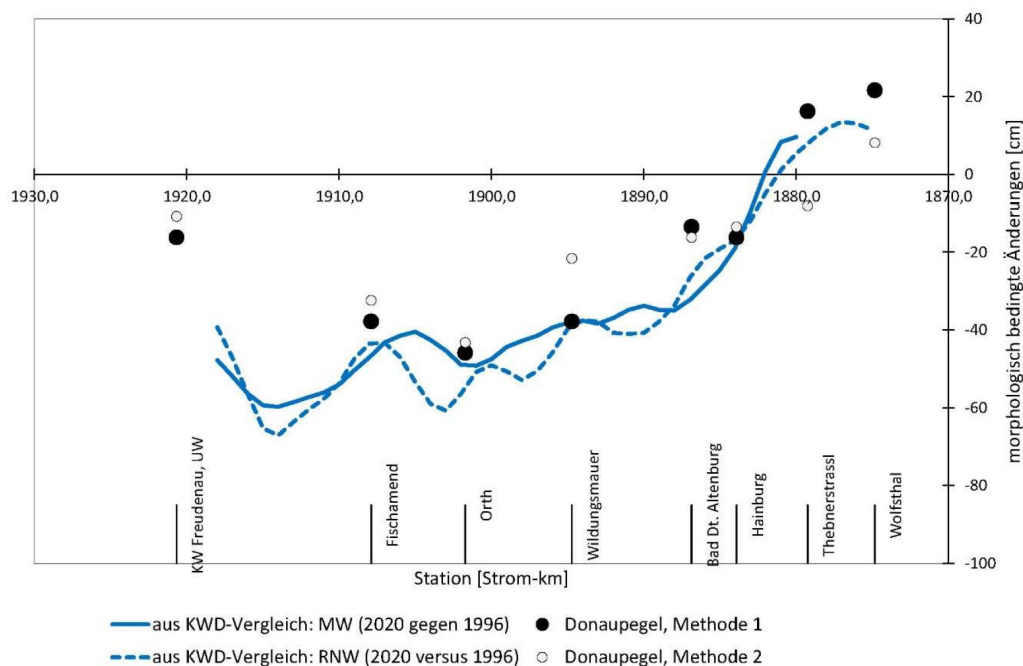


Untersuchung zur Sohlerosion der Donau östlich von Wien über den Zeitraum 1996/2023 und damit zusammenhängende Änderungen der mittleren Grundwasserstände an donau nahen Messstellen. Aktualisierung der Studie vom September 2024.

Stromab des Kraftwerks Freudenau zeigen die Wasserspiegel der Donau und des flussnahen Grundwassers in den letzten Jahrzehnten eine immer weiter voranschreitende Absenkung. Ursache sind die Sohlerosion und Veränderungen der Wasserführung der Donau.

Diese Studie erweitert die bereits veröffentlichten Analysen (G. Klasz, 2024, Band 76, Wiss. Reihe NP Donau-Auen) hinsichtlich der analysierten Datenreihe und der angewandten statistischen Methoden.

Gerhard Klasz

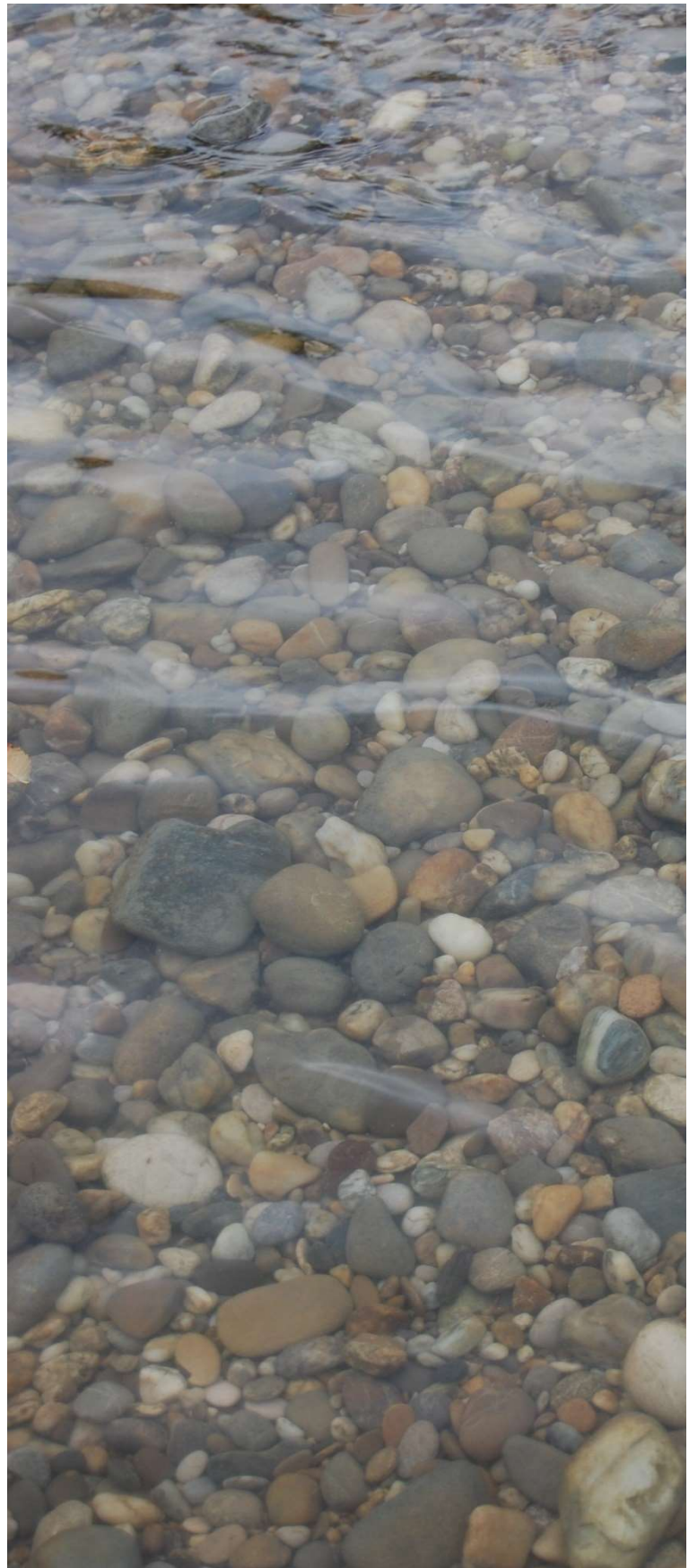


Ingenieurbüro
Dipl.-Ing. G. Klasz

Im Auftrag der
Nationalpark
Donau-Auen GmbH.

Untersuchung zur
Sohlerosion der Donau
östlich von Wien über
den Zeitraum
1996/2023 und damit
zusammenhängende
Änderungen der
donaunahen Grund-
wasserstände

Aktualisierung
einer Studie vom
September 2023



Wien, August (Ergänzungen: November) 2025

IMPRESSUM:

Auftraggeber:

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

Auftragnehmer:

Ingenieurbüro (für Kulturtechnik & Wasserwirtschaft)
Dipl.-Ing. Gerhard Klasz
Franz-Josefs-Kai 27
1010 Wien

Bearbeitung:

DI Gerhard Klasz
gerhard.klasz@a1.net

Aktualisierung der Studie

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

nun mit Berücksichtigung der Daten bis einschließlich 2023 und mit zusätzlichen Untersuchungen (u.a. auf Trendbrüche)

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 und durch zuletzt (ab 2018) etwas erhöhte VHP-Zugabemengen 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 der beurteilenden Statistik (Teststatistik) möglich ist. Diese Auswertungen werden ergänzt und gestützt durch Trendanalysen zu den GW-Ständen (Zeitreihen der GW-Jahresmittel) für 19 donanahe 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 2023 kam es zu einer morphologisch bedingten Absenkung des Mittelwassers (durch Sohlerosion) im mittleren Abschnitt (ca. Fischamend bis Wildungsmauer) im Ausmaß von etwa 40 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 wird; in der VHP-Erhaltungsstrecke (UW des Kraftwerkes Freudenau bis querab Schönauf, Strom-km 1910) sind ebenfalls Eintiefungen zu beobachten, von etwa 50 bis 60 cm im unteren Bereich dieser Teilstrecke auf etwa 20 cm (im Unterwasser des Kraftwerkes) stromauf abnehmend.*
- (4) *Die zugehörigen, also morphologisch bedingten Änderungsraten für mittlere Wasserstände $w(MQ)$ (zwischen 1996 und 2023) liegen im mittleren Bereich bei etwa -1,7 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 (Staueinfluss durch Gabčíkovo). Auch im obersten Teil der VHP-Erhaltungsstrecke (Kraftwerks-UW bis Strom-km 1916) fallen die Eintiefungsraten geringer aus, mit etwa 0,6 cm/Jahr direkt im Kraftwerks-Unterwasser. In der unteren Hälfte der VHP-Erhaltungsstrecke (etwa Strom-km 1915 bis 1910) sind die Eintiefungen aber (hier unter Berücksichtigung der KWD-Änderungen) mit etwa 2 bis 2,6 cm/Jahr besonders stark ausgefallen.*

- (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 2,5 cm/Jahr, und in der unteren Hälfte der VHP-Erhaltungsstrecke knapp über 2,0 cm/Jahr bis ca. 2,8 cm/Jahr.
- (6) Während der Untersuchungsperiode hatten auch die mittleren Abflüsse (MQ) einen fallenden Trend (von ca. -10,6 (m³/s)/Jahr), der für Hainburg bereits statistisch signifikant ist, und der sich bei der Abnahme der langfristigen MW-Stände mit etwa -1,4 cm/Jahr auswirkt. 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) Die Frage, ob es seit 2018 (Erhöhung der VHP-Geschiebezugaben) zu nennenswerten Verbesserungen (geringere Eintiefungsraten oder eventuell bereits Gleichgewicht) gekommen ist, kann grundsätzlich weniger sicher beantwortet werden als die Frage nach der Entwicklung der Gesamtreihe (ab 1996). Eine aus wenigen Jahren bestehende Zeitreihe ist in Bezug auf das Erfassen allfälliger Trends den zufalls- bzw. fehlerbedingten Streuungen viel stärker als eine längere Zeitreihe unterworfen. Insgesamt ergeben sich aber für keine der untersuchten Pegelstellen Hinweise darauf, dass die Sohlerosion zuletzt deutlich abgenommen hätte.

Unter Berücksichtigung der gesamten Untersuchungsperiode (1996/2023) führt diese Frage auf die Suche nach Trendbrüchen (bei 2018) in den Zeitreihen. Visuell und gestützt auf zusätzliche statistische Auswertungen (Standard Normal Homogeneity Test und Chow-Test) ergeben sich keine Hinweise auf solche Trendbrüche von stärker fallend auf schwächer fallend. Ganz im Gegenteil, für Bad Dt. Altenburg und Hainburg sind sogar (ab 2020 bzw. 2021) Zunahmen der Eintiefungsraten zu beobachten, was (Vermutung) mit den zuletzt stärkeren Geschieberückführungen der viadonau (Geschiebefang Treuschütt) zusammenhängen könnte; allerdings sind die Befunde dazu unklar (stärkere Unterschiede zwischen $w(RNQ)$ und $w(MQ)$), man wird zur Klärung dieser Detailfrage noch eine längere Beobachtungszeit benötigen.

- (8) Die Befunde für die letzten Jahre (ab 2018) sind vor dem Hintergrund der schwachen Abflüsse dieser Phase zu interpretieren. Die mittleren Abflüsse für 2018/2023 lagen nur bei rd. 90% des langjährigen Mittels (nach KWD) und der Geschiebetransport (Angaben des Hydrographischen Dienstes für Hainburg Straßenbrücke) für 2018/2022 lag bei rd. 86% des Durchschnittes aus 2008/2022. Mit anderen Worten: Unter langjährig gemittelten Verhältnissen wäre der Geschiebeaustrag um rd. 15 bis 20% (rechnerisch: 17%) höher als in dieser Phase gewesen. Und dennoch kam es zu weiteren Eintiefungen.
- (9) In einer früheren Phase (ca. 2008 bis 2010) zeigen sich für den Pegel Fischamend Anzeichen einer Reduktion der Erosionsraten, was mit den starken Geschieberückführungen bzw. Verklappungen durch die viadonau im dortigen Teilabschnitt begründet werden kann. Insgesamt ist auch diese Teilstrecke (querab von Fischamend) immer noch eine Eintiefungsstrecke.
- (10) Die Änderungsraten für die GW-Jahresmittel an den donau nahen Messstellen (beidseits der Donau) und den Zeitraum 1996/2022 liegen (zwischen Wien und Stopfenreuth) meist bei etwa -2,5 bis -3,5 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 weniger stark fallend; morphologisch bedingt sollte die Tendenz dort schwach steigend sein (Einfluss des Staues der Staustufe Gabčíkovo), dies wird aber durch die hydrologische Komponente überdeckt.
- (11) Mit den oben genannten Änderungsraten sind die GW-Jahresmittel über die letzten 26 Jahre um ca. 45 bis 100 cm gefallen; dieser Trend ist generell (d.h. für alle untersuchten Messstellen) statistisch signifikant. Die fallenden Grundwasserstände betreffen u.a. die (Untere) Lobau, die

Donauauen und alle donanahen 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 Änderungen reichen thematisch und räumlich über den Nationalpark hinaus und laufen allen wasserwirtschaftlichen Zielsetzungen entgegen.

- (12) *Der Kieskörper unter der Sohle der Donau (im Folgenden: Sohl-Geschiebespeicher) nimmt durch die Sohlerosion laufend ab. Für die Periode 1996/2018 erfolgte in der VHP-Erhaltungsstrecke eine mittlere Abnahme von rd. 45.000 m³/Jahr (eventuell auch ca. 60.000 m³/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 zumindest rd. 1,0 Millionen Kubikmeter aus, was mit entsprechenden Wasserspiegelabsenkungen verbunden war und ist (sh. weiter oben). Ob bzw. wie weit diese Abnahmen des Sohlspeichers seit 2018/2019 gebremst werden konnten, ist aus den hydrographischen Daten derzeit noch nicht sicher ableitbar. Allerdings zeigen sich an den untersuchten Pegeln (vom Kraftwerks-UW bis einschließlich Hainburg) nirgends Auflandungen und nirgends ein Trendbruch von fallend auf gleichbleibend (sh. oben).*
- (13) *[Aus der Studie 2023 unverändert übernommen]: 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).*
- (14) *[Aus der Studie 2023 unverändert übernommen]: 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).*
- (15) *[Aus der Studie 2023 unverändert übernommen]: Die Wirkungen 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 immer noch eine Erosionsstrecke.*
- (16) *Im Bereich Bad Dt. Altenburg und Hainburg scheinen die Sohlerosionen durch die Geschieberückführungen der viadonau (Geschiebefang Treuschütt) wieder etwas zugenommen zu haben, was theoretisch auch zu erwarten wäre, allerdings klaffen hier die Befunde für die Zustände RNQ und MQ auseinander. Für die Klärung dieser Detailfrage wird man eine längere Beobachtungszeit benötigen.*
- (17) *[Aus der Studie 2023 unverändert übernommen]: Der Kieskörper unter der Sohle ist nur wenige Meter mächtig, darunter befinden sich feinkörnige und teilweise wenig erosionsresistente Feinklastika (Sande, Schluffe). Wenn die Sohlerosion weiter läuft, dann ist letztlich mit einem Sohl-durchschlag 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 Metern*

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

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.

- (18) Das steigende Risiko eines Sohldurchschlages ist aber nur eine Folge, ein Symptom des Geschiebedefizits und der dadurch verursachten Sohlerosionen. Es wäre unzureichend, sich auf lokale Kolksicherungen zu beschränken. Die primäre Voraussetzung für die Absicherung des Nationalparks und der relevanten wasserwirtschaftlichen Nutzungen (über das Grundwasser), mithin die Absicherung öffentlicher Interessen (iSd §105 WRG), liegt in der Implementierung einer langfristig und vollständig funktionsfähigen Geschiebebewirtschaftung (u.a. ausreichende Geschiebezugaben).
- (19) Es ist (aus dem WR-Bescheid) nachweisbar, dass die Wasserrechtsbehörde bei Genehmigung des Kraftwerkes Freudenau davon ausgegangen ist, dass die Wasserspiegel innerhalb der Erhaltungsstrecke mit Ausnahme weniger Zentimeter stabil gehalten werden können (bezogen auf relevante Referenzdurchflüsse, etwa RNQ und MQ). Diese Voraussetzung wurde stark und auf gesamter Länge der Erhaltungsstrecke verletzt, damit werden wasserwirtschaftlich und ökologische relevante Voraussetzungen (die damals für die Stadt Wien und zahlreiche andere Parteien entscheidend waren) permanent verletzt, und die Diskrepanzen (zwischen Erwartung und Realität) nimmt im Lauf der Zeit weiter zu.
- (20) Ein zentrales Thema für die Nichterfüllung wasserrechtlicher Vorgaben und den Geschiebeaustrag aus der Erhaltungsstrecke waren zumindest bis 2018 die unzureichenden Aufnahmebreiten (der Stromgrundaufnahmen) der VHP; somit wurden die Sohlerosionen in Randbereichen übersehen bzw. ignoriert. Durch etwas breitere Sohlaufnahmen der viadonau konnte dies 2018 nachgewiesen werden (BMNT, 2018), aber auch diese Aufnahmen decken den geschiebeaktiven Teil der Sohle nicht vollständig ab. Daher ist das damals erkannte Defizit (von rd. 45.000 m³/a) nur als Untergrenze zu verstehen. Noch gravierender ist, dass die VHP-Aufnahmen der letzten Jahre wieder viel zu geringe Breiten abdecken, was unter Bezug auf die Methode (Einsatz von Messbooten) und auch nach Aussagen der VHP-VertreterInnen nicht verbessert werden kann. Aus diesem Grund ist ein tatsächlich funktionsfähiges Zielkriterium, und zwar das Halten genau definierter Referenzwasserspiegel (z.B. für RNQ und MQ) wasserrechtlich verbindlich zu implementieren. Da die Differenzen der letzten Jahrzehnte (ab 1996) wasserrechtlich unerwartet und nicht akzeptabel waren und öffentliches Interesse (iSd § 105 WRG) durch diese Wasserspiegelabsenkungen gefährdet bzw. verletzt wird, ist (über eine angemessene Frist) die Wiederherstellung der Situation gem. KWD-1996 erforderlich.

*& a floh & a fliang
& de san so schwa zum kriang
hed da floh de fliegl vo da fliang
war a nu schware zum kriang
(Attwenger, aus: pflug)*

1 Allgemeines und Zielsetzung

Auftraggeber dieser Studie ist die Nationalpark Donau-Auen GmbH.

Diese Studie schließt unmittelbar an die Studie „Untersuchung zur Sohlerosion der Donau östlich von Wien über den Zeitraum 1996/2020 und damit zusammenhängende Änderungen der mittleren Grundwasserstände an donaunahen Messstellen“ (im Folgenden mit Klasz, 2023 bezeichnet)² an, indem zusätzliche Daten (für den Zustand bis einschließlich 2023) berücksichtigt werden, sie ist auch vor dem Hintergrund anderer, früherer Untersuchungen (u.a. auch an BMNT, 2018) zu sehen. Der Bericht ist aber so aufgebaut und formuliert, dass er im Wesentlichen für sich verstanden werden kann.

Zielsetzung ist die Untersuchung der Sohleintiefungen bzw. damit verbundenen Wasserspiegelabsenkungen in der österreichischen Donau stromab des Kraftwerkes Freudenau, und im Besonderen die Zusatzfrage, ob für die letzten Jahre ein Trendwechsel zu erkennen ist. Zum letztgenannten Ziel, dem Erkennen allfälliger Trendbrüche, werden gegenüber der ersten Untersuchung (Klasz, 2023) zusätzliche Methoden (Standard Normal Homogeneity-Test, Chow-Test) eingesetzt.

