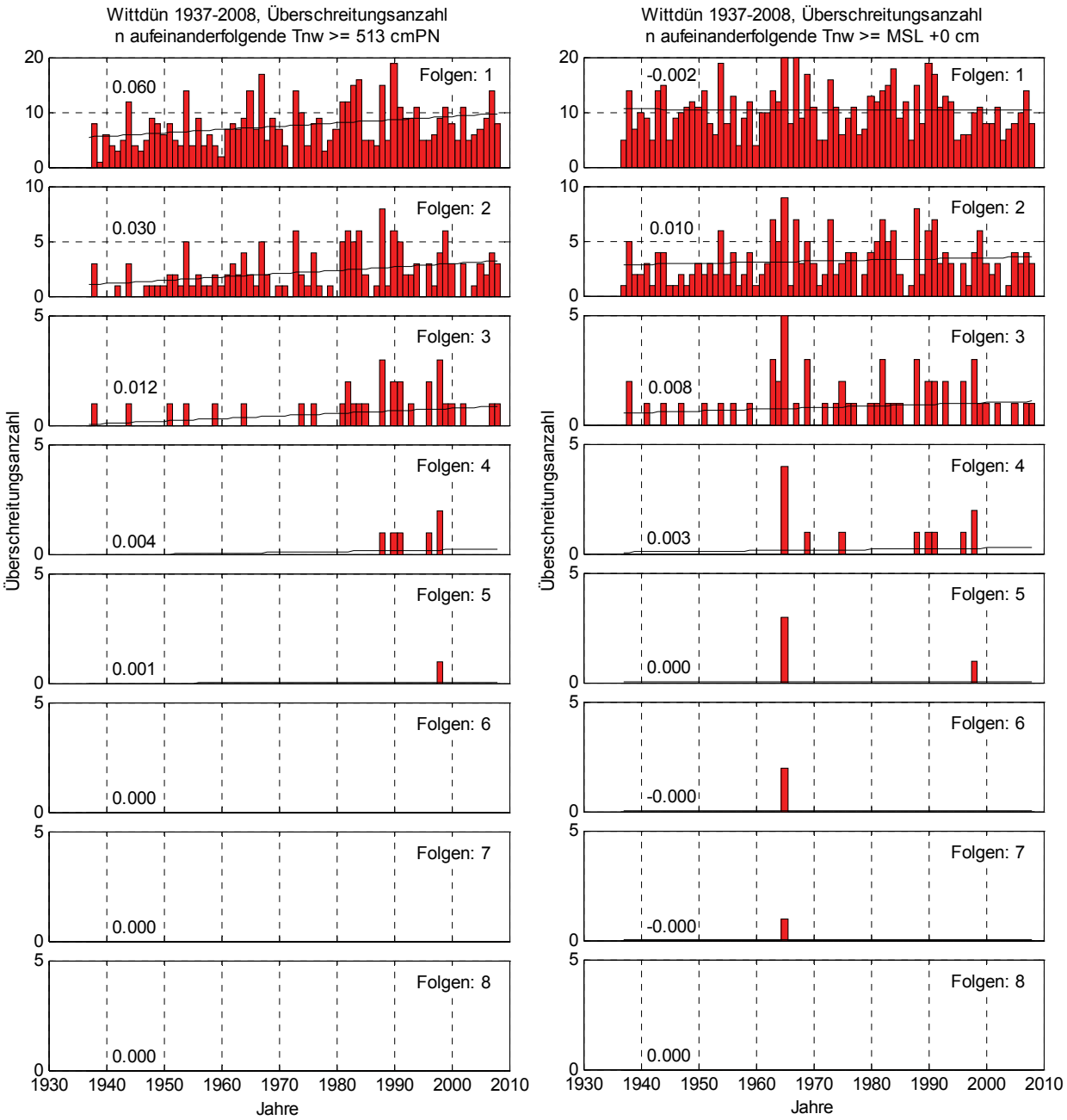


Abb. 6.4: Wittdün 1937-2008, Überschreitungszahlen durch 1-8 aufeinanderfolgende Tnw. Links: ≥ $MTnw_{1937\text{-}2008}$ + 150 cm = 513 cm, Rechts: ≥ MSL + 0 cm des jeweiligen Jahres

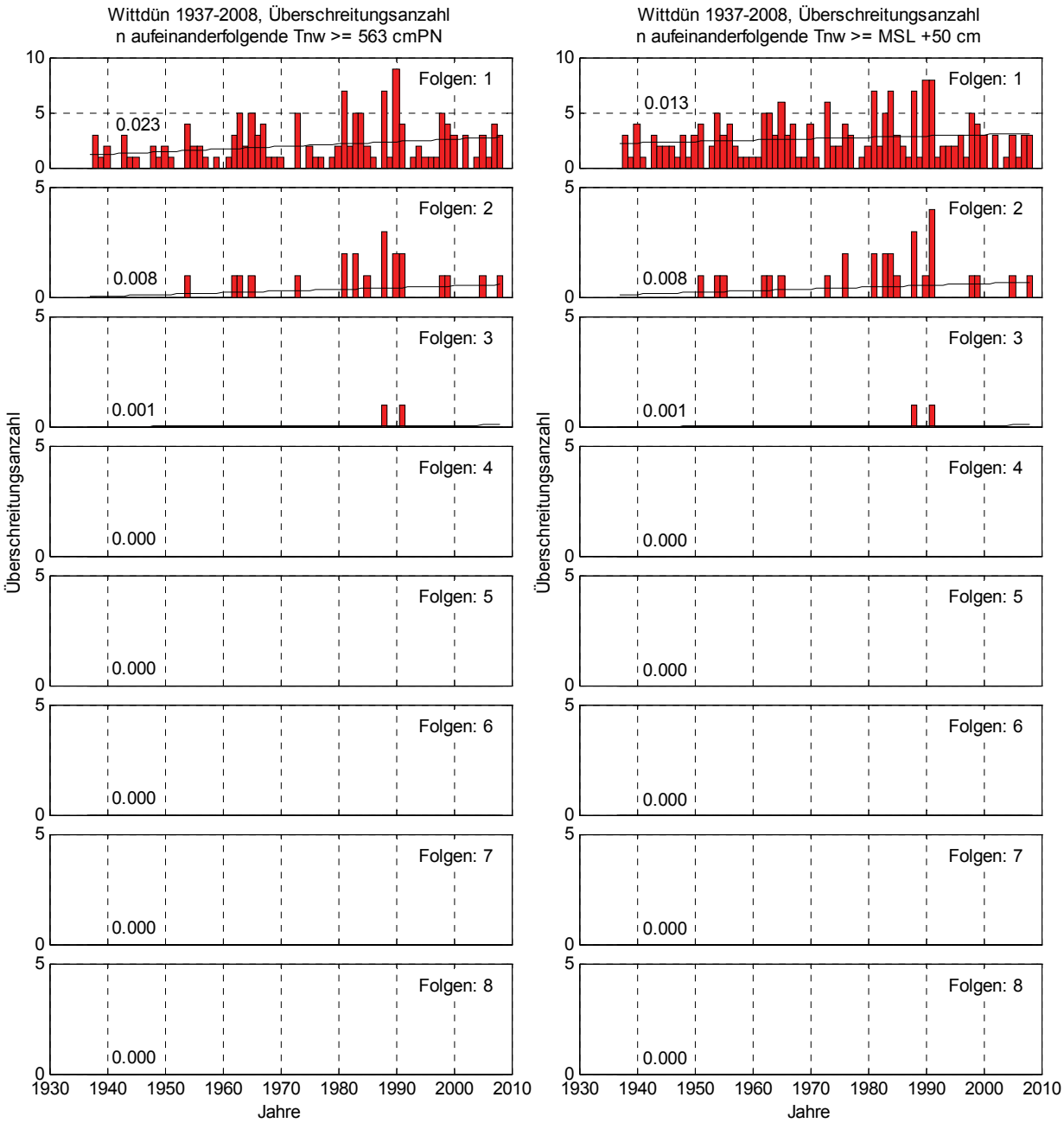


Abb. 6.5: Wittdün 1937-2008, Überschreitungszahlen durch 1-8 aufeinanderfolgende Tnw. Links: ≥ $MTnw_{1937\text{-}2008}$ + 200 cm = 563 cm, Rechts: ≥ MSL + 50 cm des jeweiligen Jahres

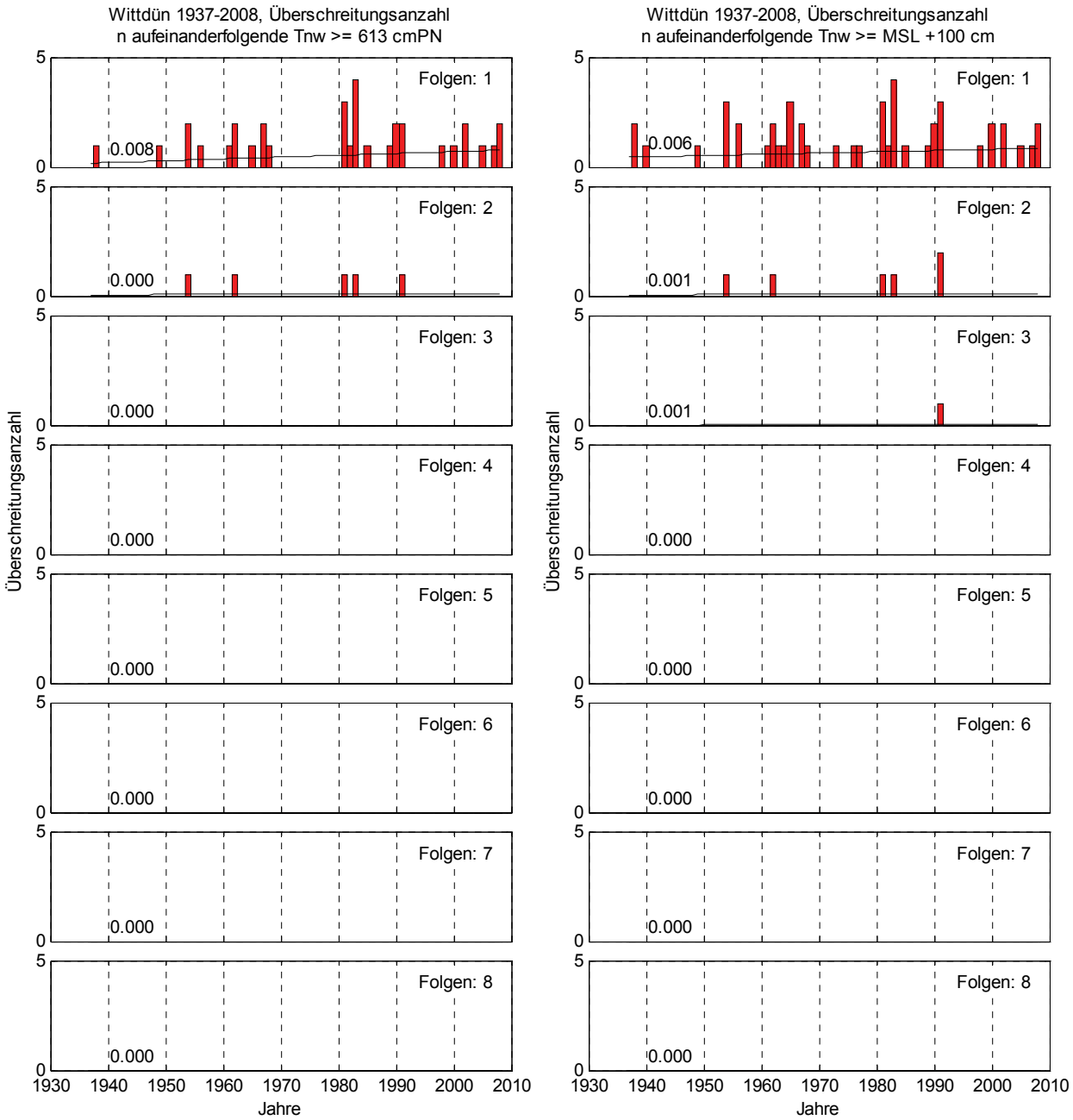


Abb. 6.6: Wittdün 1937-2008, Überschreitungszahlen durch 1-8 aufeinanderfolgende Tnw. Links: ≥ $MTnw_{1937\text{-}2008}$ + 250 cm = 613 cm, Rechts: ≥ MSL + 100 cm des jeweiligen Jahres

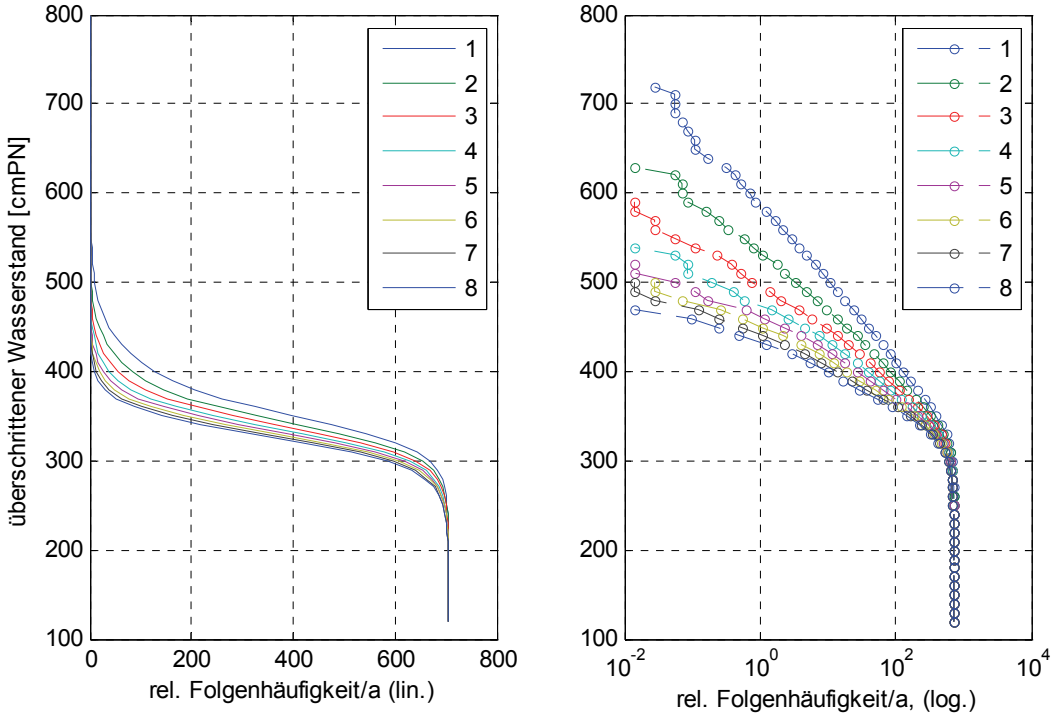


Abb. 6.7: Wittdün 1937-2008, relative Häufigkeiten aufeinanderfolgender Tnw

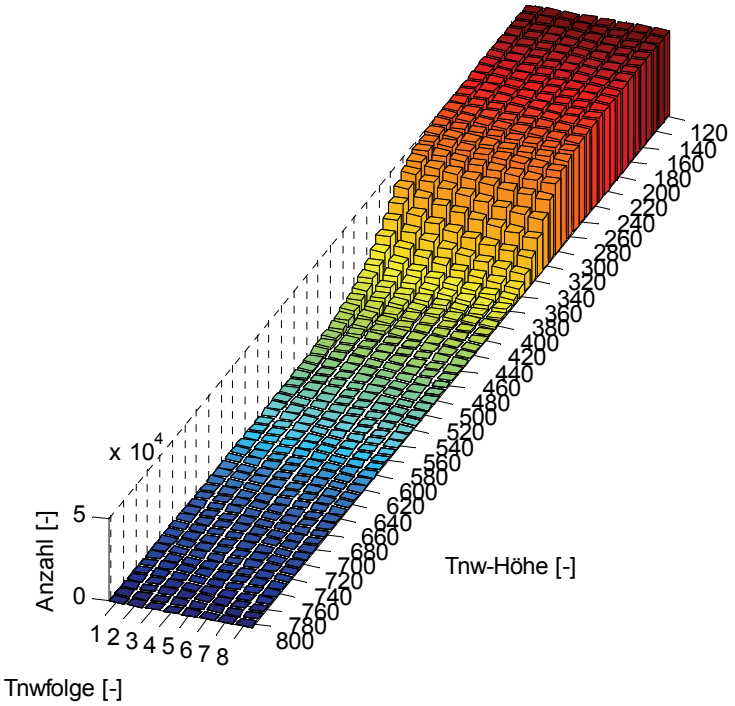


Abb. 6.8: Wittdün1937-2008, Tnw-Folgezahlen

6.2 Tidehochwasser

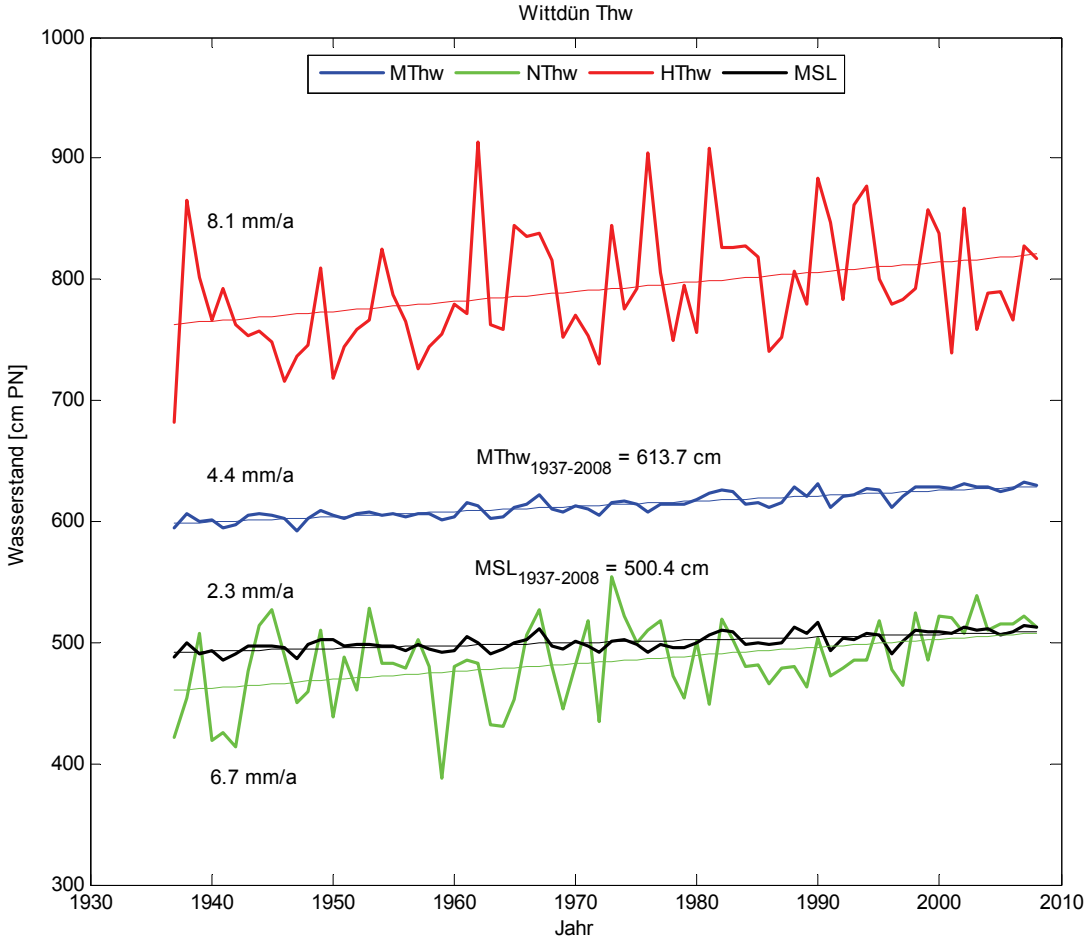


Abb. 6.9: Thw + MSL Trends Wittdün 1937 – 2008

Tendenziell nimmt der Trend der maximal erreichten Basishöhe von n aufeinanderfolgenden Thw mit zunehmender Folgenzahl ab (Abb. 6.10, Abb. 6.11). Das Maximum wird für die Folgenzahl 1, welche gleichzeitig unabhängige Einzeltiden und damit die Reihe der HThw darstellt, mit einem Trend von 8,1 mm/a erreicht. Alle Trends liegen über dem Trend des MThw = 4,4 mm/a. Trends für Folgenzahlen von 1 und 2 liegen über dem Trend der NThw = 6,7 mm/a. Der niedrigste Trend beträgt 4,8 mm/a und wird für 8 aufeinanderfolgende Thw erreicht.

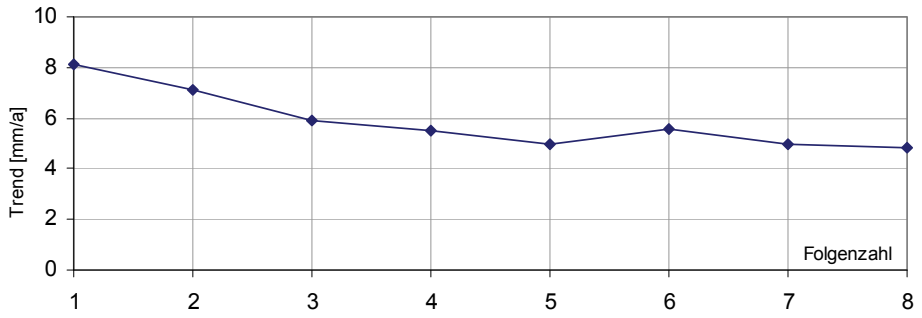


Abb. 6.10: Wittdün 1937-2008, Trendentwicklung max. Basishöhe Thw mit zunehmender Folgezahl

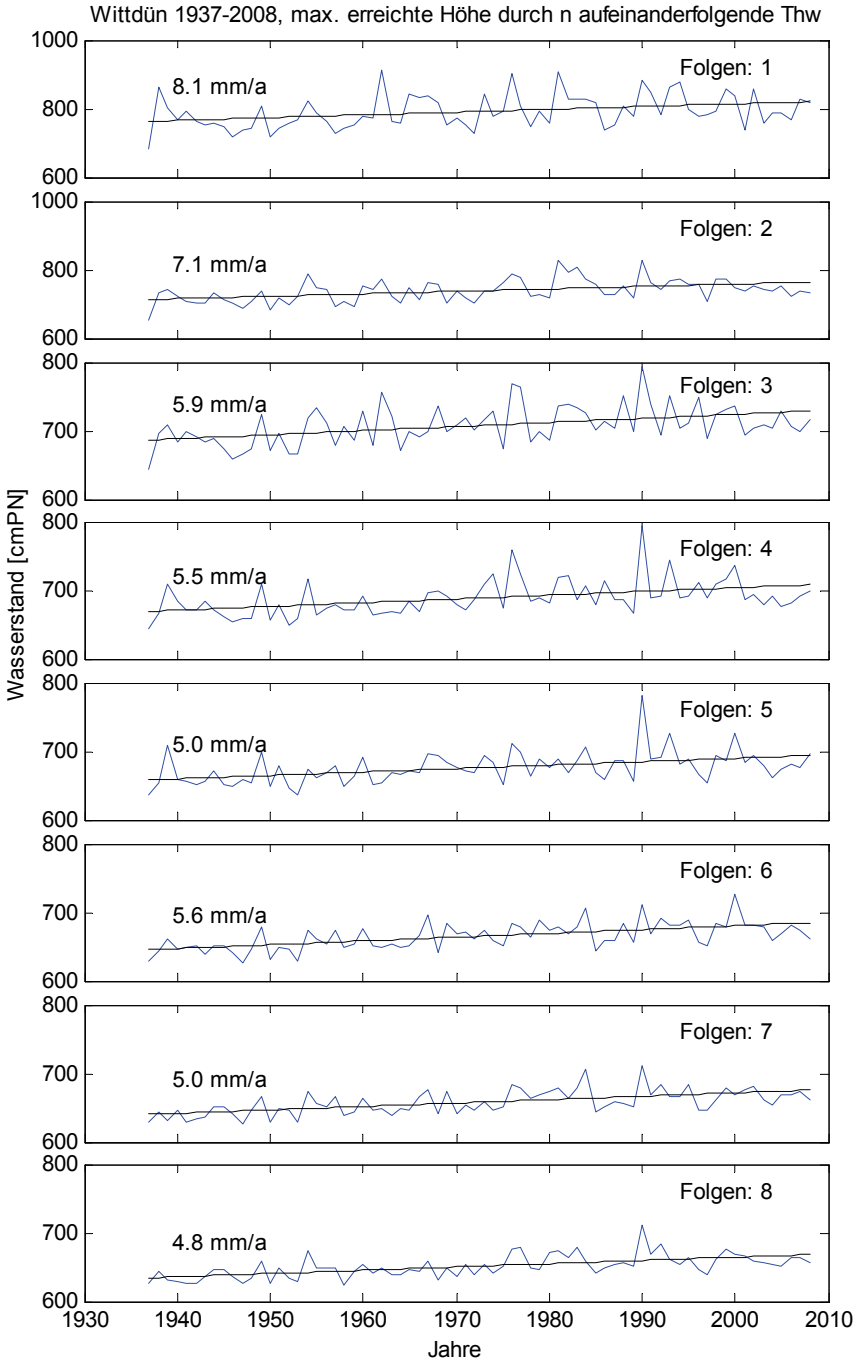


Abb. 6.11: Wittdün 1937-2008, maximal erreichte Basishöhe durch 1-8 aufeinanderfolgende Thw

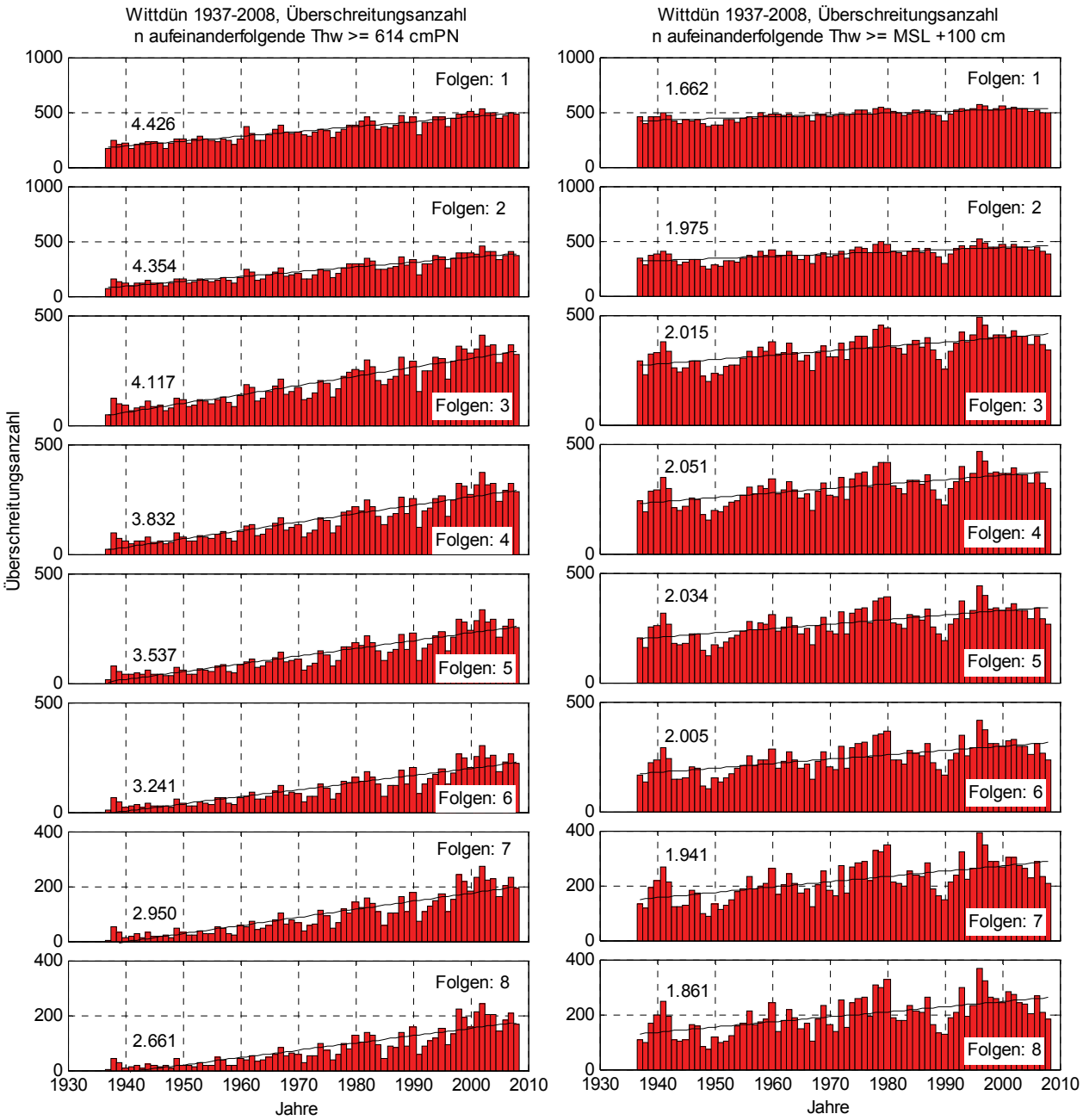


Abb. 6.12: Wittdün 1937-2008, Überschreitungszahlen durch 1-8 aufeinanderfolgende Thw. Links: ≥ $MThw_{1937\text{-}2008}$ + 0 cm = 614 cm, Rechts: ≥ MSL + 100 cm des jeweiligen Jahres

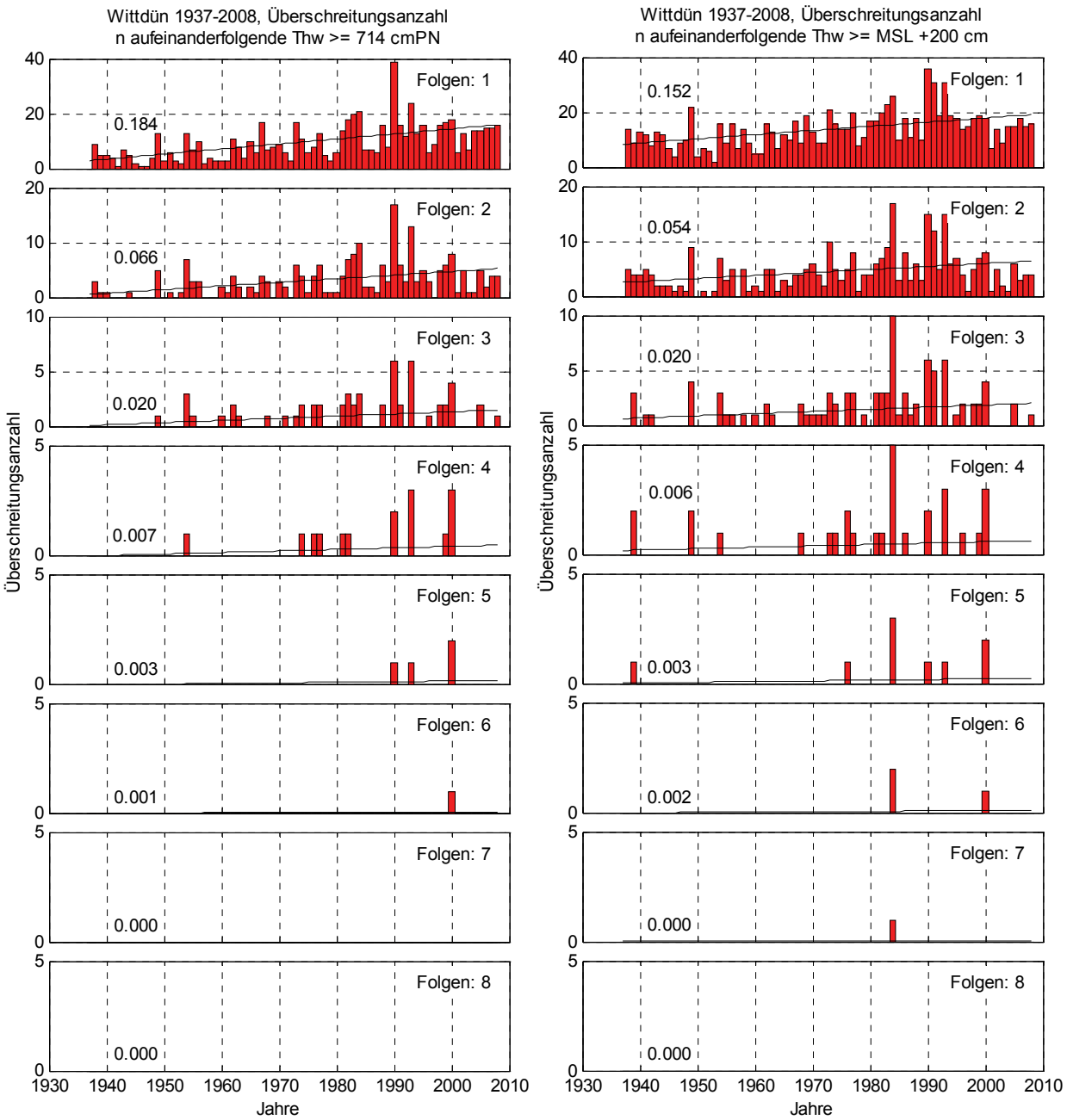


Abb. 6.13: Wittdün 1937-2008, Überschreitungszahlen durch 1-8 aufeinanderfolgende Thw. Links: ≥ $MThw_{1937\text{-}2008}$ + 100 cm = 714 cm, Rechts: ≥ MSL + 200 cm des jeweiligen Jahres

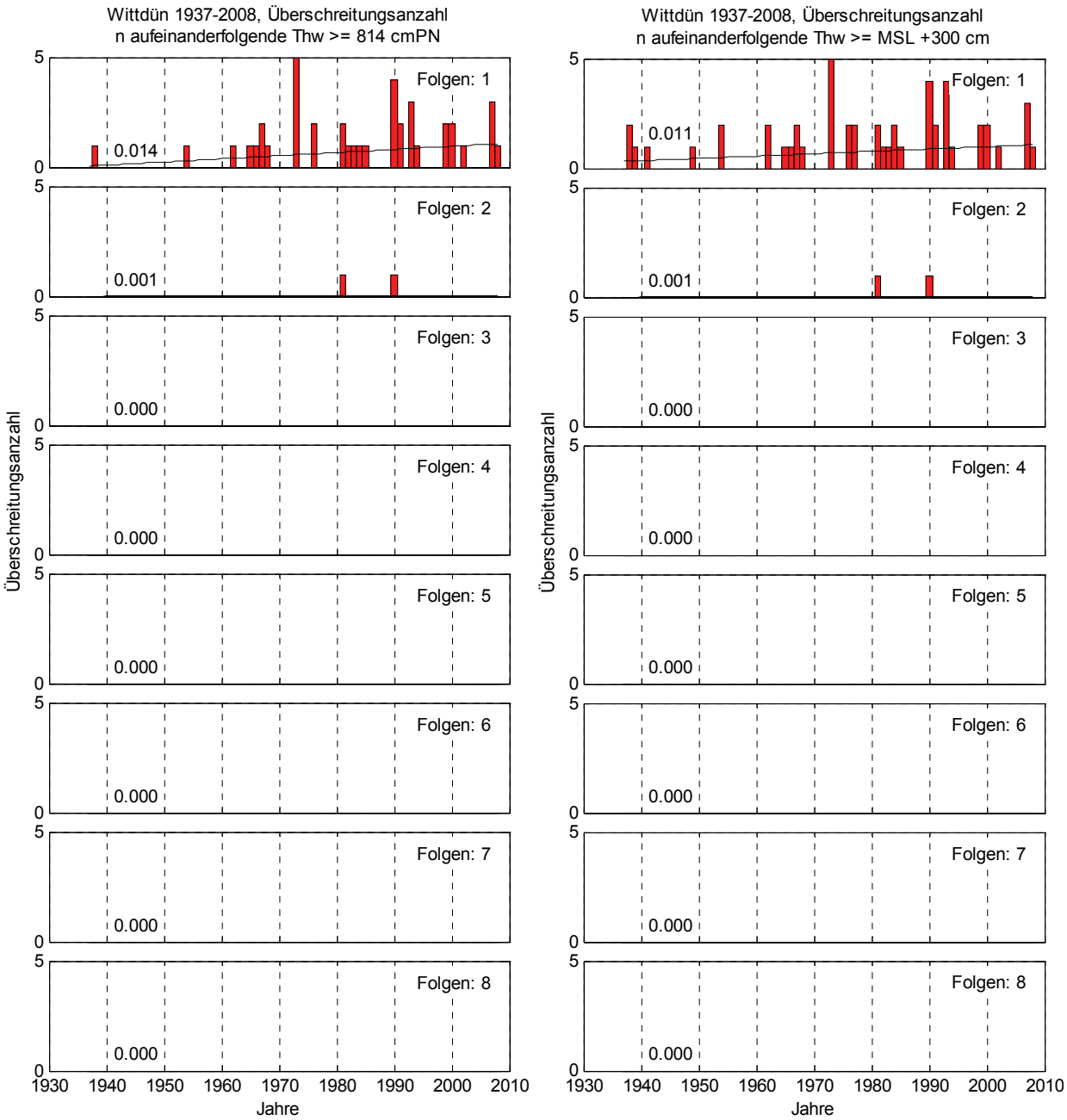


Abb. 6.14: Wittdün 1937-2008, Überschreitungszahlen durch 1-8 aufeinanderfolgende Thw. Links: ≥ $MThw_{1937-2008}$ + 200 cm = 814 cm, Rechts: ≥ MSL + 300 cm des jeweiligen Jahres

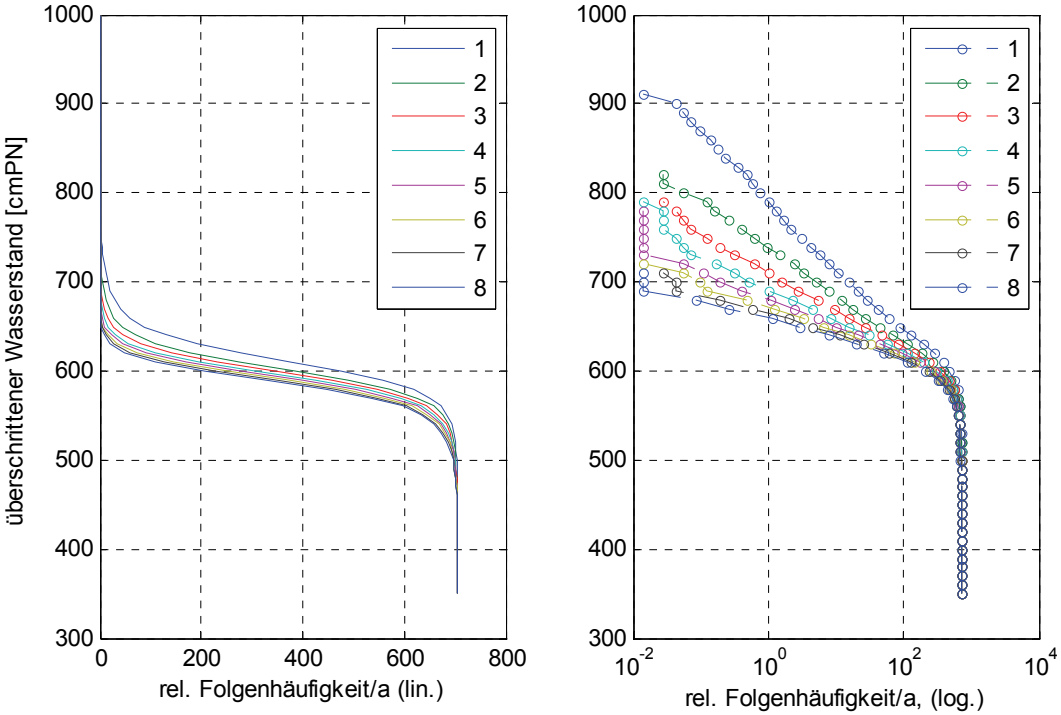


Abb. 6.15: Wittdün 1937-2008, relative Häufigkeiten aufeinanderfolgender Thw

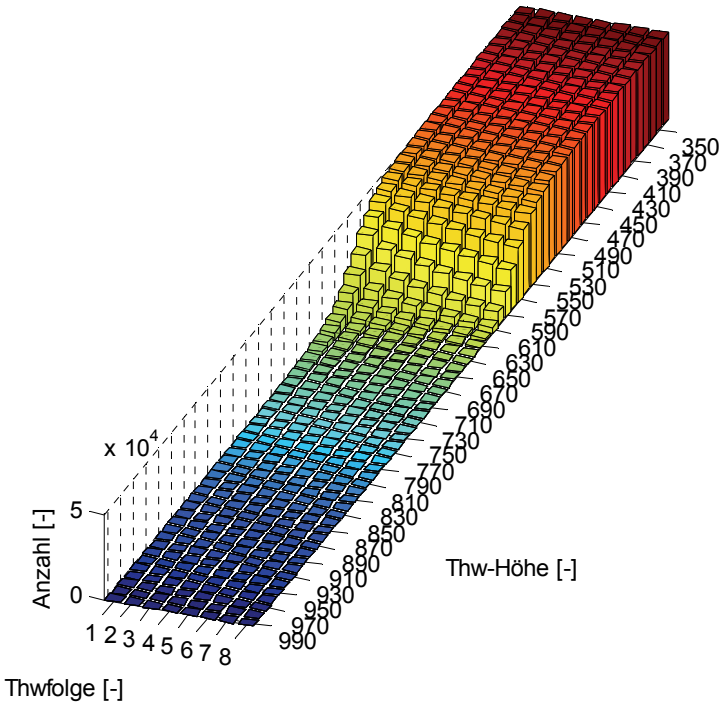


Abb. 6.16: Wittdün 1937-2008, Thw-Folgezahlen

7 Husum

7.1 Tideniedrigwasser

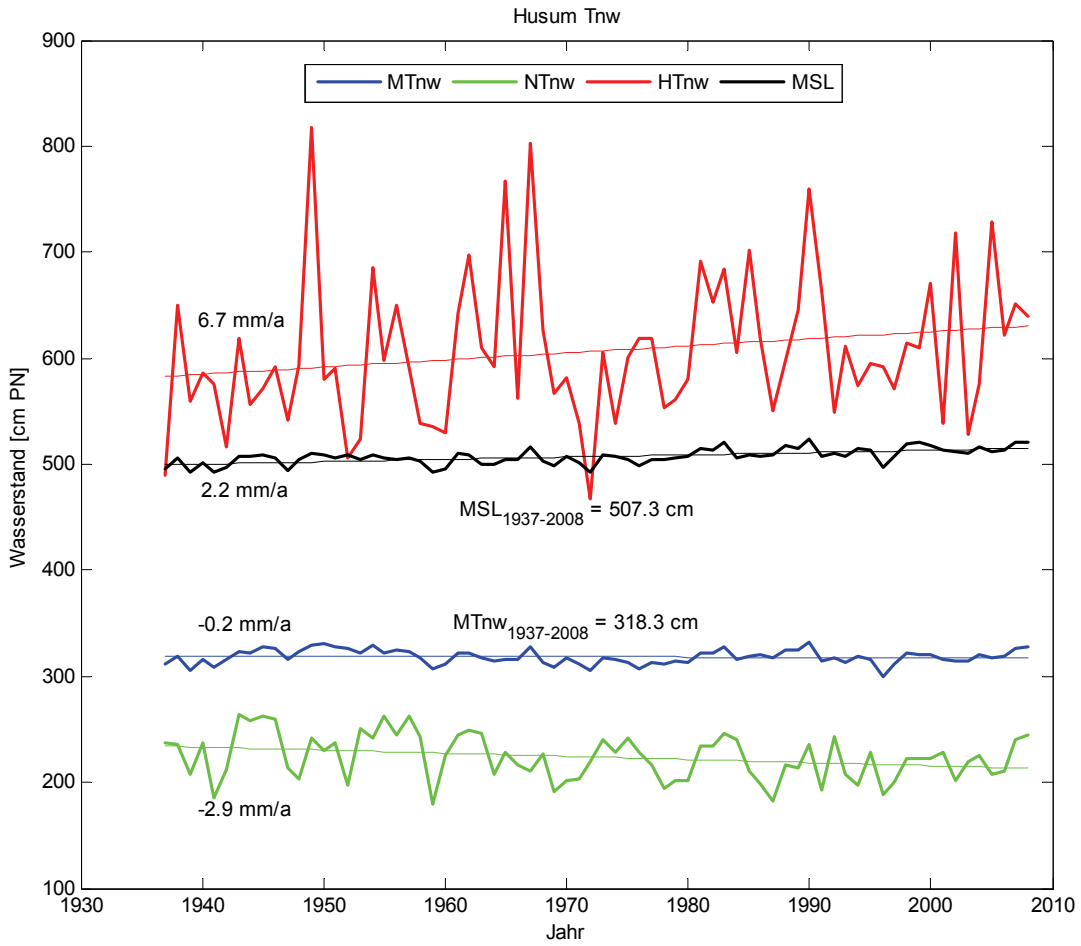


Abb. 7.1: Tnw + MSL Trends Husum 1937 – 2008

Tendenziell nimmt der Trend der maximal erreichten Basishöhe von n aufeinanderfolgenden Tnw mit zunehmender Folgenzahl ab (Abb. 7.2, Abb. 7.3). Das Maximum wird aber bei 3 aufeinanderfolgenden Tnw mit einem Trend von 6,8 mm/a erreicht. Dieser Trend ist größer als der Trend der HTnw = 4,7 mm/a. Alle Trends liegen deutlich über dem Trend des MTnw = -0,2 mm/a. Der niedrigste Trend beträgt 1,6 mm/a und wird für 8 aufeinanderfolgende Tnw erreicht.

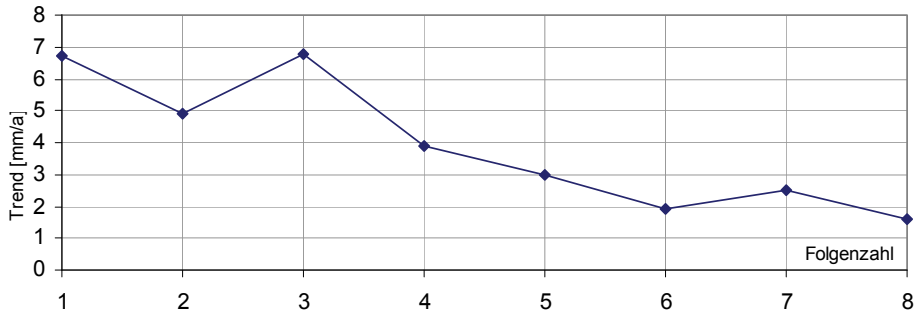


Abb. 7.2: Husum 1937-2008, Trendentwicklung max. Basishöhe Tnw mit zunehmender Folgezahl

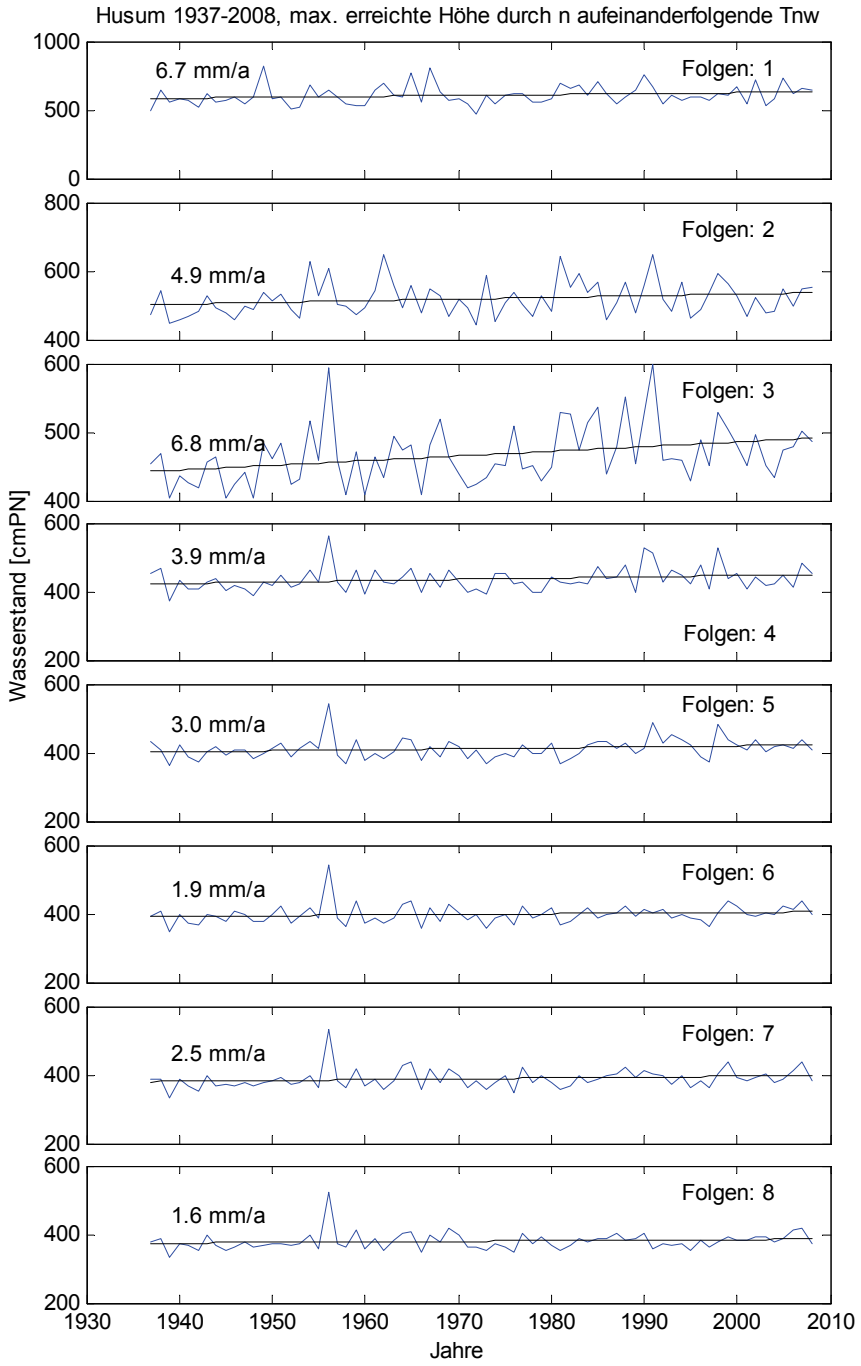


Abb. 7.3: Husum 1937-2008, maximal erreichte Basishöhe durch 1-8 aufeinanderfolgende Tnw

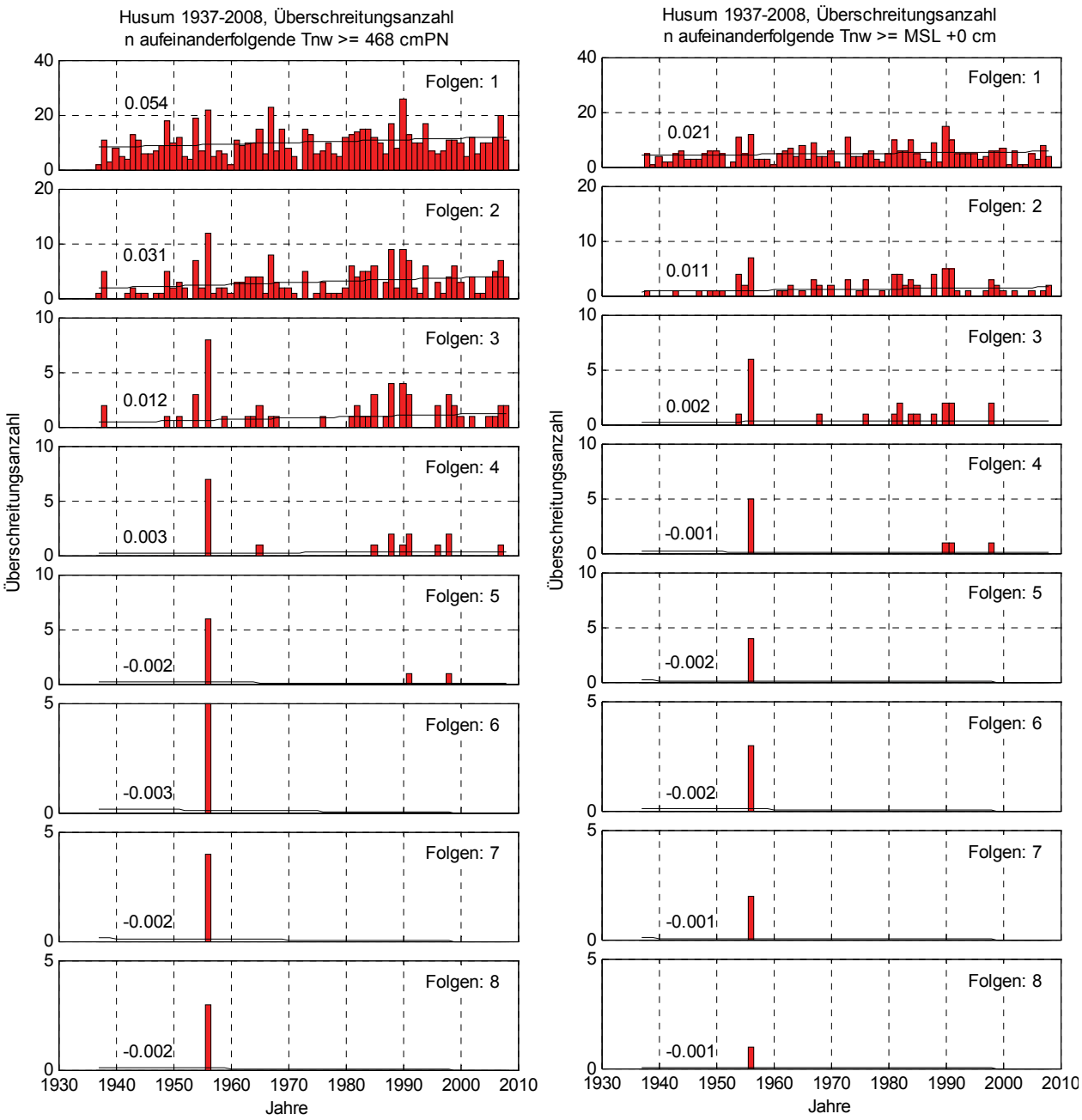


Abb. 7.4: Husum 1937-2008, Überschreitungszahlen durch 1-8 aufeinanderfolgende Tnw. Links: ≥ $MTnw_{1937\text{-}2008}$ + 150 cm = 468 cm, Rechts: ≥ MSL + 0 cm des jeweiligen Jahres

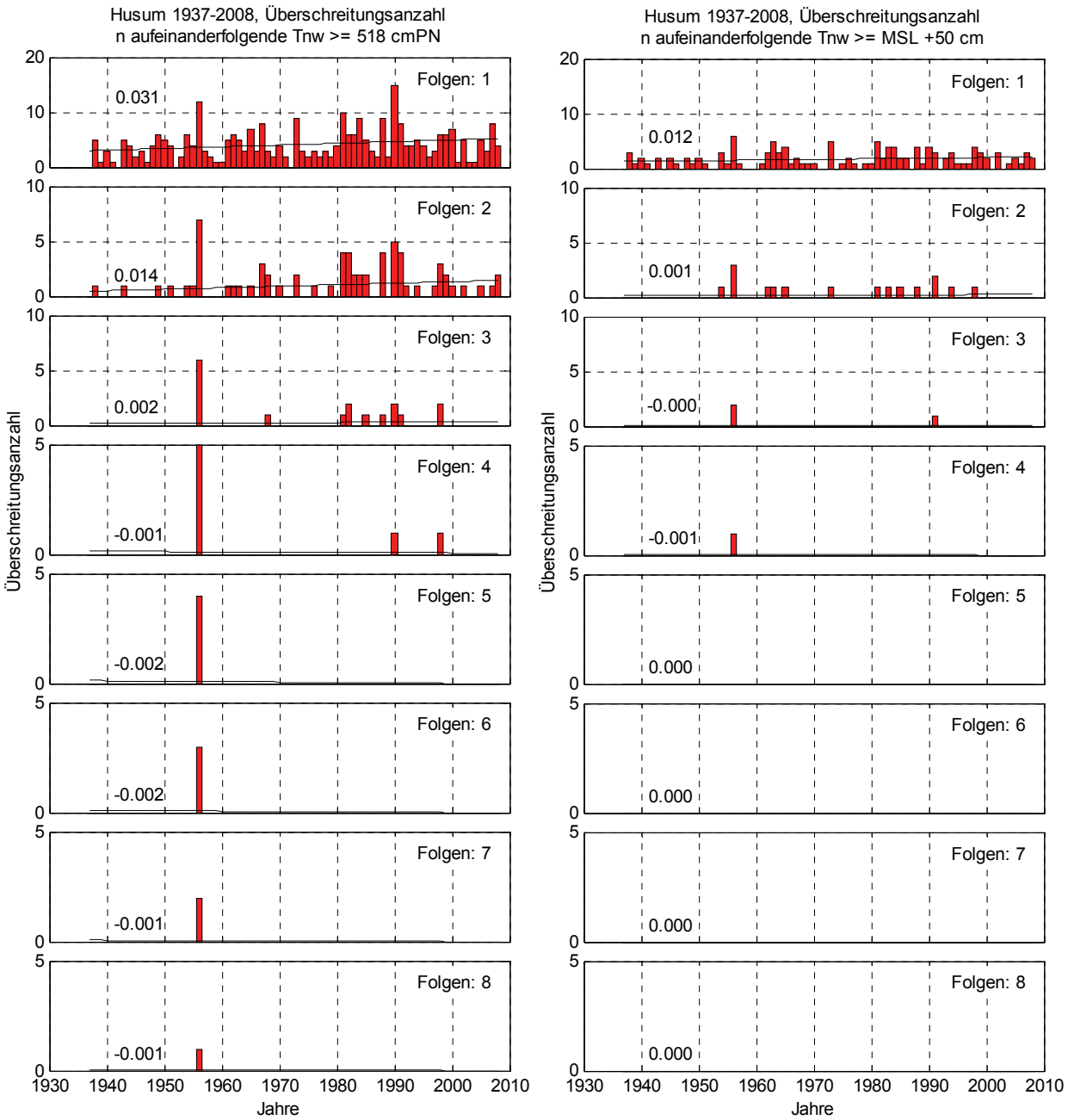


Abb. 7.5: Husum 1937-2008, Überschreitungszahlen durch 1-8 aufeinanderfolgende Tnw. Links: ≥ $MTnw_{1937-2008}$ + 200 cm = 518 cm, Rechts: ≥ MSL + 50 cm des jeweiligen Jahres

