

Untersuchung zur Sohlerosion der Donau östlich von Wien über den Zeitraum 1996/2020 und damit zusammenhängende Änderungen der mittleren Grundwasserstände an donau nahen Messstellen

Die Sohlerosion in der Fließstrecke stromab des Kraftwerks Freudenau hat erhebliche Auswirkungen auf die Wasserspiegel der Donau und des flussnahen Grundwassers. Auch Veränderungen der Wasserführung der Donau (mittlere Abflüsse) sind erkennbar. Untersuchung auf Grundlage hydrographischer Daten und mit den Mitteln einer statistisch basierten Ingenieurhydrologie (Teststatistik).

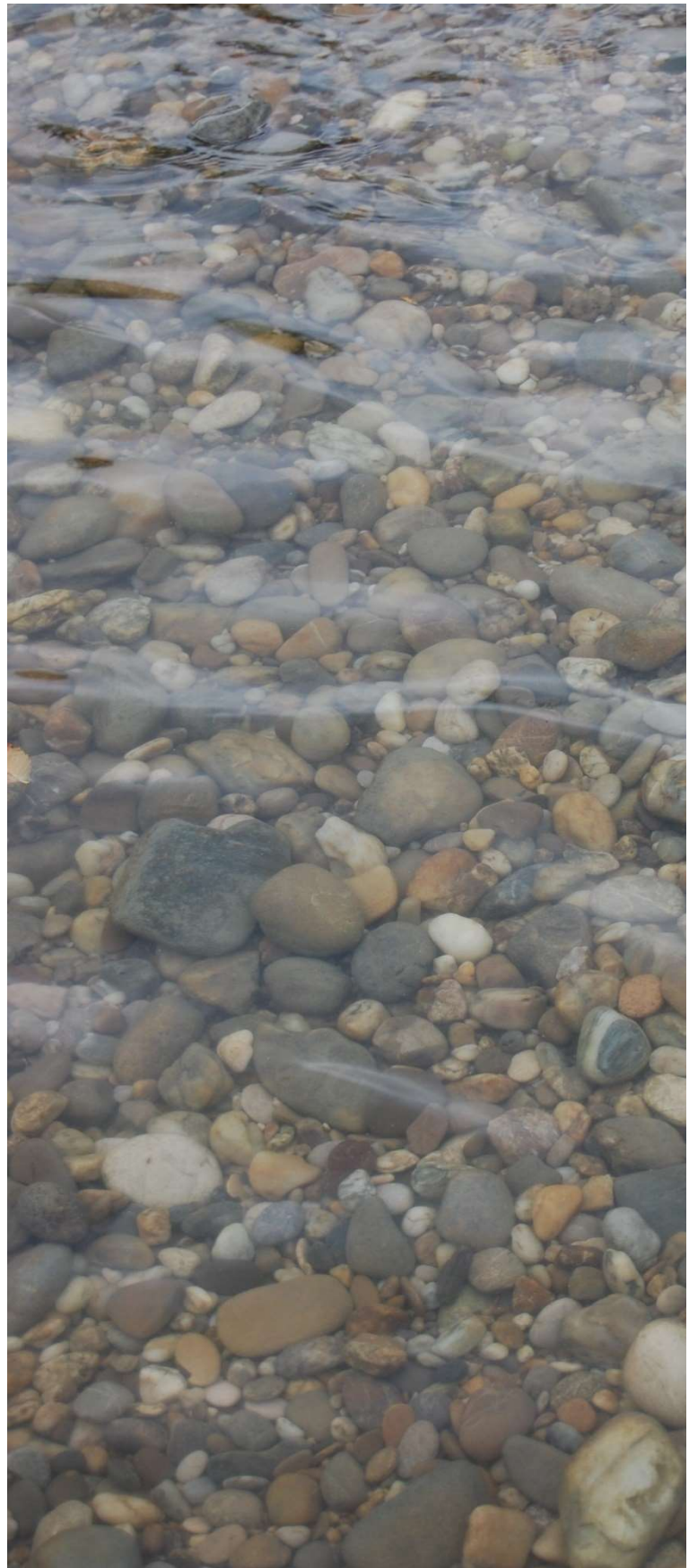
Gerhard Klasz



Ingenieurbüro
Dipl.-Ing. G. Klasz

Im Auftrag des
Nationalparks
Donau-Auen

Untersuchung zur
Sohlerosion der Donau
östlich von Wien über
den Zeitraum 1996/2020
und damit zusammen-
hängende Änderungen
der mittleren
Grundwasserstände an
donaunahen Messstellen



Wien, September 2023

IMPRESSUM:

Auftraggeber:

Nationalpark Donau-Auen GmbH
Schloss Orth
2304 Orth an der Donau

Auftragnehmer:

Ingenieurbüro Dipl.-Ing. Gerhard Klasz
Franz-Josefs-Kai 27
1010 Wien
Tel.: +43 1 533 87 47 - 14

Bearbeitung:

DI Gerhard Klasz
gerhard.klasz@a1.net

Änderungshinweis (Mai 2024):

gegenüber der Erstfassung (vom September 2023) wurde ein Fehler in Abbildung 7 korrigiert (Entfernen zweier Datenreihen mit irreführender Beschriftung, wobei diese Daten für die Aussage der Abbildung auch entbehrlich waren). Daneben wurden einige Schreibfehler korrigiert.

Untersuchung zur Sohlerosion der Donau östlich von Wien über den Zeitraum 1996/2020 und damit zusammenhängende Änderungen der mittleren Grundwasserstände an donauanahen Messstellen

Zusammenfassung

- (1) *Das hauptsächlich durch die Donaukraftwerke bewirkte Geschiebedefizit in der Donau östlich von Wien wird nach wie vor nicht vollständig durch Geschiebezugaben kompensiert. Seit Fertigstellung der Staustufe Freudenau (Teilstau 1996/ Vollstau 1998) war diese Maßnahme unvollständig. Daher geht die Sohlerosion flussab der Staustufe weiter, auch wenn ihr Ausmaß durch Geschieberückführungen der viadonau etwas gebremst werden konnte.*
- (2) *Methodisch wird hier auf hydrographische Daten des Hydrographischen Dienstes (viadonau) und der VHP zurückgegriffen (Wasserstände, Abflüsse und daraus ermittelte Abflusskurven und Jahres-MW-Zeitreihen), wobei im Gegensatz zu einer rein KWD-basierten Analyse eine hohe zeitliche Auflösung (Jahreswerte) und eine Überprüfung im Sinn einer Teststatistik möglich ist. Diese Auswertungen werden ergänzt und gestützt durch Trendanalysen zu den GW-Ständen (Zeitreihen der GW-Jahresmittel) für 15 donauernahe Grundwasser-Messstellen. Die KWD-1996, KWD-2010 und KWD-2020 werden vergleichend und in der Interpretation berücksichtigt, wobei diverse Unterschiede in den zugehörigen Referenzabflüssen (RNQ, MQ) über die Abflusskurven (w/Q-Beziehungen) kompensiert (korrigiert) werden.*
- (3) *Zwischen 1996 und 2020 kam es zu einer morphologisch bedingten Absenkung des Mittelwassers (durch Sohlerosion) im mittleren Abschnitt (ca. Fischamend bis Wildungsmauer) im Ausmaß von etwa 35 bis 50 cm, weiter stromab (also gegen Hainburg) nehmen diese Absenkungen ab, weil die Sohle am unteren Rand der Nationalparkstrecke bereits durch die Auflandungen der Staustufe Gabčíkovo gestützt werden; in der VHP-Erhaltungsstrecke (UW des Kraftwerkes Freudenau bis querab Schönau, Strom-km 1910) sind ebenfalls Eintiefungen zu beobachten, von etwa 40 bis 55 cm im unteren Bereich dieser Teilstrecke auf etwa 10 bis 20 cm im Unterwasser des Kraftwerkes.*
- (4) *Die zugehörigen Änderungsraten für Mittelwasser MW (zwischen 1996 und 2020) liegen im mittleren Bereich bei etwa -1,5 cm/Jahr, sie nehmen flussab (Richtung Hainburg) ab, im österreichisch/slowakischen Grenzabschnitt sind dann Auflandungen zwischen etwa 0,5 und beinahe 1,0 cm/Jahr zu beobachten (Stau einfluss durch Gabčíkovo). Auch im obersten Teil der VHP-Erhaltungsstrecke (Kraftwerks-UW bis Strom-km 1916) fallen die Eintiefungsraten geringer aus, mit etwa 0,5 cm/Jahr direkt im Kraftwerks-Unterwasser. In der unteren Hälfte der VHP-Erhaltungsstrecke (etwa Strom-km 1915 bis 1910) scheinen die Eintiefungen aber (hier unter Berücksichtigung der KWD-Änderungen) mit etwa 2 cm/Jahr besonders stark auszufallen.*
- (5) *Für Niederwasser (im Besonderen: RNW) fallen die Eintiefungen und Eintiefungsraten noch etwas stärker aus als für Mittelwasser, im mittleren Bereich zwischen etwa 1,5 und 2,0 cm/Jahr, und in der unteren Hälfte der VHP-Erhaltungsstrecke knapp über 2,0 cm/Jahr.*

- (6) Während der Untersuchungsperiode hatten auch die Mittelwasser-Abflüsse (MQ) einen fallenden Trend (von ca. $-10,1 \text{ (m}^3\text{/s)}/\text{Jahr}$), der zwar (noch) nicht statistisch signifikant ist, der sich aber bei der Abnahme der langfristigen MW-Stände auswirkt (mit etwa $-1,3 \text{ cm}/\text{Jahr}$). Bei den weiter oben angegebenen Werten ist dieser hydrologische Anteil nicht enthalten (weil sich diese Werte auf jeweils konstante Abflüsse beziehen und auch so ermittelt wurden), in der Natur (d.h. für Grundwasser und Donauauen) wirkt sich die Summe aus beiden Effekten aus.
- (7) In den letzten zehn Jahren (2010/2020) konnten die Sohlerosionen durch die Geschieberückführungen der viadonau gebremst werden. Dieser Effekt ist derzeit noch unsicher abzuschätzen. Auf Basis eines KWD-Vergleiches (KWD-2020 versus KWD-2010) ergibt sich sowohl für RNW als auch für MW eine gemittelte Änderungsrate (für die Strecke von Strom-km 1910 bis 1882) von rd. $-1,2 \text{ cm}/\text{Jahr}$, was im Vergleich mit den $-1,3$ bzw. $-1,4 \text{ cm}/\text{Jahr}$ (für die Periode 1996/2020) eine schwache Reduktion bedeutet. Mit den pegelbezogenen Auswertungen ergeben sich deutlichere Reduktionen, auf etwa $-0,5$ oder $-0,6 \text{ cm}/\text{Jahr}$, was aber methodisch eher unsicher ist. Besonders stark scheinen die Änderungen zuletzt bei Fischamend zu sein, wo viel Material verklappt wurde, und wo lokal sogar schwache Aufhöhungen zu beobachten waren. Insgesamt ist die Strecke aber immer noch eine Eintiefungsstrecke.
- (8) Die Änderungsraten für die GW-Jahresmittel an den donauunahen Messstellen (beidseits der Donau) und den gleichen Zeitraum (1996/2020) liegen (zwischen Wien und Stopfenreuth) meist bei etwa $-1,5$ bis $-3,1 \text{ cm/a}$; davon ist ein kleinerer Anteil rein hydrologisch bedingt (durch den für diese Phase abnehmenden Trend bei den MQ-Abflüssen), und ein größerer Anteil durch die Eintiefung und Absenkung der Donau-Wasserspiegel, also morphologisch bedingt. Erst im untersten Teilabschnitt (etwas flussab von Hainburg) sind die mittleren GW-Stände annähernd konstant oder schwach steigend (Einfluss des Staues der Staustufe Gabčíkovo).
- (9) Mit den oben genannten Änderungsraten sind die GW-Jahresmittel in den letzten 25 Jahren um ca. 45 bis 75 cm gefallen; dieser Trend ist (zwischen Wien und Stopfenreuth) generell statistisch signifikant. Die fallenden Grundwasserstände betreffen u.a. die (Untere) Lobau, die Donauauen und generell alle donauunahen Grundwassernutzungen, also auch die Brunnen in der Lobau, bei Fischamend, Mannswörth, Petronell usw. Die hydrologisch bedingten Effekte (Abnahme der Donau-MQ) werden hier durch die morphologisch bedingten Effekte (Sohlerosion der Donau) wesentlich verstärkt, diese Prozesse reichen thematisch und räumlich über den Nationalpark hinaus und laufen allen wasserwirtschaftlichen Zielsetzungen entgegen.
- (10) Der Kieskörper unter der Sohle der Donau (im Folgenden: Sohl-Geschiebespeicher) nimmt durch die Sohlerosion laufend ab. Für die Periode 1996/2020 erfolgte in der VHP-Erhaltungstrecke eine mittlere Abnahme von rd. $45.000 \text{ m}^3/\text{Jahr}$ (eventuell auch $50.000 \text{ m}^3/\text{Jahr}$), was bereits in BMNT (2018)¹ festgestellt wurde. Das war und ist dort aber nach den Genehmigungsbescheiden für das Kraftwerk Freudenau grundsätzlich unzulässig. Insgesamt (seit 1996) macht das einen Verlust von rd. 1,04 Millionen Kubikmeter aus, was mit entsprechenden Wasserspiegelabsenkungen verbunden war und ist (sh. weiter oben). Ob bzw. wie weit diese Abnahmen des Sohl-speichers seit 2020 gebremst werden konnten, ist aus den hydrographischen Daten derzeit noch nicht sicher ableitbar. Allerdings zeigen jene Pegel, für die über 2020 hinaus Daten verfügbar sind (KW Freudenau – UW, Wildungsmauer und Hainburg) eine stetige und weiter fallende Entwicklung, also noch keinen Trendbruch.

¹ Bundesministerium für Nachhaltigkeit und Tourismus, 2018: Endbericht der Arbeitsgruppe „Sohlentwicklung in der freien Fließstrecke unterstrom Kraftwerk Freudenau.“

- (11) *Flussab der VHP-Erhaltungsstrecke (Strom-km 1910 bis zur hydromorphologischen Stauwurzel bei etwa Strom-km 1882) und die Periode 1996/2020 kann die mittlere Abnahme des Sohl-Geschiebespeichers auf ca. 85.000 bis 95.000 m³/Jahr eingeschätzt werden (insgesamt also ca. 2,0 bis 2,3 Millionen Kubikmeter Geschiebedefizit).*
- (12) *Und summiert über die Gesamtstrecke (Strom-km 1921 bis 1882) und die Periode 1996/2020 ist die Abnahme des Sohl-Geschiebespeichers mit rd. 130.000 bis 145.000 m³/Jahr einzuschätzen (insgesamt also ca. 3,2 bis 3,5 Millionen Kubikmeter).*
- (13) *Die Wirkung der Geschieberückführungen der viadonau sind wegen teilweise unklarer Befunde (sh. weiter oben) derzeit nur unsicher abzuschätzen. Unter Berücksichtigung aller Informationen ist das wahrscheinlichste Szenario, dass mit diesen Maßnahmen das Geschiebedefizit von zuvor (für diese Teilstrecke) etwa 105.000 m³/Jahr (BMNT, 2018) auf rd. 40.000 bis 50.000 m³/Jahr reduziert werden konnte. Es ist damit aber immer noch eine Erosionsstrecke.*
- (14) *Der Kieskörper unter der Sohle ist nur wenige Meter mächtig, darunter befinden sich feinkörnige und meist wenig erosionsresistente Feinklastika (Sande, Schluffe). Wenn die Sohlerosion weiter läuft, dann ist letztlich mit einem Sohldurchschlag zu rechnen. Es ist nicht die Frage, ob das eintritt, sondern lediglich wann es eintritt. Es sind keine rechnerischen bzw. numerischen Verfahren zur Prognose verfügbar; seitens der viadonau wird die Sohle bei tiefreichenden Kolken verstärkt beobachtet, aber ungeachtet dieses Monitorings steigt die Wahrscheinlichkeit eines Sohldurchschlages mit jeder weiteren Abnahme des Sohl-Geschiebespeichers. Eine solche Situation wäre mutmaßlich mit mehreren Meter starken Sohlerosionen (Erosionsrinne entlang des Talweges) verbunden, und sie wäre wasserbaulich mutmaßlich nicht zu beherrschen. Gerade im obersten Abschnitt wären mit den Hafenzufahrten, mit der Zufahrt in die Schleusen des Kraftwerkes und einer zwangsläufigen Versteilung der Mündung des Donaukanals massive Behinderungen der Schifffahrt gegeben, die Randbedingungen für Grundwassernutzungen (donaunahe Brunnen, etwa in der Lobau) und Ökologie würden drastisch und wahrscheinlich irreversibel verschlechtert. Dazu kämen für die Unterliegerstrecke (Slowakei, Stauraum Gabčíkovo) massive Probleme aus den entsprechend verstärkten Auflandungen.*

1 Allgemeines

Auftraggeber dieser Studie ist die Nationalpark Donau-Auen GmbH.

Diese Studie schließt an frühere Untersuchungen an (u.a. auch an BMNT, 2018), und behandelt speziell jene Aspekte, bei denen neuere Daten oder Erkenntnisse vorliegen, oder für die aufgrund aktueller Entwicklungen eine weitere Detaillierung zweckmäßig erscheint. Der Bericht ist aber so aufgebaut und formuliert, dass er im Wesentlichen für sich verstanden werden kann.

2 Untersuchungszeitraum und Untersuchungsstrecke

Die Untersuchung erstreckt sich auf den Zeitraum zwischen 1996 (Teilstau am Kraftwerk Freudenau im März 1996; Gründung des Nationalparks im Oktober 1996) und 2020 (Verfügbarkeit der hydrographisch geprüften Daten über den Hydrographischen Dienst: eHyd).

Für einzelne Aspekte werden aber auch frühere Daten berücksichtigt, etwa die KWD-1985 oder, sofern verfügbar, frühere GW-Stände oder Abflüsse. Dies dient aber nur der Interpretation. Die eigentlichen Trenduntersuchungen werden für die Periode 1996/2020 vorgenommen.

Untersuchungsstrecke ist die freie Fließstrecke der Donau zwischen dem Unterwasser der Staustufe Freudenau (Strom-km 1921) und der Marchmündung (Strom-km 1880). Für einzelne Aspekte (z.B. Ermittlung der Lage der „Stauwurzel“ des Staues des Kraftwerkes Gabčíkovo) werden aber auch die in der österreichisch-slowakischen Grenzstrecke gelegenen Pegelstellen Thebnerstraßl (Strom-km 1879,29) und Wolfsthal (Strom-km 1874,84) berücksichtigt.

3 Hydrographisch gestützte Untersuchung zur Sohlstabilität für den Zeitraum ab 1996

3.1 Zielsetzung

Für die über den Hydrographischen Dienst (veröffentlicht über die Hydrographische Jahrbücher bzw. ehyd.gv.at) und die Verbund Hydro Power (VHP) verfügbaren Pegelstellen (sh. Tab. 1) sollen die Veränderungen der mittleren Sohlagen mit möglichst hoher zeitlicher Auflösung (einzelne Jahre) aus der Entwicklung charakteristischer Wasserstände (Methode 1) und aus einer Trendanalyse der Jahres-MW (Methode 2) abgeleitet werden und mit zusätzlichen Informationen (Kennzeichnende Wasserstände der österreichischen Donau: KWDs) in Beziehung gesetzt werden. Dabei soll speziell auf allfällige Trendbrüche und Besonderheiten während der letzten Jahre und auf Muster im Längsverlauf geachtet werden.

3.2 Pegelstellen

Die Untersuchung wird für die in [Tab. 1](#) angegebenen Pegelstellen durchgeführt.

Tabelle 1: Pegelstellen und zugehörige Informationen; PNP = Pegelnullpunkt; L= linksufrig; R= rechtsufrig;

Pegel:	Lage [Str-km]		PNP [m ü.A.]	Zur Datenbasis:	Anm.:
Kraftwerk Freudenau UW	1920,67	R	0,00	Daten von VHP; Tageswerte ab 1996; Abflüsse von Korneuburg	
Fischamend	1907,90	R	143,92	Tageswerte (Wst) ab 2006; zuvor Monatswerte aus HJB; Abflüsse von Wildungsmauer	
Orth	1901,72	L	143,30 / 142,30	Tageswerte (Wst) / Auswertung ab 2003; Abflüsse von Wildungsmauer	(1)
Wildungsmauer	1894,72	R	140,48 / 139,48	Tageswerte (Wst und Abfl.) ab 1996	(2)
Bd. Dt. Altenburg	1886,86	R	137,18	Tageswerte ab 2002, zuvor Monatswerte aus HJB; Abflüsse von Hainburg	(1)
Hainburg	1883,92	R	135,25	Tageswerte (Wst und Abflüsse) ab 1996	
Thebnerstraßl	1879,25	R	133,26	Tageswerte (Wst. und Abflüsse.) / Auswertung ab 2000;	
Wolfsthal	1874,84	R	130,21	Tageswerte (Wst) ab 2000; zuvor Monatswerte aus HJB; Abflüsse von Thebnerstraßl (ab 2000) bzw. Hainburg + Angern an der March (vor 2000)	
Anm. (1): PNP-Änderung im Oktober 2019; Anm. (2): PNP-Änderung im Jänner 2004;					

Mit Ausnahme der Daten des Pegels KW Freudenau – UW stammen alle Daten vom Hydrographischen Dienst (eHyd bzw. HJB).

Für die Pegelstellen Orth und Thebnerstraßl liegen Daten erst ab 2003 bzw. 2000 vor; für sie erfolgen die Auswertungen also entsprechend verkürzt bzw. methodisch eingeschränkt (nur nach Methode 1).

Für die Pegelstellen Wildungsmauer, Hainburg und Thebnerstraßl werden ergänzend auch noch Daten für 2021 und 2022, die noch nicht vom Hydrographischen Zentralbüro (HZB) freigegeben wurden, berücksichtigt (übernommen von der Homepage des Niederösterreichischen Hydrographischen Dienstes), allerdings nur als Zusatzinformation. Die statistischen Auswertungen (Methoden 1 und 2) erstrecken sich auch für diese Pegel bis 2020.

3.3 Hinweise zur Methodik

Im Folgenden werden zwei Methoden angewandt, die auf hydrographisch ermittelte und dokumentierte Daten aufbauen und auch eine Analyse im Rahmen der Teststatistik ermöglichen.

3.3.1 Zur Methode 1

Für alle in Tab. 1 angegebenen Pegelstellen liegen Tageswerte zu den Wasserständen vor (für Fischamend, Orth und Wolfsthal für einzelne Jahre nur Monatswerte)². Zusätzlich sind Abfluss-Tageswerte für Fischamend, Wildungsmauer, Hainburg und Thebnerstraßl verfügbar. Für alle anderen Pegelstellen (Orth, Bad Dt. Altenburg, Wolfsthal) können die Abfluss-Tageswerte aus benachbarten Pegelstellen zugeordnet werden (also z.B. für Orth die Abflüsse von Wildungsmauer; bzw. für Wolfsthal jene von Thebnerstraßl). Daraus ergeben sich für jedes einzelne Jahr Abflusskurven (w/Q-Beziehung³); diese werden visuell überprüft, ggf. (sehr selten) sind einzelne Ausreißer dabei (einzelne Tageswerte), diese werden für die weitere Bearbeitung entfernt. Diese Daten werden für den Bereich zwischen Niederrwasser und ca. 4000 m³/s über eine quadratische Funktion nach dem Ansatz von Fenton (2018)⁴ angepasst:

$$Q^v = a_0 + a_1 \cdot w \quad (\text{Gl. 1})$$

mit dem Durchfluss Q [m³/s], dem Wasserstand w [m ü.A.] und drei Kalibrierparameter a_0 , a_1 und v (Exponent); Fenton (2018) zeigt, dass man mit $v = 1/2$ (quadratische Anpassung) normalerweise (sehr) gute Anpassungen erzielt, solange man „kleine“ Durchflüsse hat (d.h. unter dem bordvollen Abfluss, also $Q < Q_{bf}$), und das ist auch in diesem Donauabschnitt (mit $Q < Q_{bf} \sim 5000$ m³/s) der Fall.

In Abb. 1 wird dies beispielhaft für den Pegel Wildungsmauer gezeigt. Die quadratische Anpassung ist meist mit sehr geringen Abweichungen verbunden, die Bestimmtheitsmaße R^2 liegen meist $R^2 \geq 0,999$. Nur für einzelne Pegelstellen und einzelne Jahre sind etwas größere Streuungen möglich, mutmaßlich dann, wenn innert einzelner Jahre seitens der viadonau die Pegelschlüssel etwas stärker verändert wurden, wenn also eine Mischung aus zwei Datenkollektiven vorliegt, wobei diese Verschiebungen meist gering ausfallen. Das Bestimmtheitsmaß R^2 ist auch dann hoch, meist mit $R^2 \geq 0,995$, und diese Unschärfen betreffen nur einzelne Jahre, nie eine ganze Zeitreihe.

Mit diesen analytisch formulierten Abflusskurven (Funktionen) werden dann charakteristische Wasserstände für $Q=980$ m³/s (das entspricht dem RNQ zwischen Wien und Marchmündung gem. KWD-2010) bzw. 1049 m³/s (RNQ gem. KWD-2010 stromab der Marchmündung) und für $Q=1930$ m³/s (MQ zwischen Wien und Marchmündung gem. KWD-2010) bzw. 2068 m³/s (MQ gem. KWD-2010 stromab der Marchmündung) bestimmt.

² In solchen Fällen (für einzelne Jahre nur Monatswerte verfügbar) ist die Auswertung ganz analog möglich, die Zahl der Stützstellen ist dann entsprechend geringer (es werden dann tw. auch ergänzend Monatsminimal verwendet).

³ Auch „Pegelschlüssel“ genannt.

⁴ Fenton, J. (2018): On the generation of Stream rating curves; Journal of Hydrology (564) 748-757.

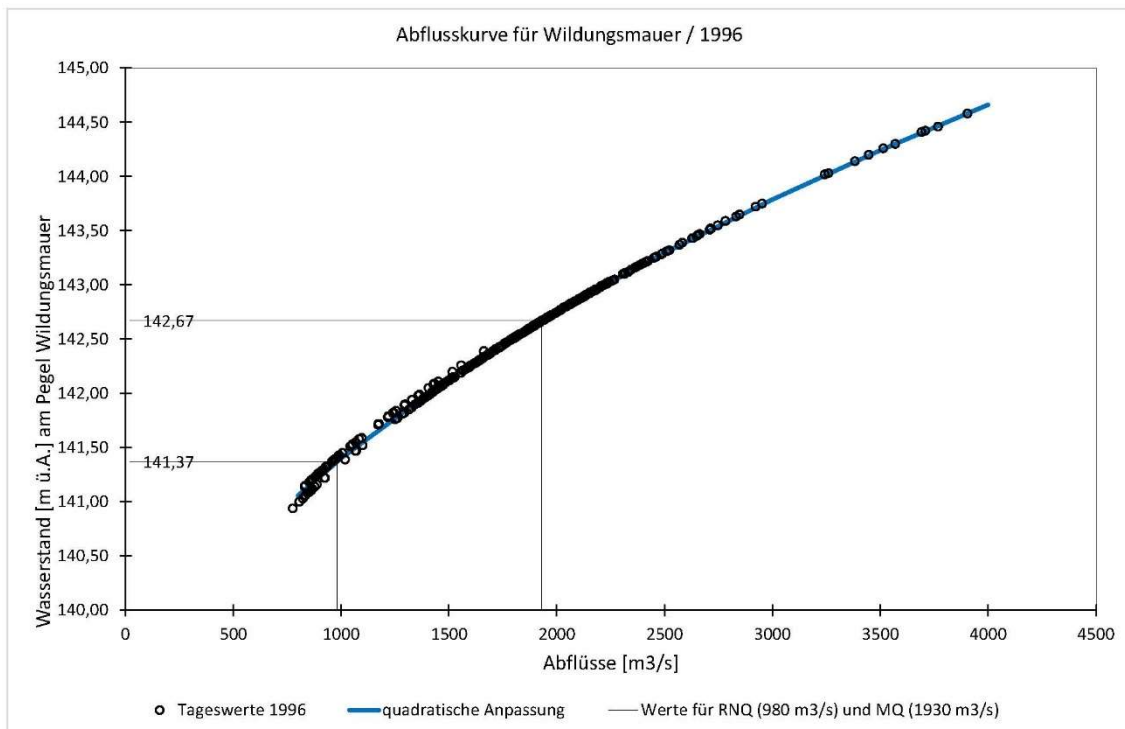


Abbildung 1: Aus den Daten (des Hydrographischen Dienstes) rekonstruierte Abflusskurven (w/Q-Beziehung) für den Pegel Wildungsmauer und das Jahr 1996. Die eingetragenen Tageswerte (Wasserstands- und Abflussmittelwerte) werden durch eine quadratische Funktion (vgl. Fenton, 2018) angepasst, man erkennt hier im unteren Abflussbereich eine gewisse Unschärfe (zwei verschiedene Datenkollektive), offensichtlich wurde in diesem Jahr ein Pegelschlüssel durch einen anderen Pegelschlüssel ersetzt; eingetragen sind hier auch die für dieses Jahr und die Daten approximierten Wasserstände für RNQ (980 m³/s) und MQ (1930 m³/s). Das Bestimmtheitsmaß ist hier $R^2 = 0,999$.

Die damit erhaltenen Wasserstände (eben analog RNQ und MQ gem. KWD-2010) für die einzelnen Jahre (im Folgenden auch als Zeitreihen der charakteristischen Wasserstände bezeichnet) werden schließlich im langjährigen Verlauf aufgetragen, vgl. Abb. 2 (für Pegel Wildungsmauer) bzw. Anhang A2 (für alle untersuchten Pegelstellen), mit den KWD-Werten (aus 1985, 1996 und 2010) verglichen, und sie werden im zeitlichen Verlauf im Sinn linearer Regressionsmodelle angepasst. Damit ergeben sich für Wildungsmauer MW Änderungsraten von -1,3 cm/a und für RNW von -1,5 cm/a (sh auch Abb. 2 und Tab. 4).

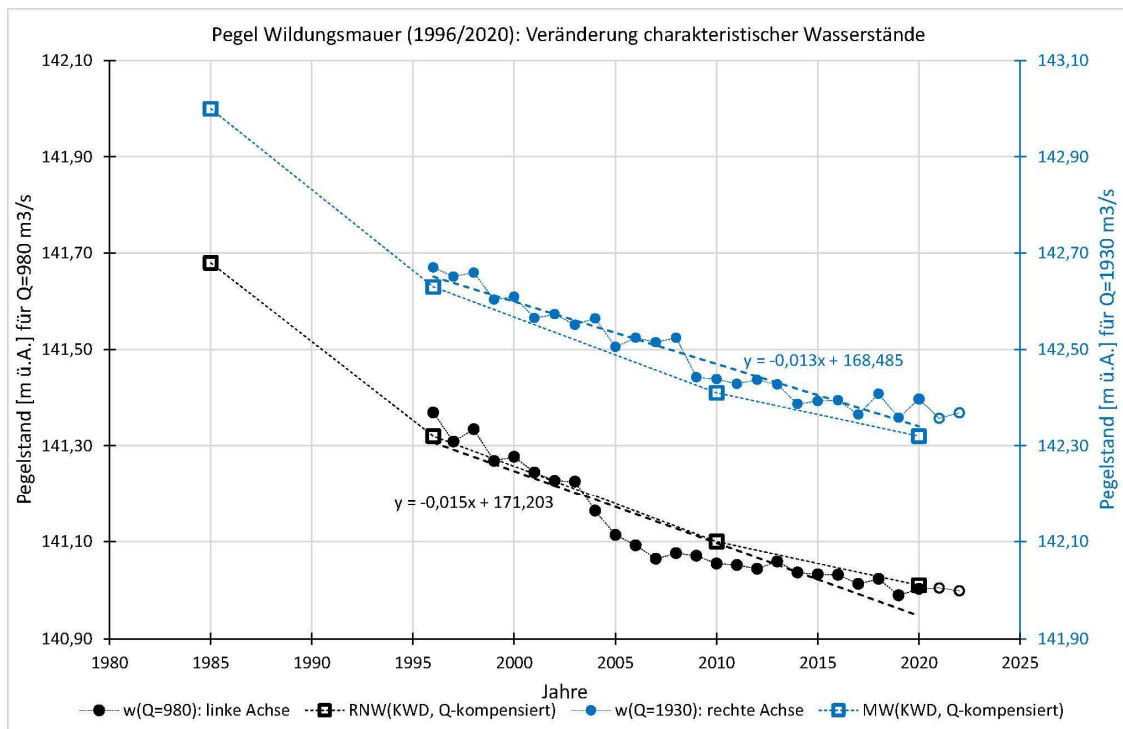


Abbildung 2: Zeitreihen der charakteristischen Wasserstände (für Abflüsse entsprechend RNQ-2010 und MQ-2010) für den Pegel Wildungsmauer und den Zeitraum 1996/2020. Eingetragen sind auch die RNW und MW gem. KWD-1985 (Q-kompensiert), KWD-1996 (Q-kompensiert), KWD-2010 und KWD-2020 (Q-kompensiert). Die Anpassung der MW-Zeitreihe hat im linearen Regressionsmodell eine Steigung (Trend) von ca. -1,3 cm/Jahr und für RNW eine Steigung (Trend) von -1,5 cm/Jahr. Eingetragen sind auch die Daten der Jahre 2021 und 2022; diese Daten sind noch (vom HZB) ungeprüft, sie liegen aber (hier erkennbar) im Trend.

Diese Methode hat den Vorteil der größtmöglichen Genauigkeit, unter der Voraussetzung, dass die zugrundeliegenden w/Q -Beziehungen (seitens der viadonau bzw. dem Hydrographischen Dienst) genau genug und laufend an die Abflussmessungen angepasst wurden. Die damit erhaltenen Trends (bzw. Tendenzen) sind unabhängig von allfälligen Trends (bzw. Fluktuationen) bei den Abflüssen, denn es werden ja immer die gleichen Bezugsabflüsse (stromauf der Marchmündung $980 \text{ bzw. } 1930 \text{ m}^3/\text{s}$; stromab $1049 \text{ bzw. } 2068 \text{ m}^3/\text{s}$) verwendet, sie liefern also den rein morphologisch bedingten Trend.

Das Verfahren würde naturgemäß auch Auswertungen für beliebige andere Bezugsabflüsse ermöglichen, oder man könnte überhaupt komplette Abflusskurven miteinander vergleichen, vgl. Abb. 3 (für Wildungsmauer). Für den Zweck dieser Studie sind aber die RNW- und MW-Zeitreihen (Anhang A2) ausreichend.

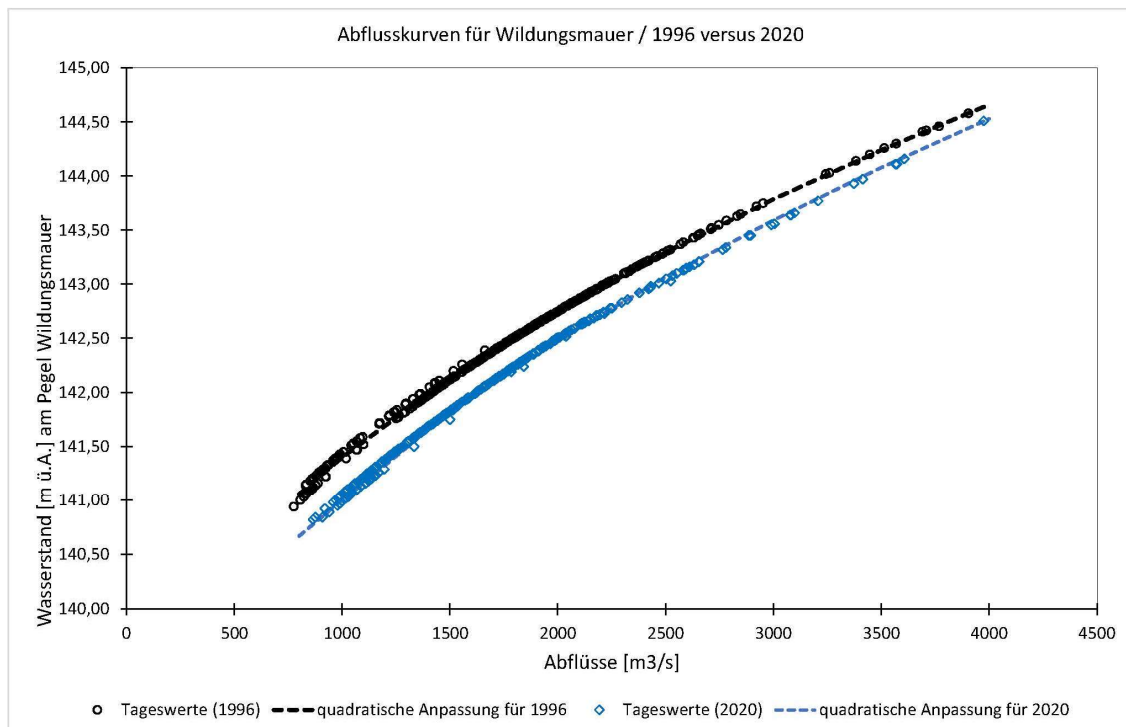


Abbildung 3: Aus den Daten rekonstruierte Abflusskurven (w/Q -Beziehung) für den Pegel Wildungsmauer und das Jahr 1996 (das entspricht der Kurve in Abb. 1) im Vergleich [blau geplottet] mit dem Jahr 2020. Die Auswirkungen der Sohleintiefung (über 25 Jahre) sind unmittelbar erkennbar. Dies wird hier nur als Beispiel angegeben, im Rahmen der Bearbeitung (Methode 1) wurden Abflusskurven für alle Pegel und alle Jahre erstellt.