1.1 Vorgeschichte und Veranlassung

Im Oktober 2023 wurde im Auftrag des Nationalparks Donau-Auen die Studie „Untersuchung zur Sohlerosion der Donau östlich von Wien über den Zeitraum 1996/2020 und damit zusammenhängende Änderungen der mittleren Grundwasserstände an donaunahen Messstellen“ fertiggestellt und an die Wasserrechtsbehörde und andere mit der Frage befassten Institutionen (Verbund Hydro Power; via-donau; Ministerium für Klimaschutz, Umwelt, Energie, Mobilität, Innovation und Technologie; Wasserwirtschaftliche Organe der Stadt Wien und des Landes Niederösterreich) weitergeleitet.

Die Datengrundlage für diese Studie reichte von 1996 (Teilstau am Kraftwerk Freudenau und Beginn der Geschiebezugaben im KW-Unterwasser; Gründung des Nationalparks Donau-Auen) bis einschließlich 2020; letzteres war das letzte Jahr, für das (über den Hydrographischen Dienst, eHYD) geprüfte Daten (zu Abflüssen und Pegelständen in der Donau) verfügbar waren. In Reaktion auf die Studie wurde mehrfach darauf hingewiesen (u.a. auch von VertreterInnen der Wasserrechtsbehörde), dass die Erhöhung der VHP-Geschiebezugaben erst 2018/2019 wirksam geworden ist und eine Untersuchung bis 2020 für das Erkennen von Trendbrüchen kaum ausreichen könne.

Kurz nach Fertigstellung der Studie (bzw. nach der ersten Sitzung des Arbeitskreises im Ministerium) wurden über eHYD die Daten für 2021 verfügbar und für eine Veröffentlichung zum Thema (Klasz und

² Klasz, G. (2023): Untersuchung zur Sohlerosion der Donau östlich von Wien über den Zeitraum 1996/2020 und damit zusammenhängende Änderungen der mittleren Grundwasserstände an donaunahen Messstellen. Veröffentlicht in der Wissenschaftliche Reihe des Nationalparks Donau-Auen, Heft 76 /2024.

Baumgartner, 2024)³ auch genutzt. Außerdem hat sich herausgestellt, dass über Anfrage des Nationalparks bei viadonau auch vorläufig geprüfte („plausibilisierte“) Wasserstands- und Abflussdaten für 2022 und 2023 bezogen werden konnten. In einer späteren Phase dieser Bearbeitung wurden schließlich auch die Daten aus 2022 über eHYD freigeschaltet und damit allgemein verfügbar. Mit dieser nun erweiterten Datengrundlage, also bis einschließlich 2023 (und davon geprüfte Daten bis 2022), werden im Folgenden alle pegelbezogenen Auswertungen aktualisiert, unter Beibehaltung der ursprünglich entwickelten Methodik.

Die Untersuchungen zu den Trends im Grundwasser werden für Zeitreihen bis einschließlich 2022 (Reihe 1996/2022) durchgeführt.

Gegenüber der ersten Bearbeitung (Stand Oktober 2023) werden zusätzlich spezielle Bruchpunkts- bzw. Homogenitätstests (mittels Standard Homogeneity Test, vgl. Wijngaard et al., 2003)⁴ angewandt. Damit können im Rahmen einer Teststatistik Bruchpunkte detektiert werden; falls sie nicht vorliegen wird die Nullhypothese („es gibt keine derartigen Bruchpunkte in der Zeitreihe“) beibehalten, also im Sinn einer Wahrscheinlichkeitsaussage bestätigt. Diese Methode wird, weil die Zeitreihen bereits durch die Trends inhomogen sind, die Methode hier also auf Grenzen stößt, durch einen anders fundierten Bruchpunkt-Test (eine spezielle Form des F-Tests), den Chow-Test (Chow, 1960)⁵ ergänzt.

1.2 Auflistung der Ergänzungen bzw. Änderungen gegenüber der Studie 2023

- Für die Trendanalysen zu den Wasserständen und Abflüssen in der Donau werden Daten bis einschließlich 2023 verwendet; die gegenüber der ersten Version der Studie (Klasz, 2023) ergänzten Daten für 2021 und 2022 sind mittlerweile als geprüfte Daten über den Hydrographischen Dienst (eHYD) verfügbar bzw. wurden für 2023 von der viadonau als noch nicht geprüfte, aber bereits plausibilisierte Daten zur Verfügung gestellt (vorbehaltlich allfälliger Korrekturen im Zuge einer endgültigen Prüfung).
- Für die Trendanalysen zu den Grundwasserständen (donaunahe Messstellen) werden Daten bis einschließlich 2022 verwendet; die gegenüber der ersten Version der Studie (Oktober 2023) ergänzten Daten für 2021 und 2022 sind über den Hydrographischen Dienst (eHYD) verfügbar und gelten als geprüft.
- Für die Analyse der Trends im Grundwasser werden vier zusätzliche GW-Messstellen berücksichtigt; die Zahl der berücksichtigten donaunahen Stationen steigt damit auf 19.
- Die Untersuchung der Zusammenhänge (Regressionsmodelle) zwischen den GW-Monatswerten der einzelnen Messstellen und den Donau-Monatsmittelwerten (Pegel Hainburg) werden nun über die gesamte Untersuchungsperiode (1996/2022) und nicht bloß über einen Teilzeitraum vorgenommen.

³ Klasz, G., C. Baumgartner (2024): Trends bei Wasserständen und mittleren Abflüssen in der Donau östlich von Wien und donaunahen Grundwasserständen: Starke Effekte durch Sohlerosion und Klimawandel. Österreichische Wasser- und Abfallwirtschaft, doi.org/10.1007/s00506-024-01090-z.

⁴ Wijngaard, J.B., A.M.G. Klein Tank & G.P. Können (2003): Homogeneity of 20th century European daily temperature and precipitation series. International Journal of Climatology: A Journal of the Royal Meteorological Society, 23, 679-692.

⁵ Chow, G. C. (1960). Tests of equality between sets of coefficients in two linear regressions. Econometrica: Journal of the Econometric Society, 591-605.

- In der ersten Version der Studie (Oktober 2023) wurde als kritischer Wert für den Mann-Kendall-Test: $Z_{crit} = Z_{\alpha/2} = 1,708$ (für $\alpha = 10\%$; beidseitiger Test) gesetzt; dies ist die 95%-Quantile der t-Verteilung mit Freiheitsgrad $FG=25$ (Weber, 1983)⁶. Dieser Wert war aber etwas zu hoch, also zu streng gewählt, denn beim Mann-Kendall-Test⁷ handelt es sich um einen Permutationstest, bei dem die Varianz bekannt ist und nicht geschätzt werden muss. Es sollte also nicht (für kleine Stichproben) die t-Verteilung (mit dem jeweiligen Freiheitsgrad) verwendet werden, sondern die Standardnormalverteilung, hier mit der 95%-Quantile, und das ergibt $Z_{crit} = Z_{\alpha/2} = 1,645$; wie im Folgenden generell angewandt. Dies ist also ein etwas weniger strenger Grenzwert.
- Der Mann-Kendall-Test wird nun auch für die Zeitreihen der charakteristischen Wasserstände (Methode 1) angewendet, und nicht bloss für die Jahres-MW der Donaupegel und die Jahresmittel der GW-Stände. Dies liefert keine grundsätzlich neuen Erkenntnisse, erlaubt aber eine quantitative Absicherung (bzw. Überprüfung) der statistischen Signifikanz dieser Trends.
- Es wird eine ergänzende Untersuchung in Bezug auf die relativ großen und unplausiblen Unterschiede zwischen den Jahres-MQ der Pegeln Hainburg und Wildungsmauer durchgeführt, dies ist für die Interpretation etwas differierender Ergebnisse zu den MQ-Trends an diesen Pegelstellen relevant, nicht aber für die Frage der Erosionsraten an sich.
- Für die mittleren Grundwasserstände wird ergänzend eine synoptische Darstellung (Differenz der Jahresmittel gegenüber das Ausgangsjahr 1996 für alle GW-Messstellen) beigelegt (Abbildung 29).
- Einige ergänzend vorgenommenen Auswertungen, im Besonderen der Vergleich zwischen KWD-2010 und KWD-2020 (im Längenschnitt) sind hier nicht mehr enthalten, weil sie für die Diskussion und Interpretation der Befunde nicht benötigt werden. Diese Ergebnisse können bei Bedarf in der ersten Version der Studie (Klasz, 2023) nachgelesen werden, an diesen Auswertungen ändert sich nichts.
- Für die Zeitreihen zu den Donau-Pegelständen werden ergänzend Bruchpunkt- bzw. Homogenitätstests (SNHT: Standard Normal Homogeneity Test) und der Chow-Strukturbruchtest (eine spezielle Form des F-Tests) durchgeführt. Es werden dort auch die Änderungsraten der $w(RNQ)$ und $w(MQ)$ für die „kurzen“ Reihen (2018/2023) den Werten der Gesamtreihe (1996/2023) gegenübergestellt, und es werden diese Zeitreihen visuell nach Vorliegen von Trendbrüchen (speziell bei 2018 oder knapp danach) untersucht bzw. diskutiert (Kap. 4).
- Für die letzten Jahre („kurze Reihe“, 2018/2023) werden auch mittlere Abflüsse (bzw. die Abflussdauerlinie) und der Geschiebetransport (Angaben des Hydrographischen Dienstes für Hainburg Straßenbrücke; Werte bis 2022) ermittelt und mit den langjährigen Verhältnissen in Beziehung gesetzt (Kap. 5); dies ist für die Interpretation der Veränderungsraten dieser Phase wesentlich.

⁶ Weber, H. (1983): Einführung in die Wahrscheinlichkeitsrechnung und Statistik für Ingenieure. B. G. Teubner Stuttgart.
Die Berechnung dieser Werte (p-Quantile) wird auch durch diverse Computerprogramme (Excel, Statistikprogramme) geleistet.

⁷ Im Folgenden auch mit „MK-Test“ abgekürzt.

- Das Risiko eines Sohldurchschlages und die Erfordernisse der Sicherung von „Gefahrenkolken“ wird auf Basis bisher verfügbarer Informationen, Erfahrungen und Überlegungen detaillierter diskutiert (Kap. 6).
- Es wird unter Bezug auf den WR-Genehmigungsbescheid zur UW-Sicherung KW Freudenau gezeigt, dass die Behörde bei der Genehmigung des Kraftwerkes Freudenau explizit davon ausgegangen war, dass die Wasserspiegel (für gegebene Durchflüsse) innerhalb der Erhaltungsstrecke (mit Ausnahme weniger Zentimeter) stabil gehalten werden kann, was dann tatsächlich nicht gelungen ist (Kap. 7).
- Es wird das Problem der unzureichenden Aufnahmebreiten (Stromsohlaufnahmen), das zu den bis 2018 unerkannten Sohlerosionen (von zumindest ca. 45.000 m³/a) innerhalb der VHP-Erhaltungsstrecke geführt hat, detaillierter diskutiert; im Besonderen wird gezeigt, dass dieses Problem weiterhin besteht, dass also Sohlerosionen weiterhin nicht vollständig erfasst werden, und es wird die Vorgabe eines alternativen Zielkriteriums (Erreichen bzw. Halten von Zielwasserspiegeln für RNQ und MQ) argumentiert (Kap. 8).
- Mit dem neuen 9. Kapitel wird der Versuch einer gesamtheitlichen Bewertung der Geschiebewirtschaftung unter Berücksichtigung der aktuellen Ergebnisse unternommen. Dies beinhaltet auch eine kurze Darstellung der Vorgeschichte und der wesentlichen Entwicklungen.
- Diverse kleinere editorische Änderungen bzw. Ergänzungen.
- Die Zusammenfassung wird aktualisiert (wo sich Zahlenwerte geändert haben) und ergänzt (zusätzliche Auswertungen).

1.3 Editorische Hinweise

Diese Studie wurde gänzlich ohne Assistenz durch „künstliche Intelligenz“ (hoffentlich aber mit ausreichend natürlicher Intelligenz) erstellt.

Im Gegensatz zur ersten Version der Studie (Klasz, 2023) sind die wichtigsten Zeitreihen (Donaupegel, Methode 1 und 2) bereits im Bericht und nicht bloß im Anhang enthalten. Dem Nachteil, dass diese Abbildungen etwas verkleinert werden mussten, steht der Vorteil der besseren Lesbarkeit der Studie entgegen. Im Anhang A2 sind die Plots dieser Zeitreihen dann aber noch einmal enthalten, dort zusätzlich mit den früheren KWD-Wasserständen (gem. KWD-1985, KWD-1996, KWD-2010 und KWD-2020) und in größerer Darstellung (Querformat).

1.4 Untersuchungszeitraum und Untersuchungsbereich

Die Untersuchung zu den Verhältnissen in der Donau erstreckt sich auf den Zeitraum zwischen 1996 (Teilstau am Kraftwerk Freudenau im März 1996; Gründung des Nationalparks im Oktober 1996) und 2023 (Daten-Verfügbarkeit). Für die Auswertungen zum Grundwasser werden die Daten zwischen 1996 und 2022 berücksichtigt.

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 generell für die Periode ab 1996 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.

2 Hydrographisch gestützte Untersuchung zur Sohlstabilität (Trendanalysen) für den Zeitraum ab 1996

2.1 Zur 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. Tabelle 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 (vgl. im Besonderen auch Kap. 4).

2.2 Pegelstellen

Die Untersuchung wird für die in Tabelle 1 angegebenen Pegelstellen durchgeführt.

Tabelle 1: Pegelstellen (Donau stromab des KW Freudenau) und zugehörige Informationen; PNP = Pegelnullpunkt; L= linksufrig; R= rechtsufrig; HJB = Hydrographische Jahrbücher

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 bzw. viadonau). Die Daten zum KW-Freudenau-UW-Pegel wurden von der Verbund Hydro Power zur Verfügung gestellt.

Für die Pegelstellen Orth und Thebnerstraßl liegen Daten erst ab 2003 bzw. 2000 vor; für sie erfolgen die Auswertungen also mit verkürzten Reihen.

Neben den über eHYD verfügbaren Daten werden auch noch Daten für 2023, die noch nicht vom Hydrographischen Zentralbüro (HZB) freigegeben wurden, von der viadonau bzw. (für einen Pegel) von Verbund Hydro Power übernommen und berücksichtigt. Die Daten von viadonau für 2023 sind als plausibilisierte, aber noch nicht abschließend geprüfte Daten zu verstehen.

2.3 Zur Methodik

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

2.3.1 Zur Methode 1

Für alle in Tabelle 1 angegebenen Pegelstellen liegen Tageswerte zu den Wasserständen vor (für Fischamend, Orth und Wolfsthal für einzelne Jahre nur Monatswerte)⁸. Zusätzlich sind Abfluss-Tageswerte für Wildungsmauer, Hainburg und Thebnerstraßl verfügbar. Für alle anderen Pegelstellen (u.a. Fischamend, 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 -Beziehung; auch „Pegelschlüssel“ genannt); diese werden visuell überprüft, ggf. (sehr selten) sind einzelne Ausreißer (einzelne Tageswerte) dabei, diese werden für die weitere Bearbeitung entfernt. Diese Daten werden für den Bereich zwischen Niederwasser und ca. 4000 m³/s über eine quadratische Funktion nach dem Ansatz von Fenton (2018)⁹ 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 $v = 1/2$ normalerweise (sehr) gute Anpassungen erzielt, solange man Durchflüsse unter dem bordvollen Abfluss, ($Q < Q_{bf}$) verwendet, was in diesem Donauabschnitt (mit $Q < 4000 < Q_{bf} \sim 5000$ m³/s) der Fall ist.

In Abbildung 1 wird dies beispielhaft für den Pegel Wildungsmauer gezeigt. Die quadratische Anpassung ist meist mit sehr geringen Streuungen 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 innerhalb einzelner Jahre seitens der viadonau die Pegelschlüssel etwas stärker verändert wurden, wenn also eine Mischung aus zwei Abflusskurven vorliegt, wobei auch diese Verschiebungen generell gering ausfallen. Das Bestimmtheitsmaß R^2 ist auch dann hoch, fast immer 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 Fischamend und Marchmündung gem. KWD-2010) bzw. 1049 m³/s (RNQ gem. KWD-2010 flussab der Marchmündung) und für $Q=1930$ m³/s (MQ flussauf der Marchmündung gem. KWD-2010) bzw. 2068 m³/s (MQ gem. KWD-2010 flussab der Marchmündung) bestimmt.

Für den Pegel Kraftwerk Freudenau UW (stromauf der Zubringer Schwechat und Fischa gelegen) werden charakteristische Abflüsse von 970 und 1910 m³/s zugrunde gelegt.

⁸ 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 Monats-NQ bzw. Monats-NW verwendet).

⁹ Fenton, J. (2018): On the generation of Stream rating curves; Journal of Hydrology (564) 748-757.

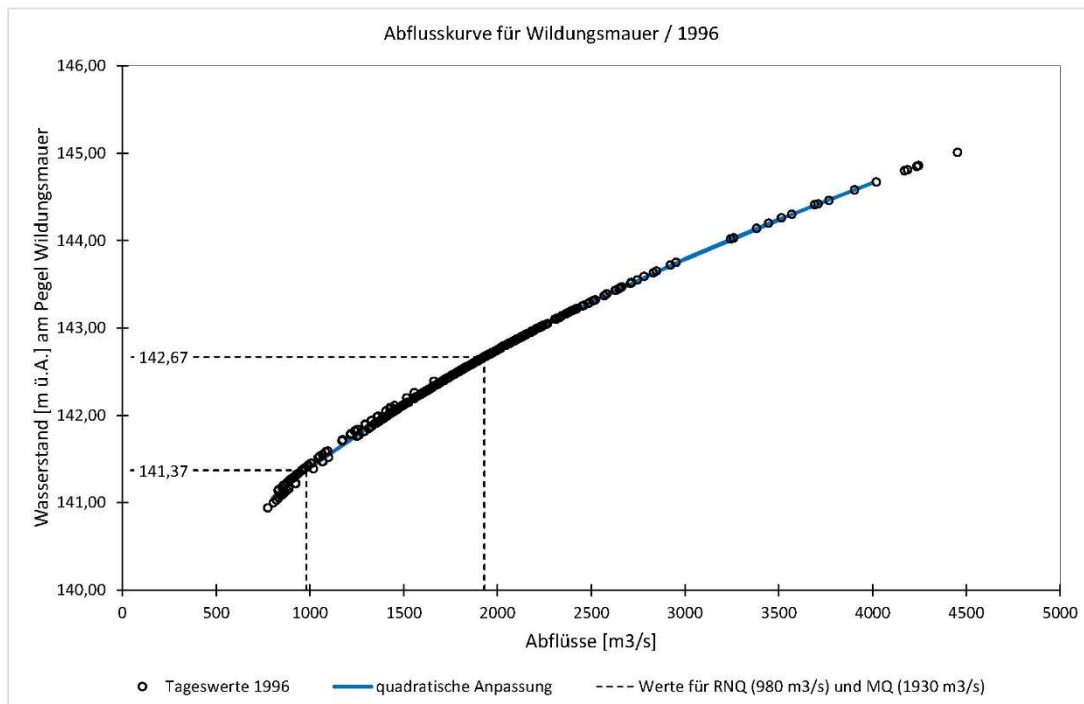


Abbildung 1: Aus den Daten (des Hydrographischen Dienstes) rekonstruierte Abflusskurven (w/Q -Beziehung) für den Pegel Wildungsmauer und das Jahr 1996. Die eingetragenen Tageswerte (Wasserstands- und Abfluss-Tagesmittel) werden durch eine quadratische Funktion (vgl. Fenton, 2018) angepasst, man erkennt hier im unteren Abflussbereich eine kleinere 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 ($980 \text{ m}^3/\text{s}$) und MQ ($1930 \text{ m}^3/\text{s}$). Das Bestimmtheitsmaß ist hier $R^2 = 0,999$.