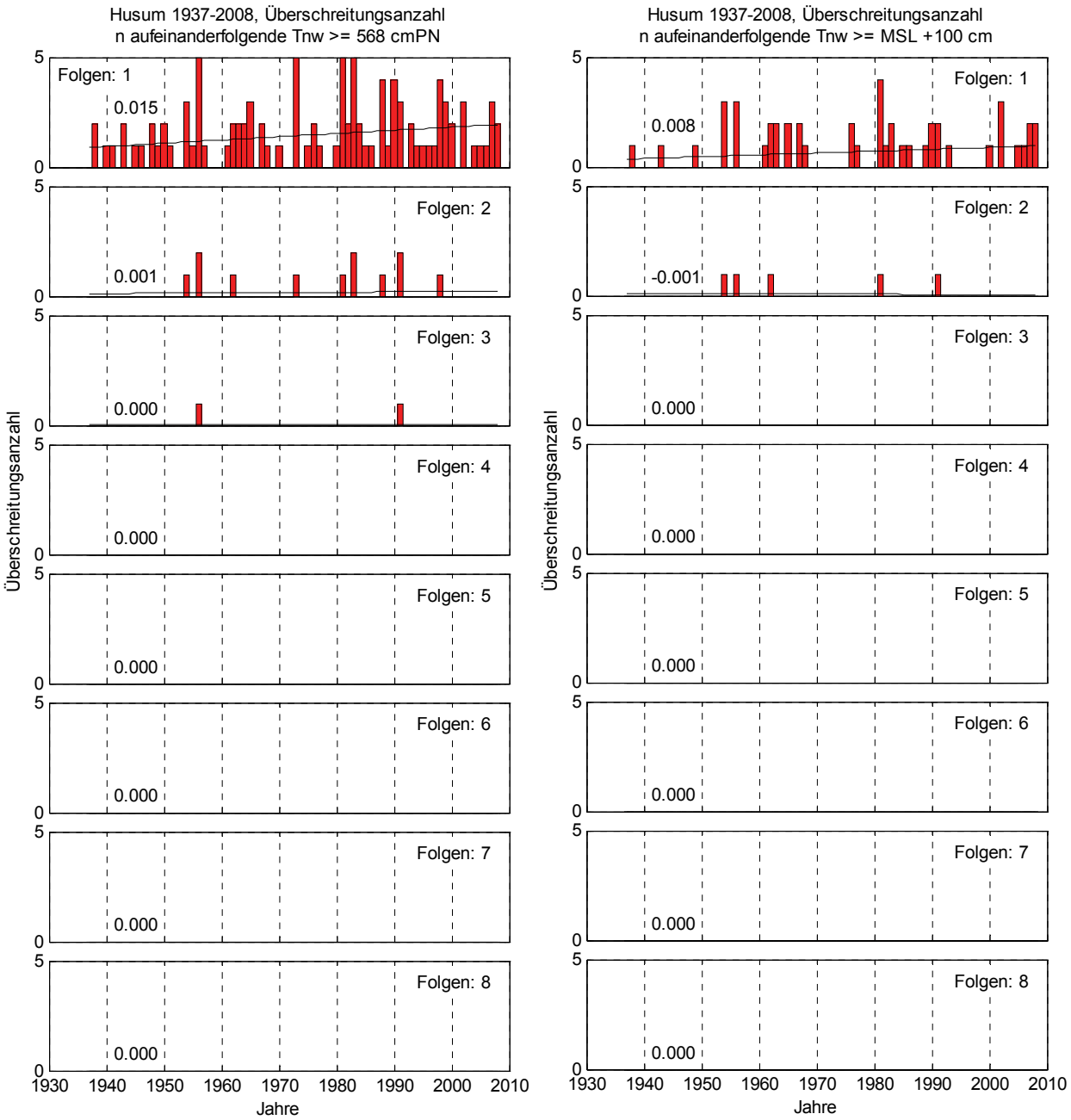


Abb. 7.6: Husum 1937-2008, Überschreitungszahlen durch 1-8 aufeinanderfolgende Tnw. Links: ≥ $MTnw_{1937-2008}$ + 250 cm = 568 cm, Rechts: ≥ MSL + 100 cm des jeweiligen Jahres

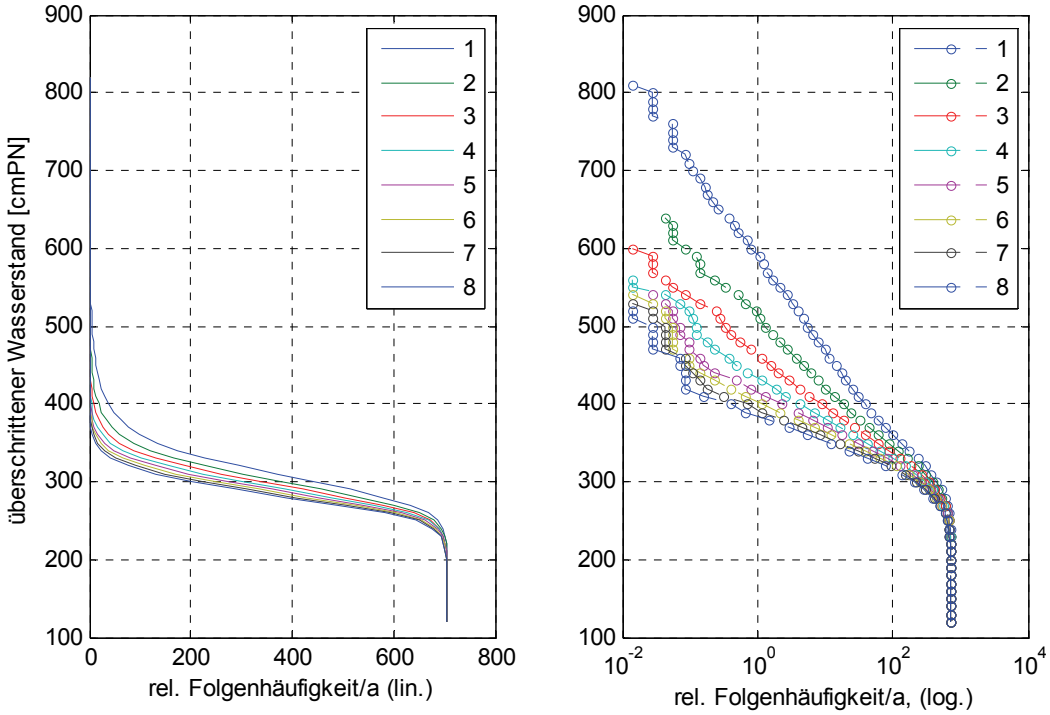


Abb. 7.7: Husum 1937-2008, relative Häufigkeiten aufeinanderfolgender Tnw

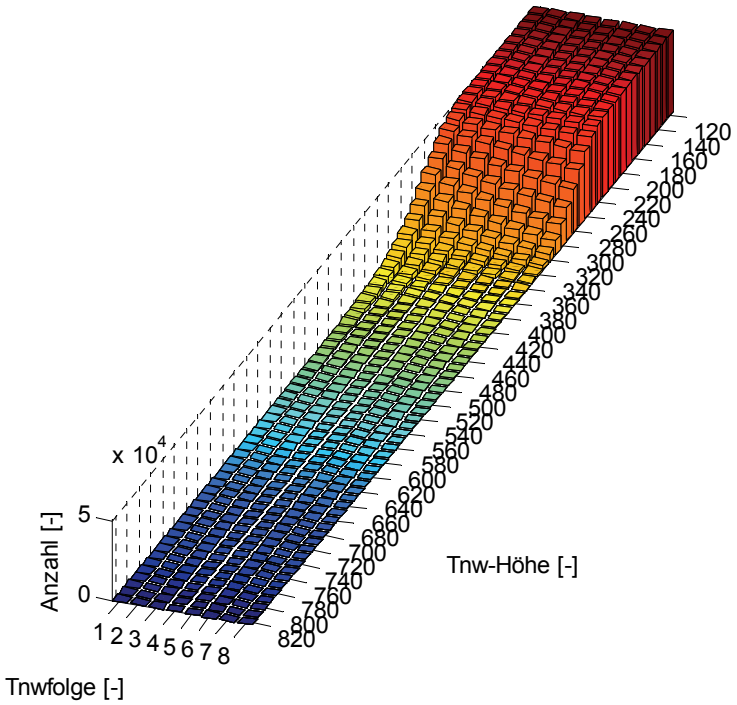


Abb. 7.8: Husum 1937-2008, Tnw-Folgezahlen

7.2 Tidehochwasser

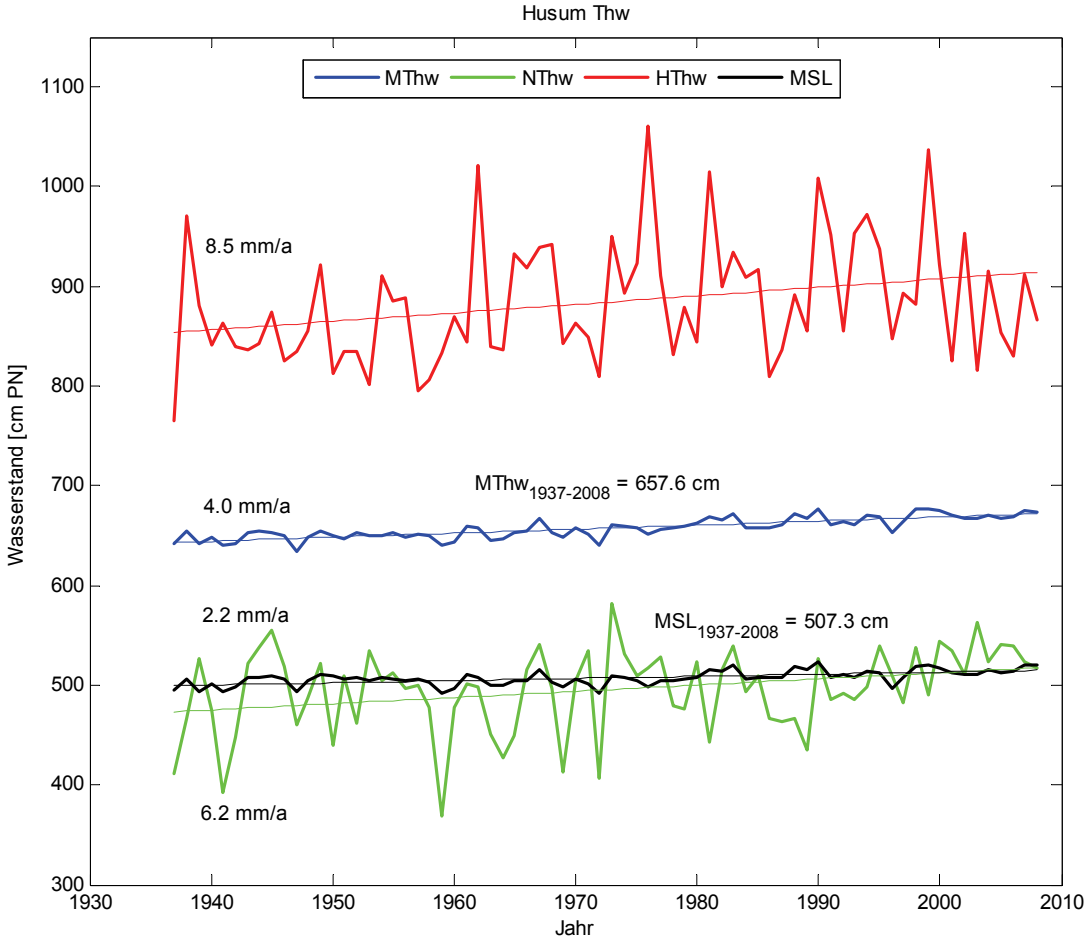


Abb. 7.9: Thw + MSL Trends Husum 1937 – 2008

Tendenziell nimmt der Trend der maximal erreichten Basishöhe von n aufeinanderfolgenden Thw mit zunehmender Folgenzahl ab (Abb. 7.10, Abb. 7.11). Allerdings weisen die Folgenzahlen 1 und 2 den gleichen Trend von 8,5 mm/a auf, welcher auch den maximalen Wert darstellt. Nach Folgezahl 2 fallen die Trends ab, um bei gering fallender Tendenz zwischen rund 6 mm/a bis 4 mm/a zu verlaufen. Alle Trends liegen über dem Trend des MThw = 4,0 mm/a. Der niedrigste Trend beträgt 4,2 mm/a und wird für 8 aufeinanderfolgende Thw erreicht.

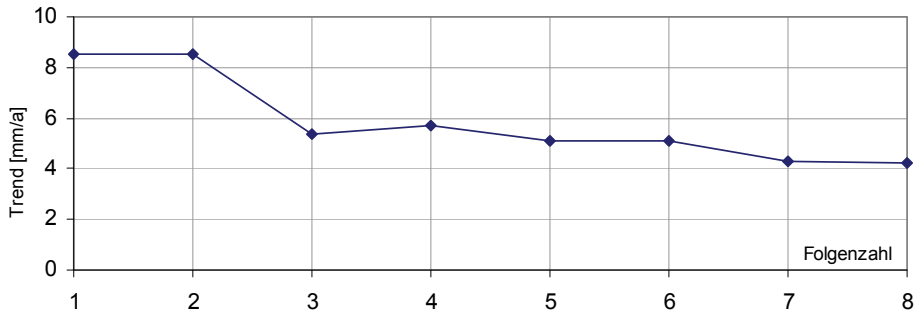


Abb. 7.10: Husum 1937-2008, Trendentwicklung max. Basishöhe Thw mit zunehmender Folgezahl

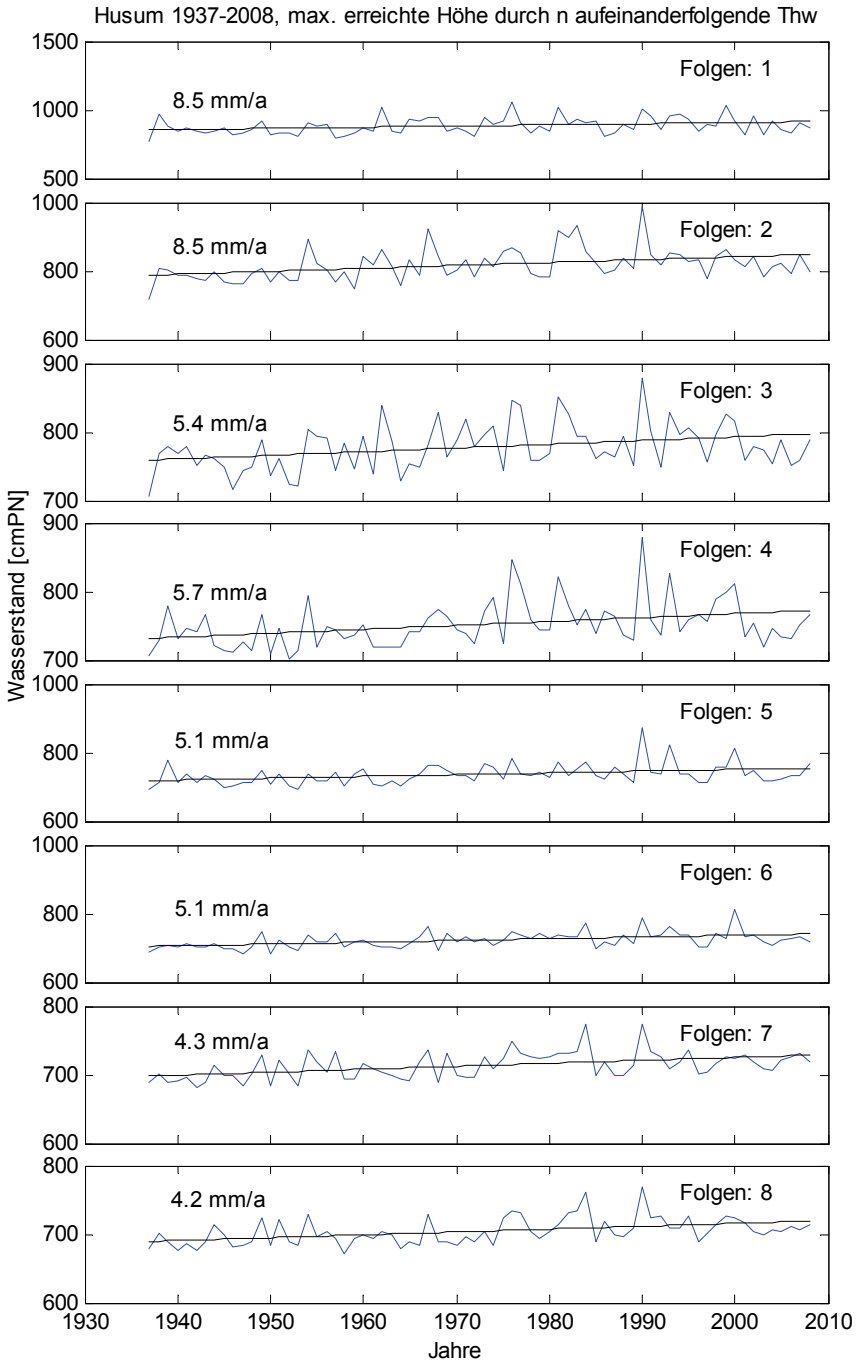


Abb. 7.11: Husum 1937-2008, maximal erreichte Basishöhe durch 1-8 aufeinanderfolgende Thw

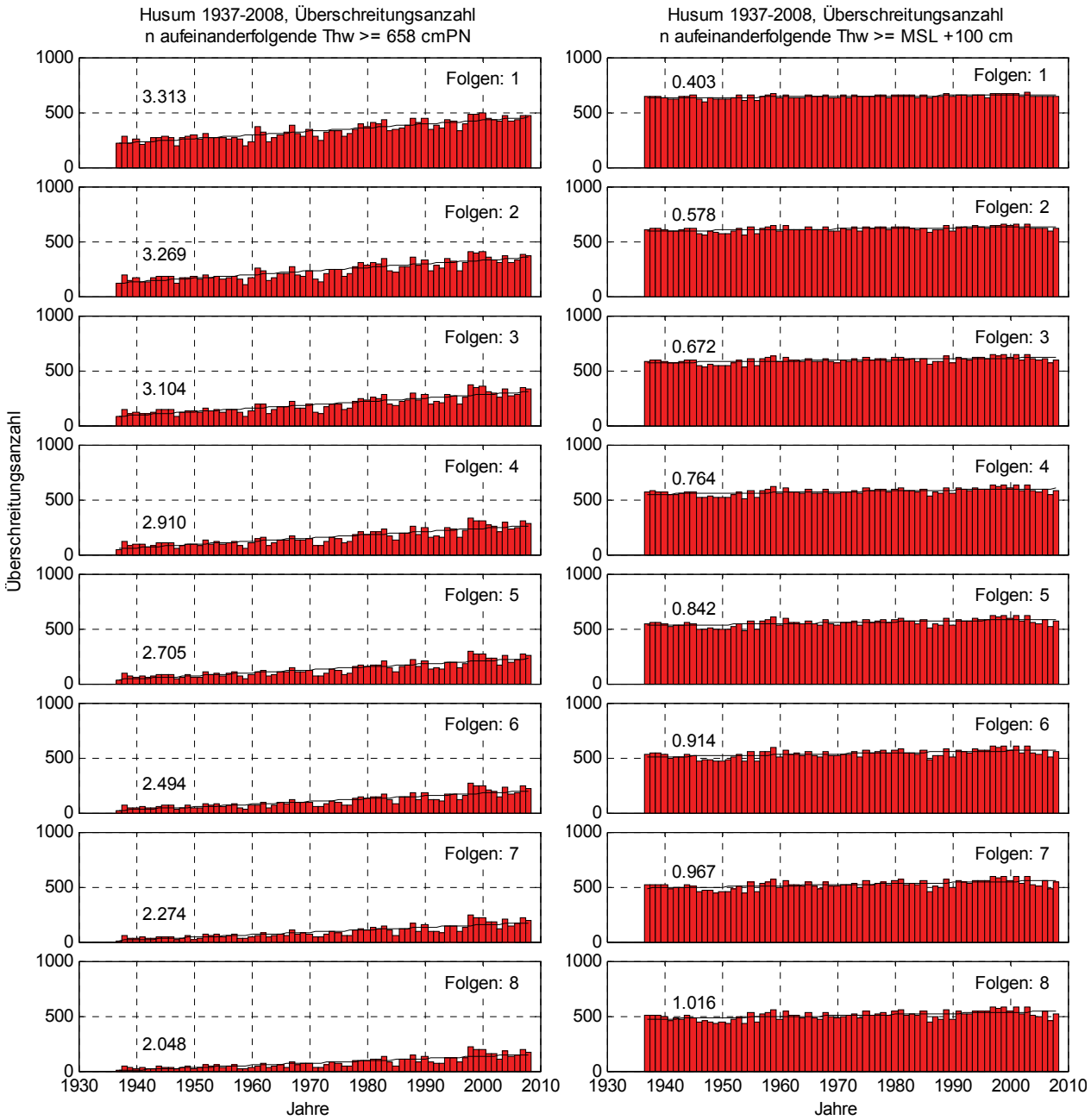


Abb. 7.12: Husum 1937-2008, Überschreitungszahlen durch 1-8 aufeinanderfolgende Thw. Links: ≥ $MThw_{1937\text{-}2008}$ + 0 cm = 658 cm, Rechts: ≥ MSL + 100 cm des jeweiligen Jahres

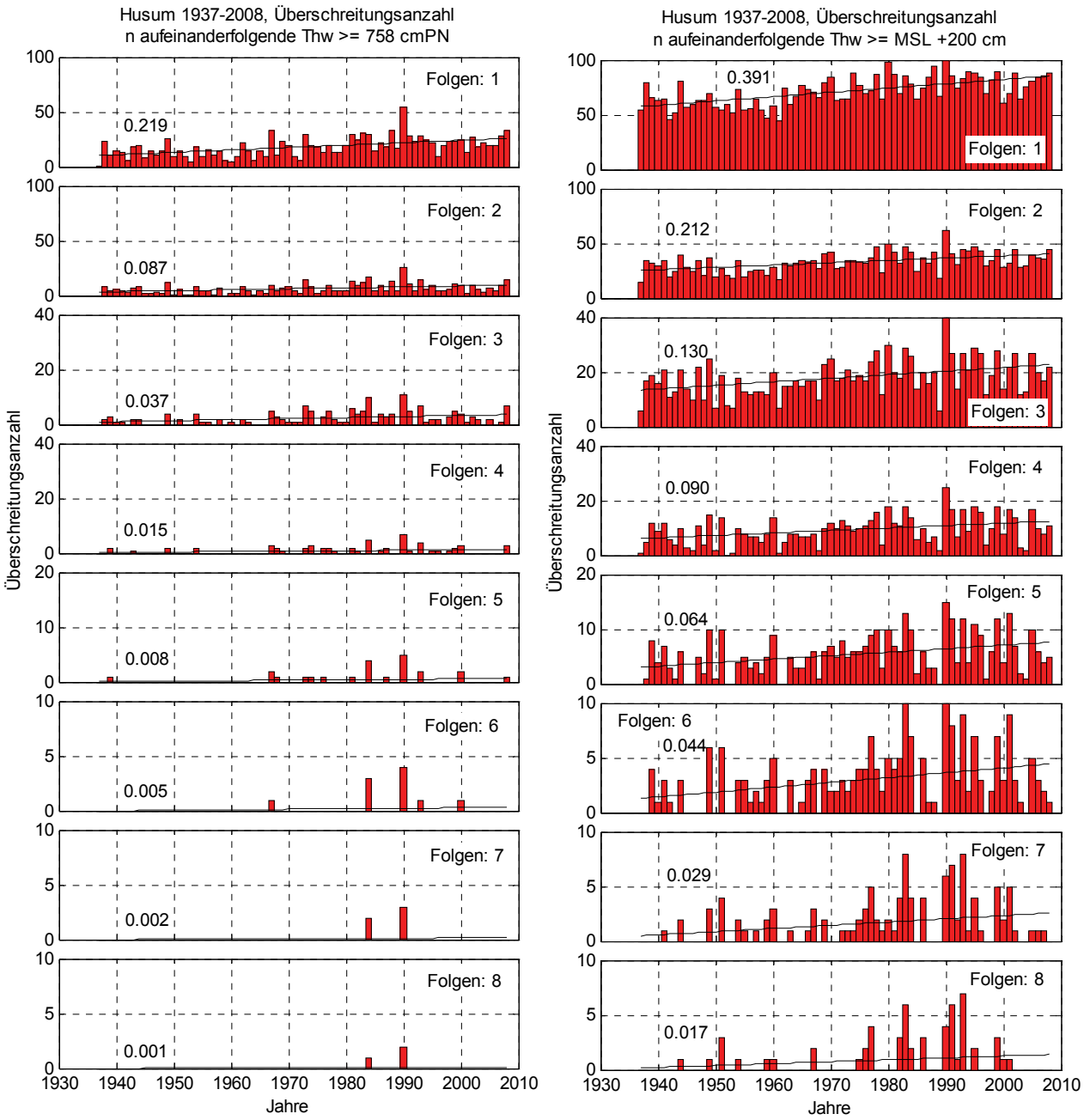


Abb. 7.13: Husum 1937-2008, Überschreitungszahlen durch 1-8 aufeinanderfolgende Thw. Links: $\geq MThw_{1937\text{-}2008} + 100$ cm = 758 cm, Rechts: ≥ MSL + 200 cm des jeweiligen Jahres

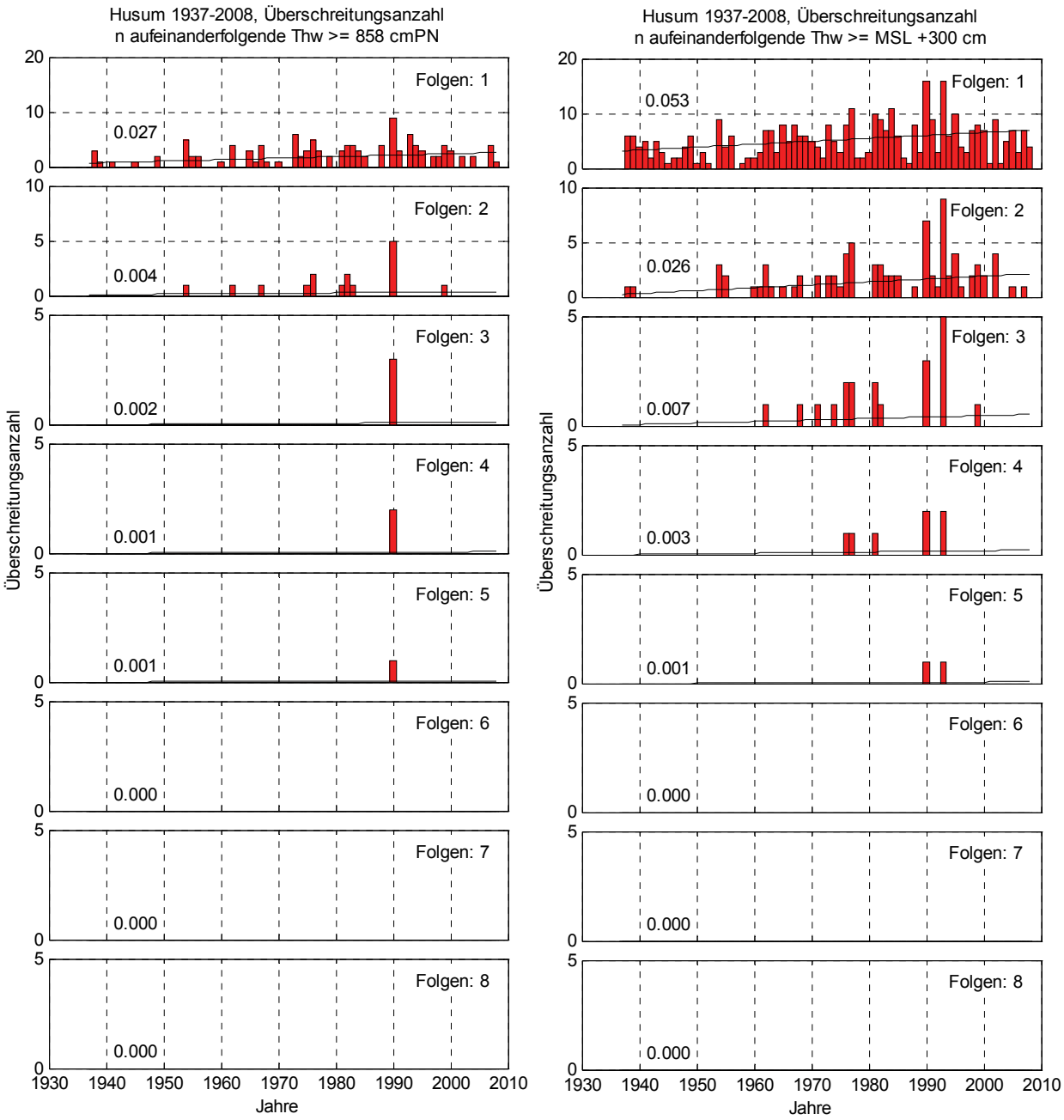


Abb. 7.14: Husum 1937-2008, Überschreitungszahlen durch 1-8 aufeinanderfolgende Thw. Links: ≥ $MThw_{1937\text{-}2008}$ + 200 cm = 858 cm, Rechts: ≥ MSL + 300 cm des jeweiligen Jahres

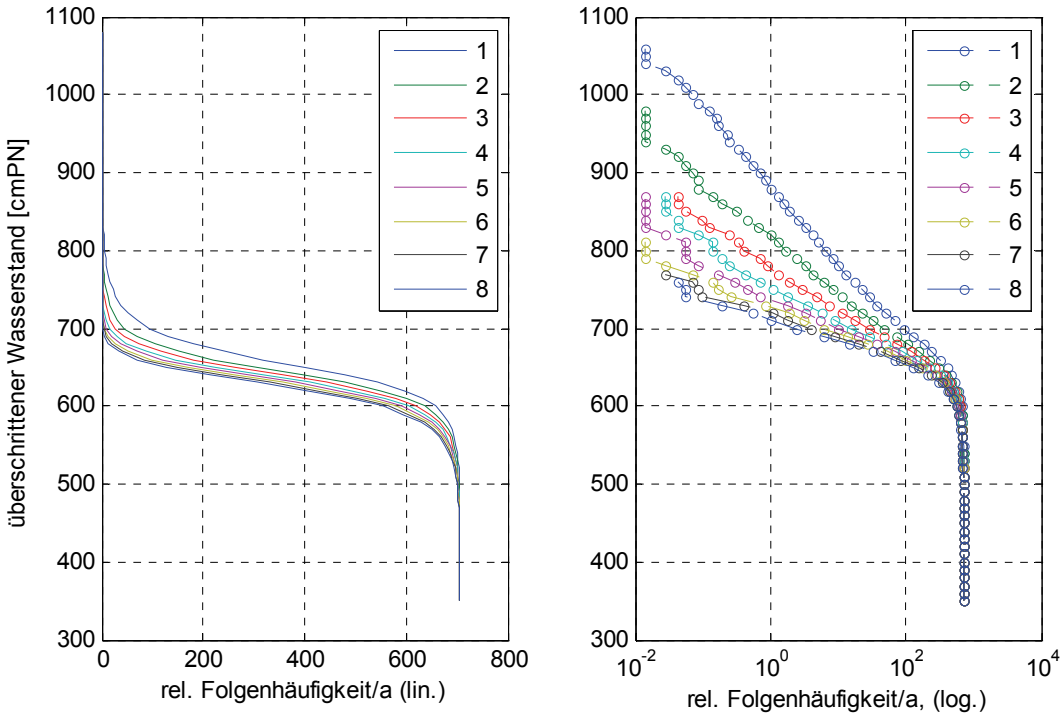


Abb. 7.15: Husum 1937-2008, relative Häufigkeiten aufeinanderfolgender Thw

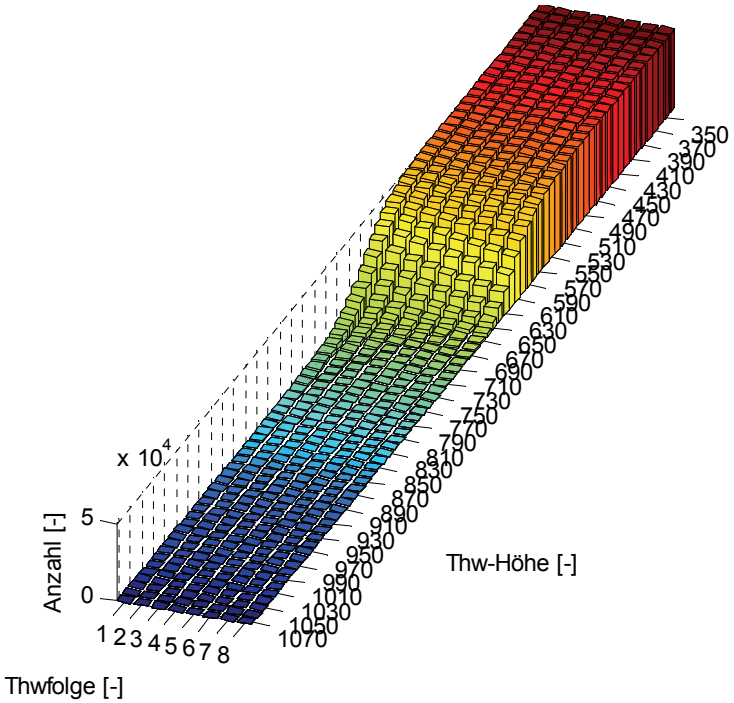


Abb. 7.16: Husum 1937-2008, Thw-Folgezahlen

8 Helgoland

8.1 Tideniedrigwasser

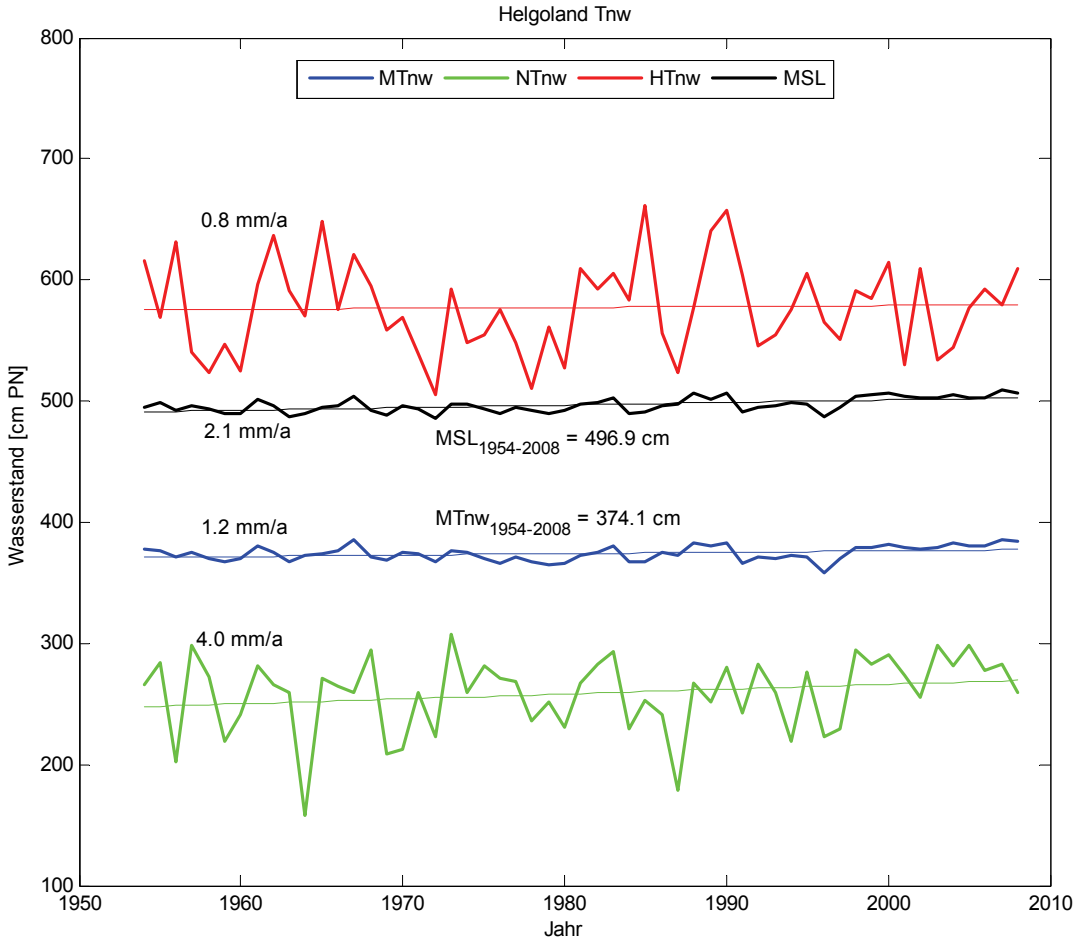


Abb. 8.1: Tnw + MSL Trends Helgoland 1954 – 2008

Die Trendentwicklung der maximalen Basishöhe der Tnw-Ketten zeigt für Helgoland einen zunächst niedrigen Verlauf für Folgenzahlen 1 und 2, dann einen hohen Verlauf für mittlere Folgenzahlen von 3 bis 5 aufeinanderfolgende Tiden und schließlich wieder ein mit weiter zunehmender Folgenzahl abnehmenden Verlauf (Abb. 8.2, Abb. 8.3). Das Maximum wird bei 3 aufeinanderfolgenden Tnw mit einem Trend von 4,4 mm/a erreicht. Dieser Trend ist größer als der Trend der NTnw = 4,0 mm/a. Bis auf die Folgenzahlen 1 und 2, welche mit einem Trend von 0,8 mm/a und 0,3 mm/a die niedrigsten Trends darstellen, liegen alle weiteren Trends über dem Trend des MTnw = 1,2 mm/a.

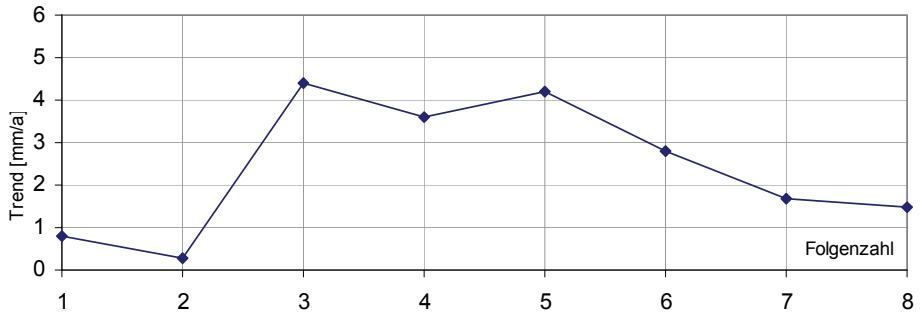


Abb. 8.2: Helgoland 1954-2008, Trendentwicklung max. Basishöhe Tnw mit zunehmender Folgezahl

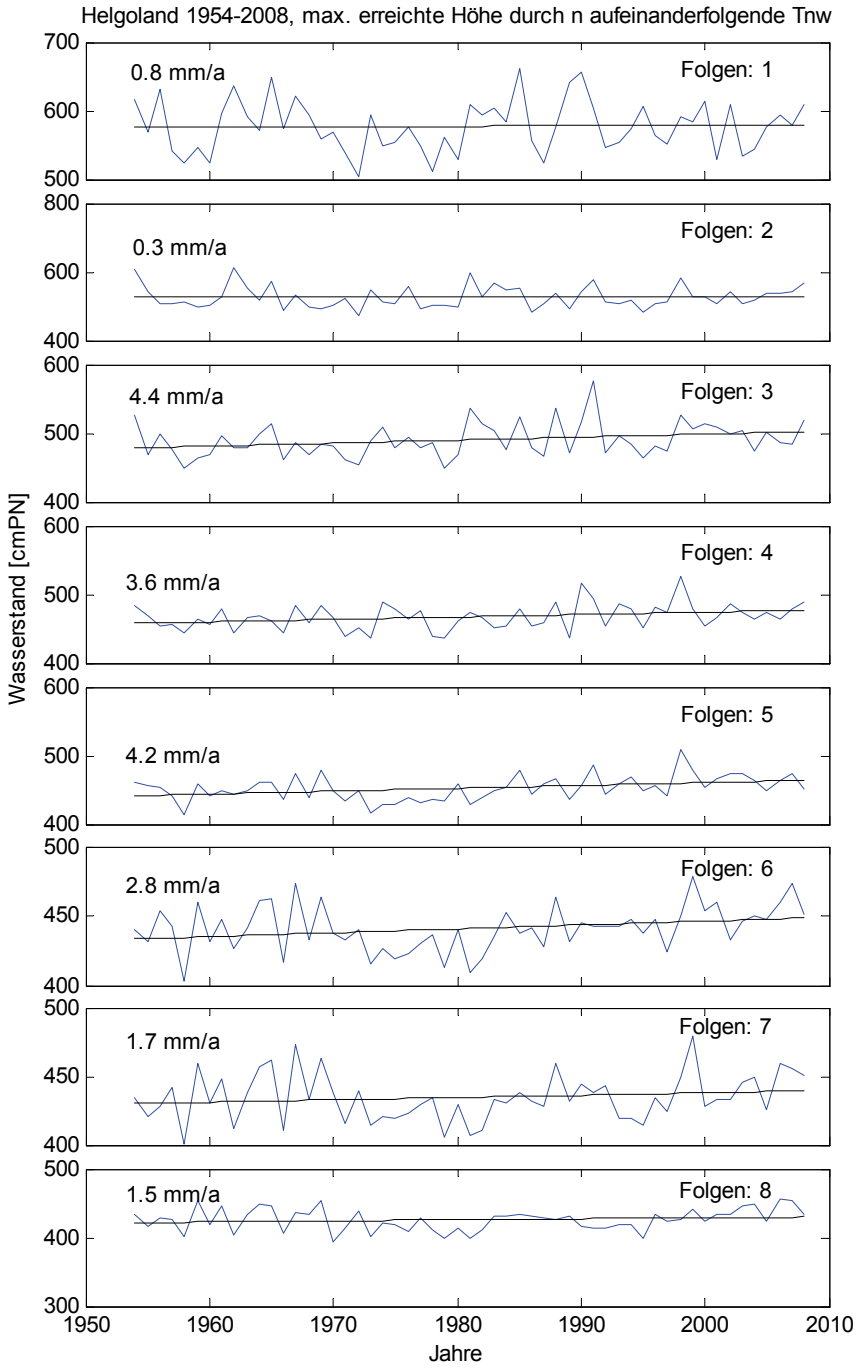


Abb. 8.3: Helgoland 1954-2008, maximal erreichte Basishöhe durch 1-8 aufeinanderfolgende Tnw

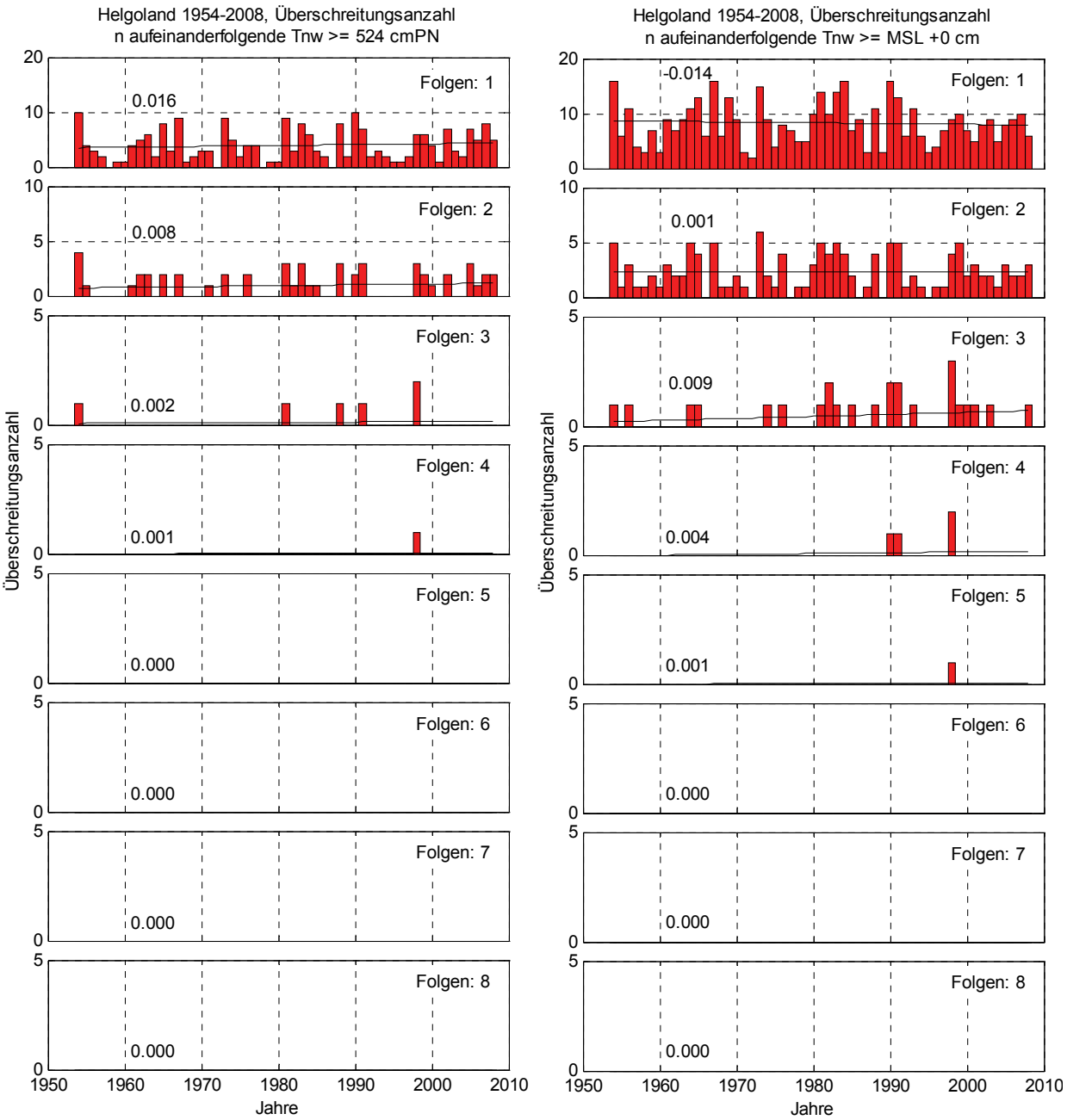


Abb. 8.4: Helgoland 1954-2008, Überschreitungszahlen durch 1-8 aufeinanderfolgende Tnw. Links: ≥ $MTnw_{1954\text{-}2008}$ + 150 cm = 524 cm, Rechts: ≥ MSL + 0 cm des jeweiligen Jahres

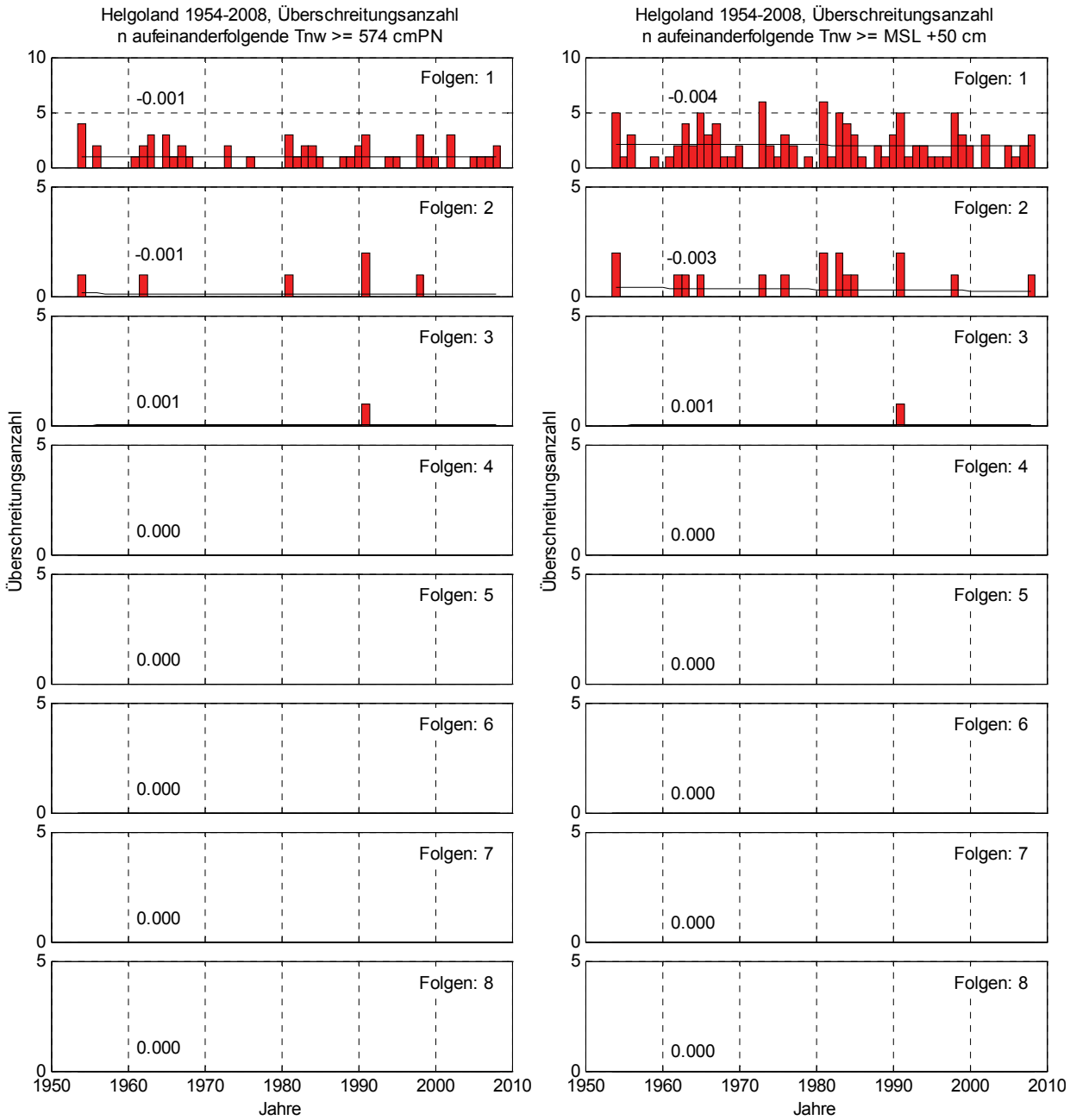


Abb. 8.5: Helgoland 1954-2008, Überschreitungszahlen durch 1-8 aufeinanderfolgende Tnw. Links: ≥ $MTnw_{1954\text{-}2008}$ + 200 cm = 574 cm, Rechts: ≥ MSL + 50 cm des jeweiligen Jahres

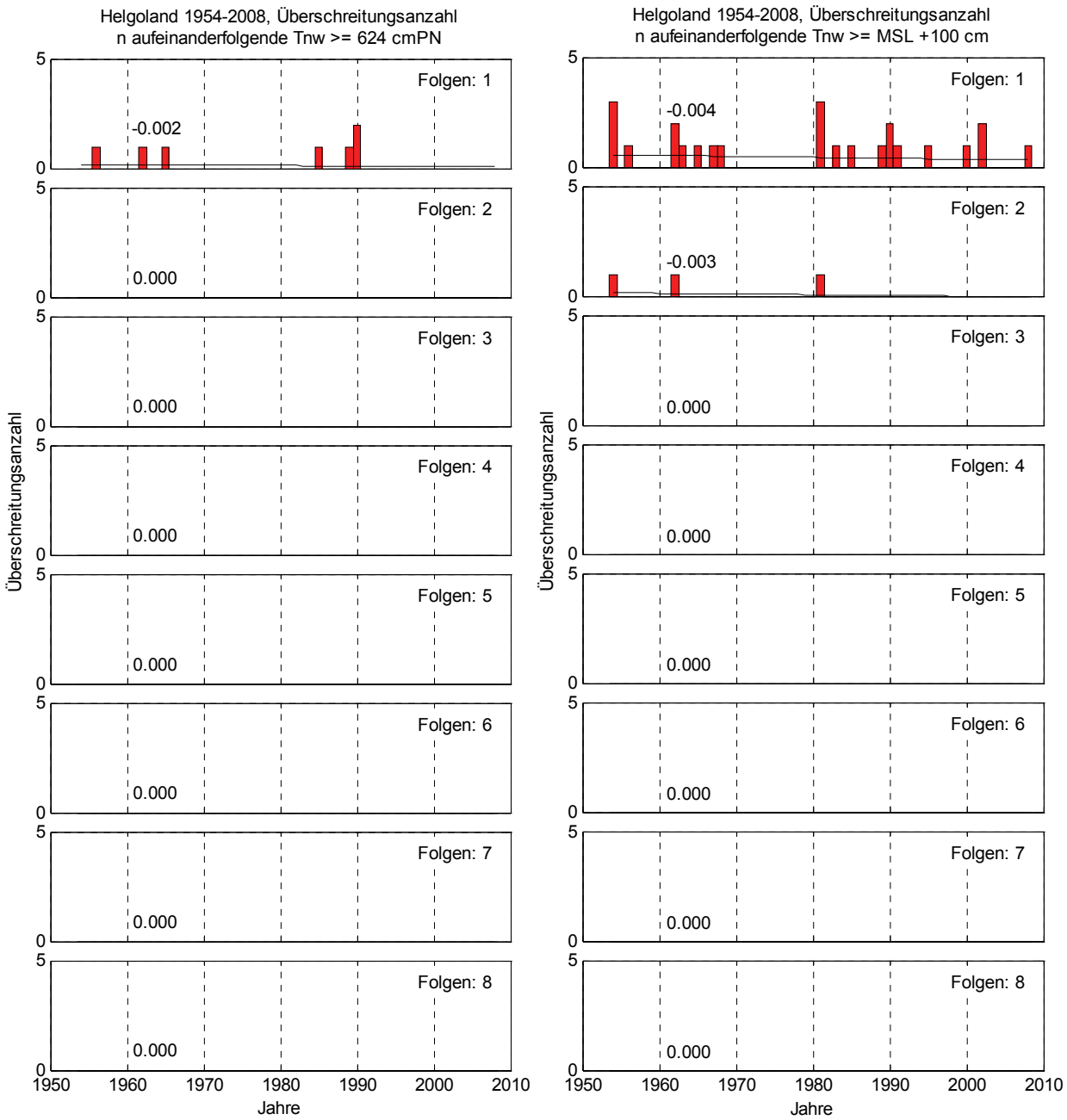


Abb. 8.6: Helgoland 1954-2008, Überschreitungszahlen durch 1-8 aufeinanderfolgende Tnw. Links: ≥ $MTnw_{1954\text{-}2008}$ + 250 cm = 624 cm, Rechts: ≥ MSL + 100 cm des jeweiligen Jahres

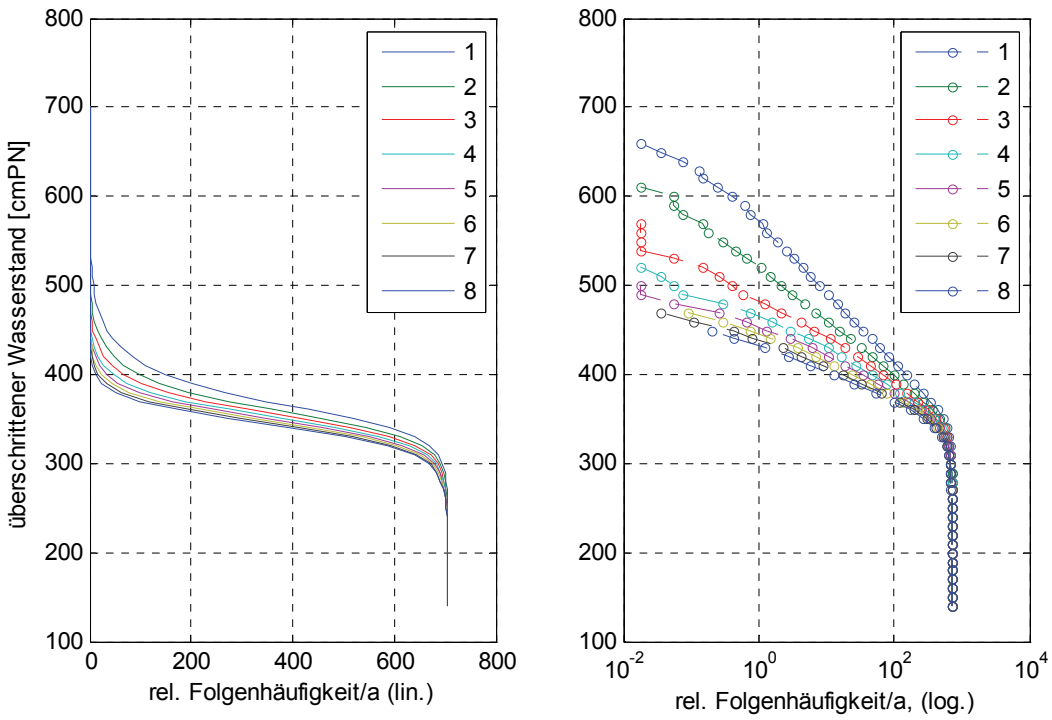


Abb. 8.7: Helgoland 1954-2008, relative Häufigkeiten aufeinanderfolgender Tnw

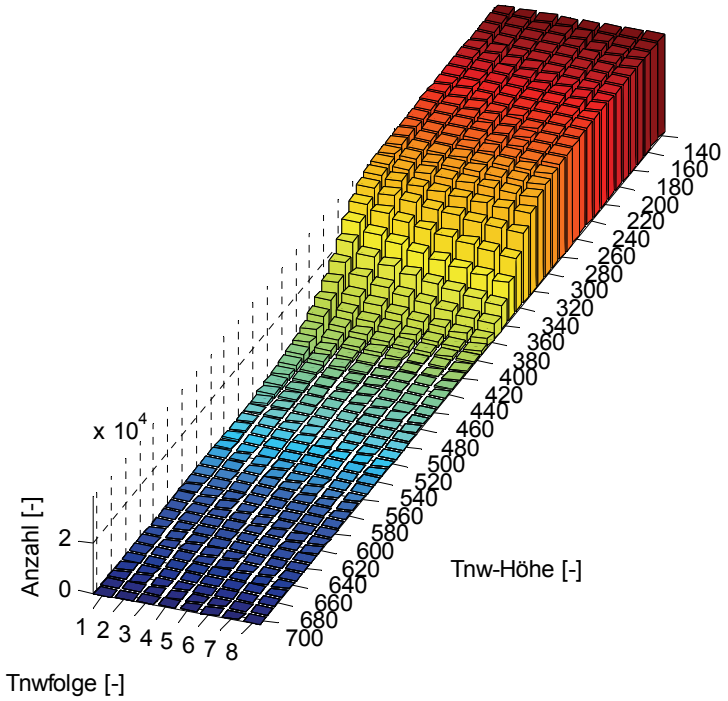


Abb. 8.8: Helgoland 1954-2008, Tnw-Folgezahlen

8.2 Tidehochwasser

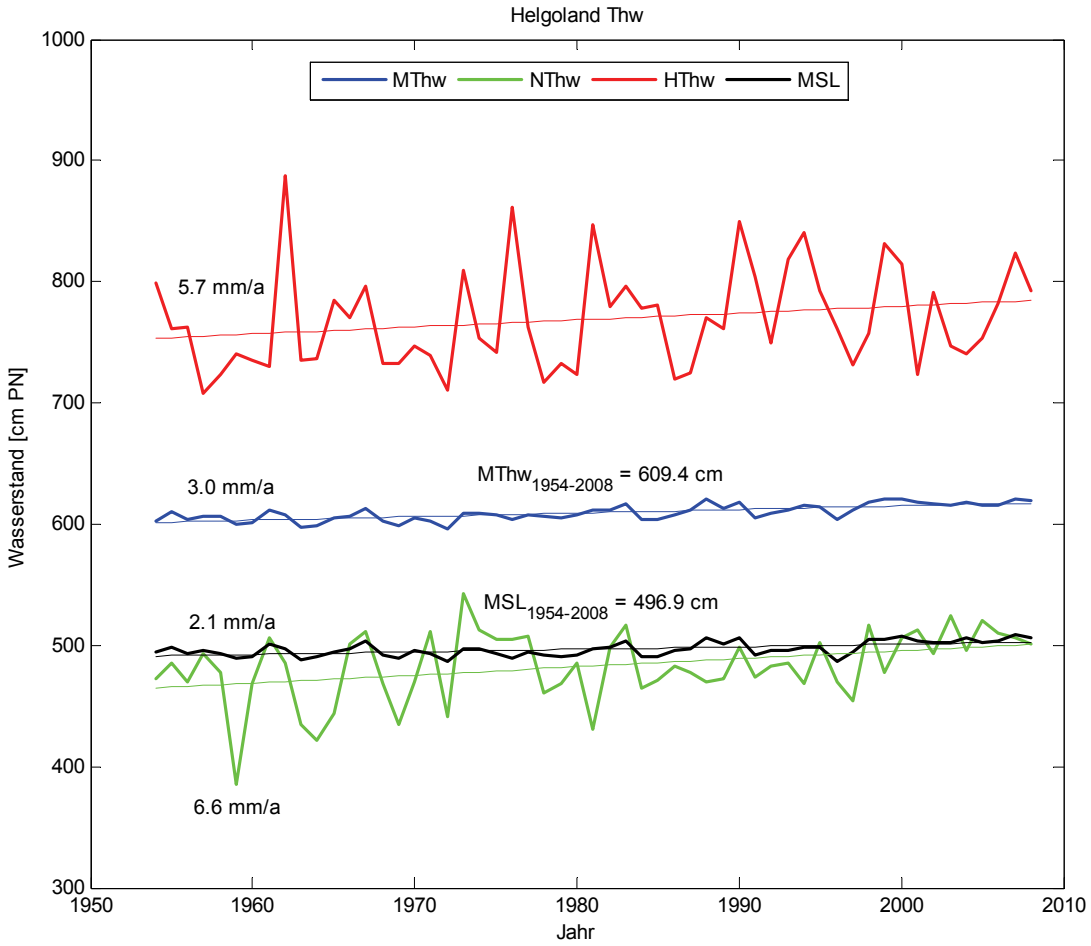


Abb. 8.9: Thw + MSL Trends Helgoland 1954 – 2008

Tendenziell nimmt der Trend der maximal erreichten Basishöhe von n aufeinanderfolgenden Thw mit zunehmender Folgenzahl ab (Abb. 8.10, Abb. 8.11). Der Abfall ist dabei von Folgenzahl 1 bis 3 am größten, um dann zwischen Folge 3 und Folge 8 auf nahezu gleichbleibendem Trend von etwa 2 mm/a zu verbleiben. Das Maximum wird für die Folgenzahl 1, welche gleichzeitig unabhängige Einzeltiden und damit die Reihe der HThw darstellt, mit einem Trend von 5,7 mm/a erreicht. Bis auf die Folgezahl 1 mit 5,7 mm/a und die Folgezahl 2, für die der Trend mit 3,0 mm/a gleichauf mit dem Trend des MThw liegt, verlaufen die Trends aller übrigen Folgezahlen unter dem Trend des MThw. Der niedrigste Trend beträgt 1,5 mm/a und wird für 7 aufeinanderfolgende Thw erreicht.