3.3.2 Zur Methode 2

Für jede untersuchte Pegelstelle werden aus den Tageswerten (in Ausnahmefällen: aus den Monats-MW⁵) die Jahres-Mittelwerte (eben der Reihe 1996/2020) gebildet und damit eine Trenduntersuchung nach Mann-Kendall (Methodik: sh. Anhang A1) vorgenommen, für die Trendstärke wird die Sen-Neigung⁶ (ebenfalls Anhang A1) ermittelt.

Diese Zeitreihen haben meist eine deutliche Lag-1-Autokorrelation r_1 , wodurch die Grundannahme einer Teststatistik (einzelne Werte statistisch unabhängig voneinander) verletzt wird. Solche Autokorrelationen können als Folge des „Gedächtnisses“ von Einzugsgebieten (also deren Speichervermögens) verstanden werden. Für hydrologische (und klimatologische) Untersuchungen hat sich in den letzten beiden Jahrzehnten die Methode des Prewhitening (Herausrechnen bzw. Entfernen des autokorrelativen Anteils; numerische Vorgangsweise sh. Anhang A1) durchgesetzt (u.a. Yue et al., 2002⁷; Petrow

⁵ Das betrifft die drei Pegelstellen Fischamend (vor 2006), Bad Dt. Altenburg (vor 2001) und Wolfsthal (vor 2000).

⁶ Benannt nach Sen, P. K. (1968). Estimates of the regression coefficient based on Kendall's tau. *Journal of the American statistical association*, 63(324), 1379-1389.

⁷ Yue, S., Pilon, P., Phinney, B., & Cavadias, G. (2002b). The influence of autocorrelation on the ability to detect trend in hydrological series. *Hydrological processes*, 16(9), 1807-1829.

& Merz⁸, 2009; Blöschl et al., 2011⁹), es gibt aber auch vereinzelt kritische Hinweise dazu (u.a. Bayazit & Önöz, 2007¹⁰). Diese Studie erfolgt daher mit Prewhitening, vergleichend werden aber (in [Anhang A3](#)) auch die Ergebnisse ohne Prewhitening angegeben.

Der Mann-Kendall-Test zeigt im Sinn einer Teststatistik an, ob (unter Zugrundelegung eines gewählten Signifikanzniveaus) ein statistisch signifikanter Trend vorliegt oder nicht. Die Eingangswerte gehen nicht mit ihren absoluten Werten ein, sondern nur mit ihrer Rangordnung. Somit haben Ausreißer keinen übermäßigen Einfluss (robuste Statistik); das gilt, weil der Median aus allen möglichen Relationen gebildet wird, auch für die Sen-Neigung.

Im Rahmen dieser Studie wird generell ein Signifikanzniveau von $\alpha = 0,10$ gewählt (beidseitiger Test, d.h. 5% an beiden Seiten)¹¹. Damit ist der kritische Wert $Z_{\alpha/2} = 1,708$ (95%-Quantile der t-Verteilung für $n=25$; Weber, 1983¹²) und die Nullhypothese H_0 („kein Trend“) wird für

$$|Z| > Z_{\alpha/2} = 1,708 \quad (\text{Gl. 2})$$

verworfen (weitere methodische Hinweise: Anhang A1). Das gewählte Signifikanzniveau wird häufig für hydrologische Untersuchungen gewählt (z.B. Birsan et al., 2005¹³, Petrow und Merz, 2009; Blöschl et al., 2011). Es kann gezeigt werden, dass die Wasserstands-Zeitreihen teilweise strengeren Anforderungen an das Signifikanzniveau (z.B. $\alpha = 0,05$) gerecht werden. Dies wird dann auch angemerkt (jeweils für die Auswertung mit Prewhitening).

Ein Beispiel wird graphisch in [Abb. 4](#) (für Wildungsmauer) angegeben, die Graphiken zu allen untersuchten Pegelstellen werden in Anhang A3 dargestellt, die numerischen Ergebnisse werden in [Tab. 4](#) aufgelistet.

⁸ Petrow, T., & Merz, B. (2009). Trends in flood magnitude, frequency and seasonality in Germany in the period 1951–2002. *Journal of Hydrology*, 371(1-4), 129-141.

⁹ Blöschl, G., Viglione, A., Merz, R., Parajka, J., Salinas, J. L., & Schöner, W. (2011): Auswirkungen des Klimawandels auf Hochwasser und Niederwasser. *Österreichische Wasser-und Abfallwirtschaft*, 63(1-2), 21-30.

¹⁰ Bayazit, M., & Önöz, B. J. H. S. J. (2007). To prewhiten or not to prewhiten in trend analysis?. *Hydrological Sciences Journal*, 52(4), 611-624.

¹¹ α bezeichnet eine Fehlerwahrscheinlichkeit, und zwar jene Wahrscheinlichkeit, dass die Nullhypothese H_0 („kein Trend“) anhand der Daten der Stichprobe verworfen wird, obwohl sie tatsächlich zutrifft („wahr ist“), dass sie also irrtümlich verworfen wird (Fehler 1. Art). Über die Wahrscheinlichkeit für den Fehler 2. Art (dass H_0 bestätigt wird, obwohl die Hypothese tatsächlich falsch ist) wird damit keine Aussage getroffen.

¹² Weber, H. (1983): Einführung in die Wahrscheinlichkeitsrechnung und Statistik für Ingenieure. B. G. Teubner Stuttgart.

¹³ Birsan, M. V., Molnar, P., Burlando, P., & Pfandner, M. (2005): Streamflow trends in Switzerland. *Journal of hydrology*, 314 (1-4), 312-329.

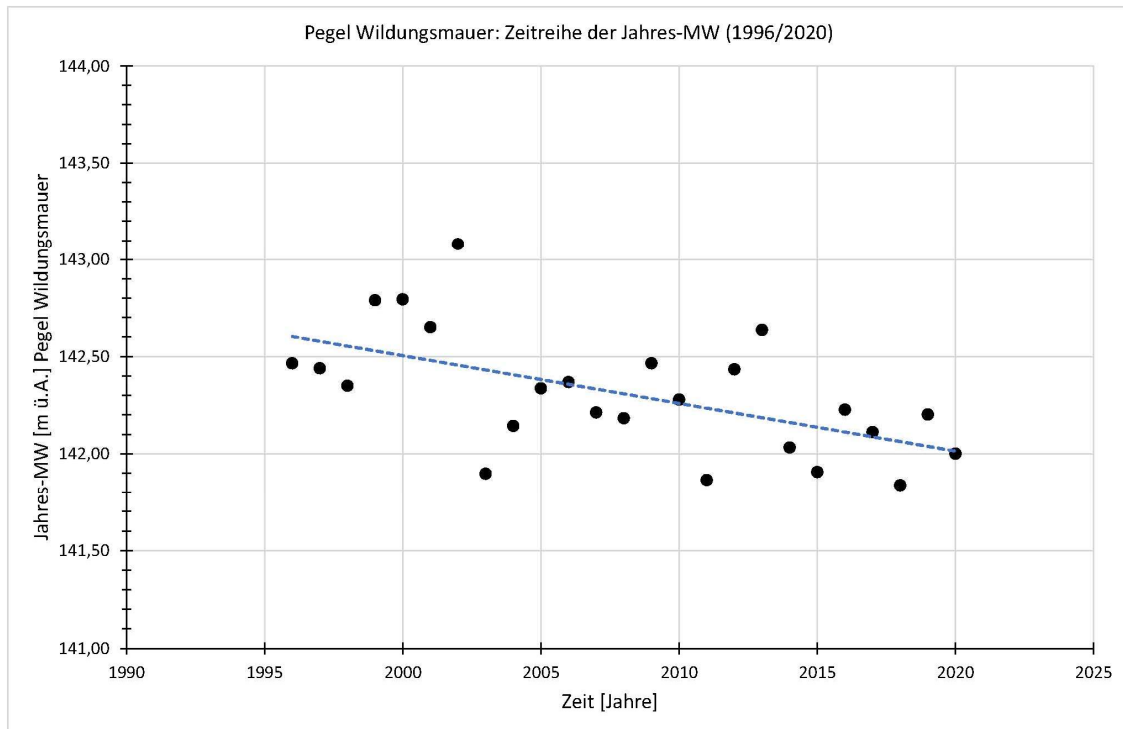


Abbildung 4: Zeitreihe der Jahres-MW für den Pegel Wildungsmauer und die Untersuchungsperiode 1996/2020. Eingetragen ist auch die Anpassung im Sinn eines linearen Regressionsmodells. Die damit verbundene Steigung kommt der Sen-Neigung nahe, die allerdings völlig anders ermittelt wird (vgl. Anhang A1); diese Linie dient hier nur zur Visualisierung des Trends.

Diese Methode hat einerseits den Vorteil, dass sie direkt mit den ganz ähnlichen Untersuchungen für donau-nahe GW-Stellen (vgl. Kap. 4) vergleichbar ist, und zweitens ist sie völlig unabhängig von den Abflusskurven und allfälligen dort enthaltenen Fehlern, denn es werden ja nur Wasserstands-Daten (Jahres-MW) verwendet. Ein Nachteil ist, dass die mit diesen Jahres-MW verbundenen Jahres-MQ auch trendbehaftet sein könnten (und dies tatsächlich auch sind). Dieser zunächst verborgene Einfluss (im Folgenden auch: „hydrologische Trendkomponente“) β_{hydr} kann aber ermittelt und berücksichtigt (kompensiert) werden, wenn zusätzlich eine Trenduntersuchung für die Jahres-MQ vorgenommen wird und ein allfällig vorhandener MQ-Trend (über die w/Q-Beziehung) in einen äquivalenten MW-Trend umgerechnet und vom Gesamtrend abgezogen wird. Dies wird hier mit den Abflussdaten für Wildungsmauer durchgeführt. Die daraus ermittelte Trendstärke bei den Jahres-MQ wird über die w/Q-Beziehung der einzelnen Pegelstellen in eine damit verbundene hydrologisch bedingte MW-Trendstärke β_{hydr} umgerechnet, vgl. Kap. 3.3.5. Die morphologisch bedingte Trendstärke β_{mor} [cm/a] ergibt sich schließlich aus der Differenz:

$$\beta_{morph} = \beta_{ges} - \beta_{hydr} \quad (Gl. 3)$$

Sie korrespondiert (zumindest im Prinzip) mit den nach Methode 1 ermittelten Werten.

3.3.3 Berücksichtigung der KWD-Werte, Korrekturen für unterschiedliche Referenzabflüsse

Für alle Pegelstellen liegen auch RNW- und MW-Werte aus den bisher veröffentlichten „Kennzeichnenden Wasserständen der österreichischen Donau“ (KWD) vor. Im Rahmen dieser Studie werden die

KWD-1985¹⁴, KWD-1996¹⁵, KWD-2010¹⁶ und die erst kürzlich veröffentlichten KWD-2020¹⁷ berücksichtigt, dies primär zum Zweck des Vergleichs.

Dabei ist zu berücksichtigen, dass sich die diesen vier KWDs zugrundeliegenden Referenzabflüsse (RNQ, MQ) unterscheiden, vgl. Tab. 2, weil die Untersuchungszeiträume für deren Ermittlung gleitend verschoben (aktualisiert) wurden. Besonders stark sind die Unterschiede bei den RNQ, mit den deutlich höheren Werten für die RNQ-2010 (und RNQ-2020) gegenüber früheren RNQs. Auch die MQ-Werte variieren, allerdings eher geringfügig.

Tabelle 2: Referenzabflüsse RNQ- und MQ-Werte der verschiedenen KWDs (1985, 1996, 2010, 2020) im Längsverlauf; die Werte in Klammern (für 1985 und 1996) wurden im Rahmen dieser Studie in Analogie zu den KWD-2010 ergänzt (mit gleichen ΔQ gegenüber Wien)

Zustand:		Abflüsse RNQ bzw MQ [m³/s]			Anm.:
		Korneuburg bzw. Wien	Wildungsmauer bzw. Hainburg	Thebnerstraßl bzw. Bratislava	
RNW	1985	900	(910)	948	Basis: Abflüsse 1924/1963
	1996	910	(920)	1010	Basis: Abflüsse 1961/1990
	2010	970	980	1049	Basis: Abflüsse 1981/2010
	2020	970	990	1040	Basis: Abflüsse 1991/2020
MW	1985	1890	(1910)	2010	Basis: Abflüsse 1924/1963
	1996	1915	(1935)	2035	Basis: Abflüsse 1961/1990
	2010	1910	1930	2068	Basis: Abflüsse 1981/2010
	2020	1885	1910	2010	Basis: Abflüsse 1991/2020

Um eine direkte Vergleichbarkeit der verschiedenen RNW bzw. MW untereinander zu erreichen, werden sie über die im Zuge der Methode 1 bereits ermittelten w/Q-Beziehungen auf die Referenzwerte für KWD-2010, also 980 m³/s (RNQ) bzw. 1930 m³/s (MQ) stromauf der Marchmündung bzw. 1049 und 2068 m³/s stromab der Marchmündung umgerechnet, und zwar mit

$$\Delta w = \frac{dw}{dQ} \cdot \Delta Q \quad (\text{Gl. 4})$$

wobei z.B. für den Vergleich KWD-2010 versus KWD-1996 gilt: $\Delta Q_{RNW} = 980 - 920 = 60 \text{ m}^3/\text{s}$ und $\Delta Q_{MW} = 1930 - 1935 = -5 \text{ m}^3/\text{s}$.

¹⁴ Wasserstraßendirektion (1986): Die kennzeichnenden Wasserstände der österreichischen Donau nach dem Stande vom 1. Jänner 1985. Herausgegeben im Selbstverlag der Wasserstraßendirektion.

¹⁵ Wasserstraßendirektion (1998): Die kennzeichnenden Wasserstände der österreichischen Donau. Nach dem Stande vom 31. Dezember 1996. Herausgegeben im Selbstverlag der Wasserstraßendirektion.

¹⁶ viadonau (2012): Die kennzeichnenden Wasserstände der österreichischen Donau. KWD 2010. Nach dem Stande vom 31. Dezember 2010. (digital verfügbare Version)

¹⁷ viadonau (2023): Die kennzeichnenden Wasserstände der österreichischen Donau. KWD 2020. (digital verfügbare Version)

Die Steigung dw/dQ ist die erste Ableitung der Abflusskurve für RNQ bzw. MQ. Man könnte sie für jedes Jahr und jeden Pegel gesondert ermitteln. In [Kap. 3.3.5 \(vgl. Tab. 3\)](#) wird gezeigt, dass diese Steigungen in unserem Untersuchungsabschnitt zeitlich und räumlich kaum variieren, daher wird in dieser Studie für die gesamte Strecke mit einem einzigen Wert für RNQ (0,18 cm/(m³/s)) und einen einzigen Wert für MQ (0,13 cm/(m³/s)) gerechnet. Damit ergeben sich für die KWD-1996 (gegenüber KWD-2010) Korrekturen von +11 cm (RNW) bzw. -1 cm (MW) und für die KWD-2020 (gegenüber KWD-2010) Korrekturen von -2 cm (RNW) bzw. +3 cm (MW). Die damit erhaltenen korrigierten RNW- bzw. MW-Werte werden im Folgenden auch als „Q-kompensiert“ bezeichnet.

3.3.4 Ein methodischer Hinweis zum Abschnitt stromab der Marchmündung

Die beiden Pegelstellen Thebnerstraßl und Wolfsthal liegen stromab des Nationalparks Donau-Auen; außerdem liegen sie nach bisherigen Erfahrungen bereits im Staubereich des Kraftwerkes Gabčíkovo (Strom-km 1819; Stau seit 1992), sie sollten somit keine Eintiefungstendenz zeigen. Dies ist tatsächlich mit den hier vorgenommenen Untersuchungen erkennbar.

Diese Daten werden hier dennoch ausgewertet, denn es ergibt sich damit (und mit dem Vergleich der Ergebnisse für Hainburg und weiter flussauf gelegenen Pegelstellen) erstmalig die Möglichkeit, die „Stauwurzel“ von Gabčíkovo nach hydromorphologischen Kriterien genau zu bestimmen, nämlich als jene Stelle (im Längenschnitt), wo die Eintiefungstendenz (der freien Fließstrecke) in eine Auflandungstendenz (des Staupraumes) umschlägt. Diese Zusammenhänge sind in der Darstellung der RNW- und MW-Änderungen im Längenschnitt (vgl. [Abb. 6](#)) und der zugehörigen Änderungsraten ([Abb. 7](#)), direkt erkennbar.

3.3.5 Zusatzauswertung zu den Jahres-MQ (rein hydrologischer Trend) und den damit verbundenen Wasserstandsänderungen

Den für Methode 2 verwendeten Jahres-MW können Jahres-MQ (Mittelwerte der Abflüsse über die einzelnen Jahre) zugeordnet werden. Die MW-Trendstärke kann nur dann vollständig mit morphologischen Effekten (Eintiefungen, Auflandungen) begründet werden, wenn die MQ keinen Trend haben, wenn also $\beta_{hydr} = 0$ ist. Das ist an der Donau und diese Untersuchungsperiode nicht der Fall.

Umgekehrt sind die MQ ja bekannt (für Pegel Hainburg ab 1977; für Pegel Wildungsmauer ab 1996, vgl. [Abb. 5](#)) und sie können analog zu den Wasserständen im Sinn einer Trendanalyse (Mann-Kendall-Test und Sen-Neigung: Methode sh. [Anhang A1](#)) untersucht werden. Dies wird im Folgenden für die Reihe 1996/2020 und den Pegel Wildungsmauer durchgeführt, vgl. [Anhang A3](#) und [Kap. 3.4](#). Eine Auswertung für Hainburg würde annähernd gleiche Ergebnisse liefern.

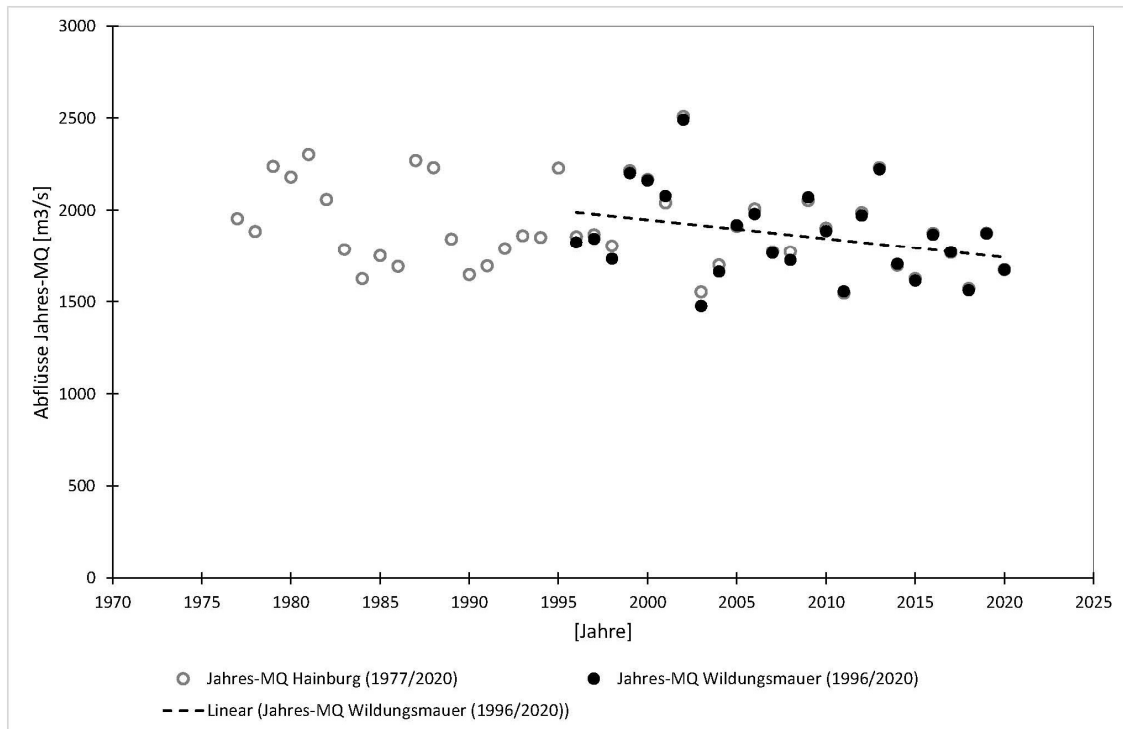


Abbildung 5: Jahres-MQ für die Pegelstellen Hainburg (1977/2020) und Wildungsmauer (1996/2020); die Zeitreihe der Jahres-MQ 1996/2020 (im Folgenden werden dafür die Daten von Wildungsmauer verwendet) zeigt einen fallenden Trend (mit ca. $-10,1 \text{ (m}^3/\text{s)/Jahr}$).

Der damit erhaltene Trend für die MQ-Abflüsse β_{MQ} kann über die w/Q-Beziehung (Abflusskurven) der einzelnen Pegel in Wasserstands-Änderungen bzw. Wasserstands-Änderungsraten umgerechnet werden.

$$\beta_{hydr} = \frac{dw}{dQ} \cdot \beta_{MQ} \quad (\text{Gl. 5})$$

Im Prinzip ändern sich die Abflusskurven von Jahr zu Jahr (vgl. [Kap. 3.3.1](#)), allerdings sind deren Neigungen rund um Mittelwasser sehr stabil, denn die hydraulisch relevanten Querschnittsformen der Donau bleiben weitgehend unverändert, auch wenn sich die mittleren Sohlagen (etwas) ändern. Es kann zusätzlich auch gezeigt werden, dass diese Neigungen der w/Q-Beziehungen (für den Mittelwasser-Abfluss) für alle Pegelstellen annähernd gleich ausfallen, denn die hydraulischen Verhältnisse sind in diesem Abschnitt annähernd gleichförmig. Dies wird in [Tab. 3](#) für die Zustände 1996, 2010 und 2020 und verschiedene Pegelstellen gezeigt.

Tabelle 3: Neigung der Abflusskurven dw/dQ [cm/(m³/s)] bei RNQ und bei MQ für verschiedene Pegelstände und Jahre nach den im Zuge der „Methode 1“ ermittelten Abflusskurven; k.A. = keine Auswertung möglich

Pegelstelle	Strom-km	Neigung der Abflusskurven bei RNQ [cm/(m ³ /s)]			Neigung der Abflusskurven bei MQ [cm/(m ³ /s)]		
		1996	2010	2020	1996	2010	2020
Fischamend	1907,90	0,19	0,19	0,18	0,14	0,14	0,13
Orth	1901,72	k.A.	0,18	0,18	k.A.	0,13	0,13
Wildungsmauer	1894,72	0,16	0,18	0,18	0,12	0,13	0,13
Bad Dt. Altenburg	1886,86	0,19	0,20	0,18	0,13	0,14	0,13
Hainburg	1883,92	0,19	0,20	0,20	0,14	0,14	0,14
Thebnerstraßl	1879,25	k.A.	0,18	0,18	k.A.	0,13	0,13
Wolfsthal	1874,84	0,18	0,19	0,19	0,13	0,13	0,13
Median =	Gesamt	0,18			0,13		

Dieser Ansatz kann auch für den Vergleich unterschiedlicher KWD (also etwa $MW_{KWD-2020}$ versus $MW_{KWD-1996}$) verwendet werden; dabei ist zu berücksichtigen, dass sich die jeweiligen Referenzabflüsse etwas voneinander unterscheiden, vgl. [Kap. 3.3.3](#).

Für MW wird im Folgenden mit einer einheitlichen Neigung dw/dQ von 0,13 cm/(m³/s) gerechnet, und für RNW mit einer Neigung von 0,18 cm/(m³/s).

3.3.6 Zusatzauswertung (nach Methode 1) für die letzten zehn Jahre (2010/2020)

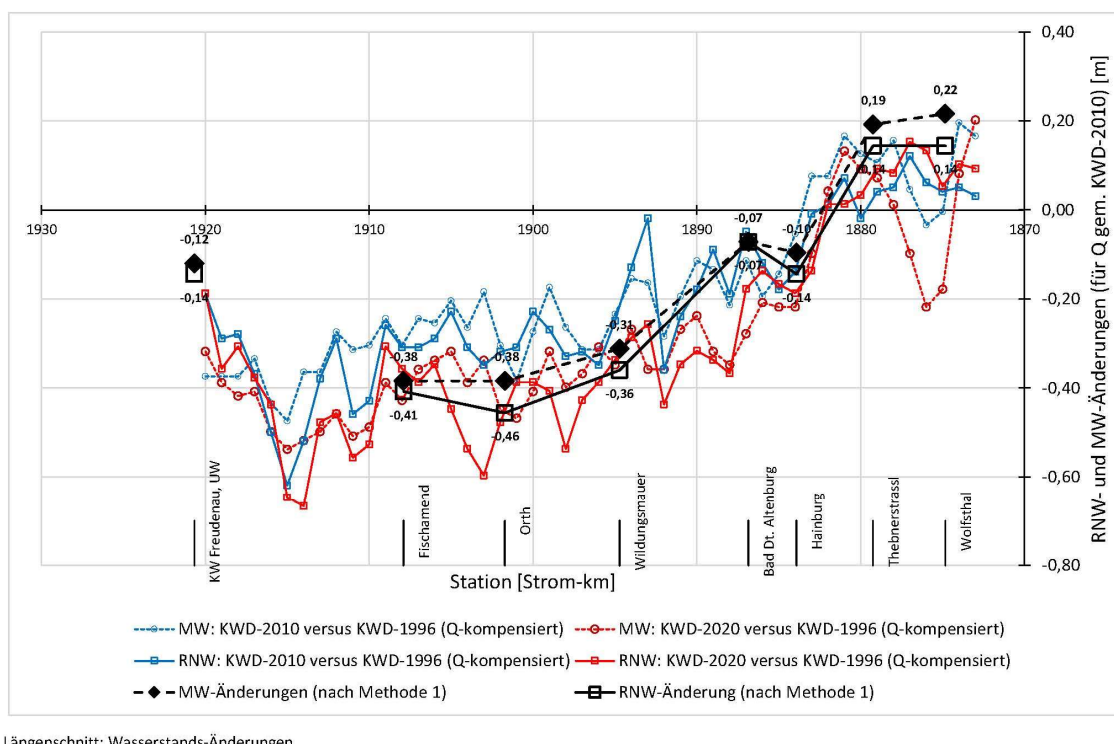
Auswertungen nach Methode 1 können auch auf kürzere Untersuchungsperioden angewandt werden, im Folgenden auf den Zeitraum 2010/2020; sie liefern dann formal die gleichen Parameter (also in erster Linie die Steigungen der Regressionsgeraden [m/Jahr] mit der Zeit als unabhängiger Variablen). Es ist klar, dass die Unsicherheiten mit kürzer werdenden Zeiträumen größer werden; deshalb sind die damit erhaltenen Ergebnisse eher im Kollektiv (also in der Gesamtschau und der Gesamtheit der untersuchten Pegelstellen) und in Kombination mit den zugehörigen KWD-Änderungen (KWD-2020 versus KWD-2010; Q-kompensiert) zu interpretieren.

3.4 Ergebnisse und Diskussion

Die Zeitreihen der charakteristischen Wasserstände (für RNQ und MQ) werden in Anhang A2 graphisch dargestellt („Methode 1“), die Zeitreihen der Jahres-MW („Methode 2“) in Anhang A3. Die daraus abgeleitete Änderungsrate für die untersuchten Pegelstellen (lineares Regressionsmodell) und zugehörige Parameter werden in [Tab. 4](#) aufgelistet. Diese Änderungsrate (sowohl für die RNW als auch die MW) werden in [Abb. 7](#) im Längsverlauf graphisch dargestellt.

Tabelle 4: Ergebnisse der Trenduntersuchungen für Donauwasserstände an Pegelstellen, Reihe 1996/2020, nach Methode 1 und Methode 2 (mit Prewhitening); k.A.= keine Angabe (weil Daten nicht über die gesamte Reihe verfügbar (in diesem Fall nur Anwendung der Methode 1)

Pegelstelle	Methode 1 (1996/2020)		Methode 2 (1996/2020; Variante mit Prewhitening)			
	Änderungs- rate für RNQ [cm/a]	Änderungs- rate für MQ [cm/a]	standardi- sierte Prüf- größe Z	Trend stati- stisch signifikant ($\alpha = 0,10$)	Gesamt-trend β_{ges} [cm/a]	morpholog. Trendkompo- nente β_{morph} [cm/a]
KW Freudenau UW	-0,6	-0,5	-1,938	ja	-1,8	-0,5
Fischamend	-1,7	-1,6	-2,592	ja	-2,9	-1,6
Orth	-1,9	-1,6	k.A.	k.A.	k.A.	k.A.
Wildungsmauer	-1,5	-1,3	-2,406	ja	-2,3	-1,0
Bd. Dt. Altenburg	-0,3	-0,3	-2,079	ja	-1,9	-0,6
Hainburg	-0,6	-0,4	-1,938	ja	-1,8	-0,5
Thebnerstraßl	+0,6	+0,8	k.A.	k.A.	k.A.	k.A.
Wolfsthal	+0,9	+0,9	-1,191	nein	-1,2	+0,1



Längenschnitt: Wasserstands-Änderungen

Abbildung 6: Wasserstandsänderungen für charakteristische Wasserstände (RNQ und MQ gem. KWD-2010) und den Untersuchungszeitraum 1996/2020 im Längenschnitt. Aufgetragen sind die mit den Änderungsraten ermittelten RNW- und MW-Änderungen für die Pegelstellen Kraftwerk Freudenau – UW, Fischamend, Orth, Wildungsmauer, Bad Dt. Altenburg, Hainburg, Thebnerstraßl und Wolfsthal und

zusätzlich die entsprechenden Differenzen aus dem Vergleich der KWD-2020 gegenüber den KWD-1996, wobei Q-kompensierte Wasserstände verwendet werden

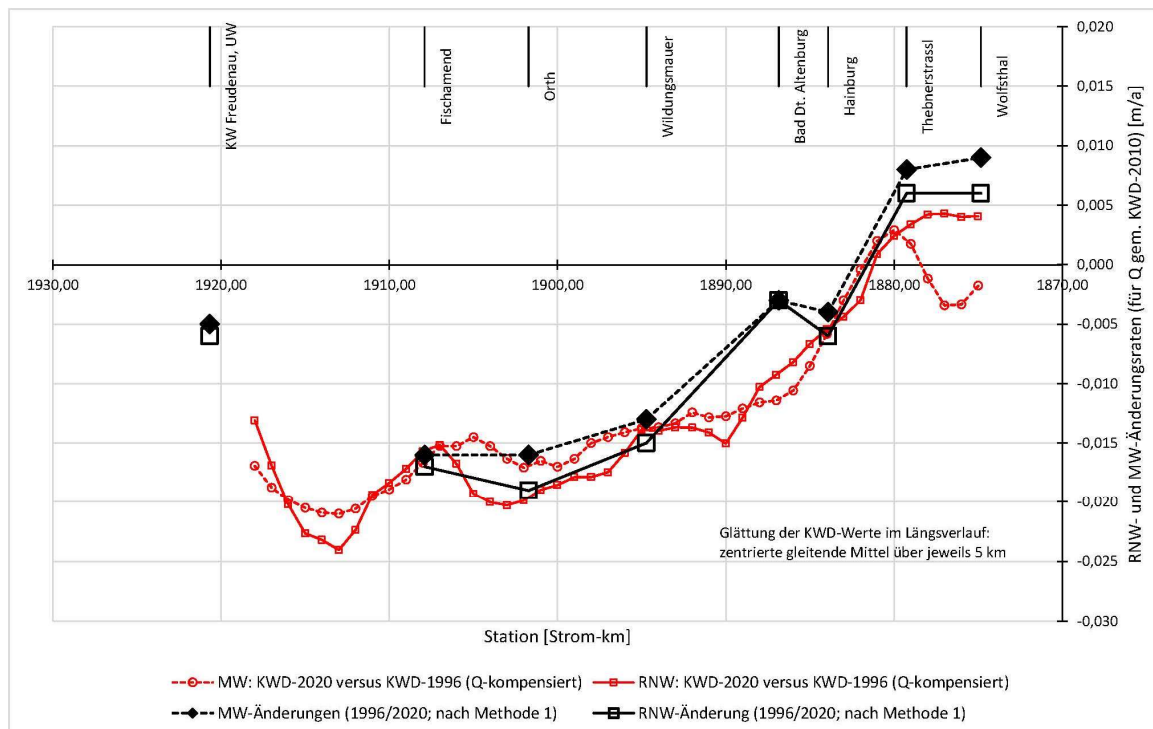


Abbildung 7: Änderungsraten für charakteristische Wasserstände (RNQ und MQ gem. KWD-2010) und den Untersuchungszeitraum 1996/2020 im Längsschnitt. Aufgetragen sind die RNW- und MW-Änderungsrate für die Pegelstellen Kraftwerk Freudenu – UW, Fischamend, Orth, Wildungsmauer, Bad Dt. Altenburg, Hainburg, Thebnerstraßl und Wolfsthal und zusätzlich die entsprechenden Änderungsrate aus dem Vergleich der KWD-2020 gegenüber den KWD-1996, wobei Q-kompensierte Wasserstände verwendet werden; außerdem wurden die RNW- und MW-Verläufe im Längsverlauf geglättet (durch Verwendung zentrierter gleitender Mittel über jeweils 5 km)

Die Ergebnisse ergeben eine im Längsverlauf plausiblen und mit früheren Untersuchungen (z.B. Klasz et al., 2016)¹⁸ ähnlichen Verlauf. Die Absenkungen (Eintiefungen) sind im mittleren Abschnitt (etwa Fischamend bis Wildungsmauer) am stärksten und nehmen sowohl flussabwärts gerichtet (also zwischen Wildungsmauer und Hainburg) als auch im obersten Abschnitt der VHP-Erhaltungsstrecke ab.

Der Einfluss des Staues des KW Gabčíkovo reicht bis etwa Strom-km 1882, also bis etwa 2 km stromauf der Marchmündung („Stauwurzel“ nach hydromorphologischen Kriterien), von dort weg wird die Sohl-lage gestützt (in einem dynamischen Sinn, durch Auflandungen) und im stromauf anschließenden Bereich (bis etwa Wildungsmauer) zeigt sich das typische Bild einer Rotationserosion.

Im unteren Teil der VHP-Erhaltungsstrecke (etwa Strom-km 1916 bis 1910) sind (unter besonderer Berücksichtigung der KWD-Differenzen) besonders starke Eintiefungen erkennbar, sie sind dort stärker als weiter flussab, erst im obersten Teil der VHP-Erhaltungsstrecke (KW-UW bis etwa Strom-km 1915),

¹⁸ Klasz, G., Gabriel, H., Habersack, H., Schmalfuß, R., Baumgartner, C., & Gutknecht, D. (2016). Ausmaß und Dynamik der Sohlerosion der Donau östlich von Wien – flussmorphologische und wasserwirtschaftliche Aspekte. Österreichische Wasser- und Abfallwirtschaft, 5(68), 199-207.

wo das allermeiste Geschiebe verklappt wird, nehmen die Eintiefungen wieder ab, sie sind aber auch dort noch deutlich erkennbar.

Für die Pegelstelle Bad Dt. Altenburg zeigen die in dieser Studie vorgenommenen Auswertungen deutlich kleinere Absenkungen als auf Grundlage der KWDs, und die Absenkungen sind auch geringer als dies unter Berücksichtigung des gesamten Verlaufes zu erwarten wäre. Dies könnte mit den dort (in den Jahren 2013 und 2014) vorgenommenen Arbeiten (Naturversuch) in Verbindung stehen, wahrscheinlich primär mit dem Umbau der Buhnen. Es ist jedenfalls eine nur lokale Besonderheit.

Methode 1 liefert unmittelbar die rein morphologisch bedingte Änderungsrate, während Methode 2 neben den morphologischen Effekten auch durch den hydrologischen Effekt des MQ-Trends (mit Senneigung $\beta_{MQ} = -10,13 \text{ (m}^3\text{/s)/Jahr}$) beeinflusst wird. Dieser Abflusstrend ist zwar noch nicht statistisch signifikant (standardisierte Prüfgröße $Z = -1,331$ und $\alpha = 0,10$), aber naturgemäß hydraulisch wirksam, der zugehörige Wasserstands-Trend beträgt (umgerechnet über die w/Q-Beziehung) etwa -1,3 cm/Jahr. Die in Tab. 4 angegebenen Werte $\beta_{morph} = \beta_{gesamt} - \beta_{hydr}$ stimmen in der Größenordnung recht gut mit den Werten nach Methode 1 zusammen, für einzelne Pegel fallen die Werte nach Methode 2 etwas geringer aus. In diesem Zusammenhang ist zu berücksichtigen, dass die Untersuchungsperiode (mit $n=25$) relativ kurz ist. Dort, wo etwas größere Unterschiede bestehen, ist der Methode 1 höheres Gewicht zu geben, solange die Abflusskurven kaum Streuung zeigen und laufend aktualisiert wurden; beide Voraussetzungen sind im vorliegenden Fall erfüllt.

Es ist auch plausibel, dass die Veränderungen für RNQ zumeist etwas stärker ausfallen als für MQ, denn die zugehörigen durchflussaktiven Breiten sind für Niederwasser geringer als für Mittelwasser.

Für die beiden Pegelstellen Orth und Thebnerstraßl erfolgte keine Methode 2-Auswertung, weil Daten erst ab 2003 bzw. 2000 verfügbar sind.