Die damit erhaltenen Wasserstände (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. Abbildung 2 (für Pegel Wildungsmauer) bzw. Abbildung 6 bis Abbildung 13 (alle untersuchten Pegelstellen), mit den KWD-Werten (aus 1985, 1996 und 2010) verglichen (Anhang A2), und sie werden im zeitlichen Verlauf im Sinn linearer Regressionsmodelle angepasst. Damit ergeben sich für Wildungsmauer Änderungsraten (Steigungen im linearen Modell: $\vartheta_{w(MQ)}$ bzw. $\vartheta_{w(RNQ)}$) von $-1,3 \text{ cm/a}$ (für $w(MQ)$) und von $-1,4 \text{ cm/a}$ (für $w(RNQ)$), sh auch Abbildung 2 und Tabelle 4.

Zusätzlich werden mit diesen Zeitreihen Trendanalysen auf Grundlage des Mann-Kendall-Tests (immer mit Prewhitening) und dem Sen-Slope vorgenommen, vgl. Pkt. 2.3.2 und Anhang A1. Die relevanten Ergebnisse dieser Analysen werden in Tabelle 4 aufgelistet. Für Wildungsmauer findet man Sen-Slopes $\beta_{w(RNQ)}$ und $\beta_{w(MQ)}$ von $-1,2 \text{ cm/a}$ bzw. $-1,4 \text{ cm/a}$, also ähnlich wie die Steigungen aus den linearen Regressionsmodellen (sh. oben).

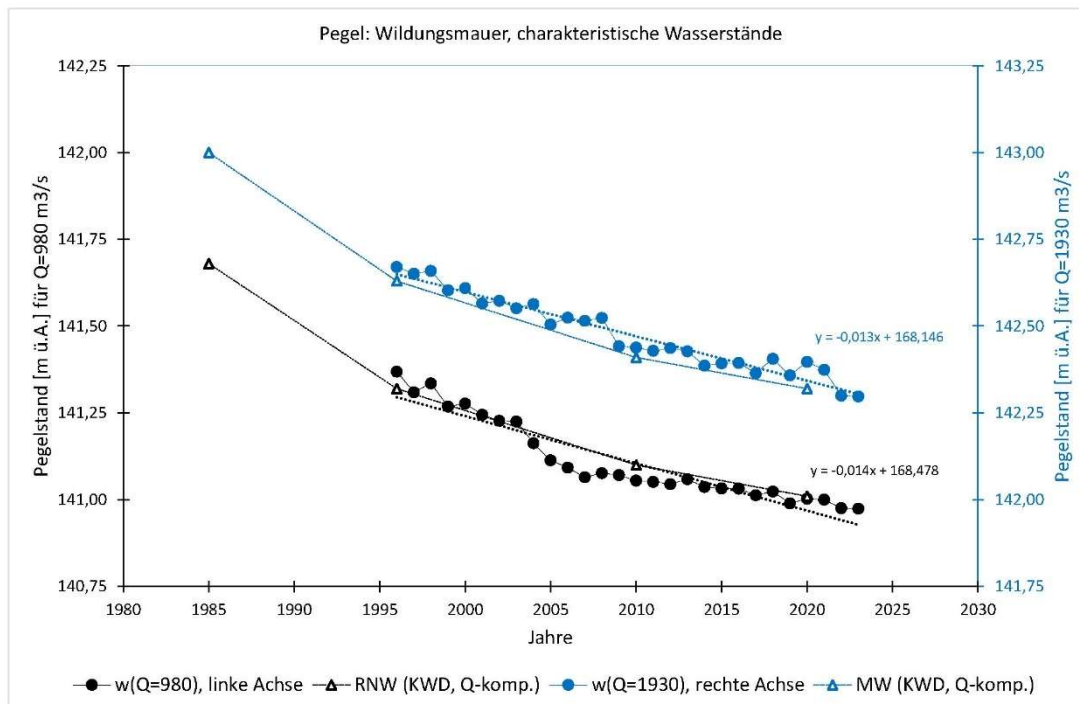


Abbildung 2: Zeitreihen der charakteristischen Wasserstände (für Abflüsse entsprechend RNQ-2010 und MQ-2010) für den Pegel Wildungsmauer und den Zeitraum 1996/2023. Eingetragen sind auch die RNW und MW gem. KWD-1985 (Q-kompensiert), KWD-1996 (Q-kompensiert), KWD-2010 und KWD-2020 (Q-kompensiert). Die Anpassung der MW-Zeitreihe hat im linearen Regressionsmodell eine Steigung (Trend) von ca. -1,3 cm/a und für RNW eine Steigung (Trend) von -1,4 cm/a.

Diese Methode mit den charakteristischen Wasserständen (Methode 1) $w(RNQ)$ und $w(MQ)$ 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 durch den Hydrographischen Dienst (viadonau) 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 bzw. 1930 m³/s; stromab 1049 bzw. 2068 m³/s) verwendet, sie liefern also rein morphologisch bedingte Veränderungen (bzw. rein morphologisch bedingte Trends).

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

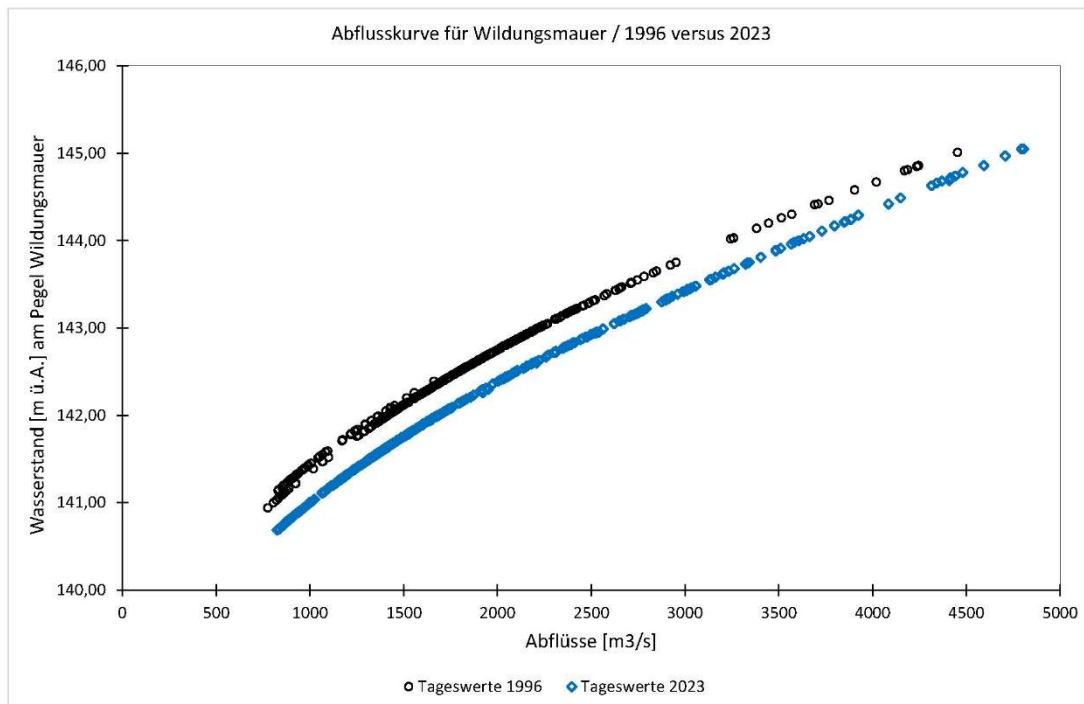


Abbildung 3: Aus den Daten rekonstruierte Abflusskurven (w/Q -Beziehung) für den Pegel Wildungsmauer und das Jahr 1996 (das entspricht der Kurve in Abbildung 1) im Vergleich [blau geplottet] mit dem Jahr 2023. Die Auswirkungen der Sohleintiefung (über 27 Jahre) sind unmittelbar erkennbar. Dies wird hier nur als Beispiel angegeben, im Rahmen der Bearbeitung (Methode 1) wurden Abflusskurven für alle Pegel und alle einzelnen Jahre erstellt.

2.3.2 Zur Methode 2

Für jede untersuchte Pegelstelle werden aus den Tageswerten (in Ausnahmefällen: aus den Monats-MW¹⁰) die Jahres-Mittelwerte (eben der Reihe 1996/2023) gebildet und damit eine Trenduntersuchung nach Mann-Kendall (Methodik: sh. [Anhang A1](#)) vorgenommen, für die Trendstärke wird die Sen-Neigung¹¹ ([Anhang A1](#)) ermittelt.

Der MK-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.

Solche Zeitreihen haben meist eine stärkere Lag-1-Autokorrelation r_1 , wodurch die Grundannahme einer Teststatistik (einzelne Werte statistisch unabhängig voneinander) verletzt wird. Autokorrelationen beim Mittelwasserabfluss und den dadurch bedingten MW (Methode 2) 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 Prewhitenings (Herausrechnen bzw. Entfernen des autokorrelativen Anteiles; numerische

¹⁰ Das betrifft die drei Pegelstellen Fischamend (vor 2006), Bad Dt. Altenburg (vor 2001) und Wolfsthal (vor 2000).

¹¹ 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.

Vorgangsweise sh. [Anhang A1](#)) durchgesetzt (u.a. Yue et al., 2002¹²; Petrow & Merz¹³, 2009; Blöschl et al., 2011¹⁴). Diese Studie erfolgt daher generell mit Prewhitening.

Im Rahmen dieser Studie wird (für den MK-Test) generell ein Signifikanzniveau von $\alpha = 0,10$ gewählt (beidseitiger Test, d.h. 5% an beiden Seiten)¹⁵. Damit ist der kritische Wert $Z_{\alpha/2} = 1,645$ (95%-Quantile Standardnormalverteilung; Weber, 1983) und die Nullhypothese H_0 („kein Trend“) wird für

$$|Z| > Z_{\alpha/2} = 1,645 \quad (\text{Gl. 2})$$

verworfen (weitere methodische Hinweise: [Anhang A1](#)). Das gewählte Signifikanzniveau wird häufig für hydrologische Untersuchungen gewählt (z.B. Birsan et al., 2005¹⁶, Petrow und Merz, 2009; Blöschl et al., 2011). Es kann gezeigt werden, dass die Wasserstands-Zeitreihen teilweise strengerer Anforderungen an das Signifikanzniveau (z.B. $\alpha = 0,05$) gerecht werden. Dies wird dann fallweise auch angemerkt (jeweils für die Auswertung mit Prewhitening).

Ein Beispiel (für Wildungsmauer) wird graphisch mit Abbildung 4 angegeben, die Graphiken zu allen untersuchten Pegelstellen werden in Abbildung 14 bis Abbildung 21 dargestellt, die numerischen Ergebnisse werden in Tabelle 5 aufgelistet.

¹² 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.

¹³ 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.

¹⁴ 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.

¹⁵ 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.

¹⁶ Birsan, M. V., Molnar, P., Burlando, P., & Pfaundler, M. (2005): Streamflow trends in Switzerland. *Journal of Hydrology*, 314 (1-4), 312-329.

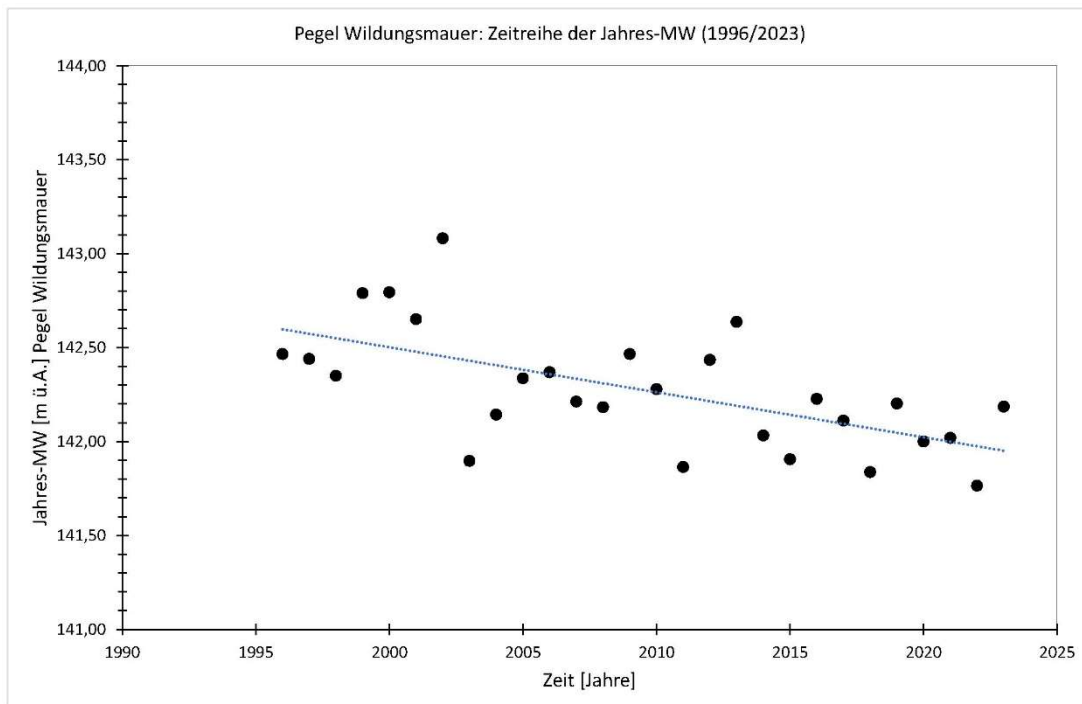


Abbildung 4: Zeitreihe der Jahres-MW für den Pegel Wildungsmauer und die Untersuchungsperiode 1996/2023. Eingetragen ist auch die Anpassung im Sinn eines linearen Regressionsmodells. Die damit verbundene Steigung kommt der Sen-Neigung nahe, die allerdings völlig anders ermittelt wird (vgl. [Anhang A1](#)); 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-Stationen (vgl. Kap. 3) 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“) $\beta_{MW,hy}$ 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 Gesamttrend abgezogen wird. Dies wird hier mit den Abflussdaten für Hainburg (und ergänzend auch für Wildungsmauer) durchgeführt, vgl. Tabelle 7. 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 $\beta_{MW,hy}$ umgerechnet, vgl. Kap. 2.3.5. Die morphologisch bedingte Trendstärke $\beta_{MW,m}$ [cm/a] ergibt sich schließlich aus der Differenz:

$$\beta_{MW,m} = \beta_{MW} - \beta_{MW,hy} \quad (\text{Gl. 3})$$

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

2.3.3 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-1985¹⁷, KWD-1996¹⁸, KWD-2010¹⁹ und die erst kürzlich veröffentlichten KWD-2020²⁰ berücksichtigt, dies primär zum Zweck des Vergleichs.

Dabei ist zu berücksichtigen, dass sich die diesen vier KWDs zugrundeliegenden Referenzabflüsse (RNQ, MQ) unterscheiden, vgl. Tabelle 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 Differenzwerten 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 (Abflusskurven) 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 $\Delta Q_{MW} = 1930 - 1935 = -5 \text{ m}^3/\text{s}$.

¹⁷ Wasserstraßendirektion (1986): Die kennzeichnenden Wasserstände der österreichischen Donau nach dem Stande vom 1. Jänner 1985. Herausgegeben im Selbstverlag der Wasserstraßendirektion.

¹⁸ Wasserstraßendirektion (1998): Die kennzeichnenden Wasserstände der österreichischen Donau. Nach dem Stande vom 31. Dezember 1996. Herausgegeben im Selbstverlag der Wasserstraßendirektion.

¹⁹ viadonau (2012): Die kennzeichnenden Wasserstände der österreichischen Donau. KWD 2010. Nach dem Stande vom 31. Dezember 2010. (digital verfügbare Version)

²⁰ 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. 2.3.5 (vgl. Tabelle 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.

2.3.4 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. Abbildung 23) und der zugehörigen Änderungsraten (Abbildung 22), direkt erkennbar.

Im Übrigen können die beiden Pegelstellen in der Grenzstrecke zukünftig auch für die Geschiebebewirtschaftung größere Bedeutung bekommen, denn sie zeigen, ob die in den letzten Jahren seitens der viadonau intensivierten Geschieberückführungen (speziell über die Geschiebefänge bei der Furt Treuschütt und bei Hainburg) eine stärkere Wirkung auf die Unterliegerstrecke haben bzw. ermöglichen diesbezüglich auch eine Quantifizierung und ggf. auch ein Steuerkriterium.

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

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 für diese Strecke und Untersuchungsperiode nicht der Fall.

Umgekehrt sind die Jahres-MQ ja bekannt (für Pegel Hainburg ab 1977; für Pegel Wildungsmauer ab 1996, vgl. Abbildung 5) und sie können analog zu den Wasserständen im Sinn einer Trendanalyse (MK-Test und Sen-Neigung) untersucht werden. Dies wird im Folgenden für die Reihe 1996/2023 und die beiden Pegel Hainburg und Wildungsmauer durchgeführt.

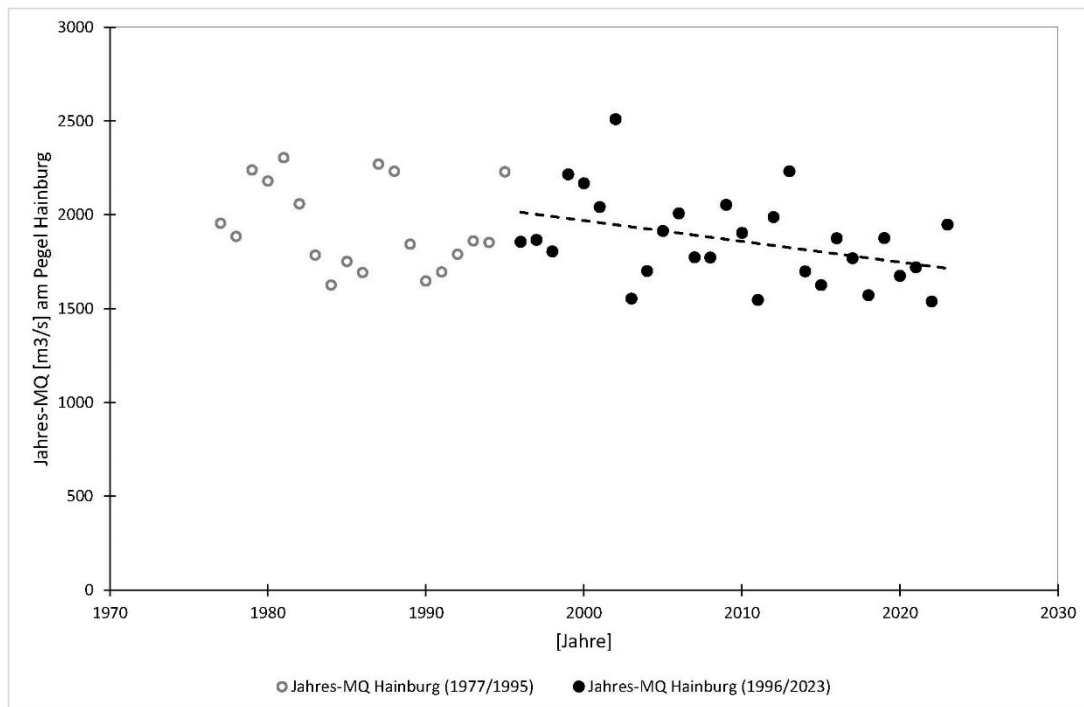


Abbildung 5: Zeitreihe der Jahres-MQ für den Pegel Hainburg und den Zeitraum 1996/2023. Eingetragen sind auch die (über Hydrographische Jahrbücher bzw. eHYD verfügbaren) Werte vor 1996, bis zurück zu 1977.

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.