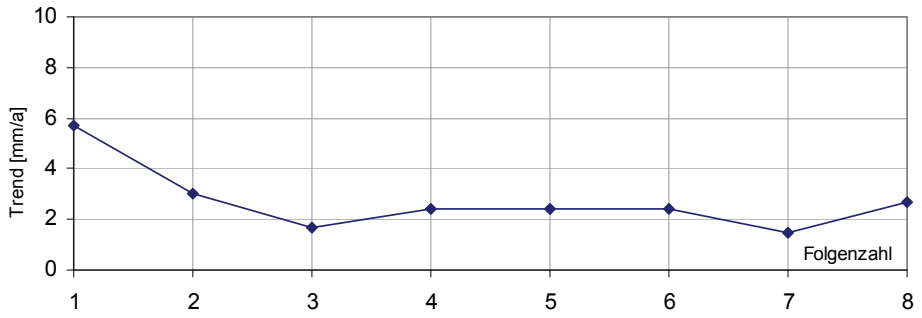


Abb. 8.10: Helgoland 1937-2008, Trendentwicklung max. Basishöhe Thw mit zunehmender Folgezahl

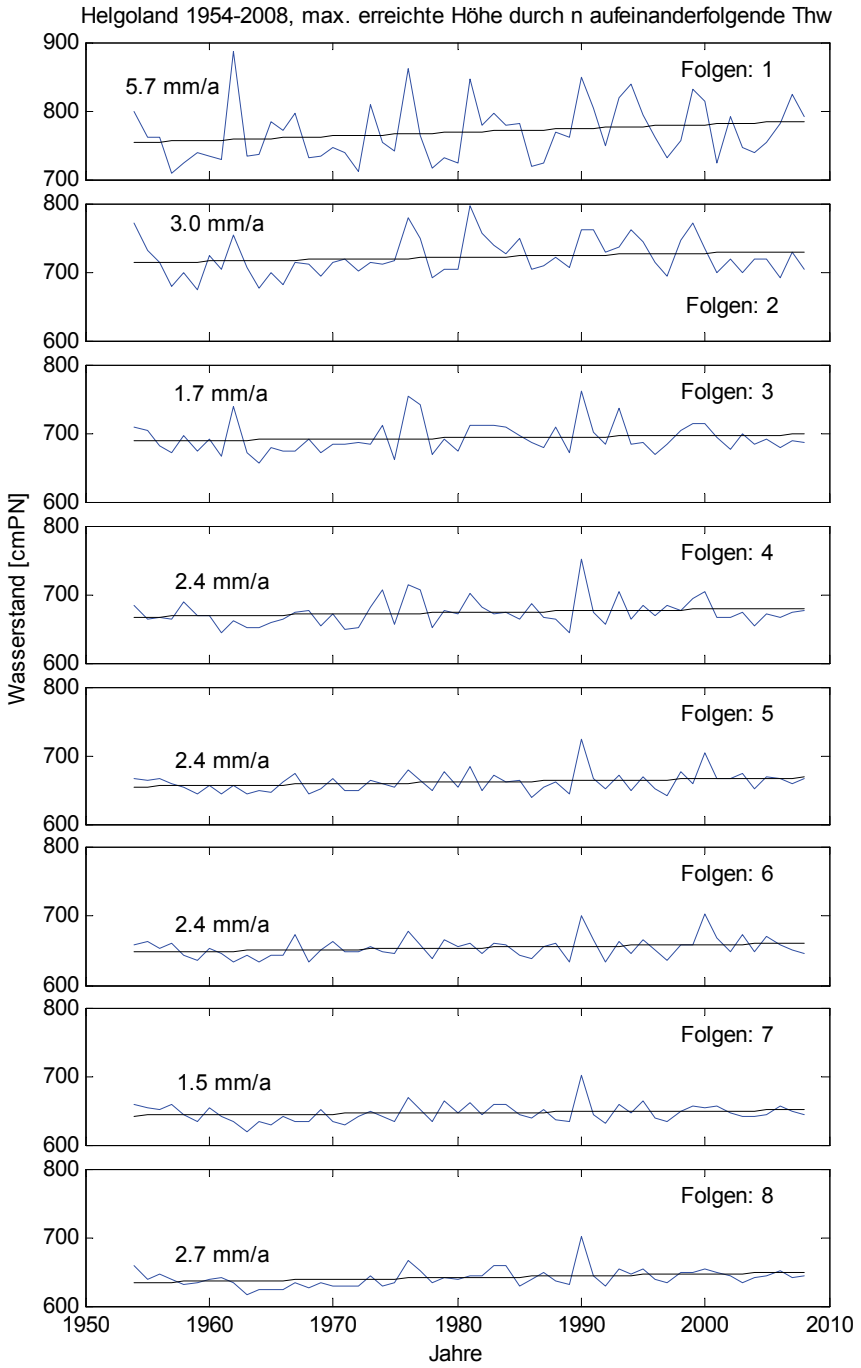


Abb. 8.11: Helgoland 1954-2008, maximal erreichte Basishöhe durch 1-8 aufeinanderfolgende Thw

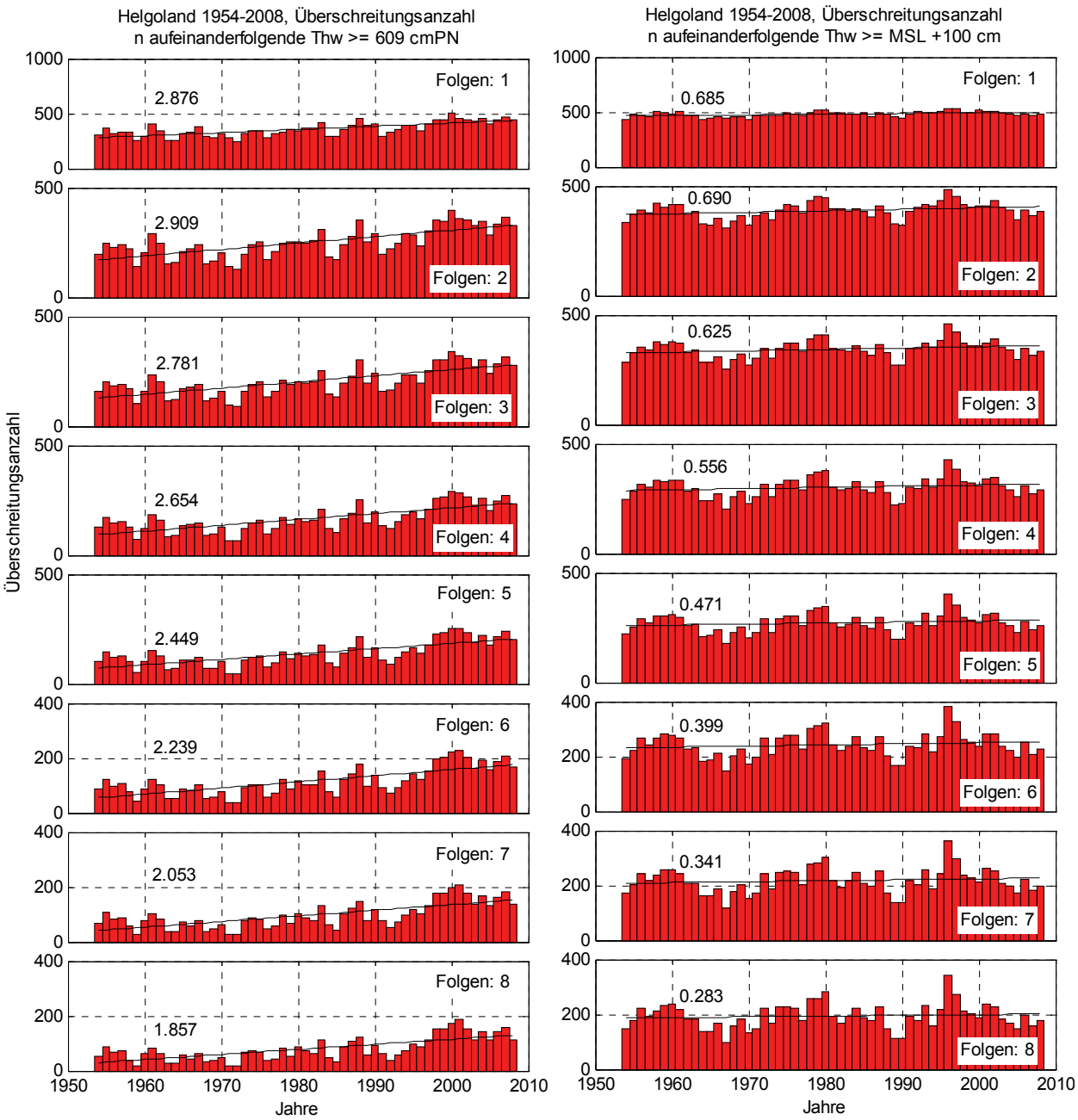


Abb. 8.12: Helgoland 1954-2008, Überschreitungszahlen durch 1-8 aufeinanderfolgende Thw. Links: ≥ $MThw_{1954\text{-}2008}$ + 0 cm = 609 cm, Rechts: ≥ MSL + 100 cm des jeweiligen Jahres

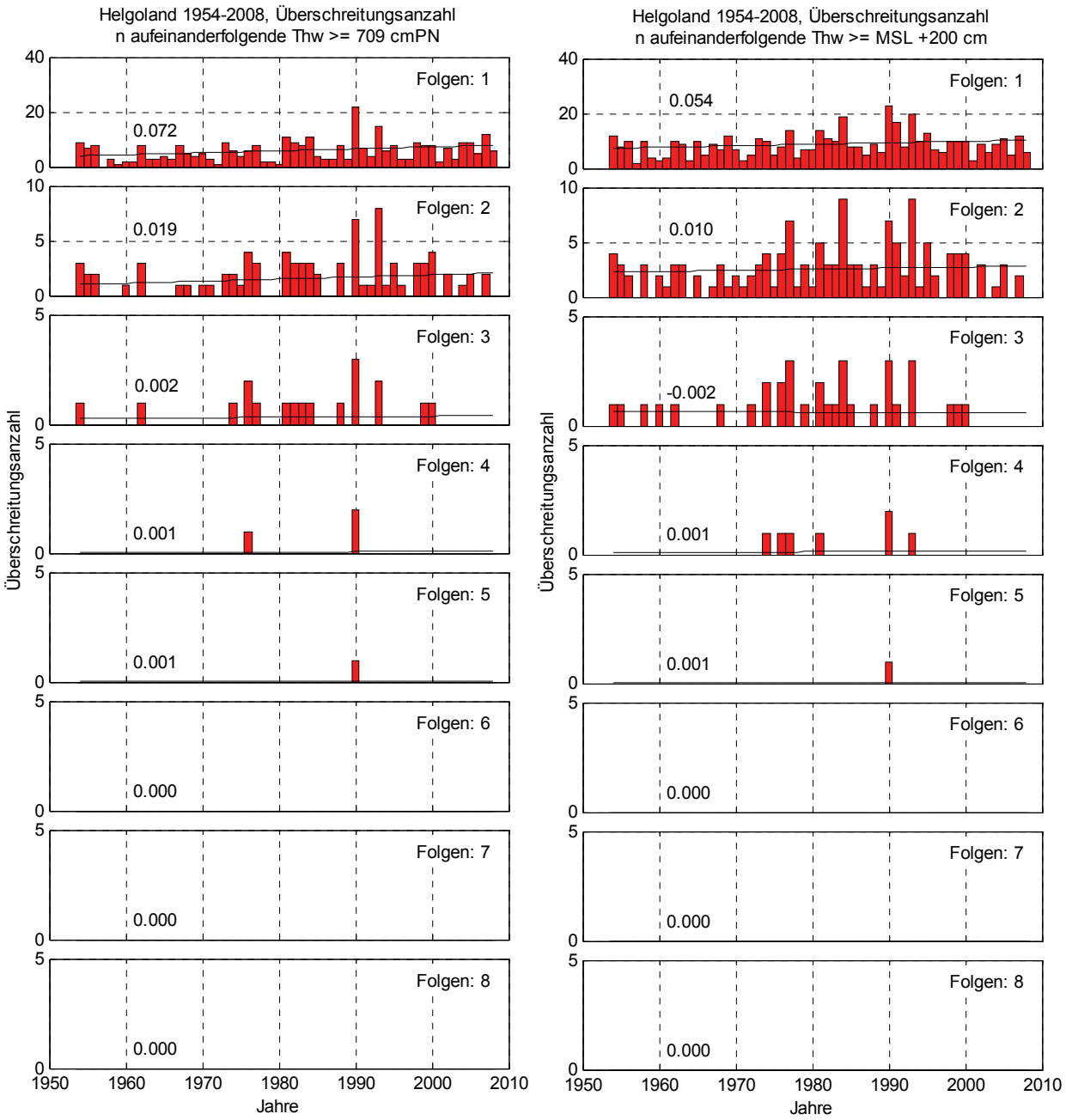


Abb. 8.13: Helgoland 1954-2008, Überschreitungszahlen durch 1-8 aufeinanderfolgende Thw. Links: ≥ $MThw_{1954\text{-}2008}$ + 100 cm = 709 cm, Rechts: ≥ MSL + 200 cm des jeweiligen Jahres

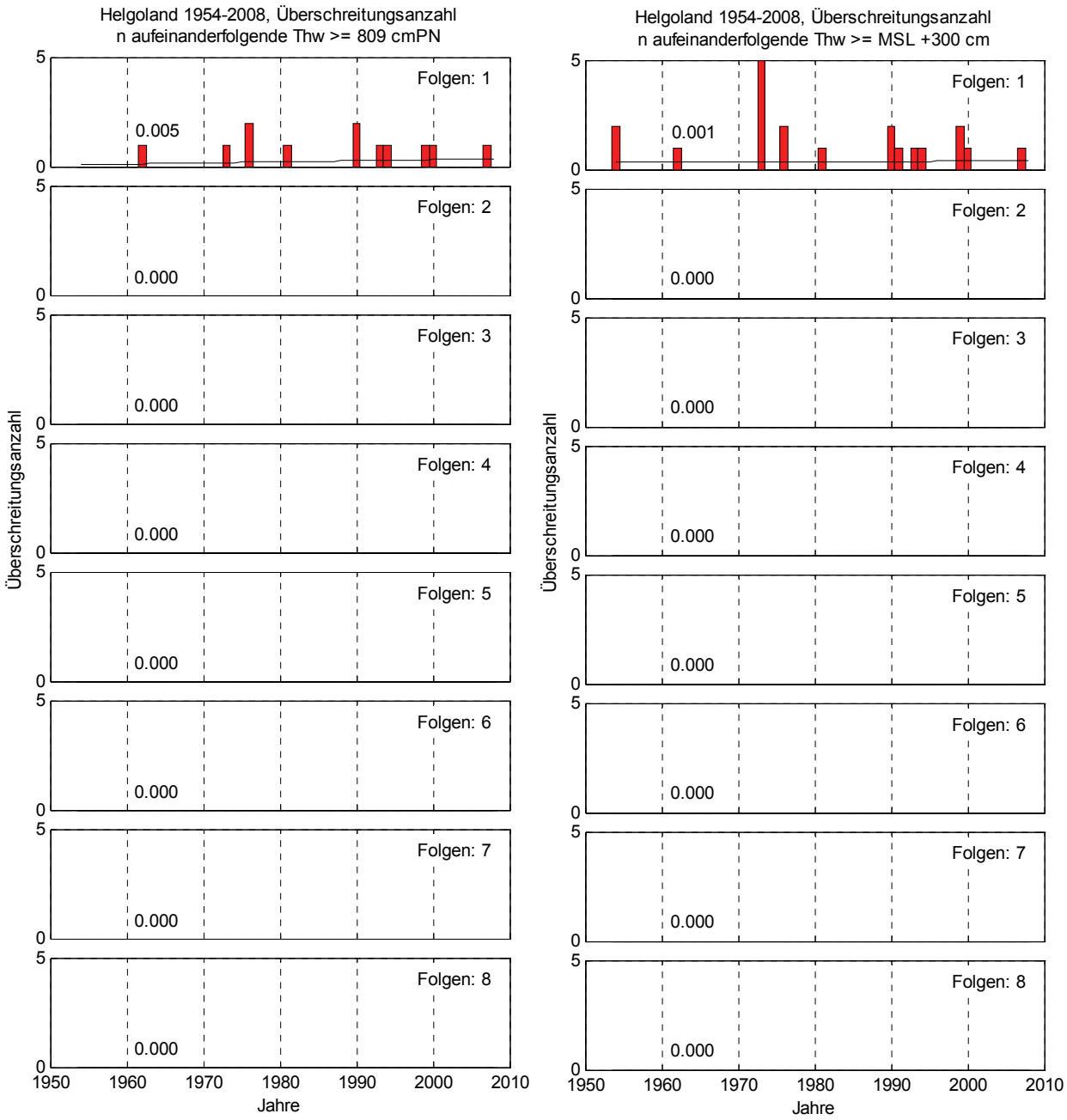


Abb. 8.14: Helgoland 1954-2008, Überschreitungszahlen durch 1-8 aufeinanderfolgende Thw. Links: ≥ $MThw_{1954\text{-}2008}$ + 200 cm = 809 cm, Rechts: ≥ MSL + 300 cm des jeweiligen Jahres

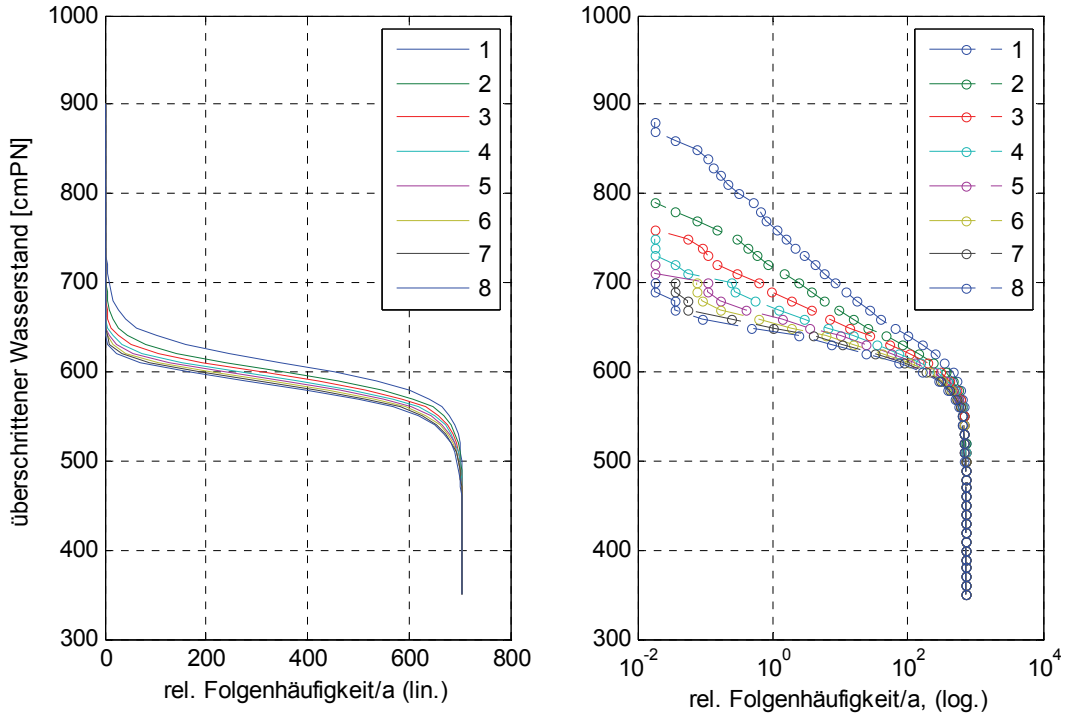


Abb. 8.15: Helgoland 1954-2008, relative Häufigkeiten aufeinanderfolgender Thw

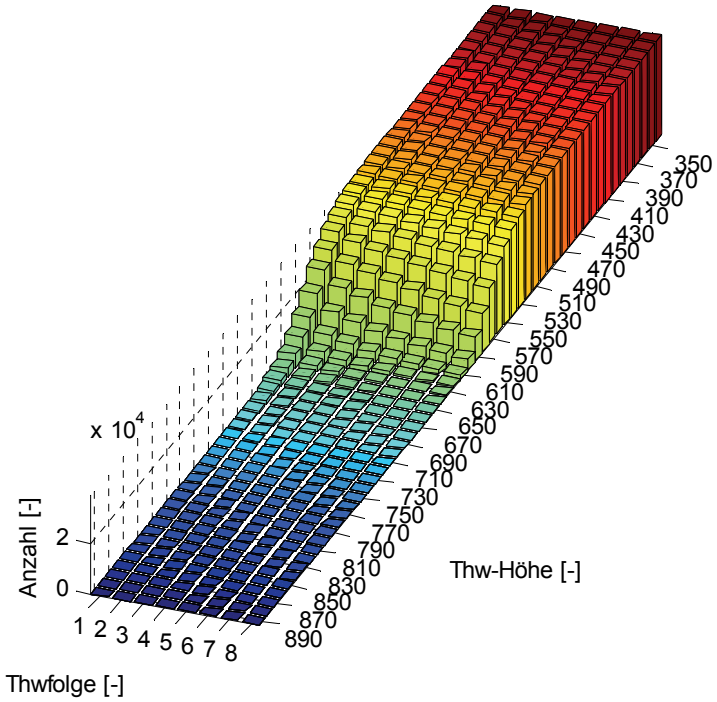


Abb. 8.16: Helgoland 1954-2008, Thw-Folgezahlen

9 Cuxhaven

9.1 Tideniedrigwasser

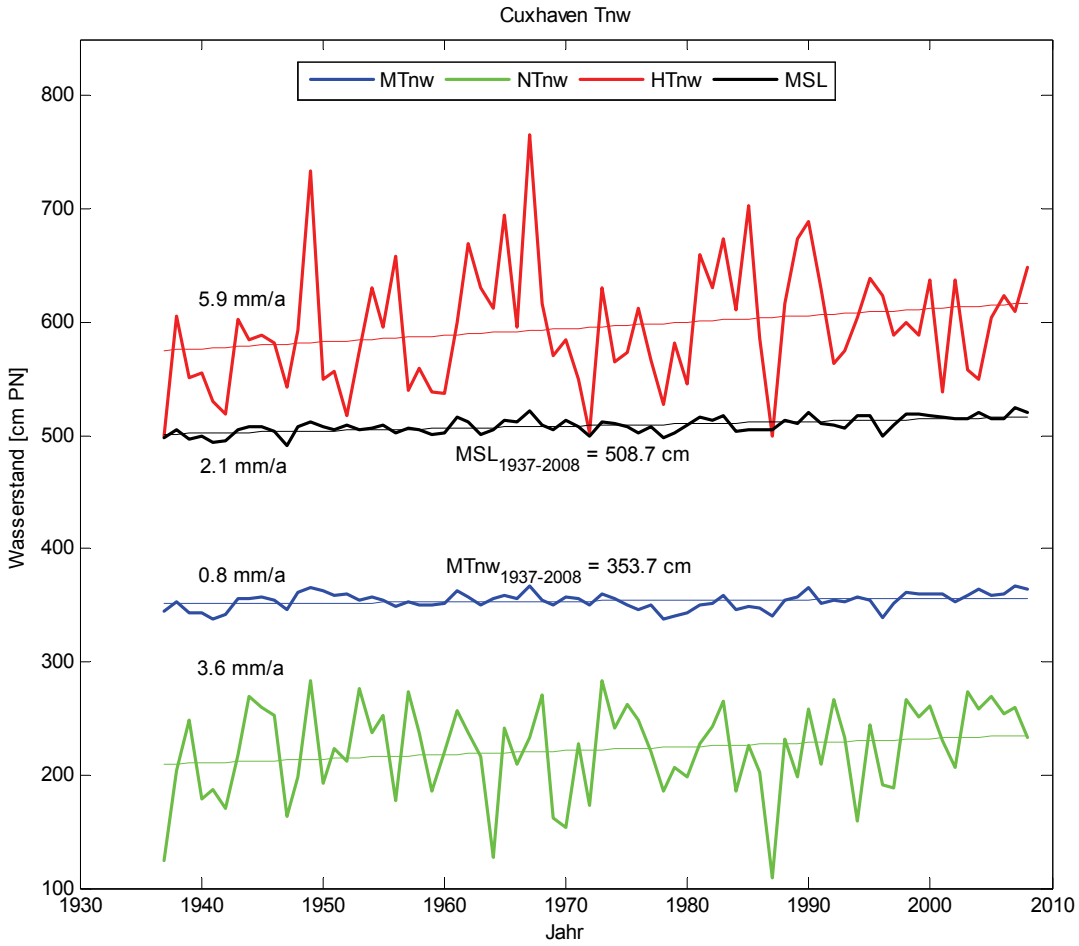


Abb. 9.1: Tnw + MSL Trends Cuxhaven 1937 – 2008

Tendenziell nimmt der Trend der maximal erreichten Basishöhe von n aufeinanderfolgenden Tnw mit zunehmender Folgenzahl ab (Abb. 9.2, Abb. 9.3). Das Maximum wird für die Folgenzahl 1, welche gleichzeitig unabhängige Einzeltiden und damit die Reihe der HTnw darstellt, mit einem Trend von 5,9 mm/a erreicht. Alle Trends liegen deutlich über dem Trend des MTnw = 0,8 mm/a. Der niedrigste Trend beträgt 1,6 mm/a und wird für 8 aufeinanderfolgende Tnw erreicht.

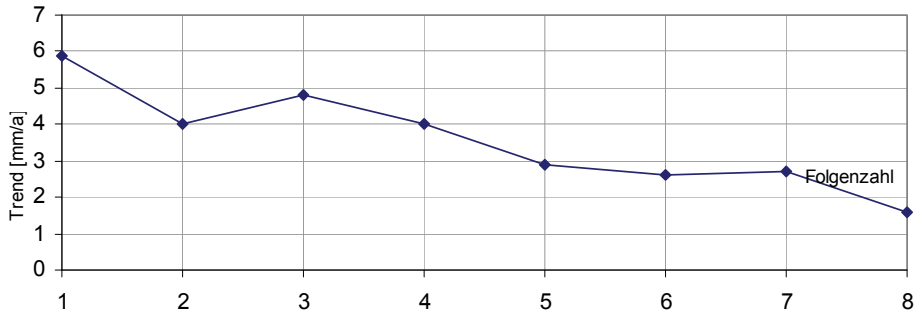


Abb. 9.2: Cuxhaven 1937-2008, Trendentwicklung max. Basishöhe Tnw mit zunehmender Folgezahl

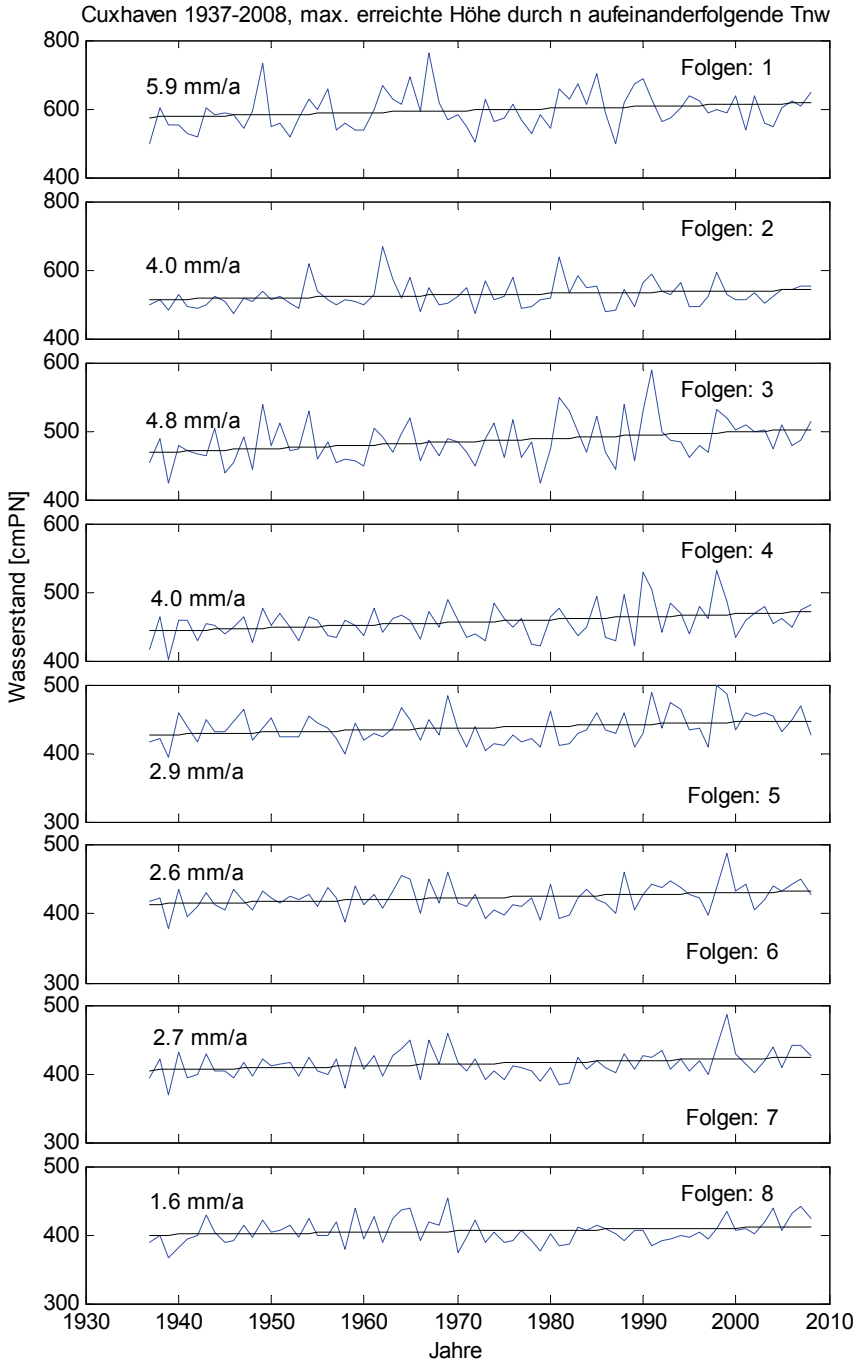


Abb. 9.3: Cuxhaven 1937-2008, maximal erreichte Basishöhe durch 1-8 aufeinanderfolgende Tnw

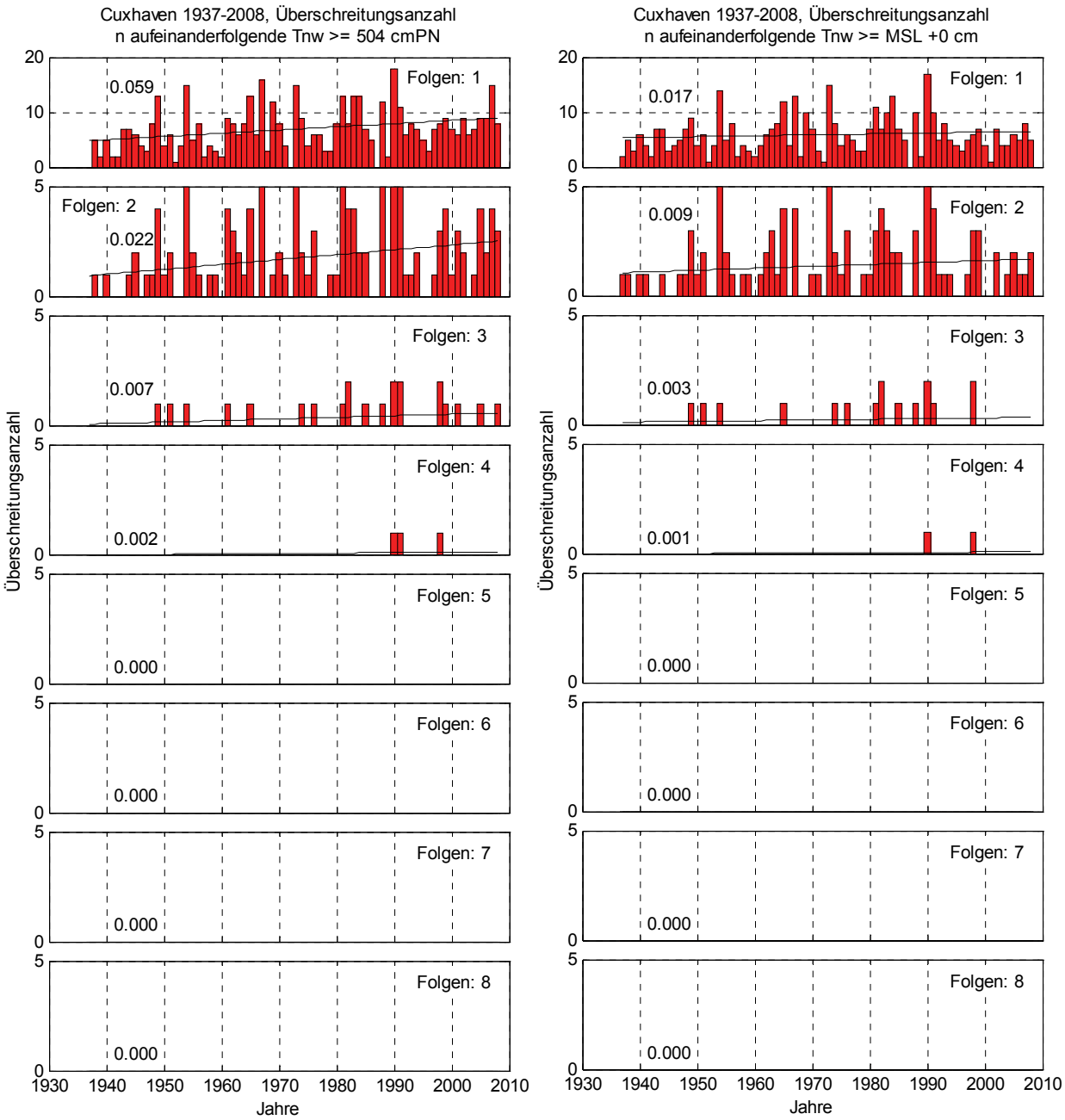


Abb. 9.4: Cuxhaven 1937-2008, Überschreitungszahlen durch 1-8 aufeinanderfolgende Tnw. Links: ≥ $MTnw_{1937\text{-}2008}$ + 150 cm = 504 cm, Rechts: ≥ MSL + 0 cm des jeweiligen Jahres

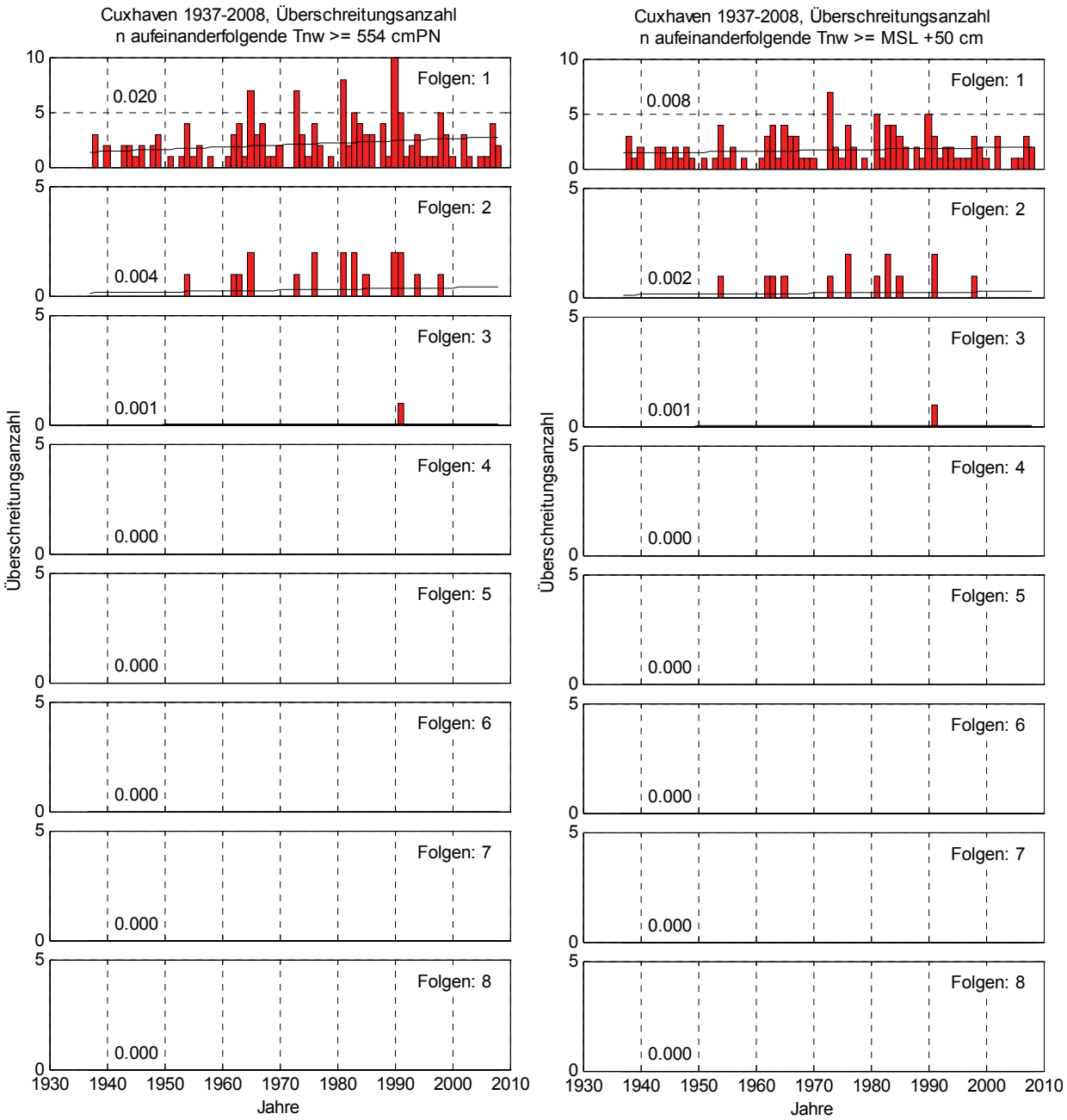


Abb. 9.5: Cuxhaven 1937-2008, Überschreitungszahlen durch 1-8 aufeinanderfolgende Tnw. Links: ≥ $MTnw_{1937\text{-}2008}$ + 200 cm = 554 cm, Rechts: ≥ MSL + 50 cm des jeweiligen Jahres

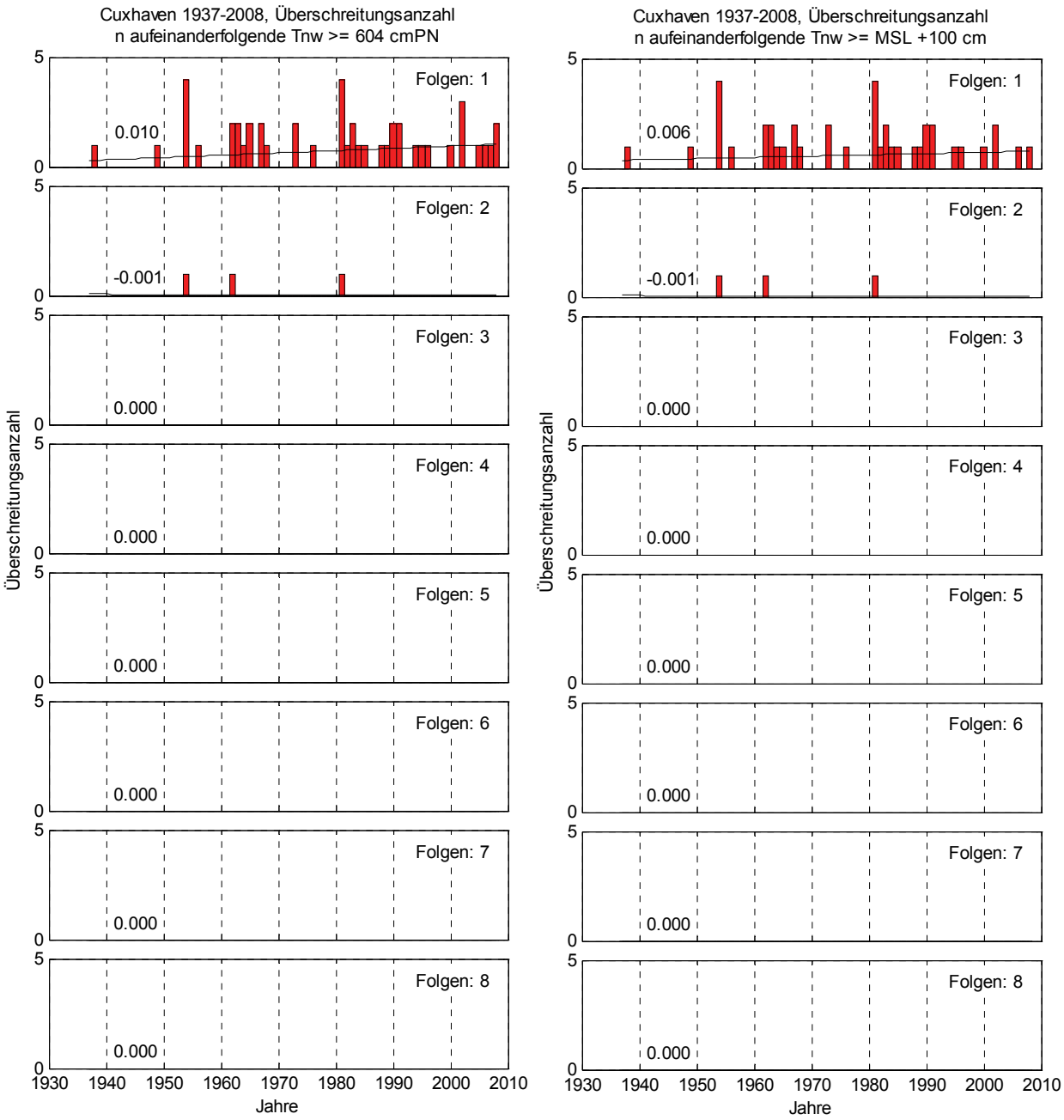


Abb. 9.6: Cuxhaven 1937-2008, Überschreitungszahlen durch 1-8 aufeinanderfolgende Tnw. Links: ≥ $MTnw_{1937\text{-}2008}$ + 250 cm = 604 cm, Rechts: ≥ MSL + 100 cm des jeweiligen Jahres

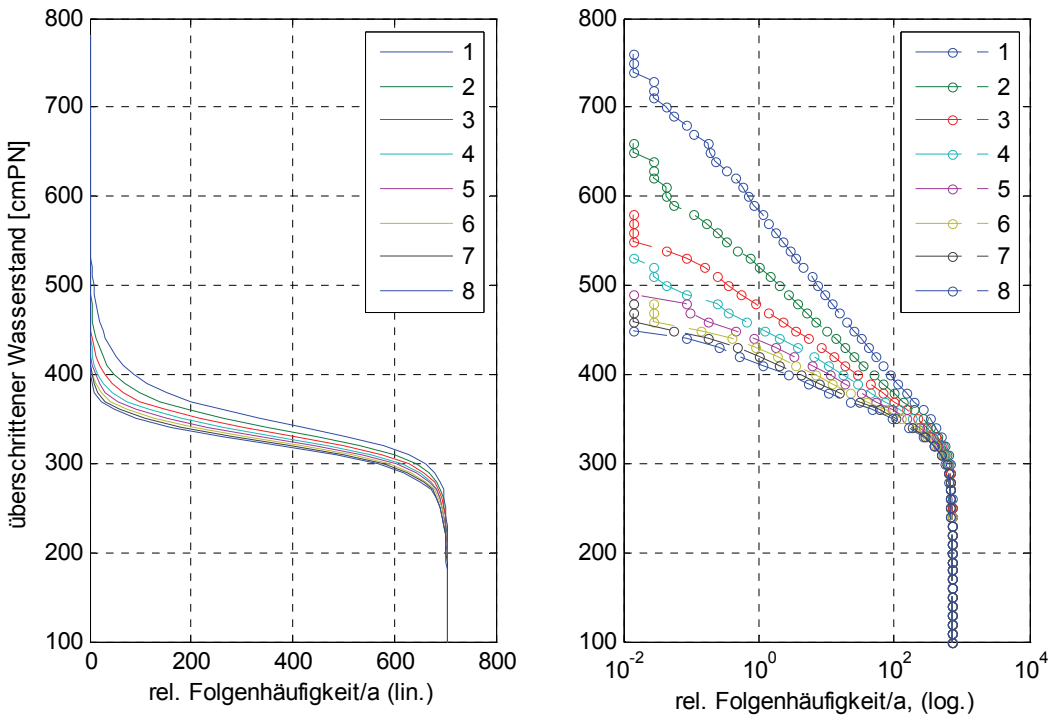


Abb. 9.7: Cuxhaven 1937-2008, relative Häufigkeiten aufeinanderfolgender Tnw

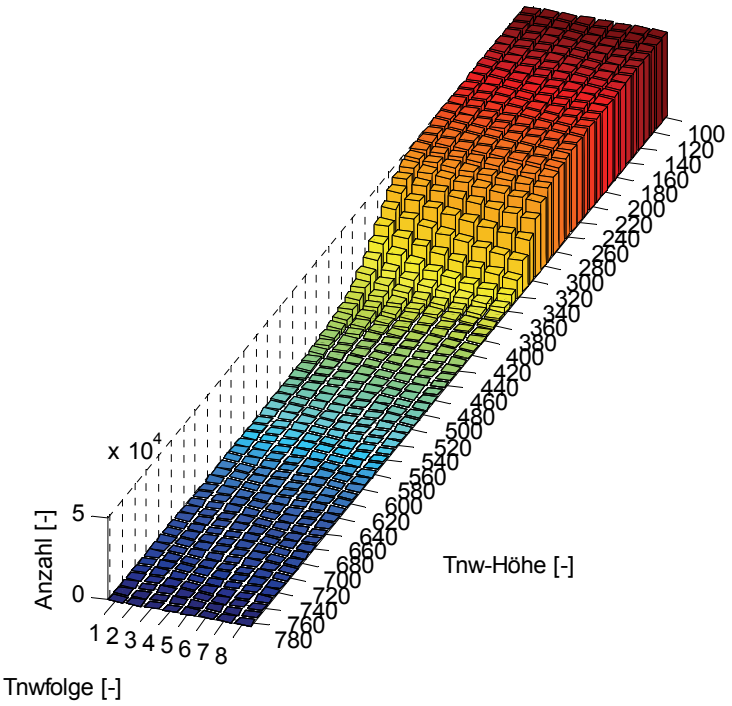


Abb. 9.8: Cuxhaven 1937-2008, Tnw-Folgezahlen

9.2 Tidehochwasser

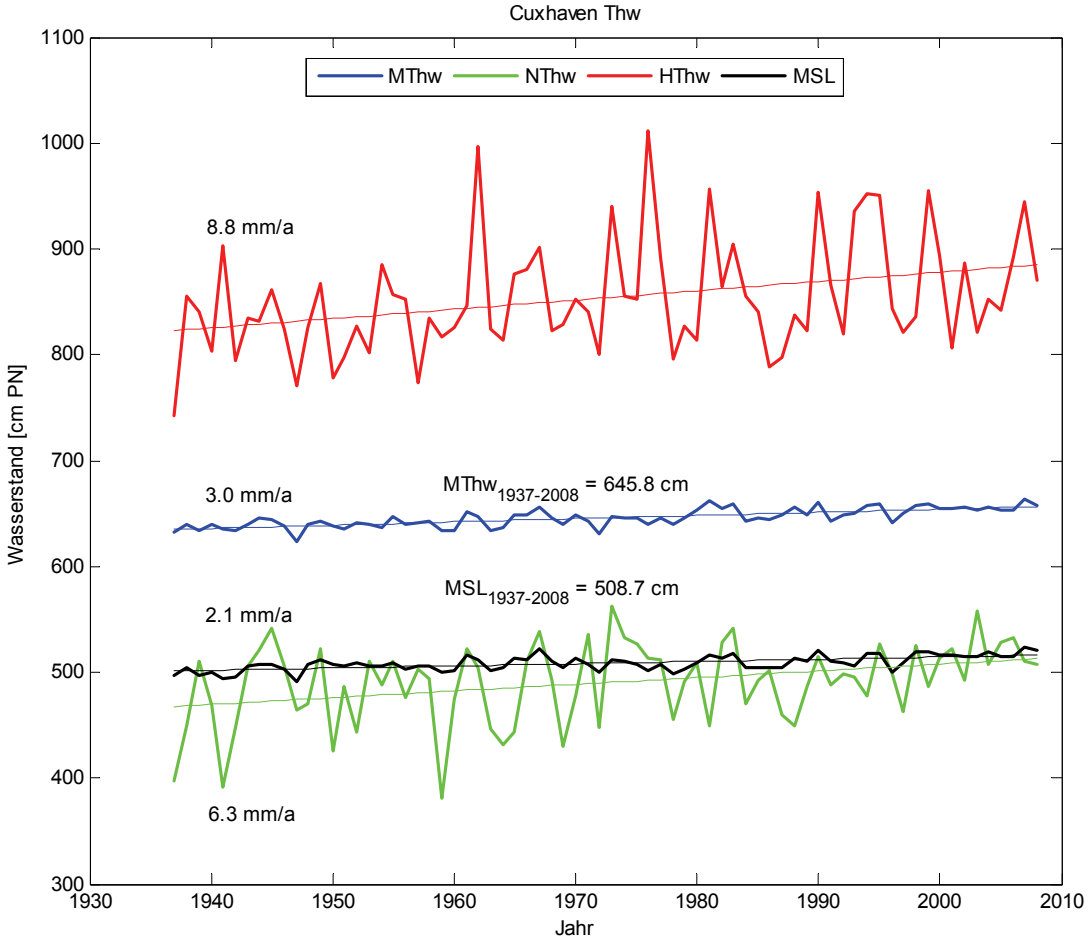


Abb. 9.9: Tnw + MSL Trends Cuxhaven 1937 – 2008

Tendenziell nimmt der Trend der maximal erreichten Basishöhe von n aufeinanderfolgenden Thw mit zunehmender Folgenzahl ab (Abb. 9.10, Abb. 9.11). Der Abfall ist dabei von Folgenzahl 1 bis 3 am größten und gleichmäßig, um dann zwischen Folge 3 und Folge 8 auf nahezu gleichbleibendem Trend von etwa 4 mm/a zu verbleiben. Das Maximum wird für die Folgenzahl 1, welche gleichzeitig unabhängige Einzeltiden und damit die Reihe der HThw darstellt, mit einem Trend von 8,8 mm/a erreicht. Alle Trends liegen über dem Trend des MThw = 3,0 mm/a. Der niedrigste Trend beträgt 3,1 mm/a und wird für 5 aufeinanderfolgende Thw erreicht.