Im Vergleich der pegelbezogenen Auswertungen mit den KWD-Differenzen (bzw. KWD-Änderungsraten) zeigen sich einige Besonderheiten:

- im Kraftwerks-UW fallen die KWD-Differenzen (Eintiefungen) deutlich stärker aus als die pegelbezogenen Auswertungen (Methode 1); generell stimmen dort die KWD-Werte (vor allem KWD-2010 und KWD-2020) schlecht mit den Werten aus den Abflusskurven (Methode 1) zusammen; für MW machen diese Differenzen rd. 20 cm aus, für RNW ca. 10 bis 15 cm (vgl. die [Abbildung Anhang A2/1](#));
- am Pegel Bad Dt. Altenburg fallen die KWD-Differenzen (Eintiefungen) stärker aus als die pegelbezogenen Auswertungen (Methode 1); das hängt damit zusammen, dass die MW(1996) etwa 10 cm über den Werten aus den Abflusskurven (Methode 1) und die MW(2020) etwa 10 cm darunter liegen (vgl. [Abbildung Anhang A2/5](#)); für RNW sind die Differenzen dort deutlich kleiner;
- für die beiden Pegel Thebnerstraßl und Wolfsthal fallen die Aufhöhungen (Anlandungen) nach den pegelbezogenen Auswertungen (Methode 1) stärker aus als mit den KWD-Auswertungen; speziell für Wolfsthal haben die KWD-Werte stärkere Abweichungen; der MW(2020) liegt rd. 30 cm unter den Werten aus den Abflusskurven (Methode 1), vgl. [Abbildung Anhang A2/8](#), das ist die größte Abweichung für alle Pegelstellen; im Übrigen ist die Absenkung zwischen dem MW(2010) und dem MW(2020) in dieser Auflandungsstrecke ([Abb. 9](#)) unplausibel;

Die stärkeren Differenzen für Wolfsthal und (weniger ausgeprägt) für Thebnerstraßl könnten mit der für diese Strecke erforderlichen Abstimmung zwischen viadonau und slowakischer Wasserbauverwaltung und daraus resultierenden Besonderheiten resultieren. Aus diesen Abweichungen entstehen

jedenfalls keine Unsicherheiten für die Aussagen zu den morphologischen und hydrologischen Veränderungen in der Nationalparkstrecke. Und selbst für die Ermittlung der Lage der hydromorphologischen Stauwurzel liefern die KWD-Werte ähnliche Werte wie die hier dokumentierten pegelbezogenen Auswertungen.

Bei den Differenzen am Pegel KW Freudenu – UW könnte eine Rolle spielen, dass die dortigen Rohdaten durch die VHP gewonnen wurden und seitens der viadonau entweder nicht berücksichtigt oder geringer bewertet wurden. Für diesen Pegel wäre eine Klärung allfälliger Widersprüche von größerer Bedeutung.

Generell ist anzumerken, dass man durch den Vergleich der verschiedenen KWDs (Q-kompensiert) für die Pegelstellen die gleichen Ergebnisse erhalten müsste wie mit Methode 1, die zugrundeliegenden Daten (Wasserstände und Abflüsse an den Pegelstellen) stammen aus der gleichen Quelle (Hydrographischer Dienst bzw. viadonau). Es ist aber zu berücksichtigen, dass bei der Erstellung der KWDs nach der Fixierung der RNW- und MW-Stände an den Pegelstellen ein zweiter Bearbeitungsschritt erfolgt, nämlich die Berechnung der RNW- und MW-Wasserspiegel über die gesamte Strecke, denn das ist ja der primäre Zweck der KWDs. Dadurch werden im Allgemeinen kleinere Abweichungen an den Pegelstellen eingetragen, denn es ist weder bei 1d- noch bei 2d-Wasserspiegelberechnungen möglich, die Sollwerte an allen Pegelstellen zu erreichen. Die Stärke der KWDs liegt darin, plausible Wasserspiegel für die gesamte Strecke zu liefern, aber nicht darin, möglichst genaue Wasserstände für die einzelnen Pegelstellen.

In einzelnen MW- und RNW-Zeitreihen (z.B. Wildungsmauer) zeigen sich für die letzten Jahre abnehmende Erosionen. Das ist – zumindest für den mittleren Abschnitt (Fischamend bis etwa Wildungsmauer) – nicht unerwartet, denn die viadonau hat dort in dieser Phase verstärkt Geschieberückführungen betrieben (Baggermaterial aus Instandhaltungsbaggerungen und zuletzt auch aus Geschiebefängen weiter stromauf verklappt). In der VHP-Erhaltungsstrecke und in der Strecke stromab von Wildungsmauer sind solche Änderungen hingegen nicht zu erwarten.

Von besonderer Bedeutung ist der Pegel Fischamend, der im Zeitraum 2010/2020 sogar Auflandungen zeigt, sh. [Abb. 8](#).

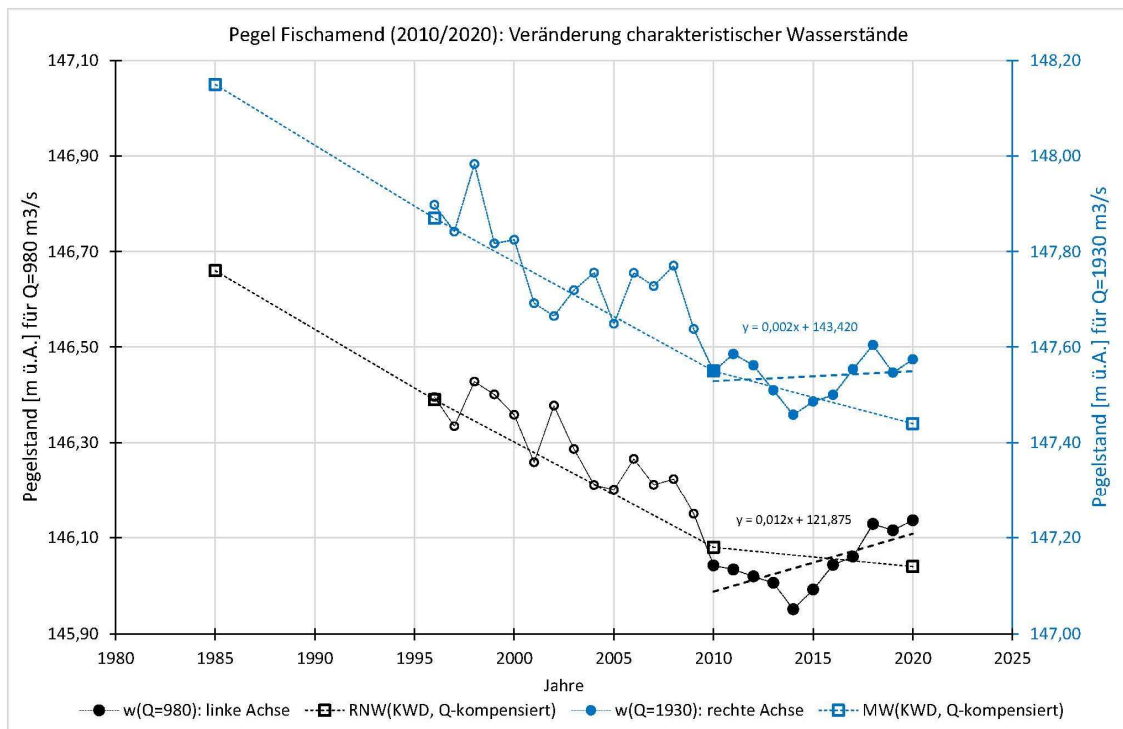


Abbildung 8: Zeitreihen der charakteristischen Wasserstände (für Abflüsse entsprechend RNQ-2010 und MQ-2010) für den Pegel Fischamend und den Zeitraum 2010/2020. Eingetragen sind auch die RNW und MW gem. KWD-1985 (Q-kompensiert), KWD-1996 (Q-kompensiert), KWD-2010 und KWD-2020 (Q-kompensiert). Die Anpassung der MW-Zeitreihe hat für diese kurze Untersuchungsperiode im linearen Regressionsmodell eine Steigung (Trend) von ca. +0,2 cm/Jahr und für RNW eine Steigung (Trend) von +1,2 cm/Jahr.

An den Pegelstellen Orth und Hainburg sind solche Änderungen weniger ausgeprägt. Für die Pegel Thebnerstraßl und Wolfsthal zeigen sich, was für die Fragestellung in dieser Studie allerdings weniger wichtig ist, verstärkte Aufhöhungen, aber keine Trendbrüche gegenüber der vorherigen Entwicklung. In Tab. 5 werden die mit dieser Zusatzauswertung erhaltenen Änderungsraten für RNW und MW den Werten für die Gesamtreihe (1996/2020) gegenübergestellt, und in Abb. 9 werden die über die Periode 2010/2020 ermittelten Gesamtänderungen den Werten aus dem Vergleich der KWD-Werte (KWD-2020 versus KWD-2010; Q-kompensiert) gegenübergestellt.

Tabelle 5: Ergebnisse der Trenduntersuchungen für Donauwasserstände an Pegelstellen, Reihe 1996/2020 im Vergleich zur kürzeren Reihe 2010/2020, beides nach Methode 1

Pegelstelle	1996/2020 (Methode 1)		2010/2020 (Methode 1)	
	Änderungs- rate für RNQ [cm/a]	Änderungs- rate für MW [cm/a]	Änderungs- rate für RNQ [cm/a]	Änderungs- rate für MW [cm/a]
KW Freudenau UW	-0,6	-0,5	-0,5	-0,7
Fischamend	-1,7	-1,6	+1,2	+0,2
Orth	-1,9	-1,6	-0,9	-0,9
Wildungsmauer	-1,5	-1,3	-0,6	-0,6
Bd. Dt. Altenburg	-0,3	-0,3	+0,8	-0,2
Hainburg	-0,6	-0,4	-0,2	-0,3
Thebnerstraßl	+0,6	+0,8	+1,2	+1,4
Wolfsthal	+0,9	+0,9	+1,2	+1,3

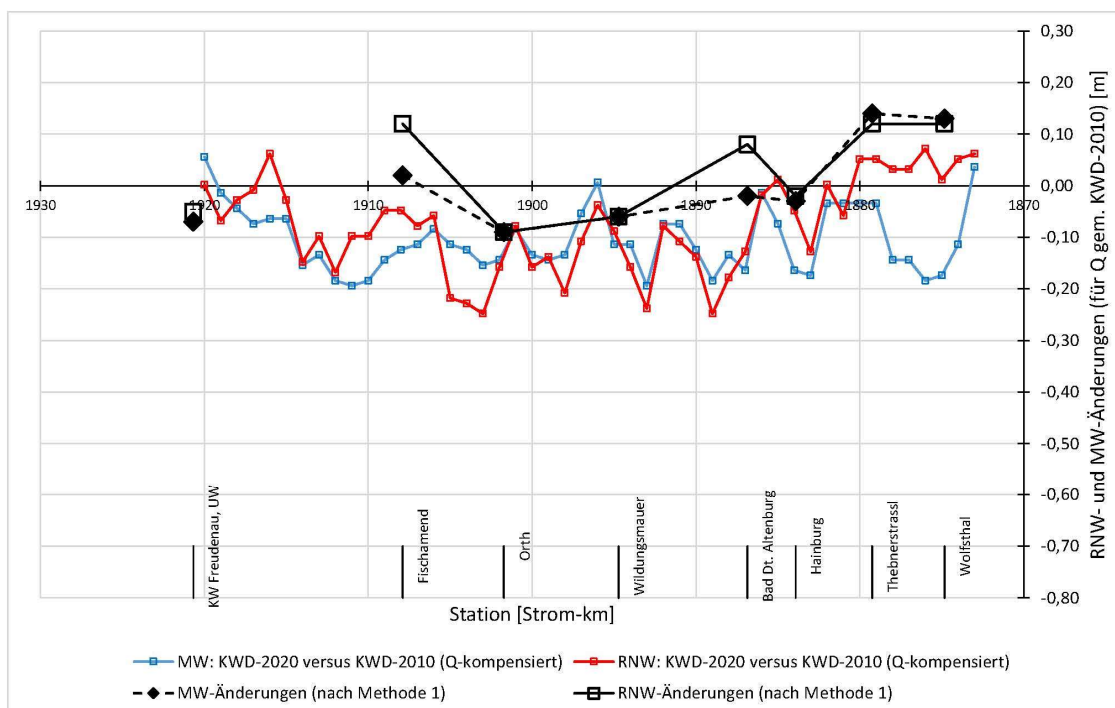


Abbildung 9: Wasserstandsänderungen für charakteristische Wasserstände (RNQ und MQ gem. KWD-2010) und den Untersuchungszeitraum 2010/2020 im Längenschnitt. Aufgetragen sind die mit den Änderungsraten ermittelten RNW- und MW-Änderungen für die Pegelstellen Kraftwerk Freudenau – UW, Fischamend, Orth, Wildungsmauer, Bad Dt. Altenburg, Hainburg, Thebnerstraßl und Wolfsthal und zusätzlich die entsprechenden Differenzen aus dem Vergleich der KWD-2020 (Q-kompensierte Wasserstände) gegenüber den KWD-2010

Dabei zeigen sich auch bei diesen Auswertungen in fast allen Bereichen – zumindest zwischen Strom-km 1915 (etwa Mitte der VHP-erhaltungsstrecke) und etwa Hainburg – Eintiefungen, die im Übrigen für MW meist (etwas) stärker ausfallen als für RNW, was untypisch ist. Auch die pegelbezogenen Auswertungen (Methode 1) für Fischamend und Bad Dt. Altenburg zeigen diese Besonderheit.

Für Bad Dt. Altenburg ist ein lokaler und nur einmal wirksam gewordener Effekt durch den Naturversuch (Bauphase: 2013/2014) zu erwarten, hier vor allem durch den Bühnenumbau, und am Pegel Fischamend sollten sich die stärkeren Verklappungen aus den Geschieberückführungen auswirken.

Insgesamt und in der Gesamtschau ist in dieser Phase für die VHP-Erhaltungsstrecke eine mittlere Eintiefungsrate von etwa -0,6 bis -1,0 cm/Jahr und für die anschließende Strecke (Strom-km 1910 bis 1882) eine mittlere Eintiefungsrate von rd. -1,2 cm/Jahr abzuschätzen. Damit ist – im Vergleich zur längeren Untersuchungsperiode (1996/2020) eine gewisse Abschwächung der Sohlerosion gegeben, aber noch keine Stabilisierung der Stromsohle.

4 Untersuchung zu den Grundwasserständen an donaulahen Messstellen

4.1 Zur Fragestellung und Relevanz

Zu untersuchen ist, ob donaulahen Grundwasser-Messstellen statistisch signifikante Trends bezüglich des mittleren GW-Niveaus zeigen, und wenn ja, wie das mit den Trends der Donauwasserstände (Jahres-MW) zusammenhängt.

Solche Trends im donaulahen Grundwasser sind aus zwei Gründen relevant: Einerseits unmittelbar, denn die GW-Stände sind ökologisch und wasserwirtschaftlich von großer Bedeutung (hydrologische Randbedingung für die Vegetation, für Alt- und Nebengewässer der Donau, für Brunnen usw.), und andererseits können die mittleren GW-Stände solcher flussnahen Messstellen auch als Indikatoren für die Entwicklung der Donauwasserstände (und damit für Eintiefungen oder Aufhöhungen der mittleren Sohlagen) verwendet werden, denn sie folgen (lediglich mit einer geringen zeitlichen Verzögerung und einer gewissen Dämpfung) den Donau-Wasserständen und den dort wirksamen Trends bzw. Tendenzen. Daher haben deren Mittelwerte (Jahresmittelwerte, im Übrigen auch die Monatsmittelwerte) eine sehr starke Korrelation mit den zugehörigen Mittelwerten der nächstgelegenen Donauwasserstände, und in diesem Zusammenhang können sie die Befunde zu den Pegelständen gut ergänzen.

4.2 Berücksichtigte Messstellen

Die Untersuchung wird für die Periode 1996/2020 und für donaulahen GW-Messstellen durchgeführt. Als „donaulah“ im Sinn dieser Untersuchung sollen jene Teile des Grundwasserkörpers gelten, sowohl links- als auch rechtsseitig, die hydrologisch mit der Donau in Verbindung stehen und vom nächstgelegenen Donauufer nicht weiter als rund 3 km entfernt sind. Diese Entfernung wurde hier aus eher pragmatischen Gründen gewählt (Verfügbarkeit von Daten und Anzahl von Messstellen). Im Zuge einer umfangreicheren Untersuchung könnten auch weiter entfernte Messstellen berücksichtigt werden.

Die Daten der untersuchten Messstellen reichen weiter zurück als nur bis 1996; es wurden auch die älteren Daten übernommen, in den Graphiken geplottet und bei der visuellen Prüfung der Zeitreihen berücksichtigt. Für einige Messstellen (Schönauf; Witzelsdorf; Stopfenreuth; Hainburg) liegen sogar lange Zeitreihen mit mehr als 50 Jahren vor. Aber die eigentlichen Trenduntersuchungen und statistischen Parameter beziehen sich generell auf die Reihe 1996/2020.

Es werden nur Daten solcher Messstellen verwendet, die vier wesentliche Voraussetzungen erfüllen:

- a) Lage donaulah (Distanz vom nächstgelegenen Ufer bis ca. 3,0 km) und in dem von der Donau unmittelbar beeinflussten Grundwasserkörper (links- oder rechtsufrig) gelegen;
- b) Daten mindestens ab 1996 verfügbar, möglichst aber noch (zumindest) einige Jahre länger (um allfällige Auffälligkeiten in der zeitlichen Entwicklung, auch in der Phase vor Untersuchungszeitraum, erkennen zu können);
- c) möglichst wenig (bzw. überhaupt keine) Lücken bei den Monatswerten (weniger als 9 fehlende Monatswerte, das entspricht 3% bezogen auf den Untersuchungszeitraum 1996/2020);
- d) keine bekannten stärkeren Entnahmen (Brunnen), Versickerungen oder sonstige anthropogene Störungen in der Nähe der Messstelle;

Damit waren die in [Tab. 6](#) angegebenen 15 Messstellen (des Hydrographischen Dienstes) zu berücksichtigen:

Tabelle 6: Donaunahe GW-Messstellen und zugehörige Informationen; R= rechtsufrig; L= linksufrig

Nr.:	GW-Messstelle:	HZB-Nr.:	Distanz vom Donauufer [m]:		Daten ab:	Lücken (1996/2020):
GW1	Wien 11, Bl 11-50	330035	500	R	1986	1 (von 300)
GW2	Wien 22, Bl 22-186/LRA44	313254	450	L	1972	1 (von 300)
GW3	Fischamend, Bl 1909.6	331082	840	R	1983	8 (von 300)
GW4	Schönau a.d.Donau, Br	305136	1090	L	1949	0
GW5	Maria Ellend, Bl 1906.2	331090	200	R	1983	2 (von 300)
GW6	Orth a.d.D., Bl 1902.5	331041	590	L	1983	3 (von 300)
GW7	Orth a.d.D., Bl 1900.003	326710	650	L	1979	0
GW8	Regelsbrunn, Bl 1898.2	331116	510	R	1983	4 (von 300)
GW9	Eckartsau, Bl	304600	3000	L	1939	0
GW10	Eckartsau, Bl 1894.5	331058	490	L	1983	8 (von 300)
GW11	Witzelsdorf, Br	305326	2750	L	1949	0
GW12	Petronell, Bl 1889.7	331066	190	L	1983	6 (von 300)
GW13	Petronell, Bl 1889.2	331132	430	R	1983	2 (von 300)
GW14	Stopfenreuth, Bl 123	305193	1570	L	1958	0
GW15	Hainburg a.d.D., Bl. 21	305458	230	R	1957	0

Es ist klar, dass für die einzelnen Messstellen immer auch lokale Besonderheiten (z.B. Nähe eines Seitenarmes der Donau und dort gegebene hydraulische Bedingungen) wirksam sind. Die Ergebnisse dieser Untersuchung sind daher eher im Sinn einer Stichprobe zu sehen.

4.3 Zur Methodik

Die eigentlichen Trenduntersuchungen erfolgen für die Zeitreihen der GW- Jahresmittelwerte (1996/2020). Diese werden gemeinsam mit den Basisdaten (GW- Monatsmittel) und den Jahres-GW-Minima in Anhang A4 graphisch dargestellt; sie wurden visuell auf Besonderheiten überprüft.

Für verschiedene Messstellen bestehen einzelne Lücken bei den Monatswerten (einzelne Monatswerte 2002/2003), vgl. [Tab. 6](#). Diese fehlenden Angaben wurden über Regressionsanalysen mit Donauwasserständen (Pegel Hainburg, Monatsmittelwerte, i.A. für die Teilperiode 1998/2000; n=36 Werte) ergänzt. Dies wird hier beispielhaft für GW6 (Orth, Bl. 1902.5) gezeigt, vgl. [Abb. 10](#).

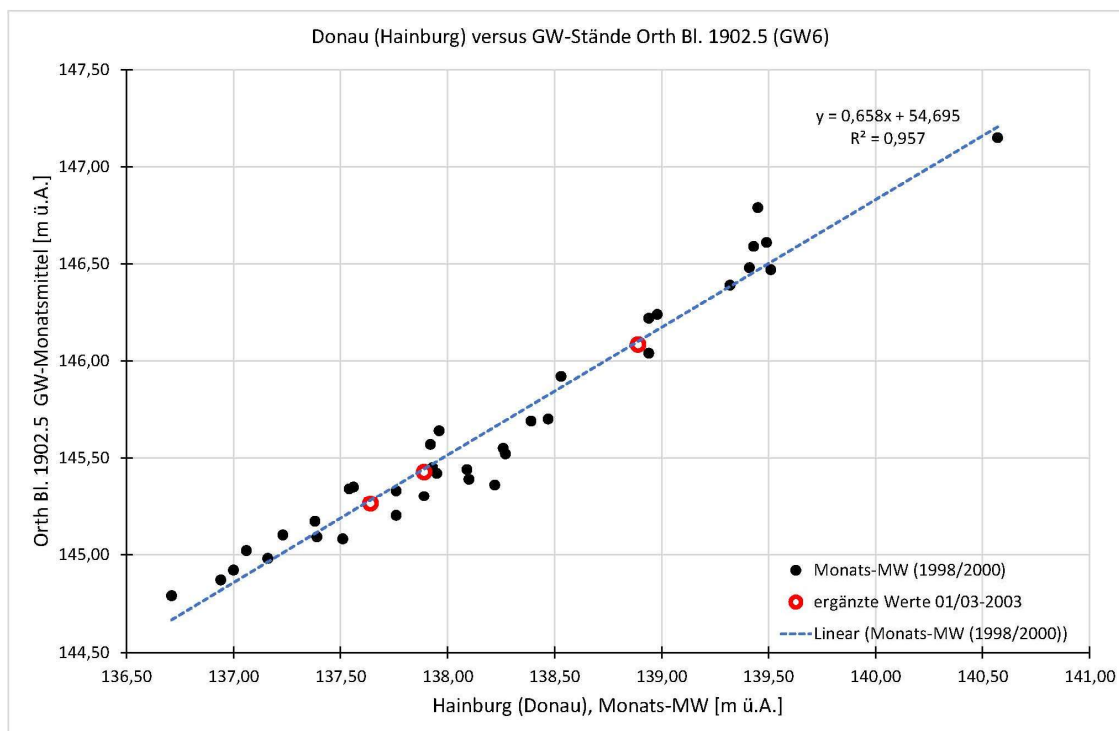


Abbildung 10: Regressionsanalyse der GW-Monatsmittel Orth Bl. 1902.5 versus Monats-MW am Pegel Hainburg (Donau); verwendet Reihe: 1998/2000 (n=36); mit diesem Modell werden einzelnen fehlende GW-Monatsmittel für die GW-Messstelle Orth (drei fehlende Werte: 01/03-2003) ergänzt

Dieses Verfahren liefert auch in anderer Hinsicht wichtige Informationen. Daher wurden für alle untersuchten GW-Messstellen die Relationen zwischen den GW-Monatsmittelwerten und den Monats-MW-Werten des Pegels Hainburg in Beziehung gesetzt, und zwar für die drei Jahre 1998/2000 (n=36)¹⁹. Die Steigungen $a_{1,i}$ und die Bestimmtheitsmaße R_i^2 der jeweiligen Regressionsmodelle (lineares Modell)

$$GW_i = a_{0,i} + a_{1,i} \cdot MW_{Hainburg,i} \quad (\text{Gl. 6})$$

liefern Informationen über die Stärke der Beeinflussung des Grundwassers durch die Donauwasserstände und werden in Tab. 7 aufgelistet.

¹⁹ Für diese Teilperiode liegen für alle GW-Messstellen die Monatsmittelwerte vor.

Tabelle 7: Zusammenhang (Regressionsparameter, lineares Modell) zwischen GW-Monatsmittel der einzelnen Messstellen und dem Donau-MW (Monats-MW am Pegel Hainburg), Reihe 1998/2000 (n=36)

Nr.:	GW-Messstelle:	HZB-Nr.:	Distanz zum Donauufer [m]:		Achsabschnitt a_0 [m ü.A.]	Steigung a_1	Bestimmtheitsmaß R^2
GW1	Wien 11, Bl 11-50	330035	500	R	73,46	0,570	0,832
GW2	Wien 22, Bl 22-186/LRA44	313254	450	L	54,49	0,691	0,932
GW3	Fischamend, Bl 1909.6	331082	840	R	50,24	0,709	0,873
GW4	Schönau a.d.Donau, Br	305136	1090	L	80,03	0,490	0,900
GW5	Maria Ellend, Bl 1906.2	331090	200	R	47,52	0,721	0,980
GW6	Orth a.d.D., Bl 1902.5	331041	590	L	54,69	0,658	0,957
GW7	Orth a.d.D., Bl 1900.003	326710	650	L	93,28	0,373	0,776
GW8	Regelsbrunn, Bl 1898.2	331116	510	R	54,38	0,645	0,948
GW9	Eckartsau, Bl	304600	3000	L	116,85	0,187	0,402
GW10	Eckartsau, Bl 1894.5	331058	490	L	54,49	0,638	0,905
GW11	Witzelsdorf, Br	305326	2750	L	115,73	0,186	0,436
GW12	Petronell, Bl 1889.7	331066	190	L	90,70	0,360	0,932
GW13	Petronell, Bl 1889.2	331132	430	R	50,66	0,649	0,957
GW14	Stopfenreuth, Bl 123	305193	1570	L	97,82	0,301	0,618
GW15	Hainburg Bl. 21	305458	230	R	6,91	0,938	0,972

Es ist zu erwarten, dass beide Parameter stark von der Distanz zur Donau (zum nächstgelegenen Donauufer) beeinflusst werden. Dies ist tatsächlich der Fall. [Abb. 11](#) zeigt den Zusammenhang für die Steigungen der Regressionsgeraden a_1 (exponentielles Modell; Bestimmtheitsmaß 0,584) und [Abb. 12](#) für die Bestimmtheitsmaße R^2 (exponentielles Modell; Bestimmtheitsmaß 0,895).

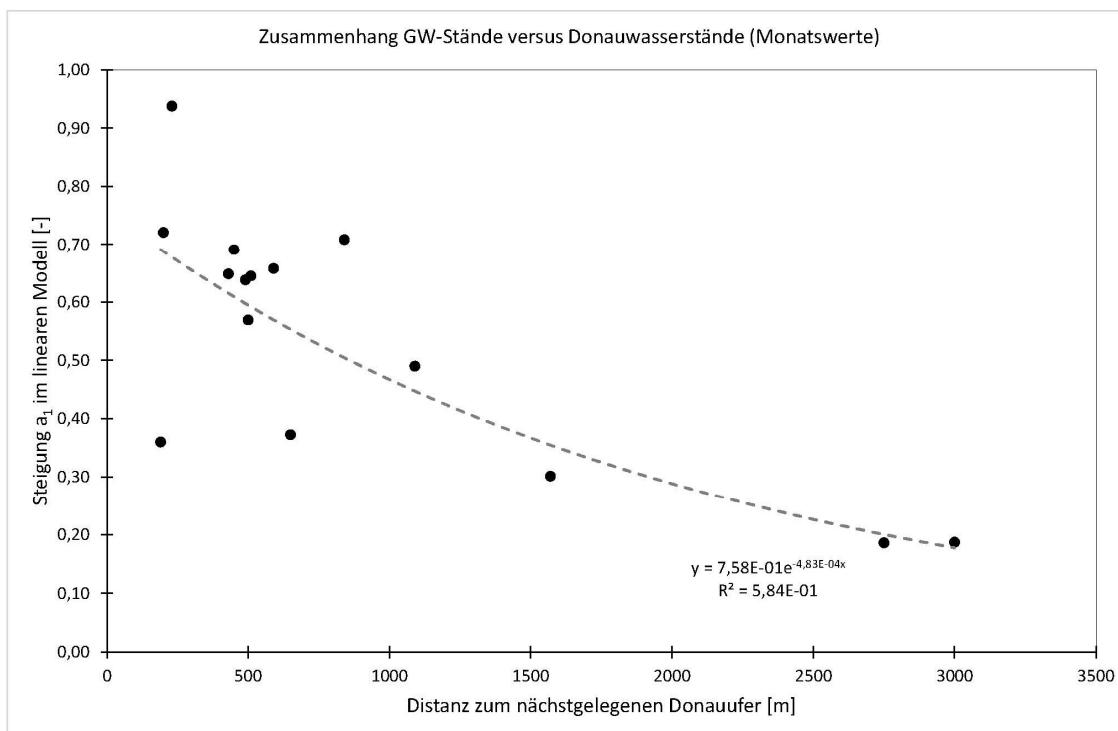


Abbildung 11: Zusammenhang (Regressionsmodell, exponentielles Modell) zwischen Distanz der GW-Messstelle zum nächstgelegenen Donauufer und der Steigung a_1 aus dem linearen Modell; Basiswerte: Monatsmittel der Reihe 1998/2000.

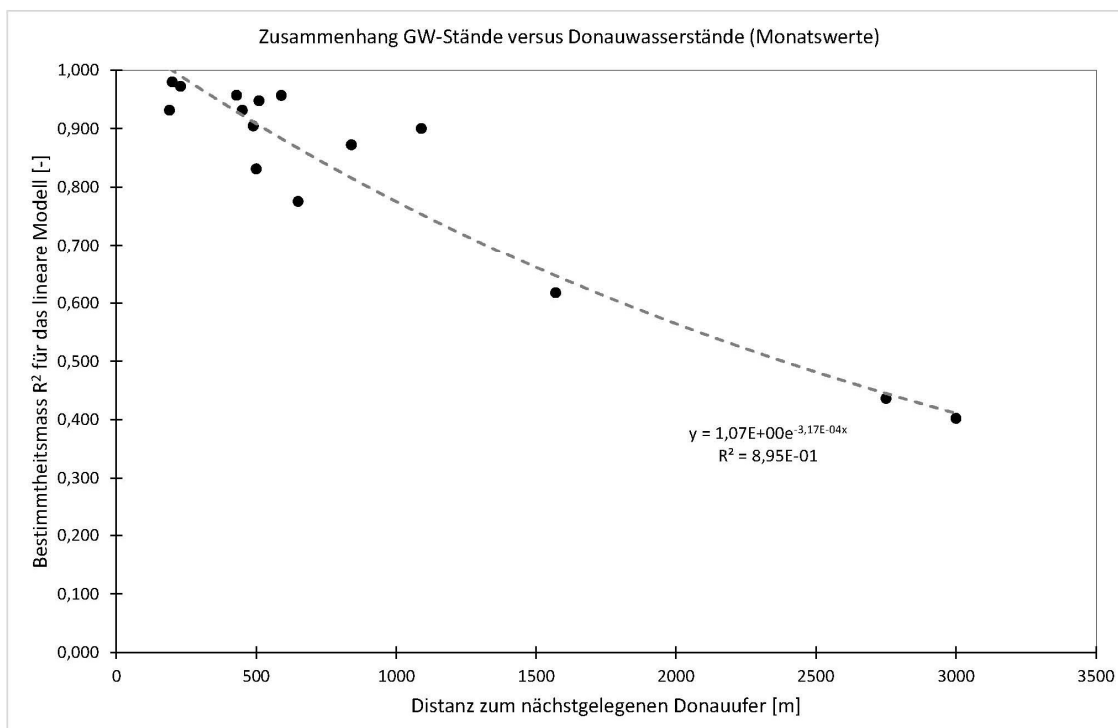


Abbildung 12: Zusammenhang (Regressionsmodell, exponentielles Modell) zwischen Distanz der GW-Messstelle zum nächstgelegenen Donauufer und dem Bestimmtheitsmaß R^2 aus dem linearen Modell; Basiswerte: Monatsmittel der Reihe 1998/2000.

Über die Mittelung der GW-Monatsmittelwerten (über die einzelnen Jahre) erhält man die Zeitreihen der MW- Jahresmittelwerte (in den Graphiken rot geplottet, [Anhang A4](#)). Damit fallen die starken saisonalen Schwankungen heraus. Für die damit erhaltenen Zeitreihen werden schließlich Trendanalysen mittels Mann-Kendall-Test und Sen-Neigung (Methodik vgl. [Anhang A1](#)) durchgeführt, analog zu den Donauwasserständen. Die Ergebnisse dieser Untersuchungen werden in [Tab. 8](#) aufgelistet und dort (Kap. 4.4) auch diskutiert. Bei der Interpretation ist der bereits unter Pkt. 3.4 erwähnte Trend der Donauabflüsse (Jahres-MQ) in Kombination mit den damit bedingten Wasserstandsänderungen (hydrologisch bedingte Trendkomponente β_{hyd} zu berücksichtigen.

Bei dieser Korrektur des Gesamttrends (Abzug der hydrologisch bedingten Komponente β_{hydr} , d.h. jenes Anteiles, der durch den MQ-Trend bedingt ist) ist aber zu beachten, dass diese nur in der Donau voll wirksam ist, während sie an den einzelnen GW-Messstellen (entsprechend der Neigungen der Regressionsgeraden $a_{1,i}$) nur gedämpft in Erscheinung tritt; es gilt also für die verschiedenen Messstellen, dass $\beta_{GW,hydr,i} = a_{1,i} \cdot \beta_{hydr}$. Diese Werte werden schließlich in [Tab. 8](#) von den jeweiligen Gesamttrendstärken β_{ges} abgezogen

$$\beta_{GW,morph,i} = \beta_{GW,ges,i} - a_{1,i} \cdot \beta_{hydr} \quad (\text{Gl. 7})$$

und ergeben dann den morphologisch (durch die Sohlerosion der Donau) bedingten Trend der GW-Absenkungen (letzte Spalte in [Tab. 8](#)). Aus wasserwirtschaftlicher und ökologischer Sicht ist naturgemäß der Gesamttrend wirksam.

Ergänzend (für die Interpretation der Ergebnisse) werden auch die Zeitreihen der Jahresniederschläge für drei in der Umgebung befindliche Stationen (Franzensdorf; Bad Dt. Altenburg; Markthof; Daten ab 1971; [Anhang A4](#)) aus eHyd übernommen und für die Periode 1996/2020 im Rahmen einer Trendanalyse (Mann-Kendall-Test; Sen-Neigung) untersucht. Dabei soll überprüft werden, ob das Grundwasser ggf. durch stärkere Niederschlags-Trends oder Besonderheiten in den letzten Jahren beeinflusst wird.

4.4 Ergebnisse und Diskussion

Die Zeitreihen der GW-Jahresmittel (Reihe 1996/2020) werden in [Anhang A4](#) graphisch dargestellt. Die daraus abgeleiteten statistischen Parameter und die Ergebnisse der Trendanalysen (Mann-Kendall-Test und Sen-Neigung) werden in [Tab. 8](#) aufgelistet.

Ein typisches Beispiel (GW6: Messstelle Orth Bl. 1902.5) wird mit [Abb. 13](#) angegeben. Man erkennt einerseits die starken Variationen (Schwankungen) der Monatswerte, die im Wesentlichen durch entsprechende Schwankungen der Donauwasserstände (Monatsmittel) bedingt sind und über das lineare Regressionsmodell (Gl. 6) meist gut beschrieben werden. Für diese Messstelle (bei Orth) ist der Zusammenhang mit $R^2 = 0,957$ sehr stark, die (lineare) Dämpfung ist hier mit $a_1 = 0,658$ gegeben. Zweitens ist die Abnahme des mittleren Niveaus der GW-Stände (also der GW-Jahresmittel; rote Markierung / rote Linie) unübersehbar. Das ist der Trend, dessen Stärke (Trendstärke β_{ges} im Sinn der Sen-Neigung) und statistische Signifikanz im Rahmen dieser Untersuchung gesucht ist. Für diese Messstelle ist der Gesamttrend der Reihe 1996/2020 rd. -2,6 cm/Jahr und die statistische Signifikanz (mit einer standardisierten Prüfgröße von $|Z| = 3,480$) besonders ausgeprägt. Der Trend wäre hier auch mit einem deutlich strengeren Signifikanzniveau von $\alpha = 1\%$ als statistisch signifikant zu bewerten. Über diese 24 Jahre fiel das mittlere GW-Niveau um rd. 60 cm.