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

wobei auf die unter Pkt. 2.3.3 genannte Beziehung (Neigung der Abflusskurve) zurückgegriffen werden kann. Die Ergebnisse dieser Auswertungen werden unter Pkt. 2.4.4 beschrieben. Im Prinzip ändern sich die Abflusskurven von Jahr zu Jahr, 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 Tabelle 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. 2.3.3.

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).

2.4 Ergebnisse und Diskussion zu den Trendanalysen

2.4.1 Wasserstands-Zeitreihen

Die Zeitreihen der charakteristischen Wasserstände (für RNQ und MQ) werden in Abbildung 6 bis Abbildung 13 und [Anhang A2](#) graphisch dargestellt (Methode 1), die Zeitreihen der Jahres-MW (Methode 2) in Abbildung 14 bis Abbildung 21.

Die daraus abgeleitete Änderungsraten für die untersuchten Pegelstellen (Sen-Slope und lineares Regressionsmodell) und zugehörige statistische Parameter werden in Tabelle 4 (Methode 1) und Tabelle 5 (Methode 2) aufgelistet. Die Ergebnisse (Änderungsraten) beider Methoden werden in Tabelle 6 gegenübergestellt und in Abbildung 22 im Längsverlauf graphisch dargestellt.

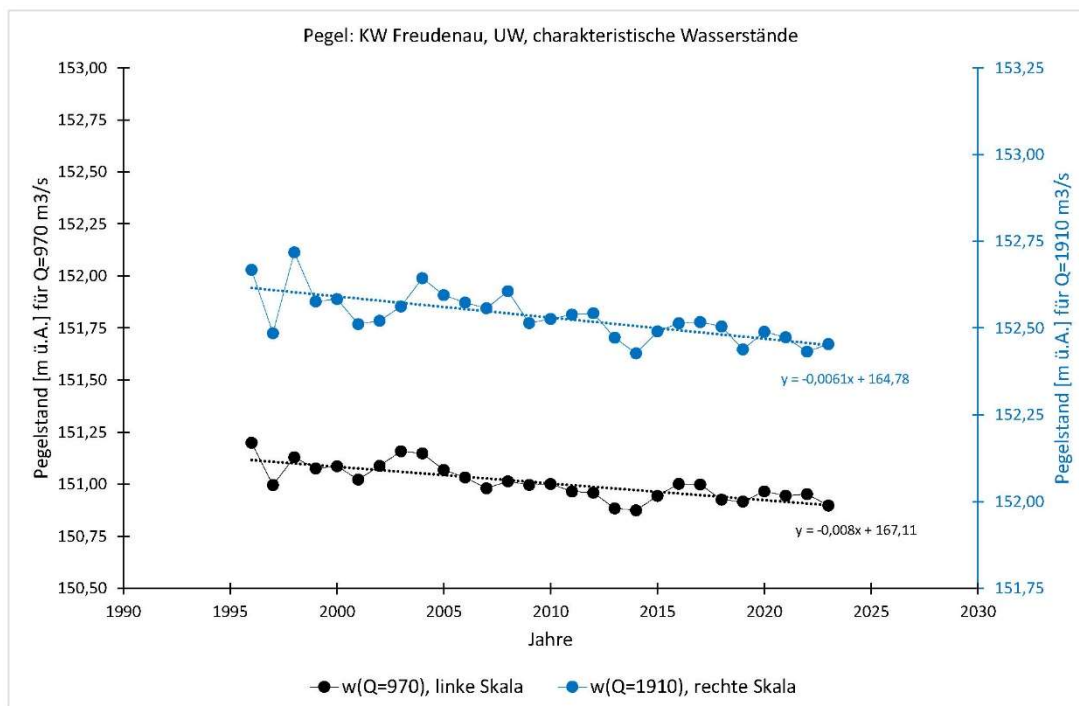


Abbildung 6: Zeitreihen der charakteristischen Wasserstände $w(RNQ)$ und $w(MQ)$ für den Pegel Kraftwerk Freudenau, UW und den Zeitraum 1996/2023.

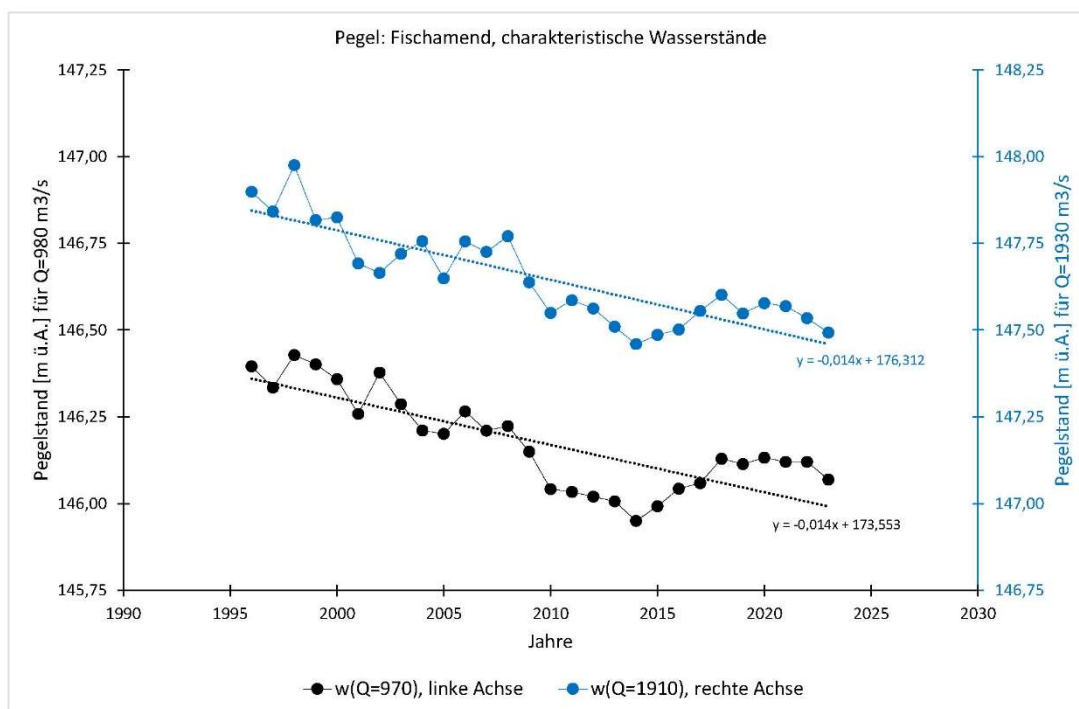


Abbildung 7: Zeitreihen der charakteristischen Wasserstände $w(RNQ)$ und $w(MQ)$ für den Pegel Fischamend und den Zeitraum 1996/2023.

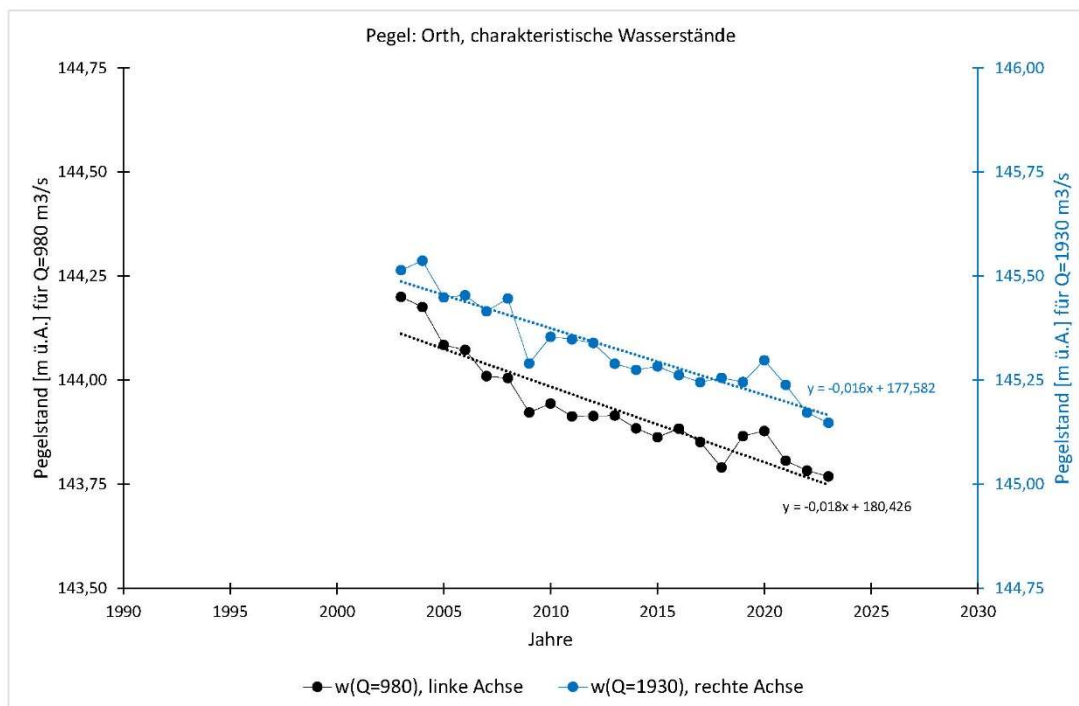


Abbildung 8: Zeitreihen der charakteristischen Wasserstände $w(RNQ)$ und $w(MQ)$ für den Pegel Orth und den Zeitraum 2003/2023 (verkürzte Reihe, keine Rohdaten vor 2003 verfügbar).

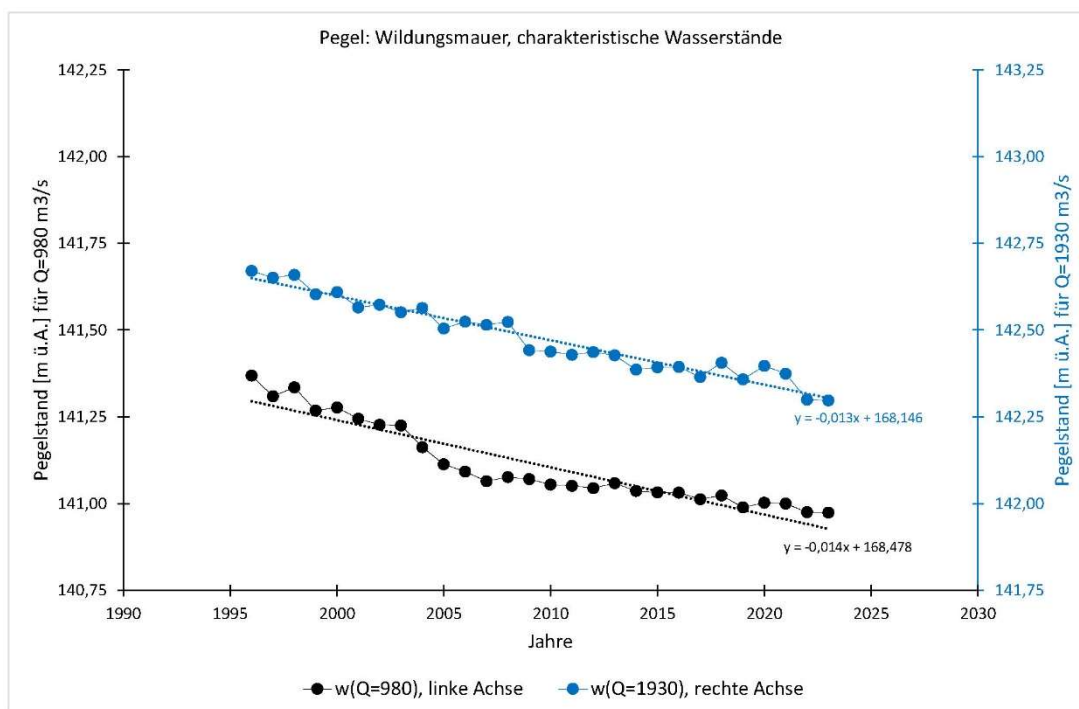


Abbildung 9: Zeitreihen der charakteristischen Wasserstände $w(RNQ)$ und $w(MQ)$ für den Pegel Willungsmauer und den Zeitraum 1996/2023.

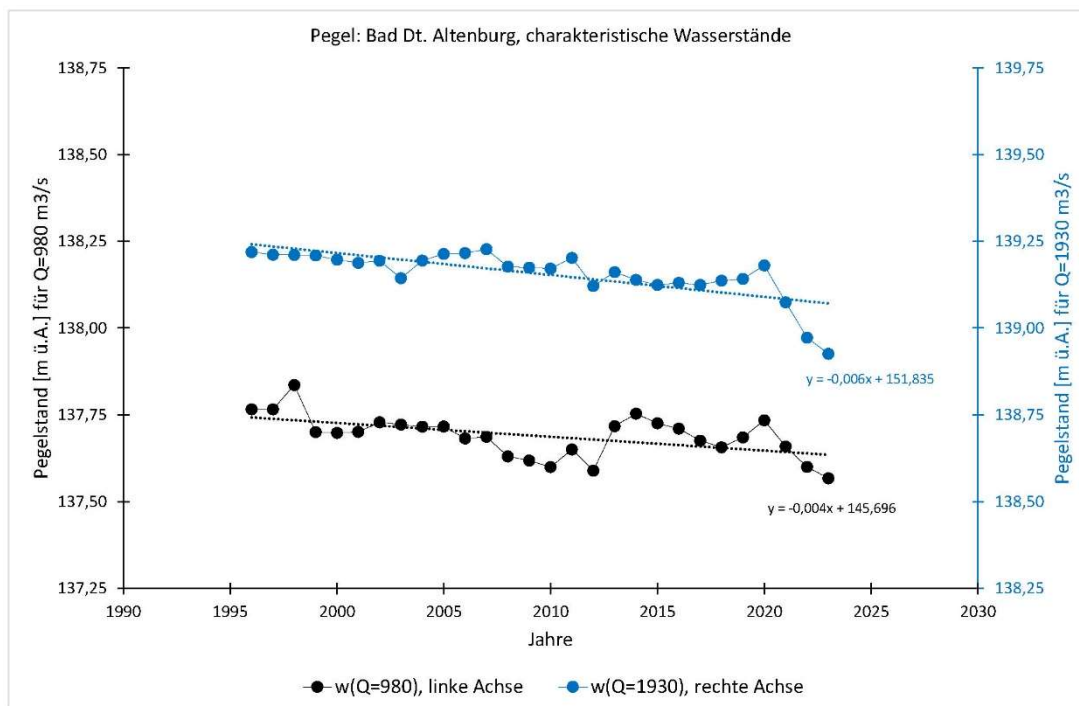


Abbildung 10: Zeitreihen der charakteristischen Wasserstände $w(RNQ)$ und $w(MQ)$ für den Pegel Bad Deutsch Altenburg und den Zeitraum 1996/2023.

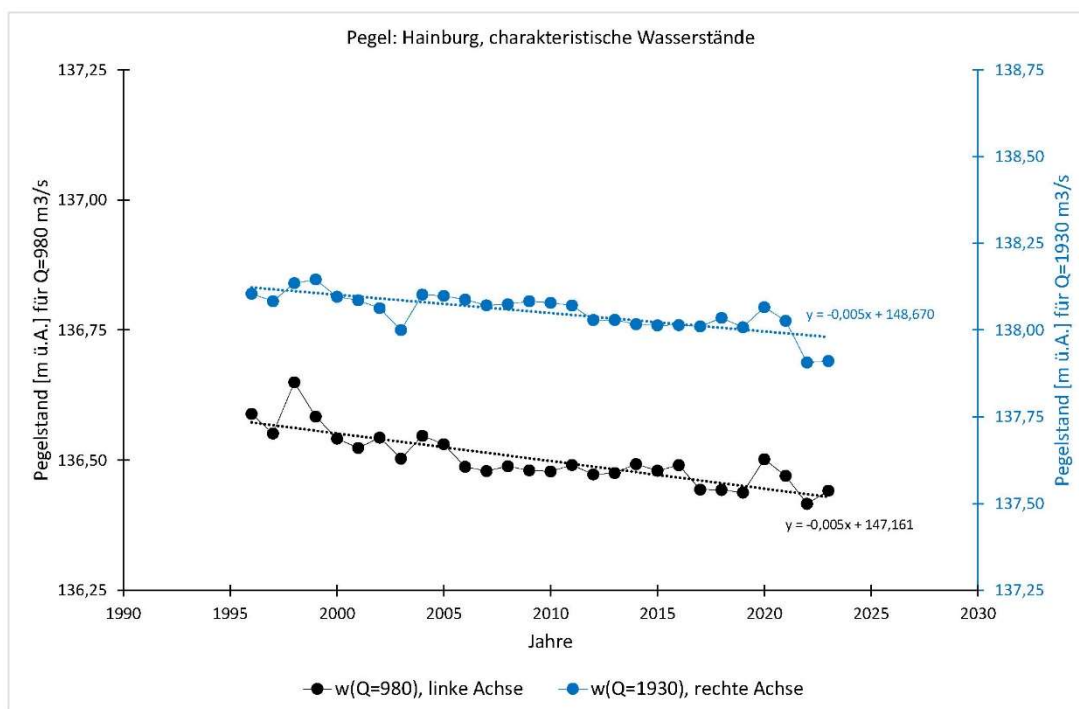


Abbildung 11: Zeitreihen der charakteristischen Wasserstände $w(RNQ)$ und $w(MQ)$ für den Pegel Hainburg und den Zeitraum 1996/2023.

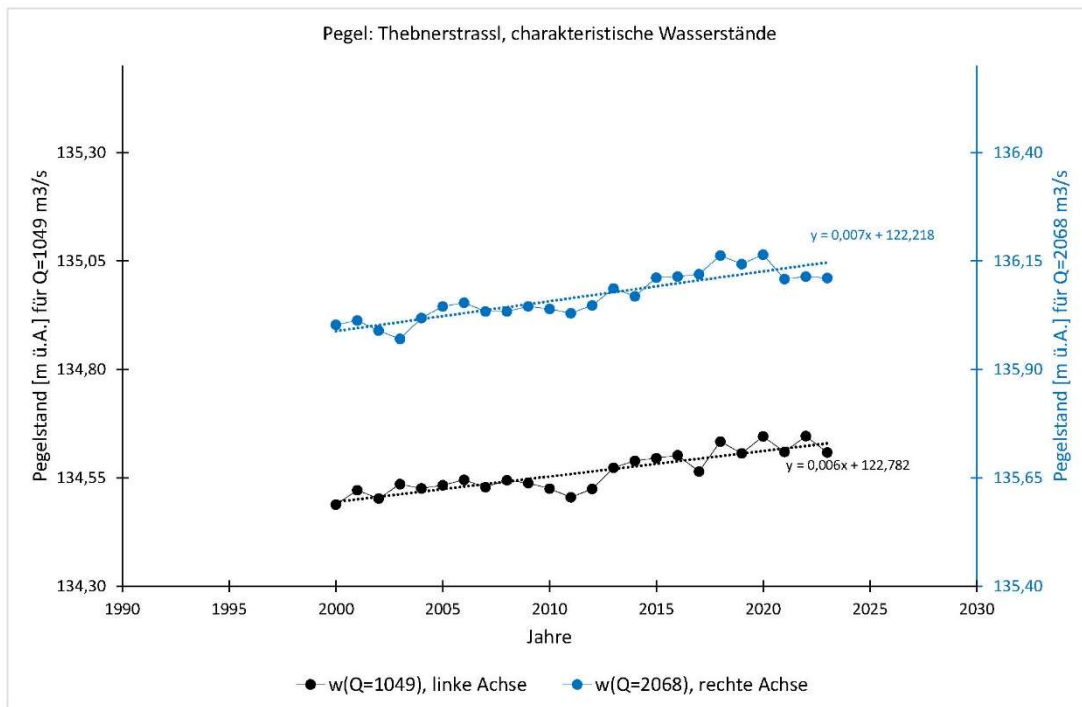


Abbildung 12: Zeitreihen der charakteristischen Wasserstände $w(RNQ)$ und $w(MQ)$ für den Pegel Thebnerstrassl und den Zeitraum 2000/2023 (verkürzte Reihe, keine Rohdaten vor 2000 verfügbar).