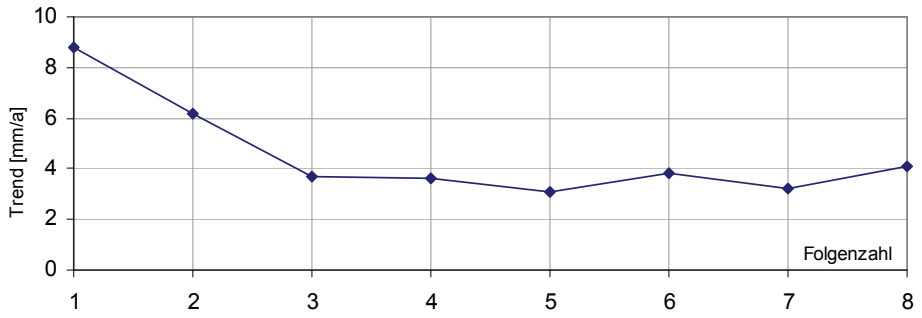


Abb. 9.10: Cuxhaven 1937-2008, Trendentwicklung max. Basishöhe Thw mit zunehmender Folgezahl

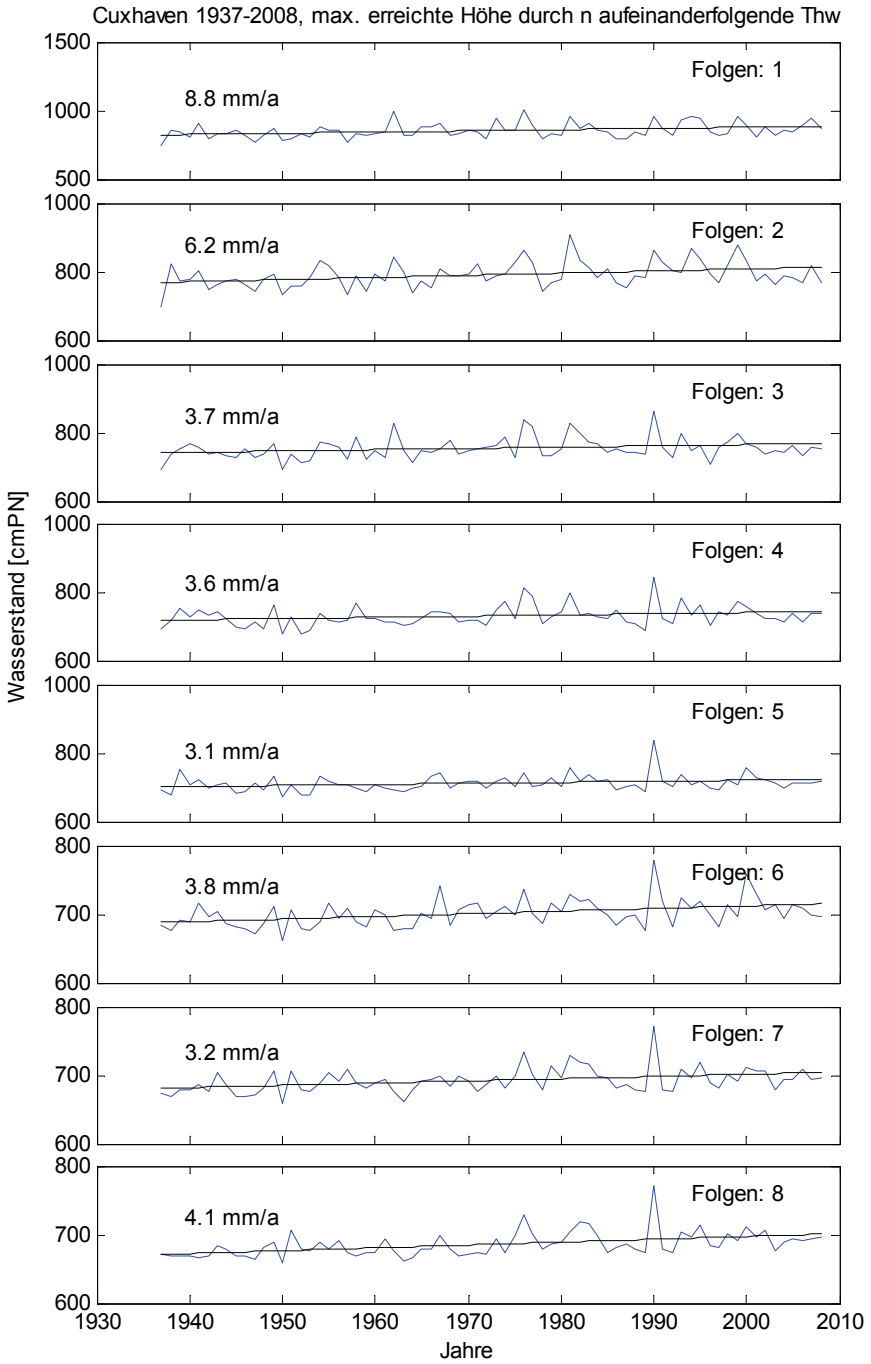


Abb. 9.11: Cuxhaven 1937-2008, maximal erreichte Basishöhe durch 1-8 aufeinanderfolgende Thw

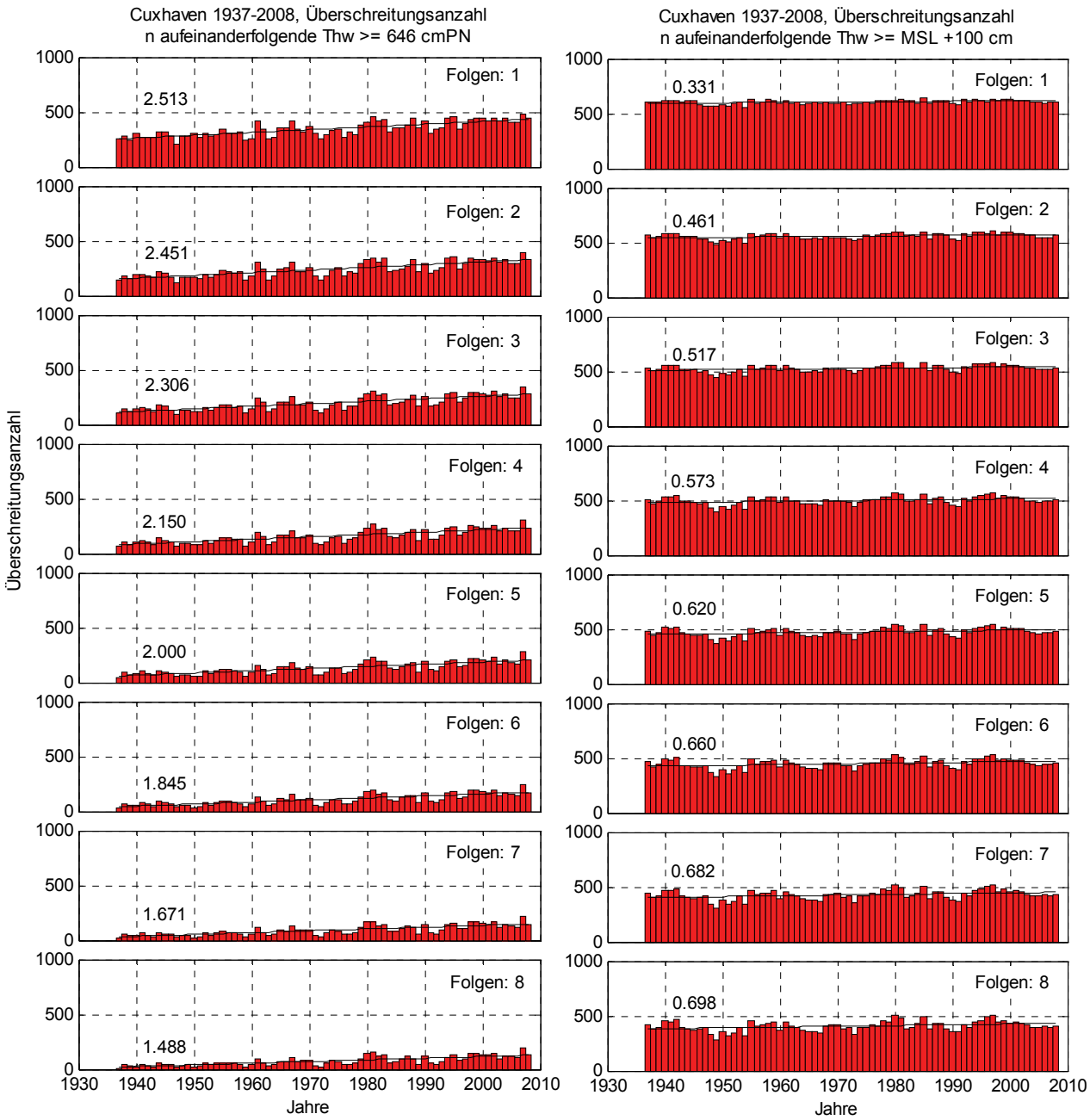


Abb. 9.12: Cuxhaven 1937-2008, Überschreitungszahlen durch 1-8 aufeinanderfolgende Thw. Links: ≥ $MThw_{1937\text{-}2008}$ + 0 cm = 646 cm, Rechts: ≥ MSL + 100 cm des jeweiligen Jahres

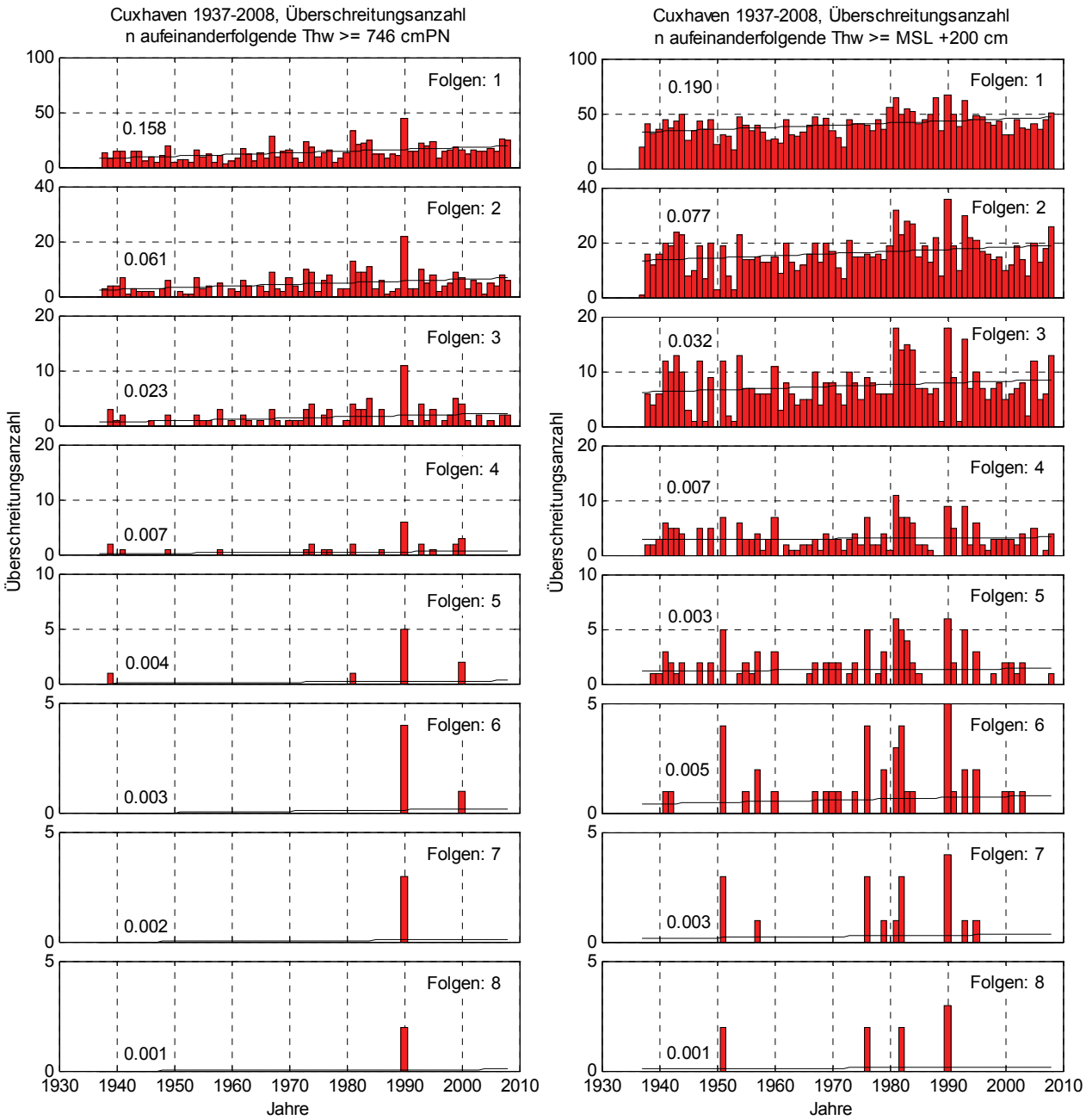


Abb. 9.13: Cuxhaven 1937-2008, Überschreitungszahlen durch 1-8 aufeinanderfolgende Thw. Links: ≥ $MThw_{1937\text{-}2008}$ + 100 cm = 746 cm, Rechts: ≥ MSL + 200 cm des jeweiligen Jahres

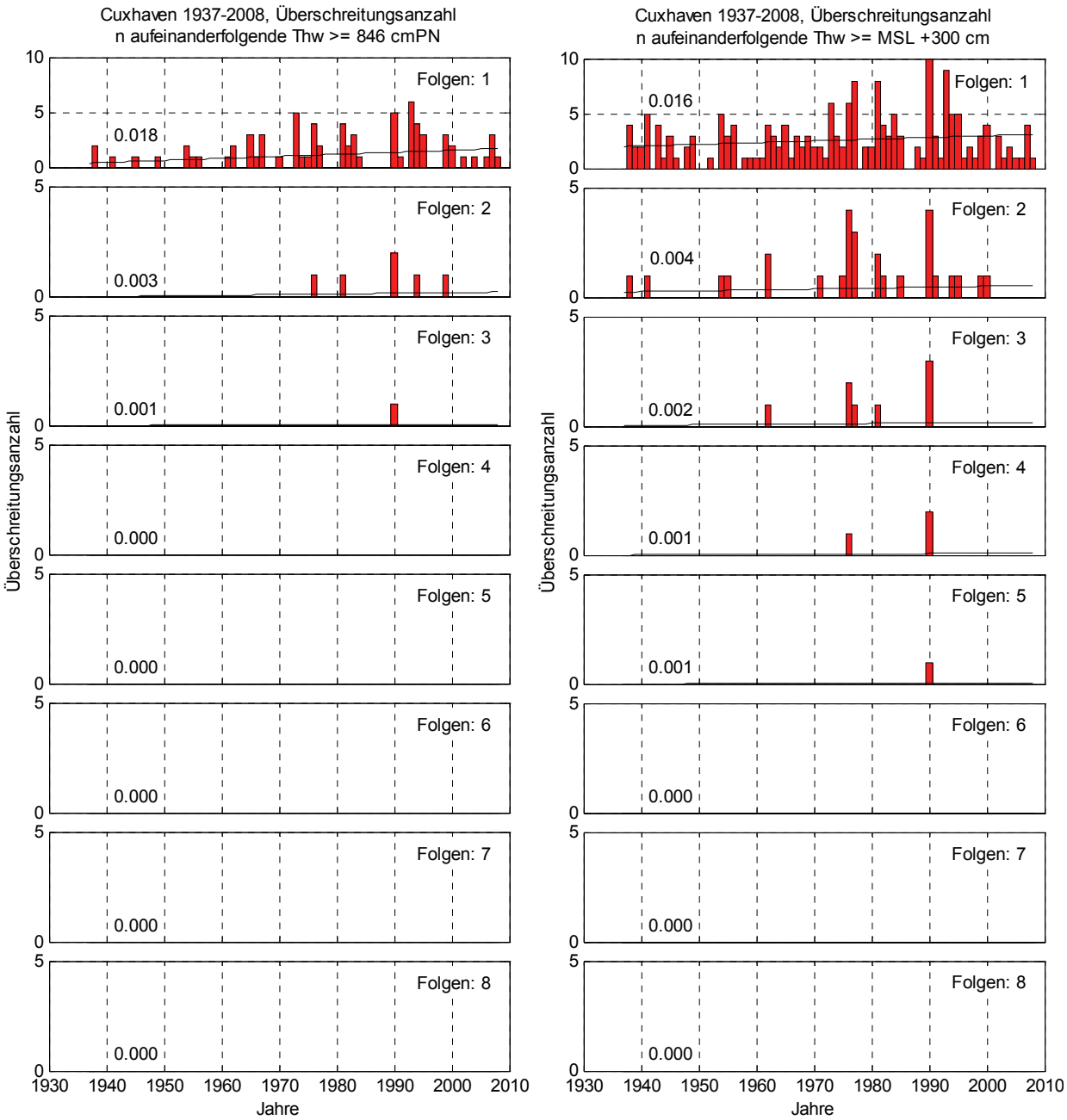


Abb. 9.14: Cuxhaven 1937-2008, Überschreitungszahlen durch 1-8 aufeinanderfolgende Thw. Links: ≥ $MThw_{1937\text{-}2008}$ + 200 cm = 846 cm, Rechts: ≥ MSL + 300 cm des jeweiligen Jahres

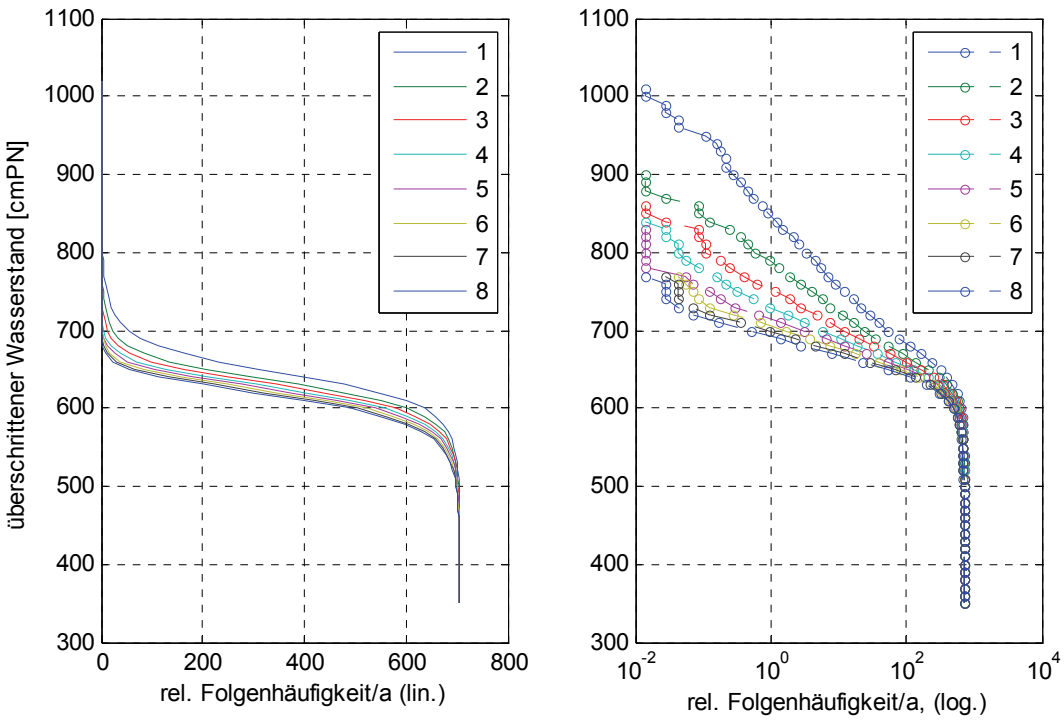


Abb. 9.15: Cuxhaven 1937-2008, relative Häufigkeiten aufeinanderfolgender Thw

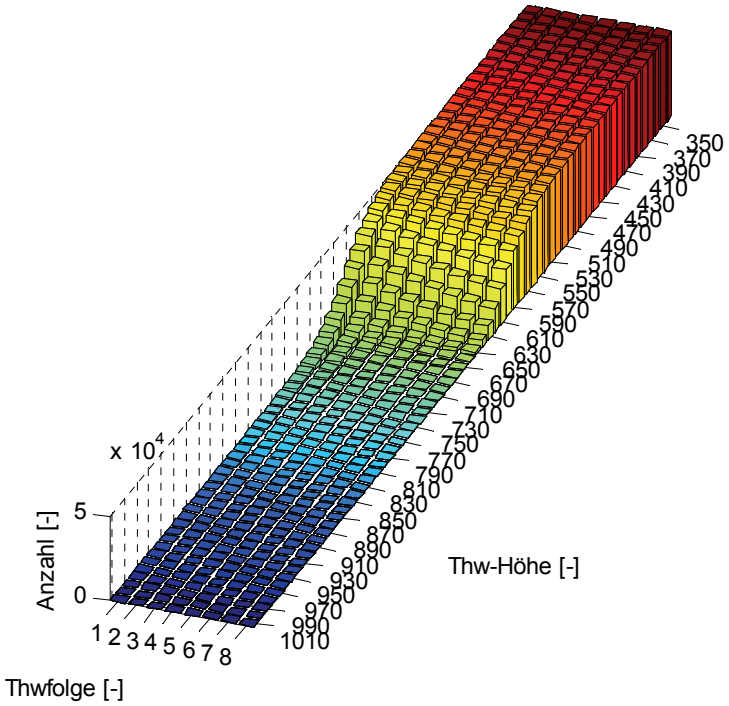


Abb. 9.16: Cuxhaven 1937-2008, Thw-Folgezahlen

10 Bremerhaven

10.1 Tideniedrigwasser

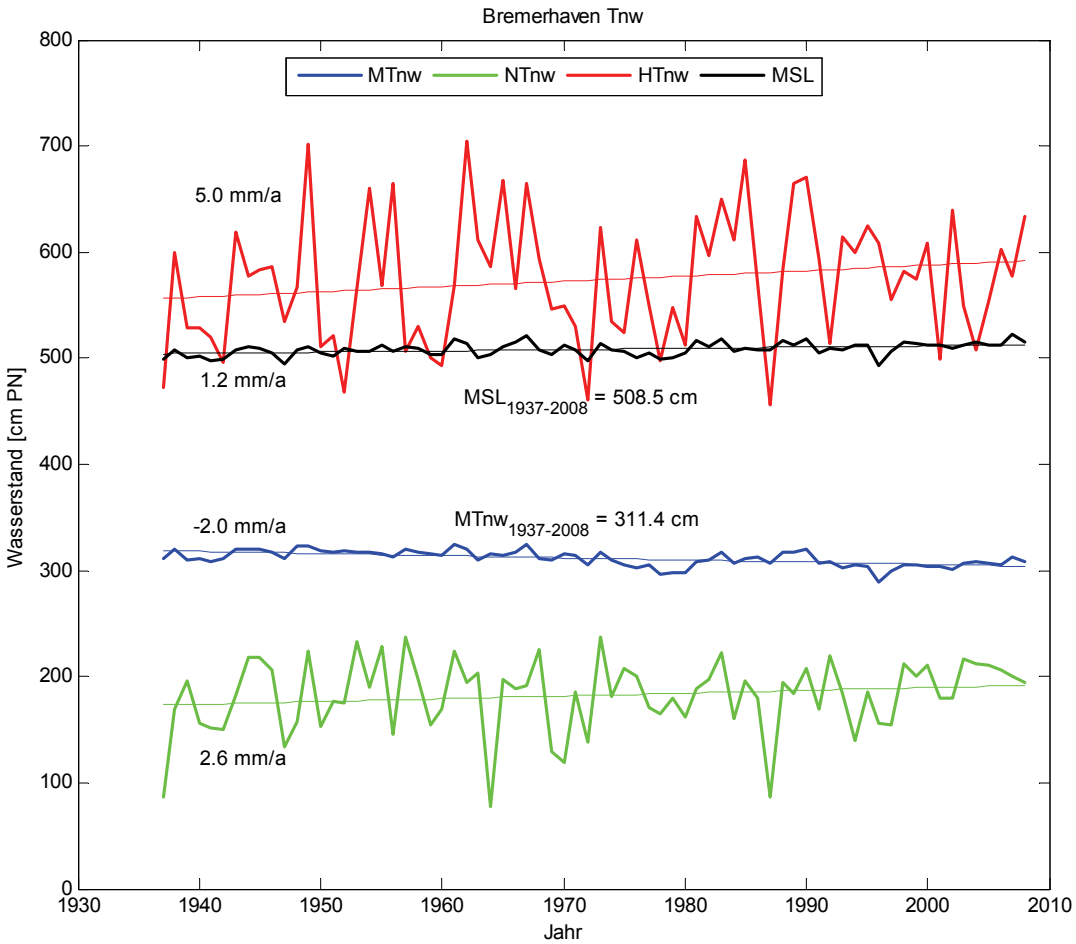


Abb. 10.1: Tnw + MSL Trends Bremerhaven 1937 – 2008

Tendenziell nimmt der Trend der maximal erreichten Basishöhe von n aufeinanderfolgenden Tnw mit zunehmender Folgenzahl ab (Abb. 10.2, Abb. 10.3). Das Maximum wird für die Folgenzahl 1, welche gleichzeitig unabhängige Einzeltiden und damit die Reihe der HTnw darstellt, mit einem Trend von 5,0 mm/a erreicht. Alle Trends liegen deutlich über dem Trend des MTnw, welches mit -2,0 mm/a signifikant fallenden Trend aufweist. Der niedrigste Trend wird für Folgezahl 8 erreicht und ist mit -0,7 mm/a ebenfalls negativ.

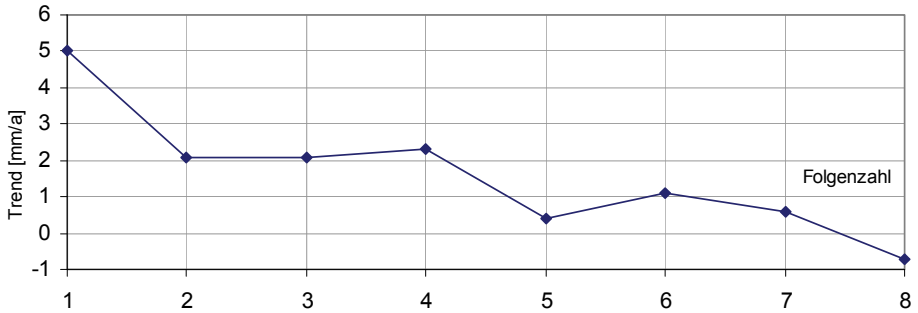


Abb. 10.2: Bremerhaven 1937-2008, Trendentwicklung max. Basishöhe Tnw mit zunehmender Folgezahl

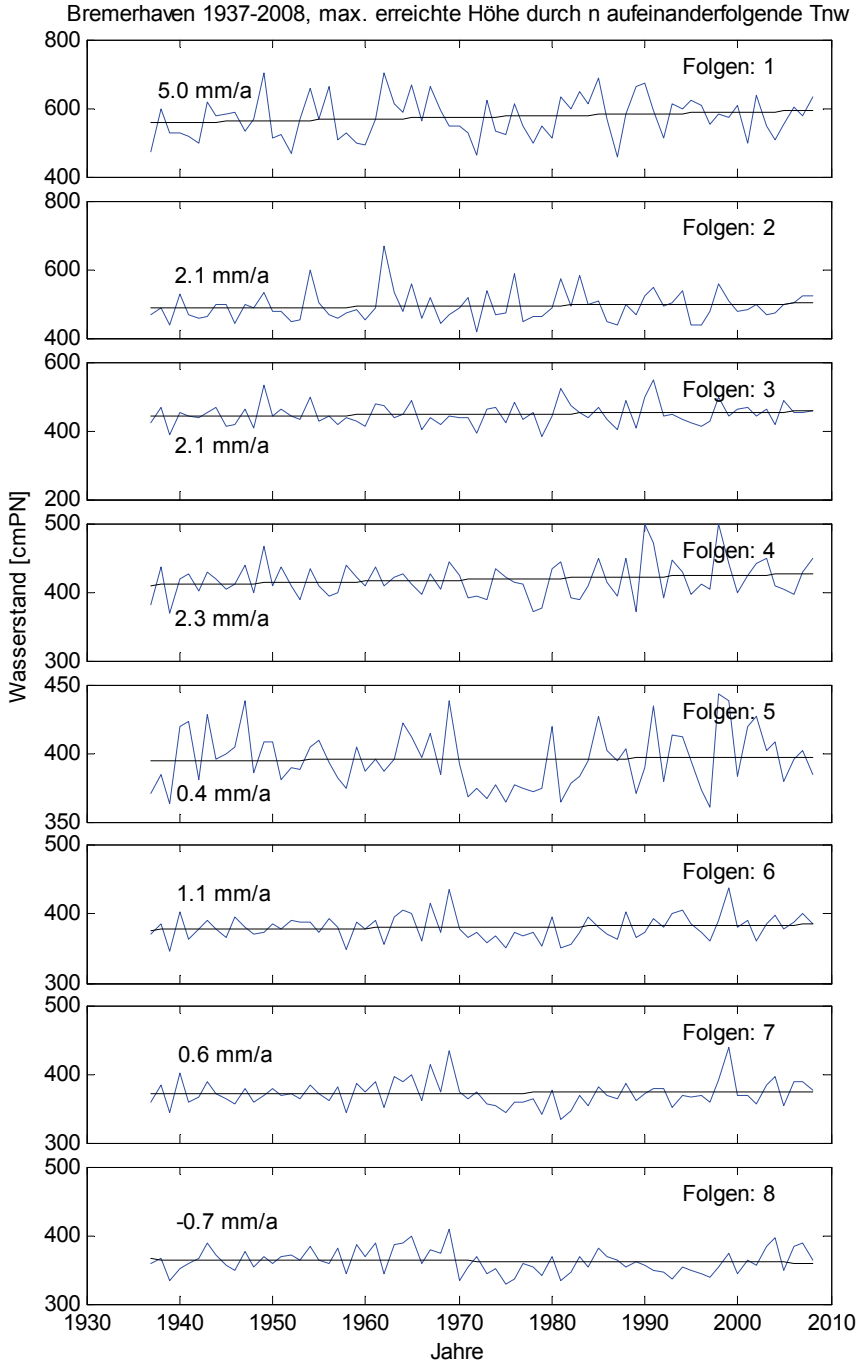


Abb. 10.3: Bremerhaven 1937-2008, maximal erreichte Basishöhe durch 1-8 aufeinanderfolgende Tnw

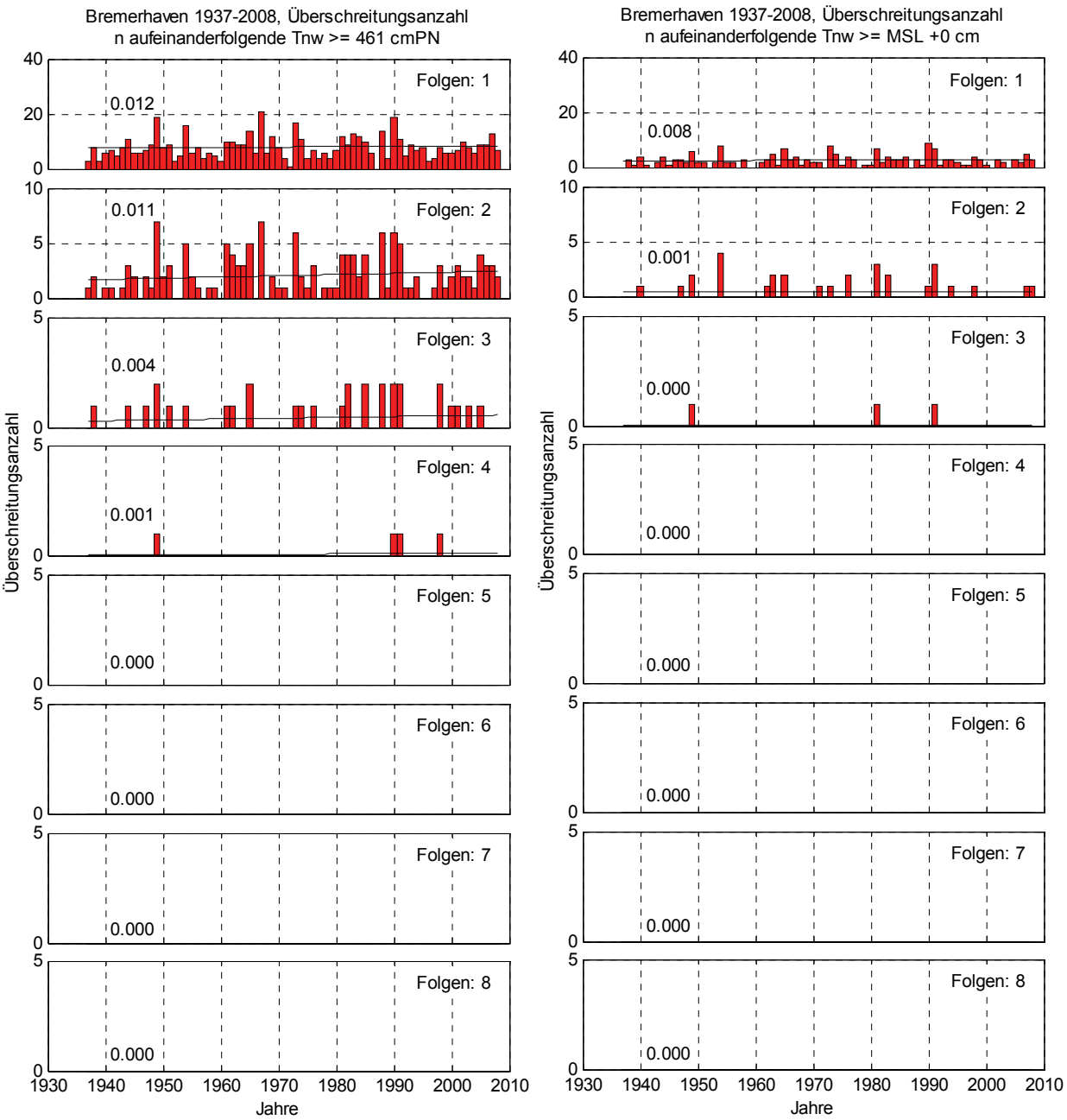


Abb. 10.4: Bremerhaven 1937-2008, Überschreitungszahlen durch 1-8 aufeinanderfolgende Tnw. Links: ≥ $MTnw_{1937\text{-}2008}$ + 150 cm = 461 cm, Rechts: ≥ MSL + 0 cm des jeweiligen Jahres

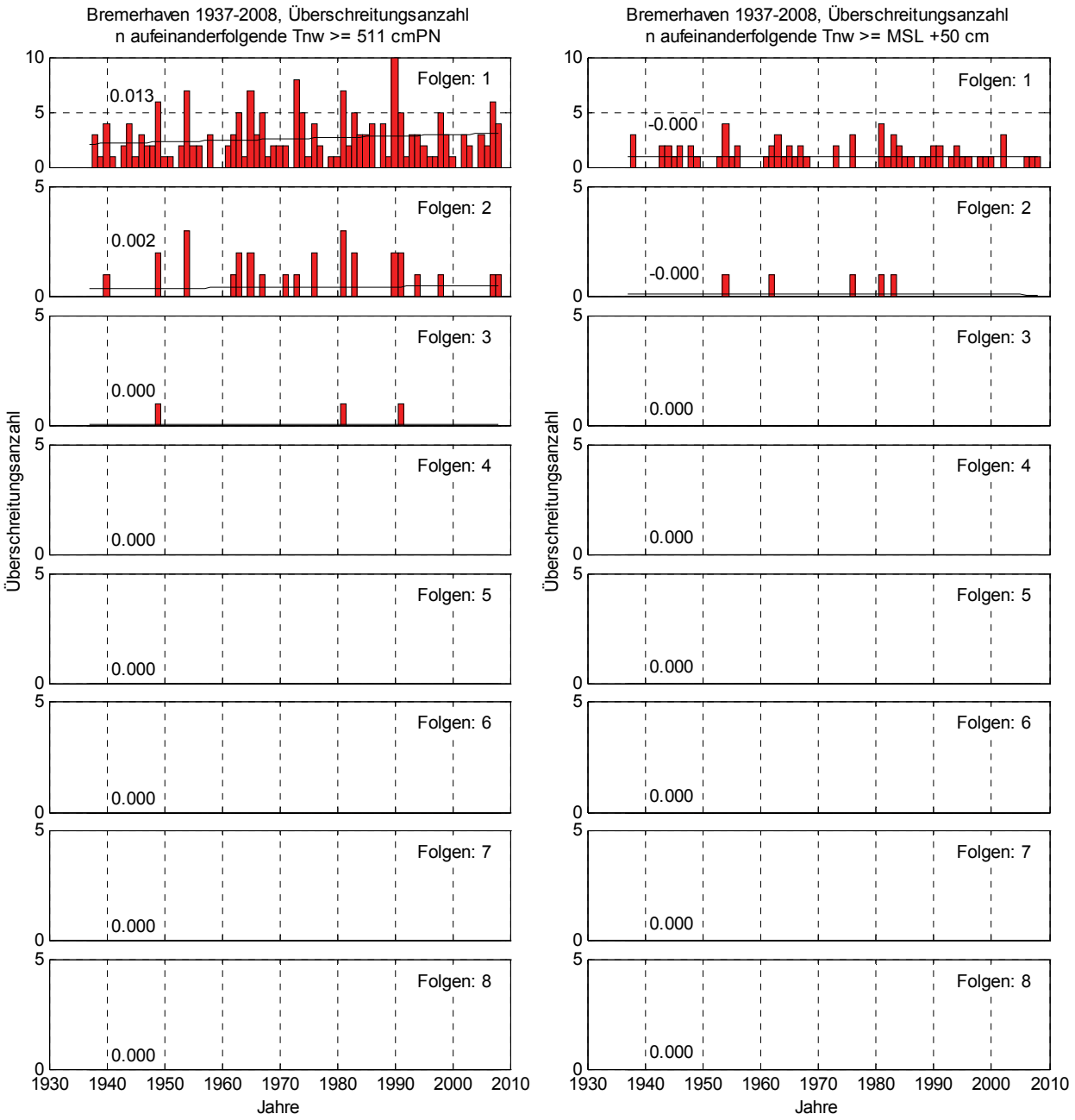


Abb. 10.5: Bremerhaven 1937-2008, Überschreitungszahlen durch 1-8 aufeinanderfolgende Tnw. Links: ≥ $MTnw_{1937-2008}$ + 200 cm = 511 cm, Rechts: ≥ MSL + 50 cm des jeweiligen Jahres

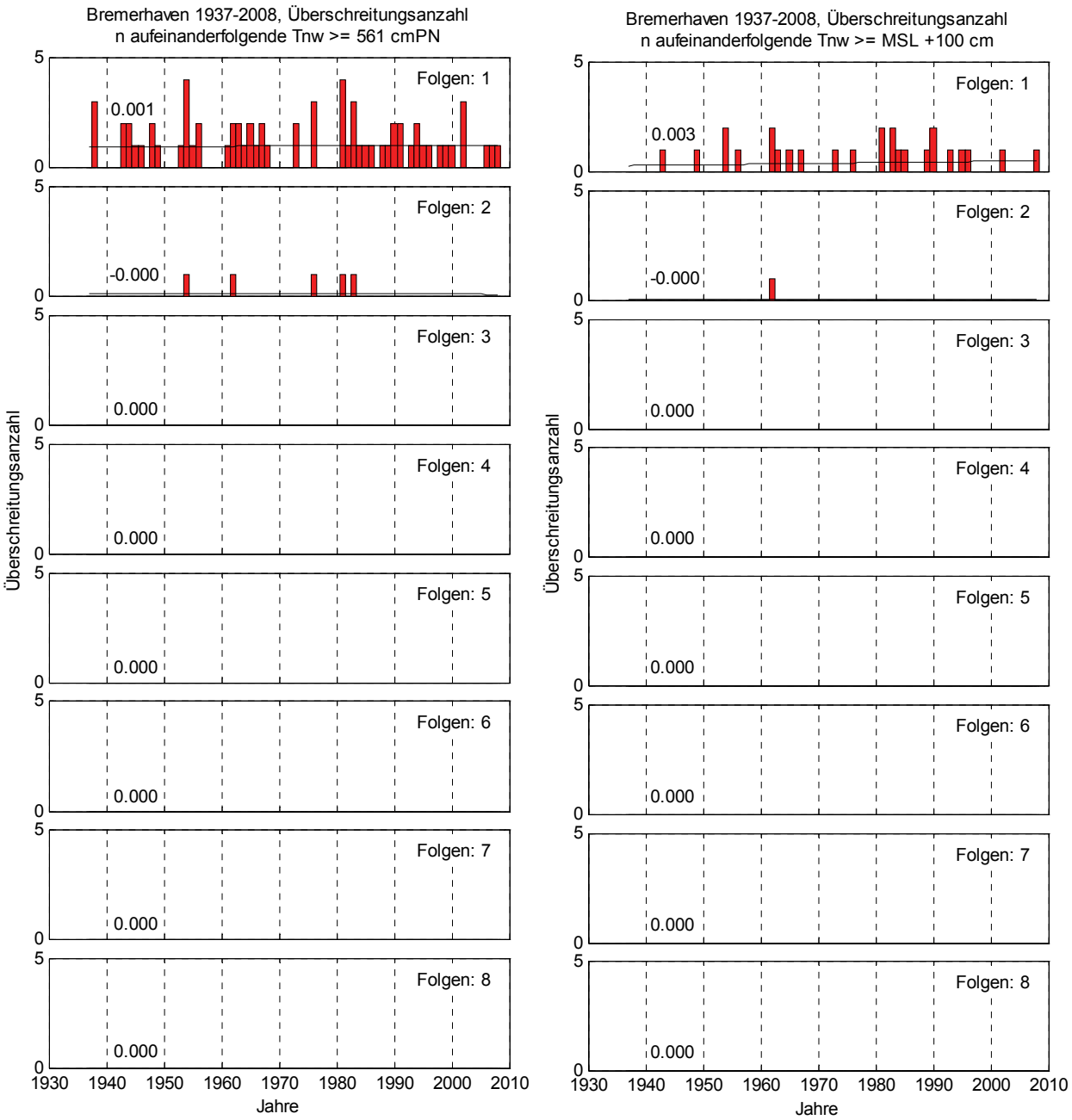


Abb. 10.6: Bremerhaven 1937-2008, Überschreitungszahlen durch 1-8 aufeinanderfolgende Tnw. Links: ≥ $MTnw_{1937\text{-}2008}$ + 250 cm = 561 cm, Rechts: ≥ MSL + 100 cm des jeweiligen Jahres

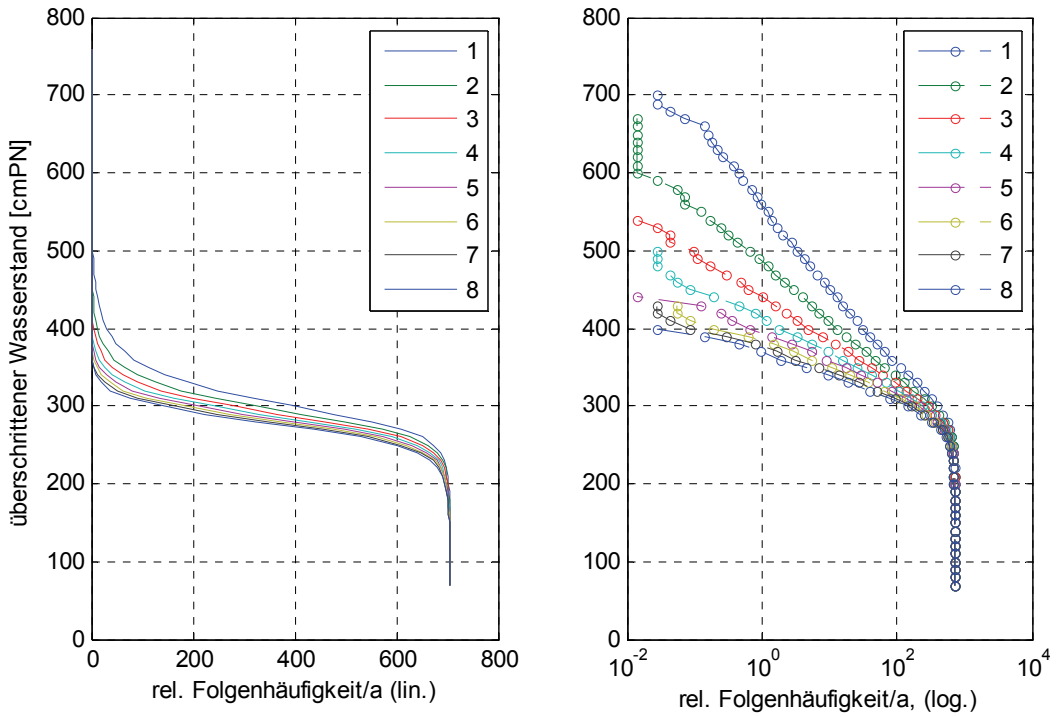


Abb. 10.7: Bremerhaven 1937-2008, relative Häufigkeiten aufeinanderfolgender Tnw

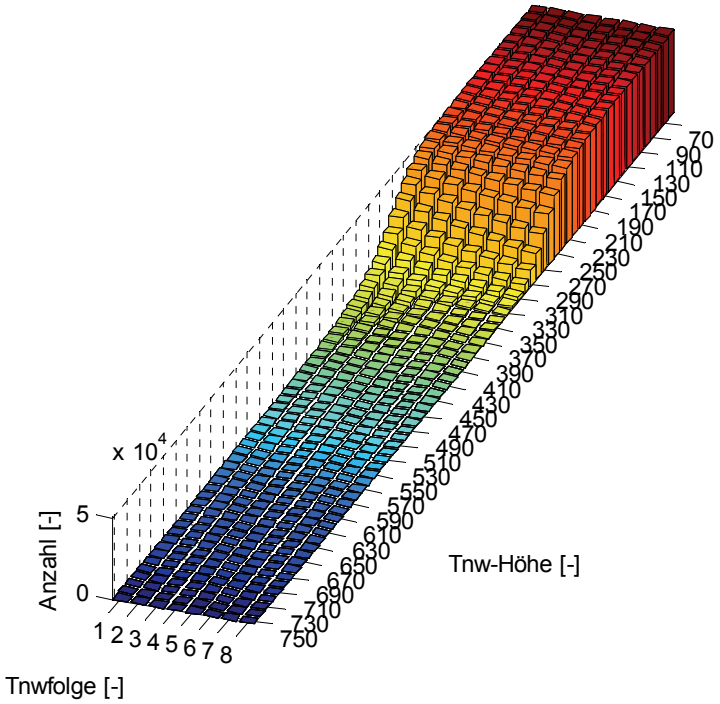


Abb. 10.8: Bremerhaven 1937-2008, Tnw-Folgezahlen

10.2 Tidehochwasser

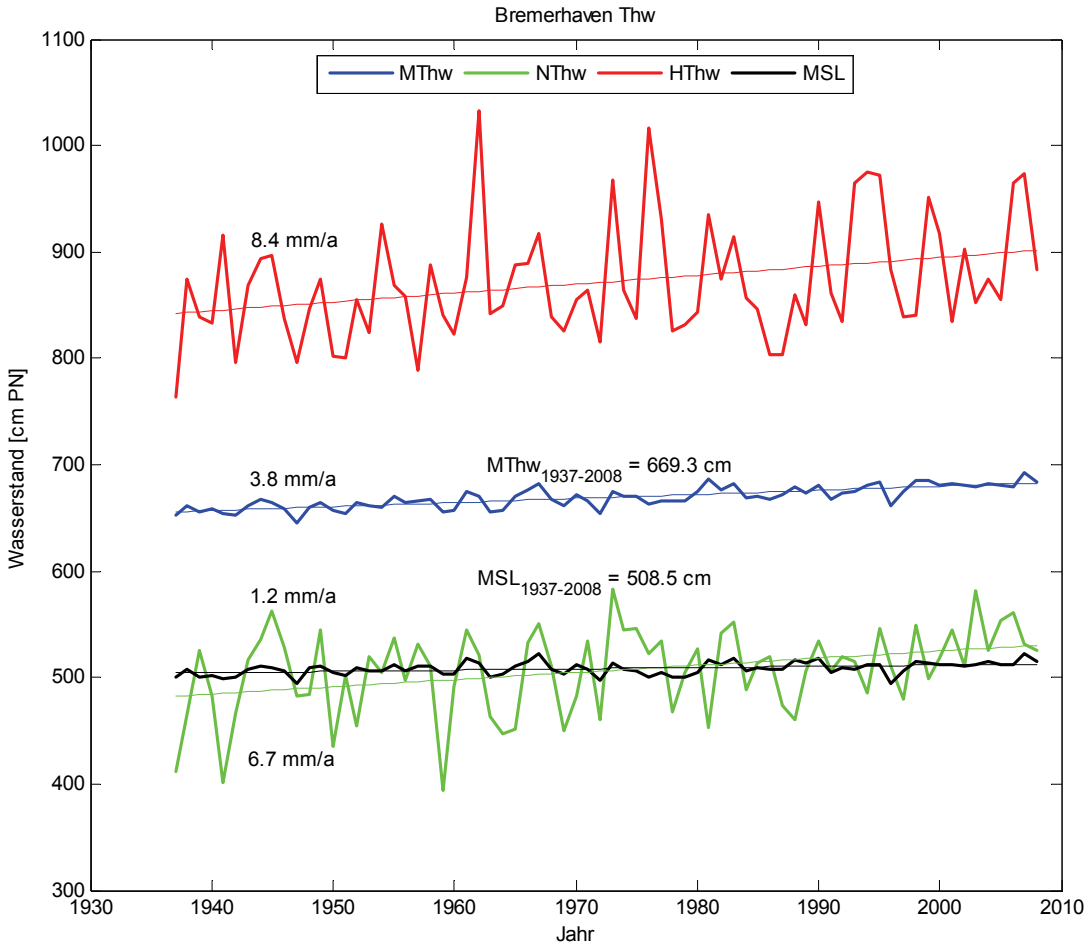


Abb. 10.9: Thw + MSL Trends Bremerhaven 1937 – 2008

Tendenziell nimmt der Trend der maximal erreichten Basishöhe von n aufeinanderfolgenden Thw mit zunehmender Folgenzahl ab (Abb. 10.10, Abb. 10.11). Der Abfall ist dabei von Folgenzahl 1 bis 3 am größten, um dann von Folge 3 bis 5 deutlich langsamer zu fallen. Für Folgezahlen 6 bis 8 steigt der Trend wieder leicht auf ein Niveau von etwa 5 mm/a. Das Maximum wird für die Folgenzahl 1, welche gleichzeitig unabhängige Einzeltiden und damit die Reihe der HThw darstellt, mit einem Trend von 8,4 mm/a erreicht. Alle Trends bis auf Folgezahl 5 liegen über dem Trend des MThw = 3,8 mm/a. Der Trend der Folgezahl 5 liegt allerdings mit 3,7 mm/a nur leicht unter dem Trend des MThw und ist gleichzeitig der niedrigste Trend der Basishöhenentwicklung der Thw-Ketten für den Pegel Bremerhaven.