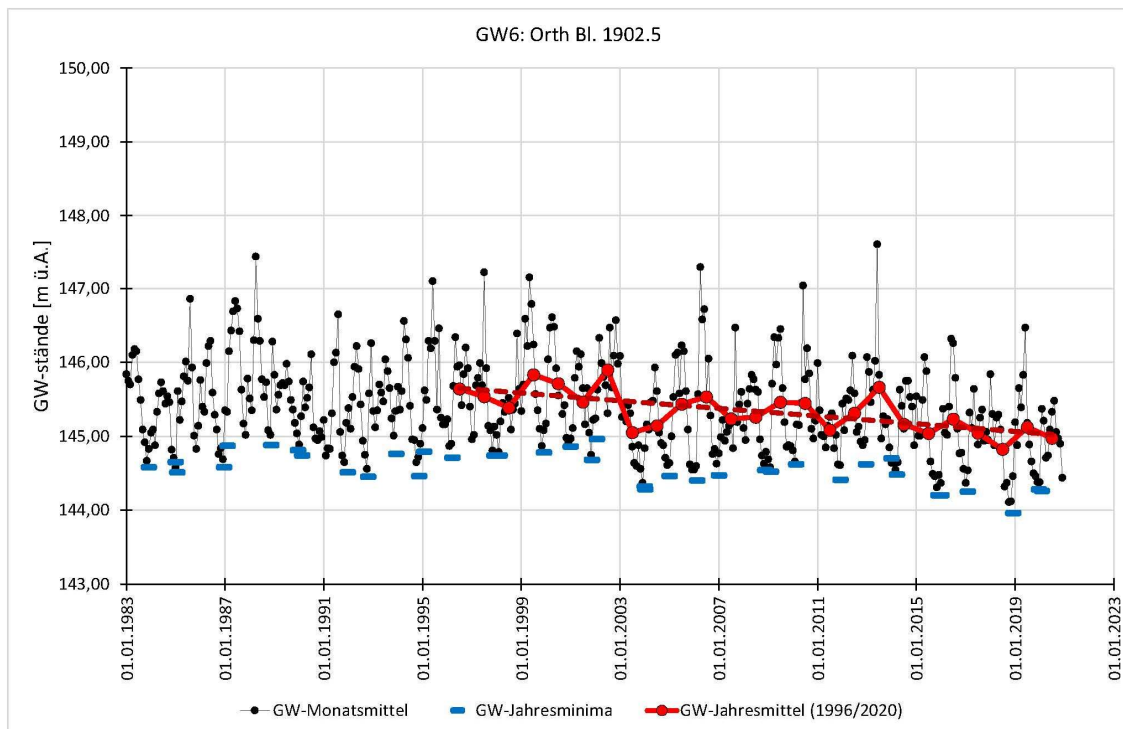


Abbildung 13: GW-Monatsmittel, GW-Jahresminima (beides: 1983/2020) und GW-Jahresmittelwerte (1996/2020) für die GW-Messstelle Orth Bl. 1902.5;

Auf dem gewählten (und für hydrologische Untersuchungen häufig angewandten) Signifikanzniveau von $\alpha = 10\%$ (beidseitiger Test, d.h. 5% an beiden Seiten) zeigen alle GW-Messstellen mit Ausnahme von GW15 (Hainburg Bl. 21) statistisch signifikante und fallende Trends. Für die Trendstärken (Sen-Neigungen) sind (neben lokalen Besonderheiten, die hier nicht näher untersucht bzw. diskutiert werden sollen) zwei Einflüsse relevant:

- Messstellen im mittleren Abschnitt der Donau (ca. Fischamend bis Eckartsau) haben tendenziell stärkere Trendstärken als jene im unteren Abschnitt (Stopfenreuth und Hainburg) bzw. am oberen Ende in Simmering;
- donaunahe Messstellen haben tendenziell stärkere Trendstärken als donauferne Messstellen;

Beide Einflüsse sind gut erklärbar, sie korrespondieren einerseits mit den Befunden zu den Donauwasserständen (Kap. 3.4) und andererseits mit den Ergebnissen zur Abnahme des Einflusses der Donauwasserstände mit zunehmender Distanz vom Ufer (Kap. 4.3). Es ist aber bemerkenswert, dass selbst für die beiden bereits recht entfernt von der Donau gelegenen (3,0 km bzw. 2,75 km) Messstellen GW9 und GW11 noch ziemlich starke Trends (Abnahmen) festzustellen sind. Der Einfluss der morphologisch bedingten Änderungen der Donauwasserstände reicht also mindestens so weit, tatsächlich wohl noch weiter; diese Frage könnte durch Berücksichtigung weiterer (weiter von der Donau entfernter) Messstellen im Detail untersucht werden, was aber den Rahmen dieser Studie überschreitet.

Tabelle 8: Ergebnisse der Trenduntersuchungen für mittlere GW-Stände (d.h. die Zeitreihe der GW-Jahresmittel) für die untersuchten donaunahen Messstellen und die Untersuchungsperiode 1996/2020.

Abb.:	GW-Messstelle:	statistische Parameter (1996/2020)			Trendanalyse (1996/2020), MK-Test mit Prewhitening			
		Mittelwert [m ü.A.]	Standardabweichung [m]	Lag-1-Autokorrelation r_1 [-]	standardisierte Prüfgröße Z	Trend statistisch signifikant ($\alpha = 0,10$)	Gesamt-trend $\beta_{GW,ges}$ [cm/a]	morphol. Trendkomponente $\beta_{GW,morph}$ [cm/a]
GW1	Wien 11, Bl 11-50	151,94	0,271	0,144	-2,499	ja	-1,8	-1,1
GW2	Wien 22, Bl 22-186/LRA44	149,69	0,327	0,424	-3,060		-2,5	-1,6
GW3	Fischamend, Bl 1909.6	147,88	0,323	0,348	-2,966		-2,6	-1,7
GW4	Schönau a.d.Donau, Br	147,57	0,237	0,391	-2,733		-1,9	-1,2
GW5	Maria Ellend, Bl 1906.2	146,82	0,284	0,317	-2,546		-2,1	-1,1
GW6	Orth a.d.D., Bl 1902.5	145,34	0,281	0,411	-3,480		-2,6	-1,7
GW7	Orth a.d.D., Bl 1900.003	144,51	0,291	0,592	-3,760		-3,1	-2,7
GW8	Regelsbrunn, Bl 1898.2	143,32	0,217	0,347	-2,546		-1,6	-0,7
GW9	Eckartsau, Bl	142,59	0,261	0,466	-3,060		-2,1	-1,9
GW10	Eckartsau, Bl 1894.5	142,43	0,314	0,390	-3,340		-2,9	-2,1
GW11	Witzelsdorf, Br	141,38	0,199	0,307	-2,779		-1,4	-1,1
GW12	Petronell, Bl 1889.7	140,28	0,234	0,345	-2,966		-2,1	-1,6
GW13	Petronell, Bl 1889.2	140,07	0,275	0,333	-2,686		-2,2	-1,4
GW14	Stopfenreuth, Bl 123	139,37	0,185	0,075	-2,359		-1,0	-0,6
GW15	Hainburg Bl. 21	136,28	0,318	0,181	-1,285	nein	-1,1	0,1

Die Zeitreihen der Jahresniederschläge zeigen keine Anzeichen fallender Trends, eher im Gegenteil. [Abb. 14](#) zeigt dies beispielhaft für Bad Dt. Altenburg (HZB-Nr. 108555), der Trend für den Zeitraum 1996/2020 ist dort steigend, wenngleich dies nicht statistisch signifikant ist (standardisierte Prüfgröße $Z = 0,864$; Sen-Neigung $\beta = 3,38$ mm/a). Die langjährigen Jahresmittelwerte liegen in dieser Region zwischen etwa 550 und 580 mm.

Die letzten Jahre gelten für Mitteleuropa als besonders trocken, aber die Werte für diese drei Stationen zeigen diesbezüglich keine besonders tiefen Werte (wobei die Jahre 2021 und 2022 nicht enthalten sind); generell deutet jedenfalls nichts darauf hin, dass die fallenden Trends bei den mittleren GW-Ständen (Jahresmittelwerten) durch abnehmende Niederschläge verursacht oder beeinflusst sein könnten. Die Ursachen liegen ganz offensichtlich bei Veränderungen der Donauwasserstände, und zwar einerseits bei den morphologisch bedingten Effekten und andererseits beim fallenden Trend für die Jahres-MQ. Letzteres ist ein hydrologischer Effekt, der durch Entwicklungen im gesamten Einzugsgebiet der Donau (mutmaßlich Klimawandel) geprägt sein muss; die erstgenannte und meist deutlich

überwiegende Komponente beruht hingegen auf der Sohlerosion zwischen Wien und etwa Hainburg und damit auf dem Geschiebedefizit dieser Strecke.

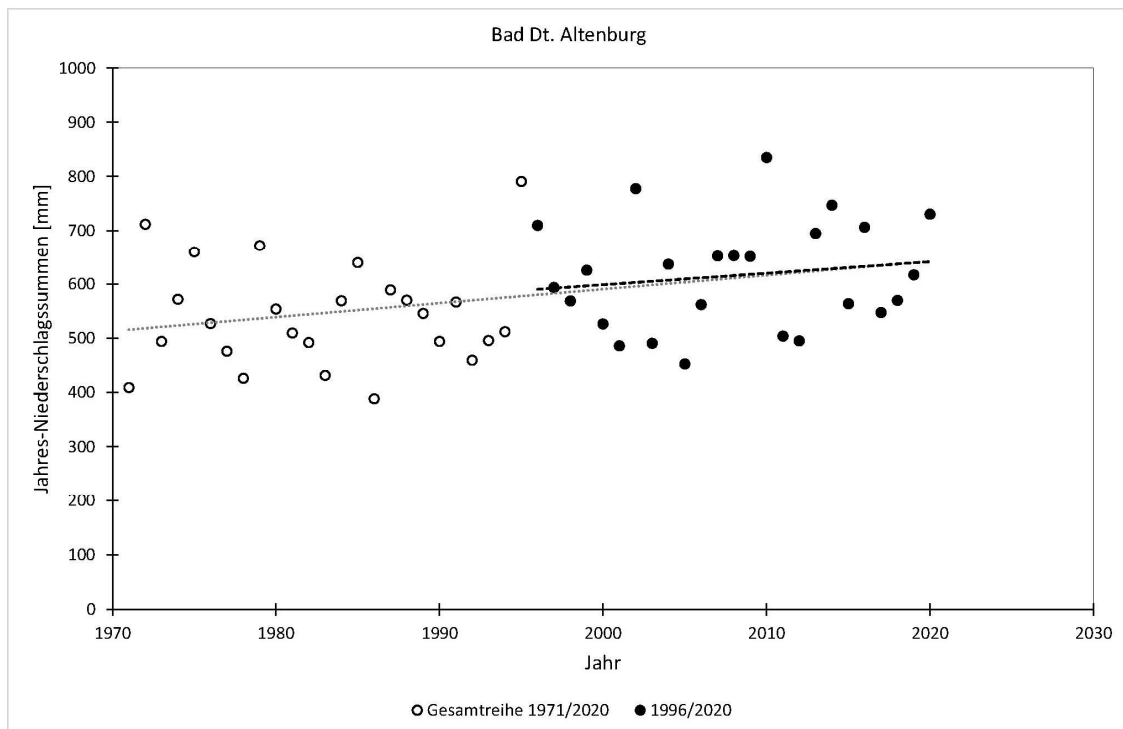


Abbildung 14: Jahres-Niederschlagssummen der Station Bad Dt. Altenburg (Reihe 1971/2020) mit besonderer Kennzeichnung der Werte 1996/2020; diese folgen im Wesentlichen dem (steigenden) Trend 1971/2020.

Die Jahresniederschlags-Zeitreihen der drei untersuchten Stationen werden in [Anhang A4](#) (A4/16 bis A4/18) graphisch dargestellt.

4.5 Eine wasserwirtschaftliche Zusatzbemerkung

Vor dem Hintergrund der offensichtlich immer stärker werdenden (bzw. besser erkennbaren) Auswirkungen des Klimawandels (u.a. zunehmende Wahrscheinlichkeit länger dauernder Trockenperioden) geht die Entwicklung der fallenden Trends bei den mittleren GW-Ständen naturgemäß in die falsche Richtung. In nur 24 Jahren (1996/2020) haben die mittleren GW-Stände an fast allen untersuchten Messstellen um ca. 45 bis 70 cm abgenommen; gestiegen oder auch nur gleichgeblieben sind sie nirgends.

Gerade in der jetzigen Situation muss die Erhöhung der Resilienz der Wasserversorgung ein vorrangiges Ziel sein, tatsächlich werden aber die nachteiligen Entwicklungen hier noch durch die Sohlerosion der Donau verstärkt. Dazu kommt im Übrigen, dass der Nutzungsdruck (Wasserbedarf) im Wiener Raum durch die regionale Bevölkerungszunahme und die Landwirtschaft noch weiter zunimmt.

Die Donauauen und der Nationalpark sind von diesen Problemen direkt und besonders stark betroffen, aber die Relevanz dieser Frage geht weit darüber hinaus. Zu den übergeordneten Entwicklungen bezüglich der GW-Ressourcen und der GW-Nutzungen (bis 2050) sh. auch BMLRT (2021)²⁰.

²⁰ BMLRT (2021): Wasserschatz Österreich – Grundlagen für nachhaltige Nutzungen des Grundwassers. Bundesministerium für Landwirtschaft, Regionen und Tourismus

5 Ergänzende Auswertungen und Abschätzungen zu den Änderungen des Geschiebespeichers

Änderungen von Referenzwasserspiegel dw_i/dt (hier differentiell formuliert) können mit den Änderungen der mittleren Sohllagen dz_i/dt in Verbindung gesetzt werden; und gemeinsam mit einer mittleren durchflussaktiven Breite $B_{m,i}$ und der Länge der Strecke L_i kann das schließlich auf gemittelte Änderungen des Geschiebe-Sohlspeichers $dV_{G,i}/dt$ (Volumen des Geschiebekörpers unter der Sohle) umgerechnet werden, vgl. u.a. auch BMNT (2018). Mit der Grundannahme

$$\frac{\Delta w_i}{\Delta t} \sim \frac{\Delta z_i}{\Delta t} \quad (\text{Gl. 8})$$

wobei hier aus pragmatischen Gründen von der differentiellen Formulierung auf die Formulierung mit Differenzen gewechselt wurde, folgt:

$$\frac{\Delta V_{G,i}}{\Delta t} = \frac{\Delta z_i}{\Delta t} \cdot B_{m,i} \cdot L_i \sim \frac{\Delta w_i}{\Delta t} \cdot B_{m,i} \cdot L_i \quad (\text{Gl. 9})$$

Für die mittlere durchflussaktive Breite wurde in BMNT (2018) eine Spannweite von 260 m bis 280 m gesetzt. Nach einer früheren Untersuchung (Klasz, 2011) könnte es für MW auch etwas höher sein, eher rd. 300 m. Es ist klar, dass die durchflussaktive Breite für Niederwasser (im Besonderen: RNW) geringer ist als für Mittelwasser. In Klasz (2011)²¹ wurde für diese Strecke eine mittlere RNW-Breite von ca. 247 m ermittelt.

5.1 VHP-Erhaltungsstrecke

Für die VHP-Erhaltungsstrecke (Strom-km 1921 bis 1910) wurde in der Arbeitsgruppe des Ministeriums (BMNT, 2018) aus direkten Auswertungen der Stromgrundaufnahmen (Methode und erste Ergebnisse bereits in Klasz et al, 2016 beschrieben; im Übrigen wurde diese Strecke auch schon in der Dissertation Balzhieva (2015)²² auf dieser Basis näher untersucht) eine zeitgemittelte Abnahme des Geschiebespeichers von ca. -45.000 m³/Jahr festgestellt; auf Basis einer anderen Stromgrundaufnahme sogar rd. 50.000 m³/Jahr (BMNT, 2018). Dies muss zumindest bis 2019 (neuer §21a-Bescheid) wirksam gewesen sein. Damit und mit den genannten Breiten erhält man Wasserstands-Änderungsraten für die VHP-Strecke (d.h. strecken- und zeitgemittelt) von etwa -1,5 bis -1,6 cm/Jahr.

Das fällt etwas stärker als der Mittelwert der pegelbezogenen Änderungsraten (Methode 1) aus Fischamend (als repräsentativ für den unteren Rand gesetzt) und Kraftwerk Freudenau – UW (oberer Rand), was für Mittelwasser -1,1 cm/Jahr ergibt. Dabei ist zu berücksichtigen, dass hier nur Daten von zwei Pegel zur Verfügung stehen, was erhebliche Unsicherheiten mit sich bringt; die dortige Entwicklung muss ja nicht (annähernd) linear zwischen beiden Rändern (oben / unten) gewesen sein. Der Mittelwert der MW-Änderungen und RNW-Änderungen aus dem KWD-Vergleich (KWD-2020 versus KWD-1996; Q-kompensiert) liefert für RNW und MW -1,7 bzw. -1,8 cm/Jahr und damit eine geringe Überschreitung des oben genannten Wertebereiches von -1,5 bis -1,6 cm/Jahr.

²¹ Ingenieurbüro Klasz (2011): Studie zur Flussmorphologie der frei fließenden Donau, Wien bis Marchmündung – Überarbeitete Fassung; im Auftrag des Nationalparks Donau-Auen.

²² Balzhieva, D. (2015): Analysis of morphological changes of the Danube on the basis of repeated river bed surveys; Doctoral Thesis; Vienna University of Technology, Faculty of Civil Engineering.

Das plausibelste Szenario für die VHP-Strecke (und den Zeitraum 1996/2020) ist, dass das **Defizit zumindest bei 50.000 m³/Jahr** lag (denn auch die viadonau-Stromgrundaufnahmen²³, die höhere Austräge ergaben, deckten nicht die gesamte Breite ab) und die zugehörigen mittleren MW-Absenkungen bei rd.

$$50000/(280 \cdot 11000) \sim 0,016 \text{ m/a}$$

bzw.

$$50000/(260 \cdot 11000) \sim 0,0175 \text{ m/a}$$

d.h. zwischen -1,6 und -1,75 cm/Jahr, also mit sehr guter Übereinstimmung zwischen der hydrographischen und der flussgeometrischen (direkte Ermittlung des Erosionsvolumens) Methode. All das ist in einer Strecke geschehen, in der es nach der Logik und den Vorgaben (Auflagen) der Wasserrechtsbehörde (ursprüngliche Genehmigungsbescheide) überhaupt keine Eintiefung hätte geben dürfen!

Einen Trendbruch kann es dann frühestens 2020 gegeben haben, was derzeit mit den Daten nicht sicher geprüft werden kann. Der Vergleich der KWD-2020 gegen die KWD-2010 ([Abb. 9](#)) zeigt im Übrigen auch, dass die stärksten Eintiefungen im unteren Bereich der VHP-Erhaltungsstrecke (etwa Strom-km 1914 bis 1910) zu beobachten sind. Die MW-Absenkungen sind dort stärker als weiter flussab.

5.2 Stromab der VHP-Erhaltungsstrecke bis hydromorphologische Stauwurzel

Für die Strecke stromab der VHP-Erhaltungsstrecke (bis zur hydromorphologischen Stauwurzel: Strom-km 1910 bis 1882) wird im Folgenden umgekehrt vorgegangen, d.h. aus den ermittelten (mittleren) Wasserstands-Änderungsraten werden die Änderungsraten des Sohl-Geschiebespeichers abgeleitet; dies in zwei methodisch unterschiedlichen Varianten, nämlich mit (a.) den nach Methode 1 ermittelten pegelbezogenen Änderungen (Pegel Fischamend, Orth, Wildungsmauer, Bad Dt. Altenburg und Hainburg) und (b.) mit den über den Längsverlauf aus den KWDs (KWD-2020 versus KWD-1996; Q-kompensiert) gemittelten MW-Änderungsraten, vgl. [Tab. 9](#). Dort werden dann auch die entsprechenden Werte für RNW (mit einer mittleren durchflussaktiven Breite für RNW von 245 m) angegeben. Für MW wird hier generell eine Breite von 280 m gesetzt.

²³ Den höchsten Wert ergab die Aufnahme 2016/03 (Breite: 239 m) versus 1999/04 mit -50.900 m³/a (BMNT, 2018); dabei wäre ja auch noch zu berücksichtigen, dass bereits vor dem Jahr 1999 (also 1996/1999) Sohlerosion in der VHP-Strecke stattgefunden hat.

Tabelle 9: Abschätzung der Änderungsraten des Sohl-Geschiebespeichers in der Teilstrecke unterhalb der VHP-Erhaltungsstrecke (Strom-km 1910) bis zur hydromorphologischen Stauwurzel (Strom-km 1882) mit (a.) über die untersuchten Pegelstellen gemittelten Änderungsraten und (b.) aus dem KWD-Vergleich (KWD-2020 versus KWD-1996; Q-kompensiert) ermittelten Änderungsraten

Methode	Zustand	Breite [m]	Länge [m]	Wst-Ände- rungsrate [m/a]	Volumenän- derung (ge- mittelt und gerundet)
(a) pegelbezogene Mittelwerte (Methode 1)	MW	280	28.000	0,010	81.500
	RNW	245		0,012	82.300
(b) Mittelwerte aus KWD-Ver- gleich (KWD-2020 versus KWD- 1996, Q-kompensiert)	MW	280	28.000	0,013	105.200
	RNW	245		0,014	96.100

Der Ansatz mit dem KWD-Vergleich liefert höhere Mittelwerte für die Wst-Änderungsraten und somit höhere Volumen-Änderungsraten. In der Gesamtbewertung und unter Berücksichtigung der verschiedenen Unschärfen wird für diese Teilstrecke und die Periode 1996/2020 eine **gemittelte Volumen-Änderungsraten von etwa 85.000 bis 95.000 m³/Jahr** abgeschätzt, das macht über den gesamten Zeitraum rd. 2,0 bis 2,3 Mio m³.

In der früheren Arbeitsgruppe wurde für diese Teilstrecke nach verschiedensten Sensitivitätsanalysen ein wahrscheinlichster Wert für das Geschiebedefizit von ca. 105.000 m³/Jahr abgeschätzt (BMNT, 2018). Die hier ermittelten Werte passen dazu relativ gut, wenn man voraussetzt, dass in den letzten Jahren (ab 2018) weitere graduelle Verbesserungen durch die Geschieberückführungen der viadonau erzielt werden konnten (vgl. weiter unten, [Pkt. 5.3](#)).

Gemeinsam mit der VHP-Erhaltungsstrecke gingen also in dieser Periode 1996/2020 rd. 135.000 bis 145.000 m³/Jahr verloren, in Summe (bis 2020) also rd. 3,2 bis 3,5 Mio. m³. Das ist die primäre Ursache und der Motor für die Wasserspiegelabsenkungen (Kap. 3) und die Grundwasserabsenkungen (Kap. 4) der Phase ab 1996 (Inbetriebnahme / Teilstau des Kraftwerkes Freudenuau). Zuvor (in den 1980er- und frühen 1990er-Jahre) wirkten sich aber bereits die Kraftwerke Altenwörth und Greifenstein aus.

5.3 Zusatzauswertung für die letzten zehn Jahre (2010/2020)

Für die letzten zehn Jahre (2010/2020) werden im Folgenden primär die KWD-basierten Änderungsraten berücksichtigt (KWD-2020 versus KWD-2010, Q-kompensiert); man erhält damit die in [Tab. 10](#) angegebenen Werte:

Tabelle 10: Abschätzung der Änderungsraten des Sohl-Geschiebespeichers in der Teilstrecke unterhalb der VHP-Erhaltungsstrecke (Strom-km 1910) bis zur hydromorphologischen Stauwurzel (Strom-km 1882) aus dem KWD-Vergleich (KWD-2020 versus KWD-2010; Q-kompensiert) ermittelten Änderungsraten

Methode	Zustand	Breite [m]	Länge [m]	Wst-Ände- rungsrate [m/a]	Volumenän- derung (ge- mittelt und gerundet)
(b) Mittelwerte aus KWD-Vergleich (KWD-2020 versus KWD-2010, Q-kompensiert)	MW	280	28.000	0,012	94.100
	RNW	245		0,012	82.300

Mit der pegelbezogenen Auswertung würde man einen Mittelwert (Pegel Fischamend; Orth; Wildungsmauer; Bad Dt. Altenburg; Hainburg) für die Strecke stromab der VHP-Erhaltungsstrecke (bis Strom-km 1882) von rd. -0,4 cm/Jahr erhalten; dieser Wert ist aber – hauptsächlich durch die für diese Phase untypischen und lokalen Sonderentwicklungen bei Fischamend und Bad Dt. Altenburg (vgl. auch [Pkt. 3.4](#)) tendenziell zu hoch (d.h. die Eintiefungen sind mit großer Wahrscheinlichkeit etwas stärker).

Das Zugabeäquivalent durch die über Geschieberückführungen der viadonau zusätzlich zugegebenen Mengen wurde in Klasz et al. (2017)²⁴ mit (Größenordnung) etwa 50.000 m³/a (Mittelwert über 2009/2016 und unter Berücksichtigung von Abriebs- und Sortiereffekten) angegeben. Dieser Anteil könnte gegen Ende der Periode 2010/2020 noch etwas angestiegen sein; damit wäre das verbleibende Geschiebedefizit in dieser Teilstrecke und Phase mit etwa 40.000 bis 50.000 m³/Jahr abzuschätzen, und dazu würde eine MW-Änderungsrate von etwa -0,5 bis -0,6 cm/Jahr passen.

In der Gesamtbewertung ist also plausibel, dass das Geschiebedefizit in der VHP-Erhaltungsstrecke bis 2019 gleichgeblieben ist, mit etwa 45.000 bis 50.000 m³/Jahr (allfällige Verbesserungen im Jahr 2020 erhöhen den Dekadendurchschnitt nur geringfügig), und dass das Defizit in der daran anschließenden Strecke (Strom-km 1910 bis 1882) vom früheren Wert von etwa 105.000 m³/s (gem. BMNT, 2018) auf etwa 40.000 bis 50.000 m³/Jahr reduziert werden konnte, aufgrund der verstärkten Geschieberückführungen der viadonau. Für die Gesamtstrecke läge das Defizit damit zwischen rd. 85.000 und 100.000 m³/Jahr. Es ist damit immer noch eine Erosionsstrecke.

Ein rein KWD-basierter Vergleich (KWD-2020 versus KWD-2010) würde etwas höhere Werte für das Geschiebedefizit liefern (sh. [Tab. 10](#)).

²⁴ Klasz, G., Küblbäck, G., Gmeiner, P., Liedermann, M., Habersack, H., & Gutknecht, D. (2017). Kornverkleinerung durch Abrieb und Sortierung im Kontext eines Geschiebemanagements in der Donau östlich von Wien. Österreichische Wasser- und Abfallwirtschaft, 70, 220-229.

Anhänge

Anhang A1	Bericht (4 Seiten)	Zur Methodik (Mann-Kendall-Test, Sen-Neigung)
Anhang A2	12 Seiten A2: Ue+1/11	Charakteristische Wasserstände (entsprechend RNQ und MQ) für die Donaupegel und Auswertungen im Längenschnitt (einschl. Vergleich mit KWD-Differenzen)
Anhang A3	7 Seiten A3: 1/7	Zeitreihen der Jahres-MQ und Jahres-MW der Donaupegel
Anhang A4	19 Seiten A4: Ue+1/18	Zeitreihen der Jahres-GW-Mittelwerte der GW-Messstellen und ergänzende Auswertungen

Verwendete Abkürzungen:

BMNT	Bundesministerium für Nachhaltigkeit und Tourismus (heute: BMLFRW: Bundesministerium für Land- und Forstwirtschaft, Regionen und Wasserwirtschaft)
GW	Grundwasser (mst. direkt für Grundwasserstand bzw. Grundwasserspiegel)
HJB	Hydrographische Jahrbücher (herausgegeben vom HZB)
HZB	Hydrographisches Zentralbüro (Abt. I/3 des Bundesministeriums BMLFRW)
KW	Kraftwerk (hier: Donaukraftwerk(e))
KWD	Kennzeichnende Wasserstände der österreichischen Donau; für verschiedene Bezugszeitpunkte erschienen, u.a. KWD-1996 (Wasserstraßendirektion, 1998), KWD-2010 (viadonau, 2012) und KWD-2020 (viadonau, 2023)
MQ	Mittelwasserabfluss: Mittelwert der Abflüsse über einen längeren Durchrechnungszeitraum (nach KWD-2020: 1991/2020) bzw. in anderen Zusammenhängen auch nur über ein Jahr
MW	Mittelwasser (je nach Zusammenhang ein Wasserstand oder Wasserspiegel)
NW	Niederwasser (je nach Zusammenhang ein Wasserstand oder Wasserspiegel)
RNQ	der dem RNW zugeordnete Abfluss ; entspricht dem Abfluss mit 94% Überschreitungsdauer, bezogen auf einen längeren Durchrechnungszeitraum (nach KWD-2020: 1991/2020)
RNW	Regulierungsniederwasser; der dem RNQ zugeordnete Wasserstand bzw. Wasserspiegel
UW	Unterwasser (eines Bauwerkes)
VHP	Verbund Hydro Power (früher: Austrian Hydro Power bzw. Donaukraftwerke)
w/Q	Wasserstands-/Durchfluss-Beziehung (auch als Abflusskurve oder Pegelschlüssel bezeichnet)

Anhang A1

Die Trendanalysen in dieser Studie werden als Teststatistik auf Basis des Mann-Kendall-Tests (Mann²⁵, 1945; Kendall²⁶, 1975; Darstellung u.a. in Birsan et al., 2005) und in Kombination mit der Trendstärke-Schätzung (slope estimation) nach Sen (Sen, 1968) ausgeführt.

Es wird auch untersucht, ob die einzelnen Zeitreihen stärkere Autokorrelationen enthalten; wenn dies der Fall ist, dann wird die Trenduntersuchung zweistufig ausgeführt: (a.) auf Basis der Originalzeitreihe (also mit Autokorrelation) und (b.) nach Entfernung des autokorrelativen Anteils (Prewhitening) aus der Zeitreihe, vgl. u.a. Petrow und Merz (2009), Blöschl et al. (2011).

Der Mann-Kendall-Test

Dieser nichtparametrische (verteilungsfreie), auf Rängen basierender Test wird häufig bei der Analyse hydrologischer und klimatologischer Datenreihen genutzt (u.a. Burn & Elnur²⁷, 2002; Yue et al.²⁸, 2002; Birsan et al., 2005; Petrow & Merz, 2009; Gocic & Trajkovic²⁹, 2013). Von Vorteil ist, dass dieser Test eben keine Voraussetzungen zur Verteilung (distribution-free) der Daten macht und auch robust gegen Ausreißer ist (Birsan et al., 2005). Der Mann-Kendall-Test setzt aber statistisch unabhängige Daten voraus; das bedeutet, dass der Test empfindlich gegen Autokorrelationen in den Daten ist, und solche autokorrelativen Anteile sind bei hydrologischen und klimatischen Daten häufig. Es wird meist angenommen, dass sich das im Allgemeinen auf Lag 1-Autokorrelationen (Abhängigkeit nur von der unmittelbaren Vorperiode) beschränkt. Wenn die Daten stärker autokorreliert sind, dann steigt dadurch die Ablehnungsraten der Nullhypothese H_0 .

Die Nullhypothese H_0 (Anfangsvermutung) des Trendtests lautet, dass die Zeitreihe $\{X_t; t = 1, 2, \dots, n\}$ unabhängig und gleichverteilt ist, dass also kein systematischer Trend vorliegt, anders formuliert, dass die Schwankungen nur durch zufällige Veränderungen der einzelnen Werte verursacht werden.

Konträr lautet die Alternativhypothese H_A : Es liegt ein Trend in der Zeitreihe $\{X_t; t = 1, 2, \dots, n\}$ vor.

Nullhypothese H_0 : Kein systematischer Trend in der Zeitreihe:	$H_0: P(x_j > x_i; j > i) = 0,5$	[A1.1]
Alternativhypothese H_A : Es liegt ein Trend in der Zeitreihe vor:	$H_A: P(x_j > x_i; j > i) \neq 0,5$ (two-tailed test)	

Die Mann-Kendall-Teststatistik wird mit der Prüfgröße S berechnet:

²⁵ Mann, H. B. (1945). Non-parametric tests against trend: *Econometrica* 13, 245-259.

²⁶ Kendall, M. G. (1975). Rank correlation methods. Griffin, London.

²⁷ Burn, D. H., & Elnur, M. A. H. (2002). Detection of hydrologic trends and variability. *Journal of hydrology*, 255(1-4), 107-122.

²⁸ Yue, S., Pilon, P., & Cavadias, G. (2002). Power of the Mann-Kendall and Spearman's rho tests for detecting monotonic trends in hydrological series. *Journal of hydrology*, 259(1-4), 254-271.

²⁹ Gocic, M., & Trajkovic, S. (2013). Analysis of changes in meteorological variables using Mann-Kendall and Sen's slope estimator statistical tests in Serbia. *Global and Planetary Change*, 100, 172-182.

$$S = \sum_{i=1}^{n-1} \sum_{j=i+1}^n \operatorname{sgn}(x_j - x_i) \quad [\text{A1.2}]$$

wobei die x_j und x_i die Daten der Jahre j und i sind, mit $j > i$, und die Vorzeichenfunktion ist definiert:

$$\operatorname{sgn}(x_j - x_i) = \begin{cases} +1 & \text{wenn } (x_j - x_i) > 0 \\ 0 & \text{wenn } (x_j - x_i) = 0 \\ -1 & \text{wenn } (x_j - x_i) < 0 \end{cases} \quad [\text{A1.3}]$$

D.h. es wird jeder Wert mit jedem folgenden (also jüngeren) Wert der Zeitreihe verglichen; eine Reihe mit n Werten ergibt also $1/2 \cdot n \cdot (n - 1)$ Wertepaare, deren Sgn-Werte³⁰ über die Größe S aufsummiert werden. Trifft die Nullhypothese H_0 zu, dann ist davon auszugehen, dass S um den Wert Null schwankt. Nur bei einem deutlich monotonen Trend wird S deutlich positiv (positiver Trend) oder deutlich negativ (negativer Trend) ausfallen. Es ist also die Nullhypothese dann abzulehnen, wenn der Betrag von S einen kritischen Wert überschreitet; dieser kritische Wert der Prüfgröße S ist vom gewählten Signifikanzniveau α und der Anzahl der Beobachtungen n abhängig.

Genauer formuliert: Trifft die Nullhypothese H_0 zu, dann kann die Verteilung von S bei hinreichend großem Stichprobenumfang n gut durch die Normalverteilung approximiert werden, mit dem Erwartungswert μ_S und der Varianz σ_S^2 :

$$\mu_S = 0 \quad [\text{A1.4}]$$

$$\sigma_S^2 = \left[n \cdot (n - 1) \cdot (2n + 5) - \sum_{i=1}^m t_i \cdot (t_i - 1) \cdot (2t_i + 5) \right] / 18$$

Der zweite Summand bei der Varianz (mit den t_i) entspricht einem Korrekturglied für das Auftreten von identischen Werten in der Zeitreihe, wobei t_i die Anzahl der identischen Werte ist (für jeden derartigen Wert).

Die Prüfgröße S wird mit

$$Z = \begin{cases} \frac{S - 1}{\sigma_S} & \text{wenn } S > 0 \\ 0 & \text{wenn } S = 0 \\ \frac{S + 1}{\sigma_S} & \text{wenn } S < 0 \end{cases} \quad [\text{A1.5}]$$

in eine standardisierte Prüfgröße Z transformiert, und hier setzt die für Prüfstatistiken übliche Vorgangsweise ein; bei einem zweiseitigen Test (two-tailed test) wird die Nullhypothese H_0 mit dem Signifikanzniveau α abgelehnt, wenn

$$|Z| > Z_{\alpha/2} \quad [\text{A1.6}]$$

wobei $Z_{\alpha/2}$ der Wert der Standard-Normalverteilung mit einer Überschreitungswahrscheinlichkeit von $\alpha/2$ ist.

Das bei wissenschaftlichen Studien gewählte Signifikanzniveau ist unterschiedlich und grundsätzlich willkürlich, also von der Einschätzung der Bearbeiter abhängig. Yue et al. (2002) führt die

³⁰ Signumfunktion (Vorzeichenfunktion).

Signifikanzniveaus 0,01, 0,05 und 0,10 als üblich an. Je kleiner dieser Wert α ist, desto mehr Vertrauen (confidence) besteht, dass die Nullhypothese tatsächlich falsch ist, wenn sie als falsch identifiziert wurde (Yue et al., 2002), desto strenger ist die Anforderung. Häufig bei hydrologischen Studien wird $\alpha = 0,10$ gesetzt (also bei zweiseitigen Tests mit jeweils 5% an beiden Enden der Verteilung; u.a. Birsan et al., 2005, Petrow und Merz, 2009; Blöschl et al., 2011). Für das in dieser Studie gewählte Signifikanzniveau $\alpha = 0,10$ (analog zu den sehr ähnlichen Bearbeitungen in Blöschl et al. (2011) bzw. Petrow und Merz (2009)) ist der kritische Wert $Z_{\alpha/2} = 1,708$ (95%-Quantile der t-Verteilung, $n=25$; Weber, 1983).

Abschätzung der Änderungsraten mittels Sen-Slope

Die Abschätzung der Neigung (slope) des linearen Trends, also der Änderungsrate (change per unit time), erfolgt nach Sen (1968), daher häufig als „Sen-Slope“ bezeichnet, aber auch als „Theil-Sen-Approach“ bzw. „Theil-Sen-Estimator“. Im Gegensatz zu Regressionsrechnungen (Methode der kleinsten Fehler-Quadrate) ist dieser Ansatz (durch Verwendung der Mediane) robust gegen Ausreißer und liefert beim Vorliegen von Ausreißern auch (etwas) geringere absolute Werte für die Änderungsraten.