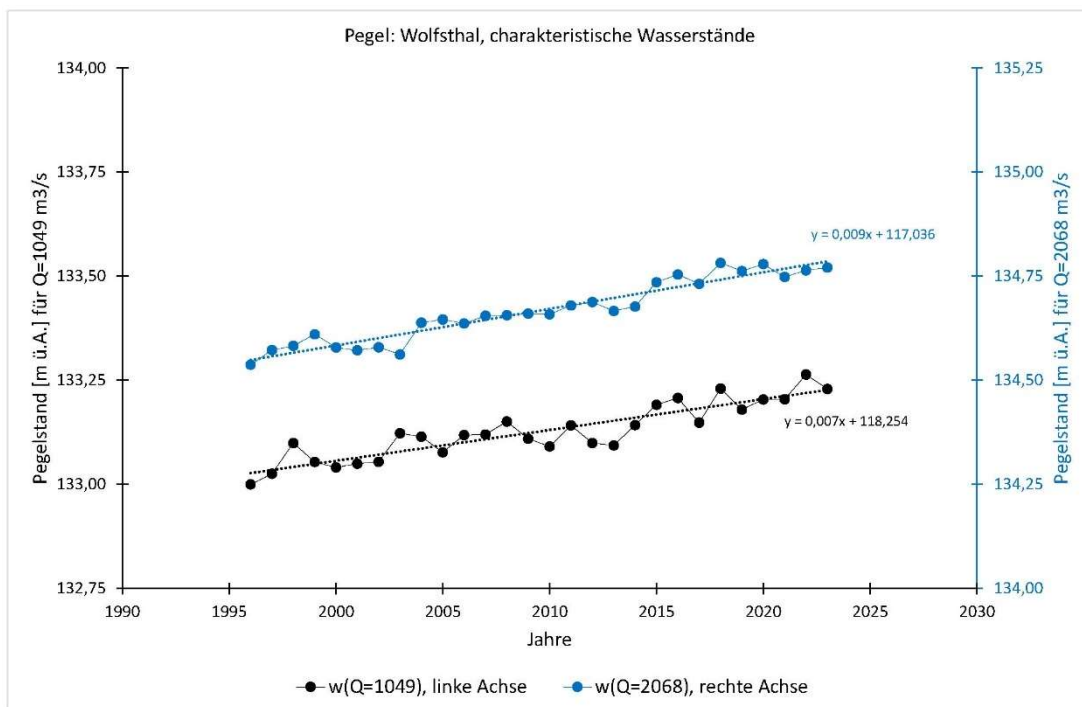


Abbildung 13: Zeitreihen der charakteristischen Wasserstände $w(RNQ)$ und $w(MQ)$ für den Pegel Wolfsthal und den Zeitraum 1996/2023.

In den verschiedenen Abbildungen, auch jenen zu den MW-Zeitreihen, sind auch die Anpassung im Sinn eines linearen Regressionsmodells aufgetragen. Die damit verbundenen Steigungen ($\vartheta_{w(RNQ)}$ und $\vartheta_{w(MQ)}$) kommt der Sen-Neigung ($\beta_{w(RNQ)}$ und $\beta_{w(MQ)}$) nahe, die allerdings völlig anders ermittelt wird (vgl. [Anhang A1](#)); diese Linien dienen hier nur zur Visualisierung des Trends.

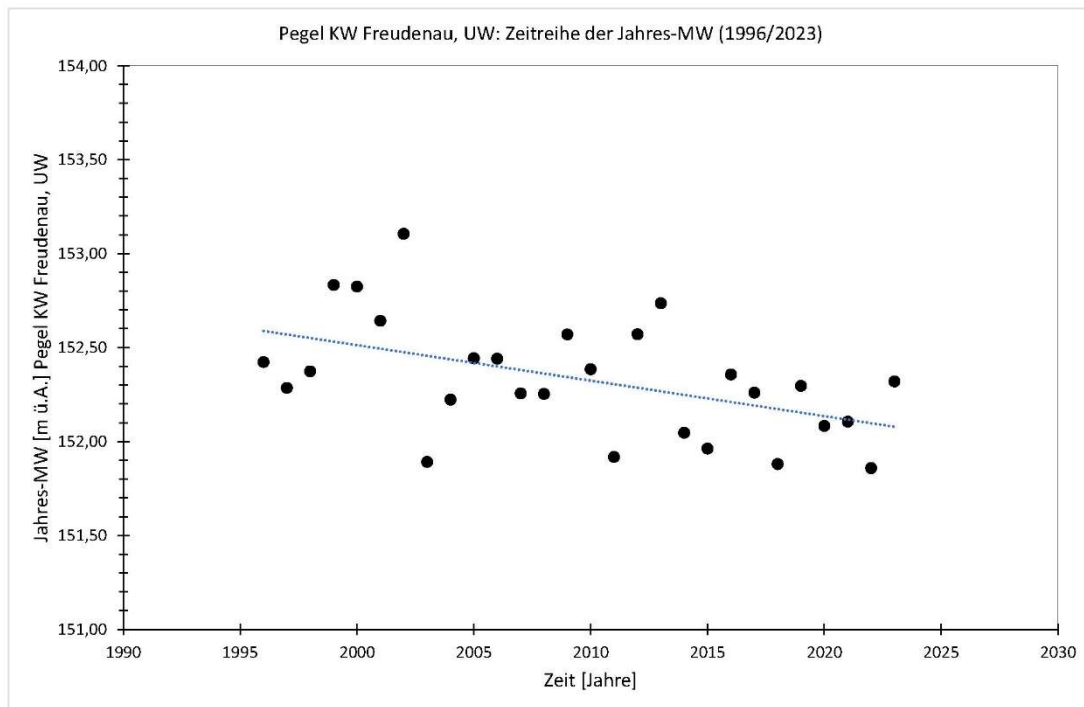


Abbildung 14: Zeitreihe der Jahres-MW für den Pegel Kraftwerk Freudenau - UW und den Zeitraum 1996/2023.

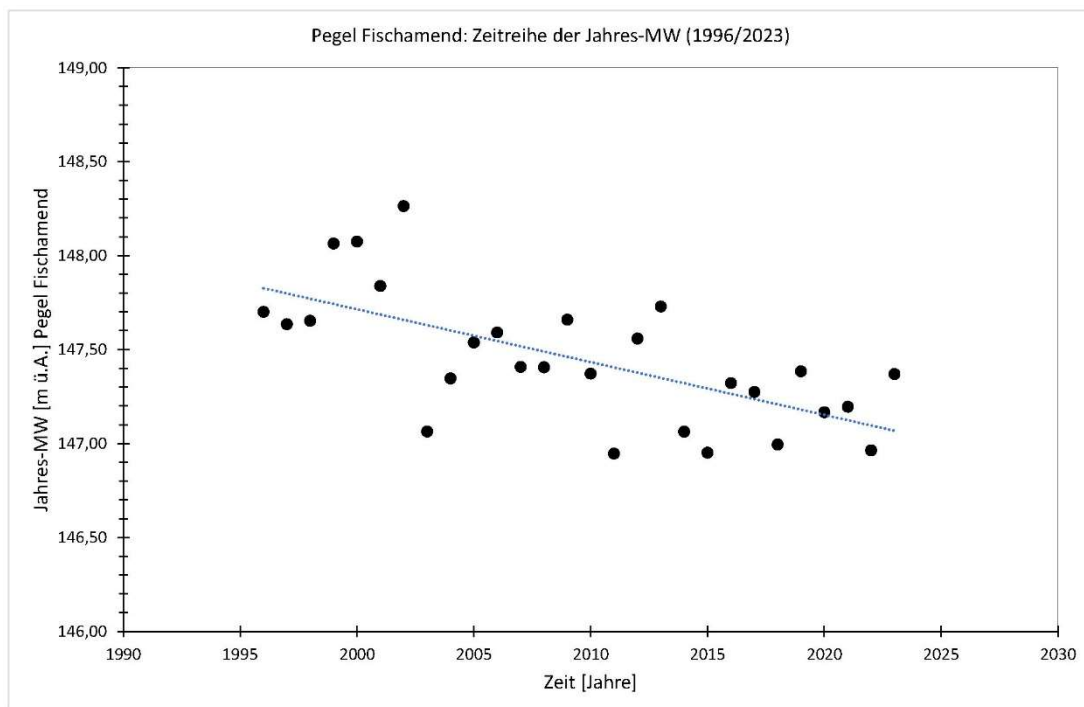


Abbildung 15: Zeitreihe der Jahres-MW für den Pegel Fischamend und den Zeitraum 1996/2023.

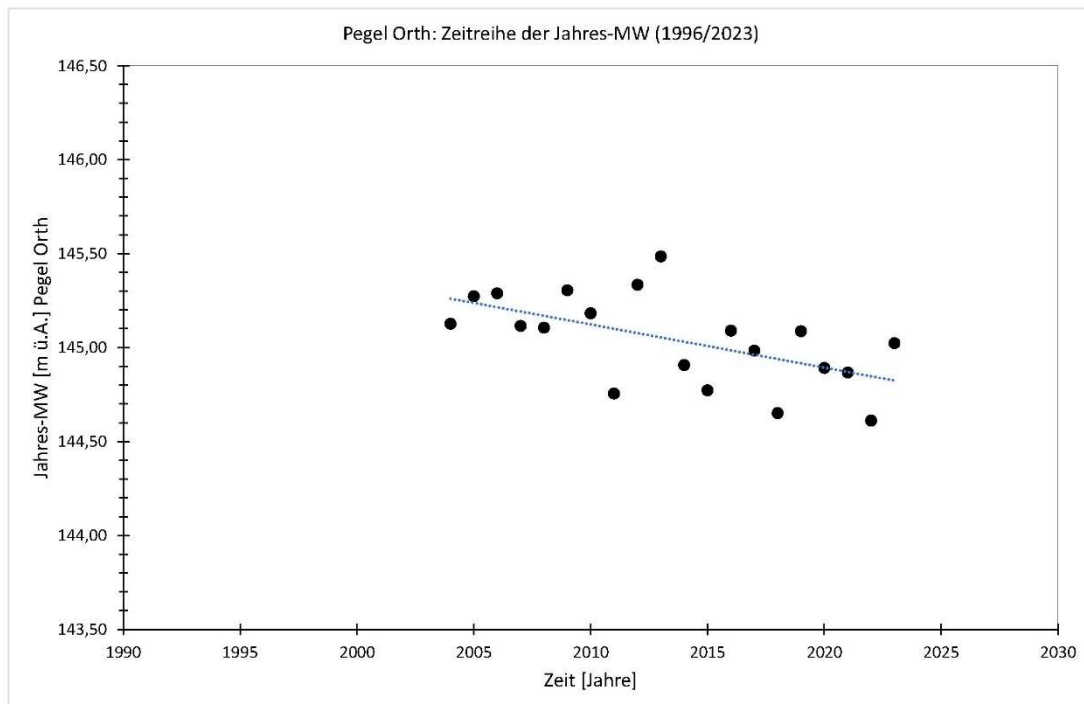


Abbildung 16: Zeitreihe der Jahres-MW für den Pegel Orth und den Zeitraum 2004/2023 (verkürzte Reihe).

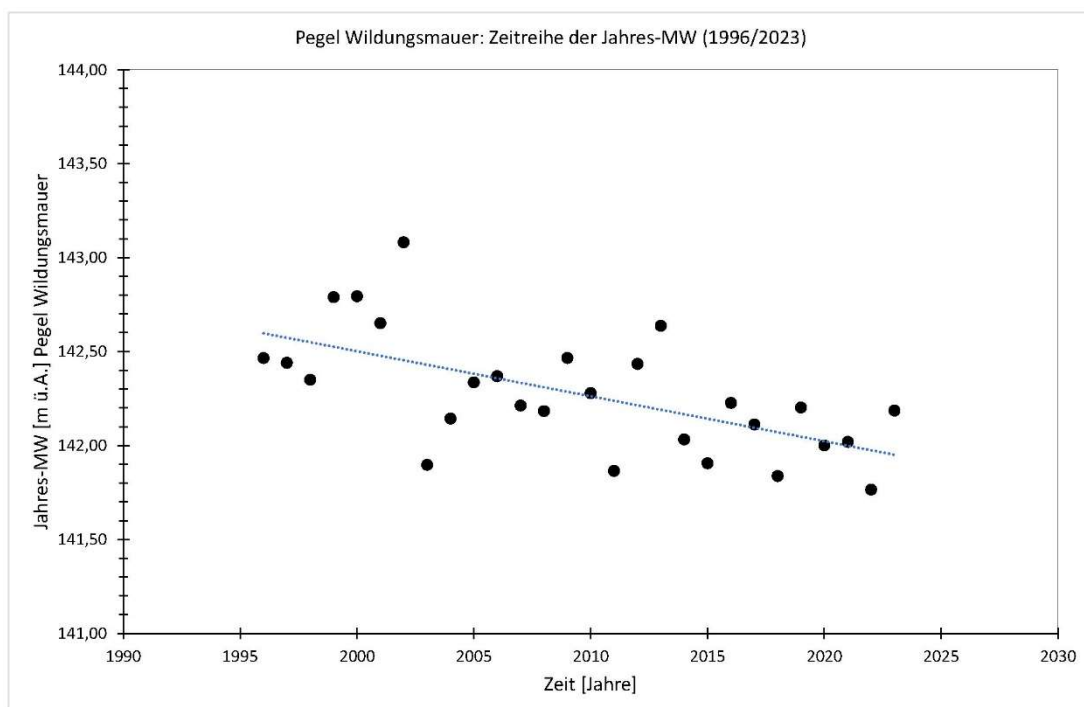


Abbildung 17: Zeitreihe der Jahres-MW für den Pegel Wildungsmauer und den Zeitraum 1996/2023.

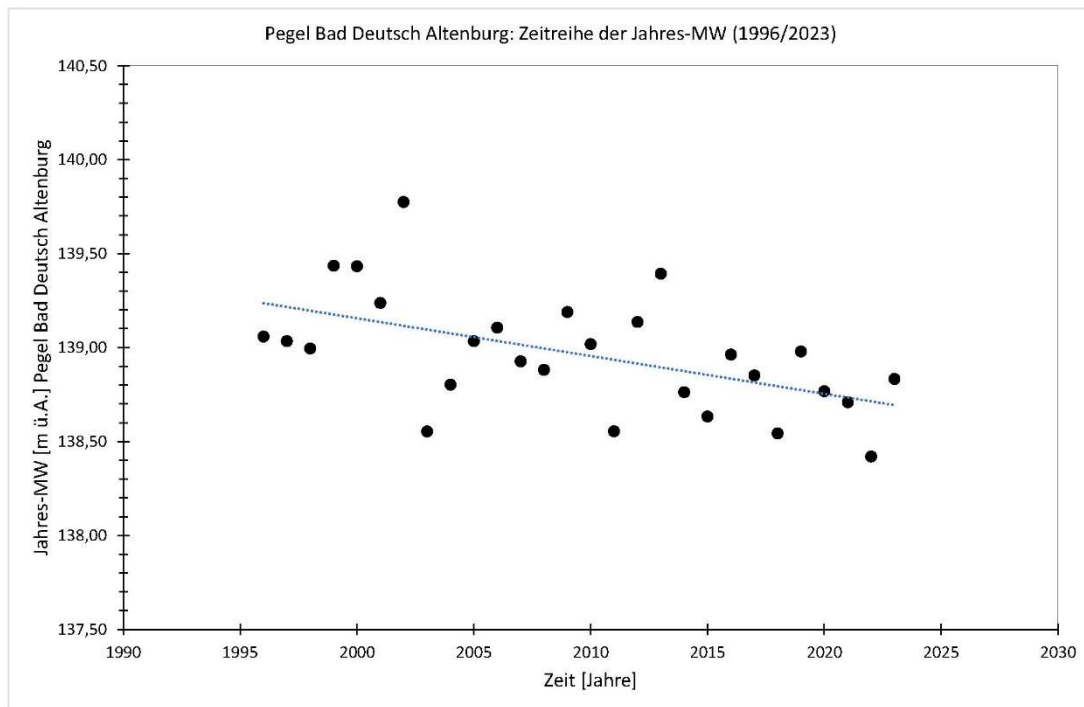


Abbildung 18: Zeitreihe der Jahres-MW für den Pegel Bad Deutsch Altenburg und den Zeitraum 1996/2023.

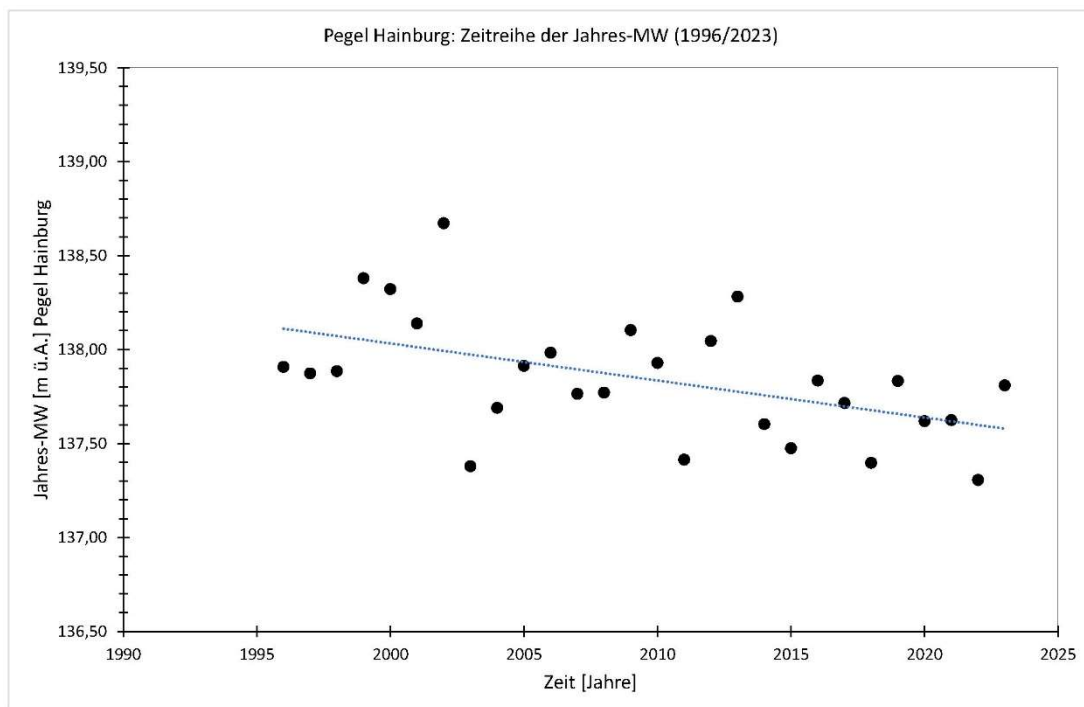


Abbildung 19: Zeitreihe der Jahres-MW für den Pegel Hainburg und den Zeitraum 1996/2023.