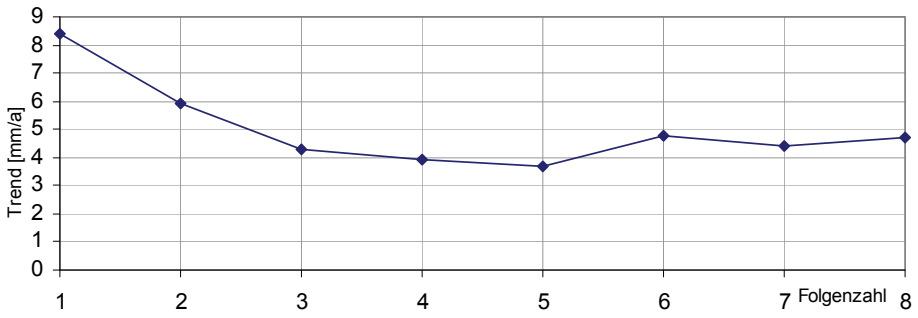


Abb. 10.10: Bremerhaven 1937-2008, Trendentwicklung max. Basishöhe Thw mit zunehmender Folgezahl

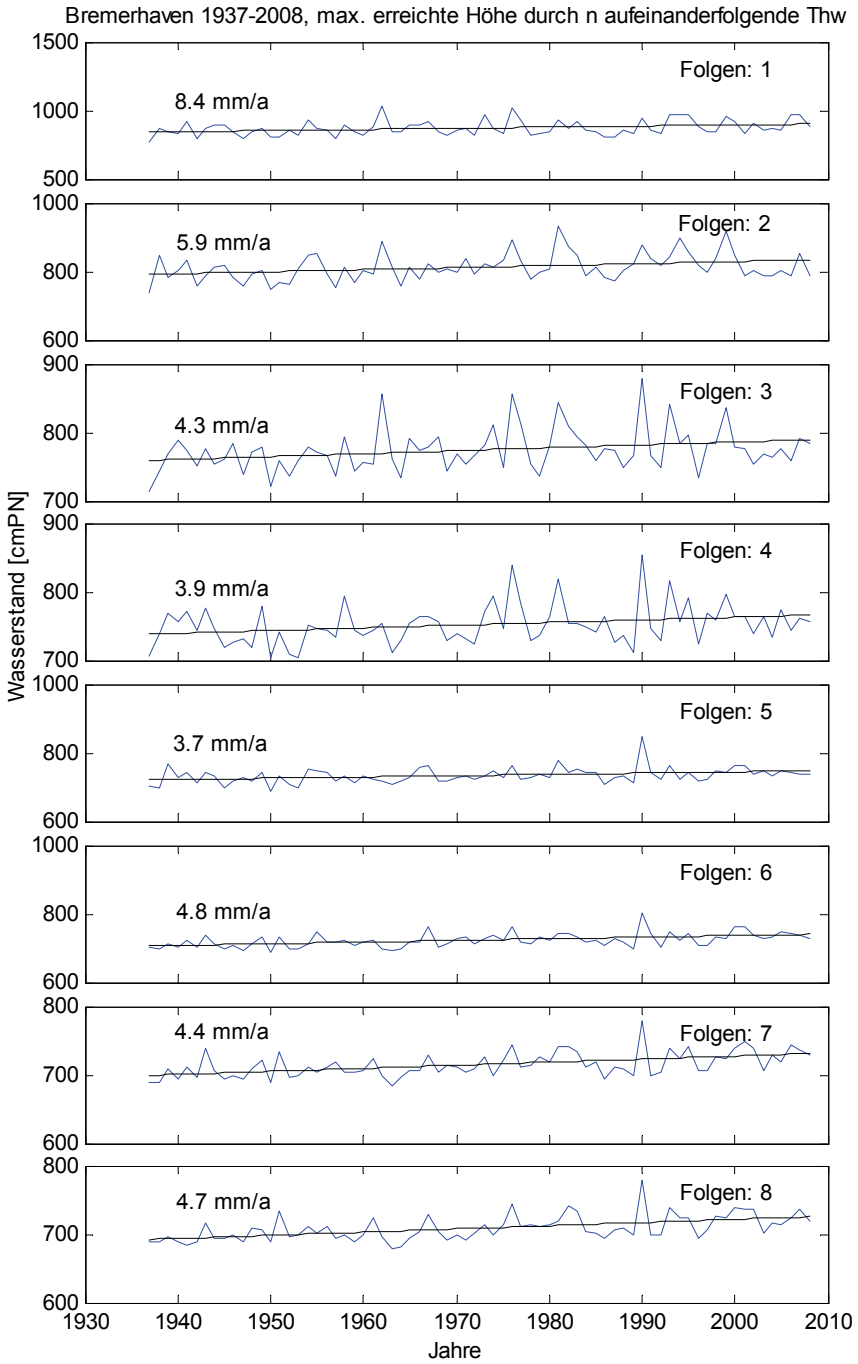


Abb. 10.11: Bremerhaven 1937-2008, maximal erreichte Basishöhe durch 1-8 aufeinanderfolgende Thw

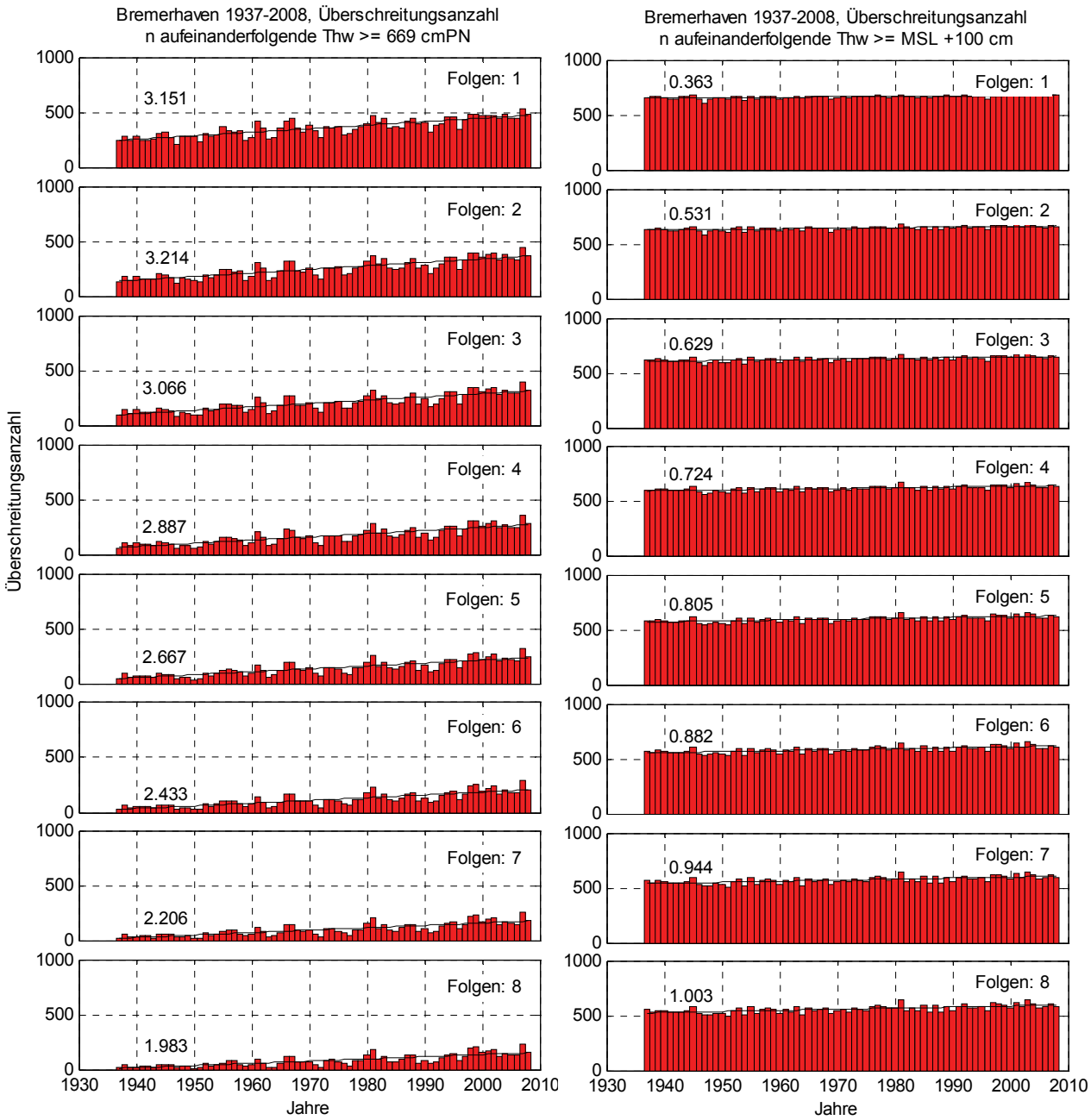


Abb. 10.12: Bremerhaven 1937-2008, Überschreitungszahlen durch 1-8 aufeinanderfolgende Thw. Links: ≥ $MThw_{1937\text{-}2008}$ + 0 cm = 669 cm, Rechts: ≥ MSL + 100 cm des jeweiligen Jahres

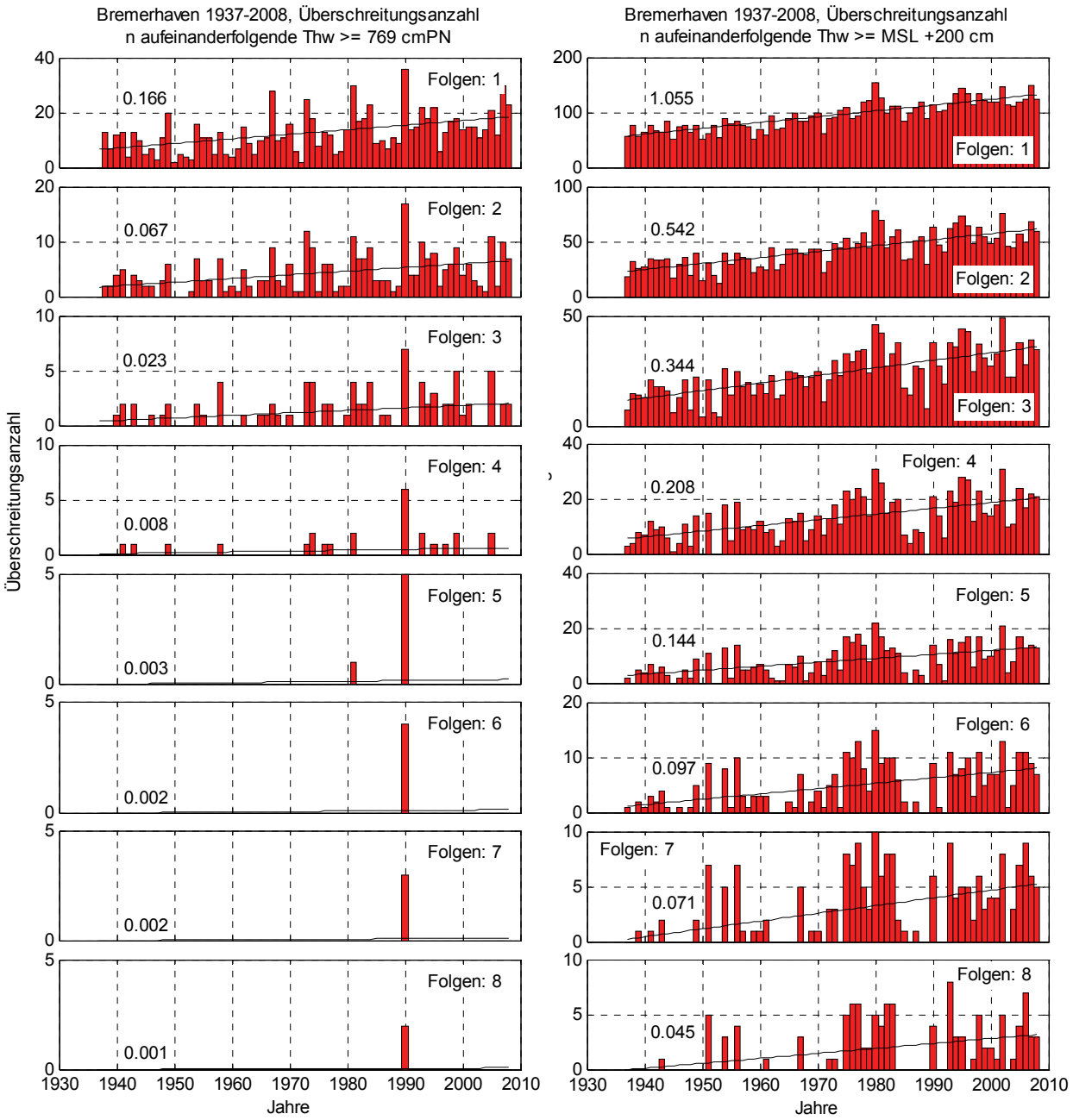


Abb. 10.13: Bremerhaven 1937-2008, Überschreitungszahlen durch 1-8 aufeinanderfolgende Thw. Links: ≥ $MThw_{1937\text{-}2008}$ + 100 cm = 769 cm, Rechts: ≥ MSL + 200 cm des jeweiligen Jahres

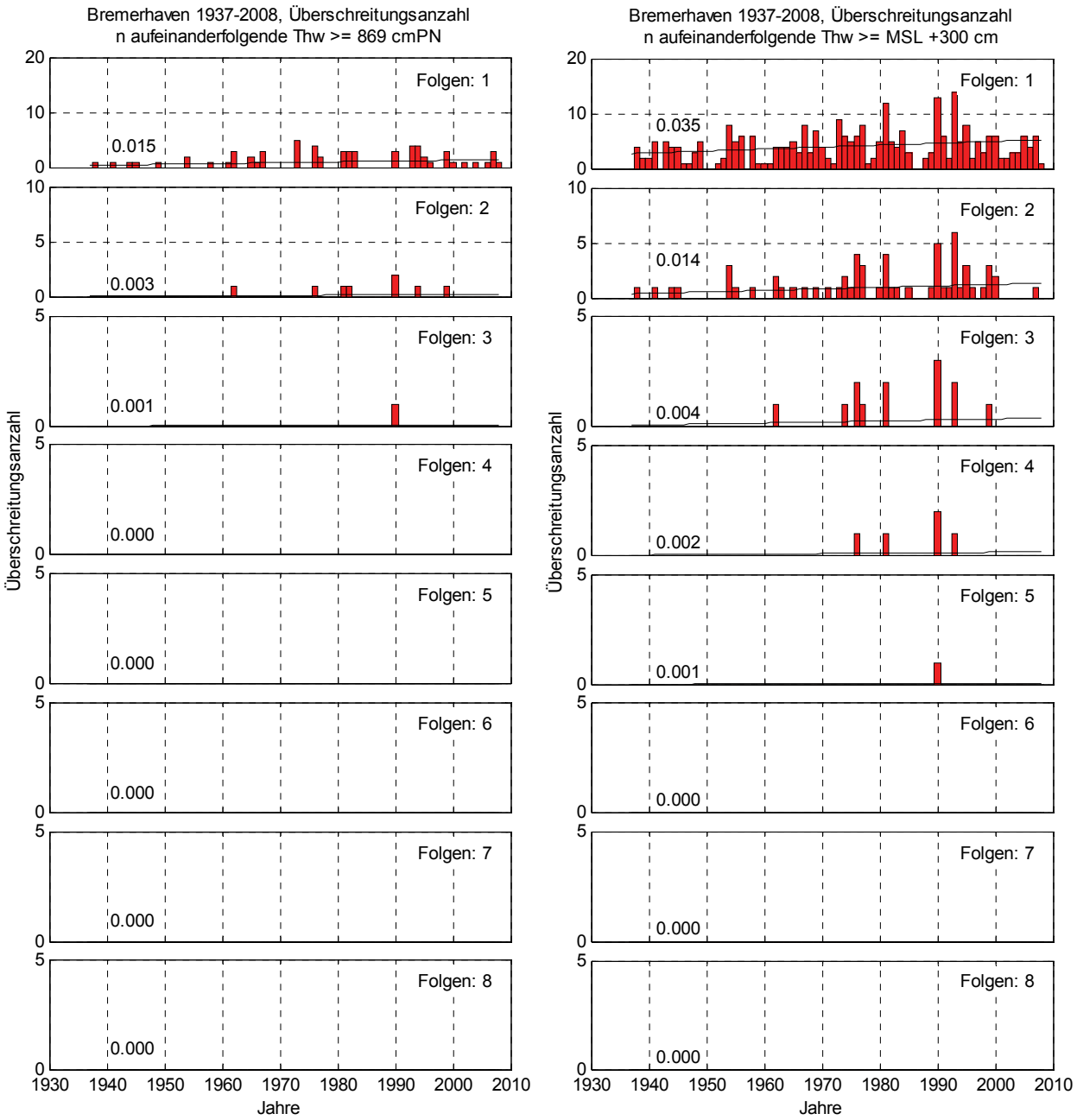


Abb. 10.14: Bremerhaven 1937-2008, Überschreitungszahlen durch 1-8 aufeinanderfolgende Thw. Links: ≥ $MThw_{1937\text{-}2008}$ + 200 cm = 869 cm, Rechts: ≥ MSL + 300 cm des jeweiligen Jahres

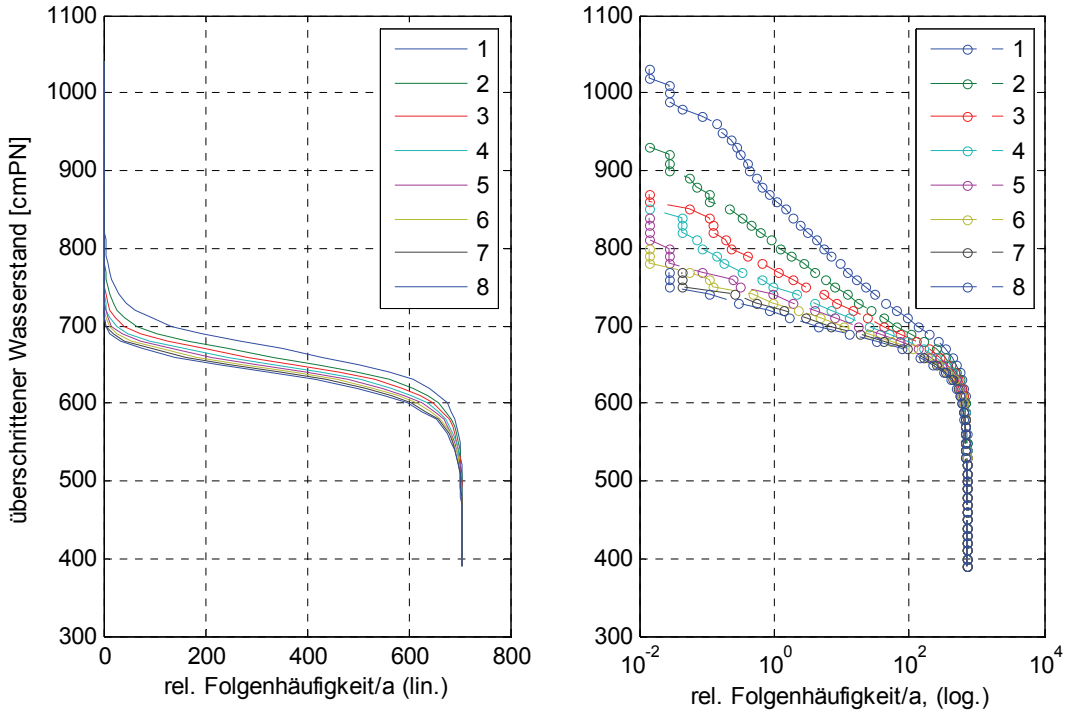


Abb. 10.15: Bremerhaven 1937-2008, relative Häufigkeiten aufeinanderfolgender Thw

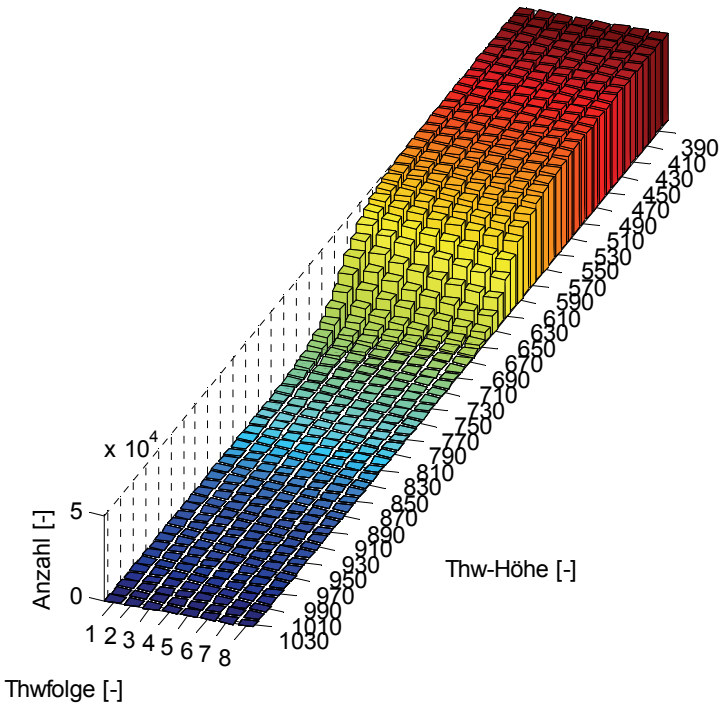


Abb. 10.16: Bremerhaven 1937-2008, Thw-Folgezahlen

11 Leuchtturm Alte Weser

11.1 Tideniedrigwasser

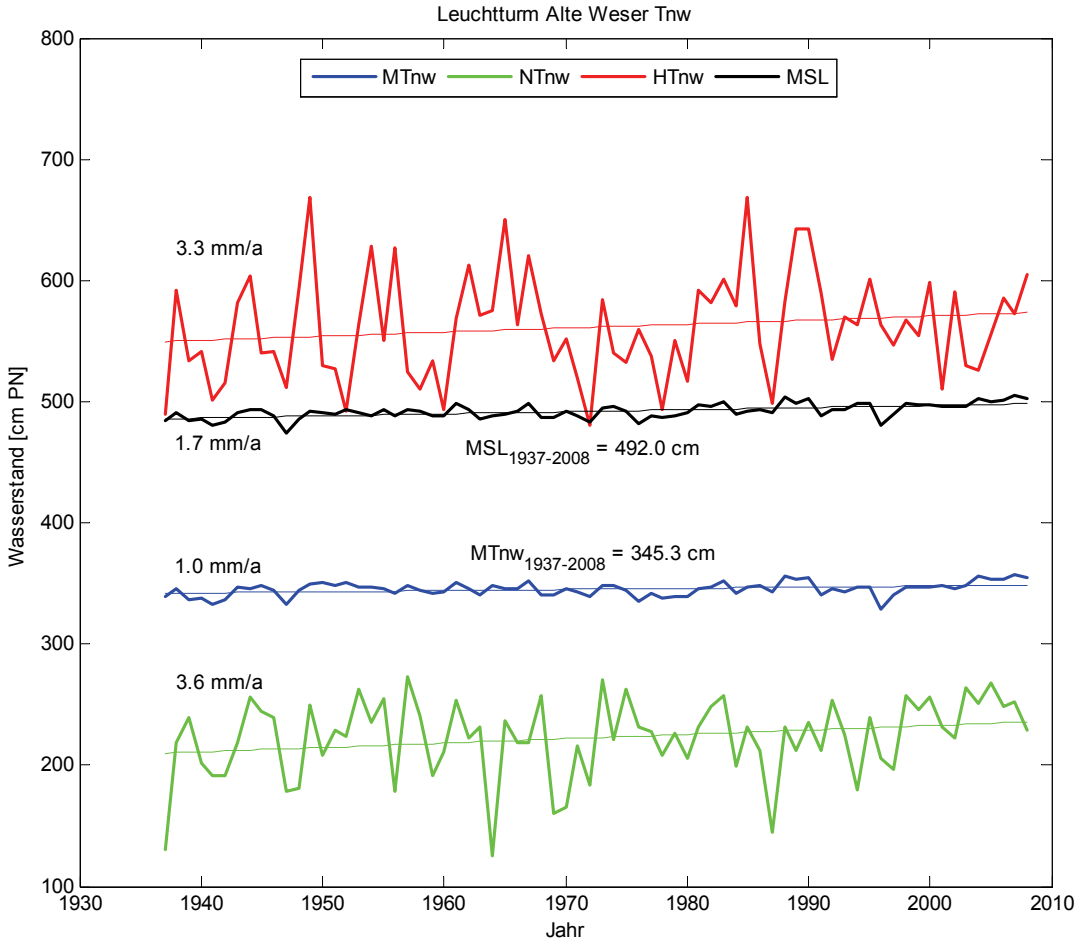


Abb. 11.1: Tnw + MSL Trends LT Alte Weser 1937 – 2008

Tendenziell nimmt der Trend der maximal erreichten Basishöhe von n aufeinanderfolgenden Tnw mit zunehmender Folgenzahl ab (Abb. 11.2, Abb. 11.3). Die Trendabnahme ist dabei aber relativ gering und verläuft in einer Bandbreite zwischen 2 und 3,5 mm/a. Das Maximum wird bei 3 aufeinanderfolgenden Tnw mit einem Trend von 3,5 mm/a erreicht. Dieser Trend ist größer als der Trend der HTnw = 3,3 mm/a. Alle Trends liegen deutlich über dem Trend des MTnw = 1,0 mm/a. Der niedrigste Trend beträgt 2,0 mm/a und wird für 8 aufeinanderfolgende Tnw erreicht.

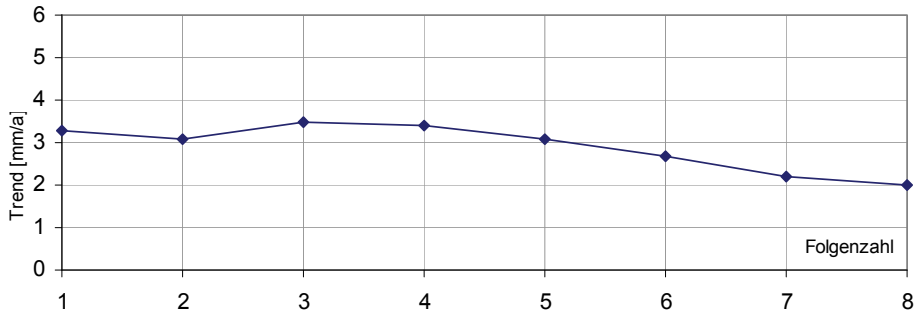


Abb. 11.2: LT Alte Weser 1937-2008, Trendentwicklung max. Basishöhe Tnw mit zunehmender Folgezahl

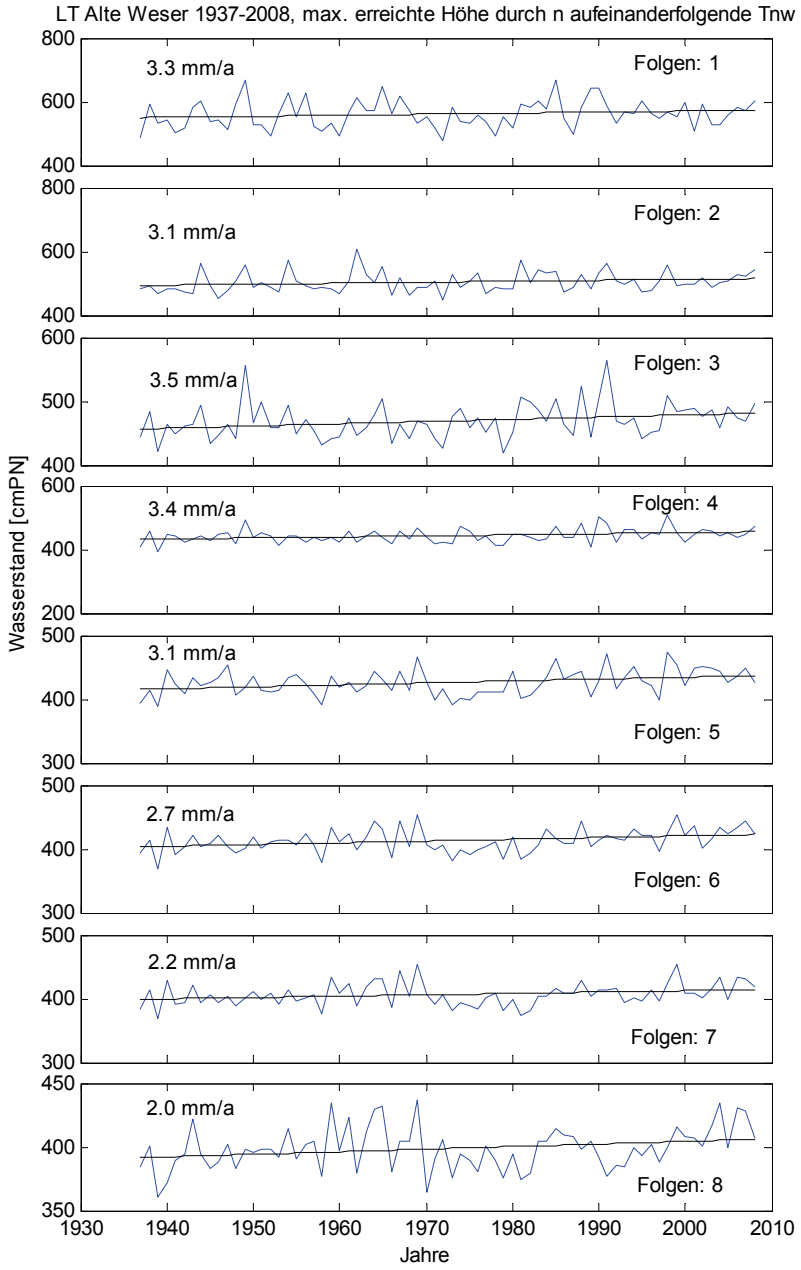


Abb. 11.3 LT Alte Weser 1937-2008, maximal erreichte Basishöhe durch 1-8 aufeinanderfolgende Tnw

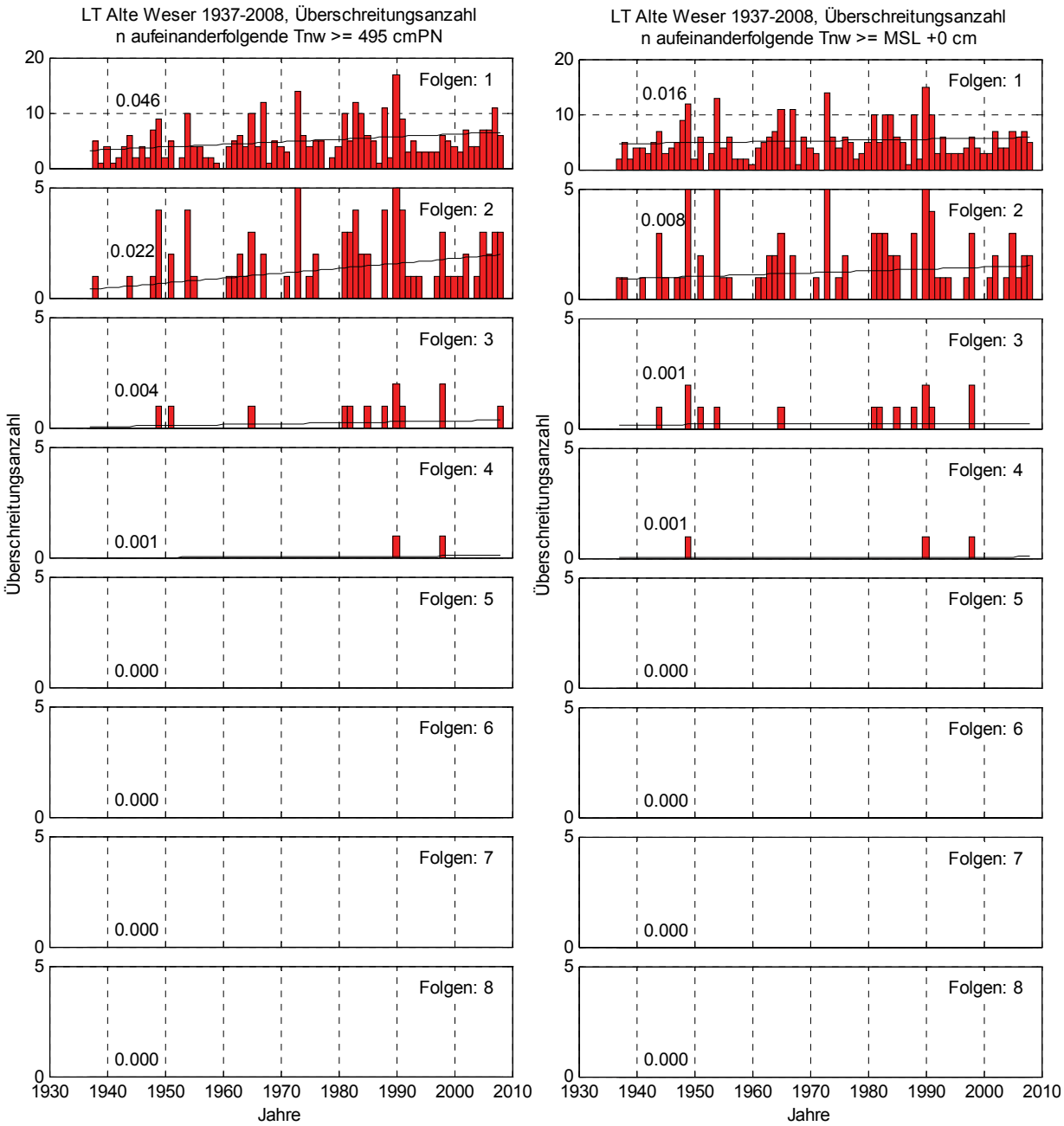


Abb. 11.4: LT Alte Weser 1937-2008, Überschreitungszahlen durch 1-8 aufeinanderfolgende Tnw. Links: ≥ $MTnw_{1937\text{-}2008}$ + 150 cm = 495 cm, Rechts: ≥ MSL + 0 cm des jeweiligen Jahres

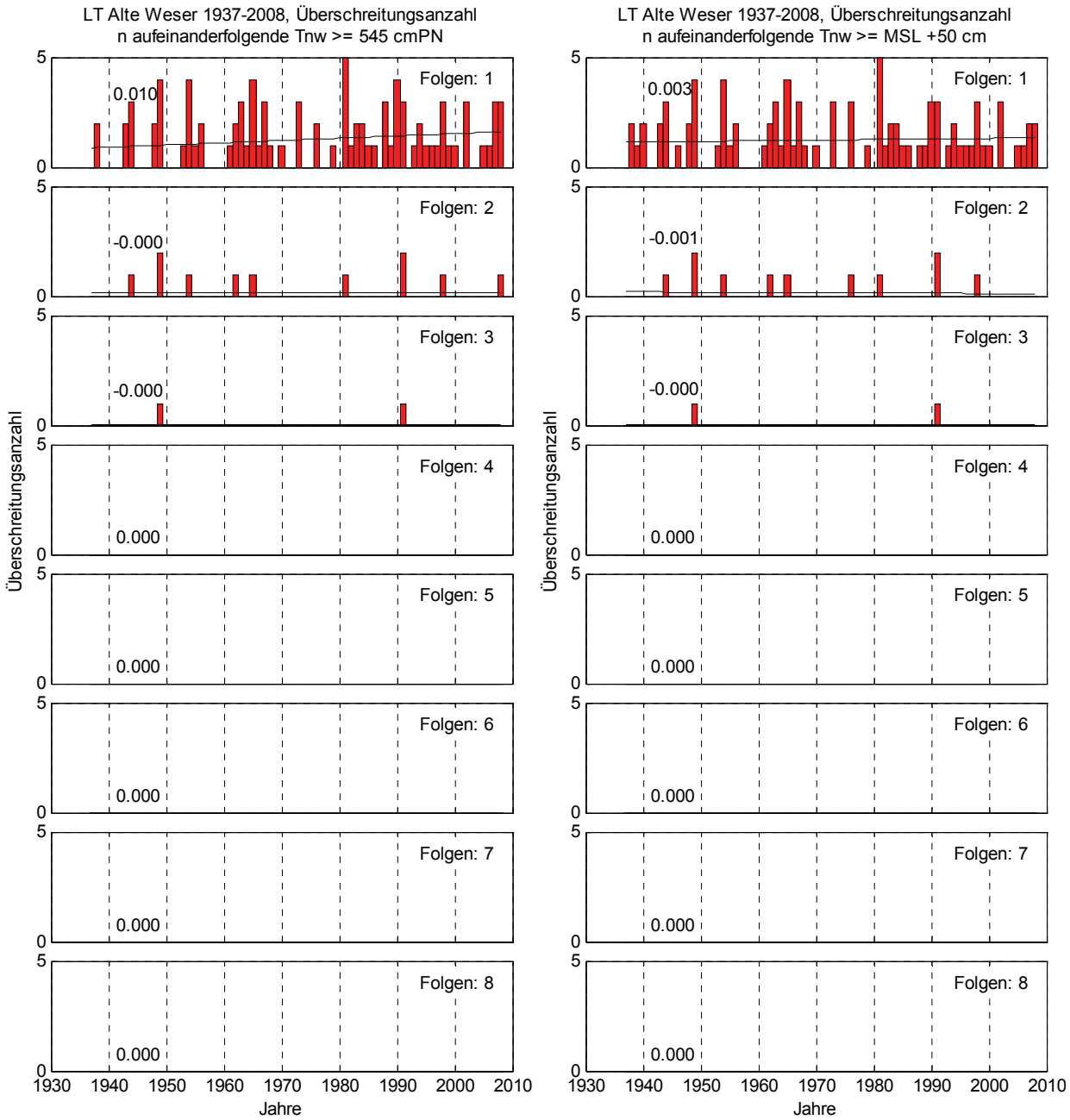


Abb. 11.5: LT Alte Weser 1937-2008, Überschreitungszahlen durch 1-8 aufeinanderfolgende Tnw. Links: ≥ $MTnw_{1937\text{-}2008}$ + 200 cm = 545 cm, Rechts: ≥ MSL + 50 cm des jeweiligen Jahres

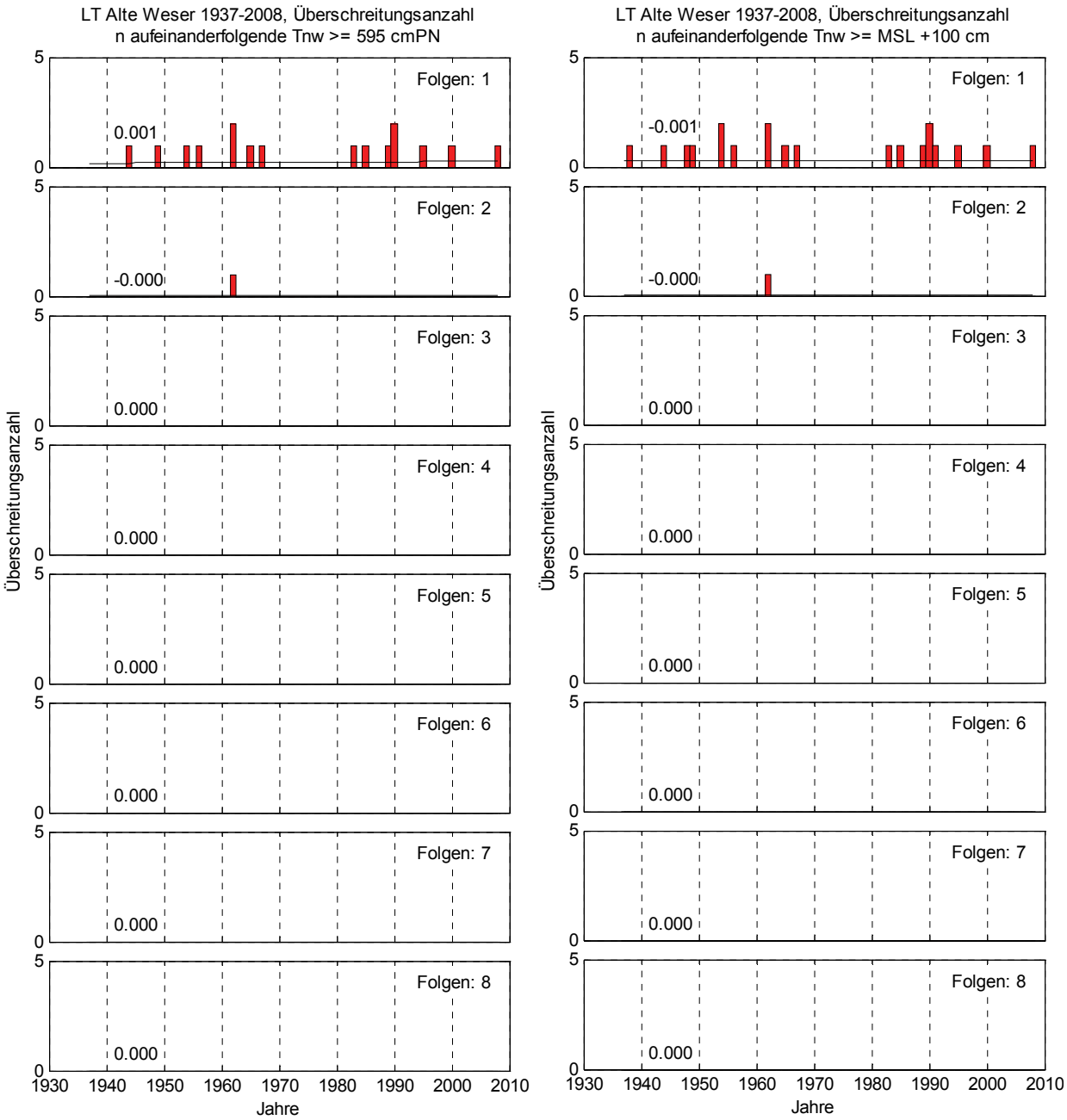


Abb. 11.6: LT Alte Weser 1937-2008, Überschreitungszahlen durch 1-8 aufeinanderfolgende Tnw. Links: ≥ $MTnw_{1937\text{-}2008}$ + 250 cm = 595 cm, Rechts: ≥ MSL + 100 cm des jeweiligen Jahres

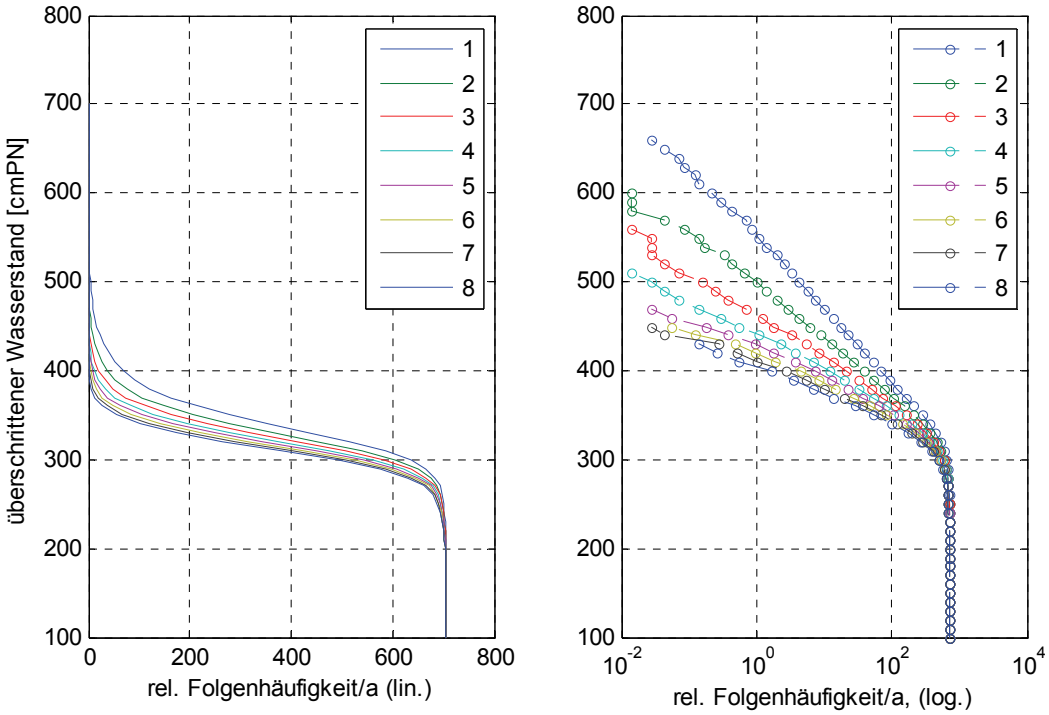


Abb. 11.7: LT Alte Weser 1937-2008, relative Häufigkeiten aufeinanderfolgender Tnw

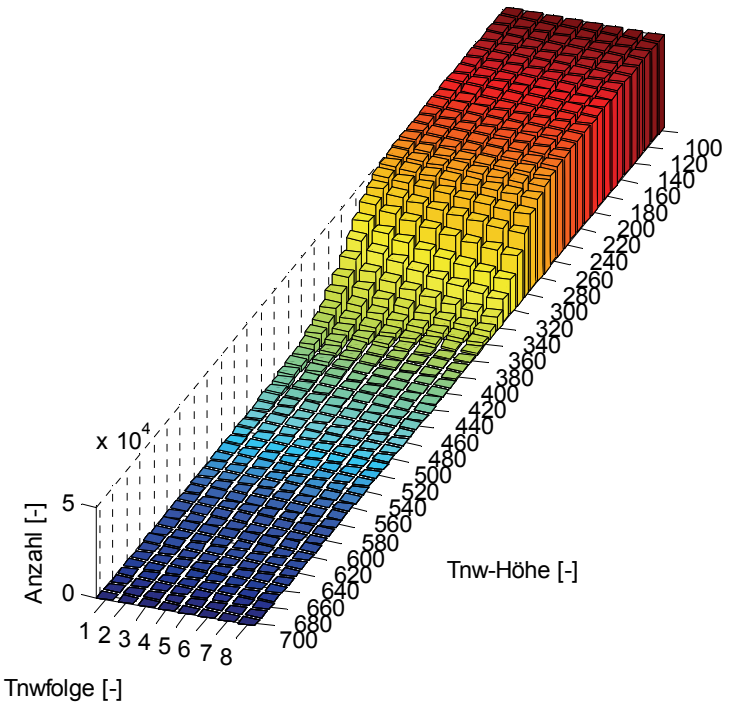


Abb. 11.8: LT Alte Weser 1937-2008, Tnw-Folgezahlen

11.2 Tidehochwasser

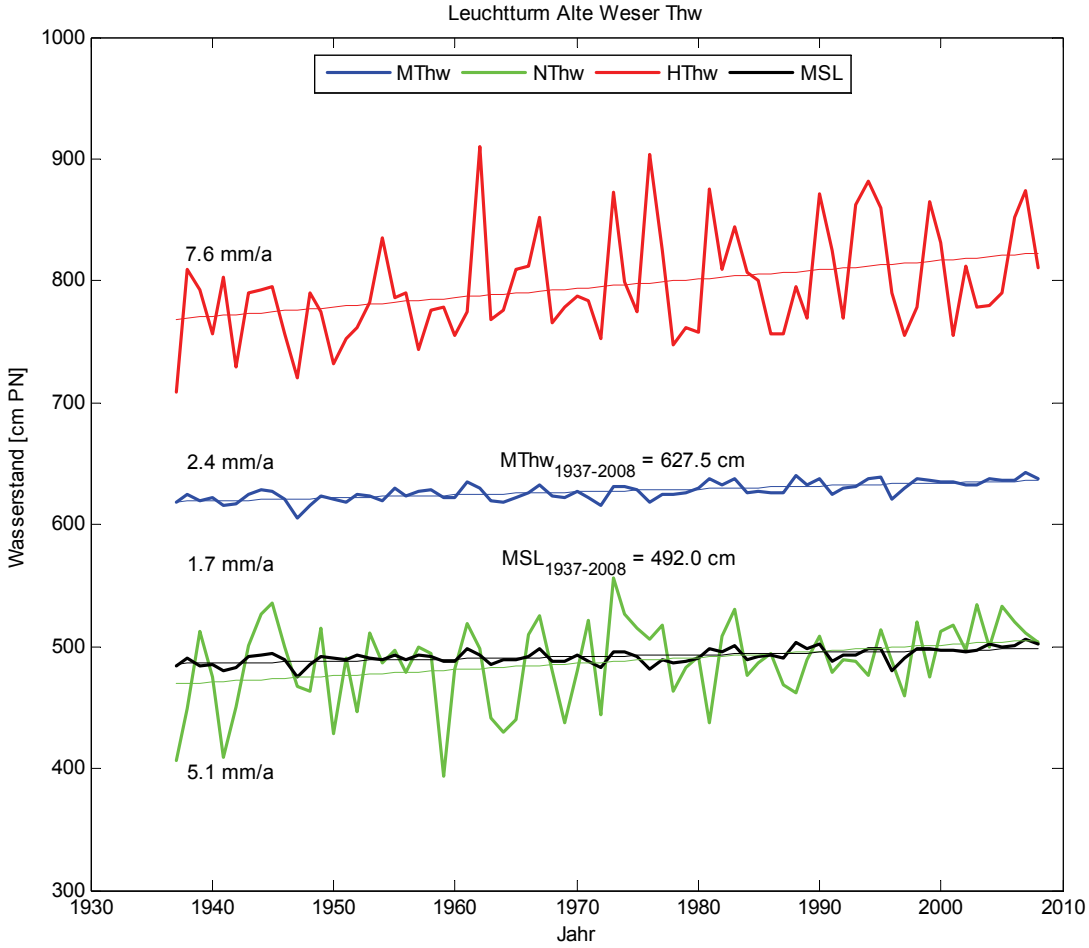


Abb. 11.9: Thw + MSL Trends LT Alte Weser 1937 – 2008

Tendenziell nimmt der Trend der maximal erreichten Basishöhe von n aufeinanderfolgenden Thw mit zunehmender Folgenzahl ab (Abb. 11.10, Abb. 11.11,). Der Abfall ist dabei von Folgenzahl 1 bis 3 sehr gleichmäßig, um dann zwischen Folge 3 und Folge 8 kaum noch geringer zu werden, sondern auf nahezu gleichbleibendem Trend von etwa 3 mm/a zu verbleiben. Das Maximum wird für die Folgenzahl 1, welche gleichzeitig unabhängige Einzeltiden und damit die Reihe der HThw darstellt, mit einem Trend von 7,6 mm/a erreicht. Alle Trends liegen über dem Trend des MThw = 2,4 mm/a. Trends für Folgenzahlen von 1 und 2 liegen über dem Trend der NThw = 5,1 mm/a. Der niedrigste Trend beträgt 2,4 mm/a und wird für 5 aufeinanderfolgende Thw erreicht.

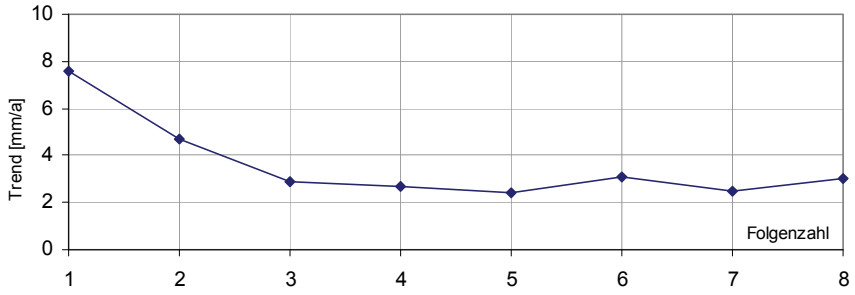


Abb. 11.10: LT Alte Weser 1937-2008, Trendentwicklung max. Basishöhe Thw mit zunehmender Folgezahl

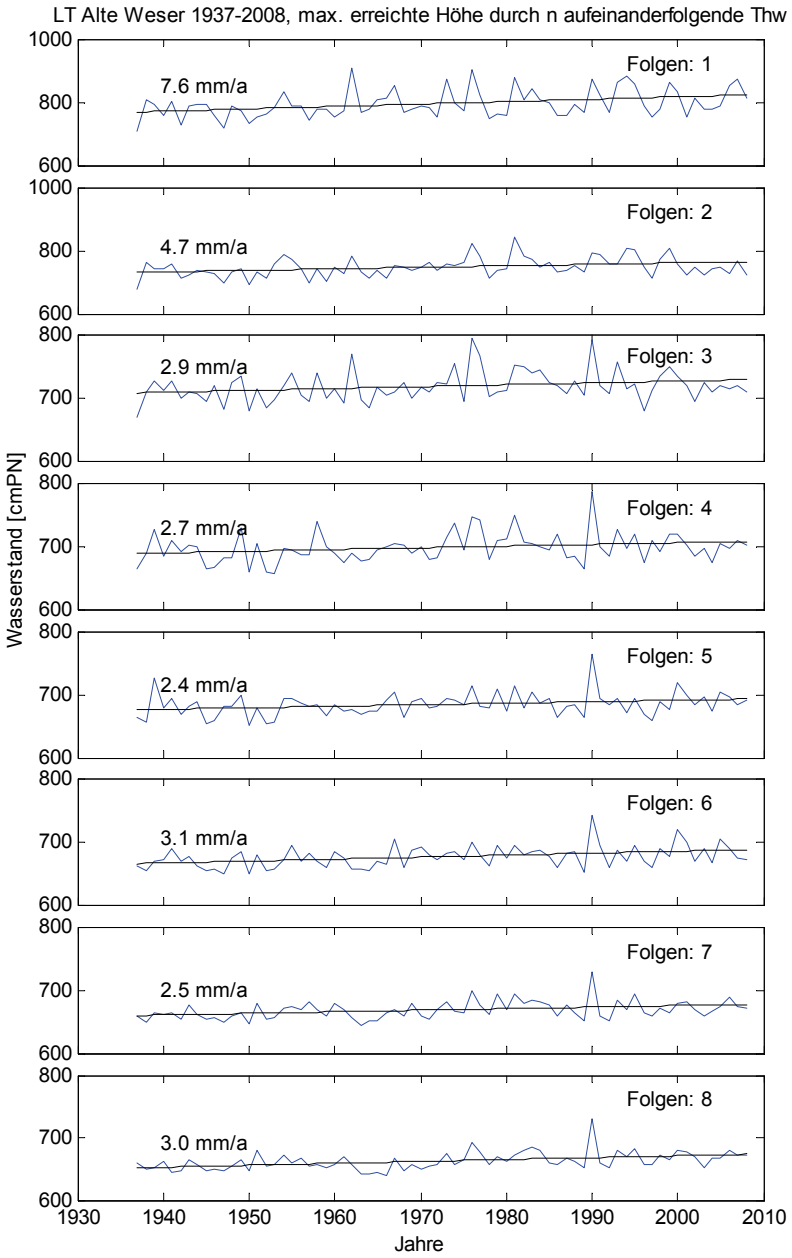


Abb. 11.11: LT Alte Weser 1937-2008, maximal erreichte Basishöhe durch 1-8 aufeinanderfolgende Thw

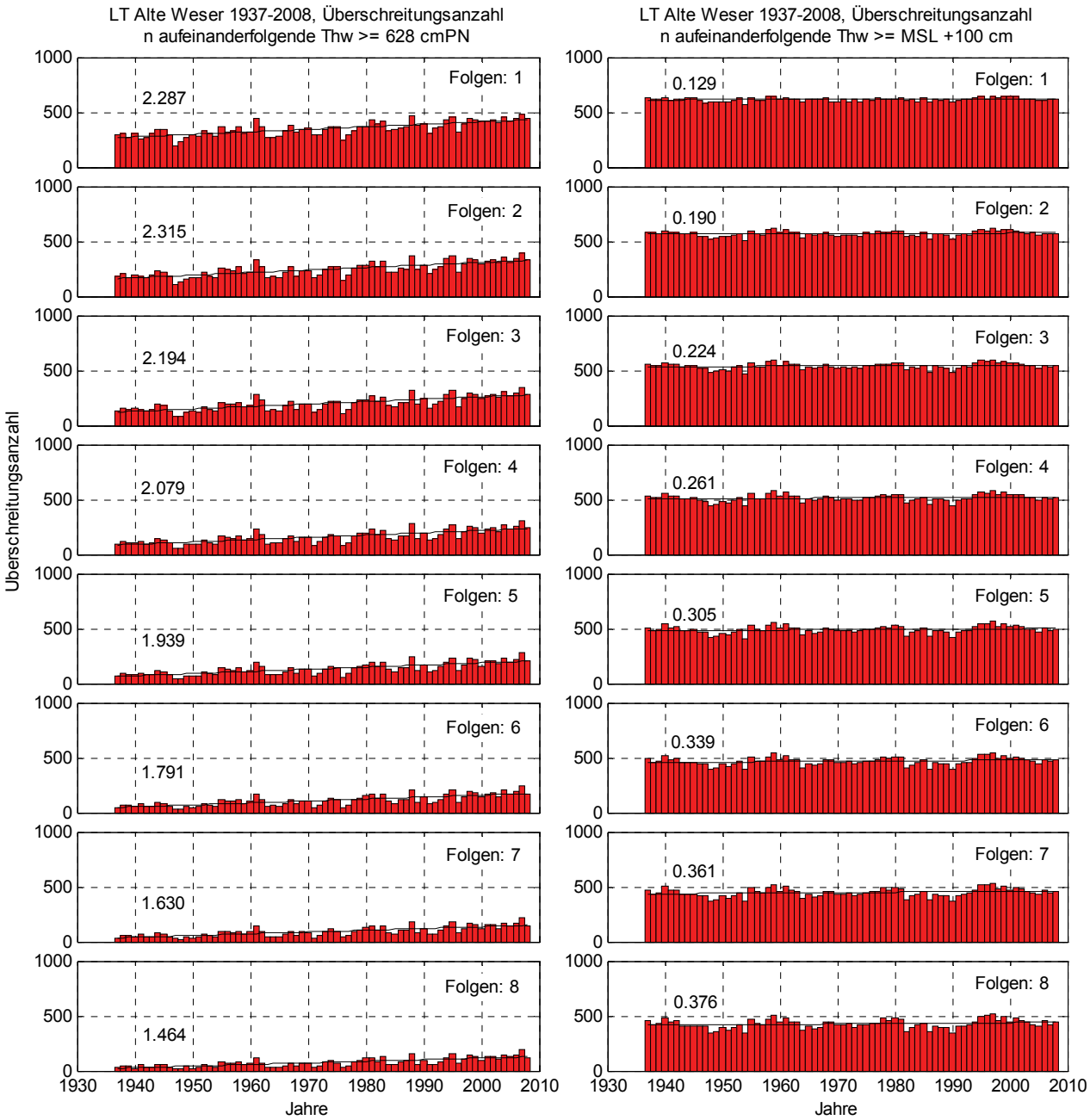


Abb. 11.12: LT Alte Weser 1937-2008, Überschreitungszahlen durch 1-8 aufeinanderfolgende Thw. Links: ≥ $MThw_{1937\text{-}2008}$ + 0 cm = 628 cm, Rechts: ≥ MSL + 100 cm des jeweiligen Jahres

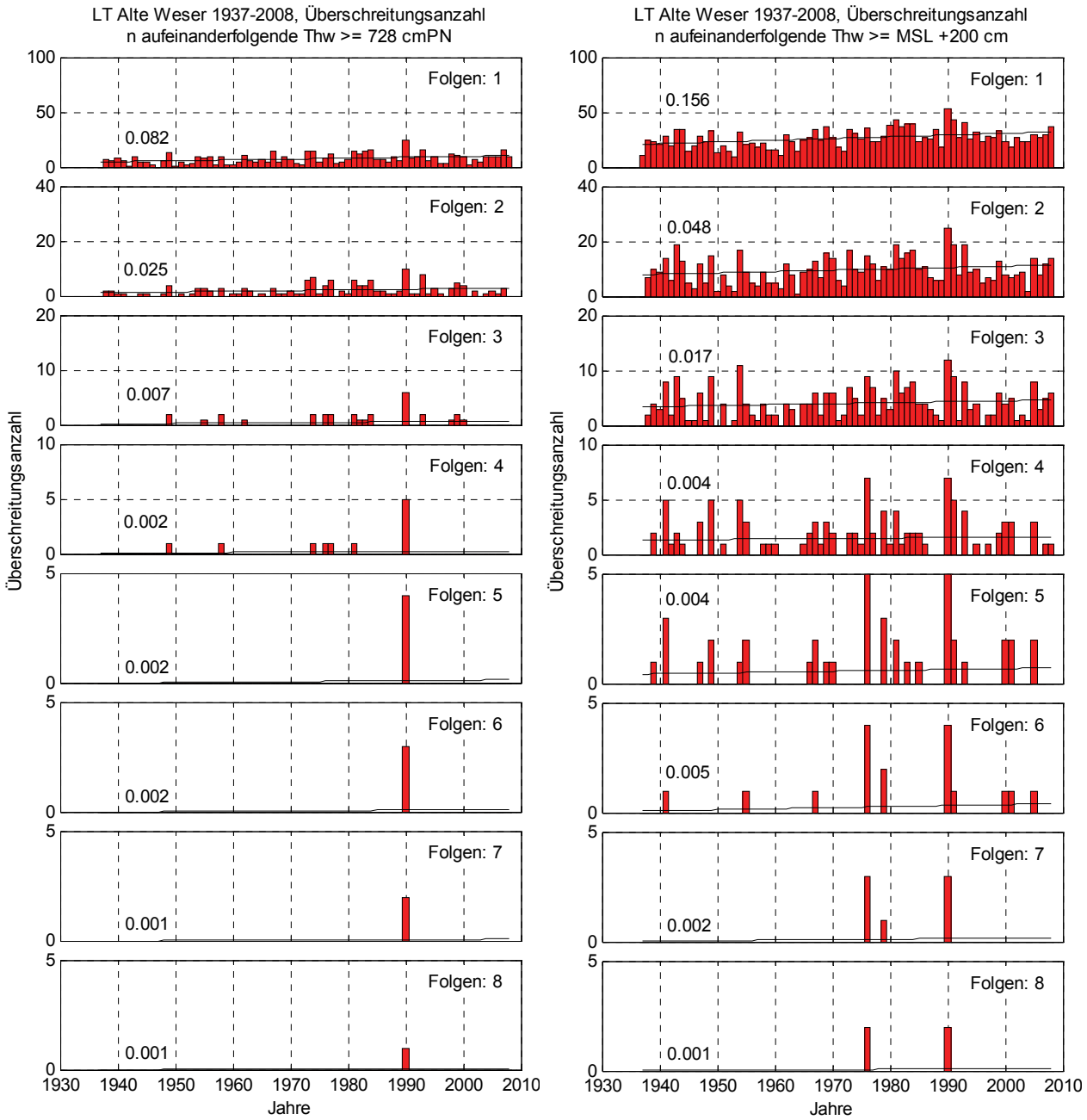


Abb. 11.13: LT Alte Weser 1937-2008, Überschreitungszahlen durch 1-8 aufeinanderfolgende Thw. Links: ≥ $MThw_{1937\text{-}2008}$ + 100 cm = 728 cm, Rechts: ≥ MSL + 200 cm des jeweiligen Jahres

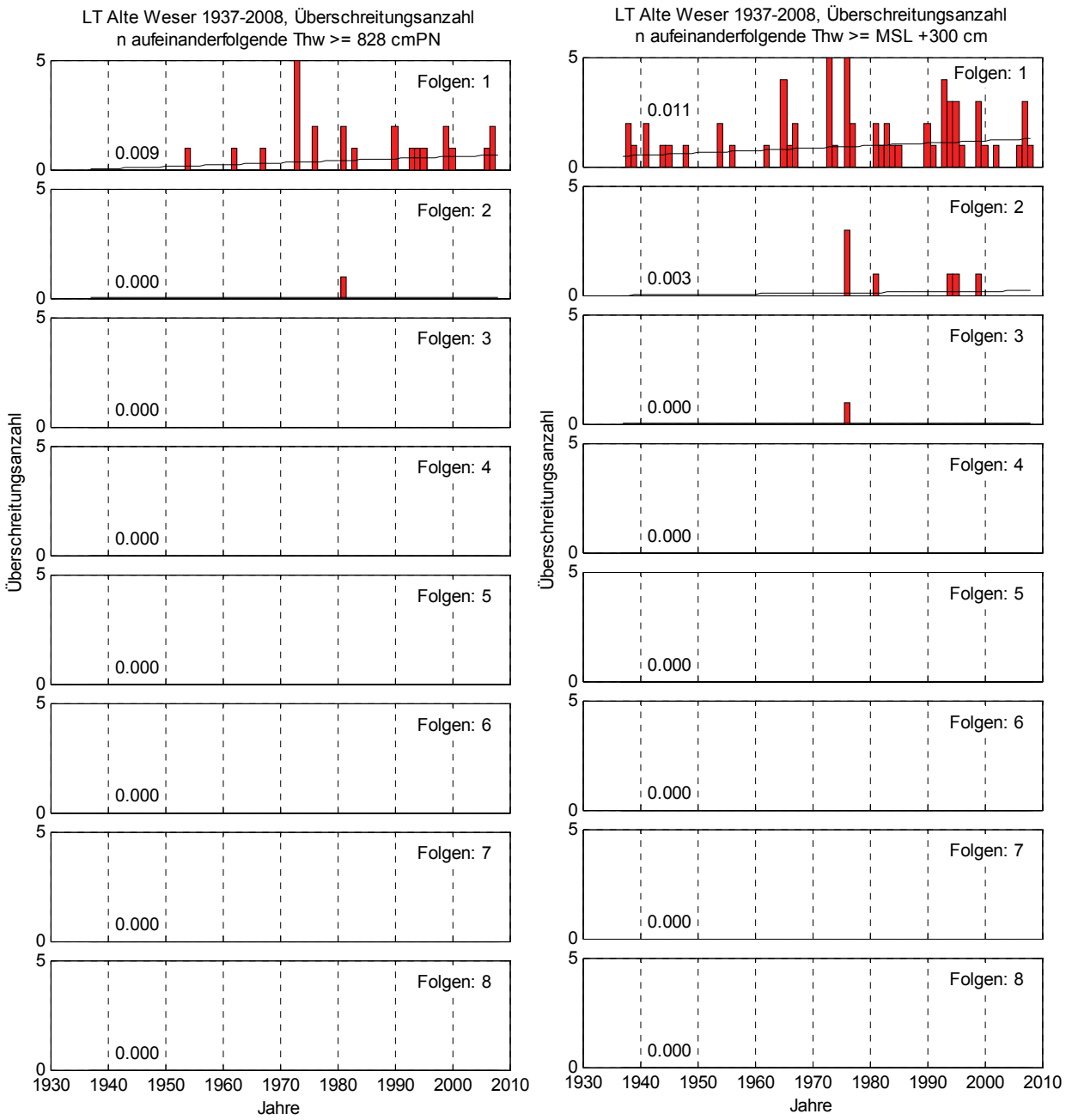


Abb. 11.14: LT Alte Weser 1937-2008, Überschreitungszahlen durch 1-8 aufeinanderfolgende Thw. Links: ≥ $MThw_{1937\text{-}2008}$ + 200 cm = 828 cm, Rechts: ≥ MSL + 300 cm des jeweiligen Jahres