Für den Sen-Slope β werden die Steigungen aller möglichen Wertepaare $(x_j; x_i; j > i)$ ermittelt; für n Werte erhält man $1/2 \cdot n \cdot (n - 1)$ Steigungen³¹, daraus wird als Schätz-Parameter für die Änderungsrate der gesamten Zeitreihe der Median gewählt:

$$\beta = \text{med} \left(\frac{x_j - x_i}{j - i} \right) \quad [\text{A1.7}]$$

mit $j > i; j = 2, 3, \dots, n; i = 1, 2, \dots, n - 1$

vgl. u.a. Blöschl et al. (2011).

Berücksichtigung der Autokorrelation, Prewhitening

In neueren Veröffentlichungen wird auf den Einfluss von Autokorrelation auf die Trendstatistik hingewiesen (vgl. u.a.: Von Storch³², 1995; Yue et al.³³, 2002b; Petrow & Merz, 2009; Blöschl et al., 2011). Je stärker die Daten einer Zeitreihe autokorreliert sind, desto höher werden bei gegebenen Signifikanzniveau die Ablehnungsraten (mit dem Mann-Kendall-Test), desto eher wird also die Nullhypothese verworfen und damit ein Trend vorgetäuscht (Fehler erster Art)³⁴; dies gilt für positive Autokorrelationskoeffizienten, für negative Koeffizienten ist es hingegen umgekehrt, der Mann-Kendall-Test wird dann die Signifikanz eines Trends unterschätzen (vgl. Yue et al., 2002b).

Der Autokorrelations-Koeffizient (mit Zeitverschiebung / Schritt: k) wird mit

$$r_k = \frac{\sum_{i=1}^{n-k} (x_i - \bar{x}) \cdot (x_{i+k} - \bar{x})}{\sum_{i=1}^n (x_i - \bar{x})^2} \quad [\text{A1.8}]$$

³¹ In dieser Studie mit $n=25$ sind das jeweils 300 Wertepaare.

³² Von Storch, H. (1999). Misuses of statistical analysis in climate research. In *Analysis of climate variability* (pp. 11-26). Springer, Berlin, Heidelberg.

³³ Yue, S., Pilon, P., Phinney, B., & Cavadias, G. (2002b). The influence of autocorrelation on the ability to detect trend in hydrological series. *Hydrological processes*, 16(9), 1807-1829.

³⁴ Mit anderen Worten: Positive Autokorrelation führt dazu, dass die Signifikanz eines positiven Trends überschätzt wird (Petrow und Merz, 2009).

berechnet und ist ein Maß dafür, wie stark die Werte einer Zeitreihe durch vorhergehende, also ältere Werte beeinflusst werden („Gedächtnis eines Prozesses“). Bei Lag1-Autokorrelationen beschränkt sich dieser Einfluss auf die jeweiligen Vorgängerwerte (Verschiebung um genau einen Zeitschritt, Korrelation zwischen dem jeweils i-ten Glied und dem (i+1)-ten Glied)).

Yue et al. (2002b) geben (unter Bezug auf Anderson³⁵, 1942; Salas³⁶ et al., 1980) Kriterien dafür an, ob eine Lag1-Autokorrelation in Bezug auf ein Signifikanzniveau von $\alpha=0,10$ dazu führt, dass die Daten einer Zeitreihe noch als statistisch unabhängig betrachtet werden können (assumed to be serially independent); das ist bei einem zweiseitigen Test dann der Fall, wenn der zugehörige Autokorrelationskoeffizient (lag1-serial correlation coefficient) innerhalb der Grenzen

$$\frac{-1 - 1,645 \cdot \sqrt{n-2}}{n-1} \leq r_1 \leq \frac{-1 + 1,645 \cdot \sqrt{n-2}}{n-1} \quad [\text{A1.9}]$$

bleibt; für $N=65$ ergeben sich also die Grenzen $-0,220 \leq r_1 \leq 0,188$. Werden diese Werte überschritten, dann sollte auf jeden Fall ergänzend die im Folgenden näher dargestellte Methode des Pre-Whitenings angewandt werden, also eine Trendanalyse mit Entfernung der Autokorrelation (Yue et al., 2002b; Petrow und Merz, 2009; Blöschl et al., 2011). Dabei wird zunächst der (mit der Original-Zeitreihe) berechnete Trend β (Gl. [A1.7]) von dieser Zeitreihe $\{X_i; i = 1, \dots, n\}$ abgezogen:

$$X'_t = X_t - \beta \cdot t \quad [\text{A1.10}]$$

Im nächsten Schritt wird daraus die Autokorrelation (mit Lag1-Autokorrelationskoeffizient r_1 nach Gl. [A1.8]) entfernt:

$$Y'_t = X'_t - r_1 \cdot X'_{t-1} \quad [\text{A1.11}]$$

und diese Zeitreihe sollte nun keinen Trend und auch keine Autokorrelation enthalten. Zuletzt wird der anfänglich abgezogene Trend wieder addiert:

$$Y_t = Y'_t + \beta \cdot t \quad [\text{A1.12}]$$

und diese Zeitreihe $\{Y_i; i = 1, \dots, n\}$, mit der der Mann-Kendall letztlich ausgeführt wird, enthält einerseits keine Autokorrelation, andererseits aber den Trend. Falls keine signifikante Lag1-Autokorrelation vorliegt (vgl. Gl. [A1.9]) kann man den Mann-Kendall-Test direkt auf die Original-Zeitreihe anwenden (Blöschl et al., 2011).

³⁵ Anderson, R. L. (1942). Distribution of the serial correlation coefficient. *The Annals of Mathematical Statistics*, 13(1), 1-13.

³⁶ Salas, J. D., Delleur, JW, Yevjevich, V. & Lane, WL (1980) Applied Modelling of Hydrologic Time Series. Water Resources Publication. Littleton, CO, USA.

Wasserstände:

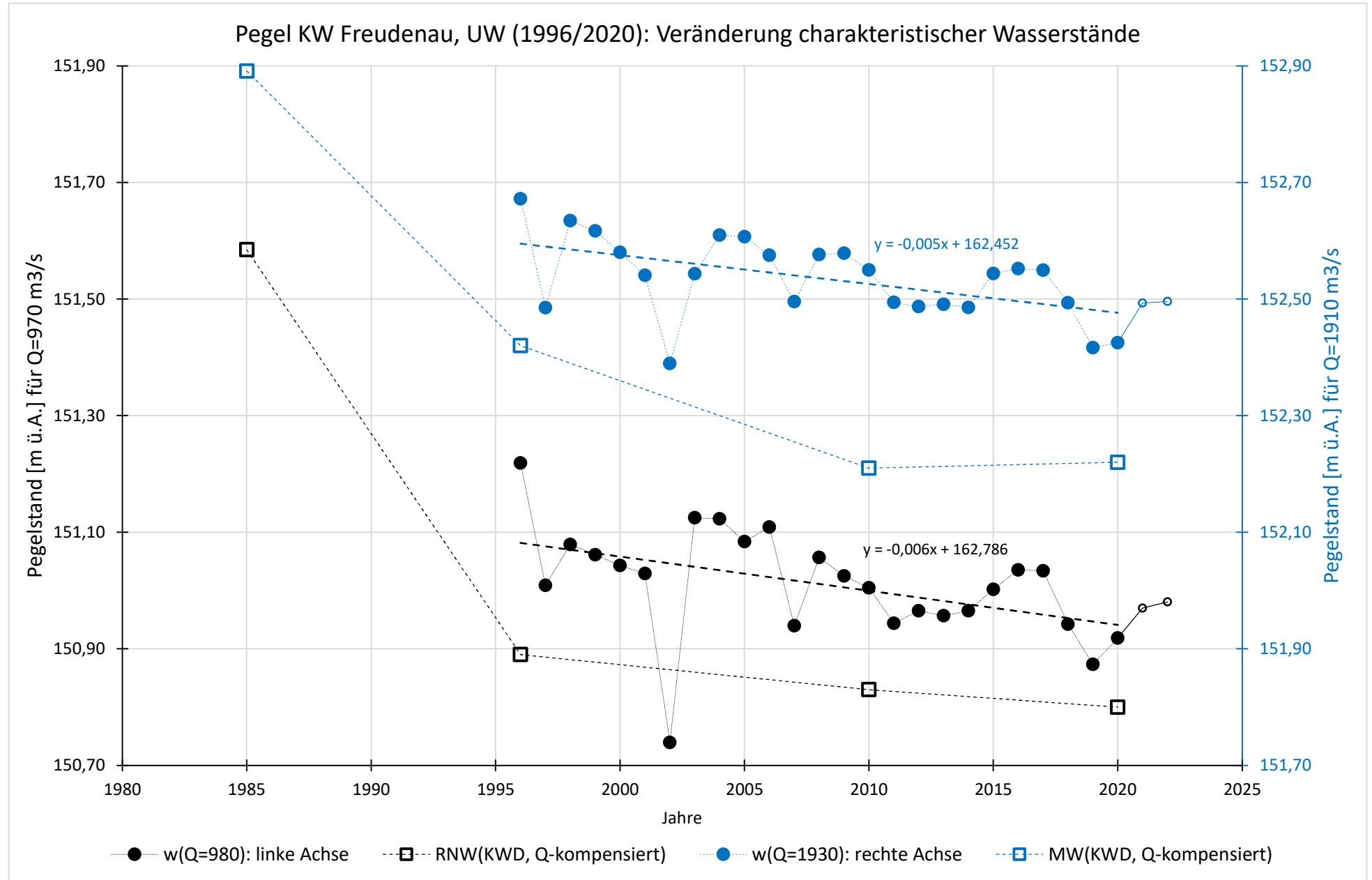
Pegel: [Text]	Lage: [Str-km]	HZB-Nr.: [Text]	Reihe: [Jahre]	Abb.: [Text]	b(RNW)= [cm/a]	b(MW)= [cm/a]	r1= [-]	Z= [-]	$\beta(\text{ges})$ = [cm/a]	Z'= [-]	$\beta'(\text{ges})$ = [cm/a]	$\beta(\text{m})$ = [cm/a]
KW Freudenau UW	1920,67	--	1996/2020	A2/1; A3/2	-0,6	-0,5	0,151	-1,985	-1,8	-1,938	-1,8	-0,5
Fischamend	1907,90	207258	1996/2020	A2/2; A3/3	-1,7	-1,6	0,407	-3,106	-2,7	-2,592	-2,9	-1,6
Orth	1901,72	207423	2003/2020	A2/3	-1,9	-1,6	<i>Reihe zu kurz</i>					
Wildungsmauer	1894,72	207373	1996/2020	A2/4; A3/4	-1,5	-1,3	0,308	-2,826	-2,3	-2,406	-2,3	-1,0
Bad Dt. Altenburg	1886,86	207266	1996/2020	A2/5; A3/5	-0,3	-0,3	0,133	-2,265	-1,8	-2,079	-1,9	-0,6
Hainburg	1883,92	207274	1996/2020	A2/6; A3/6	-0,6	-0,4	0,135	-1,985	-1,9	-1,938	-1,8	-0,5
Thebnerstrassl	1879,25	207407	2000/2020	A2/7	0,6	0,8	<i>Reihe zu kurz</i>					
Wolfsthal	1874,84	207282	1996/2020	A2/8; A3/7	0,6	0,9	-0,023	-1,238	-1,1	-1,191	-1,2	0,1

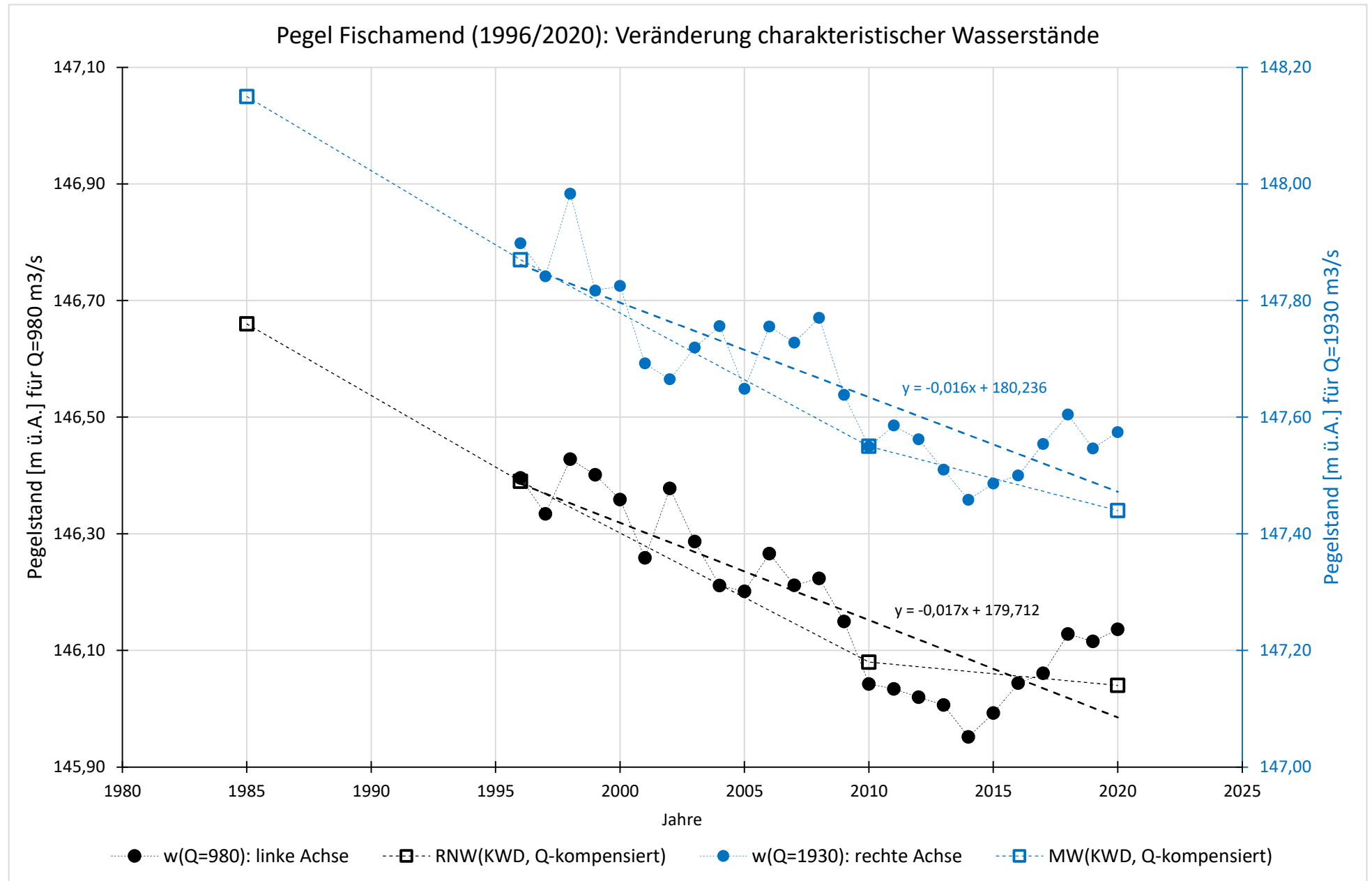
Abflüsse:

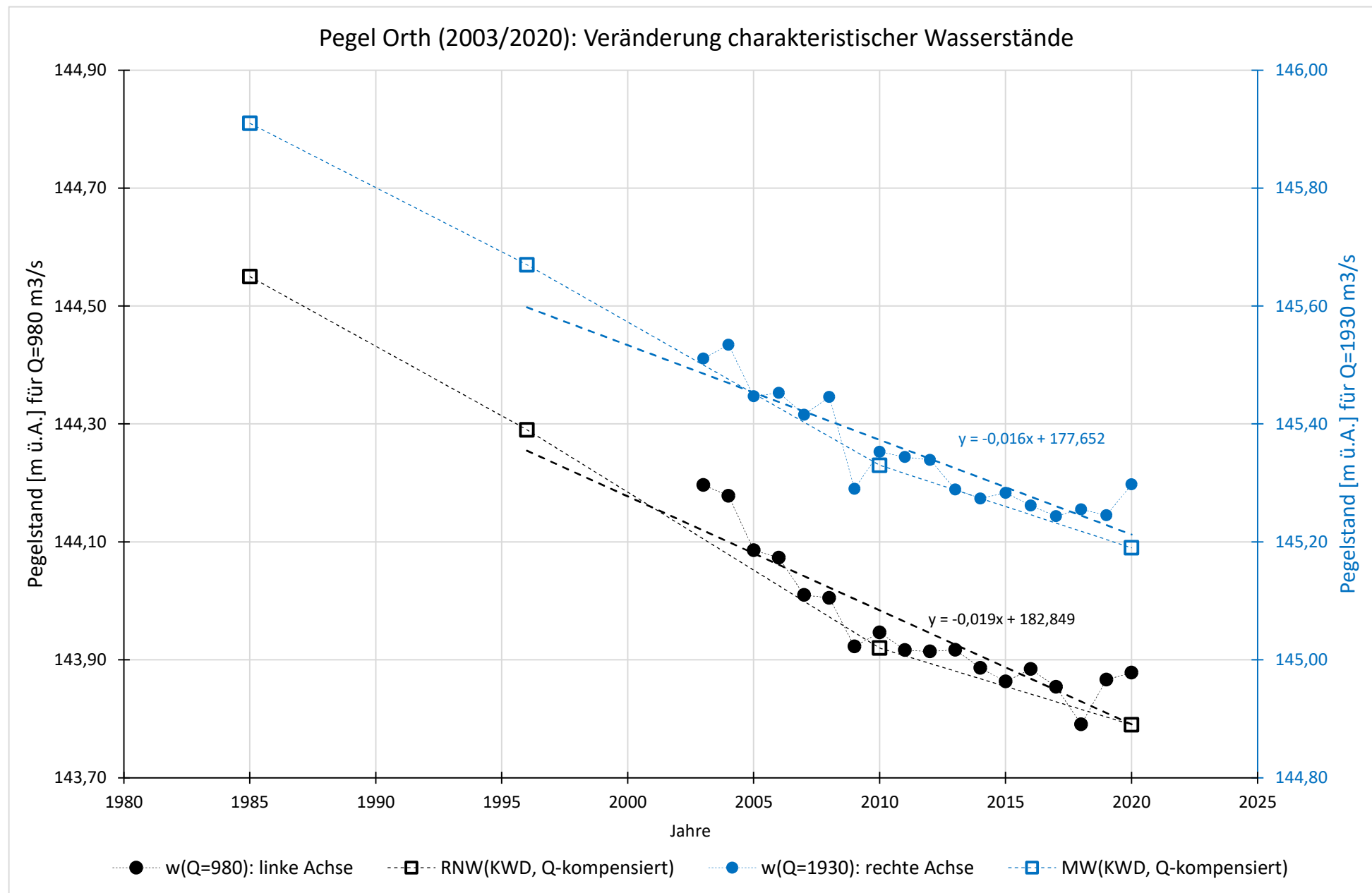
Pegel: [Text]	Lage: [Str-km]	HZB-Nr.: [Text]	Reihe: [Jahre]	Abb.: [Text]	b(RNW)= [cm/a]	b(MW)= [cm/a]	r1= [-]	Z= [-]	$\beta(\text{ges})$ = [cm/a]	Z'= [-]	$\beta'(\text{ges})$ = [cm/a]
Wildungsmauer	1894,72	207373	1996/2020	A3/1	<i>nicht relevant</i>		0,037	-1,425	-10,41	-1,331	-10,13

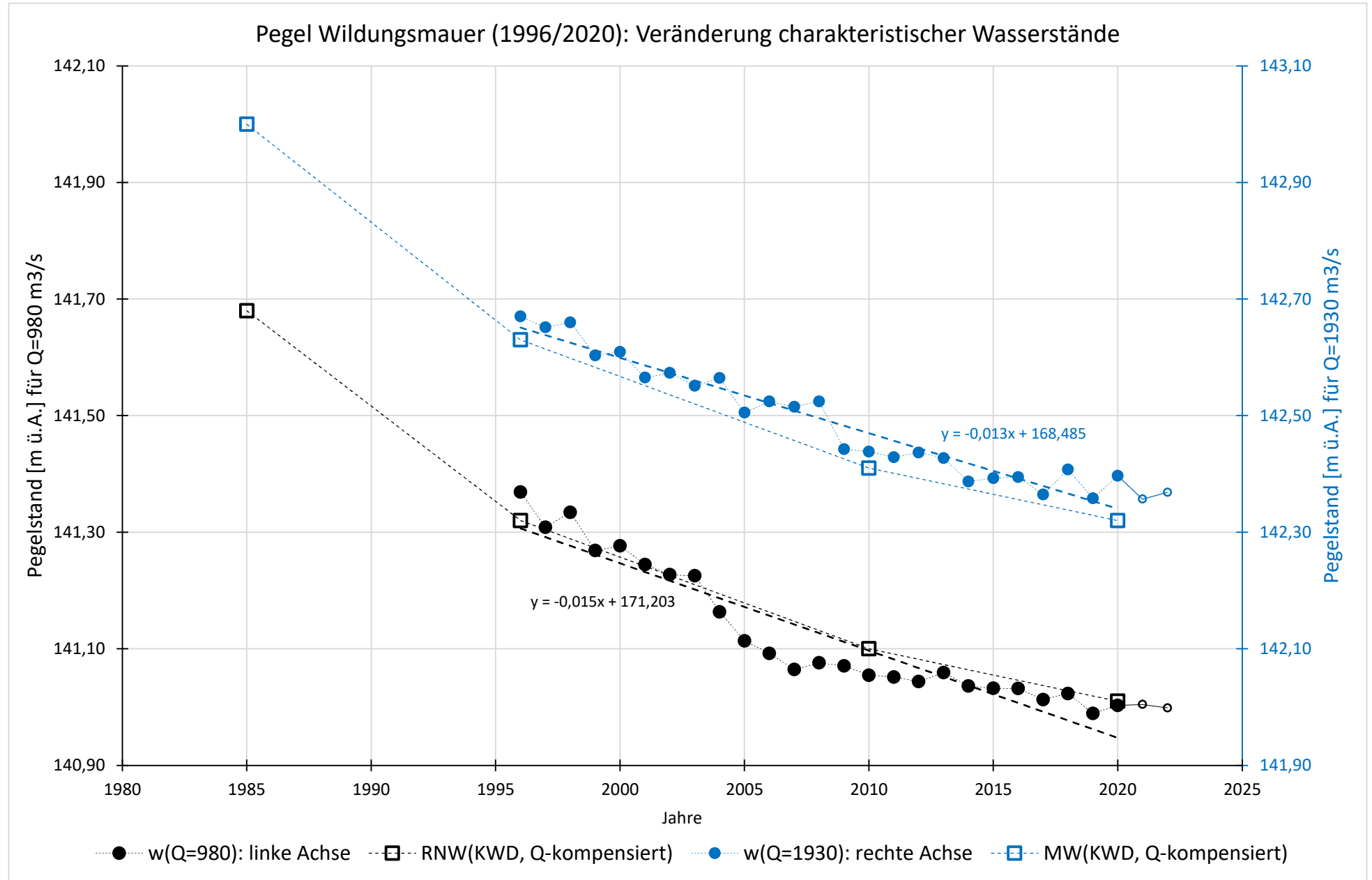
Parameter:

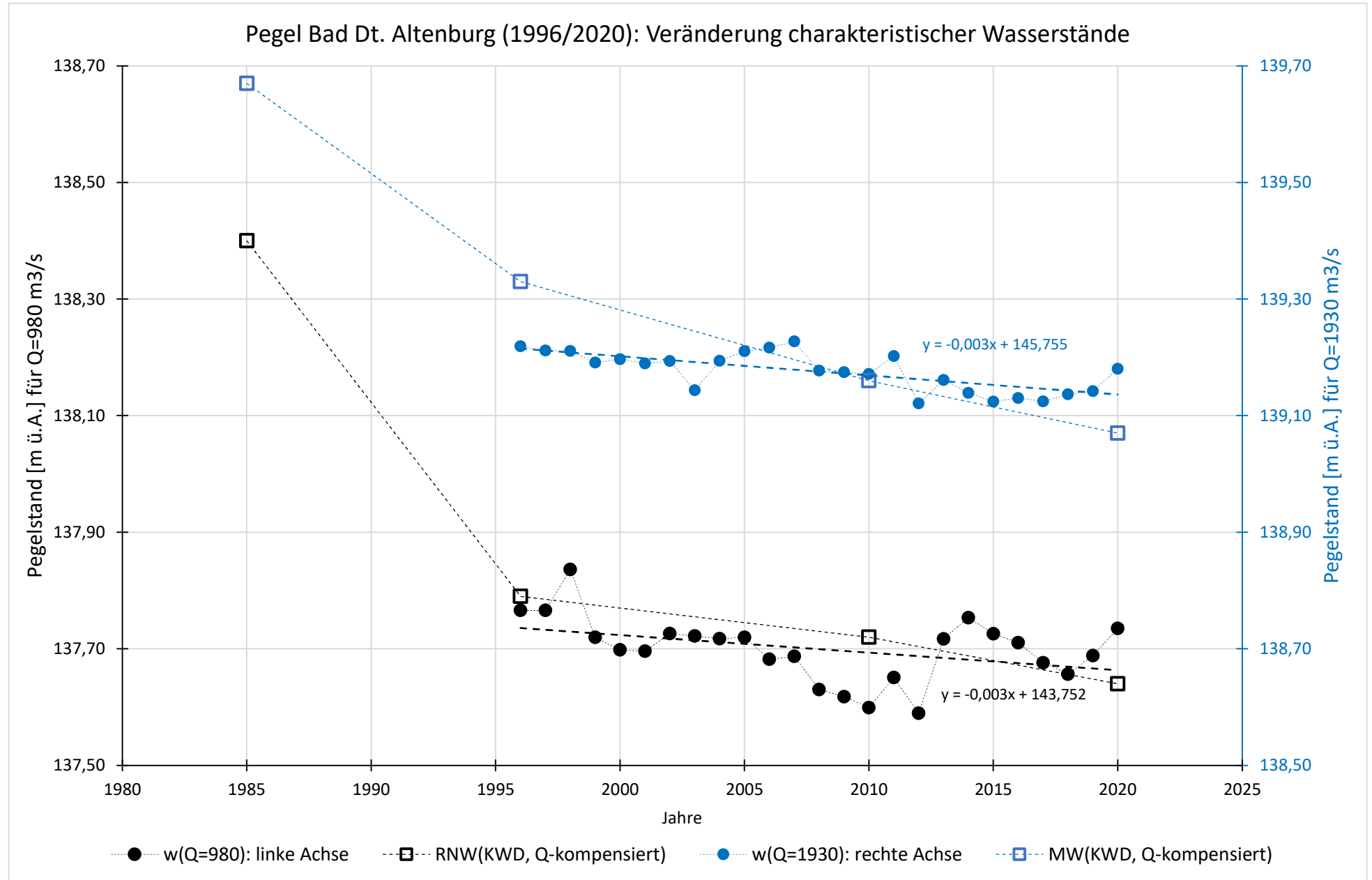
b(RNW)	Neigung der Regressionsgeraden (lineares Modell) für RNQ/RNW gem. w/Q-Beziehung (Zeit als unabhängige Var.)
b(MW)	Neigung der Regressionsgeraden (lineares Modell) für MQ/MW gem. w/Q-Beziehung (Zeit als unabhängige Var.)
r1	Lag-1-Autokorrelationskoeffizient
Z	standardisierte Prüfgrösse (Mann-Kendall-Test); ohne Prewhitening
Z'	standardisierte Prüfgrösse (Mann-Kendall-Test); mit Prewhitening
$\beta(\text{ges})$	Sen-Neigung (Trendstärke), ohne Prewhitening
$\beta'(\text{ges})$	Sen-Neigung (Trendstärke), mit Prewhitening
$\beta(\text{m})$	Sen-Neigung (Trendstärke), mit Prewhitening, morphologisch bedingte Komponente