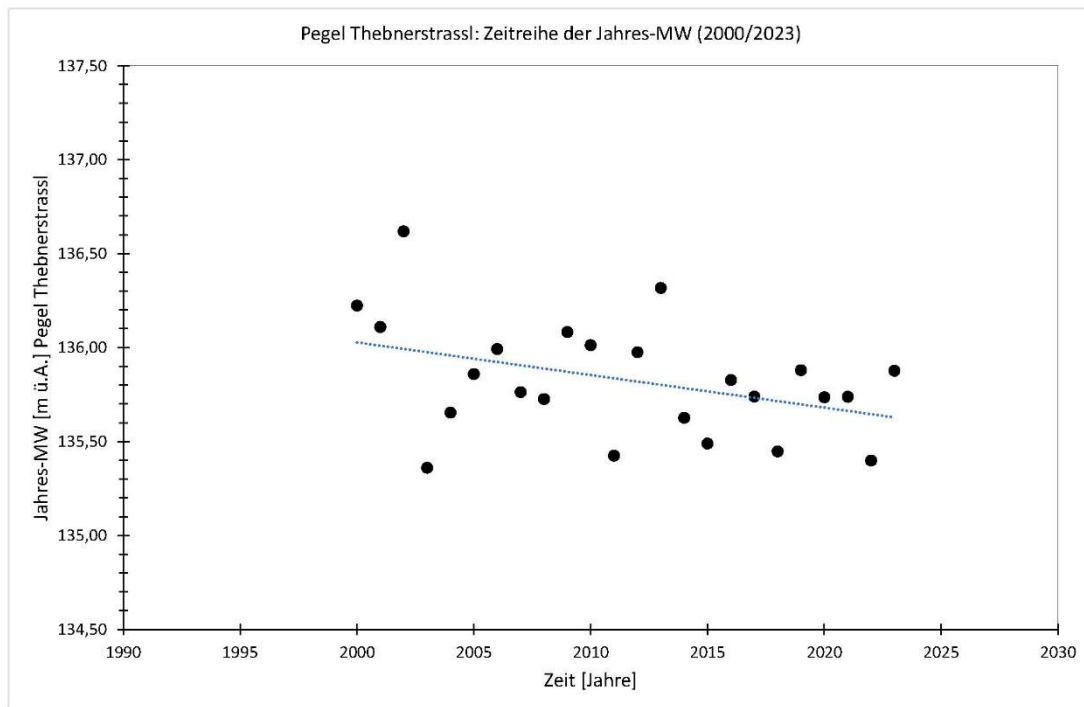


Abbildung 20: Zeitreihe der Jahres-MW für den Pegel Thebnerstraßl und den Zeitraum 2000/2023 (verkürzte Reihe).

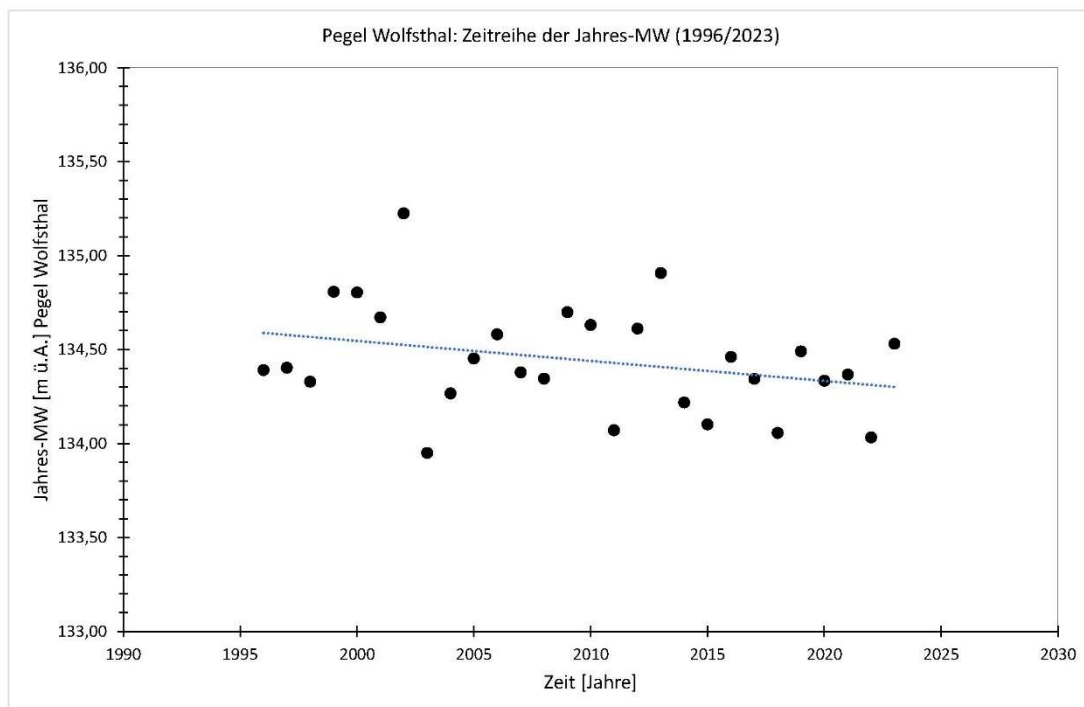


Abbildung 21: Zeitreihe der Jahres-MW für den Pegel Wolfsthal und den Zeitraum 1996/2023.

Tabelle 4: Trenduntersuchungen für Wasserstände an Pegelstellen der Donau, Reihe 1996/2023 (tw. kürzer), nach Methode 1 (Mann-Kendall-Test mit Prewhitening), also für charakteristische Wasserstände (RNW und MW gem. Referenzdurchflüsse der KWD-2010); $\beta_{w(RNQ)}$ und $\beta_{w(MQ)}$ sind die Trendstärken (Sen-Slopes), Z sind die zugehörigen standardisierten Prüfgrößen, $\vartheta_{w(RNQ)}$ und $\vartheta_{w(MQ)}$ sind die Neigungen im linearen Regressionsmodell (mit der Zeit als unabhängiger Variablen);

Pegel	Strom-km	Reihe	$w(RNQ)$			$w(MQ)$		
			Z [-]	$\beta_{w(RNQ)}$ [m/a]	$\vartheta_{w(RNQ)}$ [m/a]	Z [-]	$\beta_{w(MQ)}$ [m/a]	$\vartheta_{w(MQ)}$ [m/a]
KW Freudenau UW	1920,67	1996/2023	-4,485	-0,008	-0,008	-4,129	-0,006	-0,006
Fischamend	1907,90	1996/2023	-5,631	-0,012	-0,013	-4,998	-0,014	-0,014
Orth	1901,72	2003/2023	-5,103	-0,016	-0,018	-4,741	-0,017	-0,016
Wildungsmauer	1894,72	1996/2023	-6,579	-0,012	-0,014	-6,342	-0,014	-0,013
Bad Dt. Altenburg	1886,86	1996/2023	-3,655	-0,005	-0,004	-5,077	-0,005	-0,006
Hainburg	1883,92	1996/2023	-4,998	-0,005	-0,005	-4,880	-0,006	-0,005
Thebnerstraßl	1879,25	2000/2023	+3,795	+0,005	+0,006	+4,738	+0,006	+0,007
Wolfsthal	1874,84	1996/2023	+4,366	+0,007	+0,007	+5,749	+0,008	+0,009

Mit $|Z| > Z_{\alpha/2} = Z_{0,95} = 1,645$ (für die standardisierten Prüfgrößen) sind mit $\alpha=0,10$ (beidseitiger Test) die Trends für alle Pegeln statistisch signifikant; es soll hier angemerkt werden, dass diese Trends mit $|Z| > Z_{\alpha/2} = Z_{0,995} = 2,576$ auch mit $\alpha=0,01$, also mit einem deutlich strengeren Kriterium, für alle Pegeln statistisch signifikant ist.

Tabelle 5: Trenduntersuchungen für Wasserstände an Pegelstellen der Donau, Reihe 1996/2023 (tw. kürzer), nach Methode 2 (Mann-Kendall-Test mit Prewhitening), also für Jahres-MW; β_{MW} sind die Trendstärken (Sen-Slopes), Z sind die zugehörigen standardisierten Prüfgrößen, ϑ_{MW} sind die Neigungen im linearen Regressionsmodell (mit der Zeit als unabhängiger Variablen); $\beta_{MW,m}$ und $\beta_{MW,hy}$ sind die morphologisch bzw. hydrologisch bedingten Komponenten von β_{MW}

Pegel	Strom-km	Reihe	MW-Zeitreihen			Komponenten von β_{MW}	
			Z [-]	β_{MW} [m/a]	ϑ_{MW} [m/a]	$\beta_{MW,m}$ [m/a]	$\beta_{MW,hy}$ [m/a]
KW Freudenau UW	1920,67	1996/2023	-2,193	-0,018	-0,019	-0,004	-0,014
Fischamend	1907,90	1996/2023	-2,983	-0,026	-0,028	-0,012	-0,014
Orth	1901,72	2003/2023	-2,368	-0,030	-0,023	-0,016	-0,014
Wildungsmauer	1894,72	1996/2023	-2,904	-0,022	-0,024	-0,008	-0,014
Bad Dt. Altenburg	1886,86	1996/2023	-2,549	-0,020	-0,020	-0,006	-0,014
Hainburg	1883,92	1996/2023	-2,312	-0,019	-0,020	-0,005	-0,014
Thebnerstraßl	1879,25	2000/2023	-1,712	-0,017	-0,017	-0,003	-0,014
Wolfsthal	1874,84	1996/2023	-1,442	-0,011	-0,011	+0,003	-0,014

Mit Ausnahme von Wolfsthal sind auch die Trends für die Jahres-MW für $\alpha=0,10$ (beidseitiger Test) statistisch signifikant fallend. Die Trends sind im mittleren Bereich (Orth, Wildungsmauer, Bad Dt. Altenburg) auch für $\alpha=0,02$, also für ein deutlich strengeres Kriterium (Signifikanzniveau) statistisch signifikant, mit $|Z| > Z_{\alpha/2} = Z_{0,99} = 2,33$.

Tabelle 6: Zusammenstellung der Trenduntersuchungen für Donauwasserstände an Pegelstellen, Reihe 1996/2023 (für Orth und Thebnerstraßl kürzere Reihen) für beide Methoden. Die Änderungsraten sind hier (im Gegensatz zu den beiden vorherigen Tabellen) in [cm/a] angegeben

Pegel	Strom-km	Reihe	Methode 1	Methode 2		
			$\beta_{w(MQ)}$ [cm/a]	$\beta_{MW,m}$ [cm/a]	$\beta_{MW,hy}$ [cm/a]	β_{MW} [cm/a]
KW Freudenau UW	1920,67	1996/2023	-0,6	-0,4	-1,4	-1,8
Fischamend	1907,90	1996/2023	-1,4	-1,2	-1,4	-2,6
Orth	1901,72	2003/2023	-1,7	-1,6	-1,4	-3,0
Wildungsmauer	1894,72	1996/2023	-1,4	-0,8	-1,4	-2,2
Bad Dt. Altenburg	1886,86	1996/2023	-0,5	-0,6	-1,4	-2,0
Hainburg	1883,92	1996/2023	-0,6	-0,5	-1,4	-1,9
Thebnerstraßl	1879,25	2000/2023	+0,6	-0,3	-1,4	-1,7
Wolfsthal	1874,84	1996/2023	+0,8	+0,3	-1,4	-1,1

In Tabelle 6 ist erkennbar, dass Methode 1 und Methode 2 meist ähnliche Ergebnisse liefern; dabei sind $\beta_{w(MQ)}$ und $\beta_{MW,m}$ (vierte und fünfte Spalte) direkt miteinander zu vergleichen, während die β_{MW} (siebte Spalte) die unmittelbaren Ergebnisse der MW-Trendanalysen sind. Diese Gesamt-Änderungsraten des MW beschreibt die unmittelbar für Ökologie und Wasserwirtschaft (speziell über das Grundwasser) wirksamen Veränderungen über die Untersuchungsperiode, wobei nur $\beta_{MW,m}$ den Sohländerungen (Erosionen, Auflandungen) zuzurechnen ist.

2.4.2 Auswertungen bzw. Vergleiche im Längenschnitt

Die Änderungsraten, die sich aus dem Vergleich (für MW) zwischen KWD-2020 und KWD-1996 (jeweils Q-kompensiert, vgl. Pkt. 2.3.3) ergeben, passen mit Ausnahme von Bad Dt. Altenburg und Wolfsthal gut mit den nach Methode 1 ermittelten Werten zusammen, vgl. Abbildung 22. Im Längsverlauf nehmen die Eintiefungsraten vom Kraftwerk-Unterwasser bis Orth zu und dann gegen Hainburg zu wieder ab. Knapp flussauf der Marchmündung (bei etwa Strom-km 1882) wechselt die Sohle in ein Auflandungsregime, weil sich bis dort vom Unterwasser her der Stau des Donaukraftwerkes Gabčíkovo auswirkt (Stauwurzel). Insgesamt bestätigt sich, abgesehen von lokalen Besonderheiten, das bereits über einen reinen KWD-Vergleich erhaltene Bild. Allerdings, und das ist für die Fragestellung entscheidend, erlauben es die pegelbezogenen Auswertungen (speziell Methode 1), die Dynamik innerhalb der Untersuchungsperiode näher zu untersuchen, mit der zeitlichen Auflösung einzelner Jahre (vgl. auch Klasz & Baumgartner, 2024).

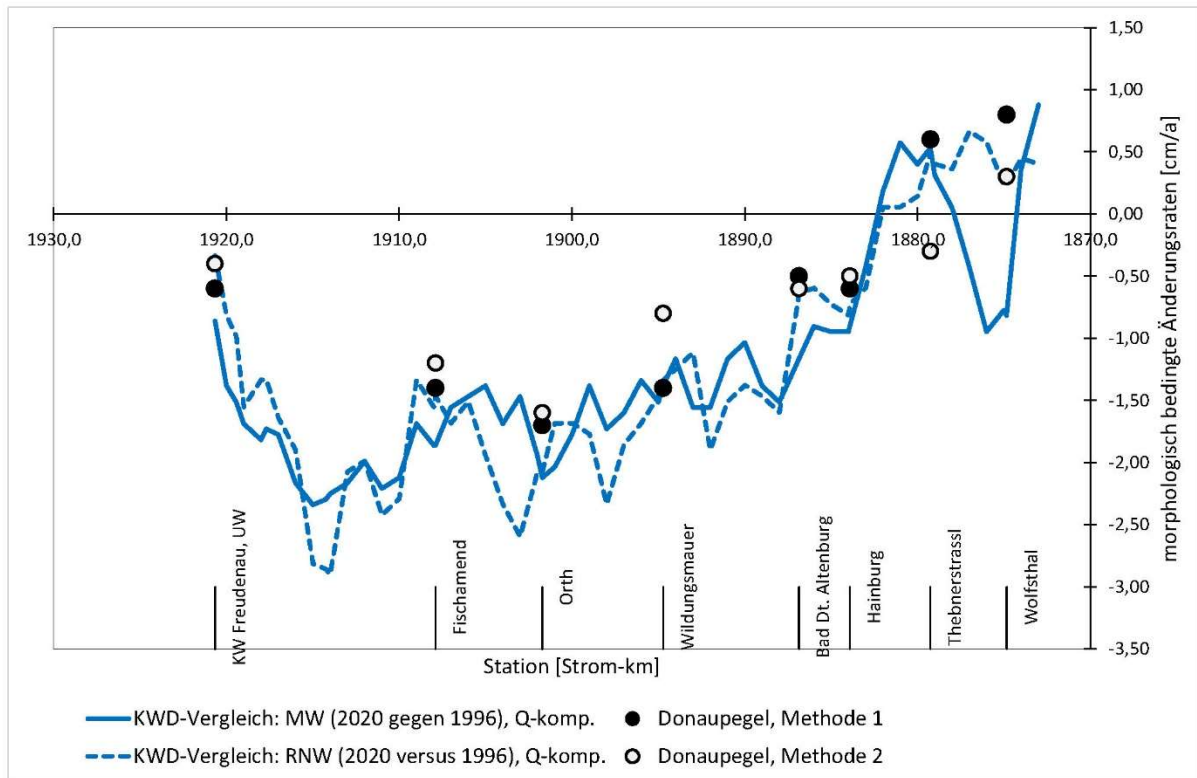


Abbildung 22: Synoptische Darstellung aller Ergebnisse im Längenschnitt (KW Freudenau, UW bis Wolfsthal), Änderungsraten nach Methode 1 (für $w(MQ)$) und Methode 2 und aus dem Vergleich der KWD-2020 gegen die KWD-1996 (für RNQ und MQ, beides Q-kompensiert).

Die Werte nach Methode 2 passen für die Pegeln KW Freudenau, UW, Fischamend, Orth, Bad Dt. Altenburg und Hainburg gut mit Methode 1 zusammen; für die Pegeln Wildungsmauer, Thebnersträßl und Wolfsthal gibt es größere Differenzen, wobei die Werte nach Methode 1 sowohl aus methodischen Gründen als auch in der Gesamtschau als plausibler und stärker relevant zu bewerten sind.

In Abbildung 23 werden die gesamten, also über die Untersuchungsperiode 1996/2023 auftretenden Änderungen (Eintiefungen oder Aufhöhungen) im Längenschnitt aufgetragen, einerseits die Werte nach Methode 1 und 2 (Produkt aus $\beta_{w(MQ)}$ bzw. $\beta_{MW,m}$ und Dauer), andererseits aus der Extrapolation des KWD-Vergleichs (KWD-2020 gegen KWD-1996, Q-kompensiert), also mit Faktor $(2023 - 1996)/(2020 - 1996) = 1,125$ gestreckt.

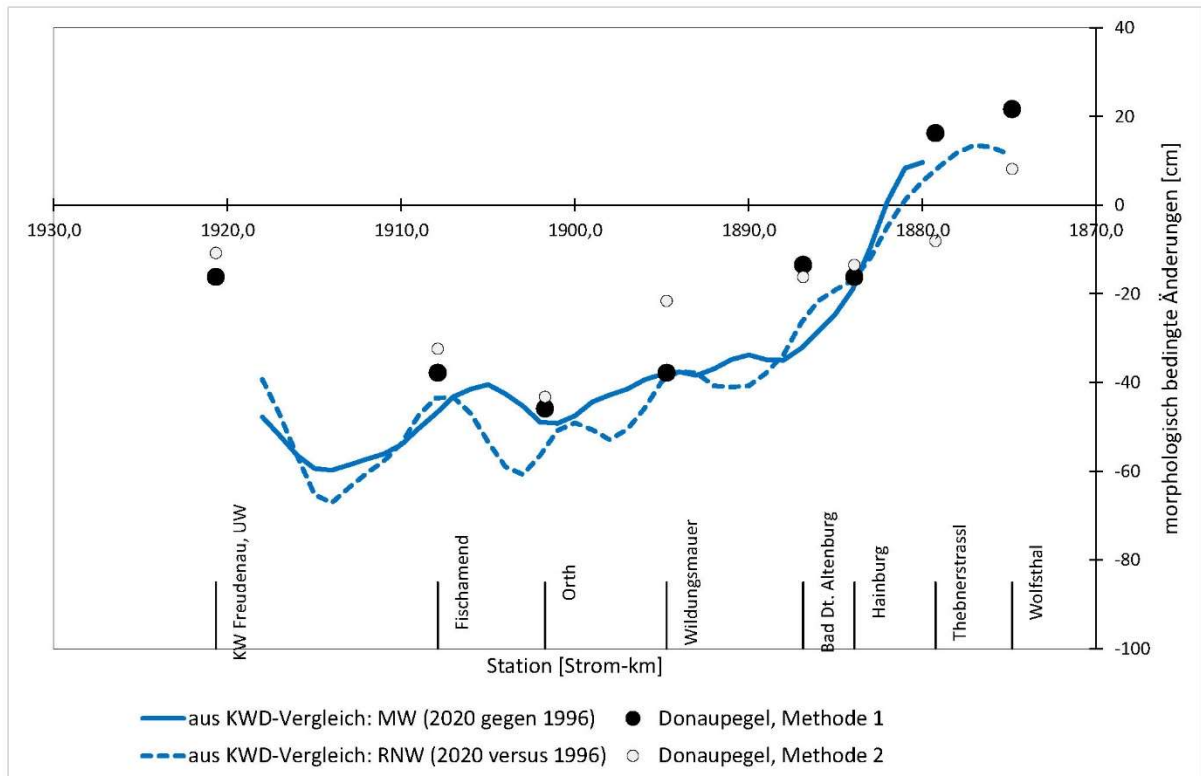


Abbildung 23: Gesamte Wasserspiegeländerungen [cm] für RNQ und MQ (Zeitraum 1996 bis 2023) im Längenschnitt (KW Freudenau, UW bis Wolfsthal) nach Methode 1 (für $w(MQ)$) und Methode 2 und aus dem Vergleich der KWD-2020 gegen die KWD-1996 (für RNQ und MQ, beides Q-kompensiert); die Verläufe für RNQ und MQ nach KWD-Vergleich wurden geglättet ($n=5$ zentriert gleitendes Mittel mit linearer Gewichtung), vgl. auch die Anmerkungen im Text.