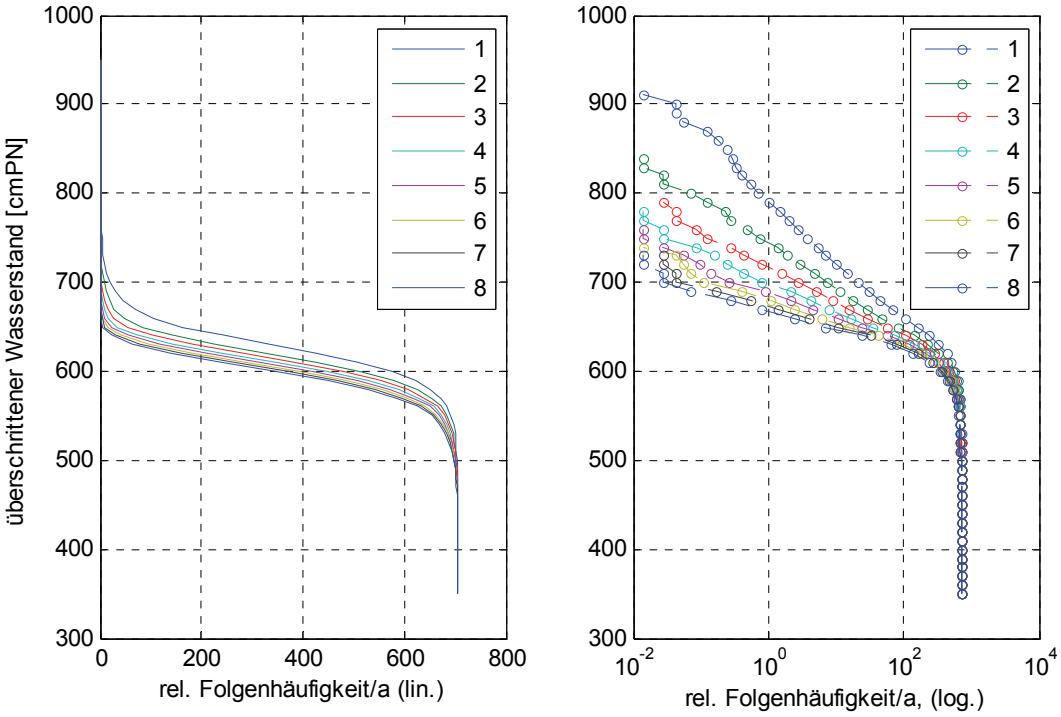


Abb. 11.15: LT Alte Weser 1937-2008, relative Häufigkeiten aufeinanderfolgender Thw

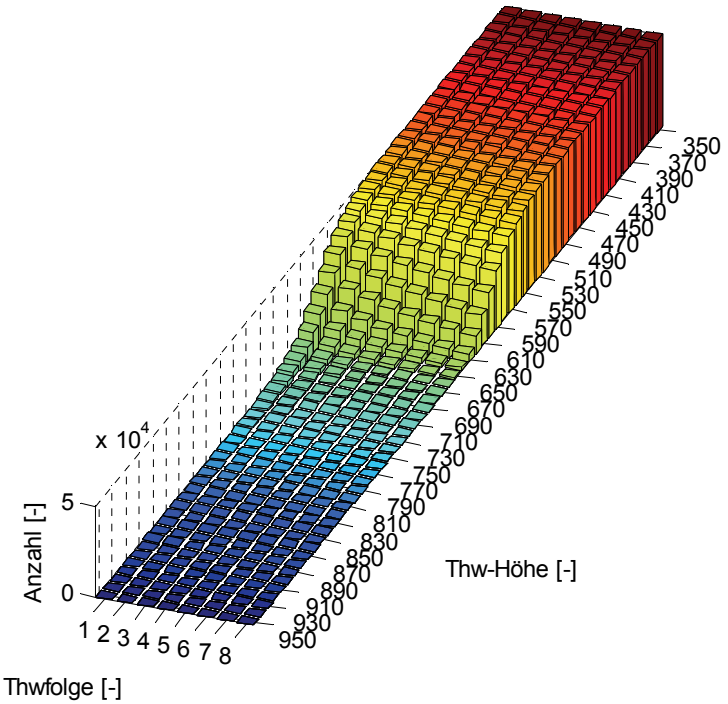


Abb. 11.16: LT Alte Weser 1937-2008, Thw-Folgezahlen

12 Wilhelmshaven

12.1 Tideniedrigwasser

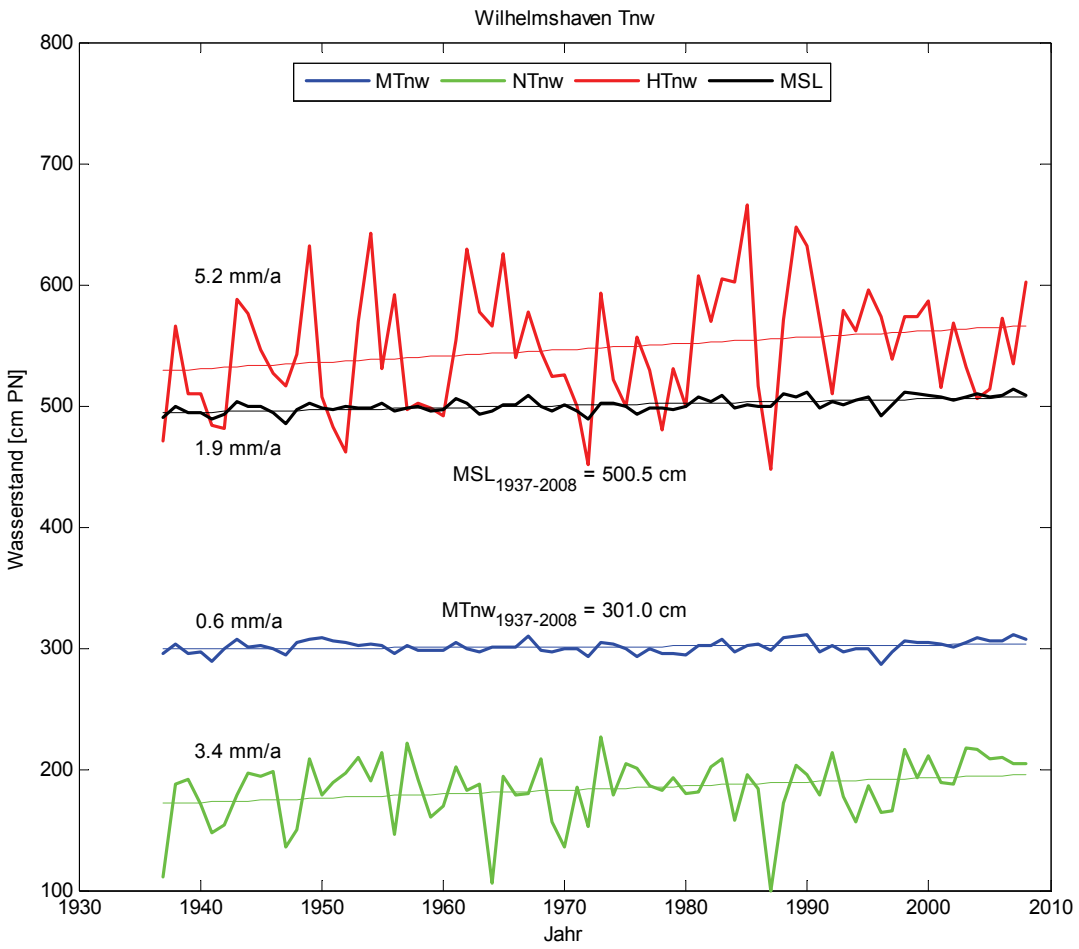


Abb. 12.1: Tnw + MSL Trends Wilhelmshaven 1937 – 2008

Tendenziell nimmt der Trend der maximal erreichten Basishöhe von n aufeinanderfolgenden Tnw mit zunehmender Folgenzahl ab (Abb. 12.2, Abb. 12.3). Das Maximum wird für die Folgenzahl 1, welche gleichzeitig unabhängige Einzeltiden und damit die Reihe der HTnw darstellt, mit einem Trend von 5,2 mm/a erreicht. Alle Trends liegen deutlich über dem Trend des MTnw = 0,6 mm/a. Der niedrigste Trend beträgt 1,7 mm/a und wird für 8 aufeinanderfolgende Tnw erreicht.

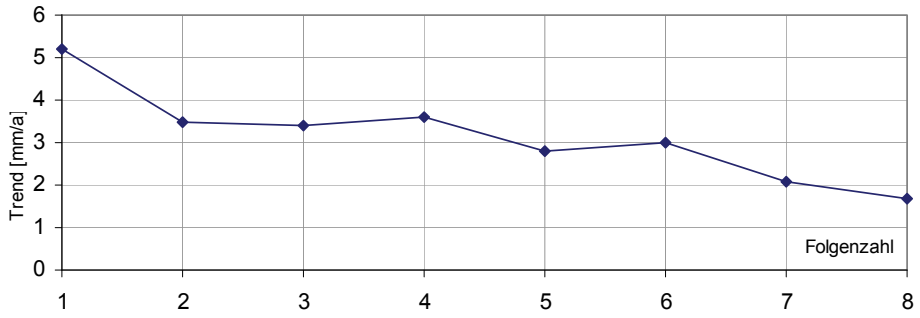


Abb. 12.2: Wilhelmshaven 1937-2008, Trendentwicklung max. Basishöhe Tnw mit zunehmender Folgezahl

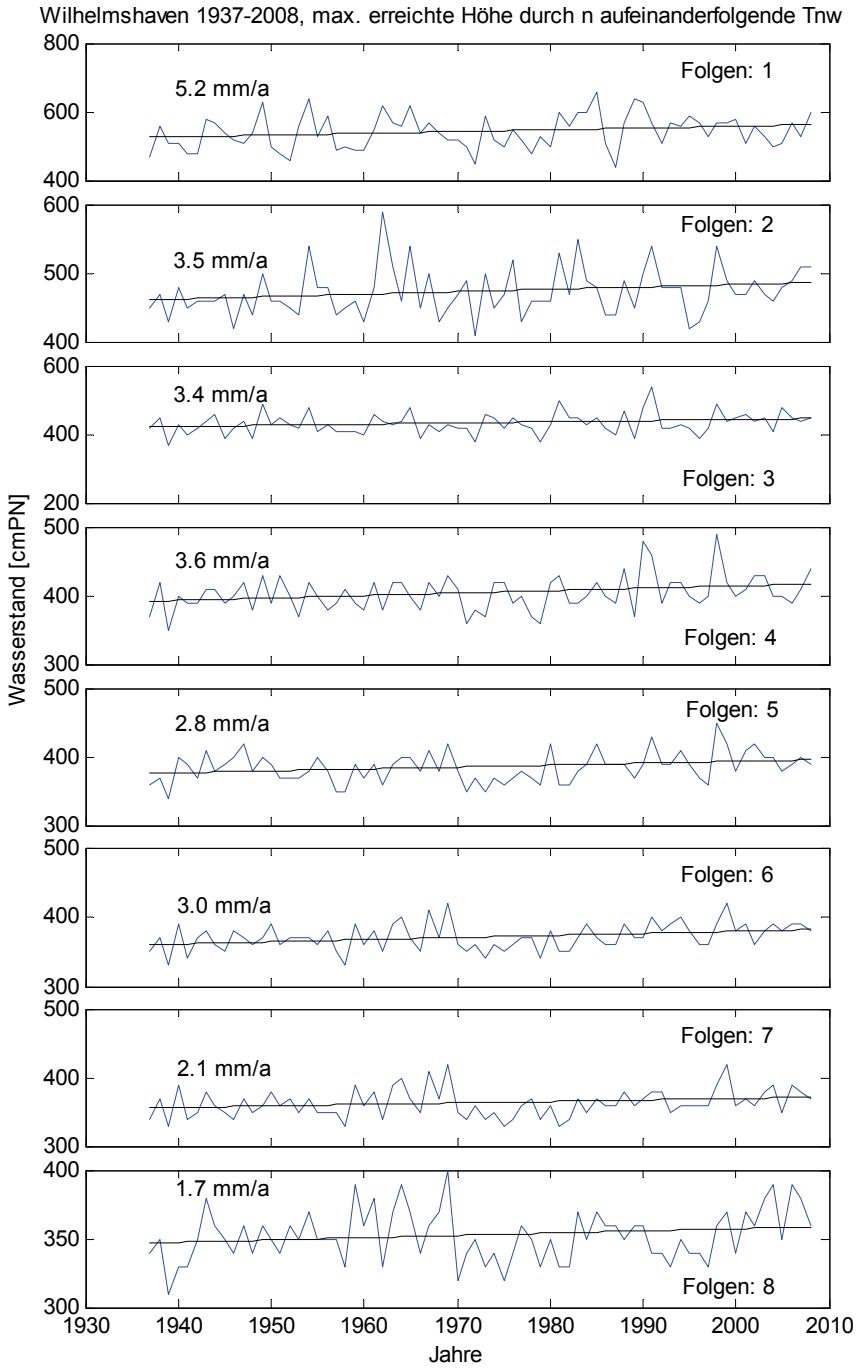


Abb. 12.3 Wilhelmshaven 1937-2008, maximal erreichte Basishöhe durch 1-8 aufeinanderfolgende Tnw

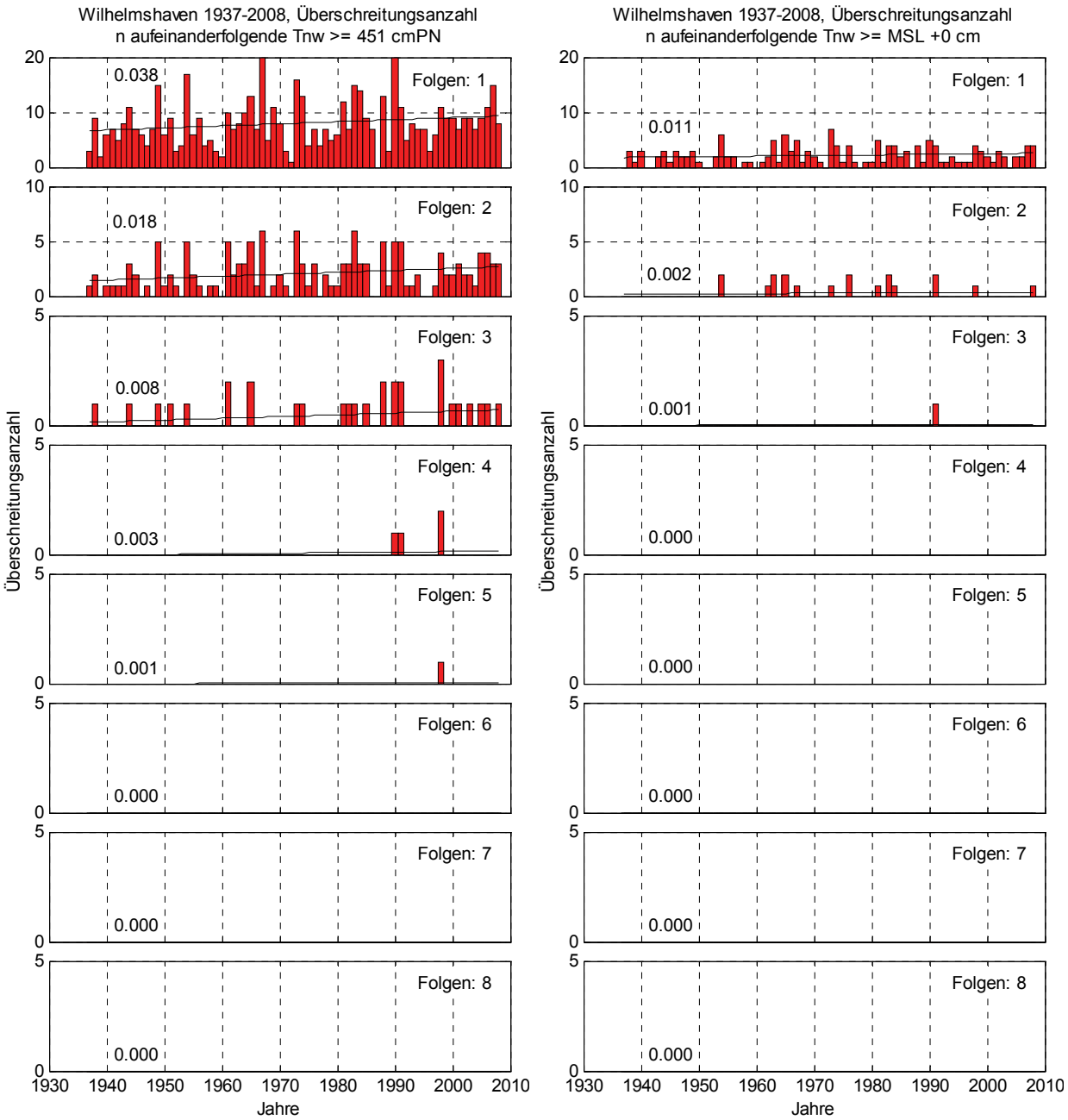


Abb. 12.4: Wilhelmshaven 1937-2008, Überschreitungszahlen durch 1-8 aufeinanderfolgende Tnw. Links: ≥ $MTnw_{1937\text{-}2008}$ + 150 cm = 451 cm, Rechts: ≥ MSL + 0 cm des jeweiligen Jahres

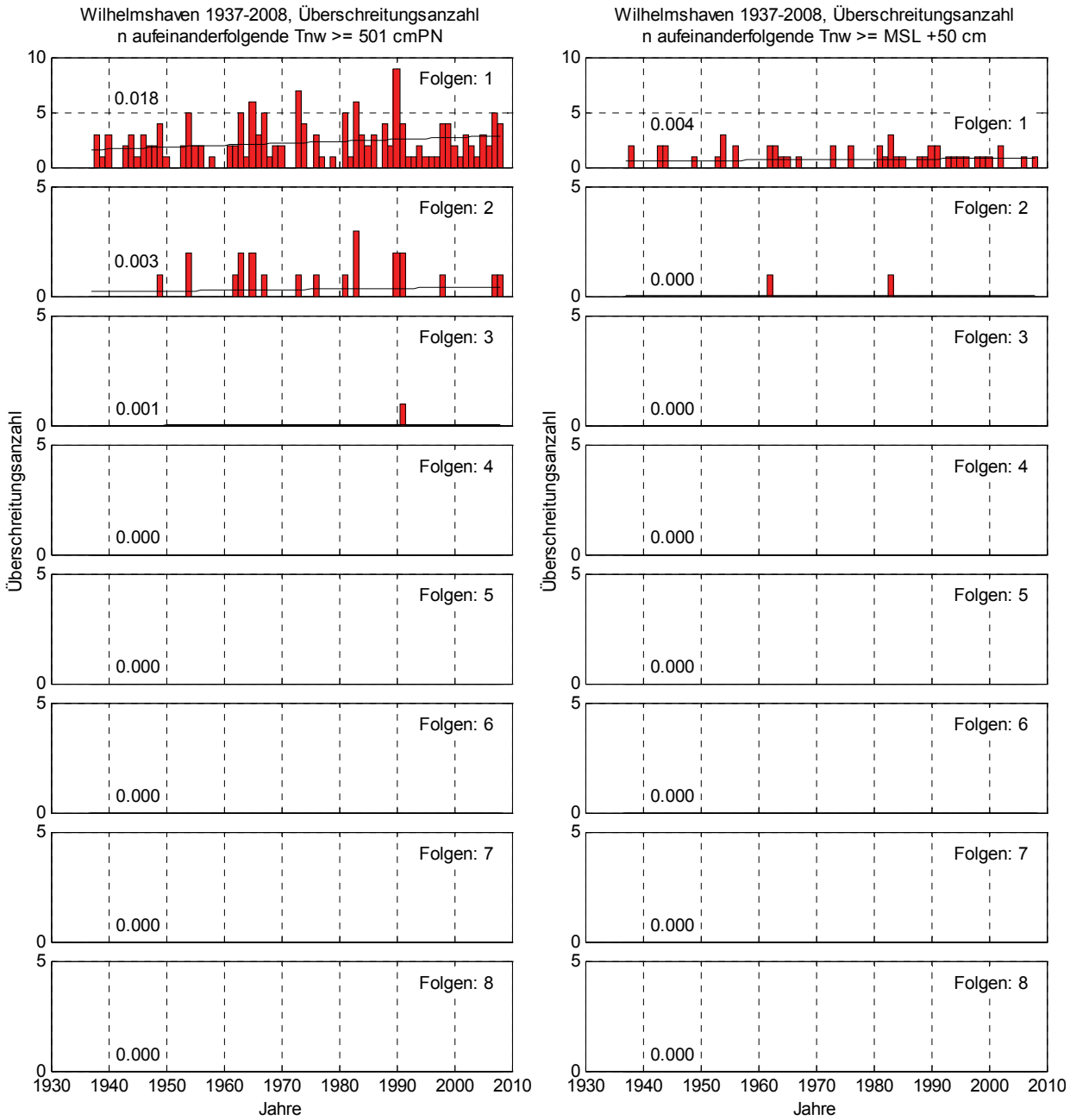


Abb. 12.5: Wilhelmshaven 1937-2008, Überschreitungszahlen durch 1-8 aufeinanderfolgende Tnw. Links: ≥ $MTnw_{1937\text{-}2008}$ + 200 cm = 501 cm, Rechts: ≥ MSL + 50 cm des jeweiligen Jahres

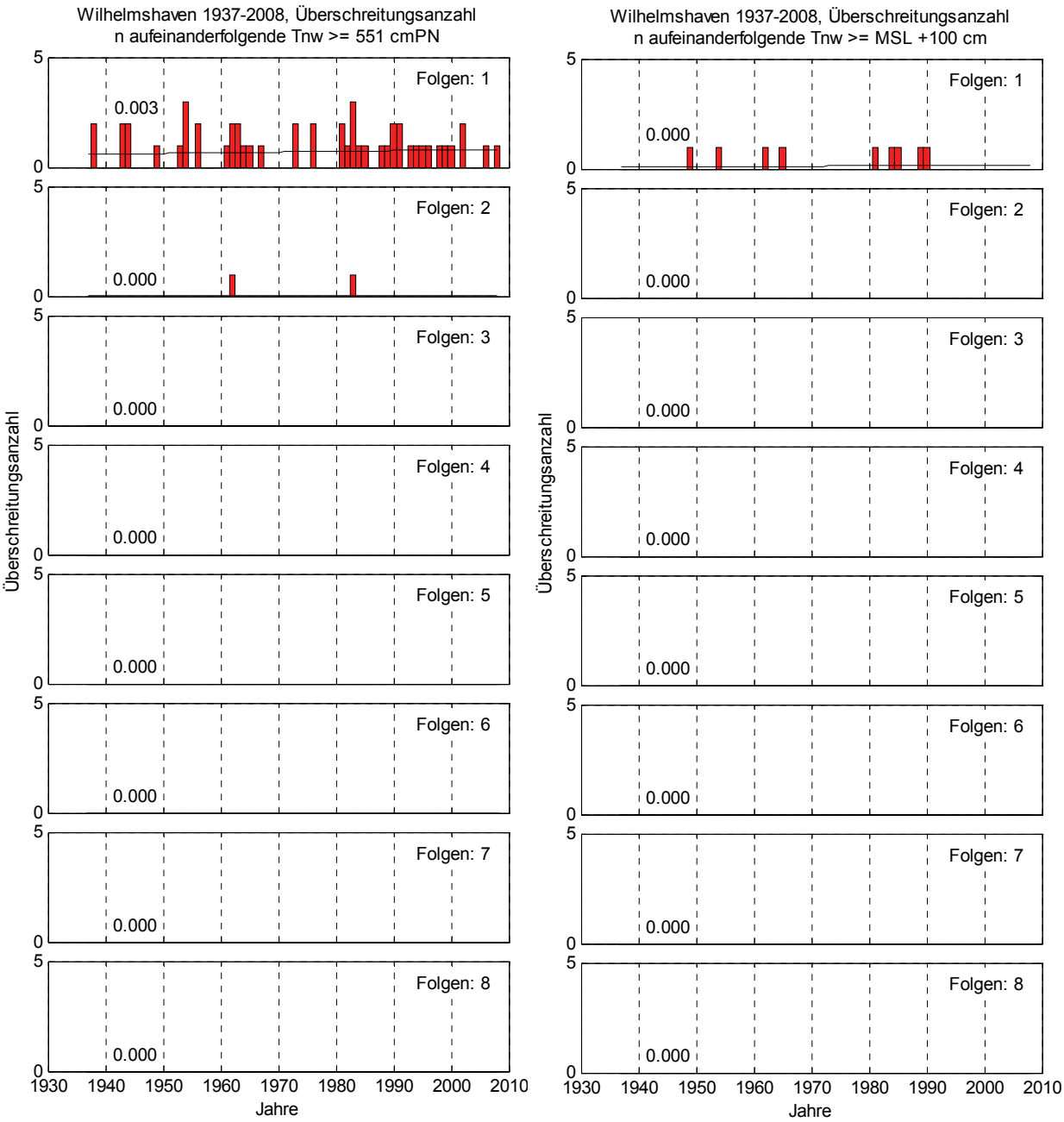


Abb. 12.6: Wilhelmshaven 1937-2008, Überschreitungszahlen durch 1-8 aufeinanderfolgende Tnw. Links: ≥ $MTnw_{1937\text{-}2008}$ + 250 cm = 551 cm, Rechts: ≥ MSL + 100 cm des jeweiligen Jahres

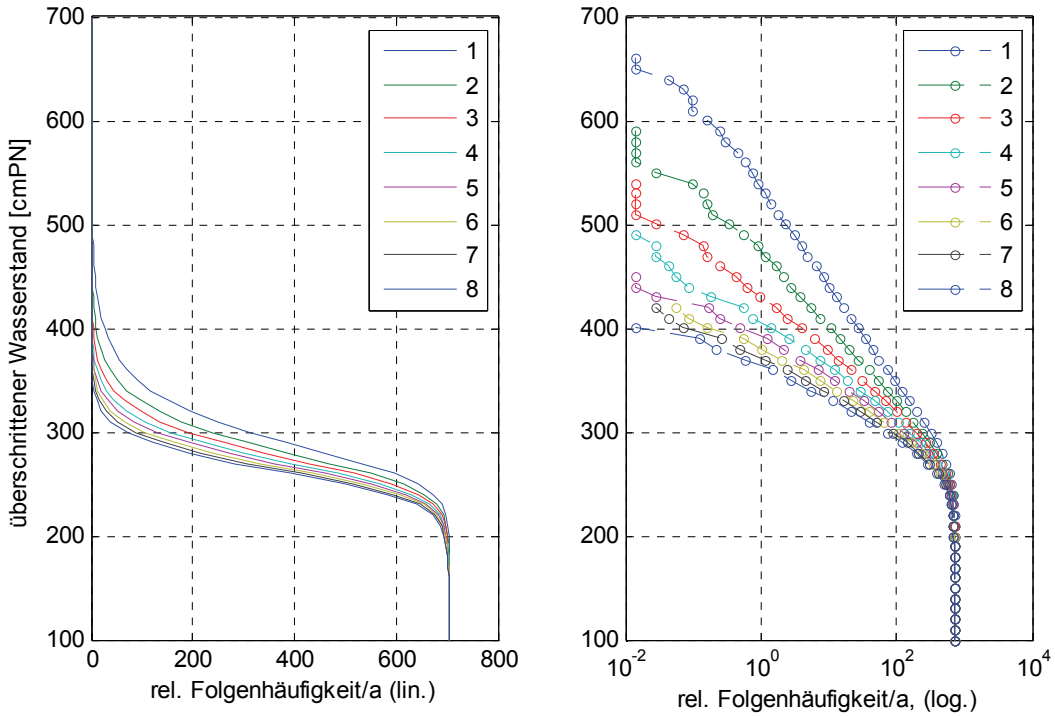


Abb. 12.7: Wilhelmshaven 1937-2008, relative Häufigkeiten aufeinanderfolgender Tnw

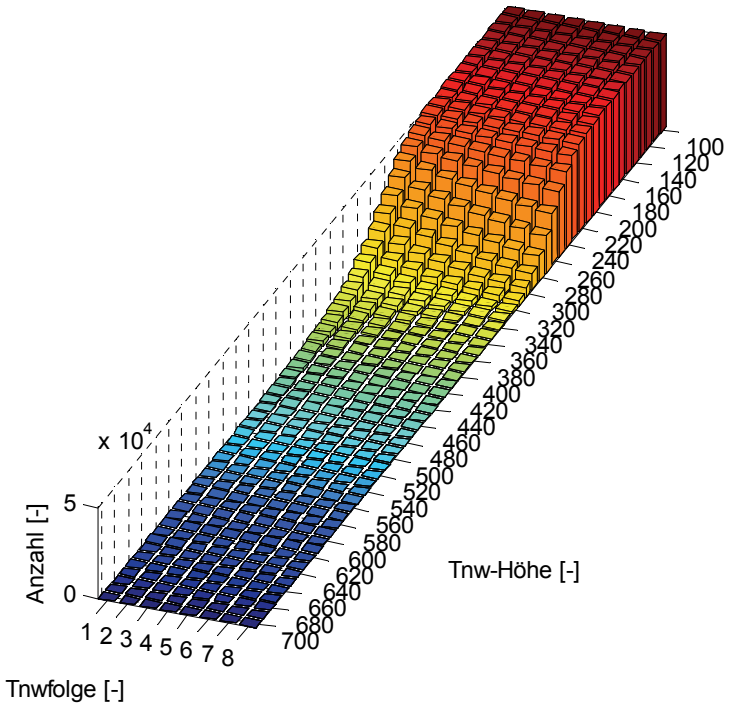


Abb. 12.8: Wilhelmshaven 1937-2008, Tnw-Folgezahlen

12.2 Tidehochwasser

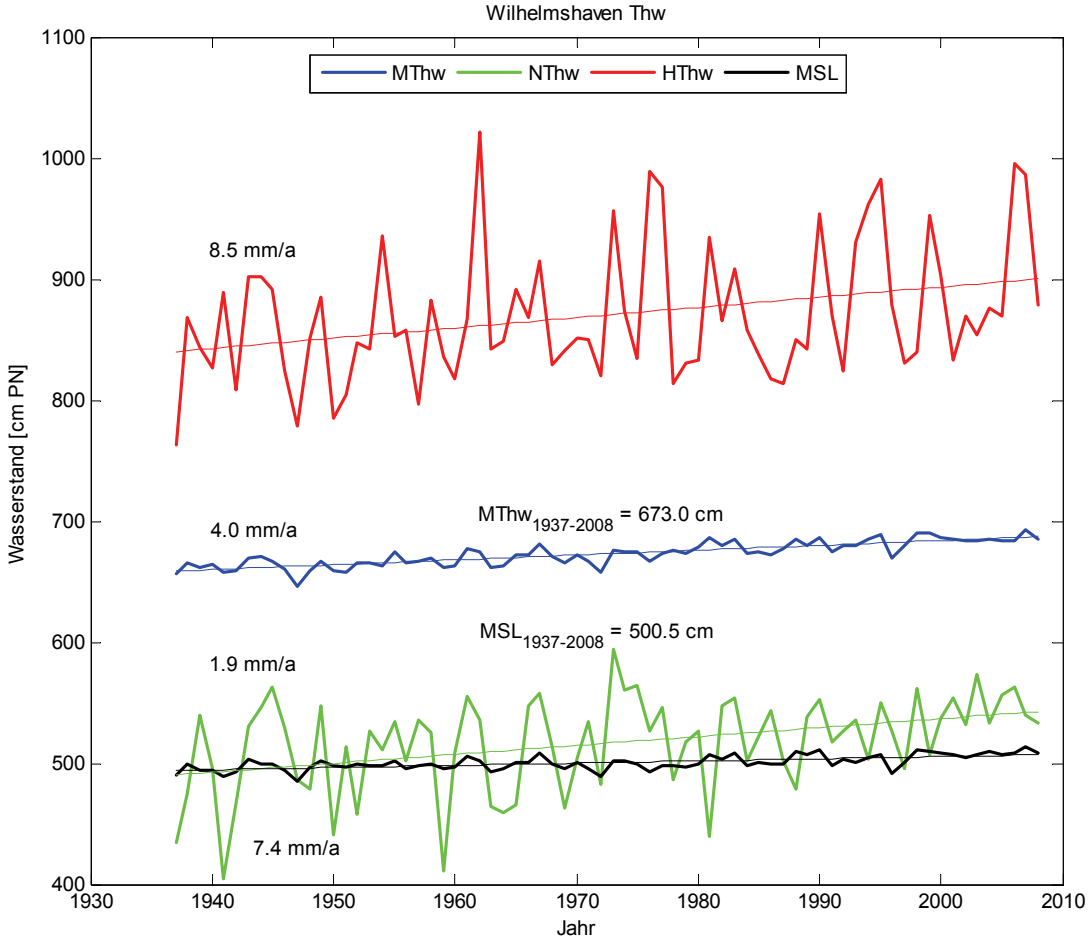


Abb. 12.9: Thw + MSL Trends Wilhelmshaven 1937 – 2008

Tendenziell nimmt der Trend der maximal erreichten Basishöhe von n aufeinanderfolgenden Thw mit zunehmender Folgenzahl ab (Abb. 12.10, Abb. 12.11). Der Abfall ist dabei von Folgenzahl 1 bis 3 am größten und gleichmäßig, um dann von Folge 3 bis 5 auf nahezu konstantem Niveau von rund 4 mm/a zu verharren. Für Folgezahlen 6 bis 8 verläuft der Trend wieder auf leicht höherem Niveau von etwa 5 mm/a. Das Maximum wird für die Folgenzahl 1, welche gleichzeitig unabhängige Einzeltiden und damit die Reihe der HThw darstellt, mit einem Trend von 8,6 mm/a erreicht. Nur die Trends der Folgezahlen 1, 2, 6, 7 und 8 liegen über dem Trend der MThw = 4,0 mm/a. Der niedrigste Trend beträgt 3,8 mm/a und wird für 3 aufeinanderfolgende Thw erreicht.

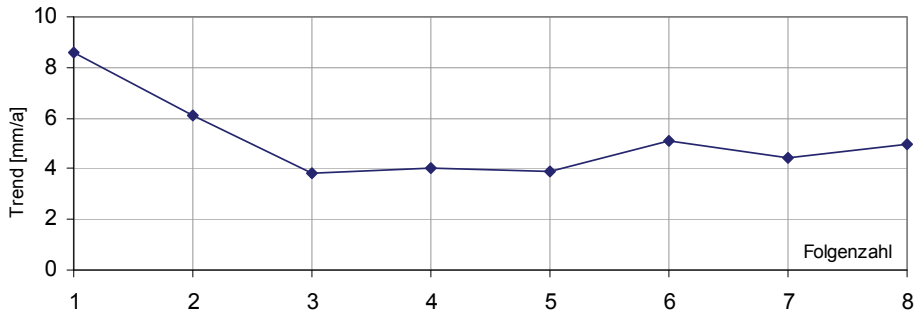


Abb. 12.10: Wilhelmshaven 1937-2008, Trendentwicklung max. Basishöhe Thw mit zunehmender Folgezahl

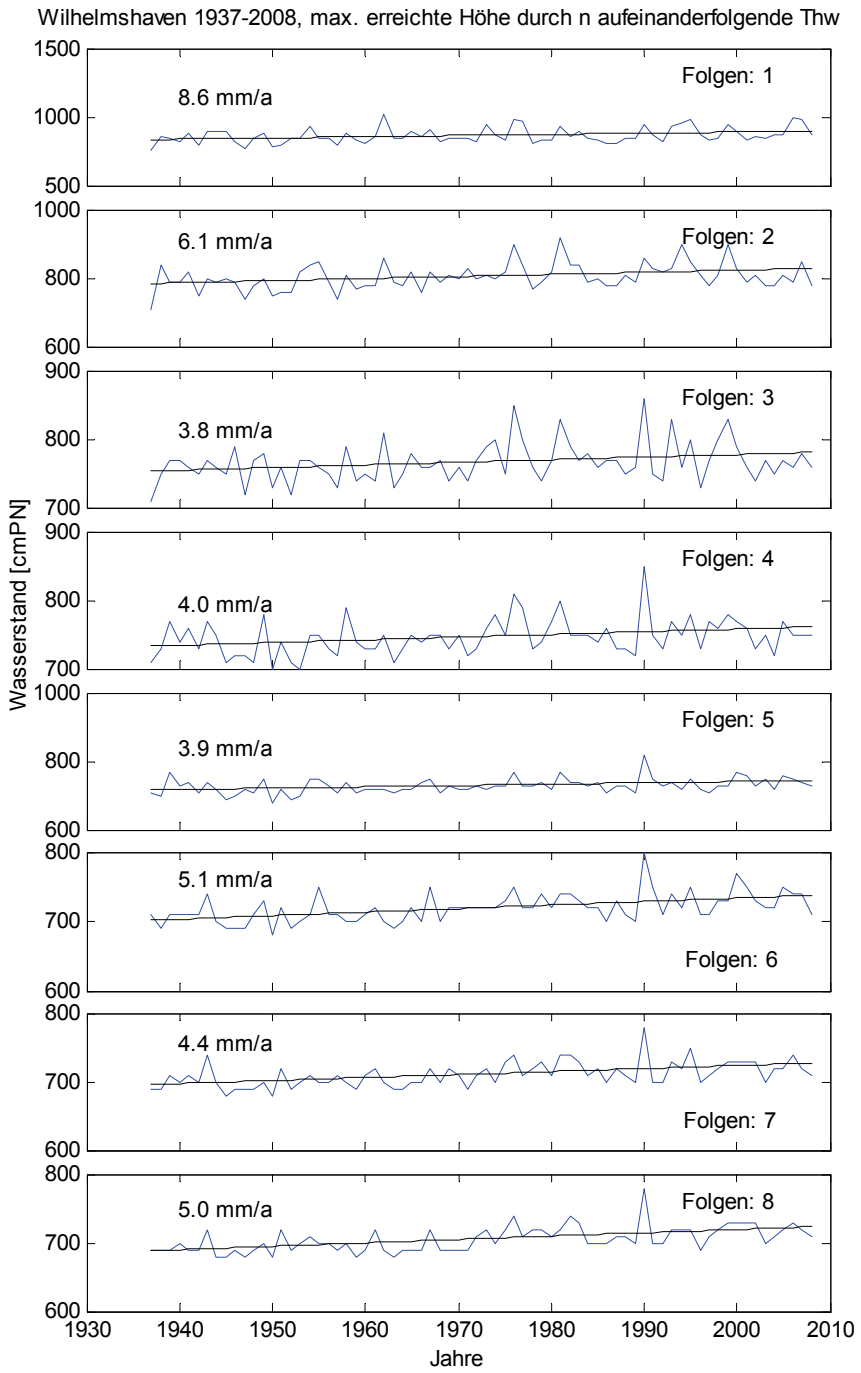


Abb. 12.11: Wilhelmshaven 1937-2008, maximal erreichte Basishöhe durch 1-8 aufeinanderfolgende Thw

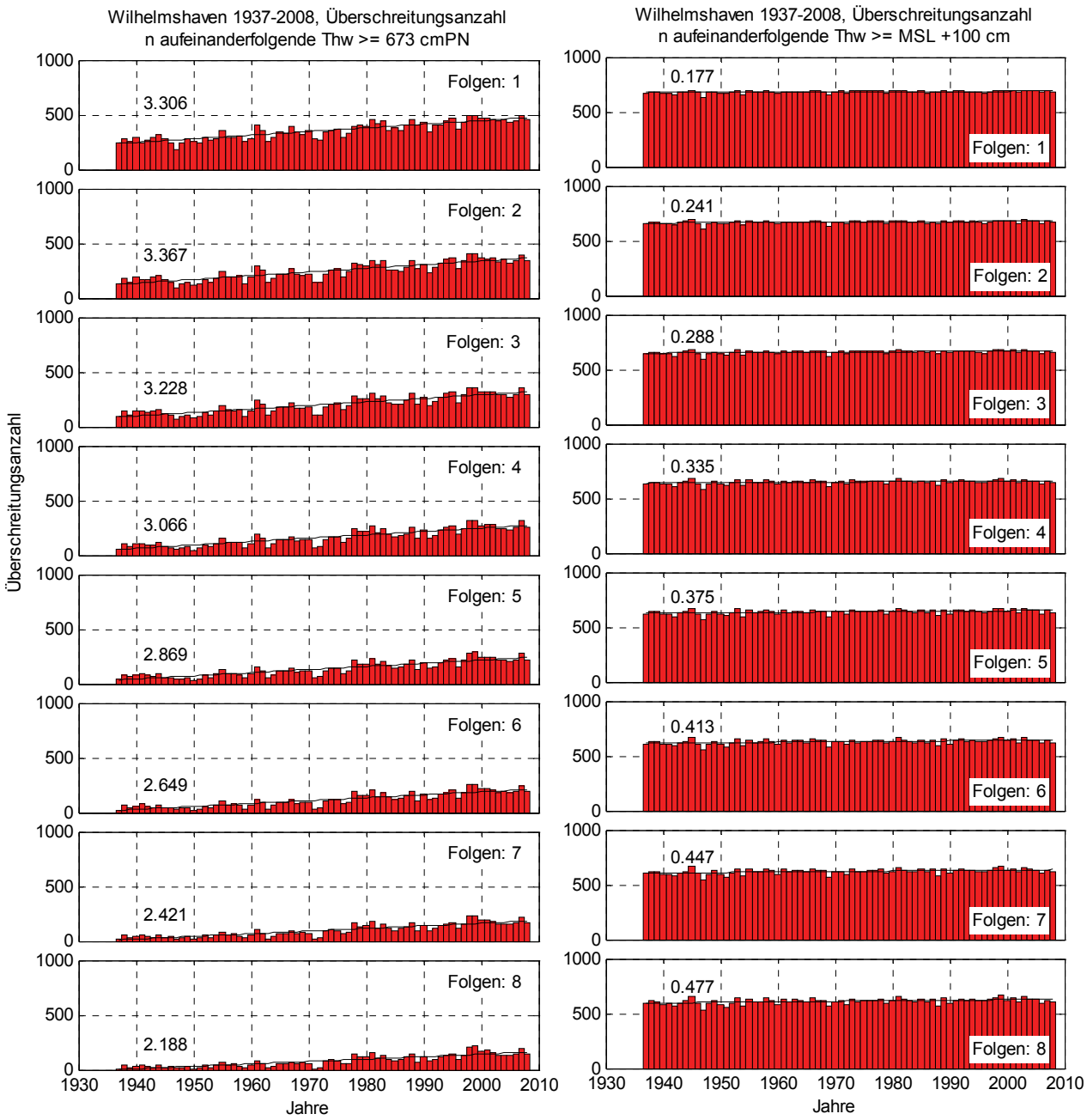


Abb. 12.12: Wilhelmshaven 1937-2008, Überschreitungszahlen durch 1-8 aufeinanderfolgende Thw. Links: ≥ $MThw_{1937\text{-}2008}$ + 0 cm = 673 cm, Rechts: ≥ MSL + 100 cm des jeweiligen Jahres

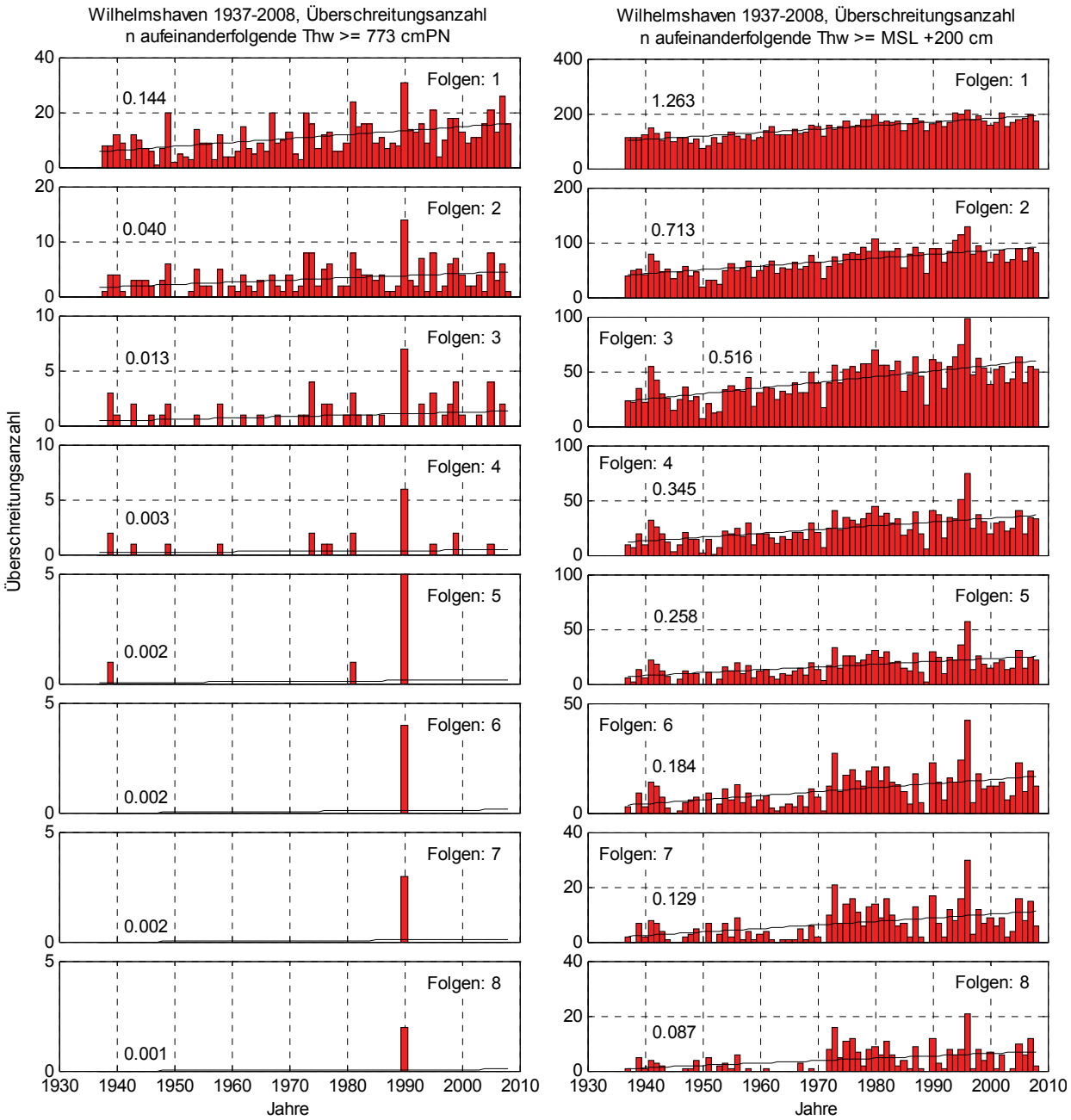


Abb. 12.13: Wilhelmshaven 1937-2008, Überschreitungszahlen durch 1-8 aufeinanderfolgende Thw. Links: ≥ $MThw_{1937\text{-}2008}$ + 100 cm = 773 cm, Rechts: ≥ MSL + 200 cm des jeweiligen Jahres

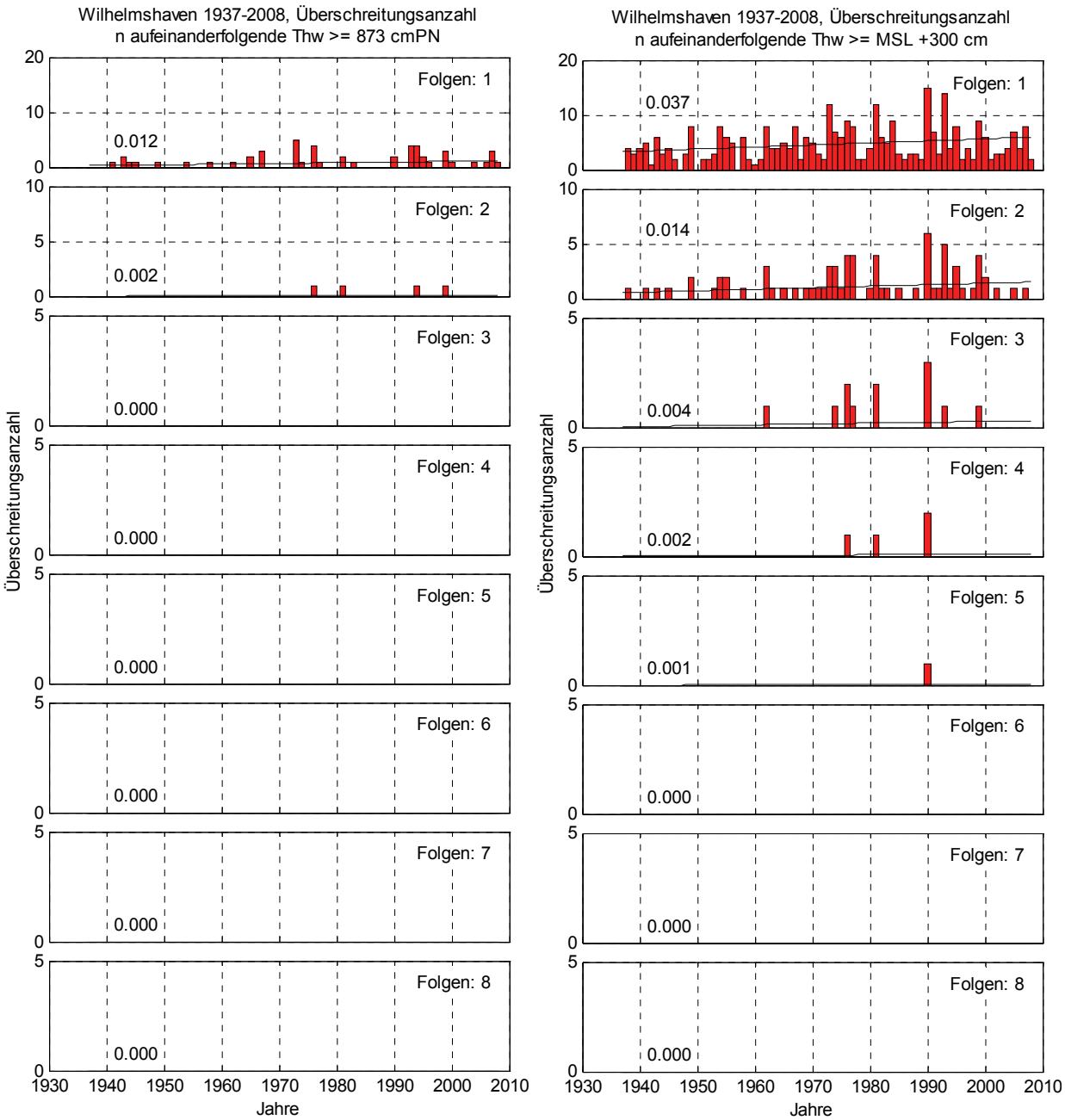


Abb. 12.14: Wilhelmshaven 1937-2008, Überschreitungszahlen durch 1-8 aufeinanderfolgende Thw. Links: ≥ $MThw_{1937\text{-}2008}$ + 200 cm = 873 cm, Rechts: ≥ MSL + 300 cm des jeweiligen Jahres

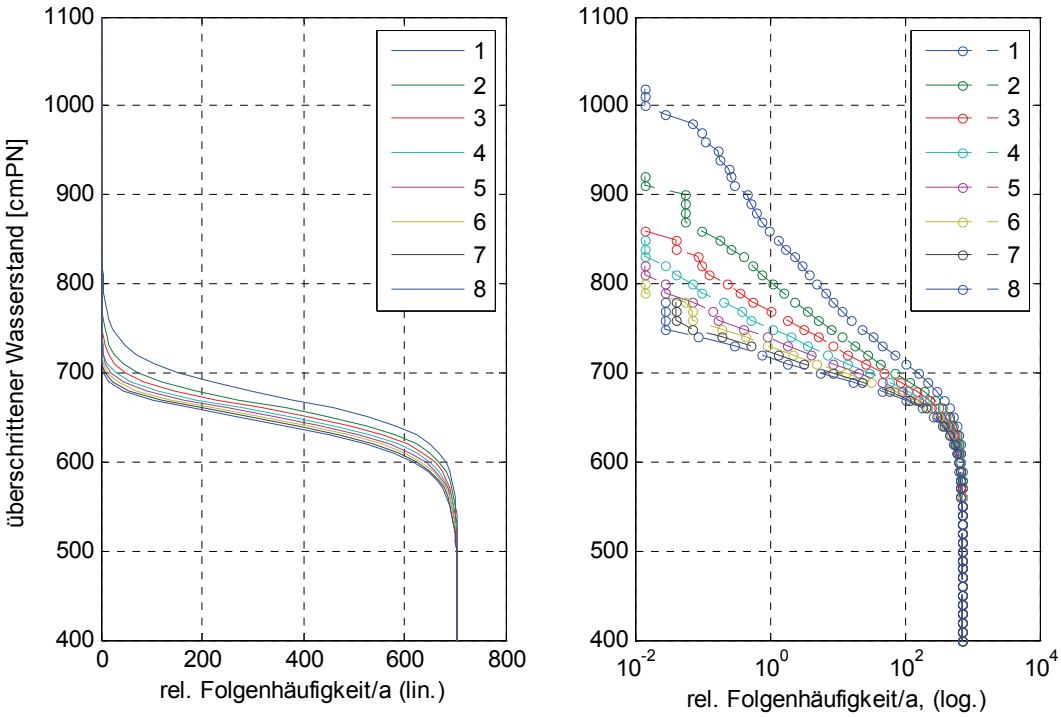


Abb. 12.15: Wilhelmshaven 1937-2008, relative Häufigkeiten aufeinanderfolgender Thw

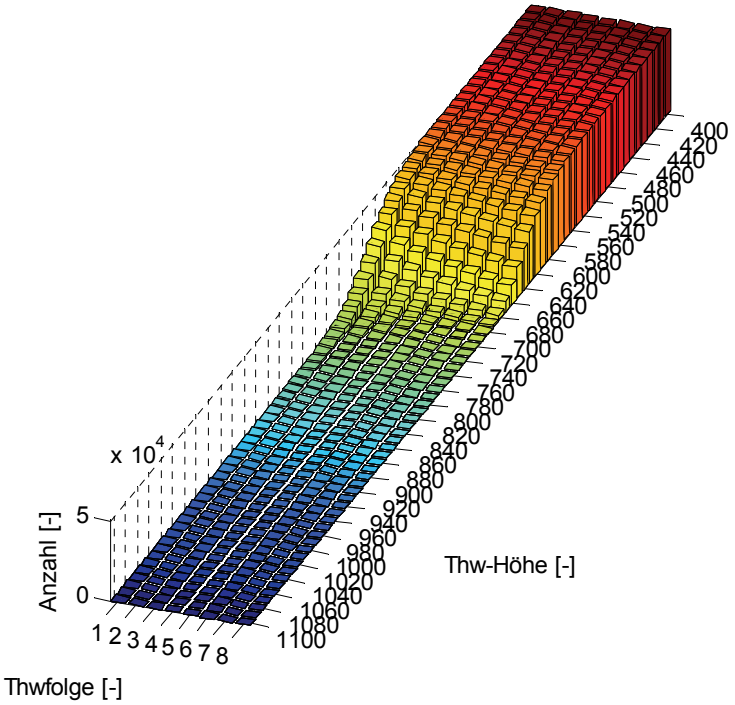


Abb. 12.16: Wilhelmshaven 1937-2008, Tnw-Folgezahlen

13 Norderney

13.1 Tideniedrigwasser

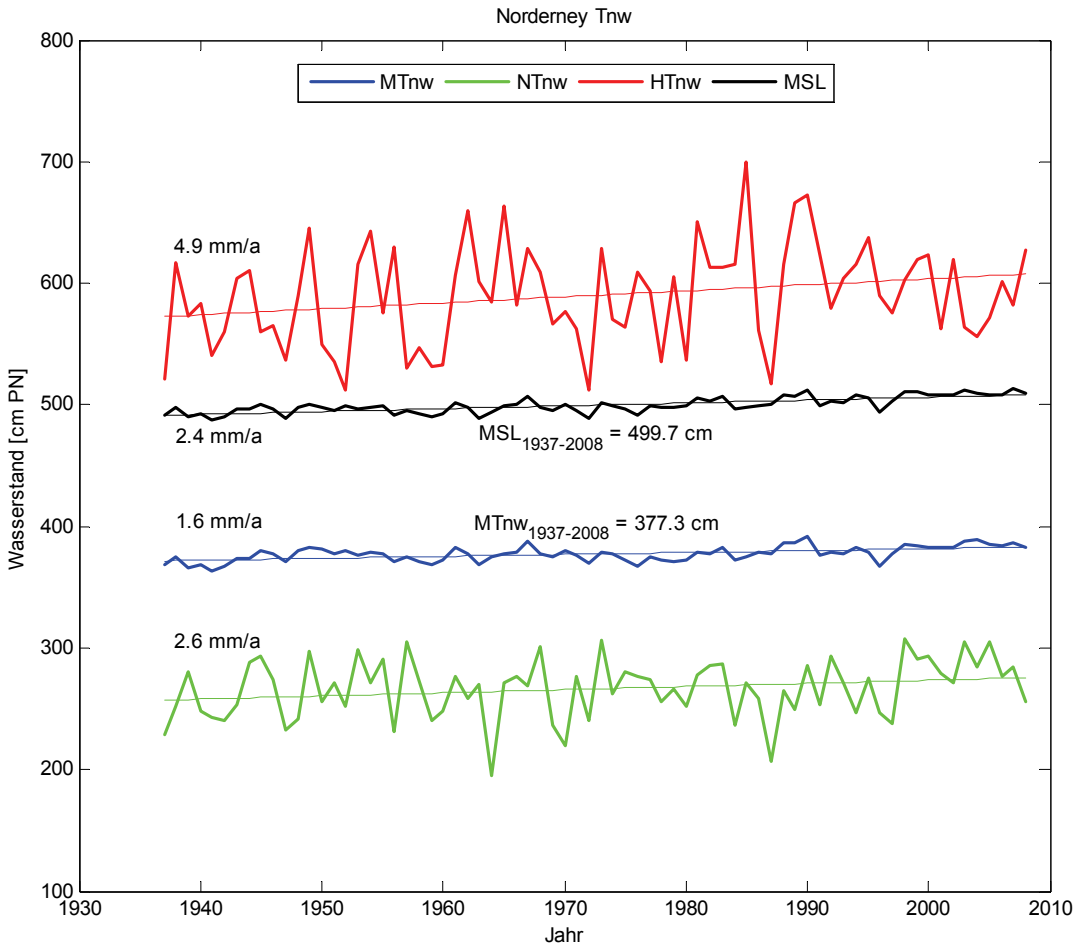


Abb. 13.1: Tnw + MSL Trends Norderney 1937 – 2008

Tendenziell nimmt der Trend der maximal erreichten Basishöhe von n aufeinanderfolgenden Tnw mit zunehmender Folgenzahl ab (Abb. 13.2, Abb. 13.3). Das Maximum wird aber bei 2 aufeinanderfolgenden Tnw mit einem Trend von 5,5 mm/a erreicht. Dieser Trend ist größer als der Trend der HTnw = 4,9 mm/a. Alle Trends liegen deutlich über dem Trend des MTnw = 1,6 mm/a. Der niedrigste Trend beträgt 2,0 mm/a und wird für 8 aufeinanderfolgende Tnw erreicht.