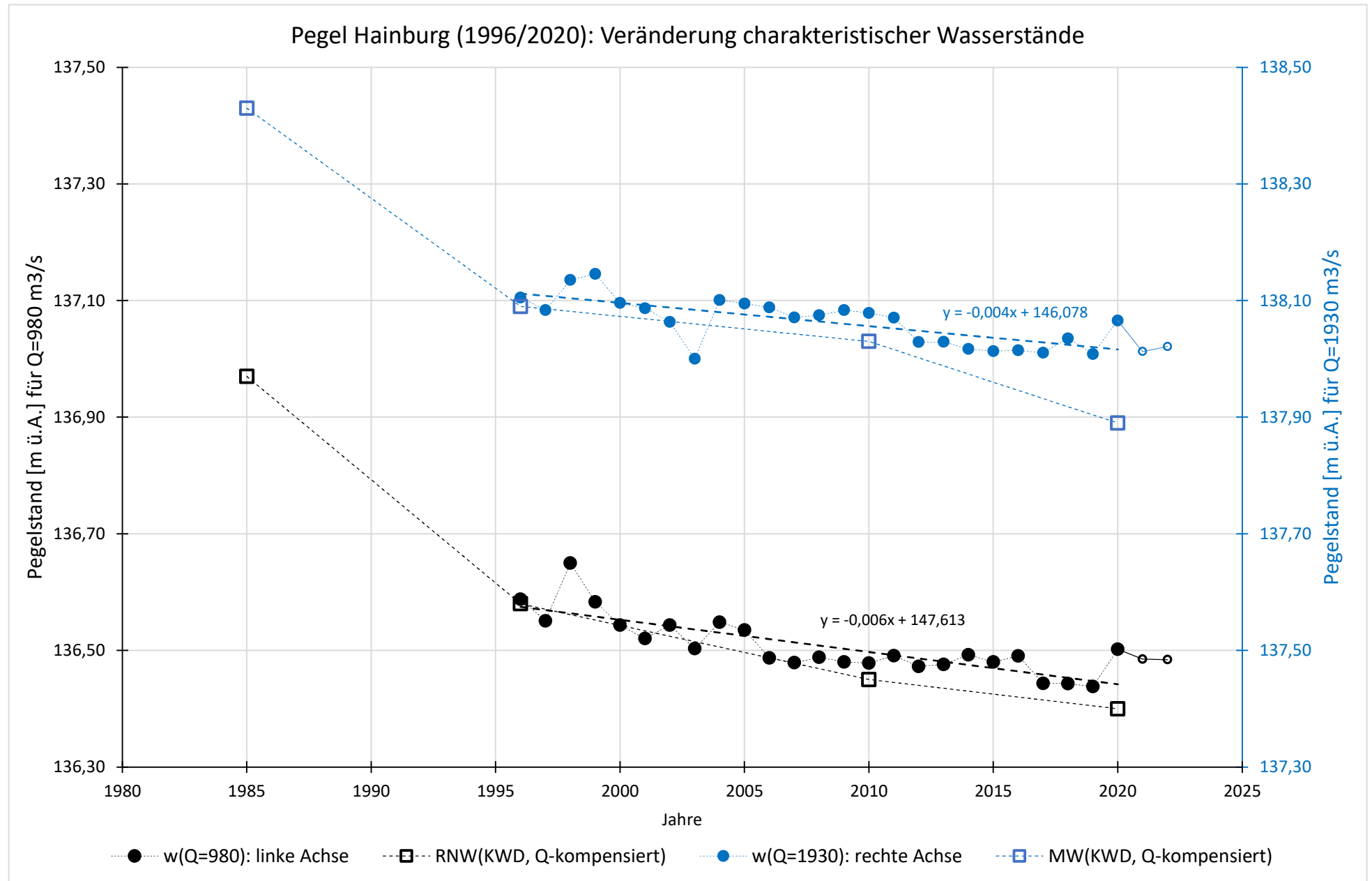


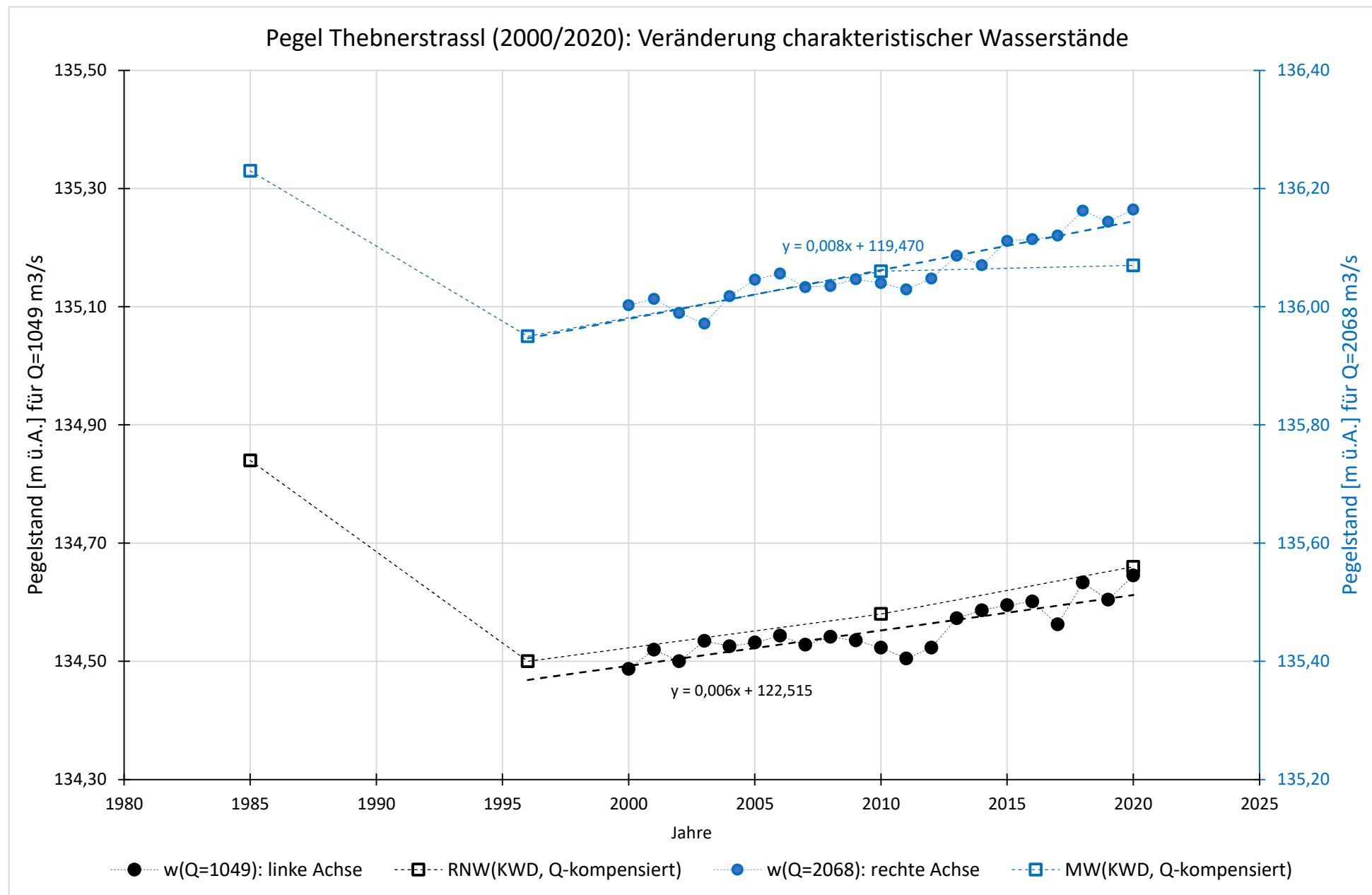


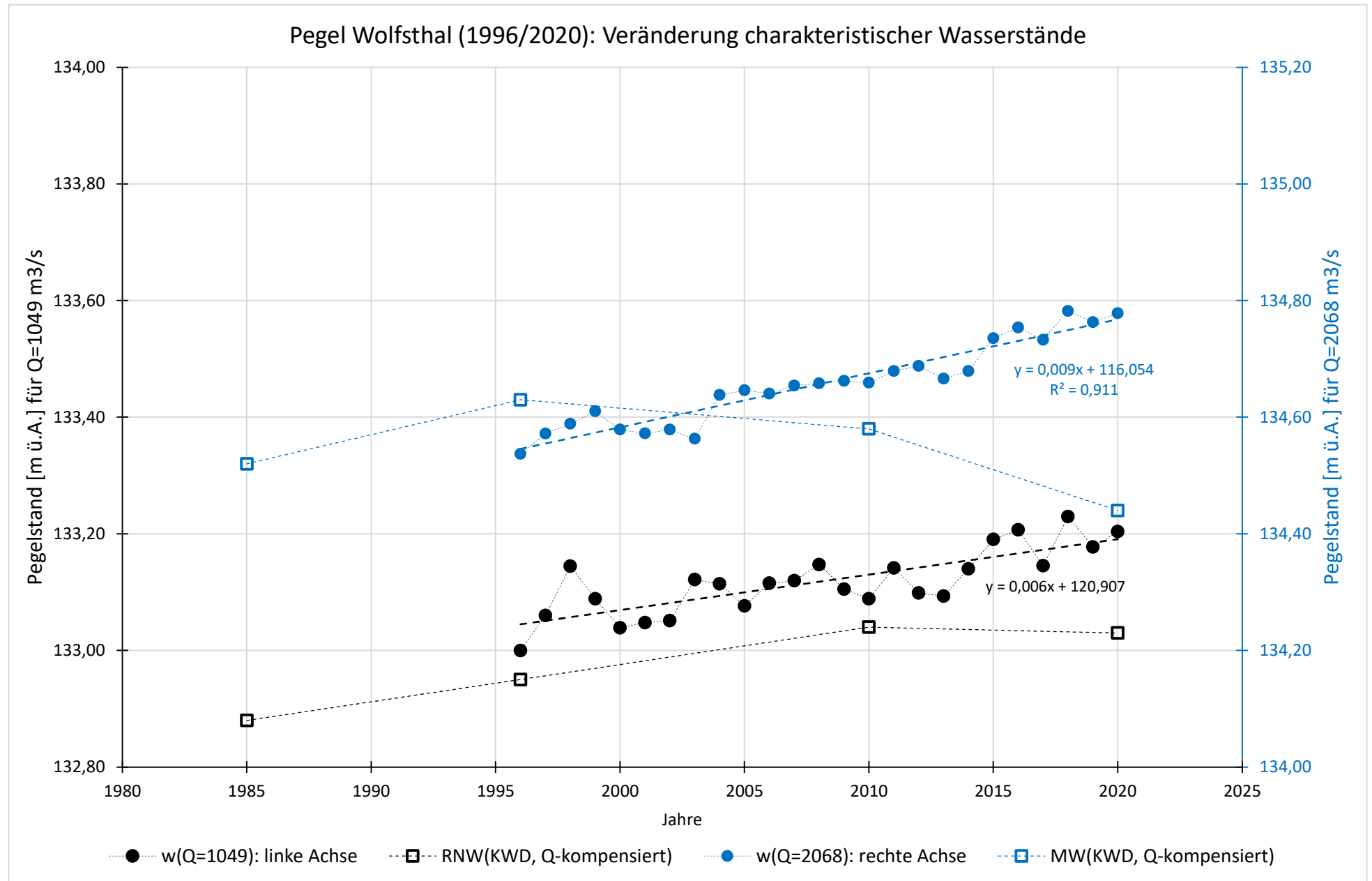


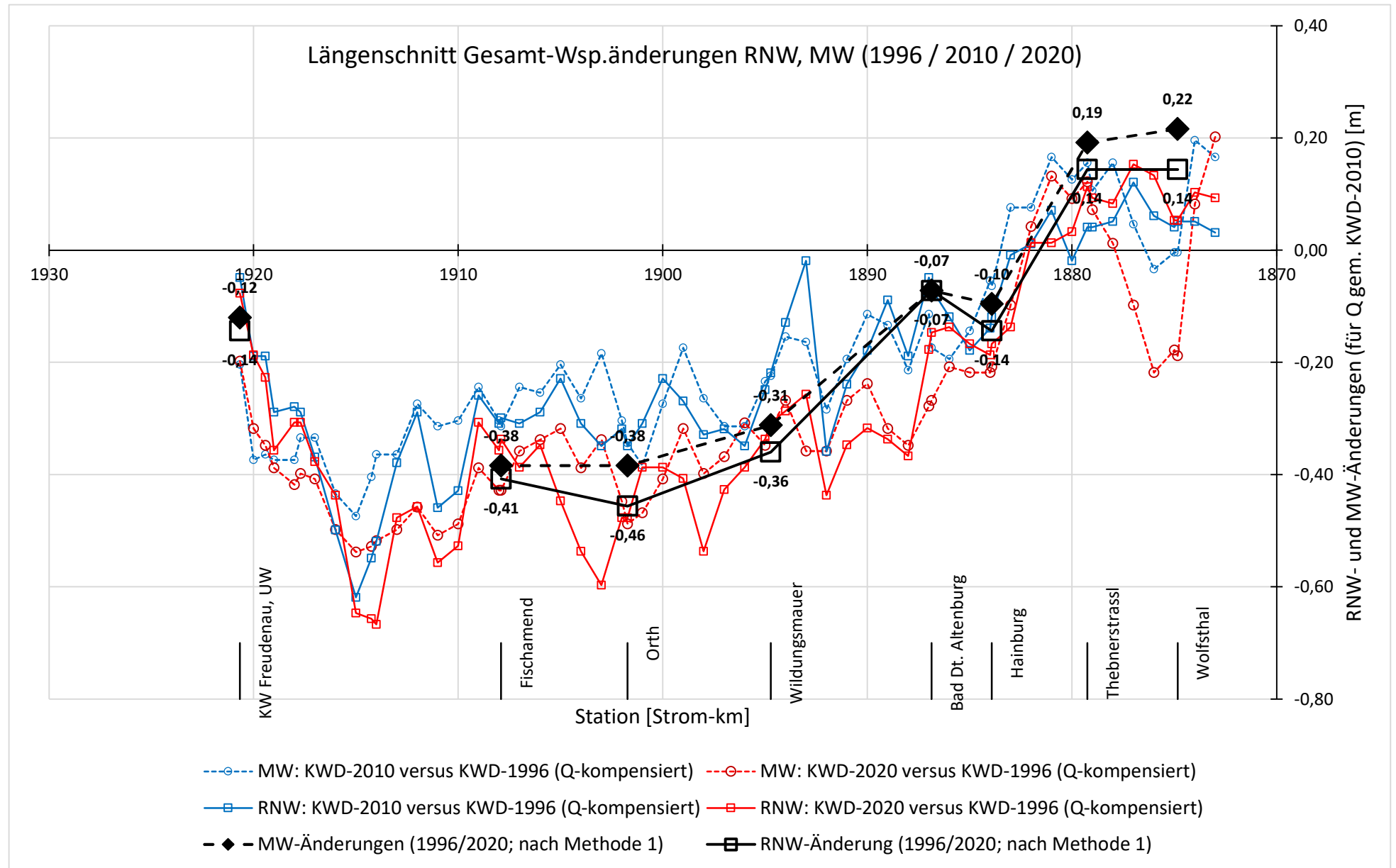




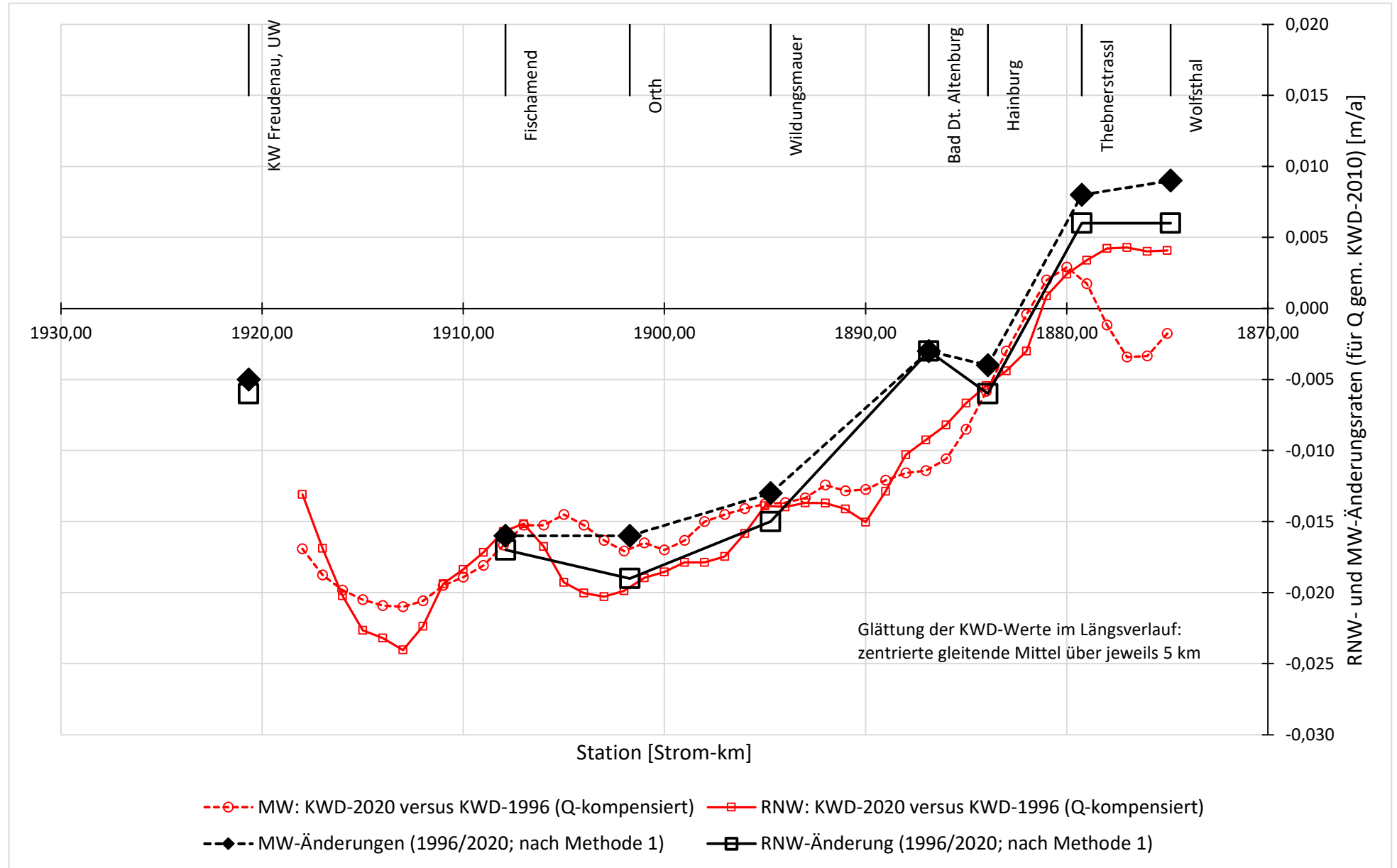




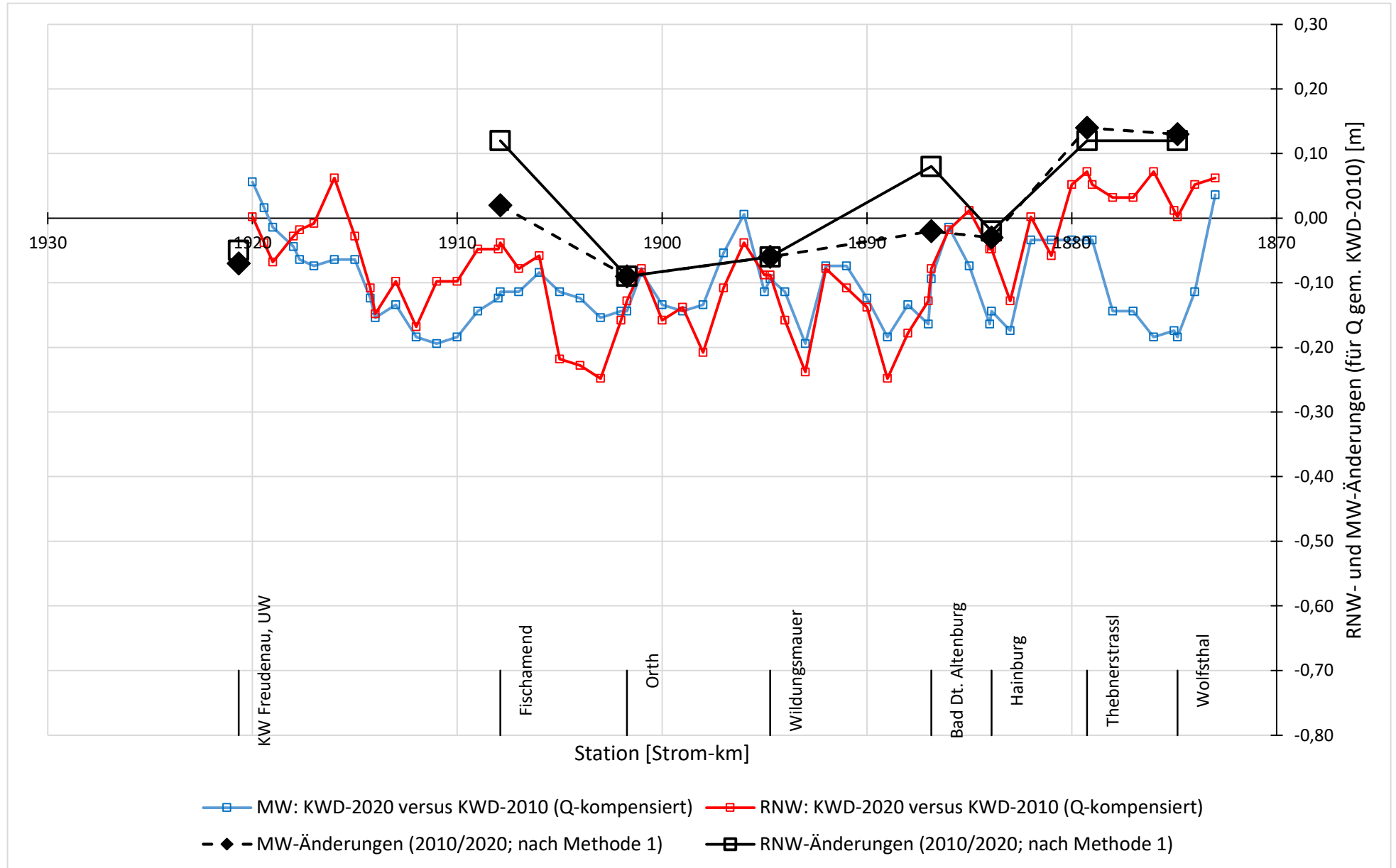




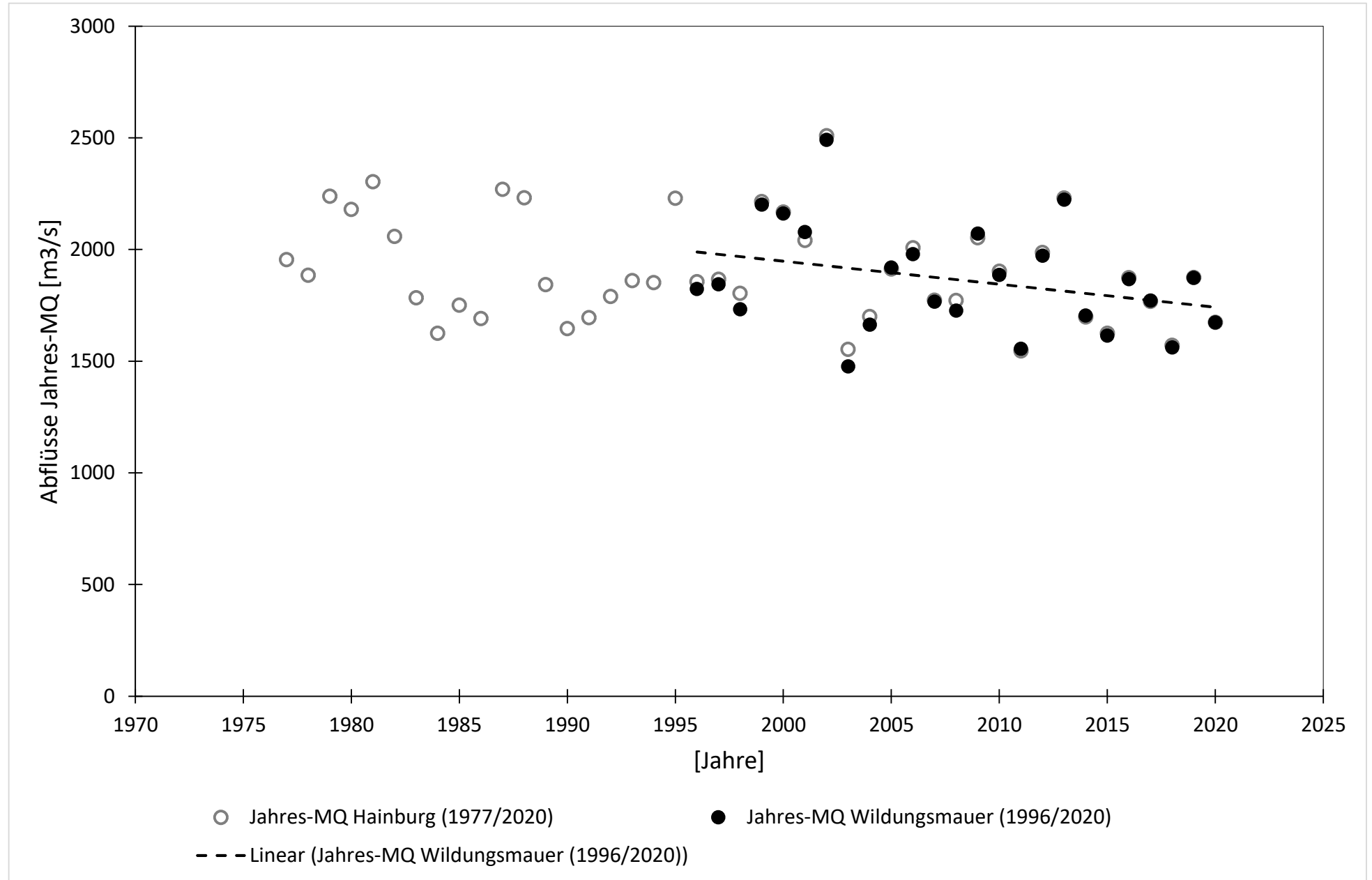
Längenschnitt: Wasserstands-Änderungen RNW und MW,
pegelbezogen (Methode 1) und KWD-Vergleich
(KWD-2020 versus KWD-1996)

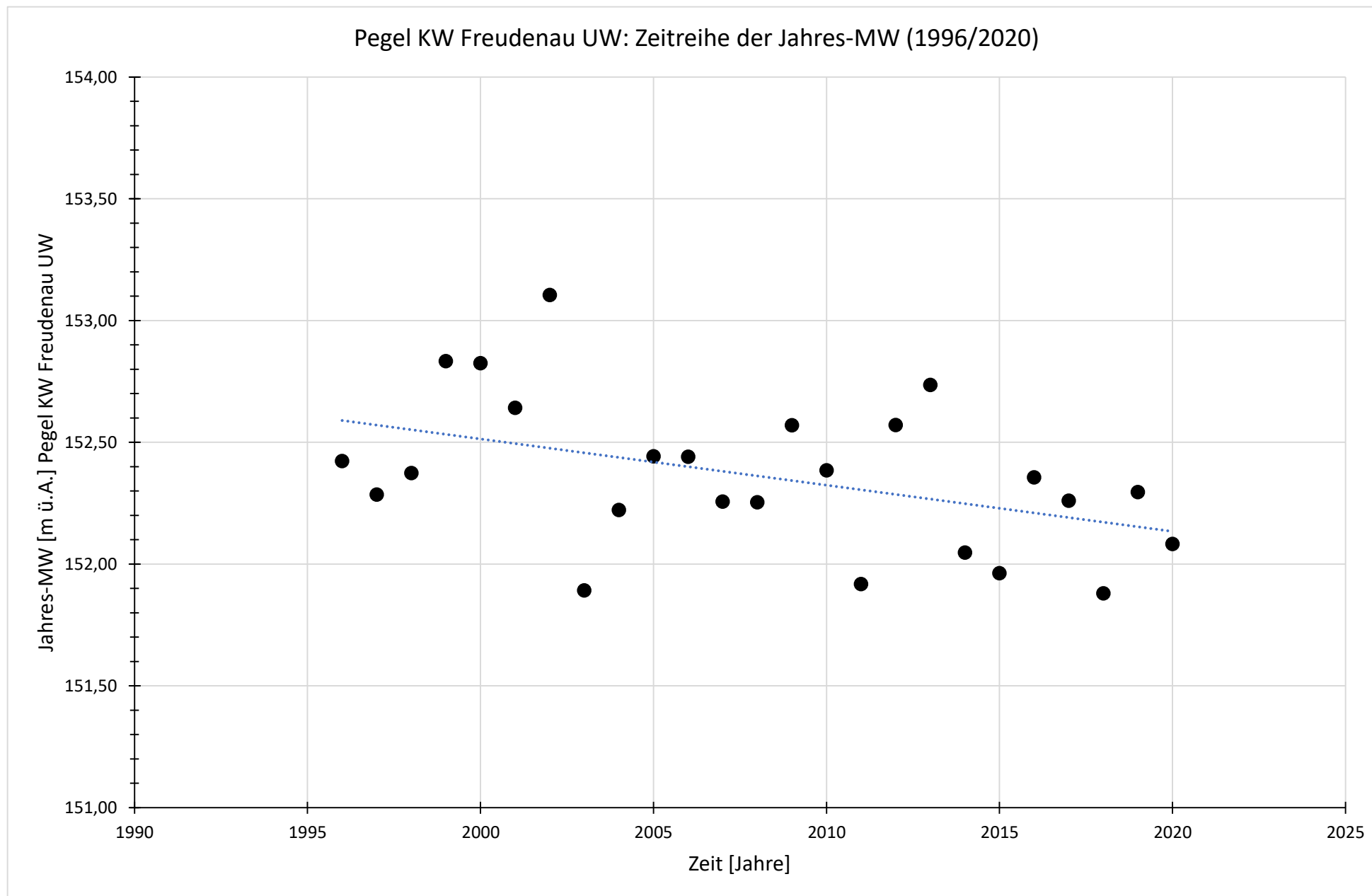


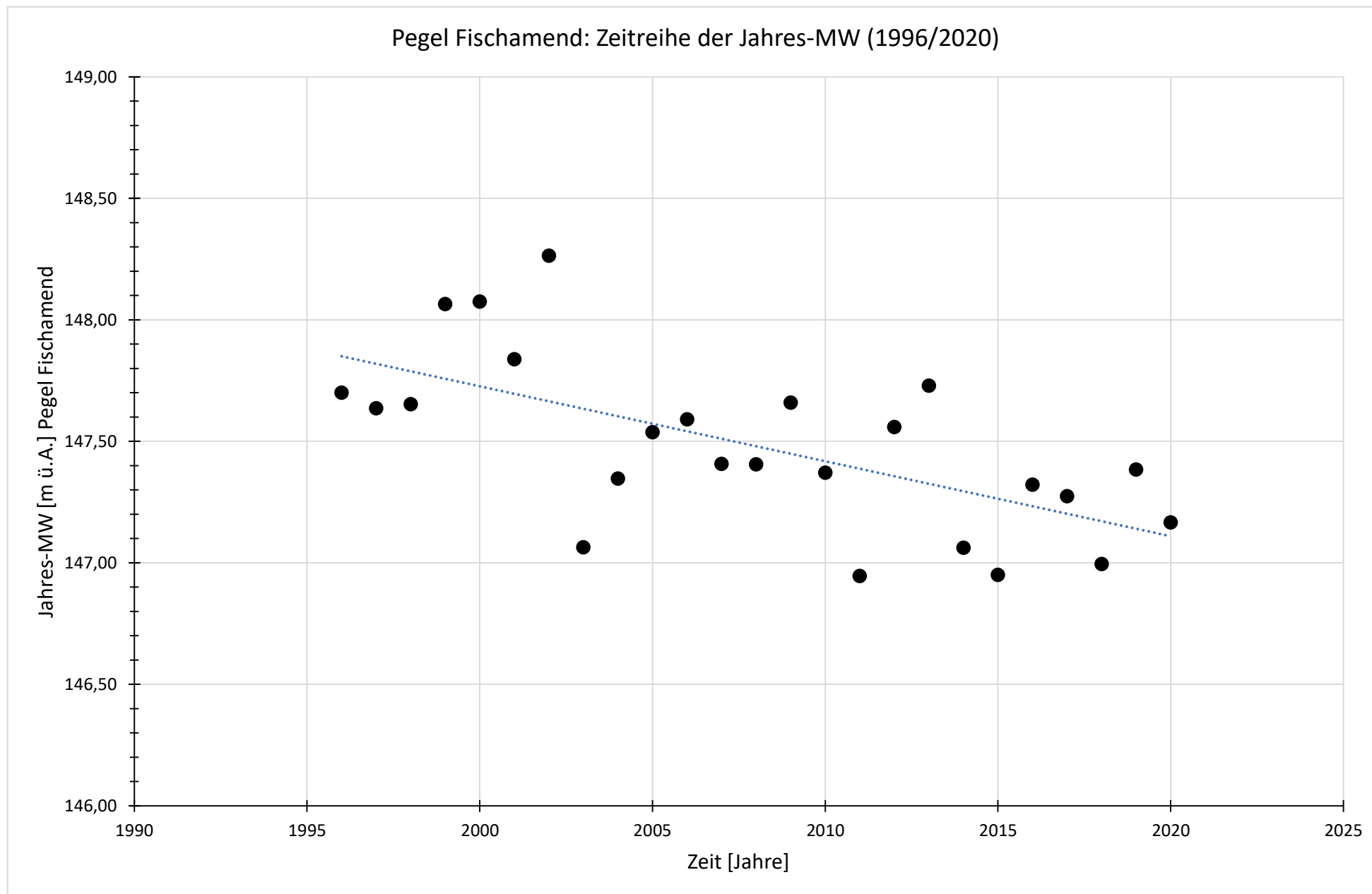
Längenschnitt: Wasserstands-Änderungsraten RNW und MW,
pegelbezogen (Methode 1) und KWD-Vergleich
(KWD-2020 versus KWD-1996)

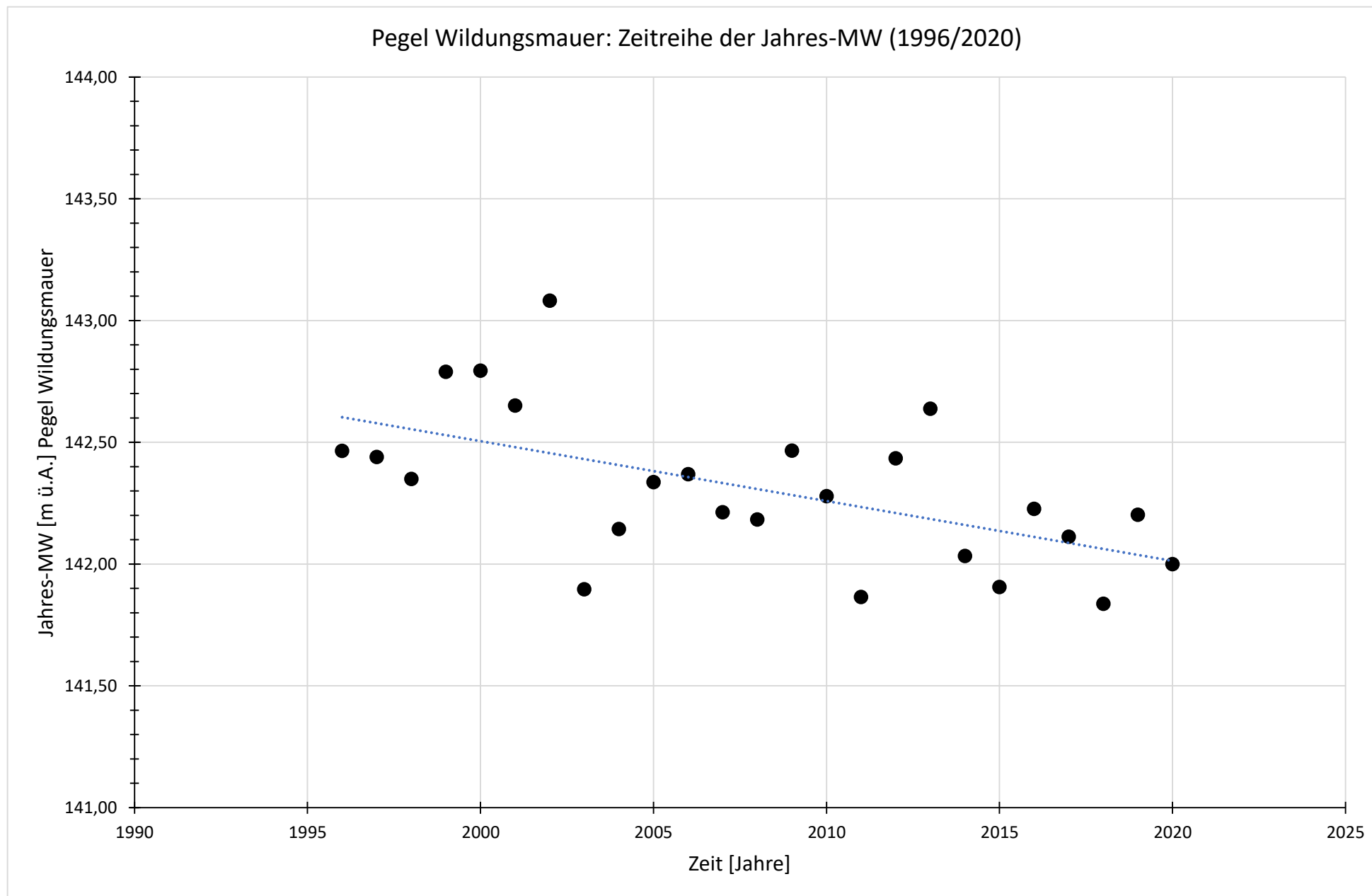


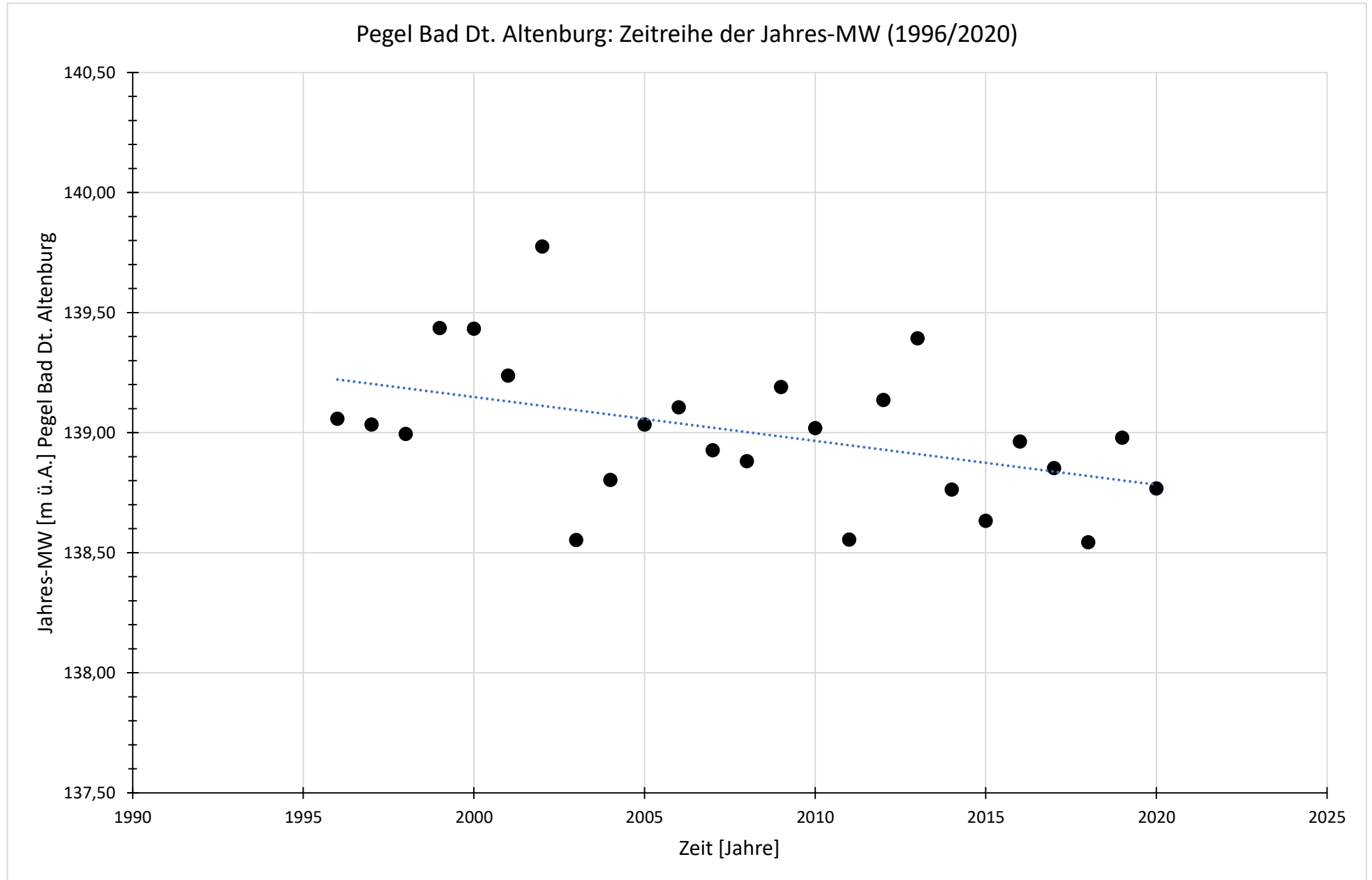
Längenschnitt: Wasserstands-Änderungen
RNW und MW, pegelbezogen (Methode 1) und KWD-Vergleich
(KWD-2020 versus KWD-2010)