Die MW-bezogenen Werte nach KWD-Vergleich sind für den untersten Bereich (Wolfsthal und knapp stromauf davon) stärker fehlerbehaftet (vgl. Pkt. 2.4.3) und werden daher im Längenschnitt weggelassen, die RNW-bezogenen Werte sind dort wahrscheinlich auch etwas zu tief, gaben aber zumindest qualitativ ein plausibles Bild.

Die aus dem KWD-Vergleich abgeleiteten Werte für die einzelnen Strom-km zeigen im Längsverlauf einen unruhigen Verlauf, wie in Abbildung 22 (für die Änderungsraten) erkennbar. Es erfolgt daher zusätzlich eine Glättung (Smoothing) über ein zentriert gleitendes Mittel mit $n=5$ (2 und 1 km stromauf, direkt an der jeweiligen Stelle, 1 und 2 km stromab), wobei eine lineare Gewichtung (0,333; 0,667; 1; 0,667, 0,333) verwendet wird. Damit erhält man einen plausiblen Verlauf, der für die meisten Pegelstellen (Ausnahme: Bad Dt. Altenburg) ziemlich gut mit den Gesamtänderungen nach Methode 1 zusammenpasst.

Auf Basis dieser Analysen (und unter besonderer Berücksichtigung der Ergebnisse für die Pegeln Hainburg und Thebnersträßl nach Methode 1) kann die „Stauwurzel“ von Gabčíkovo nach hydromorphologischen Kriterien bei etwa Strom-km 1882 lokalisiert werden.

Von besonderer Bedeutung ist der Bereich der VHP-Erhaltungsstrecke (Strom-km 1921 bis 1910); dort hätte es unter den wasserrechtlichen Vorgaben (Genehmigungsbescheide zum Kraftwerk Freudenau) überhaupt keine Eintiefungen geben dürfen, tatsächlich sind sie dort am stärksten (Maxima der Eintiefungen für RNW- und MW bei Strom-km 1914). Dazu eine ergänzende, hydraulisch (hydromechanisch) begründete Überlegung: Wäre die Erhaltungsstrecke (in ihrer Höhenlage) stabil und würde sich nur die Strecke stromab davon eintiefen, dann müssten die Absenkungen vom unteren Rand der

Erhaltungsstrecke (Strom-km 1910) nach stromauf asymptotisch gegen Null entwickeln²¹; wie schnell das gegen Null geht, hängt von den hydraulischen Parametern (speziell auch Energieliniengefälle und der Froude-Zahl) ab, es ist aber unmöglich, dass für eine stabile Sohllage die Absenkungen über einige Kilometer gleich bleiben bzw. sogar flussauf gerichtet noch weiter ansteigen! Unter den gegebenen hydraulischen (Rand-)Bedingungen ist bereits dieser (qualitative) Verlauf der Wasserspiegeländerungen ein klarer Beleg dafür, dass dort (also in der VHP-Erhaltungsstrecke) über die Untersuchungsperiode keine stabile Strecke vorlag, wie ja auch im Zuge der in BMNT (2018) dokumentierten Untersuchungen nachgewiesen wurde. Relevant ist, dass dies auch schon über einen Vergleich der KWD-2010 gegenüber der KWD-1996 erkennbar ist (was hier nicht im Detail gezeigt wird) und somit spätestens mit Veröffentlichung der KWD-2010 (im September 2012) erkannt hätte werden können. Es handelt sich dabei nicht um geringfügige Differenzen. Bei Strom-km 1914 (bzw. Strom-km 1915) sind die MW-Stände über die Periode 1996/2020 um ca. 63 cm abgesunken, für RNW sind die Differenzen mit ca. 78 cm noch stärker.

2.4.3 Besondere Hinweise zu einzelnen Pegelstellen

Die Werte für Pegel Kraftwerk UW (Abbildung 6) zeigen über die gesamte Untersuchungsperiode einen deutlich fallenden Trend, dies sowohl für $w(RNQ)$ als auch für $w(MQ)$; Trendbrüche sind visuell nicht erkennbar, auch nicht für die letzten Jahre. Der Verlauf ist anfänglich unruhig (speziell mit den lokalen Minima für 1997), was mutmaßlich mit Restarbeiten im UW des Kraftwerkes (Bauphase bis 1998) zusammenhängt. Beide Zeitreihen liegen deutlich über den Werten für die KWDs (1996, 2010 und 2020), diese Differenzen sind für MW (rd. 20 bis 30 cm) höher als für RNW.

Die Werte für Pegel Fischamend (Abbildung 7) zeigen über die gesamte Untersuchungsperiode einen – im Vergleich zu den anderen untersuchten Pegelstellen – unruhigen Verlauf (d.h. stärkere Streuungen), insgesamt aber, sowohl für die Gesamtperiode (1996/2023) als auch für die letzten Jahre (2018/2023) und für beide Referenzdurchflüsse, einen deutlich fallenden Trend. Es gibt keine Anzeichen für einen Trendwechsel in der Phase 2018/2023. Zuvor, etwa 2014 oder 2015, scheint aber ein Trendwechsel (hin zu geringeren Eintiefungen) stattgefunden zu haben, was mit den relativ starken Geschieberückführungen (die primär in diesem Abschnitt verlappt wurden) korrespondiert. Die Zeitreihen für diesen Pegel passen relativ gut mit den dortigen KWDs (der letzten Jahrzehnte) zusammen, die KWD für 2020 sind allerdings (sowohl für RNW als auch für MW) um rd. 10 cm zu tief.

Für die Pegelstelle Orth (Abbildung 8) sind Basisdaten (und daraus abgeleitete charakteristische Wasserstände) erst ab 2003 verfügbar. Die Werte für diesen Pegel zeigen über die gesamte Untersuchungsperiode und auch für die letzten Jahre (2018/2023) einen deutlich fallenden Trend; dies für beide Referenzabflüsse. Die Eintiefungsraten sind stärker als bei den anderen Pegelstellen. Bei genauer Betrachtung ist (speziell für RNQ) ein Trendbruch rund um das Jahr 2010 zu vermuten, von stark fallender Tendenz zu fallender Tendenz; ein Trendbruch in den letzten Jahren ist hingegen nicht erkennbar. Die Zeitreihen für diesen Pegel passen gut mit den dortigen KWDs (der letzten Jahrzehnte) zusammen.

Die Werte des Pegels Wildungsmauer (Abbildung 9) haben für die gesamte Untersuchungsperiode und beide Referenzdurchflüsse einen fallenden und vergleichsweise gleichmäßigen Verlauf (wenig Streuungen). Speziell für die RNQ-Werte ist visuell ein Trendbruch rund um 2007 oder 2008 erkennbar, von

²¹ Es wird hier durchgängig unterkritisches Fließen (also „Strömen“) mit Froude-Zahlen unter 1 vorausgesetzt, was in diesem Abschnitt der Donau für alle Durchflüsse der Fall ist.

stark fallend zu fallend; ein Trendbruch in den letzten Jahren ist hingegen nicht erkennbar. Die Zeitreihen für diesen Pegel passen sehr gut mit den dortigen KWDs (der letzten Jahrzehnte) zusammen.

Die Werte für den Pegel Bad Deutsch Altenburg (Abbildung 10) zeigen über die gesamte Untersuchungsperiode und für beide Referenzdurchflüsse einen fallenden Trend, wobei in den letzten Jahren (2018/2023) und speziell für MQ starke Absenkungen (mehr als 20 cm zwischen 2018 und 2023) vorliegen; für RNQ ist diese Besonderheit schwächer ausgebildet. Die Zeitreihen für diesen Pegel passen relativ gut mit den dortigen KWDs (der letzten Jahrzehnte) zusammen, der MW für die KWD-1996 ist allerdings um rd. 10 cm zu hoch, und das RNW für KWD-2010 auch um etwa 10 cm zu hoch.

Die Werte für den Pegel Hainburg (Abbildung 11) haben für die gesamte Untersuchungsperiode und beide Referenzdurchflüsse einen fallenden und vergleichsweise gleichmäßigen Verlauf (wenig Streuung), mit Ausnahme stärkerer Absenkungen für MQ in den letzten Jahren. Die Zeitreihen für diesen Pegel passen relativ gut mit den dortigen KWDs (der letzten Jahrzehnte) zusammen, der MW der KWD-2020 ist allerdings um rd. 15 cm zu tief.

Für die Pegelstelle Thebnerstraßl (Abbildung 12) sind Basisdaten (und daraus abgeleitete charakteristische Wasserstände) erst ab 2000 verfügbar. Beide Zeitreihen zeigen über die damit mögliche Untersuchungsperiode einen schwach steigenden Trend, mit einem sehr gleichmäßigen Verlauf (wenig Streuung); das gilt auch für die letzten Jahre. Trendbrüche sind nicht erkennbar. Die Zeitreihen für diesen Pegel passen sehr gut mit den dortigen KWDs (für 2010 und 2020) zusammen.

Die Zeitreihen für die Pegelstelle Wolfsthal (Abbildung 13) haben einen gleichmäßig steigenden Trend ohne erkennbare Trendbrüche; die Verläufe sind sehr gleichmäßig (wenig Streuung). Eine Besonderheit dieser Pegelstelle ist die sehr großen Differenzen der KWD-Werte; vor allem das MW gemäß KWD-2020 liegt (um rd. 30 cm) zu tief. Auch die fallende Tendenz der MW im Vergleich zwischen KWD-2010 und KWD-2020 passt nicht mit den aus den Daten des Hydrographischen Dienstes ermittelten Abflusskurven (bzw. charakteristischen Wasserständen) zusammen.

Die Anpassung dieser Zeitreihen (1996/2023; für Orth und Thebnerstraßl verkürzte Reihen) im Sinn linearer Regressionsmodelle für beide Referenzdurchflüsse ergibt die in Tabelle 4 aufgelisteten Änderungsraten.

2.4.4 Zeitreihe der Jahres-MQ

Die Zeitreihe der Jahres-MQ für Hainburg wurde bereits in Abbildung 5 graphisch dargestellt.

Mit den Daten (Tagesabflüsse und daraus gebildete Jahres-MQ) von 1996/2023 ergeben sich die in Tabelle 7 angegebenen Trendstärken für die Pegelstellen Wildungsmauer und Hainburg. Der Absolutbetrag der standardisierten Prüfgrößen Z ist für Hainburg so groß, dass die Nullhypothese H_0 („es gibt keinen Trend“) im Sinn einer Teststatistik zu verwerfen ist, $|Z| = 1,758 > |Z_{\alpha/2}| = 1,645$, mit dem Signifikanzniveau $\alpha = 10\%$ (beidseitiger Test, also 5% an beiden Enden). Mit dem gewählten α und diesen MQ-Zeitreihen ist es also vernünftig (im Sinn der Wahrscheinlichkeitsrechnung), von einem statistisch signifikanten Trend auszugehen (vgl. auch Klasz und Baumgartner, 2024).

Für den Pegel Wildungsmauer ist der Trend etwas schwächer und gerade noch nicht statistisch signifikant. Die Signifikanz des MQ-Trends wird hier aber nur ergänzend untersucht. Für die Interpretation der MW-Zeitreihen (und auch der mGW-Zeitreihen) ist letztlich nur relevant, dass es im betreffenden Untersuchungszeitraum einen solchen Trend gab (bzw. gibt) und dass dieser hydrologische Trend einen Teil der pegelbezogenen MW-Trends bedingt. Es geht um das Nebeneinander morphologisch und

hydrologisch bedingter Trends und deren Überlagerung (Summenwirkung) auf die Jahres-MW (bzw. Jahres-mGW).

Tabelle 7: Ergebnisse der Trenduntersuchungen für die Jahres-MQ (Reihe: 1996/2023); die Daten bis 2022 stammen vom Hydrographischen Dienst (eHYD), jene von 2023 sind noch Rohdaten (Daten über die viadonau)

Pegel:	Lage [Strom-km]	Reihe:	Lag-1-Auto- korrelations- koeffizient r_1	standardi- sierte Prüf- größe Z	Gesamttrend β_{MQ} [(m ³ /s)/a]	Trend stati- stisch signifikant ($\alpha = 0,10$)
Wildungsmauer	1894,72	1996/2023	0,077	-1,640	-9,8	nein
Hainburg	1883,92	1996/2023	0,086	-1,758	-10,6	ja

Mit den für die einzelnen Pegelstellen (aus den Tageswerten der Wasserstände und Abflüssen rekonstruierten) bekannten Abflusskurven können die MQ-Trends in zugehörige rein hydrologisch bedingte MW-Trends umgerechnet werden. Mit dem vom Pegel Hainburg ermittelten MQ-Trend von -10,6 (m³/s)/a ergibt sich eine Änderungsrate von ca. -1,4 cm/a, vgl. Tabelle 3. Im Prinzip sind diese Werte (Neigung der Tangente an die Abflusskurve für MQ) im Längsverlauf und von Pegel zu Pegel unterschiedlich; da sich die Werte aber nur sehr wenig voneinander unterscheiden (annähernd gleichförmige hydraulische Verhältnisse), kann für die gesamte Strecke ein mittlerer Wert von -1,4 cm/a für die hydrologische Trendkomponente angesetzt werden.

Ergänzend sei kurz auf den Zusammenhang der Abflüsse (Jahres-MQ) für Wildungsmauer zu Hainburg eingegangen. Wegen der Nähe der beiden Pegelstellen und weil zwischen ihnen keine nennenswerten Zubringer (oder Ableitungen) vorliegen, sollten die mittleren Abflüsse praktisch gleich sein. Tatsächlich liegt der langjährige (1996/2023) Mittelwert der Abflüsse für Wildungsmauer ($MQ_{WM,1996/2023} = 1851 \text{ m}^3/\text{s}$) aber um rd. 13 m³/s unter dem zugehörigen Wert für Hainburg ($MQ_{Hb,1996/2023} = 1864 \text{ m}^3/\text{s}$). Eine derart große Differenz ist für diese Situation nicht plausibel. Die Auftragung der MQ-Differenzen für die einzelnen Jahre (Abbildung 24) zeigt schließlich, dass die Unterschiede anfänglich (zwischen 1996 und etwa 2010) größer waren, über die letzten rund 15 Jahre aber viel kleiner geworden sind; alles deutet darauf hin, dass es in der Bearbeitung (Erstellung der Abflusskurven für Wildungsmauer) zunächst etwas größere Fehler gab und dass das (etwa ab 2010) erkannt und korrigiert worden war. Aus diesem Vergleich ergibt sich auch, dass die Jahres-MQ für Wildungsmauer anfänglich systematisch tiefer als für Hainburg waren, während diese Differenz dann annähernd verschwand. Damit folgt zwangsläufig, dass die Trendstärken (und auch die Signifikanz) für Wildungsmauer geringer als für Hainburg ausgefallen ist, was mit den Ergebnissen der Trendanalysen übereinstimmt.

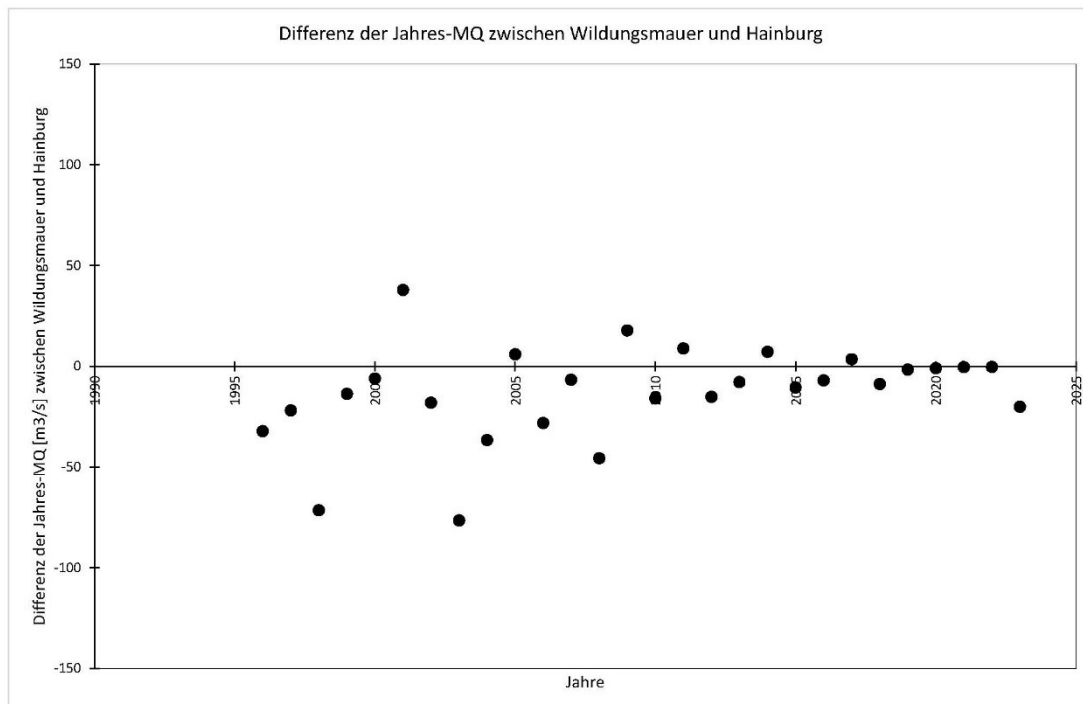


Abbildung 24: Differenzen der Jahres-MQ zwischen Wildungsmauer und Hainburg für die Reihe 1996/2023. Die Differenzen sind meist negativ (Abflüsse für Wildungsmauer geringer als für Hainburg), dieser Effekt war anfänglich deutlich stärker und nahm dann (ab etwa 2010) stark ab.

Die Vermutung, dass die Werte für Hainburg etwas genauer sind als für Wildungsmauer, jedenfalls im Rahmen der Möglichkeiten hydrographischer Analysen, stützt sich auch auf eine Untersuchung der mittleren Abflüsse im Längsverlauf, beginnend mit den Werten für den Pegel Korneuburg und unter Berücksichtigung der relevanten Zu- und Abflüsse zwischen Wien und Hainburg (Tabelle 8). Diese Untersuchung erfolgt für die Reihe 1996/2022, weil für 2023 nur für Wildungsmauer und Hainburg Daten vorlagen, nicht aber für die anderen Pegelstellen.

Tabelle 8: Mittlere Abflüsse der Donau im Längenschnitt, Vergleich zwischen Korneuburg, Wildungsmauer und Hainburg, unter Berücksichtigung relevanter Zu- und Abflüsse dazwischen, Reihe 1996/2022 (Daten über eHYD); Q_m ist der MQ nach Daten des Hydrographischen Dienstes (eHYD), ΔQ_m sind Zu-/Abflüsse nach Daten des Hydrographischen Dienstes (eHYD) bzw. Internetrecherche, $Q_{m,pl}$ ist der plausible Wert nach Fehlerausgleich

Donaupegel	Zu-/Abfluss	Q_m	ΔQ_m	$Q_{m,pl}$	Anm.:
Donau, Pg. Korneuburg		1849		1845,5	
	Marchfeldkanal		-4,0	1841,5	Ausleitung
	Wienfluss (Pg. Kennedybr.)		1,3	1842,8	Zufluss
	Hauptkläranlage		6,0	1848,8	Zufluss
	Schwechat (Pg. Schwechat)		8,2	1857,0	Zufluss
	Fischa (Pg. Fischamend)		7,8	1864,8	Zufluss
Donau, Pg. Wildungsmauer	Pg. Wildungsmauer	1848		1864,8	
Donau, Pg. Hainburg	Pg. Hainburg	1861		1864,8	

Die Werte für den Marchfeldkanal (Ausleitung) und die Hauptkläranlage (Zufluss) stammen aus einer Internetrecherche (<https://marchfeldkanal.at/messwerte/> und https://www.ebswien.at/klaeranlage/technische_daten/). Geht man von der Richtigkeit der Werte für Korneuburg aus, dann zeigt sich, dass der langjährige Jahres-MQ für Wildungsmauer unter Berücksichtigung der Zu- und Abflüsse tatsächlich zu tief ist, während die Relation Korneuburg zu Hainburg mit Ausnahme eines kleineren Differenzbetrages gut zusammenpasst.