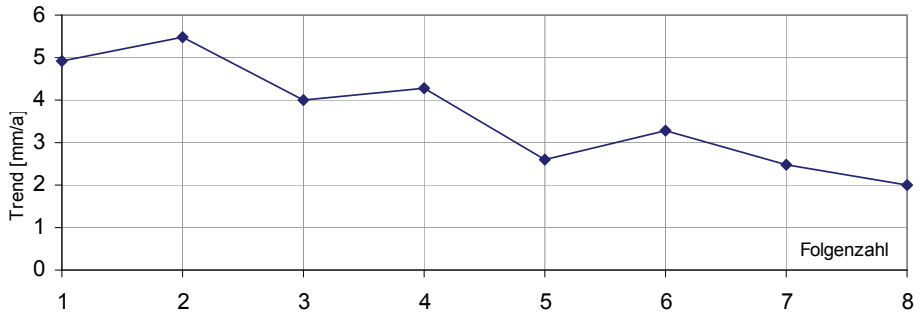


Abb. 13.2: Norderney 1937-2008, Trendentwicklung max. Basishöhe Tnw mit zunehmender Folgezahl

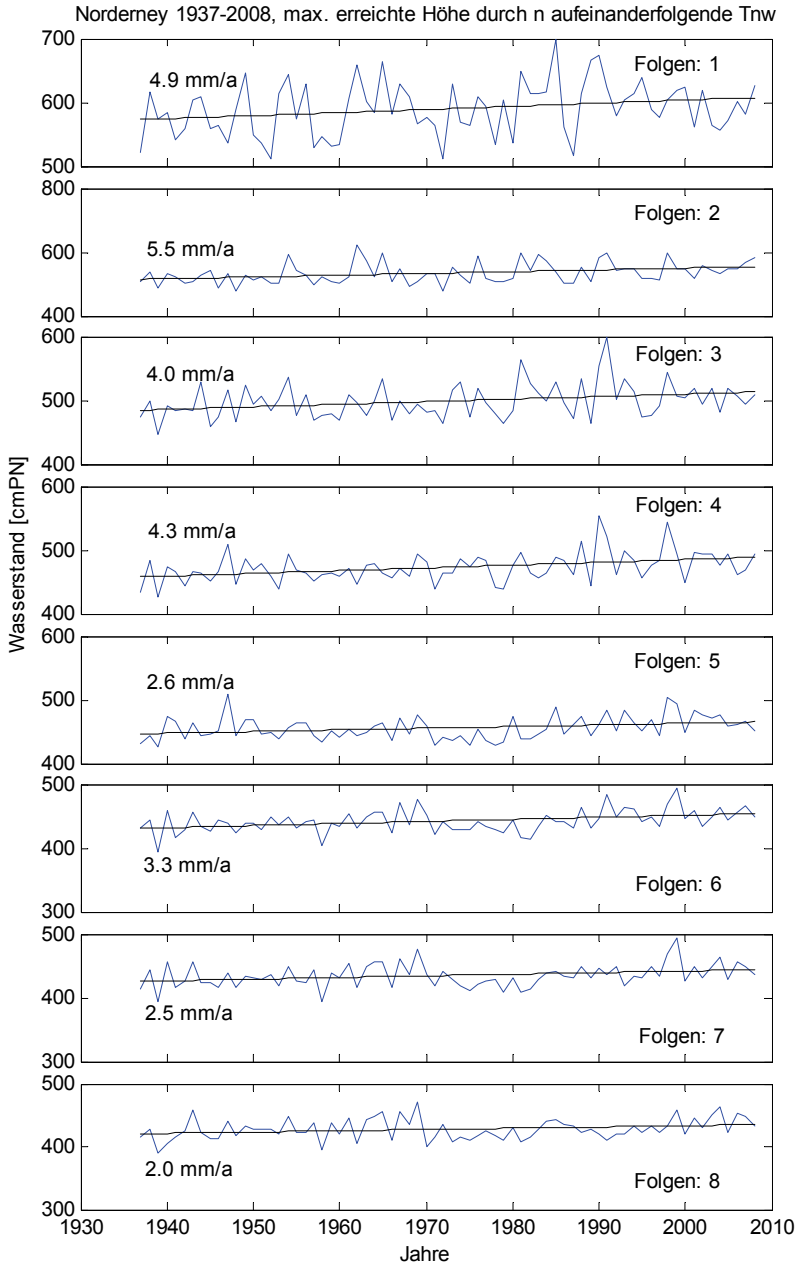


Abb. 13.3: Norderney 1937-2008, maximal erreichte Basishöhe durch 1-8 aufeinanderfolgende Tnw

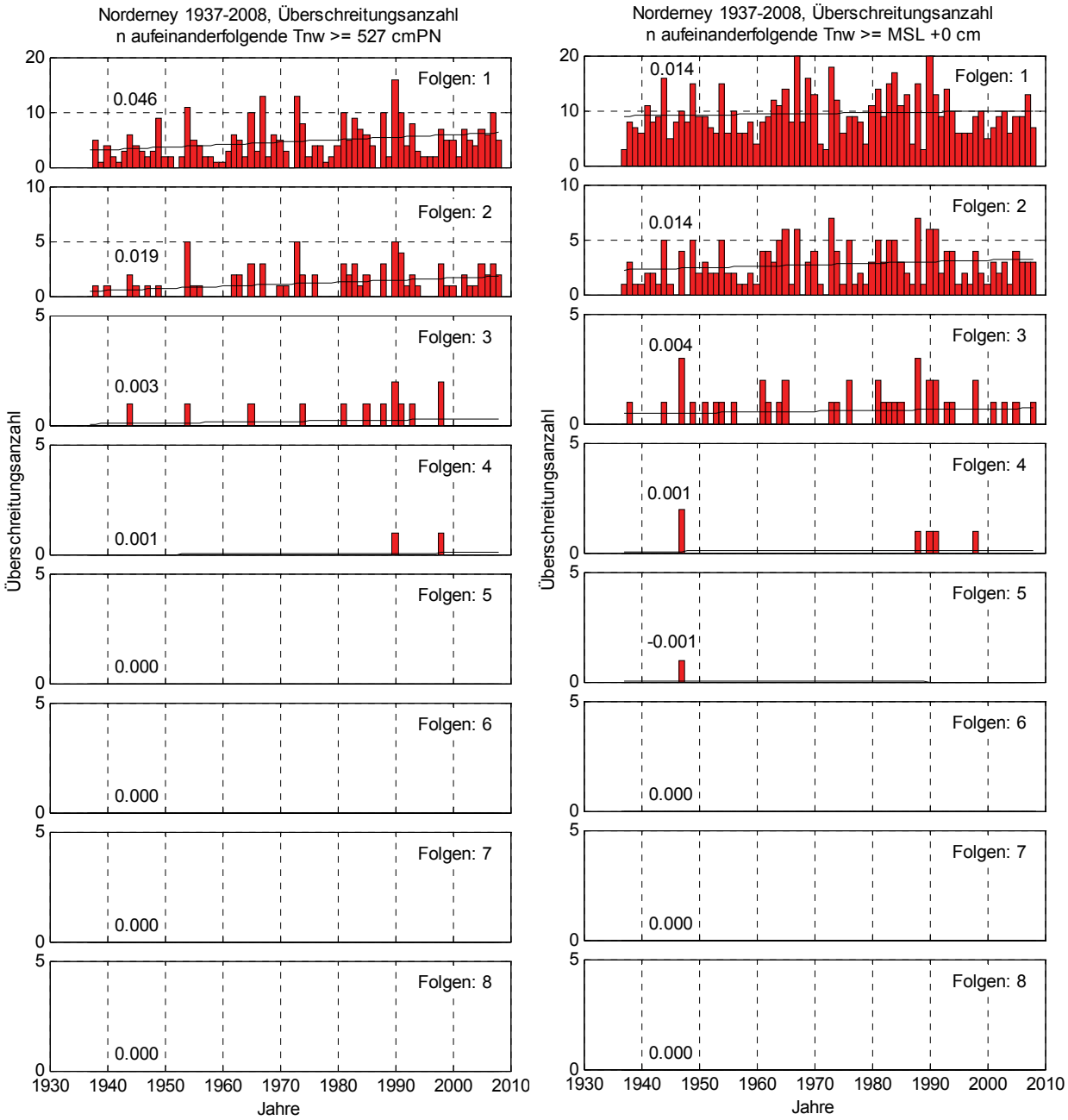


Abb. 13.4: Norderney 1937-2008, Überschreitungszahlen durch 1-8 aufeinanderfolgende Tnw. Links: ≥ $MTnw_{1937\text{-}2008}$ + 150 cm = 527 cm, Rechts: ≥ MSL + 0 cm des jeweiligen Jahres

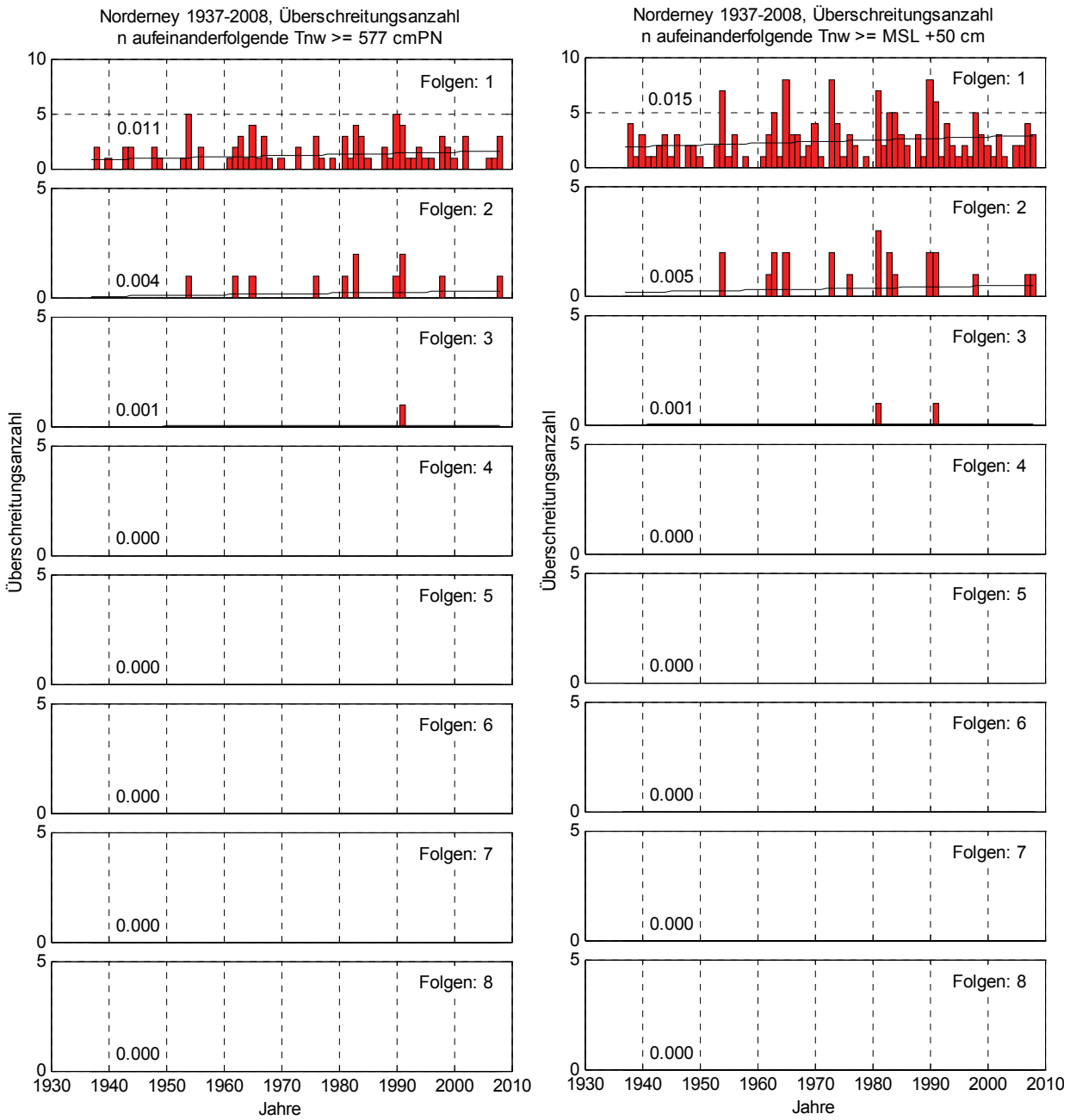


Abb. 13.5: Norderney 1937-2008, Überschreitungszahlen durch 1-8 aufeinanderfolgende Tnw. Links: ≥ $MTnw_{1937\text{-}2008}$ + 200 cm = 577 cm, Rechts: ≥ MSL + 50 cm des jeweiligen Jahres

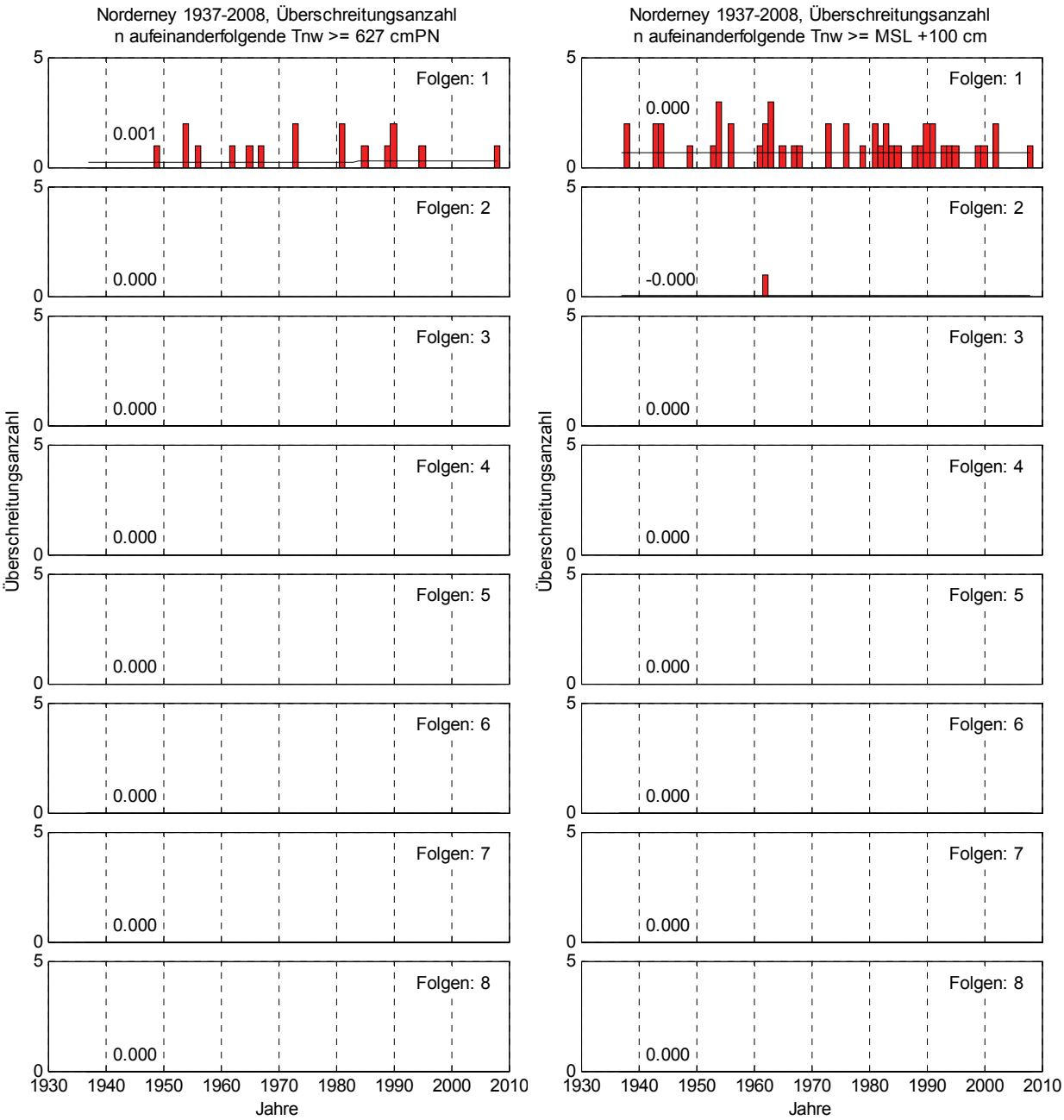


Abb. 13.6: Norderney 1937-2008, Überschreitungszahlen durch 1-8 aufeinanderfolgende Tnw. Links: ≥ $MTnw_{1937-2008}$ + 250 cm = 627 cm, Rechts: ≥ MSL + 100 cm des jeweiligen Jahres

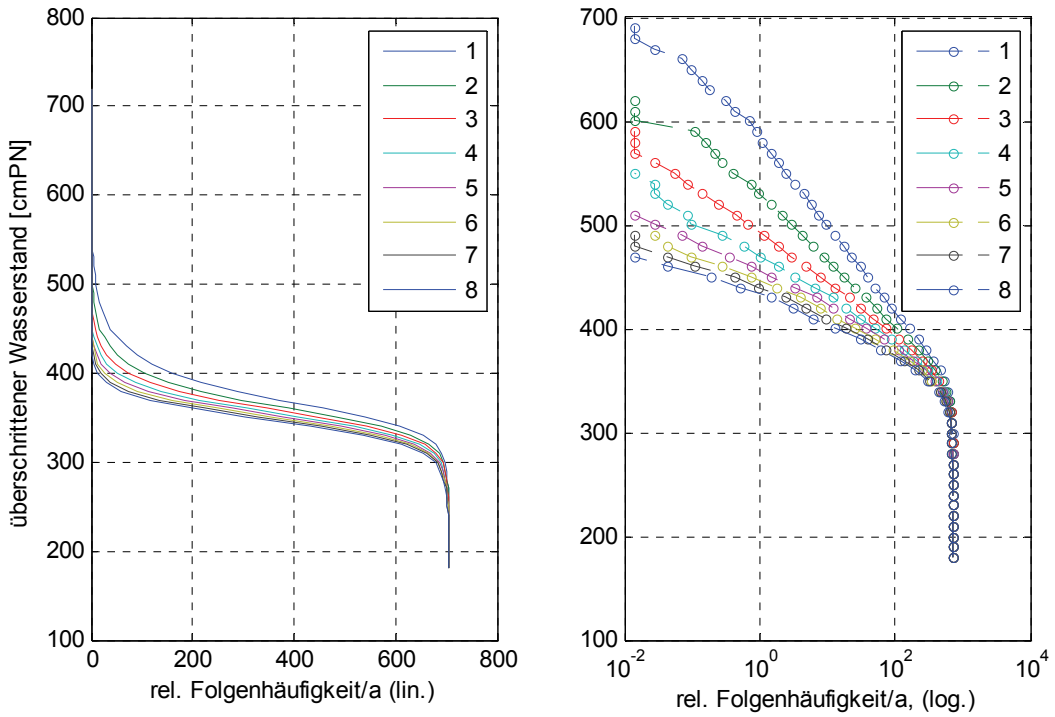


Abb. 13.7: Norderney 1937-2008, relative Häufigkeiten aufeinanderfolgender Tnw

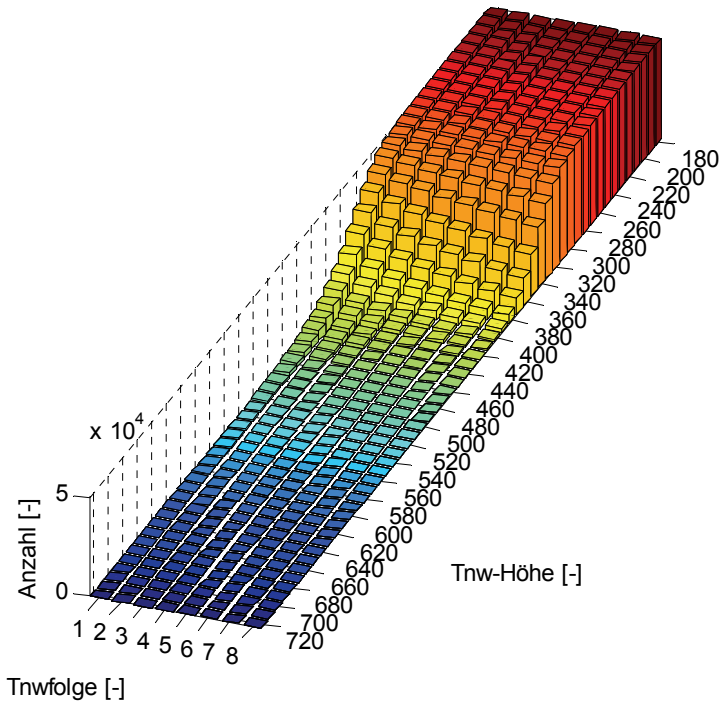


Abb. 13.8: Norderney 1937-2008, Tnw-Folgezahlen

13.2 Tidehochwasser

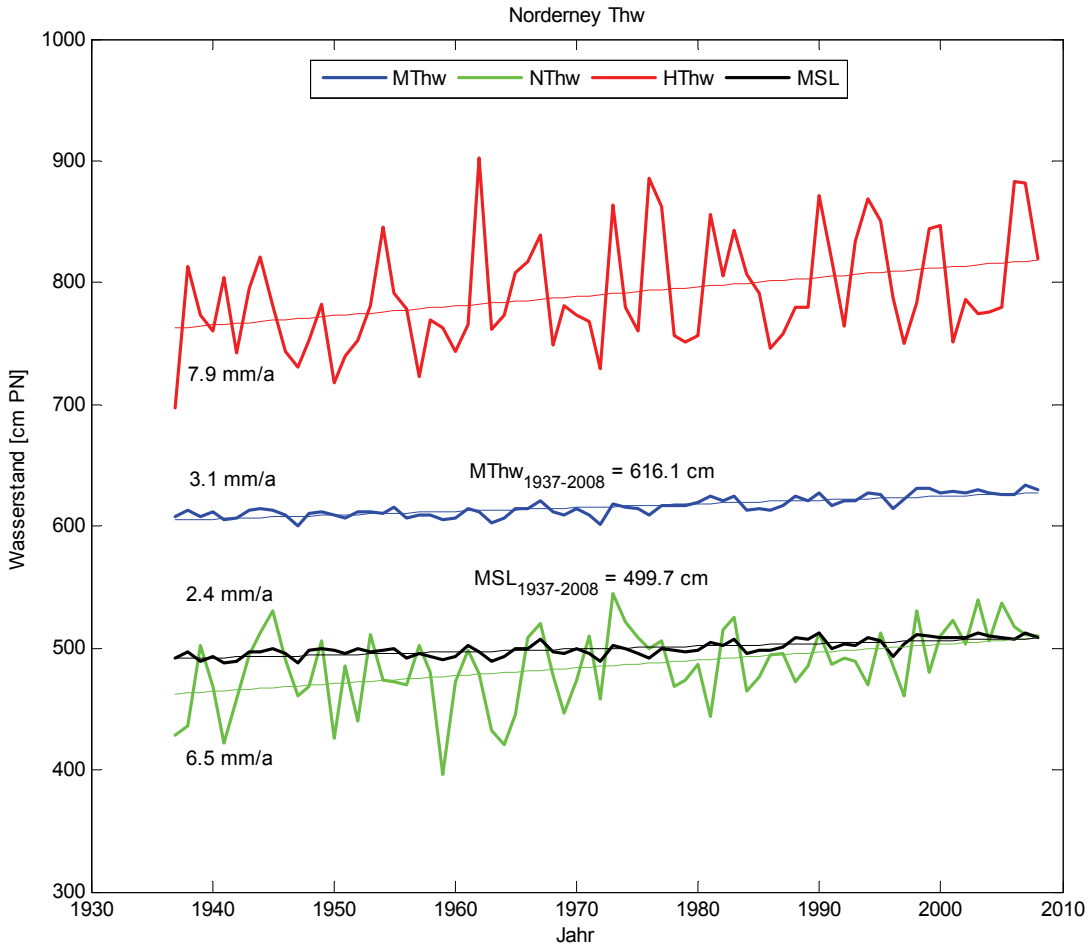


Abb. 13.9: Thw + MSL Trends Norderney 1937 – 2008

Tendenziell nimmt der Trend der maximal erreichten Basishöhe von n aufeinanderfolgenden Thw mit zunehmender Folgenzahl ab (Abb. 13.10, Abb. 13.11). Das Maximum wird für die Folgenzahl 1, welche gleichzeitig unabhängige Einzeltiden und damit die Reihe der HThw darstellt, mit einem Trend von 7,9 mm/a erreicht. Alle weiteren Folgezahlen fallen demgegenüber deutlich niedriger ab. Nur die Trends für die Folgezahlen 5 und 7 liegen unter dem Trend des MThw = 3,1 mm/a. Der niedrigste Trend beträgt 2,5 mm/a und wird für 7 aufeinanderfolgende Thw erreicht.

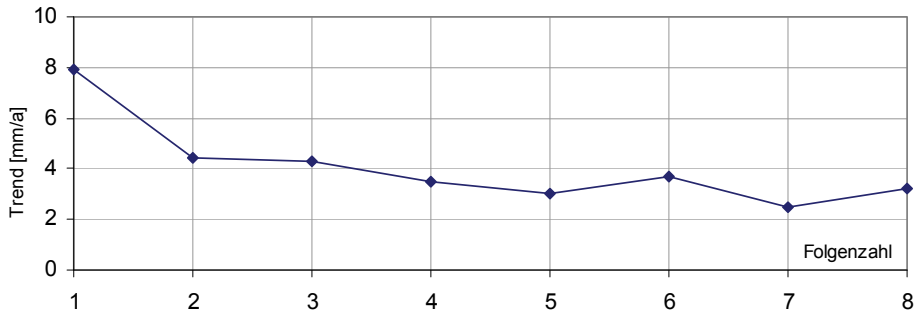


Abb. 13.10: Norderney 1937-2008, Trendentwicklung max. Basishöhe Thw mit zunehmender Folgezahl

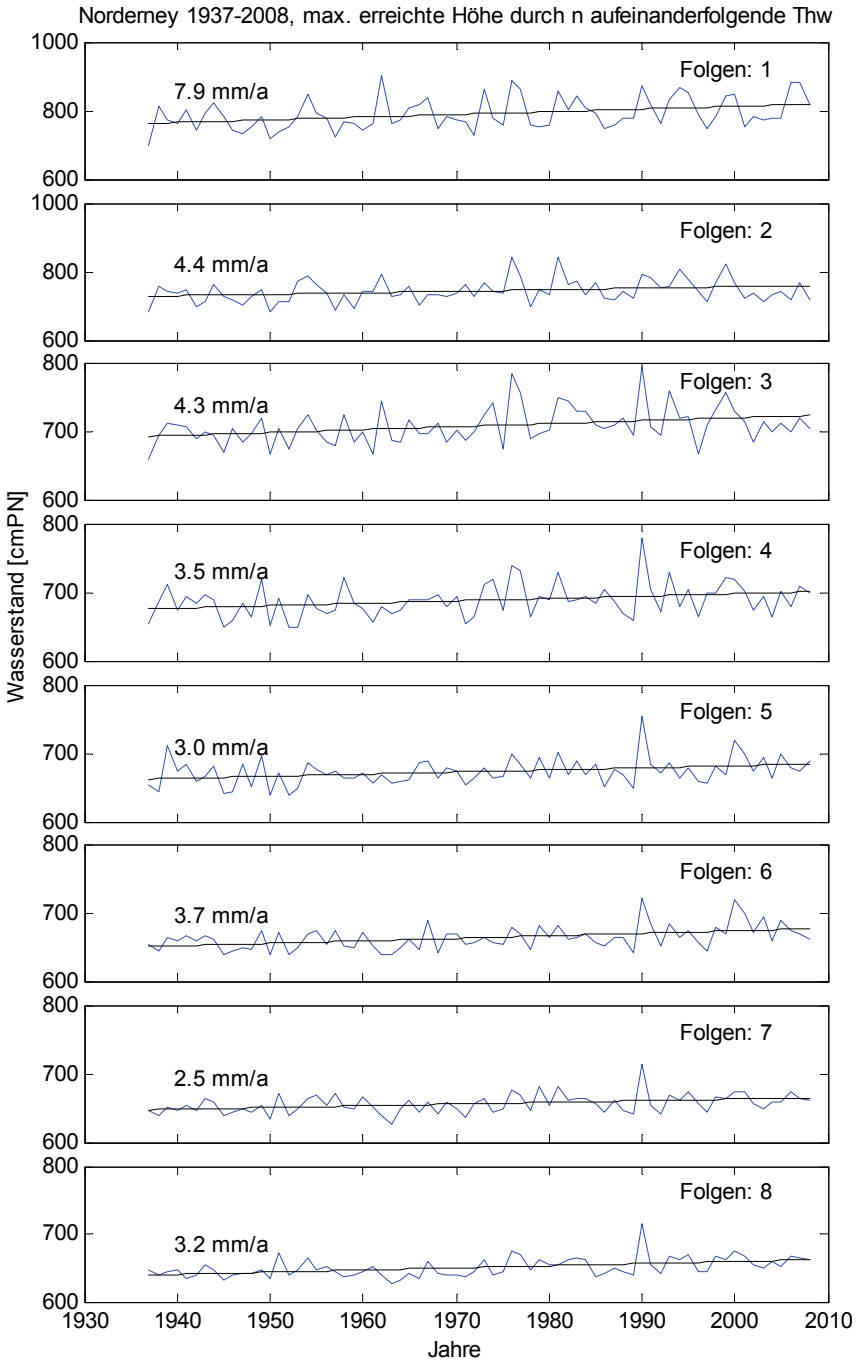


Abb. 13.11: Norderney 1937-2008, maximal erreichte Basishöhe durch 1-8 aufeinanderfolgende Thw

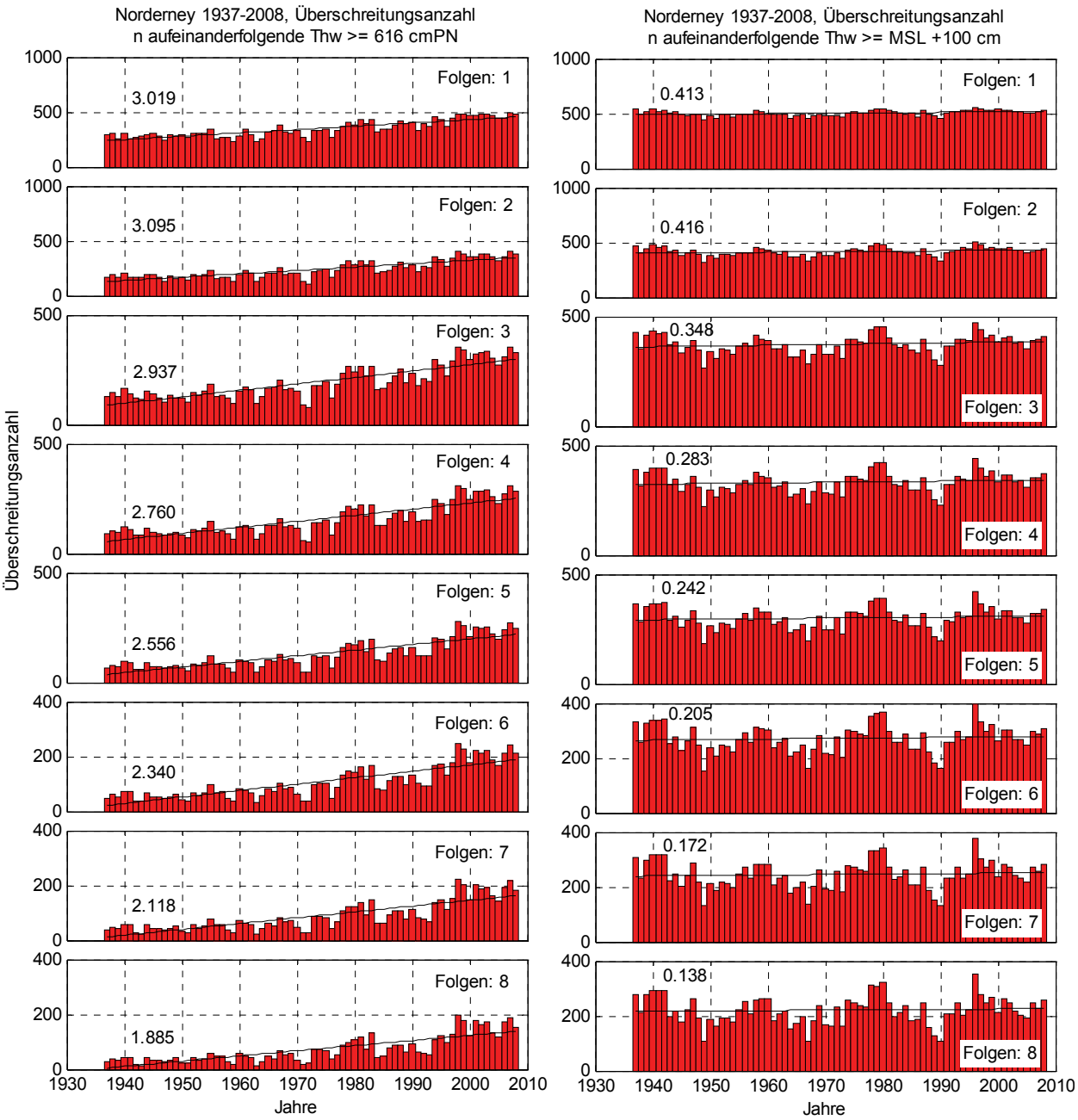


Abb. 13.12: Norderney 1937-2008, Überschreitungszahlen durch 1-8 aufeinanderfolgende Thw. Links: ≥ $MThw_{1937\text{-}2008}$ + 0 cm = 616 cm, Rechts: ≥ MSL + 100 cm des jeweiligen Jahres

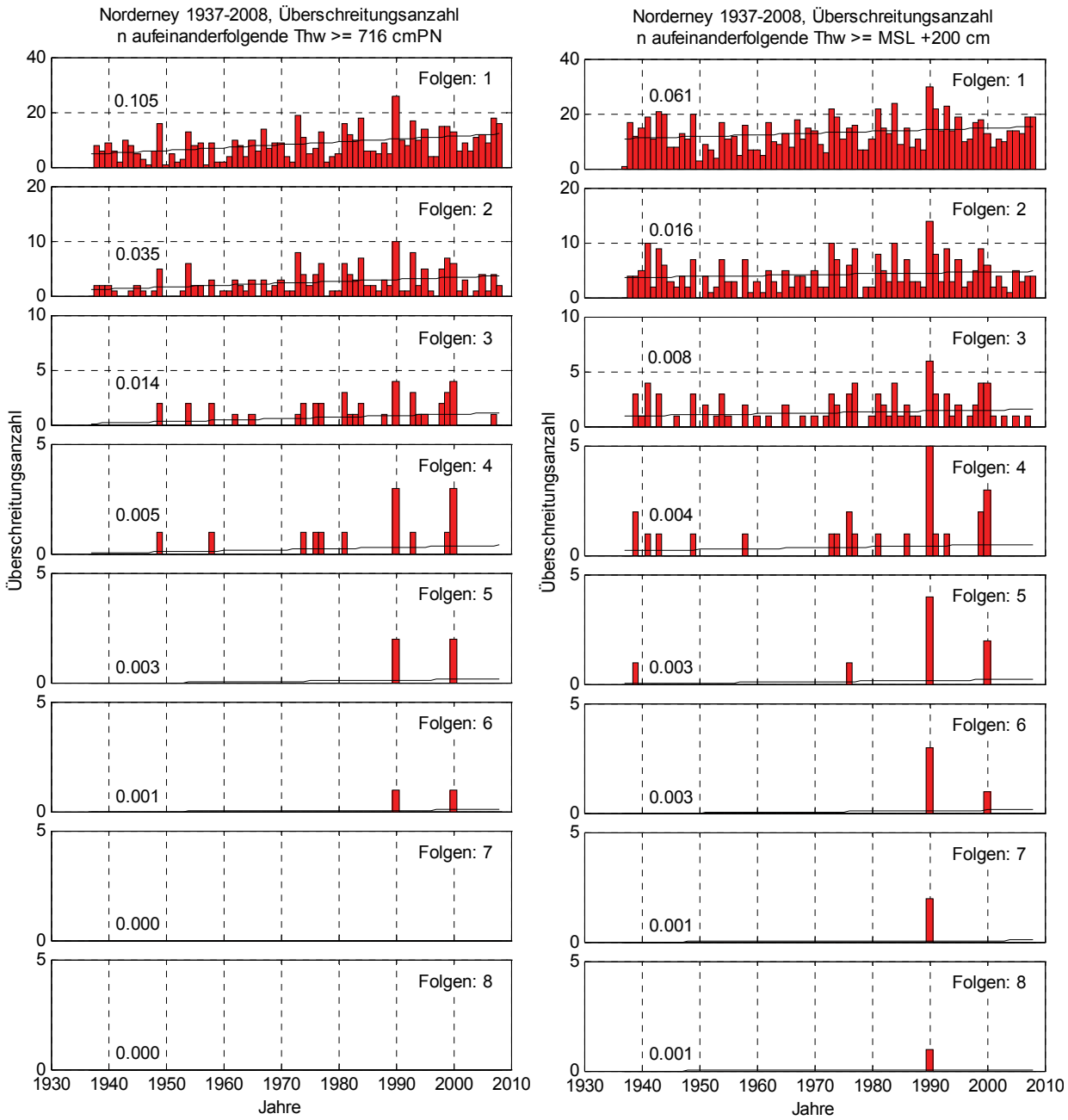


Abb. 13.13: Norderney 1937-2008, Überschreitungszahlen durch 1-8 aufeinanderfolgende Thw. Links: ≥ $MThw_{1937\text{-}2008}$ + 100 cm = 716 cm, Rechts: ≥ MSL + 200 cm des jeweiligen Jahres

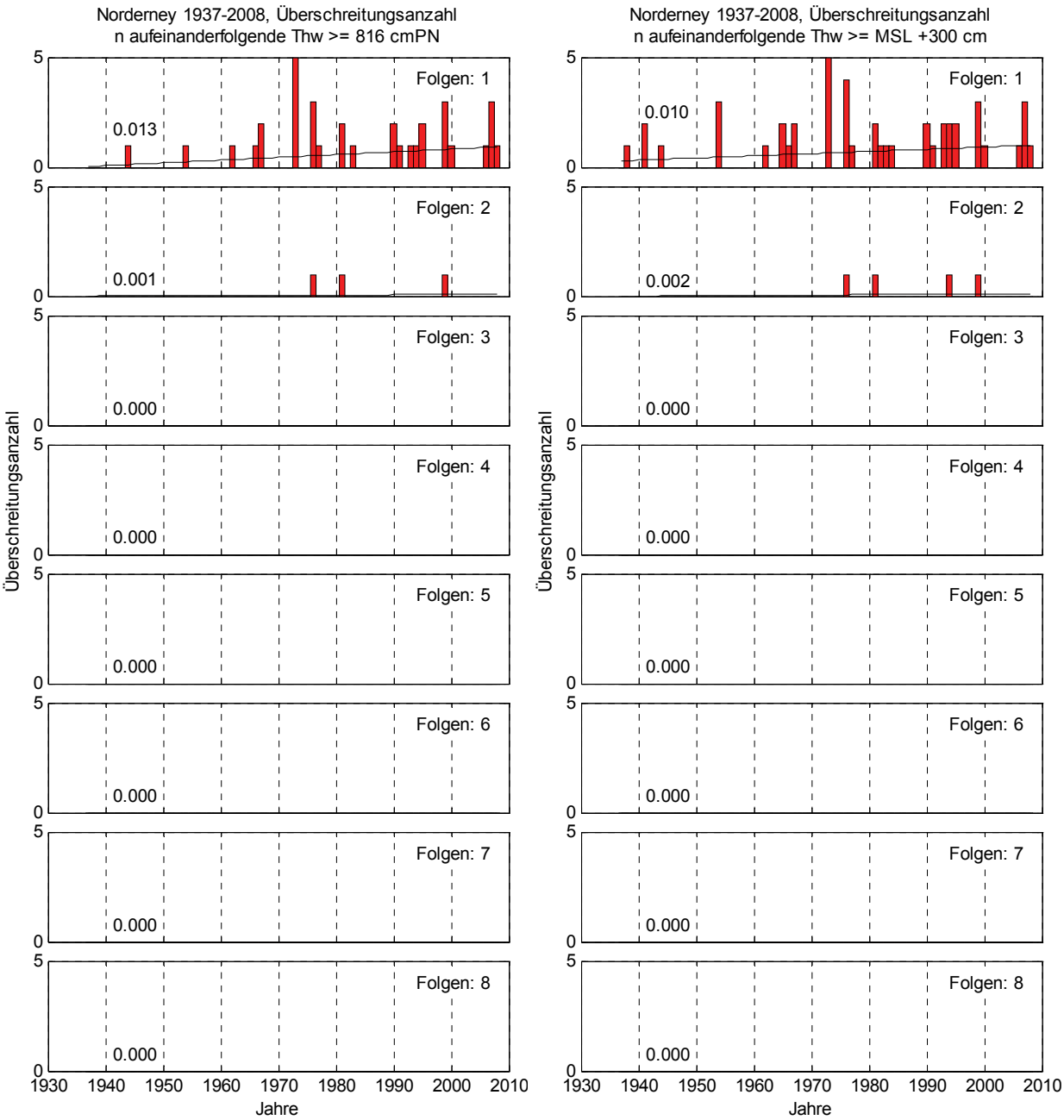


Abb. 13.14: Norderney 1937-2008, Überschreitungszahlen durch 1-8 aufeinanderfolgende Thw. Links: ≥ $MThw_{1937-2008}$ + 200 cm = 816 cm, Rechts: ≥ MSL + 300 cm des jeweiligen Jahres

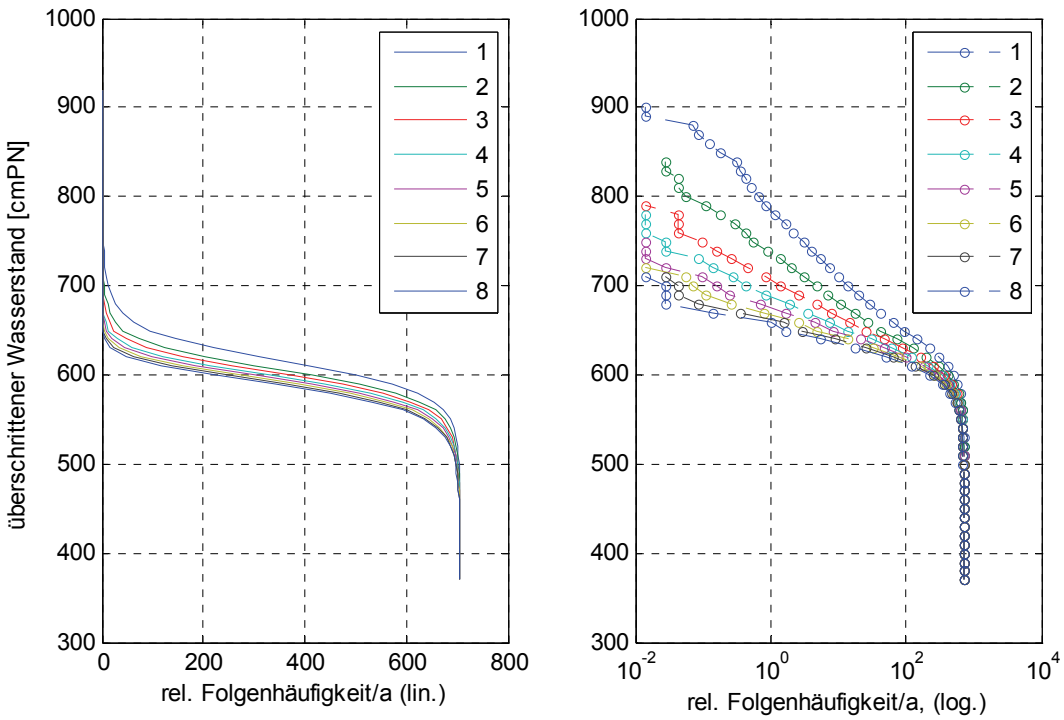


Abb. 13.15: Norderney 1937-2008, relative Häufigkeiten aufeinanderfolgender Thw

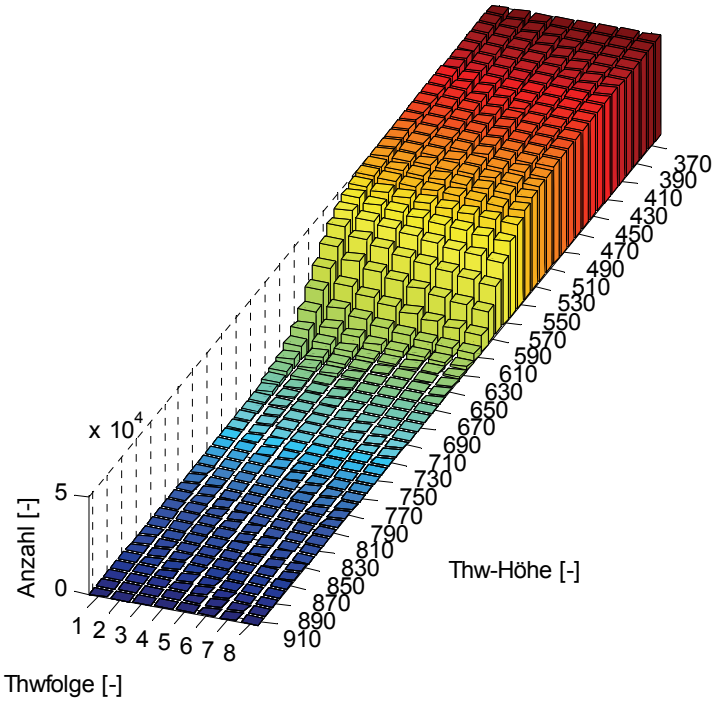


Abb. 13.16: Norderney 1937-2008, Thw-Folgezahlen

14 Emden

14.1 Tideniedrigwasser

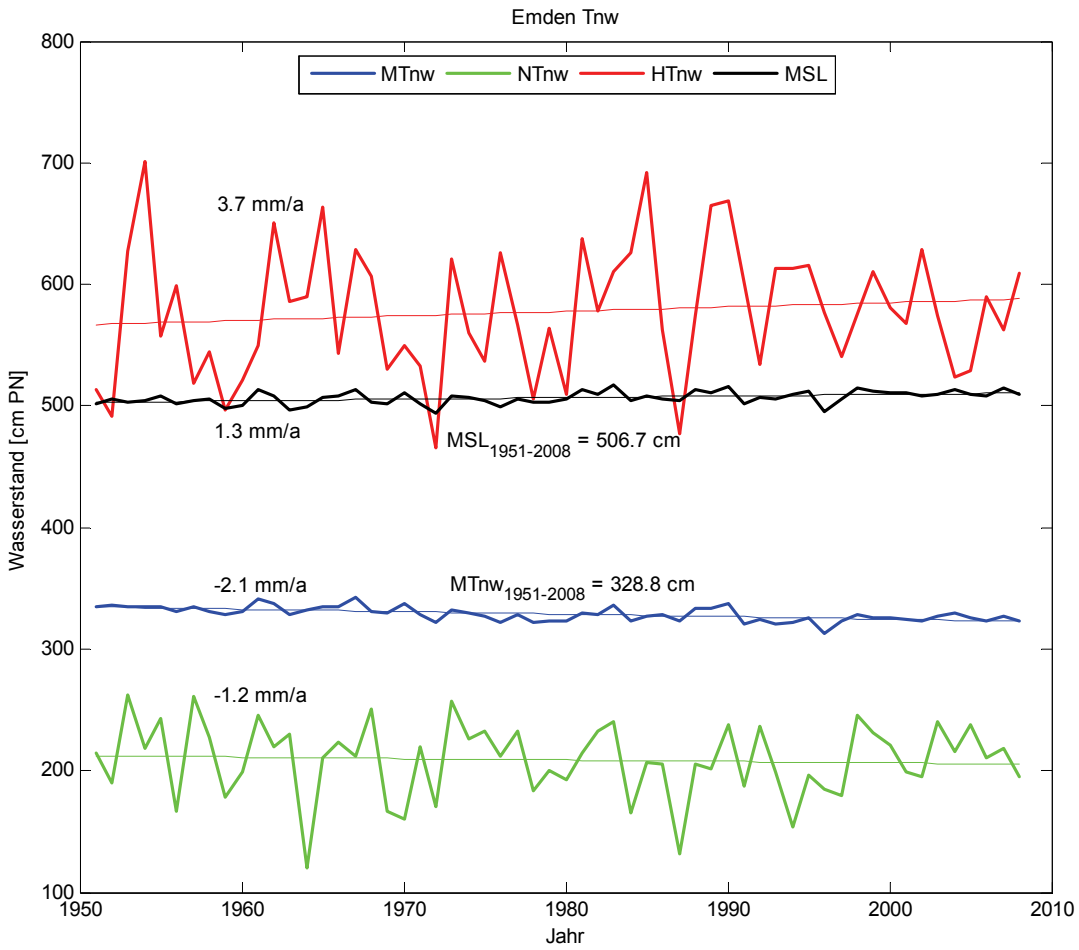


Abb. 14.1: Tnw + MSL Trends Emden 1951 – 2008

Tendenziell nimmt der Trend der maximal erreichten Basishöhe von n aufeinanderfolgenden Tnw mit zunehmender Folgenzahl ab (Abb. 14.2, Abb. 14.3). Allerdings verlaufen die Trends der Folgezahlen 1 bis 4 zunächst auf relativ gleichbleibenden Niveau von 3 bis 4 mm/a, um erst mit zunehmender Folgezahl deutlich abzufallen. Das Maximum wird aber bei 4 aufeinanderfolgenden Tnw mit einem Trend von 3,9 mm/a erreicht. Dieser Trend ist größer als der Trend der HTnw = 3,7 mm/a. Alle Trends liegen deutlich über dem Trend des MTnw = -2,1 mm/a welcher damit deutlich negativ ist. Gleiches gilt für Tnw-Ketten der Folgezahlen 7 und 8, welche ebenfalls einen negativen Trend aufweisen. Der niedrigste Trend beträgt -1,5 mm/a und wird für 8 aufeinanderfolgende Tnw erreicht.