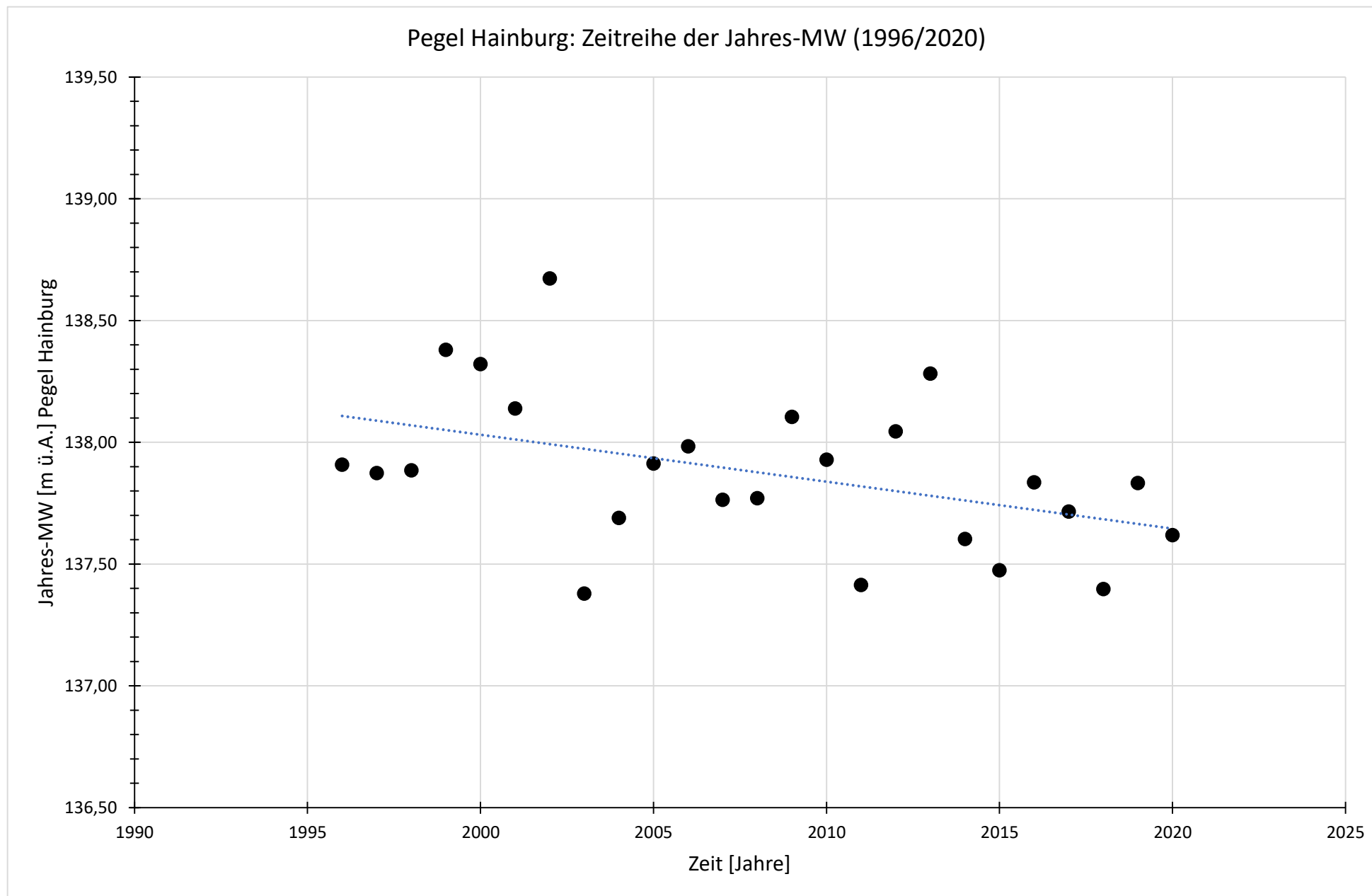


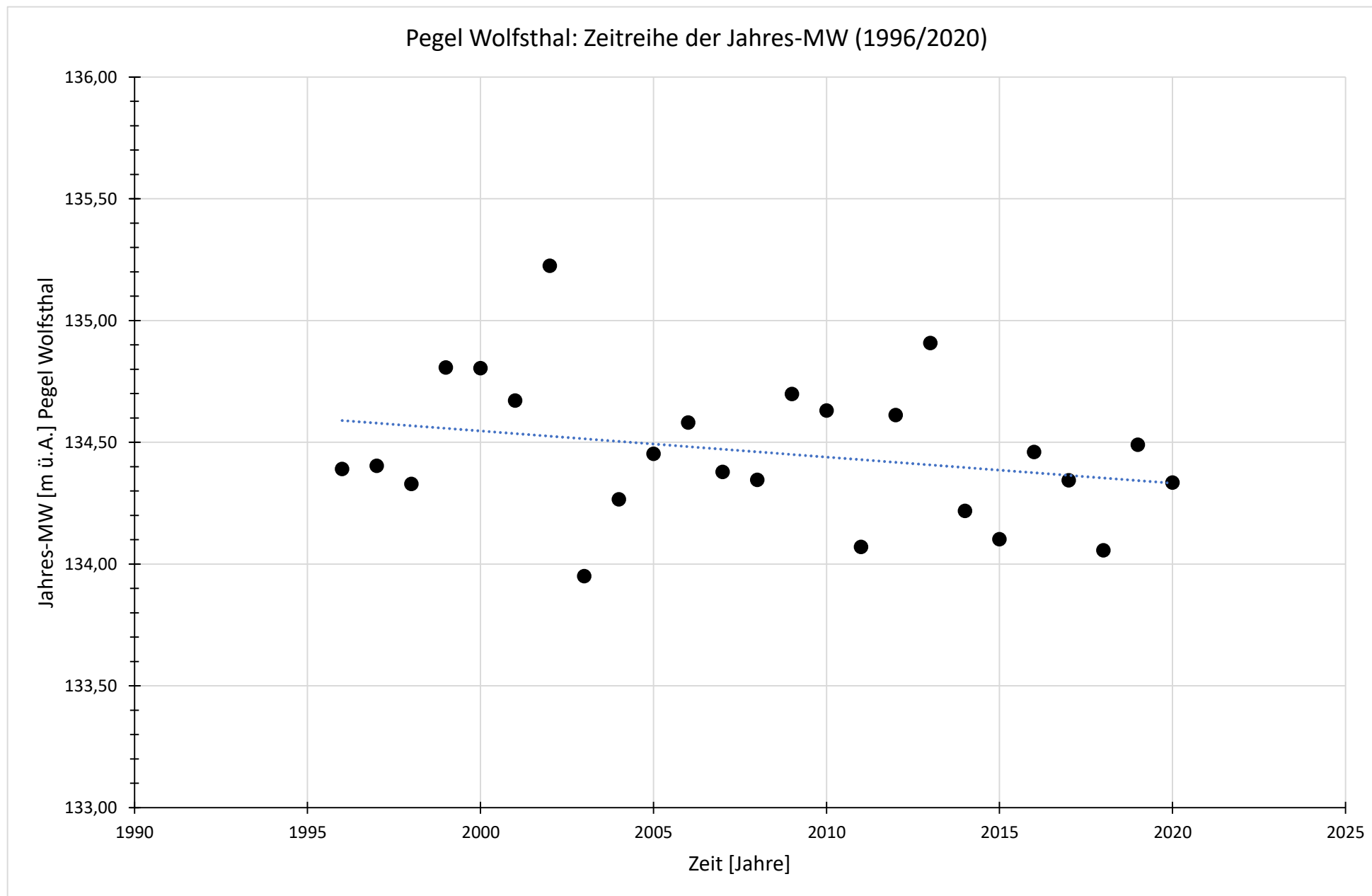










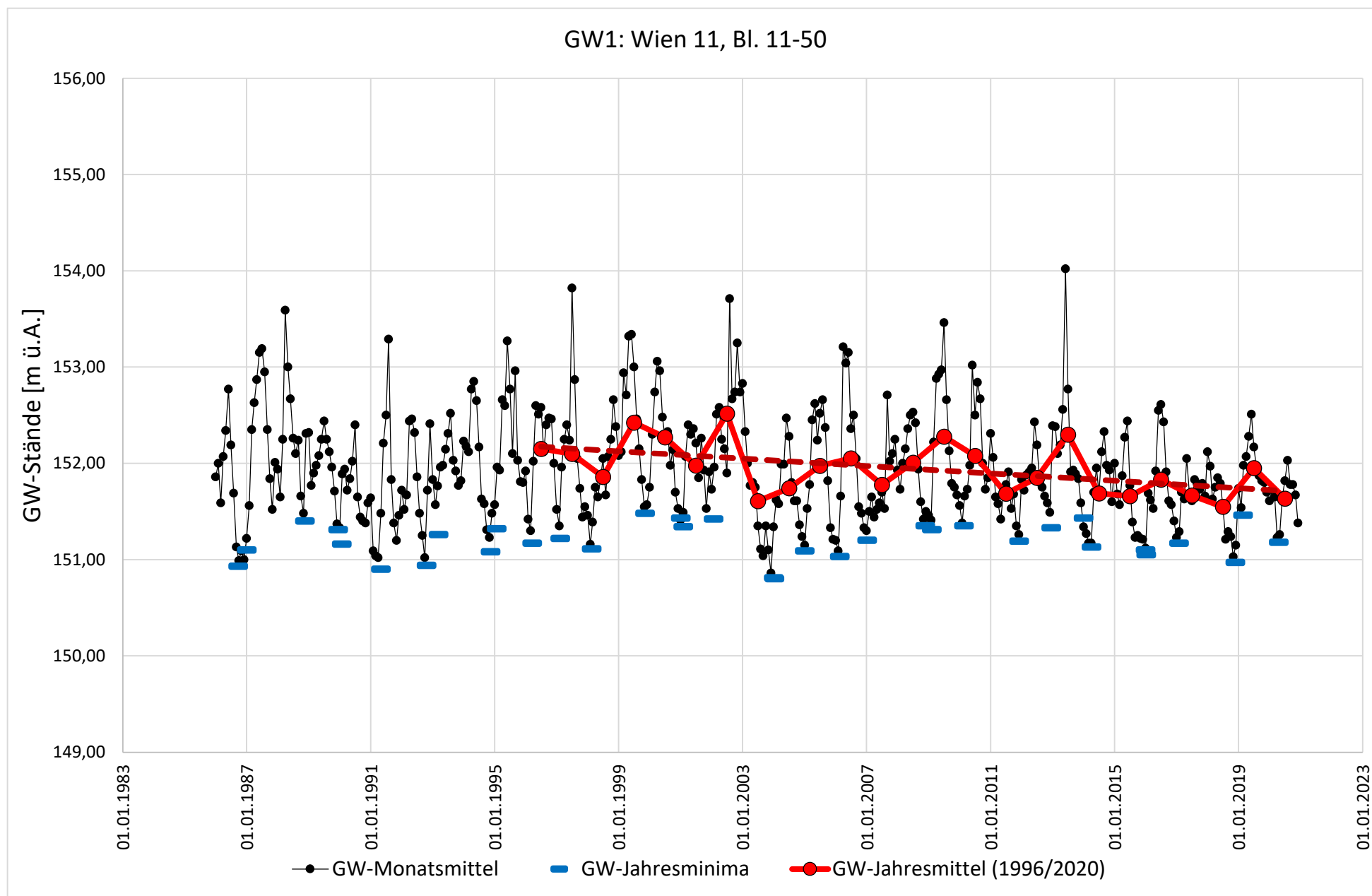


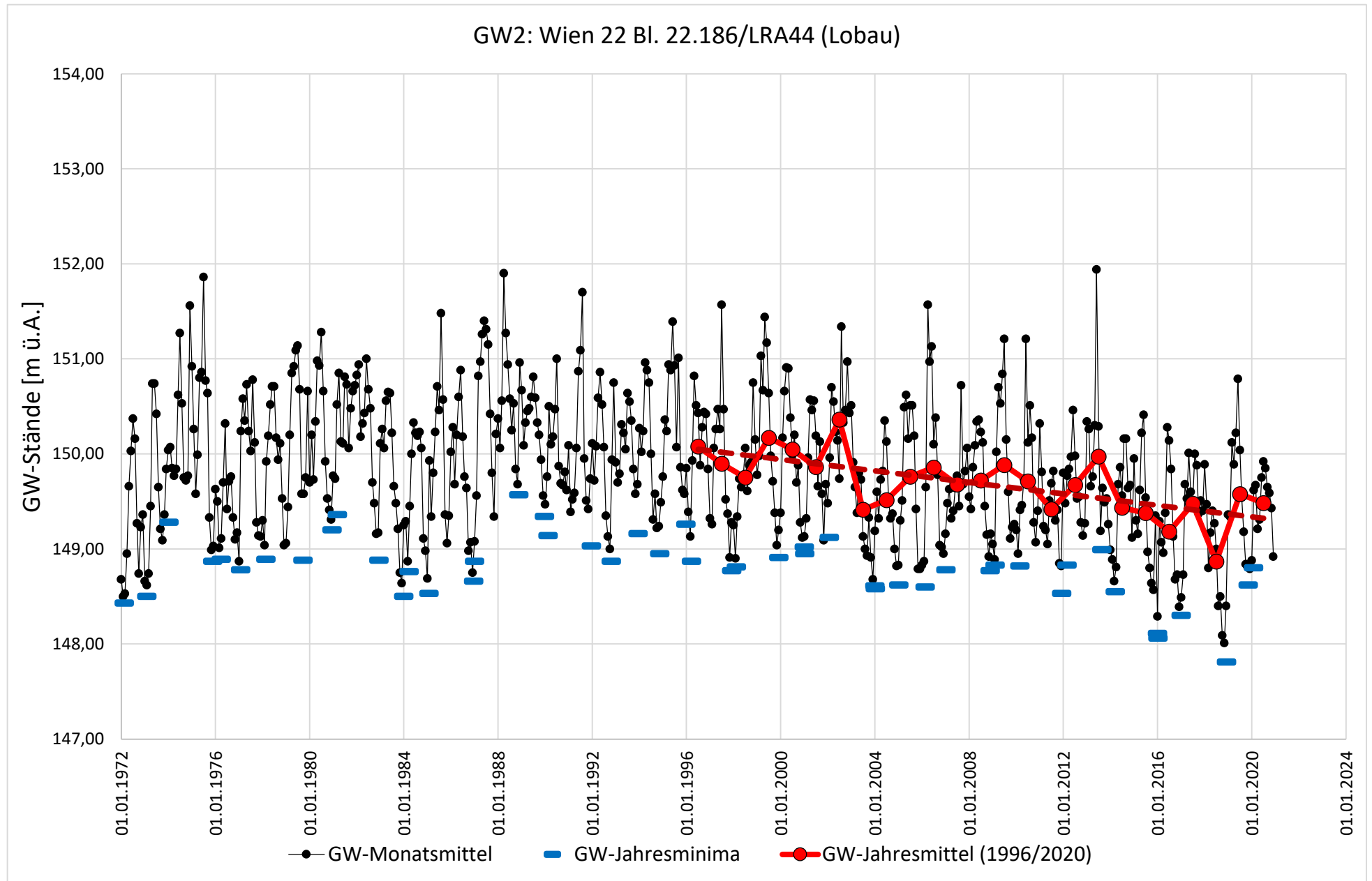
mittlere GW-Stände (mGW):

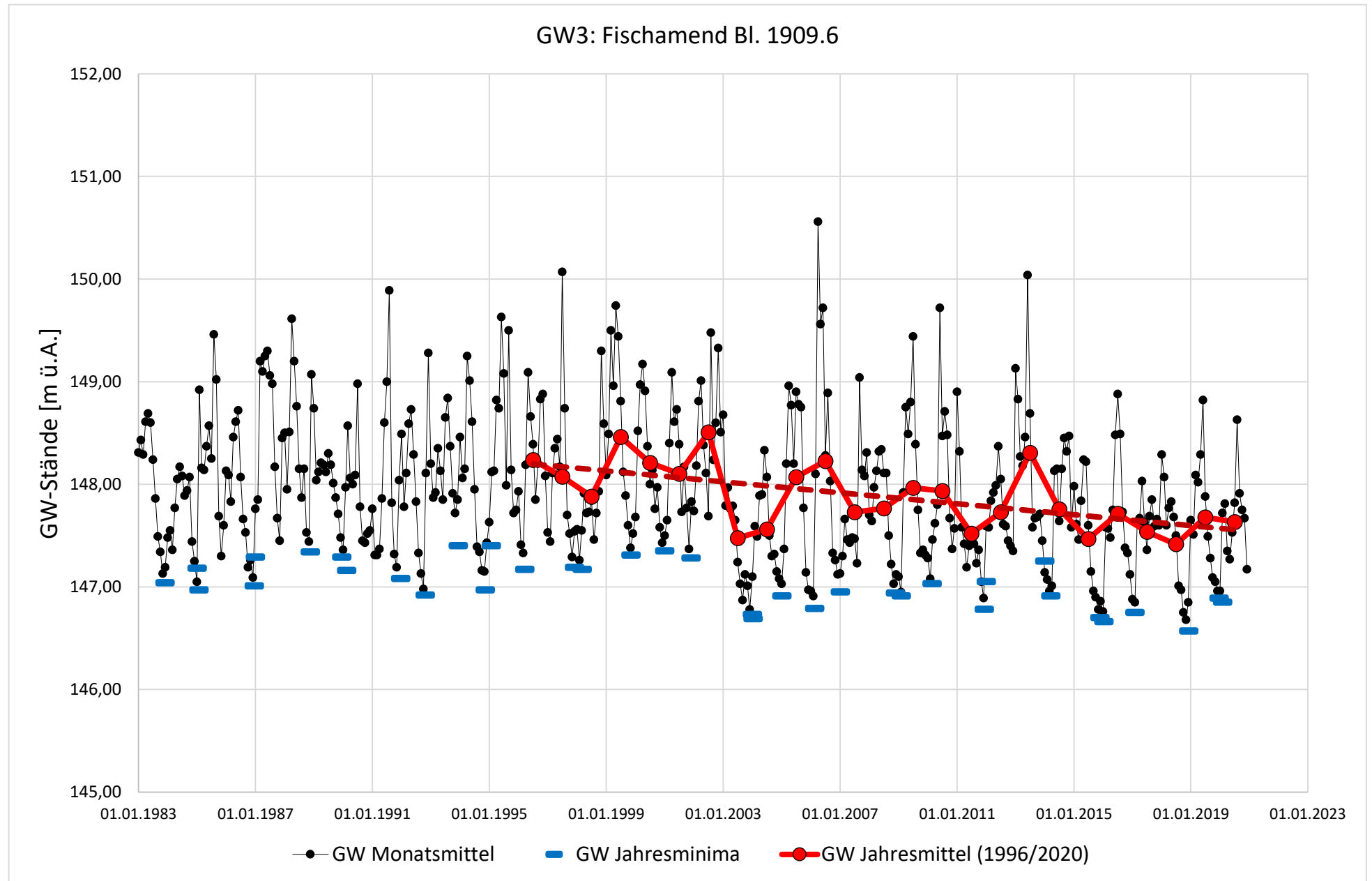
Messstelle: [Text]	Dist.: [m]		HZB-Nr.: Reihe: [Text] [Jahre]	DLü: -	Abb.: [Text]	Mean= [m ü.A.]	Std= [m]	r1= [-]	Z'= [-]	β' (ges)= [cm/a]	a1= [-]	β' (hy)= [cm/a]	β' (m)= [cm/a]
Wien 11, Bl 11-50	500	R	330035 1996/2020	1	A4/1	151,94	0,271	0,144	-2,499	-1,84	0,570	0,74	-1,10
Wien 22, Bl 22-186/LRA44	450	L	313254 1996/2020	1	A4/2	149,69	0,327	0,424	-3,060	-2,50	0,691	0,90	-1,60
Fischamend, Bl 1909.6	840	R	331082 1996/2020	8	A4/3	147,88	0,323	0,348	-2,966	-2,65	0,709	0,92	-1,72
Schöna u a.d.Donau, Br	1090	L	305136 1996/2020	0	A4/4	147,57	0,237	0,391	-2,733	-1,87	0,490	0,64	-1,23
Maria Ellend, Bl 1906.2	200	R	331090 1996/2020	2	A4/5	146,82	0,284	0,317	-2,546	-2,08	0,721	0,94	-1,14
Orth a.d.D., Bl 1902.5	590	L	331041 1996/2020	3	A4/6	145,34	0,281	0,411	-3,480	-2,58	0,658	0,86	-1,73
Orth a.d.D., Bl 1900.003	650	L	326710 1996/2020	0	A4/7	144,51	0,291	0,592	-3,760	-3,14	0,373	0,48	-2,66
Regelsbrunn, Bl 1898.2	510	R	331116 1996/2020	4	A4/8	143,32	0,217	0,347	-2,546	-1,57	0,645	0,84	-0,73
Eckartsau, Bl	3000	L	304600 1996/2020	0	A4/9	142,59	0,261	0,466	-3,060	-2,14	0,187	0,24	-1,90
Eckartsau, Bl 1894.5	490	L	331058 1996/2020	8	A4/10	142,43	0,314	0,390	-3,340	-2,94	0,638	0,83	-2,11
Witzelsdorf, Br	2750	L	305326 1996/2020	0	A4/11	141,38	0,199	0,307	-2,779	-1,36	0,186	0,24	-1,12
Petronell, Bl 1889.7	190	L	331066 1996/2020	6	A4/12	140,28	0,234	0,345	-2,966	-2,09	0,360	0,47	-1,62
Petronell, Bl 1889.2	430	R	331132 1996/2020	2	A4/13	140,07	0,275	0,333	-2,686	-2,21	0,649	0,84	-1,36
Stopfenreuth, Bl 123	1570	L	305193 1996/2020	0	A4/14	139,37	0,185	0,075	-2,359	-0,98	0,301	0,39	-0,58
Hainburg Bl. 21	230	R	305458 1996/2020	0	A4/15	136,28	0,318	0,181	-1,285	-1,14	0,938	1,22	0,08

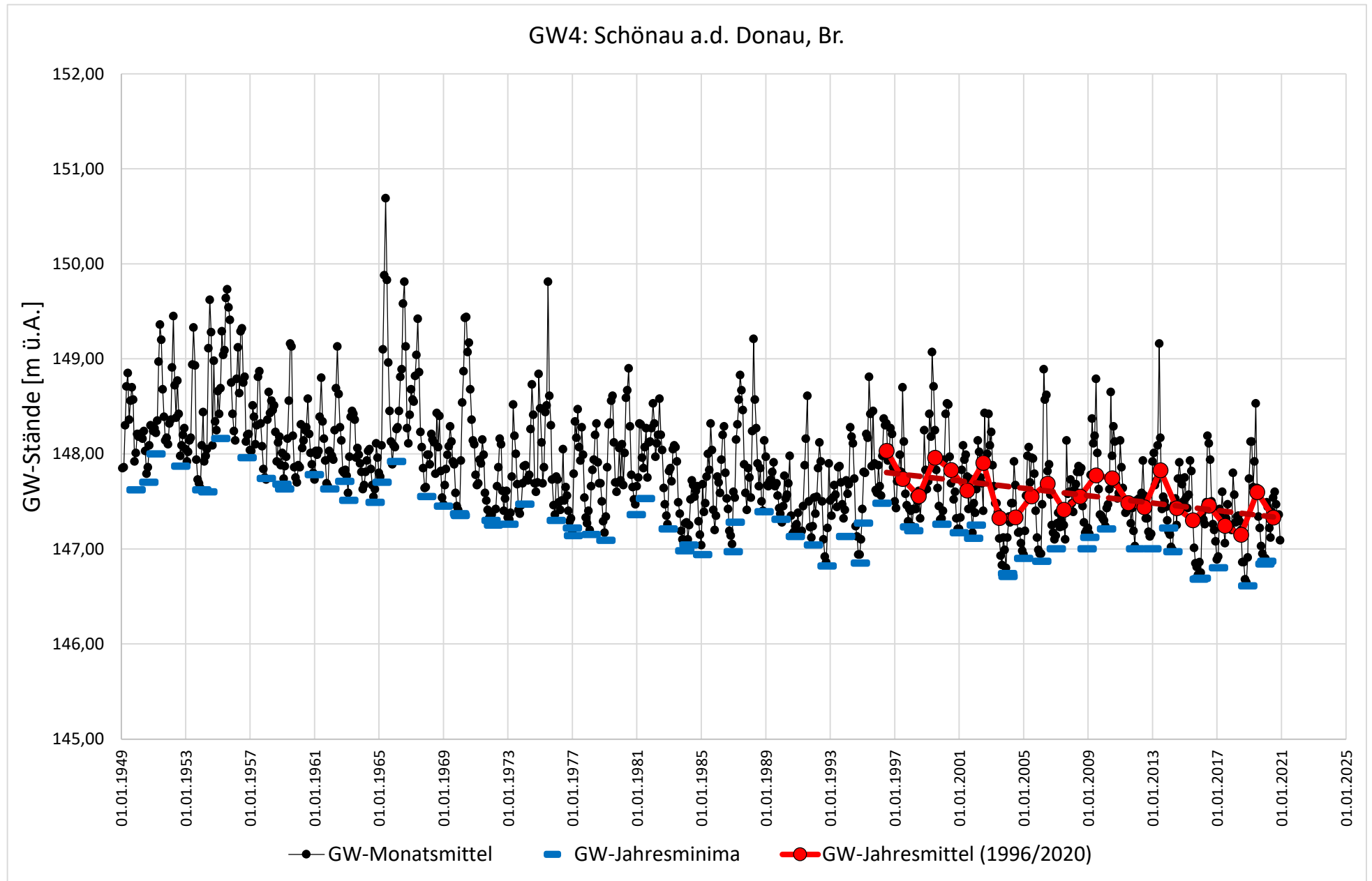
Parameter:

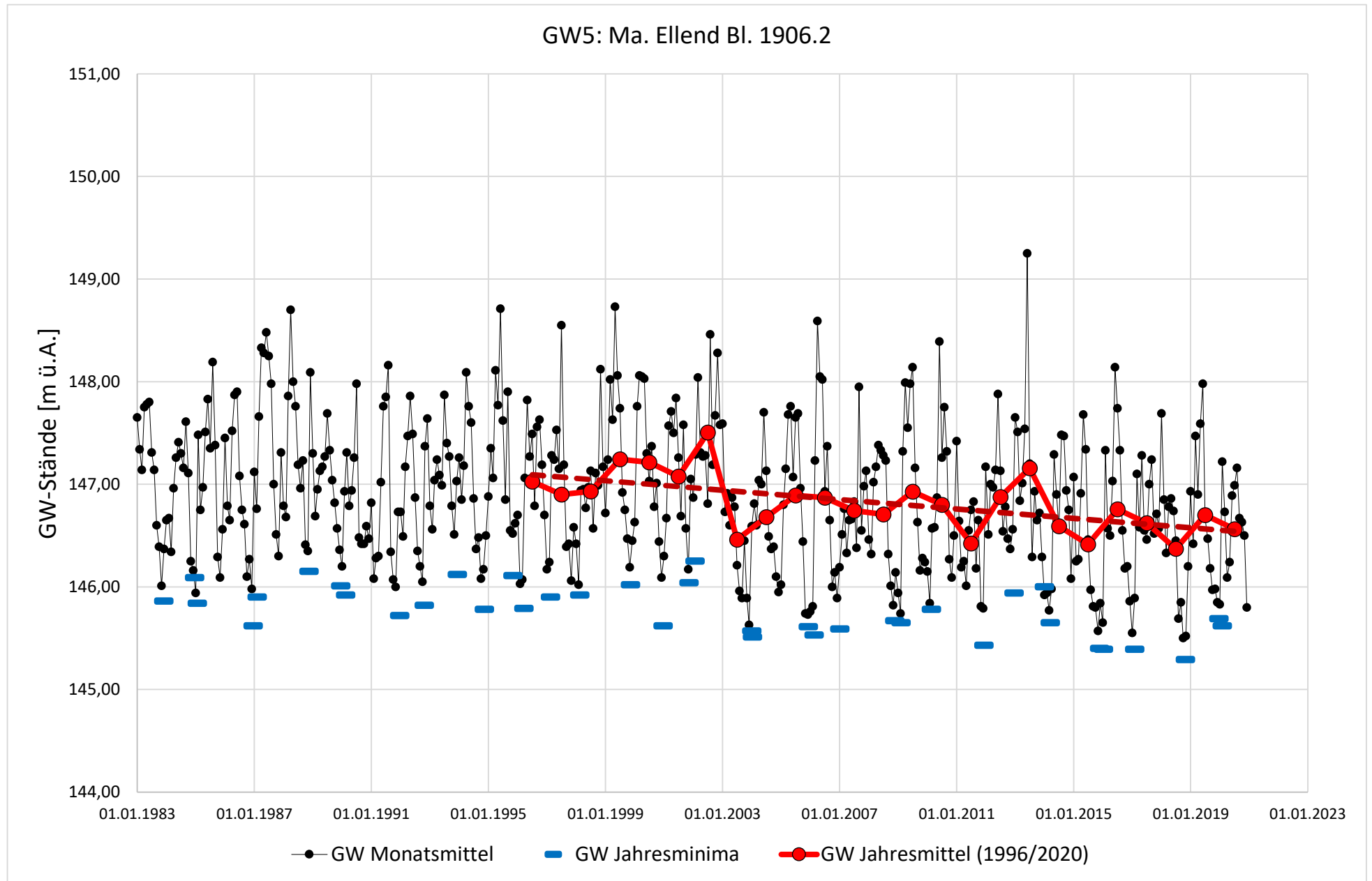
Dist	Distanz vom nächstgelegenen Donauufer
DLü	Anzahl der Datenlücken (fehlende Monatswerte)
Mean	Mittelwert der Jahres-Mittelwerte (1996/2020)
Std	Standardabweichung der Jahres-Mittelwerte (1996/2020)
r1	Lag-1-Autokorrelationskoeffizient
Z'	standardisierte Prüfgrösse (Mann-Kendall-Test); mit Prewhitening
β' (ges)	Sen-Neigung (Trendstärke), mit Prewhitening (Gesamtrend)
a1	Neigung der Regressionsgeraden (lineares Modell; 1998/2000) für Monats-MW (Hainburg) versus GW-Monatsmittel
β' (hy)	Trendstärke, hydrologisch bedingte Komponente
β' (m)	morphologisch bedingte Komponente (Abzug der hydrologischen Trendstärke von Gesamtrend)