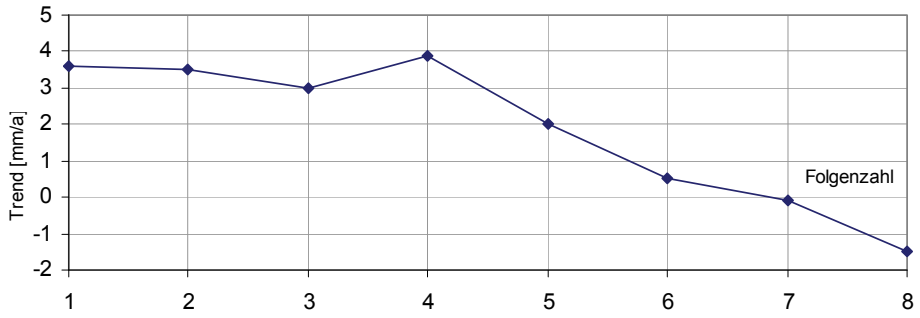


Abb. 14.2: Emden 1951-2008, Trendentwicklung max. Basishöhe Tnw mit zunehmender Folgezahl

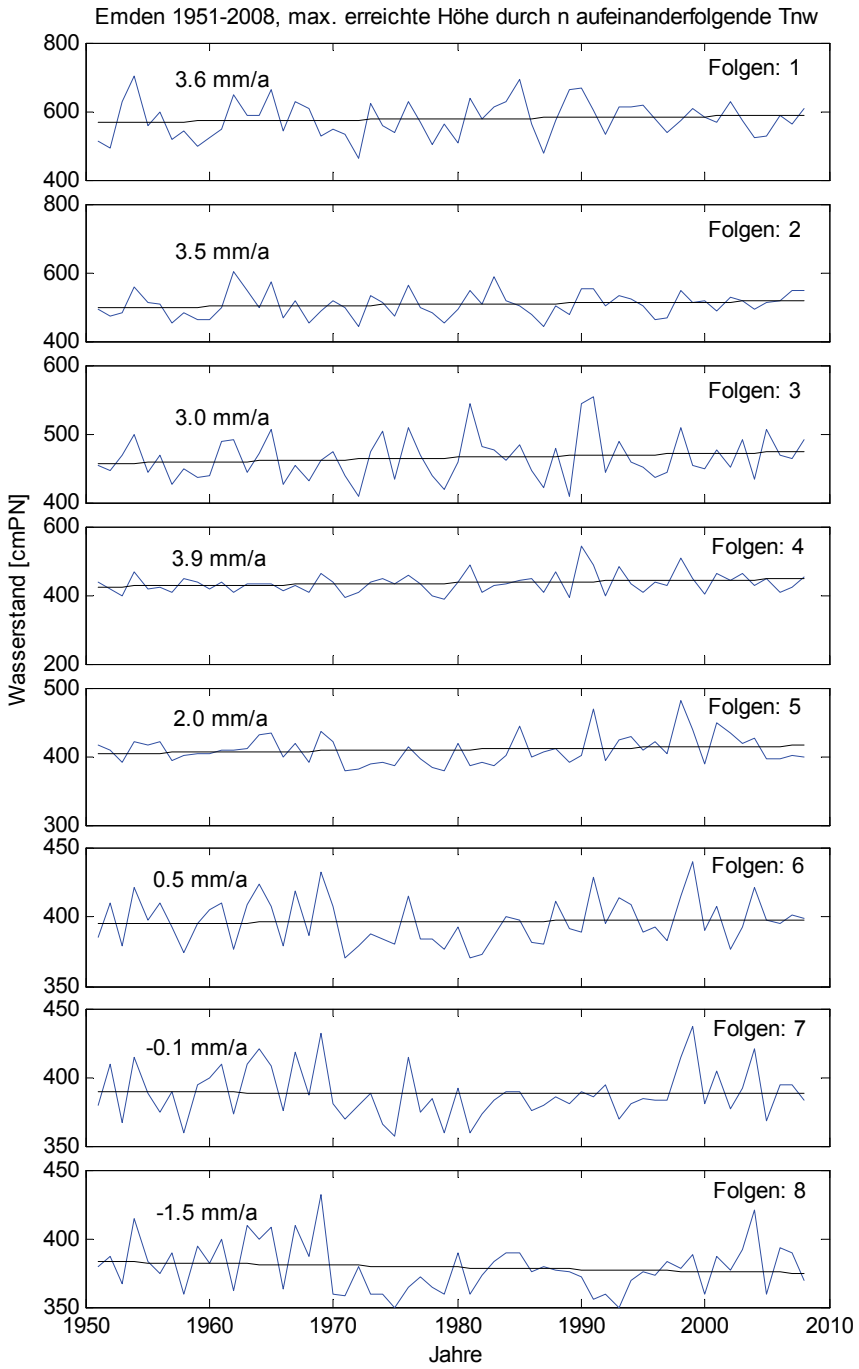


Abb. 14.3: Emden 1951-2008, maximal erreichte Basishöhe durch 1-8 aufeinanderfolgende Tnw

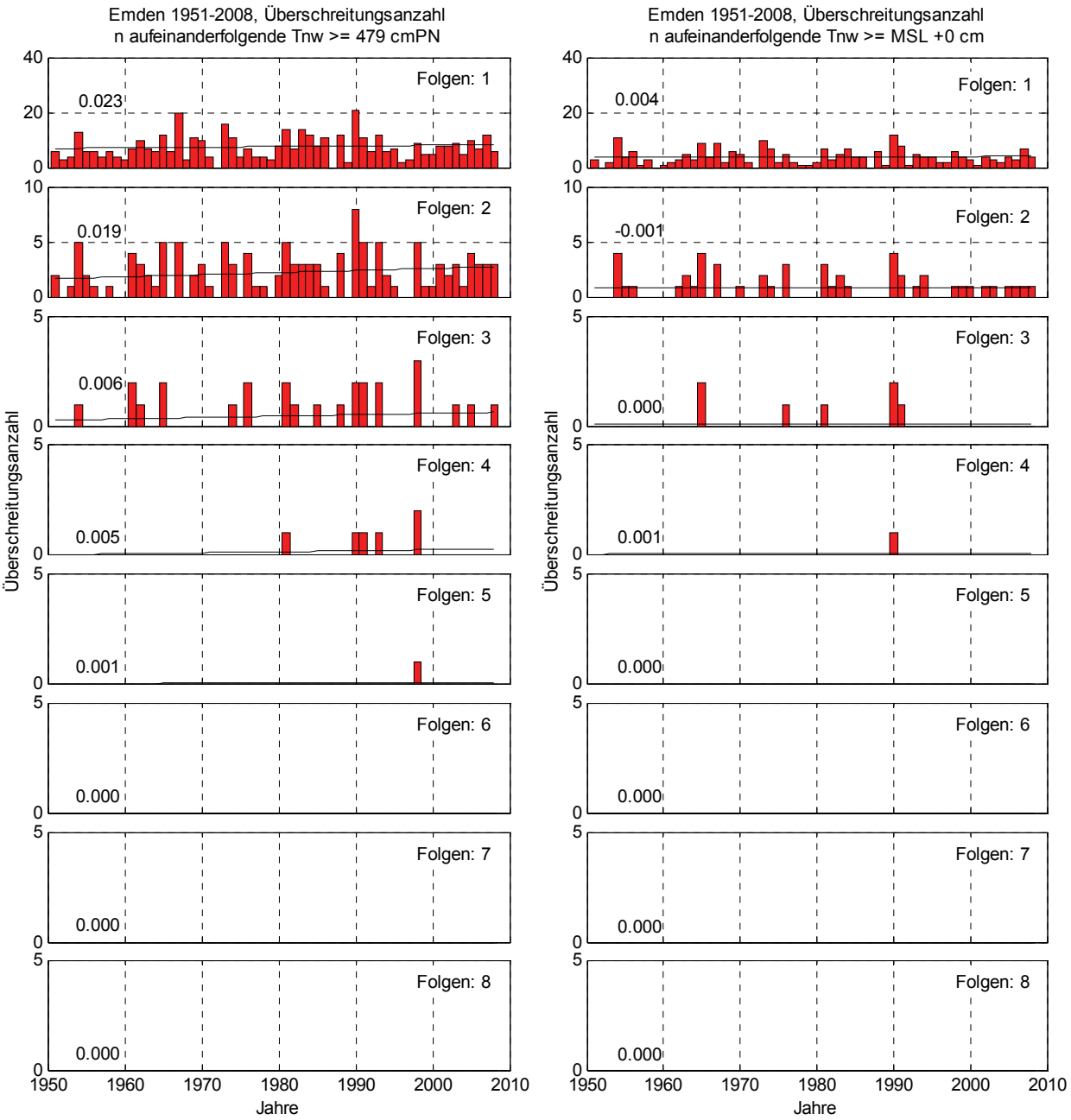


Abb. 14.4: Emden 1951-2008, Überschreitungszahlen durch 1-8 aufeinanderfolgende Tnw. Links: ≥ $MTnw_{1937\text{-}2008}$ + 150 cm = 479 cm, Rechts: ≥ MSL + 0 cm des jeweiligen Jahres

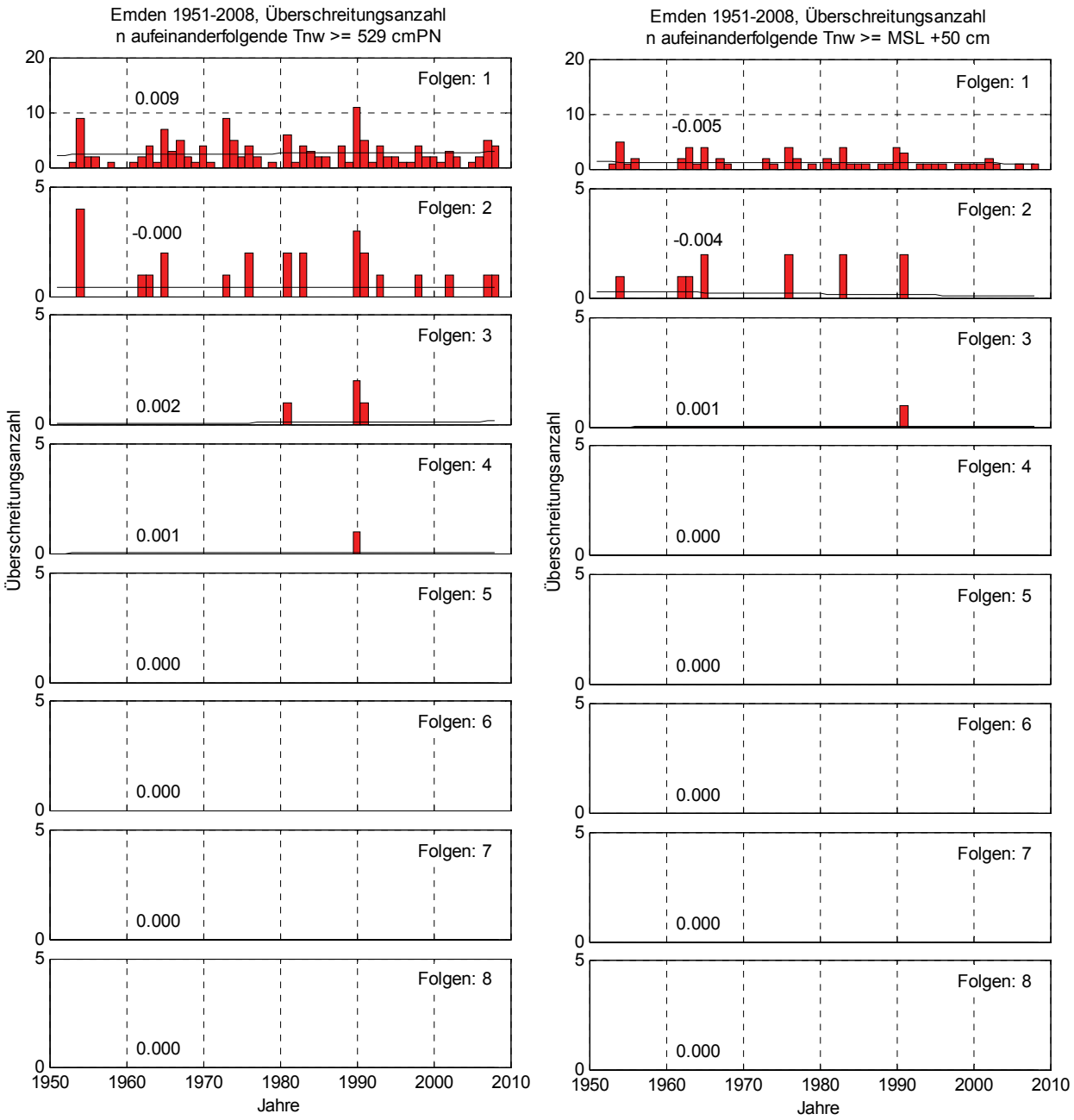


Abb. 14.5: Emden 1951-2008, Überschreitungszahlen durch 1-8 aufeinanderfolgende Tnw. Links: ≥ $MTnw_{1951-2008}$ + 200 cm = 529 cm, Rechts: ≥ MSL + 50 cm des jeweiligen Jahres

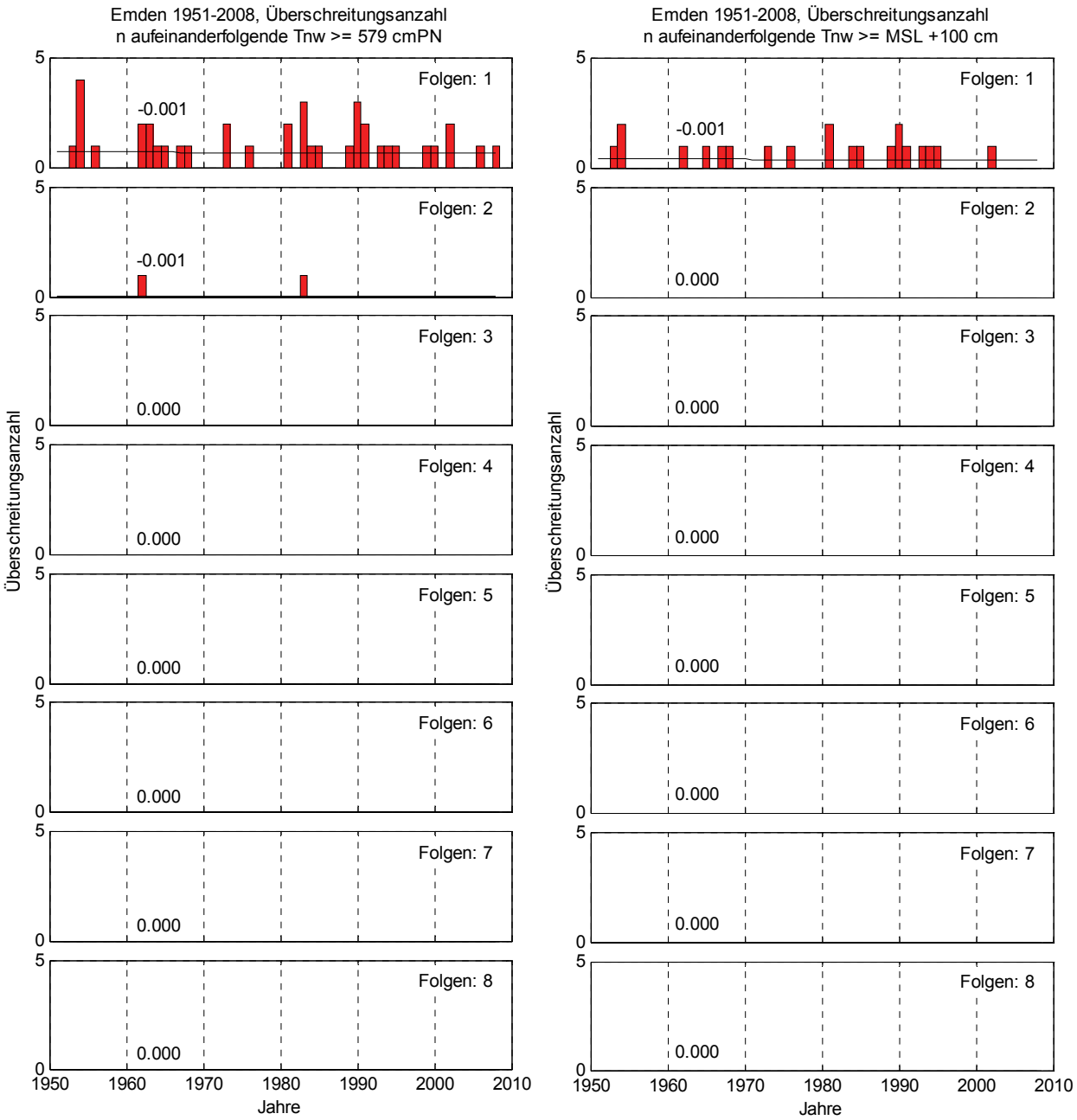


Abb. 14.6: Emden 1951-2008, Überschreitungszahlen durch 1-8 aufeinanderfolgende Tnw. Links: ≥ $MTnw_{1951\text{-}2008}$ + 200 cm = 579 cm, Rechts: ≥ MSL + 100 cm des jeweiligen Jahres

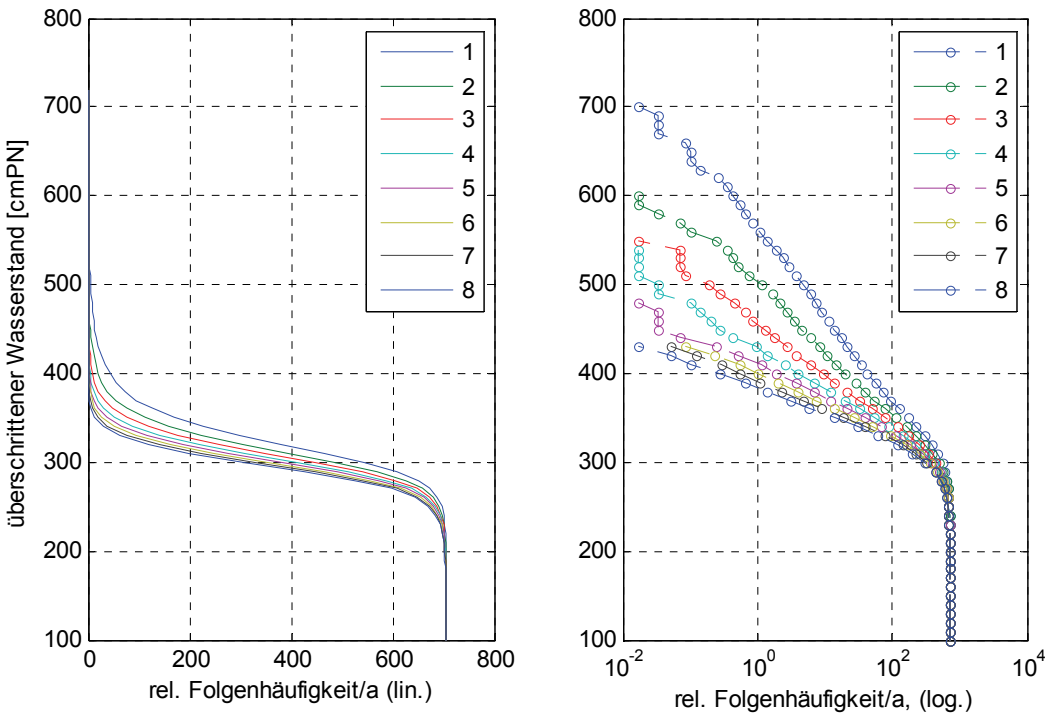


Abb. 14.7: Emden 1951-2008, relative Häufigkeiten aufeinanderfolgender Tnw

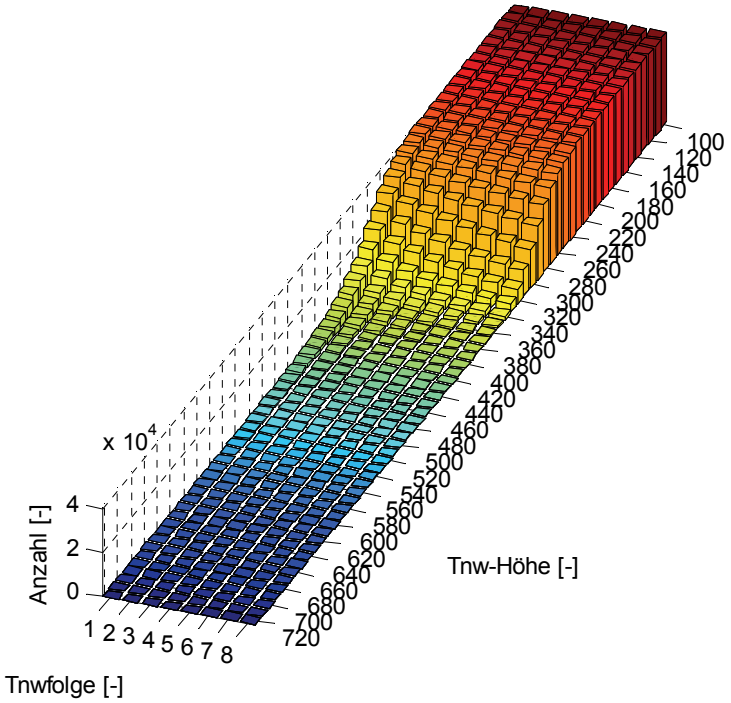


Abb. 14.8: Emden 1951-2008, Tnw-Folgezahlen

14.2 Tidehochwasser

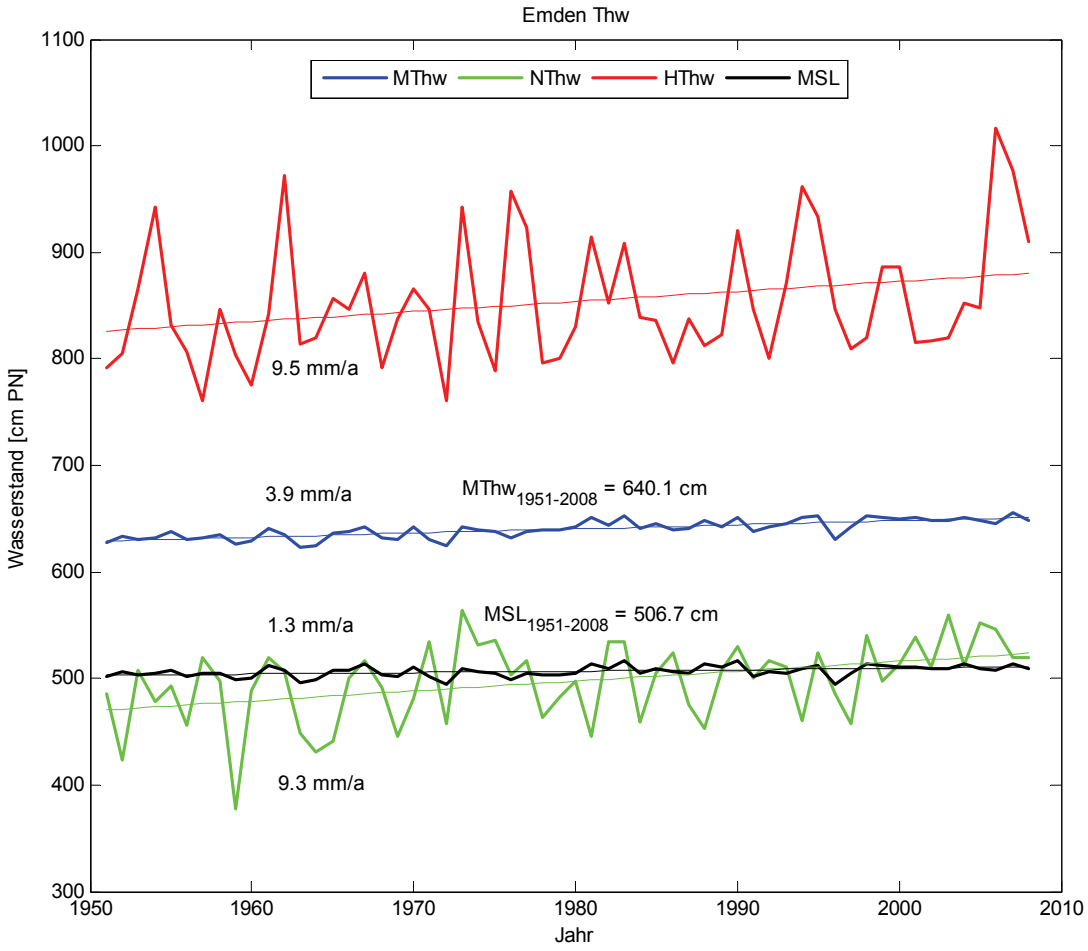


Abb. 14.9: Thw + MSL Trends Emden 1951 – 2008

Tendenziell nimmt der Trend der maximal erreichten Basishöhe von n aufeinanderfolgenden Thw mit zunehmender Folgenzahl ab (Abb. 2.10, Abb. 2.11). Ein deutlicher Abfall ist dabei allerdings bereits von Folgenzahl 1 auf 2 zu verzeichnen, während zwischen Folge 2 und Folge 6 nahezu gleichbleibende Trends von etwa 5 mm/a auftreten. Erst für Folgezahlen 6 bis 8 findet dann eine weitere Trendabnahme statt. Das Maximum wird für die Folgenzahl 1, welche gleichzeitig unabhängige Einzeltiden und damit die Reihe der HThw darstellt, mit einem Trend von 9,5 mm/a erreicht. Die Trends der Folgezahlen 1 bis 7 liegen über dem Trend des MThw = 3,9 mm/a. Der niedrigste Trend beträgt 2,7 mm/a und wird für 8 aufeinanderfolgende Thw erreicht.

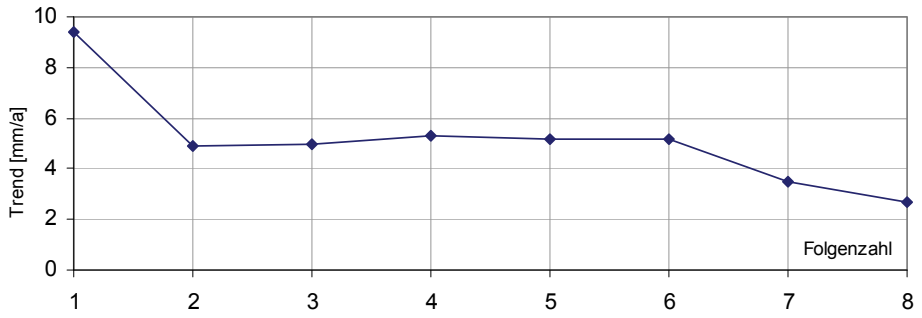


Abb. 14.10: Emden 1951-2008, Trendentwicklung max. Basishöhe Thw mit zunehmender Folgezahl

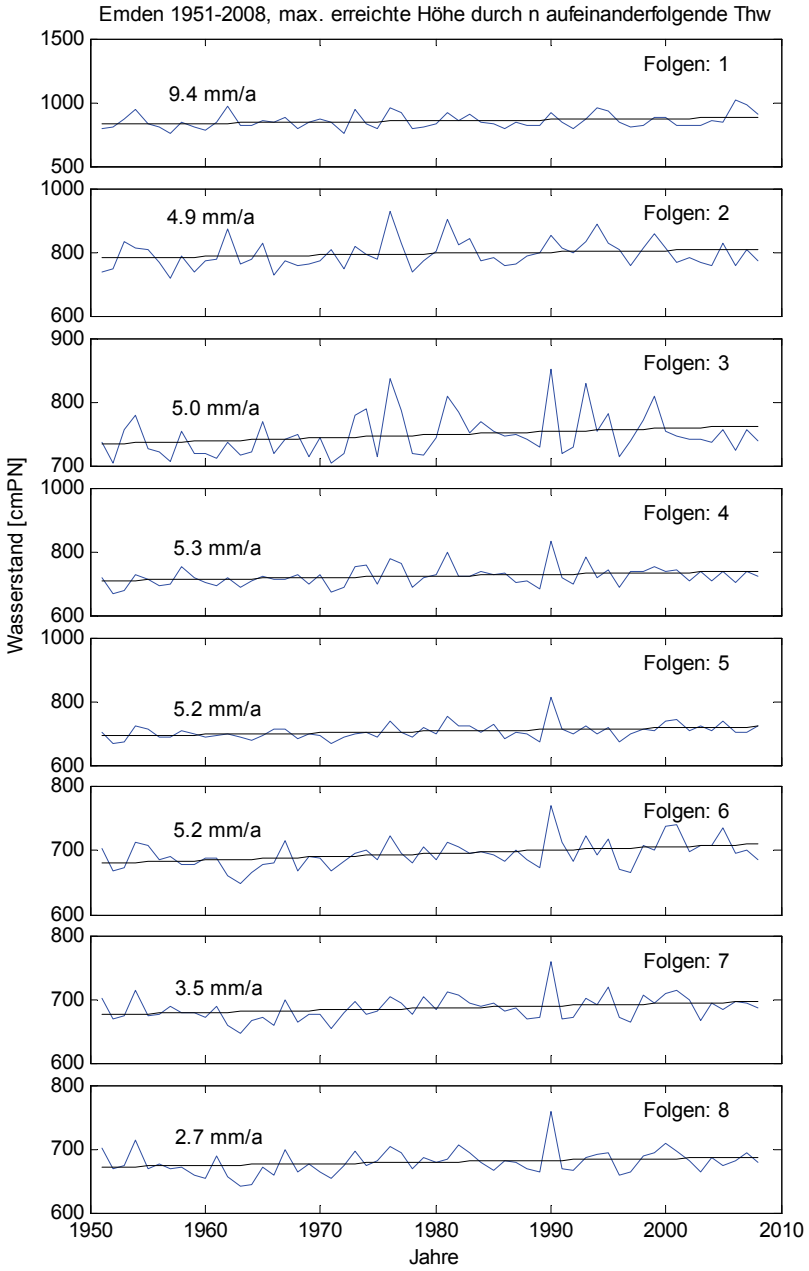


Abb. 14.11: Emden 1951-2008, maximal erreichte Basishöhe durch 1-8 aufeinanderfolgende Thw

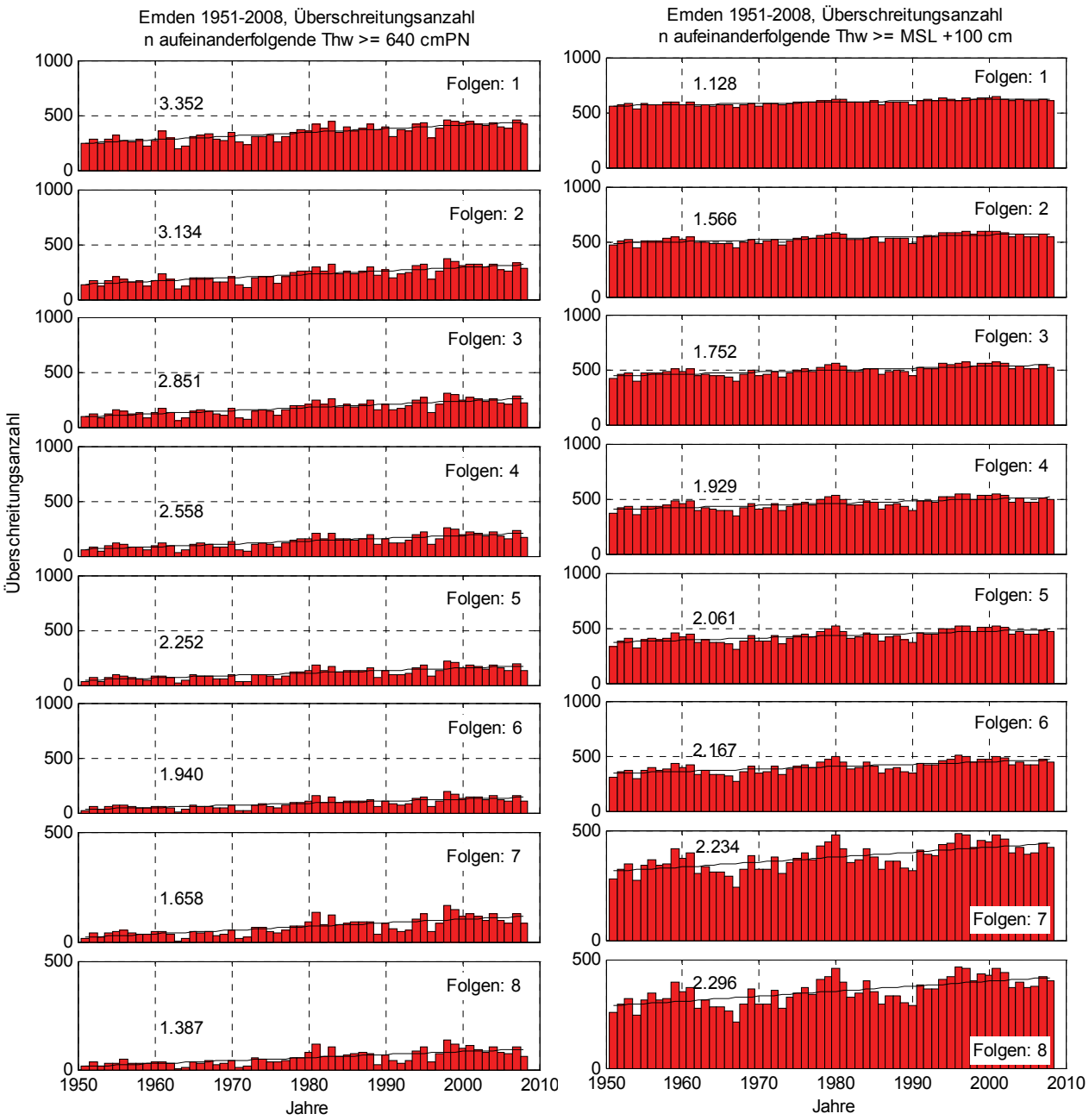


Abb. 14.12: Emden 1951-2008, Überschreitungszahlen durch 1-8 aufeinanderfolgende Thw. Links: ≥ $MThw_{1951-2008}$ + 0 cm = 640 cm, Rechts: ≥ MSL + 100 cm des jeweiligen Jahres

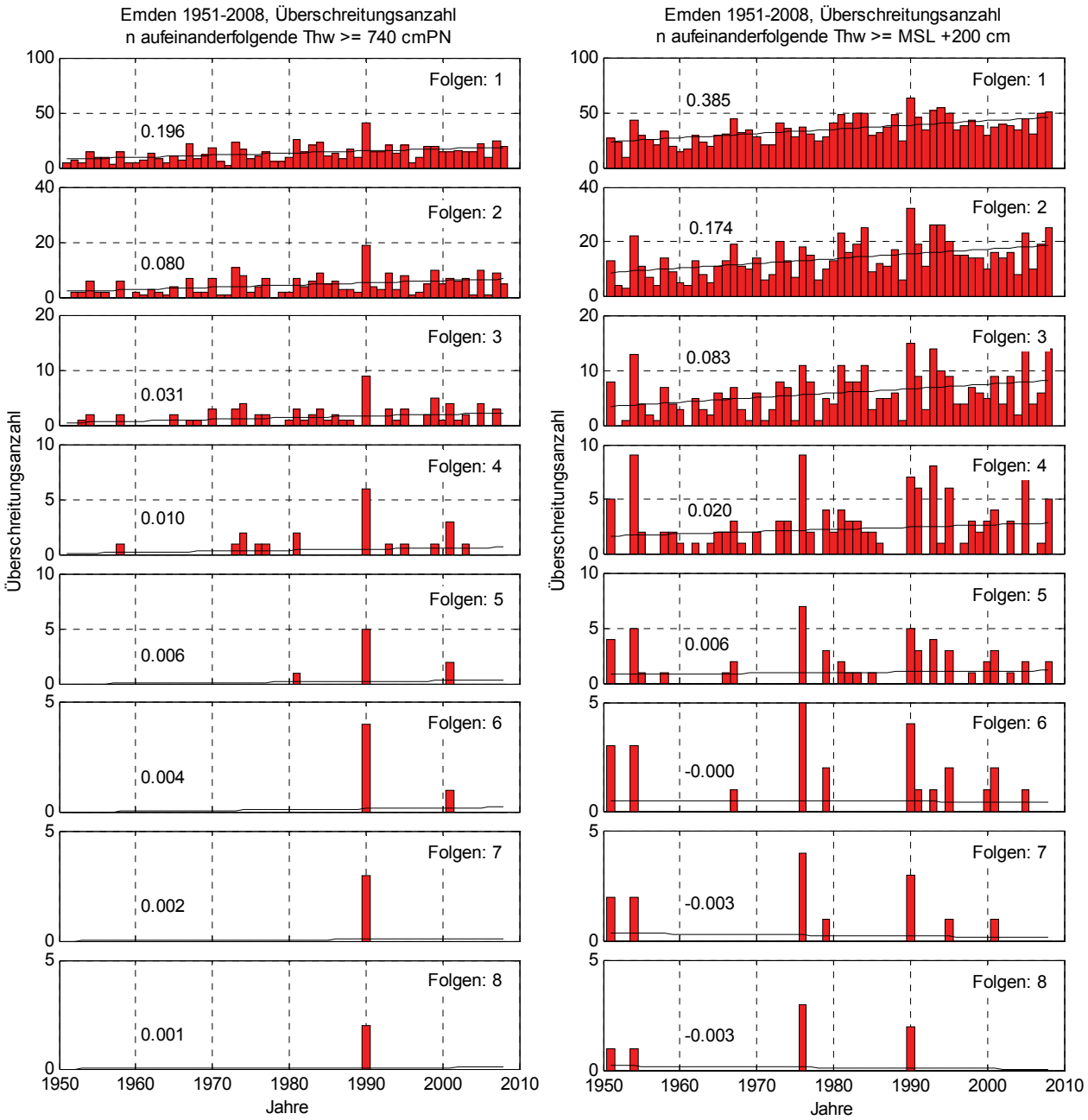


Abb. 14.13: Emden 1951-2008, Überschreitungszahlen durch 1-8 aufeinanderfolgende Thw. Links: ≥ $MThw_{1951-2008}$ + 100 cm = 740 cm, Rechts: ≥ MSL + 200 cm des jeweiligen Jahres

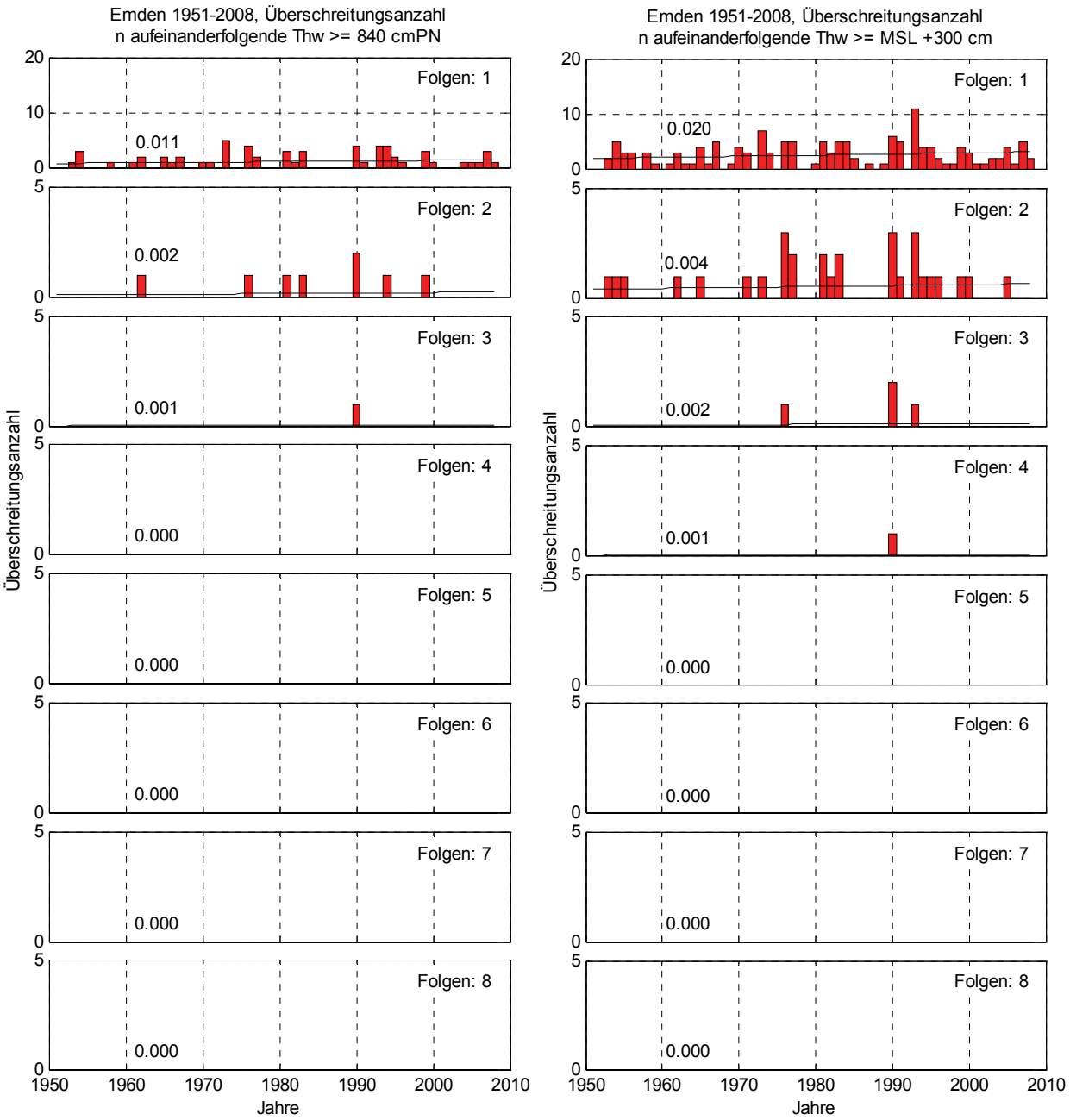


Abb. 14.14: Emden 1951-2008, Überschreitungszahlen durch 1-8 aufeinanderfolgende Thw. Links: ≥ $MThw_{1951-2008}$ + 200 cm = 840 cm, Rechts: ≥ MSL + 300 cm des jeweiligen Jahres

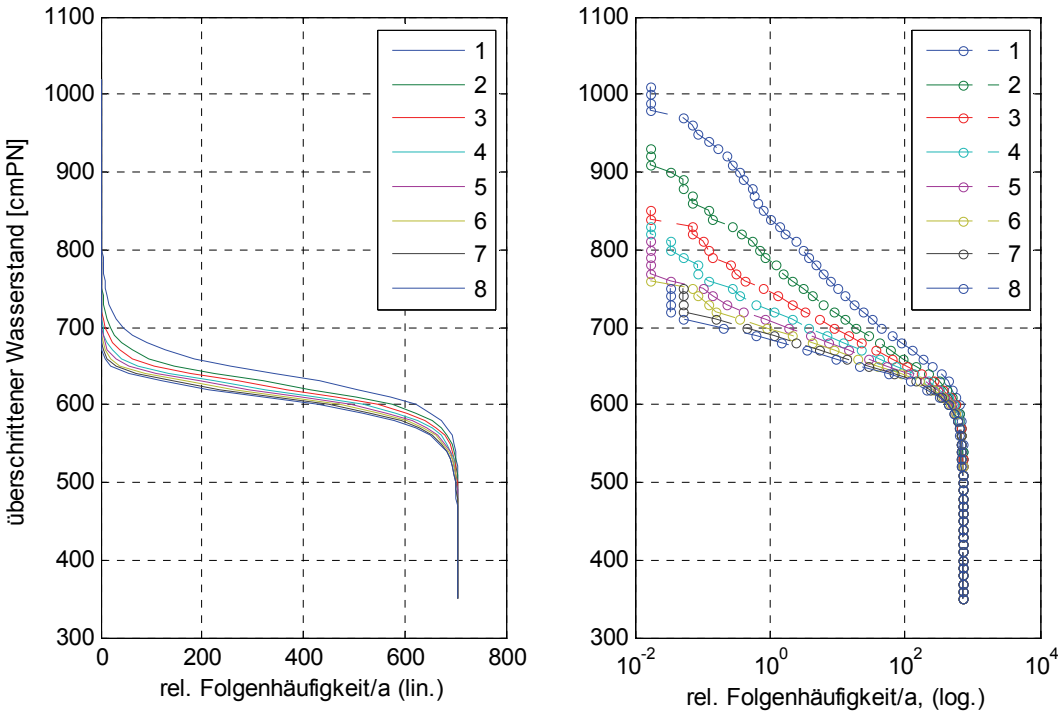


Abb. 14.15: Emden 1951-2008, relative Häufigkeiten aufeinanderfolgender Thw

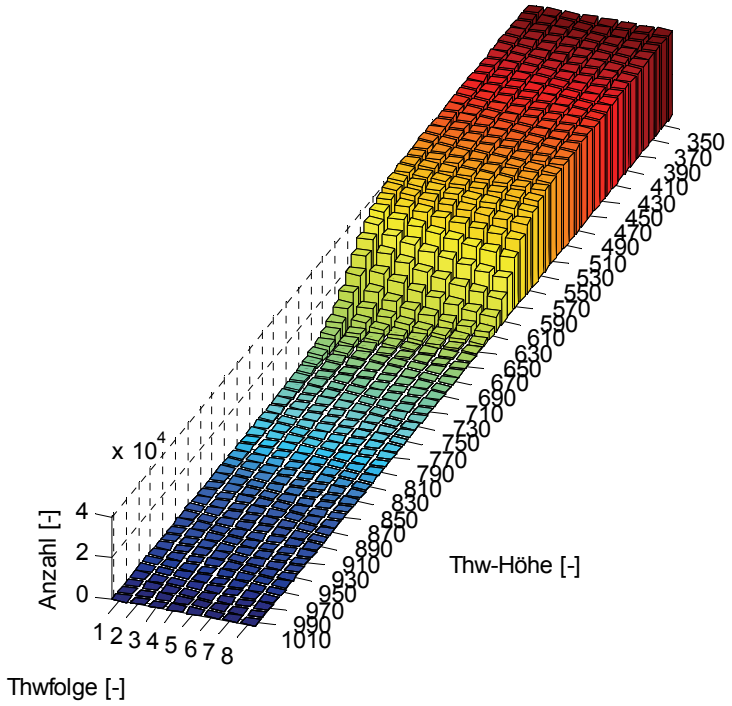


Abb. 14.16: Emden 1951-2008, Thw-Folgezahlen

15 Mittlere Verweildauern

Tab. 15.1: Mittlere Verweildauern [h] des Zeitraums 2000-2008, Pegel List, Hörnum, Wyk, Dagebüll, jeweils für Kalenderjahre (KJ), Sommerhalbjahre (SoHaJ, 1.5.-31.10.) und Winterhalbjahre (WiHaJ, 1.11.-30.4.) (für Norderney und Emden: Winterhalbjahre von 2001-2008)

	List			Hörnum			Wyk			Dagebüll		
Höhenstufe	KJ	SoHaJ	WiHaJ	KJ	SoHaJ	WiHaJ	KJ	SoHaJ	WiHaJ	KJ	SoHaJ	WiHaJ
180	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0
200	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	1,1	0,1	1,0
220	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	1,1	0,0	0,9	3,2	0,3	2,7
240	0,2	0,0	0,2	0,2	0,0	0,2	4,4	0,4	3,8	9,5	2,0	7,3
260	0,8	0,0	0,7	1,9	0,1	1,7	14,6	3,5	10,8	30,5	8,4	21,6
280	3,1	0,2	2,7	3,7	0,4	3,3	48,1	15,8	31,3	83,9	33,1	49,5
300	7,0	1,2	5,7	12,2	2,1	10,2	129,2	57,5	70,3	172,1	84,2	87,1
320	19,5	3,4	15,9	34,7	7,5	26,4	244,5	128,9	114,8	258,2	138,1	119,5
340	60,5	14,7	44,1	105,4	35,0	68,7	335,7	184,1	150,9	320,6	172,4	147,4
360	171,9	67,0	103,3	265,0	125,8	138,1	385,8	210,9	174,4	346,0	185,4	159,5
380	369,5	185,3	181,9	445,3	243,5	201,0	403,7	217,0	185,1	369,4	195,5	172,8
400	539,3	294,3	244,3	538,3	297,5	240,3	414,2	219,2	194,4	388,1	201,6	186,2
420	625,1	341,2	282,1	568,5	306,2	260,6	422,8	218,4	203,8	410,0	209,2	200,4
440	660,0	353,2	305,2	572,4	299,9	272,5	437,6	222,2	214,8	431,6	217,6	213,5
460	683,1	351,6	330,9	581,2	292,7	288,0	456,7	229,8	226,3	442,0	221,7	219,6
480	710,7	356,2	353,1	602,6	298,3	303,8	469,5	235,9	233,0	466,8	232,9	233,4
500	760,2	377,9	380,8	632,9	309,1	323,6	482,2	240,9	240,9	491,2	244,1	246,8
520	837,6	420,5	414,7	685,8	337,3	347,4	504,1	251,0	252,8	519,1	257,3	261,5
540	959,6	502,8	456,6	767,3	379,7	385,4	542,9	271,8	270,5	555,2	276,0	278,5
560	967,2	529,0	439,2	856,0	452,2	405,8	594,9	300,7	293,0	595,8	298,8	296,1
580	685,1	365,5	322,7	840,2	461,9	379,3	674,2	346,4	328,0	654,9	332,6	321,3
600	354,1	153,6	201,8	573,3	301,2	274,7	710,3	384,2	326,6	692,3	369,4	324,2
620	160,7	50,7	112,9	283,6	117,8	167,4	629,8	342,4	289,2	653,5	354,4	299,5
640	76,1	20,1	59,1	129,2	38,4	92,7	372,4	184,2	189,6	430,8	222,1	210,8
660	34,8	7,3	29,6	59,3	14,7	47,9	172,2	64,5	109,4	222,5	96,4	127,4
680	18,8	2,9	16,6	28,5	5,5	24,7	77,5	21,3	58,4	103,9	34,5	71,0
700	11,2	1,7	10,4	16,1	3,1	13,7	37,8	9,1	30,2	51,3	14,1	39,4
720	6,1	0,5	6,1	9,1	1,4	8,3	20,1	3,9	17,2	27,2	6,1	22,1
740	2,6	0,1	2,6	3,8	0,4	4,0	12,1	1,9	10,8	14,8	2,9	12,6
760	1,6	0,0	1,9	1,9	0,0	2,1	5,7	1,1	5,3	9,3	1,4	8,3
780	0,9	0,0	1,1	1,1	0,0	1,3	2,3	0,0	2,5	4,0	0,7	3,8
800	0,8	0,0	0,8	1,0	0,0	1,2	1,8	0,0	1,9	2,0	0,0	2,1
820	0,0	0,0	0,1	0,1	0,0	0,1	1,0	0,0	1,1	1,5	0,0	1,7
840	0,0	0,0	0,1	0,0	0,0	0,0	0,6	0,0	0,7	0,9	0,0	1,0
860	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,2	0,0	0,4	0,3	0,0	0,3
880	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,2	0,0	0,4
900	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0
920	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0
940	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0
960	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0
980	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0
1000	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0
1020	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0

Tab. 15.2: Mittlere Verweildauern [h] des Zeitraums 2000-2008, Pegel Wittdün, Husum, Helgoland, Cuxhaven, jeweils für Kalenderjahre (KJ), Sommerhalbjahre (SoHaJ, 1.5.-31.10.) und Winterhalbjahre (WiHaJ, 1.11.-30.4.) (für Norderney und Emden: Winterhalbjahre von 2001-2008)

	Wittdün			Husum			Helgoland			Cuxhaven		
Höhenstufe	KJ	SoHaJ	WiHaJ	KJ	SoHaJ	WiHaJ	KJ	SoHaJ	WiHaJ	KJ	SoHaJ	WiHaJ
180	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0
200	0,0	0,0	0,0	0,9	0,1	0,8	0,0	0,0	0,0	0,2	0,0	0,2
220	0,2	0,0	0,1	6,3	1,4	4,8	0,0	0,0	0,0	0,9	0,0	0,8
240	1,7	0,1	1,4	31,8	10,4	21,2	0,1	0,0	0,1	2,5	0,2	2,1
260	6,1	0,7	5,2	109,2	50,8	57,1	0,9	0,0	0,7	6,8	1,3	5,3
280	23,1	5,9	16,6	247,7	127,9	119,0	4,0	0,2	3,5	27,3	5,3	21,6
300	78,2	27,0	49,8	367,9	194,3	172,9	20,4	4,4	15,5	90,0	29,6	59,0
320	190,9	89,1	100,6	409,5	214,0	194,7	88,9	27,7	59,5	242,8	114,8	126,8
340	322,3	171,6	149,7	367,8	193,2	172,3	250,8	117,7	131,8	399,8	212,5	185,6
360	416,9	227,0	188,8	329,6	169,6	159,0	447,4	237,3	207,9	475,8	254,9	220,0
380	451,0	242,9	206,6	302,4	155,4	146,8	557,0	298,5	257,1	488,8	262,8	224,2
400	465,8	248,0	216,7	290,6	145,5	145,0	573,6	305,9	265,7	471,0	248,0	222,1
420	465,3	240,0	225,1	283,4	141,3	141,8	548,9	284,4	263,5	443,0	229,7	213,5
440	465,6	235,5	229,5	284,2	140,1	143,4	531,0	268,4	261,9	422,3	211,8	210,6
460	477,7	238,0	239,2	288,9	142,1	146,5	527,1	261,6	265,1	399,1	198,6	200,8
480	486,9	240,8	245,8	317,1	156,2	160,6	538,8	265,3	273,1	384,8	189,8	194,9
500	505,5	248,0	257,0	368,2	180,9	187,1	533,0	261,7	270,9	388,1	189,4	199,1
520	523,4	255,1	267,8	407,7	200,8	206,7	558,5	272,7	285,4	396,5	193,3	203,8
540	554,2	272,3	280,9	410,9	201,5	208,9	602,1	294,7	306,3	420,5	204,1	216,1
560	634,3	316,5	316,7	462,9	227,9	234,4	678,0	338,6	338,4	470,5	230,0	240,3
580	734,8	382,8	352,9	519,7	259,2	259,5	753,9	396,6	358,8	540,0	265,0	273,9
600	776,5	421,2	355,4	563,1	283,3	278,5	728,6	396,4	333,4	634,7	323,1	311,3
620	611,7	328,5	286,3	639,7	334,8	305,4	469,2	244,3	228,2	693,5	368,1	325,7
640	324,2	150,0	175,6	613,2	332,8	281,3	196,2	83,9	116,4	606,2	330,9	276,5
660	132,6	43,4	91,5	508,5	273,1	237,1	71,2	20,9	51,7	385,7	202,6	185,6
680	56,0	14,0	44,3	298,7	151,3	149,9	30,2	7,1	24,5	179,6	81,4	100,9
700	25,7	5,3	21,8	148,0	61,3	88,3	13,4	2,3	11,7	80,0	28,9	51,7
720	15,1	2,8	12,8	68,3	23,9	46,4	6,7	0,5	6,9	38,3	11,8	26,8
740	7,3	1,2	6,8	36,5	10,5	27,4	2,1	0,2	2,2	23,0	6,0	17,3
760	2,9	0,2	3,1	21,4	5,1	16,9	1,3	0,0	1,5	11,8	2,7	9,5
780	1,6	0,0	1,7	11,3	2,8	8,8	1,1	0,0	1,2	7,4	1,0	6,9
800	1,1	0,0	1,2	7,3	1,3	6,4	0,4	0,0	0,5	3,2	0,4	3,1
820	0,7	0,0	0,9	4,0	0,6	3,9	0,1	0,0	0,1	1,7	0,0	1,8
840	0,2	0,0	0,3	1,9	0,0	2,0	0,0	0,0	0,0	1,2	0,0	1,3
860	0,0	0,0	0,0	1,1	0,0	1,2	0,0	0,0	0,0	1,0	0,0	1,0
880	0,0	0,0	0,0	0,8	0,0	0,9	0,0	0,0	0,0	0,5	0,0	0,6
900	0,0	0,0	0,0	0,7	0,0	0,7	0,0	0,0	0,0	0,1	0,0	0,1
920	0,0	0,0	0,0	0,1	0,0	0,2	0,0	0,0	0,0	0,2	0,0	0,2
940	0,0	0,0	0,0	0,1	0,0	0,2	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,2
960	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0
980	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,1	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0
1000	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0
1020	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,1	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0

Tab. 15.3: Mittlere Verweildauern [h] des Zeitraums 2000-2008, Pegel Bremerhaven, LT Alte Weser, Wilhelmshaven, Norderney, jeweils für Kalenderjahre (KJ), Sommerhalbjahre (SoHaJ, 1.5.-31.10.) und Winterhalbjahre (WiHaJ, 1.11.-30.4.) (für Norderney und Emden: Winterhalbjahre von 2001-2008)

	Bremerhaven			LT Alte Weser			Wilhelmshaven			Norderney		
Höhenstufe	KJ	SoHaJ	WiHaJ	KJ	SoHaJ	WiHaJ	KJ	SoHaJ	WiHaJ	KJ	SoHaJ	WiHaJ
180	1,0	0,0	0,9	0,0	0,0	0,0	0,6	0,0	0,6	0,0	0,0	0,0
200	3,4	0,2	2,9	0,0	0,0	0,0	3,2	0,2	2,8	0,0	0,0	0,0
220	15,6	3,2	12,2	0,9	0,0	0,7	18,5	5,3	13,4	0,0	0,0	0,0
240	61,2	18,5	42,2	3,0	0,2	2,5	73,8	27,7	46,3	0,1	0,0	0,0
260	162,3	74,7	86,4	11,9	2,4	9,3	177,3	88,4	89,9	0,4	0,0	0,2
280	279,5	142,9	135,8	53,2	14,2	38,4	290,5	153,5	137,6	2,5	0,1	2,4
300	353,8	185,7	167,5	160,9	67,0	93,0	359,1	188,1	171,4	11,5	2,2	9,2
320	370,9	196,4	173,2	329,6	168,0	161,4	382,2	201,7	182,3	69,5	19,9	49,1
340	363,9	192,8	170,4	462,0	243,1	218,0	378,6	196,7	180,7	215,7	96,5	120,1
360	330,5	171,2	159,2	504,0	269,7	233,3	357,3	181,8	175,7	419,0	218,8	200,1
380	312,2	159,1	153,2	499,9	265,3	233,3	340,8	171,4	169,6	526,0	276,8	250,1
400	302,9	152,1	150,7	479,0	247,8	230,5	330,2	163,9	166,0	539,0	288,9	249,8
420	296,4	148,8	147,5	456,1	230,9	225,2	326,5	162,1	164,2	520,2	272,8	247,1
440	297,3	149,6	148,0	438,4	218,2	220,2	324,8	160,9	163,3	502,9	255,3	247,5
460	300,3	150,4	150,0	424,6	210,6	213,7	325,9	161,5	164,4	511,1	256,5	254,6
480	310,7	155,9	154,8	417,7	206,6	211,6	333,8	165,6	168,7	531,8	265,9	264,9
500	331,5	167,2	164,4	424,0	208,8	215,0	341,3	169,0	172,6	551,0	275,1	275,6
520	361,0	181,6	179,1	442,9	217,1	225,4	356,7	175,9	181,5	575,4	287,1	288,6
540	400,0	201,0	198,6	483,5	236,8	246,4	369,2	182,6	187,1	603,4	301,4	302,4
560	436,4	217,9	217,9	542,1	267,9	273,4	391,7	193,2	198,9	629,3	316,1	313,3
580	488,9	244,9	243,1	624,0	314,6	308,9	422,6	207,4	215,3	666,6	343,4	323,3
600	532,3	267,8	264,4	682,6	363,7	319,4	456,9	226,0	231,8	662,0	356,5	301,5
620	581,8	296,7	284,7	619,7	340,1	280,4	504,8	253,3	251,5	509,4	274,9	232,5
640	571,8	299,7	272,5	395,1	209,2	188,5	546,8	285,0	262,1	267,6	129,6	137,9
660	517,2	274,7	243,5	174,6	78,2	98,3	524,0	281,0	240,3	109,0	41,2	68,5
680	381,1	199,3	184,0	68,0	23,4	45,4	407,2	221,1	184,5	49,2	13,2	35,5
700	205,0	97,3	108,9	31,5	8,6	23,2	232,9	121,3	109,4	23,5	5,4	18,0
720	93,3	36,2	58,2	13,5	2,5	11,4	100,3	45,3	54,5	10,9	2,3	8,9
740	44,1	13,6	30,9	7,2	1,0	6,7	42,8	14,6	27,2	5,9	0,5	5,7
760	24,6	6,4	18,4	2,9	0,0	3,1	21,4	6,5	14,6	2,8	0,3	2,4
780	12,3	2,5	10,0	1,2	0,0	1,3	9,3	1,5	8,0	0,8	0,0	0,7
800	6,6	0,7	6,3	1,0	0,0	1,1	5,0	0,5	4,8	1,0	0,0	1,0
820	2,7	0,0	2,8	0,5	0,0	0,6	2,7	0,0	2,7	0,7	0,0	0,6
840	2,2	0,0	2,2	0,2	0,0	0,3	1,4	0,0	1,3	0,3	0,0	0,2
860	0,9	0,0	0,9	0,2	0,0	0,2	0,9	0,0	0,9	0,3	0,0	0,4
880	0,7	0,0	0,8	0,0	0,0	0,0	0,4	0,0	0,3	0,1	0,0	0,1
900	0,3	0,0	0,3	0,0	0,0	0,0	0,3	0,0	0,2	0,0	0,0	0,0
920	0,1	0,0	0,3	0,0	0,0	0,0	0,1	0,0	0,1	0,0	0,0	0,0
940	0,2	0,0	0,2	0,0	0,0	0,0	0,1	0,0	0,1	0,0	0,0	0,0
960	0,2	0,0	0,2	0,0	0,0	0,0	0,1	0,0	0,2	0,0	0,0	0,0
980	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,2	0,0	0,2	0,0	0,0	0,0
1000	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0
1020	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0

Tab. 15.4: Mittlere Verweildauern [h] des Zeitraums 2000-2008 Pegel Emden, jeweils für Kalenderjahre (KJ), Sommerhalbjahre (SoHaJ, 1.5.-31.10.) und Winterhalbjahre (WiHaJ, 1.11.-30.4.) (für Norderney und Emden: Winterhalbjahre von 2001-2008)

	Emden										
Höhenstufe	KJ	SoHaJ	WiHaJ	Höhenstufe	KJ	SoHaJ	WiHaJ	Höhenstufe	KJ	SoHaJ	WiHaJ
180	0,1	0,0	0,0	480	388,8	196,5	192,4	780	4,8	0,3	4,5
200	1,0	0,0	0,9	500	396,4	197,8	198,8	800	3,0	0,3	2,5
220	4,0	0,1	3,9	520	414,6	206,6	208,6	820	0,8	0,0	0,8
240	16,7	3,2	13,9	540	461,4	228,9	233,0	840	0,6	0,0	0,6
260	62,4	15,5	47,5	560	538,0	268,7	269,3	860	0,5	0,0	0,4
280	152,2	64,2	88,9	580	633,9	322,7	313,0	880	0,6	0,0	0,5
300	273,2	139,0	134,8	600	718,2	377,3	341,1	900	0,1	0,0	0,2
320	358,8	186,7	173,1	620	704,0	378,5	323,4	920	0,1	0,0	0,1
340	372,8	200,1	172,1	640	531,2	282,9	246,4	940	0,2	0,0	0,2
360	358,5	189,8	168,3	660	284,4	134,5	148,8	960	0,1	0,0	0,1
380	338,8	173,9	165,1	680	128,7	48,6	79,8	980	0,2	0,0	0,2
400	337,9	171,5	166,7	700	60,8	17,4	42,5	1000	0,0	0,0	0,0
420	355,0	179,6	175,2	720	34,0	8,2	25,5	1020	0,0	0,0	0,0
440	367,3	186,4	179,6	740	17,1	3,8	13,2	1040	0,0	0,0	0,0
460	376,5	190,1	186,1	760	8,5	1,3	7,4	1060	0,0	0,0	0,0