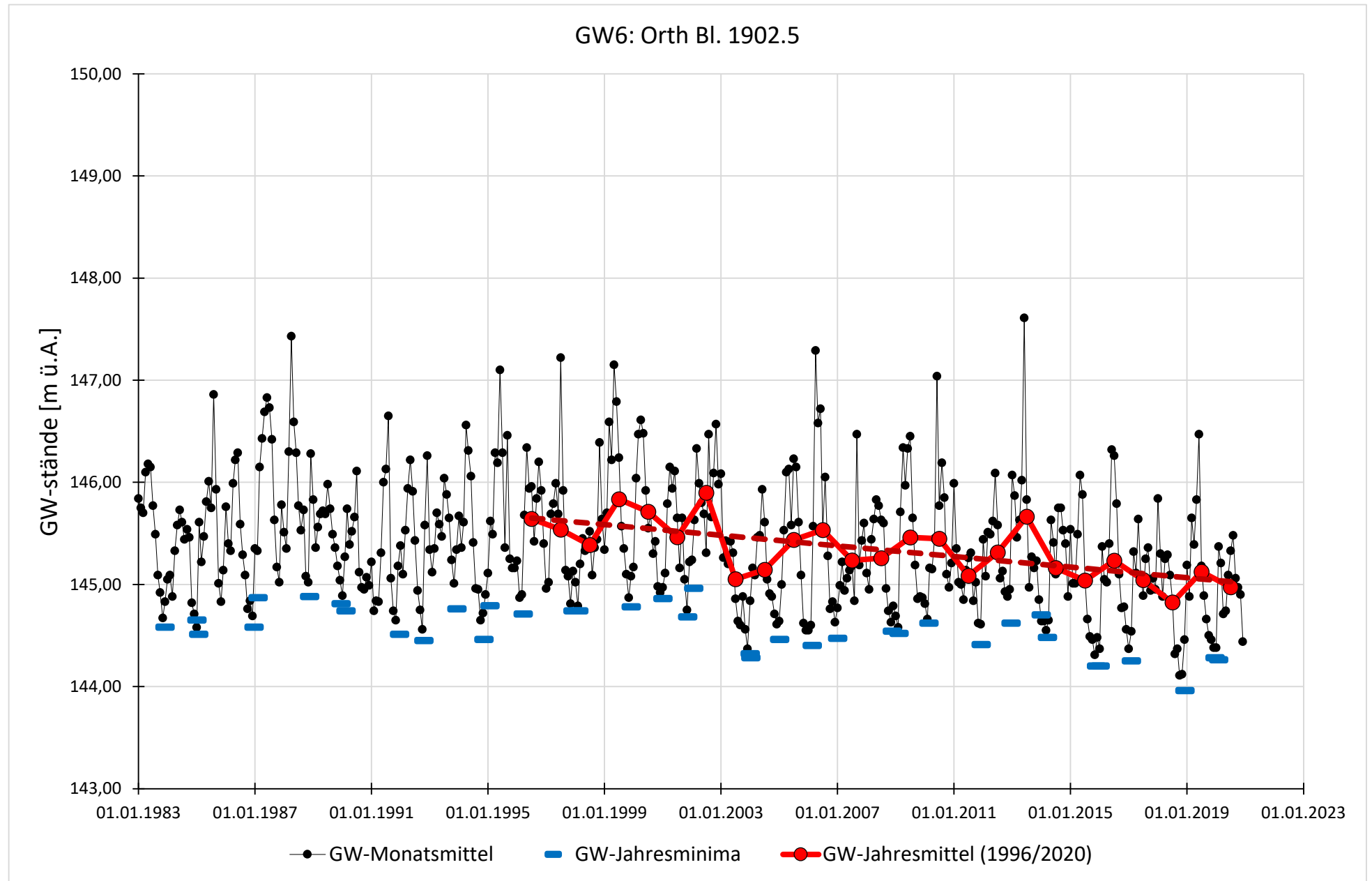


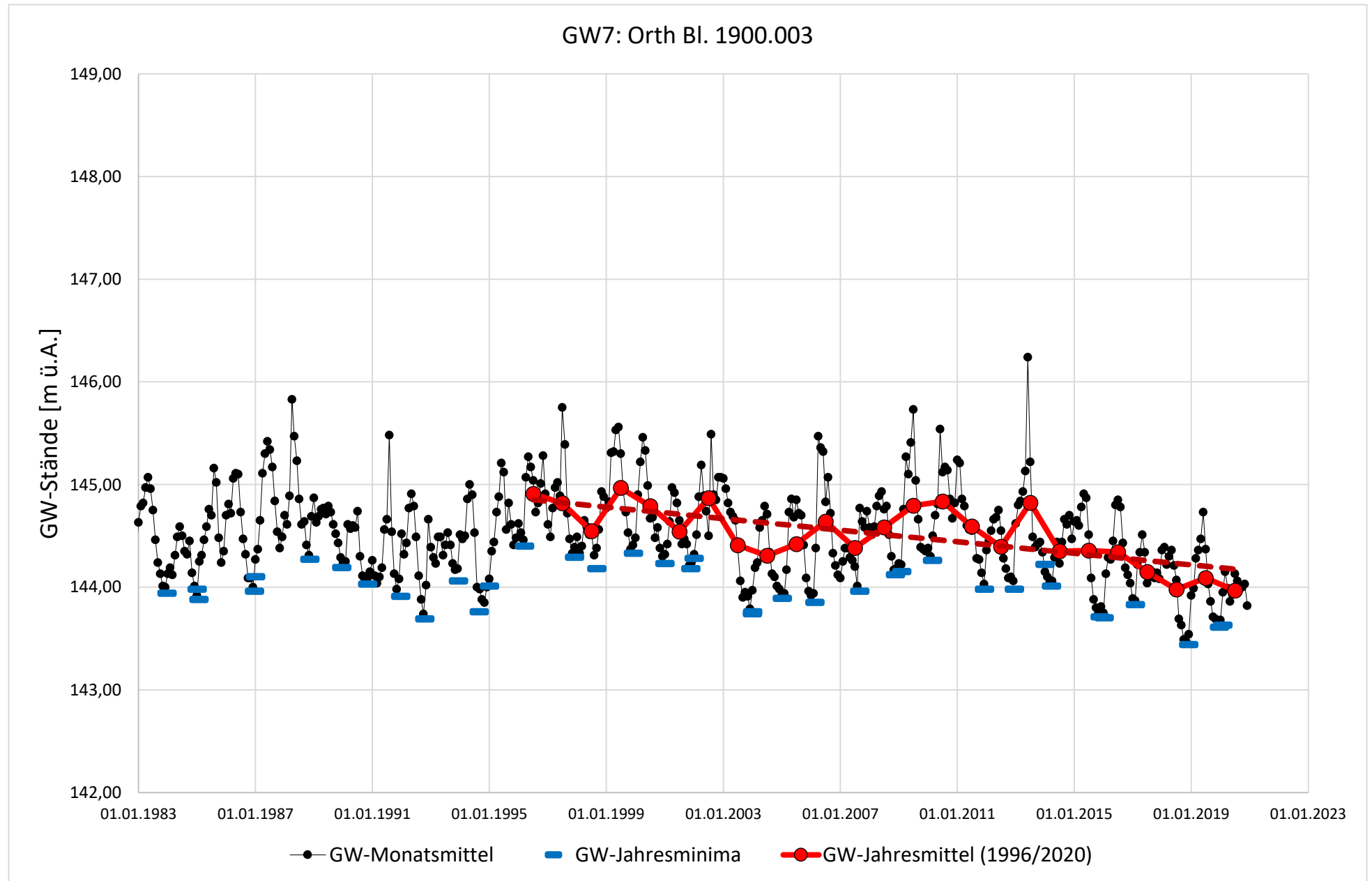


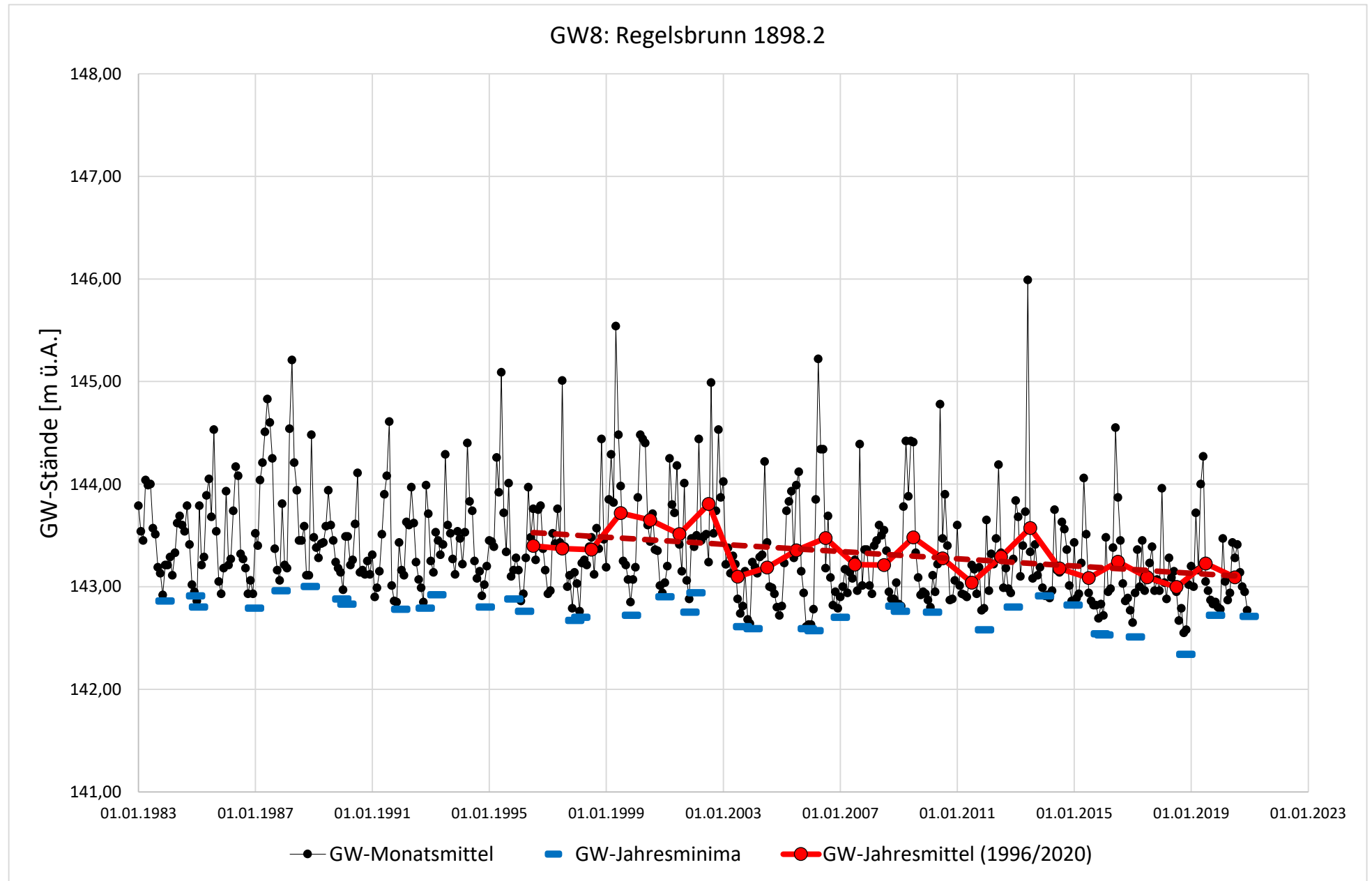


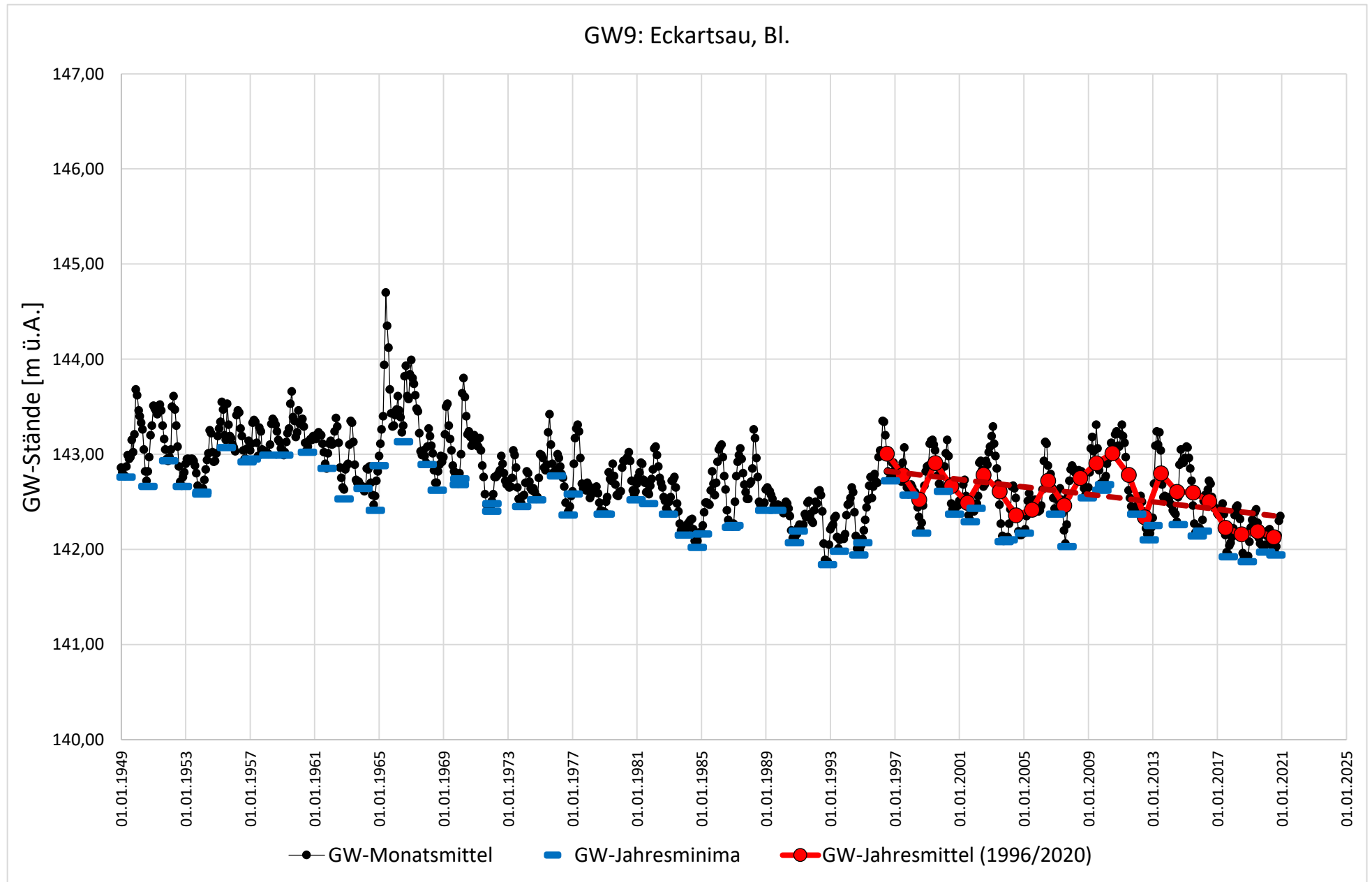


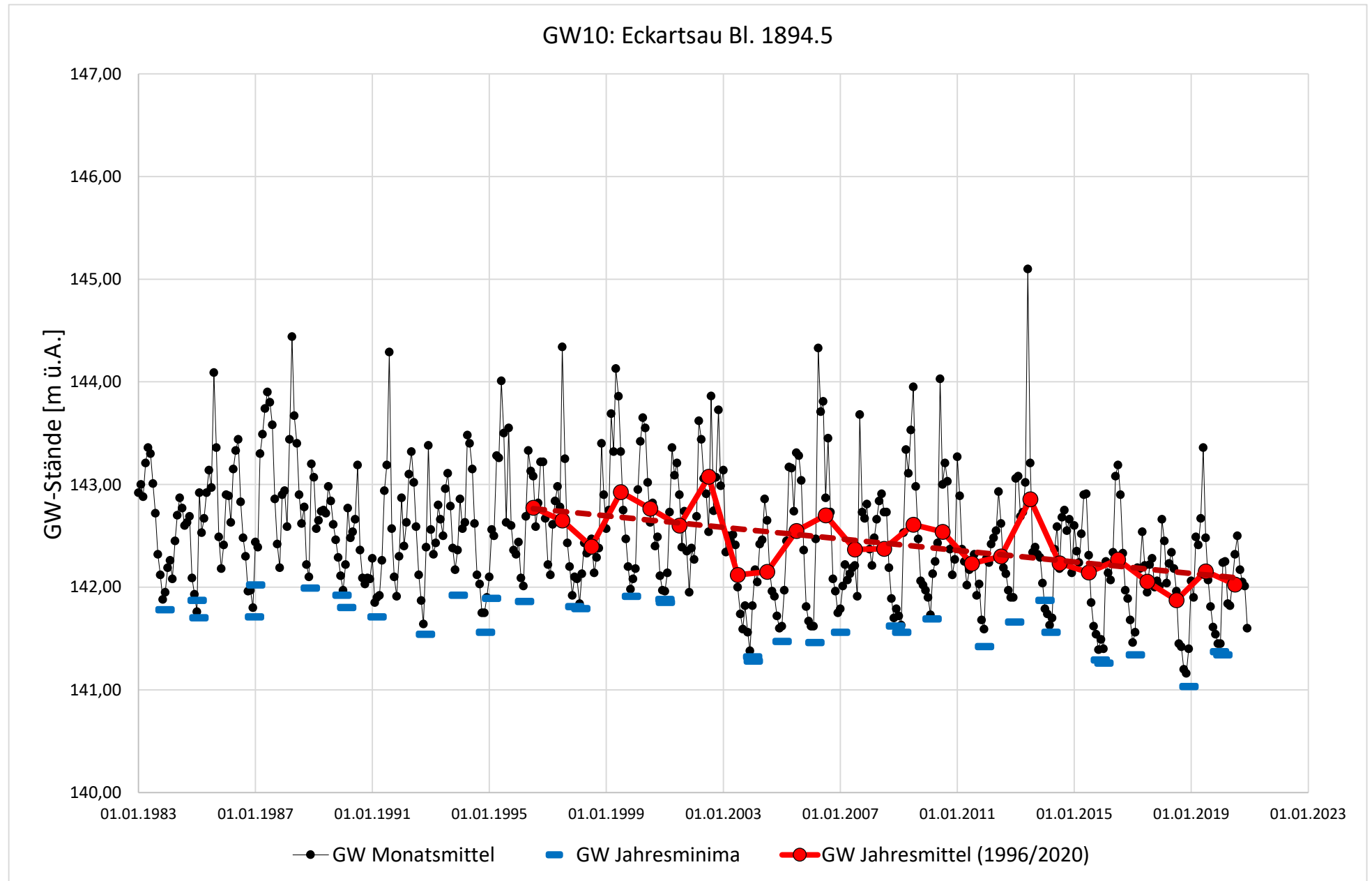


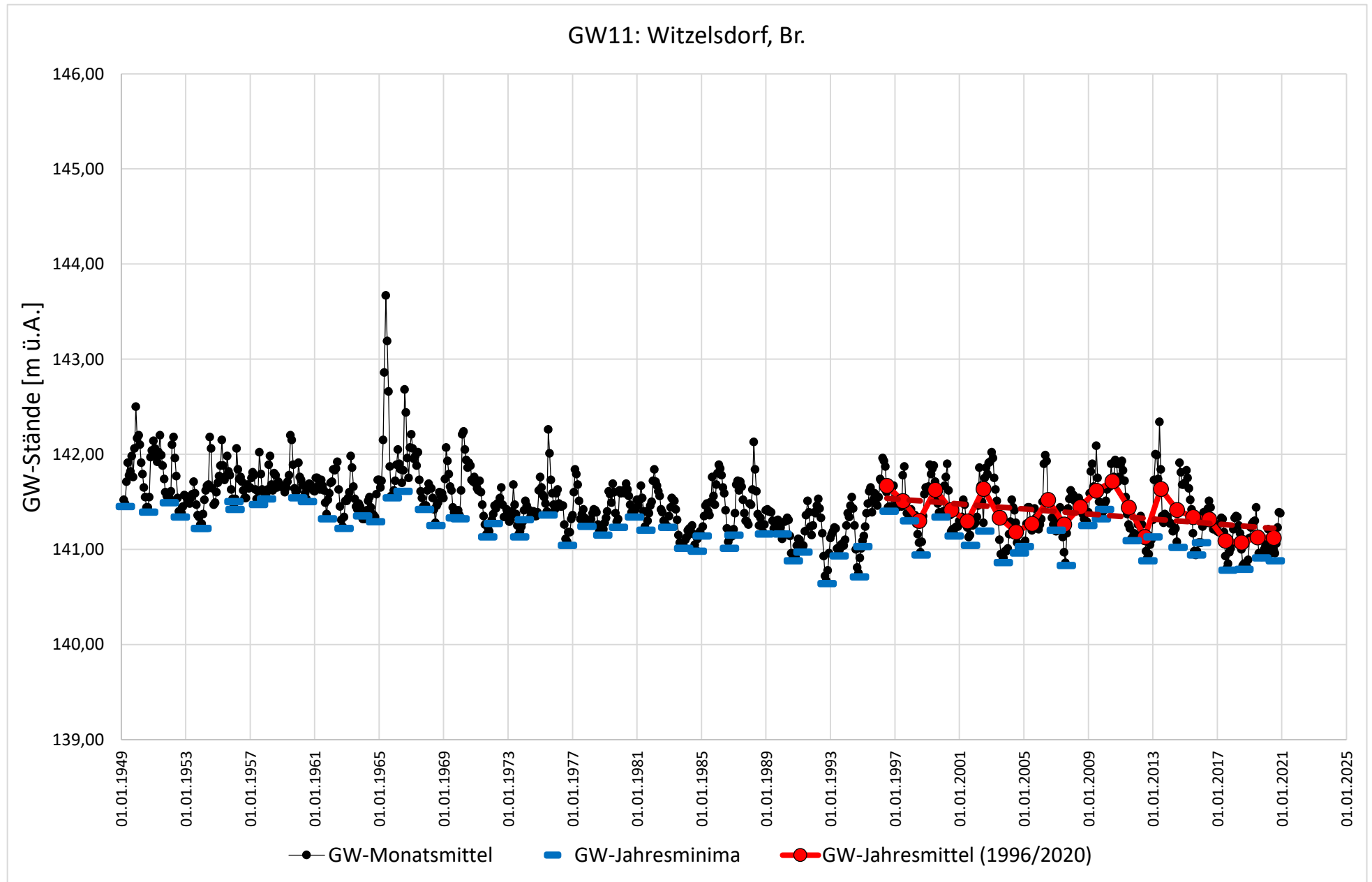


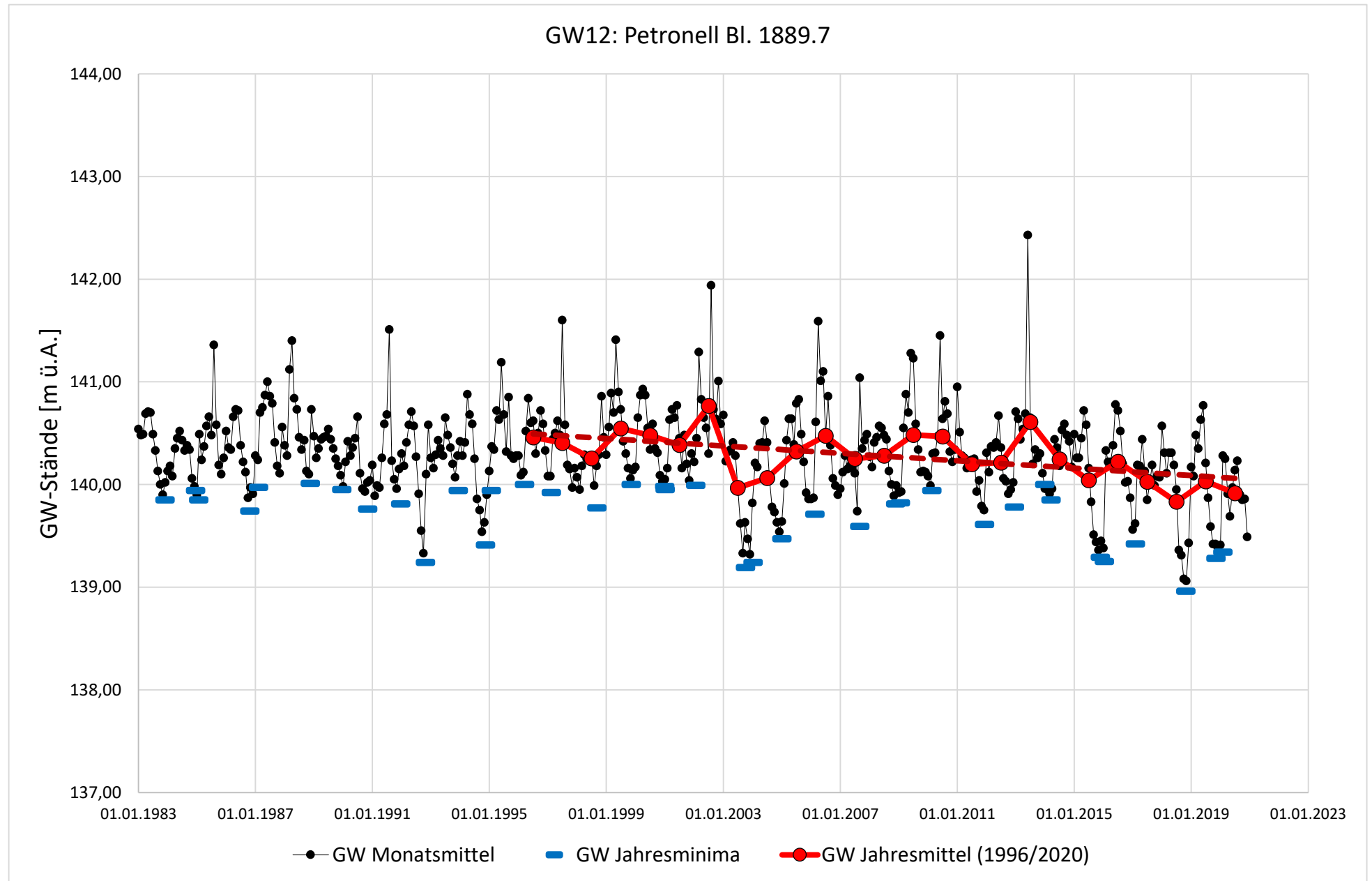


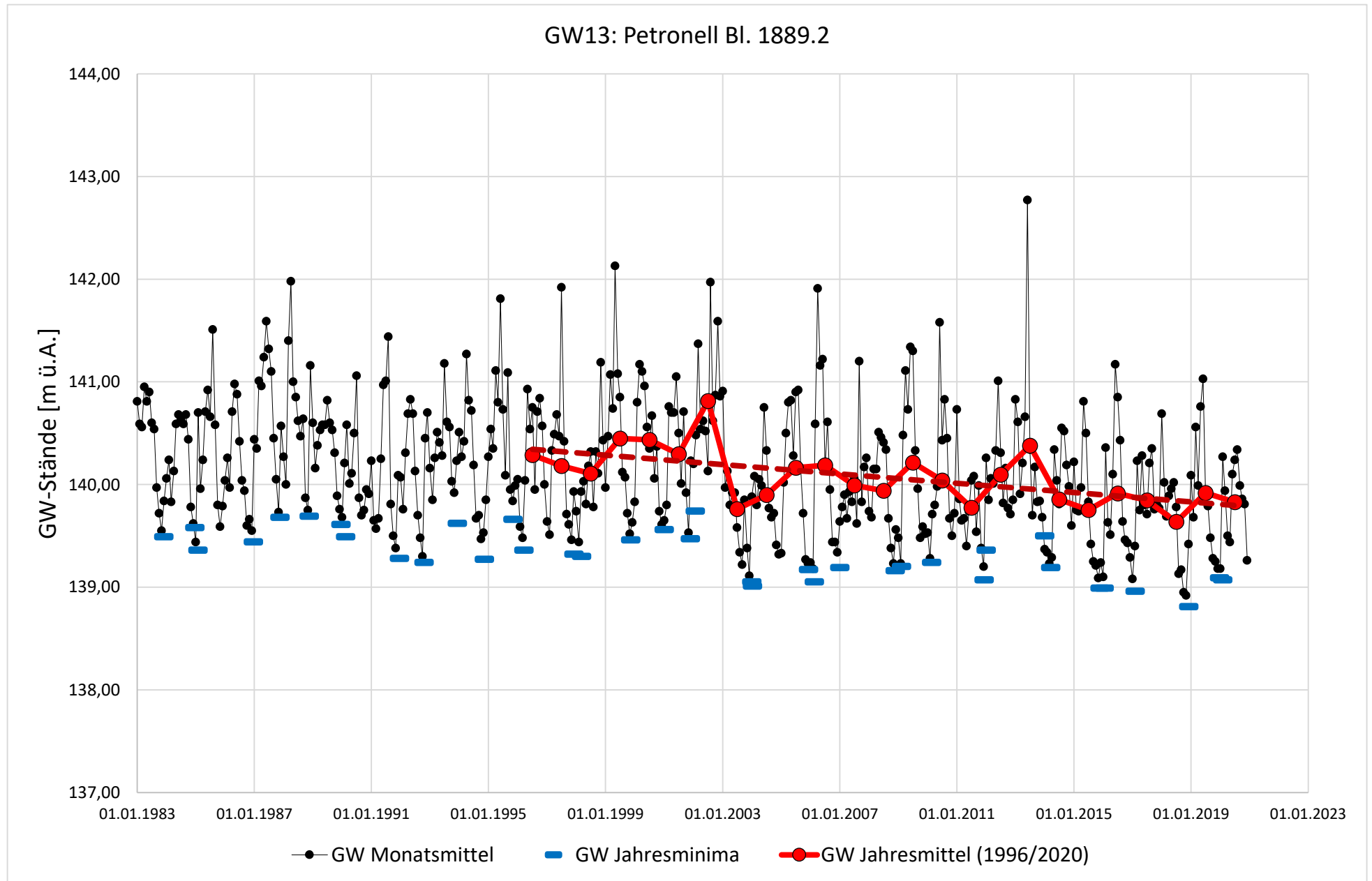


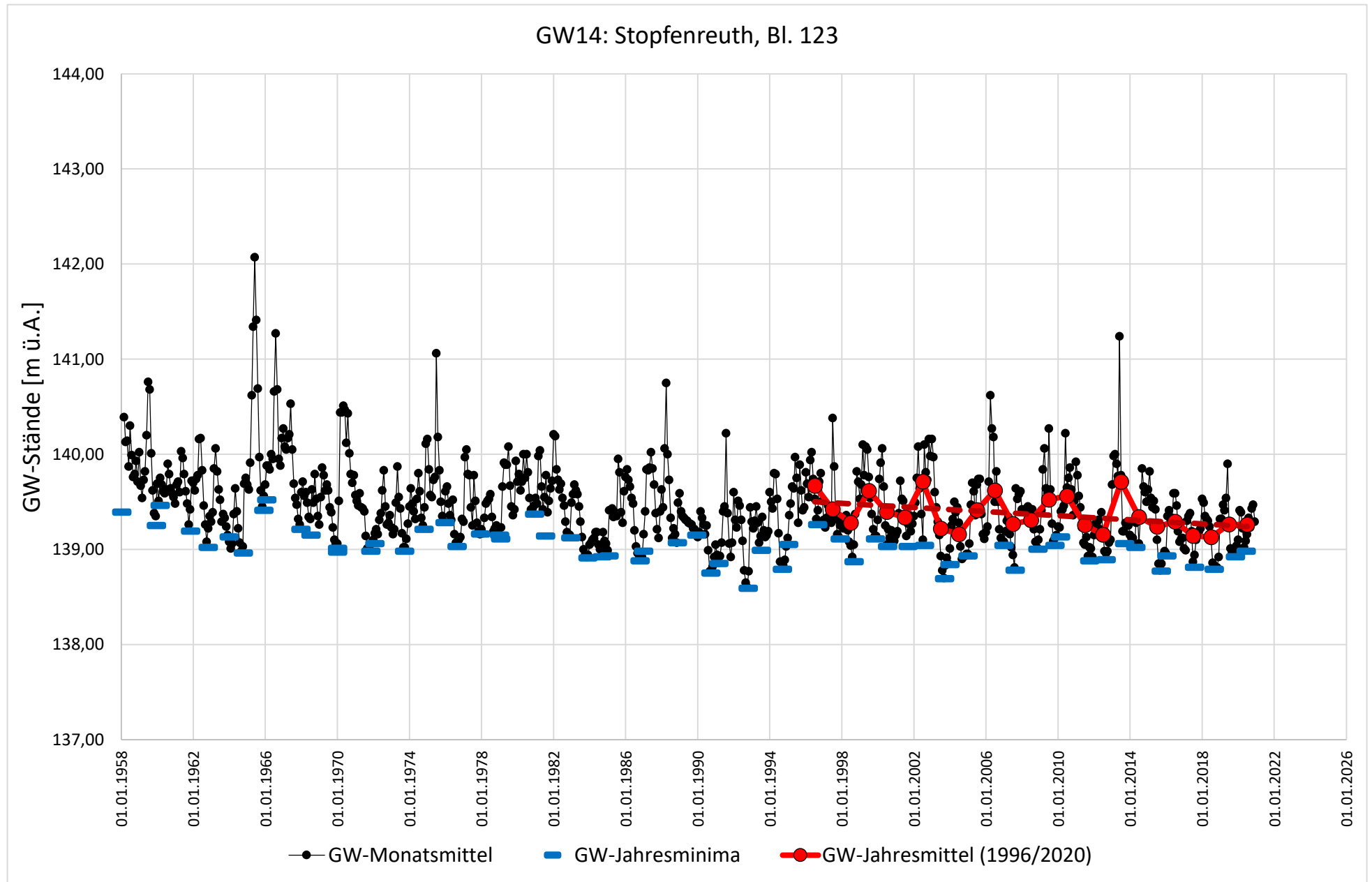


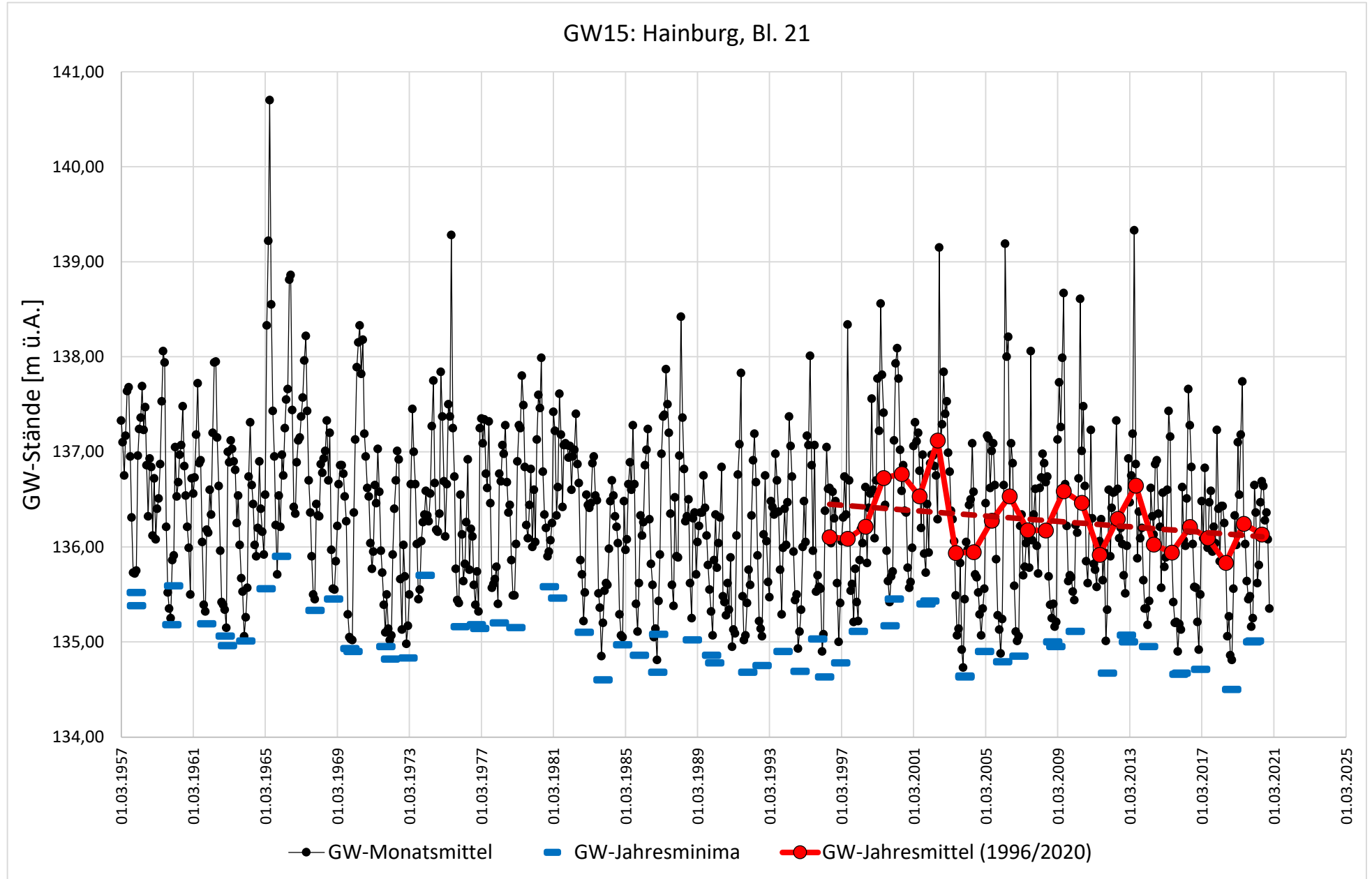


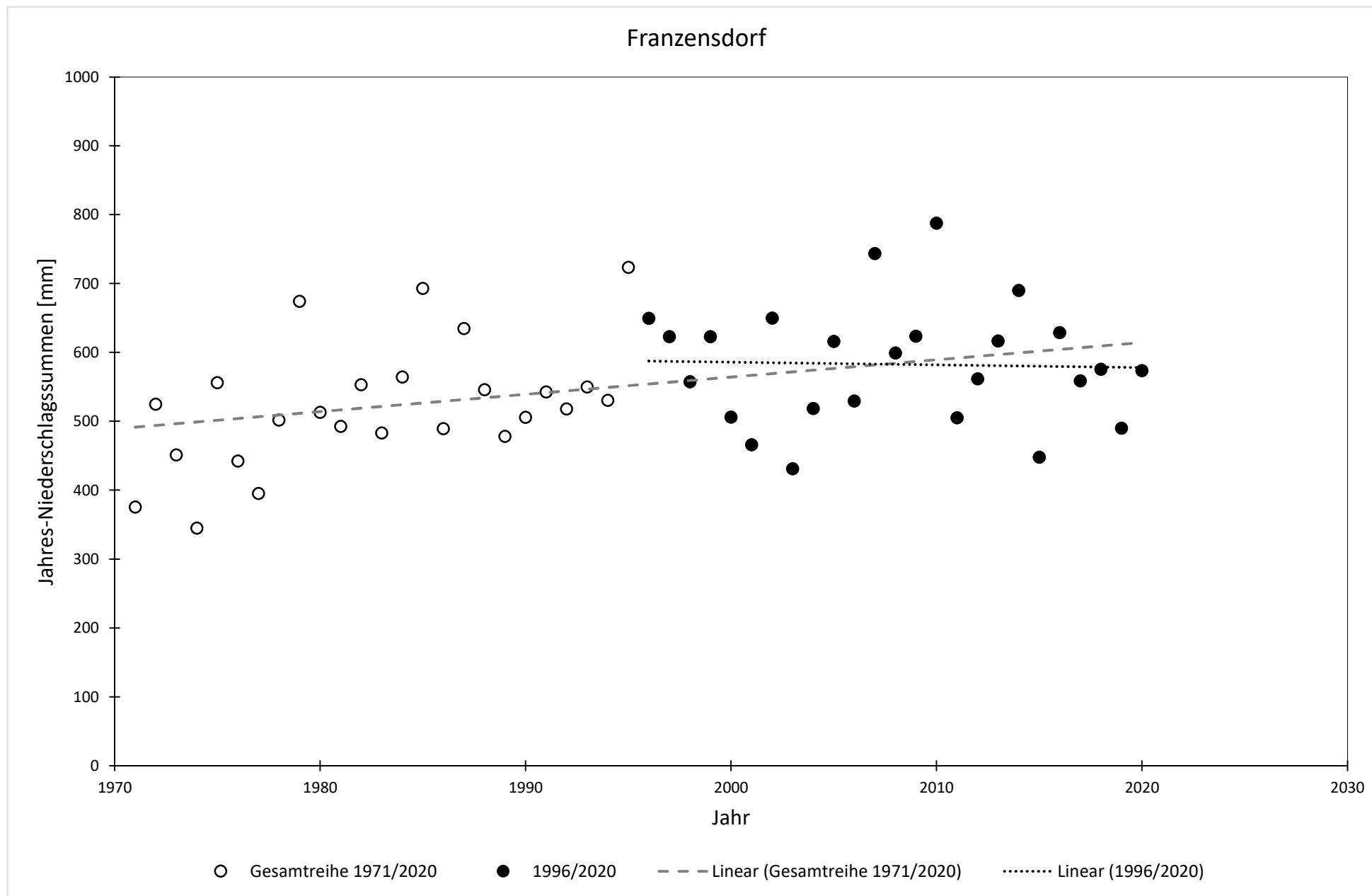


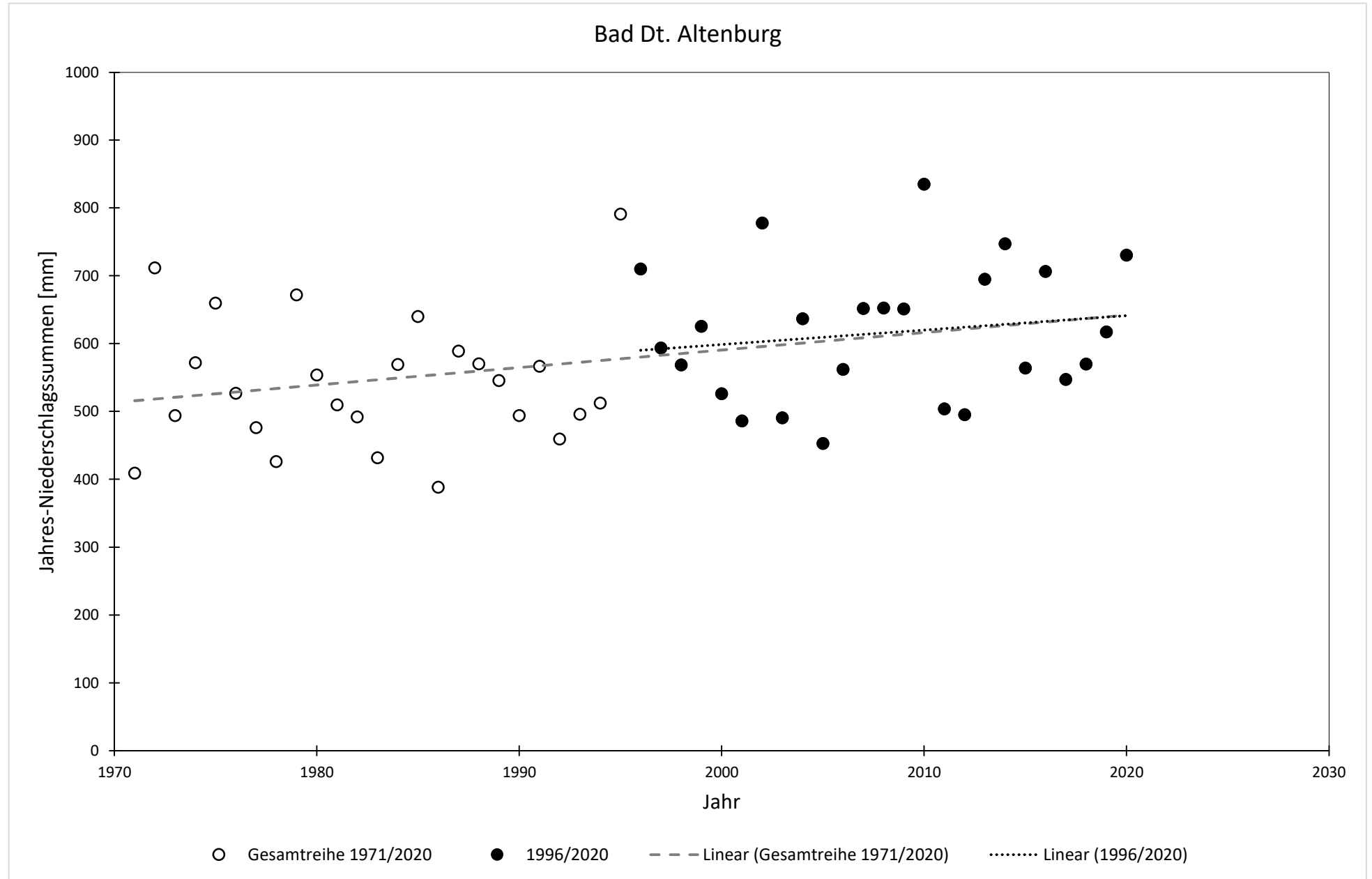


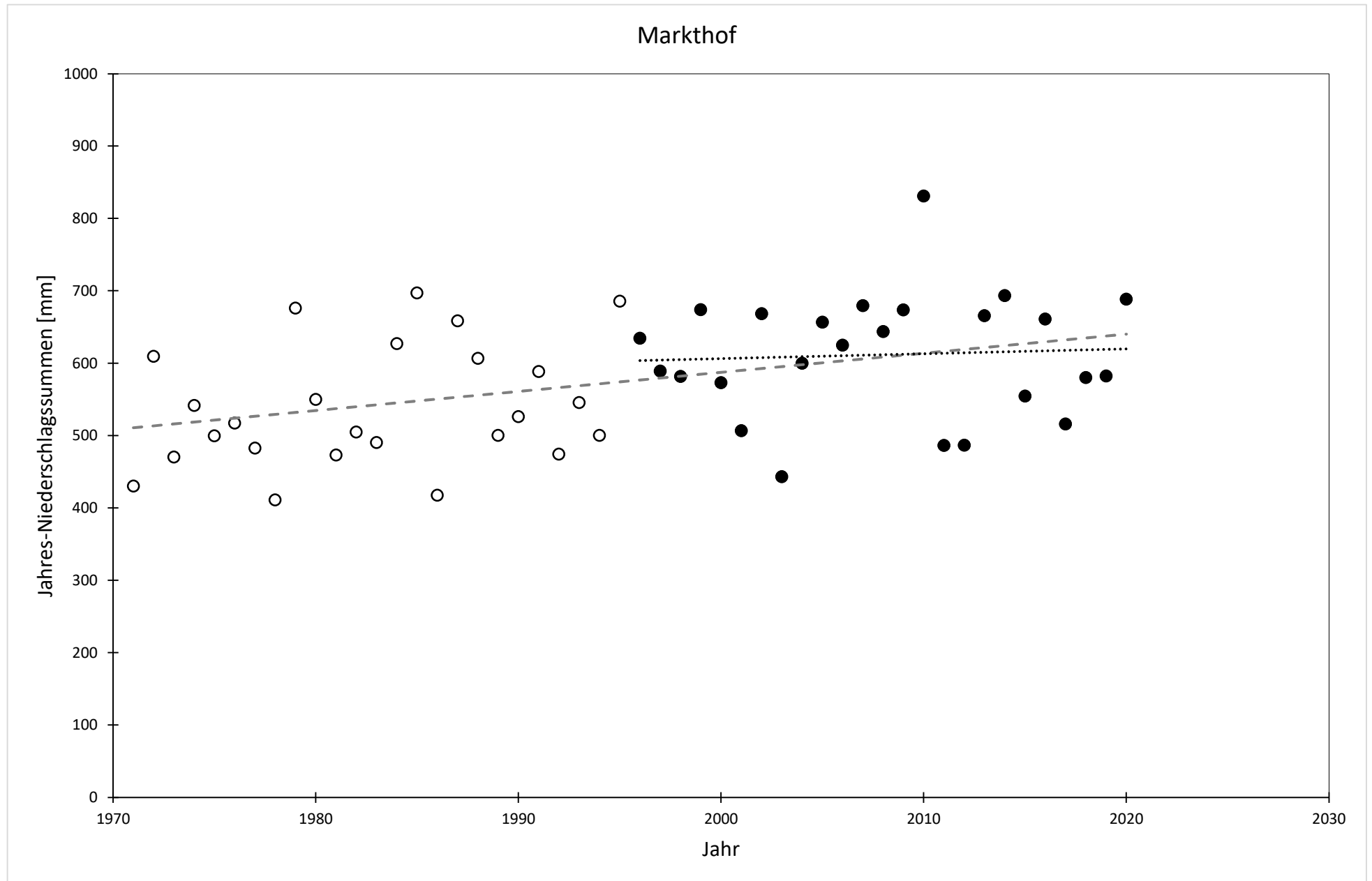












ZOBODAT - www.zobodat.at

Zoologisch-Botanische Datenbank/Zoological-Botanical Database

Digitale Literatur/Digital Literature

Zeitschrift/Journal: [Nationalpark Donauauen - Wissenschaftliche Reihe](#)

Jahr/Year: 2024

Band/Volume: [76](#)

Autor(en)/Author(s): Klasz Gerhard

Artikel/Article: [Untersuchung zur Sohlerosion der Donau östlich von Wien über den Zeitraum 1996/2020 und damit zusammenhängende Änderungen der mittleren Grundwasserstände an donanahen Messstellen 1-40](#)