2.4.5 Ergänzende Hinweise zu den Abweichungen der KWD-Werte

In [Anhang A2](#) werden die Zeitreihen $w(RNQ)$ und $w(MQ)$ der Untersuchungsperiode 1996/2023 gemeinsam mit den Werten für RNW und MW aus den KWD-1996, KWD-2010 und KWD-2020 (Q-kompensiert) aufgetragen; ergänzend werden auch die Werte der KWD-1985 geplottet.

Eine kurze Diskussion zu Übereinstimmungen bzw. Differenzen zwischen den KWD und den Zeitreihen der charakteristischen Wasserstände wurde bereits unter Pkt. 2.4.3 gegeben. In Abbildung 22 werden Änderungsraten zwischen KWD-2020 und KWD-1996 (sowohl für RNW als auch MW) geplottet, mit einzelnen Strom-Kilometer (und Pegelstellen) als Stützstellen, was auch Informationen zur Plausibilität bzw. Kohärenz der KWD-Werte liefert. Stärkere Abweichungen sind für den Pegel Wolfsthal und knapp stromauf davon (Strom-km 1878 bis 1873) und für den Pegel Kraftwerk Freudenau, UW gegeben, also für die oberen und unteren Ränder der Untersuchungsstrecke.

Für Wolfsthal ist der MW-Wert der KWD-2020 völlig unplausibel, sowohl im zeitlichen Vergleich, als auch im Längsverlauf. Die Differenzen zu dem nach Methode 1 erwartbaren Niveau liegt dort bei knapp über 30 cm, für RNW (gem. KWD-2020) ist die Differenz kleiner (ca. 17 cm), aber immer noch relativ stark.

Für den VHP-Pegel Kraftwerk Freudenau, UW sind die KWD-Werte (in ihrem zeitlichen Verlauf) annähernd parallel zu den Zeitreihen der Jahreswerte der charakteristischen Wasserstände nach unten verschoben, für die MW um rd. 25 cm und für die RNW um rd. 15 bis 20 cm. Die Werte gem. KWD-2020 haben zwischen dem Kraftwerks-Unterwasser und dem Strom-km 1920 ein untypisch geringes Gefälle

(für RNW: 0,16 m/km; für MW: 0,21 m/km), während das Gefälle im Anschluss daran, zwischen Strom-km 1920 und 1919 für beide Zustände bei 0,45 m/km liegt; alles deutet darauf hin, dass die KWD-Werte im unmittelbaren Kraftwerks-Unterwasser stärker fehlerbehaftet sind, nämlich zu tief, dass dieser Fehler dann aber weiter flussab davon rasch verschwindet.

Eine Klärung dieser Diskrepanzen (etwa durch Wasserspiegelnivellement bei Niederwasser und Mittelwasser) wäre sehr zweckmäßig. Für den Zweck dieser Studie sind die für die Pegelstellen ermittelten Zeitreihen ($w(RNQ)$ und $w(MQ)$) primär relevant, allfällige Fehler in den KWD spielen diesbezüglich (also für die Auswertungen nach Methode 1 und 2) keine Rolle. Wäre z.B. an einem Pegel der Pegelnullpunkt über die gesamte Untersuchungsperiode konstant falsch, dann hätte dies auf die Ermittlung der Änderungsraten keinen Einfluss. Wenn Pegelnullpunkte während der Untersuchungsperiode fehlerhaft werden, dann hätte dies einen Einfluss, aber gerade die Auswertungen nach Methode 1 würden das rasch erkennen lassen (durch stärkere Sprünge in den $w(RNQ)$ - und $w(MQ)$ -Zeitreihen).

Mit Bezug auf den Verlauf der Wasserspiegeländerungen im Längsverlauf (vgl. Pkt. 2.4.2) sind die KWD-gestützten Werte hingegen schon von Bedeutung; unter Berücksichtigung aller durchgeführten Untersuchungen deutet aber nichts darauf hin, dass KWD-Werte über längere Strecken (mit Ausnahme der im Zusammenhang mit dem Pegel Wolfsthal genannten Differenzen, dies zwischen etwa Strom-km 1878 und 1873, vgl. Abbildung 22) stärker fehlerbehaftet sind.

Für die Untersuchung früherer morphologischer Prozesse (z.B. Sohlerosion) auf Basis der früheren KWD (KWD-1949, KWD-1956, ..., KWD-2020) sollte aber nicht vergessen werden, dass diese Werte für einzelne Stationen (und auch für einzelne Pegelstellen) meist fehlerbehaftet sind, während zumindest für die Pegelstellen die aus früheren Abflusskurven ermittelten charakteristischen Wasserstände (Methode 1) die genaueste Möglichkeit bietet; dies aber eben nur für Pegelstellen und nicht die Abschnitte dazwischen.

3 Aktualisierte Auswertungen für die Grundwasser-Messstellen

3.1 Zur Fragestellung und Relevanz

Zu untersuchen ist, ob donanahe Grundwasser-Zeitreihen statistisch signifikante Trends bezüglich der mittleren GW-Niveaus zeigen, und wenn ja, wie stark die Trends sind und wie das mit den Trends der Donauwasserstände (Jahres-MW) zusammenhängt.

Solche Trends im donanahen 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 Tendenzen der Donauwasserstände (und damit für Eintiefungen oder Aufhöhungen der mittleren Sohllagen) verstanden werden, denn sie folgen (lediglich mit einer geringen zeitlichen Verzögerung und einer gewissen Dämpfung) den Wasserständen in der Donau. 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 Untersuchungen zu den Pegelständen in der Donau gut ergänzen.

3.2 Berücksichtigte Messstellen

Die Untersuchung wird für die Periode 1996/2022 und für donanahe GW-Messstellen durchgeführt. Als „donanah“ im Sinn dieser Untersuchung sollen jene Teile des Grundwasserkörpers gelten, sowohl links- als auch rechtsseitig, die hydraulisch / 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 späterer Untersuchungen könnten auch weiter entfernte Messstellen berücksichtigt werden.

Die Daten der untersuchten Messstellen reichen generell weiter zurück als nur bis 1996; es werden auch die älteren Daten in den Graphiken geplottet und bei der visuellen Prüfung der Zeitreihen berücksichtigt. Für einige Messstellen liegen sogar Zeitreihen mit mehr als 50 Jahren vor, vgl. Tabelle 9. Aber die eigentlichen Trenduntersuchungen und die statistischen Parameter beziehen sich generell auf die Reihe 1996/2022.

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

- a) Lage donanahe (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 zurück (bis in die 1980er-Jahre), um allfällige Auffälligkeiten (Inhomogenitäten) in der zeitlichen Entwicklung, auch in der Phase vor Untersuchungszeitraum, erkennen zu können;
- c) möglichst wenig (bzw. überhaupt keine) Lücken bei den Monatswerten (maximal 10 fehlende Monatswerte, das entspricht ca. 3% bezogen auf den Untersuchungszeitraum 1996/2022);
- d) keine bekannten stärkeren Entnahmen (Brunnen), Versickerungen oder sonstige anthropogene Störungen in der Nähe der Messstelle;

Damit waren die in Tabelle 9 angegebenen 19 Messstellen (des Hydrographischen Dienstes; über eHYD abrufbar) zu berücksichtigen:

Tabelle 9: Donaunahe GW-Messstellen und zugehörige Informationen; R= rechtsufrig; L= linksufrig

Nr.:	GW-Messstelle:	HZB-Nr.:	Distanz vom Donauufer [m]:		Daten ab:	Lücken (1996/2022):
GW1	Wien 11, Bl 11-50	330035	500	R	1986	1 (von 324)
GW2	Wien 22, Bl 22-186/LRA44	313254	450	L	1972	1 (von 324)
GW2B	Wien 22, Bl 22-187/LSD42	341339	1660	L	1991	10 (von 324)
GW3	Fischamend, Bl 1909.6	331082	840	R	1983	8 (von 324)
GW3B	Mannsdorf Bl.	304840	2480	L	1952	0 (von 324)
GW4	Schönau a.d.Donau, Br	305136	1090	L	1949	0 (von 324)
GW5	Maria Ellend, Bl 1906.2	331090	200	R	1983	5 (von 324)
GW5B	Mannsdorf, Bl. 1906.003	326686	680	L	1979	0 (von 324)
GW6	Orth a.d.D., Bl 1902.5	331041	590	L	1983	3 (von 324)
GW6B	Orth a.d.D., Bl 1902.001	305011	2680	L	1939	0 (von 324)
GW7	Orth a.d.D., Bl 1900.003	326710	650	L	1979	0 (von 324)
GW8	Regelsbrunn, Bl 1898.2	331116	510	R	1983	4 (von 324)
GW9	Eckartsau, Bl	304600	3000	L	1939	0 (von 324)
GW10	Eckartsau, Bl 1894.5	331058	490	L	1983	8 (von 324)
GW11	Witzelsdorf, Br	305326	2750	L	1949	0 (von 324)
GW12	Petronell, Bl 1889.7	331066	190	L	1983	6 (von 324)
GW13	Petronell, Bl 1889.2	331132	430	R	1983	2 (von 324)
GW14	Stopfenreuth, Bl 123	305193	1570	L	1958	0 (von 324)
GW15	Hainburg a.d.D., Bl. 21	305458	230	R	1957	0 (von 324)

Es ist zu erwarten, dass die einzelnen Messstellen immer auch durch lokale Besonderheiten beeinflusst werden, z.B. durch die Nähe eines Seitenarmes der Donau (oder eines anderen Gewässers) und dort gegebene hydraulische Randbedingungen. Die Ergebnisse dieser Untersuchung sind daher in einem statistischen Sinn zu sehen und interpretieren.

3.3 Zur Methodik

Die eigentlichen Trenduntersuchungen erfolgen für die Zeitreihen der GW- Jahresmittelwerte (1996/2022). Diese werden gemeinsam mit den Basisdaten (GW- Monatsmittel) und den Jahres-GW-Minima in [Anhang A3](#) graphisch dargestellt; sie wurden visuell auf Besonderheiten überprüft.

Für verschiedene Messstellen bestehen bei den Monatswerten einzelne Lücken, vgl. Tabelle 9. Diese fehlenden Werte wurden über Regressionsanalysen mit Donauwasserständen $MW_{Hainburg,i}$ (Pegel Hainburg, Monatsmittelwerte, für die gesamte Untersuchungsperiode) ergänzt. Dies wird hier beispielhaft für GW6 (Orth, Bl. 1902.5) gezeigt, vgl. Abbildung 25.

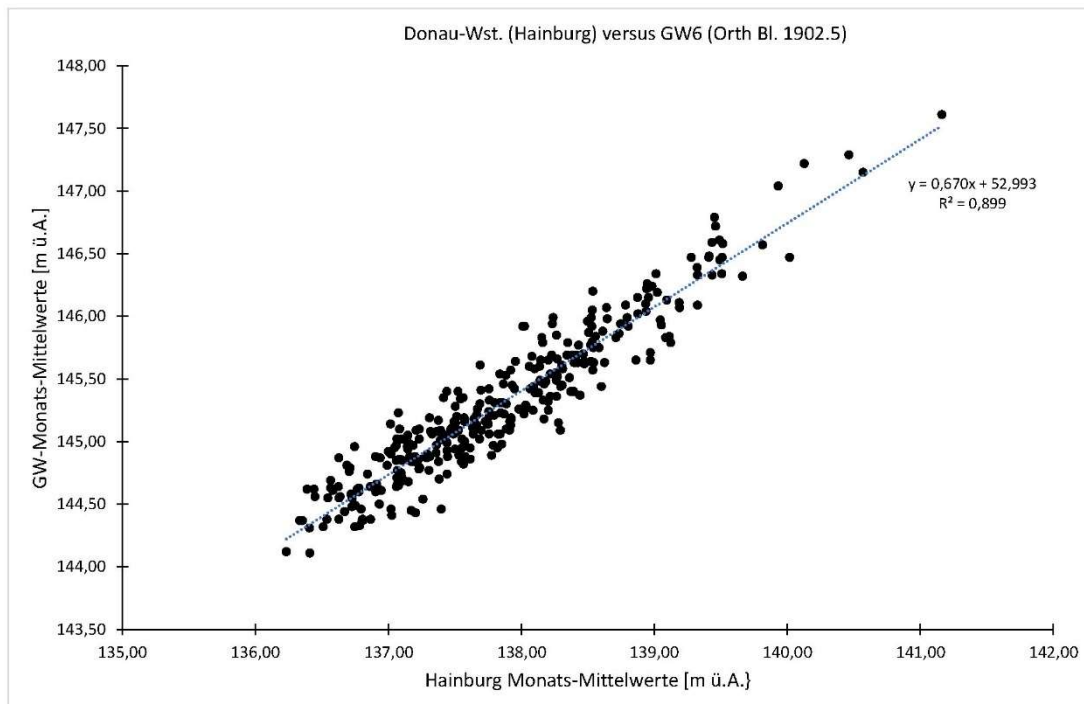


Abbildung 25: Regressionsanalyse der GW-Monatsmittel Orth Bl. 1902.5 versus Monats-MW am Pegel Hainburg (Donau); verwendet Reihe: 1996/2022 (n=321); mit diesem Modell werden einzelnen fehlende GW-Monatsmittel für die GW-Messstelle Orth (drei fehlende Werte: 01/03-2003) ergänzt.

Dieses Verfahren liefert auch andere 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 gesamte Untersuchungsperiode (1996/2022; n=324 abzüglich allfälliger Lücken). 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 Tabelle 10 aufgelistet.

Tabelle 10: Zusammenhang (Regressionsparameter, lineares Modell) zwischen GW-Monatsmittel der einzelnen Messstellen und dem Donau-MW (Monats-MW am Pegel Hainburg), Reihe 1996/2022 (n=324, abzüglich allfälliger Lücken)

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	77,94	0,537	0,754
GW2	Wien 22, Bl 22-186/LRA44	313254	450	L	53,14	0,700	0,846
GW2B	Wien 22, Bl 22-187/LSD42	341339	1660	L	92,82	0,404	0,556
GW3	Fischamend, Bl 1909.6	331082	840	R	50,97	0,703	0,782
GW3B	Mannsdorf Bl.	304840	2480	L	123,88	0,162	0,101
GW4	Schönau a.d.Donau, Br	305136	1090	L	86,14	0,445	0,746
GW5	Maria Ellend, Bl 1906.2	331090	200	R	39,95	0,775	0,959
GW5B	Mannsdorf, Bl. 1906.003	326686	680	L	72,91	0,536	0,681
GW6	Orth a.d.D., Bl 1902.5	331041	590	L	52,99	0,670	0,899
GW6B	Orth a.d.D., Bl 1902.001	305011	2680	L	118,70	0,193	0,149
GW7	Orth a.d.D., Bl 1900.003	326710	650	L	89,64	0,398	0,551
GW8	Regelsbrunn, Bl 1898.2	331116	510	R	65,02	0,568	0,909
GW9	Eckartsau, Bl	304600	3000	L	119,30	0,169	0,169
GW10	Eckartsau, Bl 1894.5	331058	490	L	54,32	0,639	0,786
GW11	Witzelsdorf, Br	305326	2750	L	117,74	0,171	0,241
GW12	Petronell, Bl 1889.7	331066	190	L	76,32	0,464	0,759
GW13	Petronell, Bl 1889.2	331132	430	R	45,59	0,685	0,922
GW14	Stopfenreuth, Bl 123	305193	1570	L	98,44	0,297	0,522
GW15	Hainburg a.d.D., Bl. 21	305458	230	R	10,21	0,914	0,919

Es ist zu erwarten, dass beide Parameter stark von der Distanz zur Donau (zum nächstgelegenen Donauufer) beeinflusst werden. Dies ist tatsächlich der Fall. Abbildung 26 zeigt den Zusammenhang für die Steigungen der Regressionsgeraden a_1 und Abbildung 27 für die Bestimmtheitsmaße R^2 . Man kann die Parameter a_1 und R^2 dann selbst wieder (abhängig von der Distanz zum Donauufer) über ein Regressionsmodell anpassen, wobei sich hier ein exponentielles Modell (mit negativem Exponenten) anbietet, was einen asymptotisch gegen null gehenden Einfluss der Donauwasserstände für steigenden Distanzen beschreibt; dies entspricht den Erwartungen aus hydraulischer Sicht.

Mit diesem Ansatz könnte man auch die zu erwartenden GW-Absenkungen für Bereiche ohne GW-Messstellen abschätzen, was aber nicht Gegenstand der Studie ist.

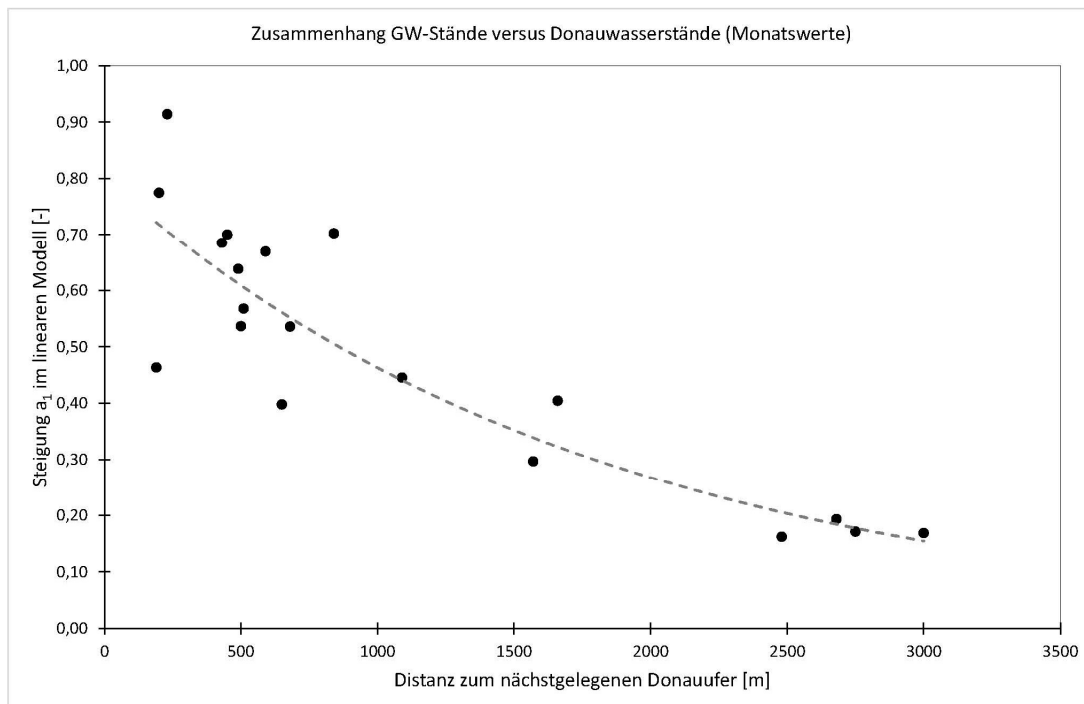


Abbildung 26: Zusammenhang (Regressionsmodell, exponentielles Modell) zwischen Distanz der GW-Messstelle zum nächstgelegenen Donauufer und der Steigung a_1 aus dem linearen Modell; Basiswerte: Monatsmittel der Reihe 1996/2022.

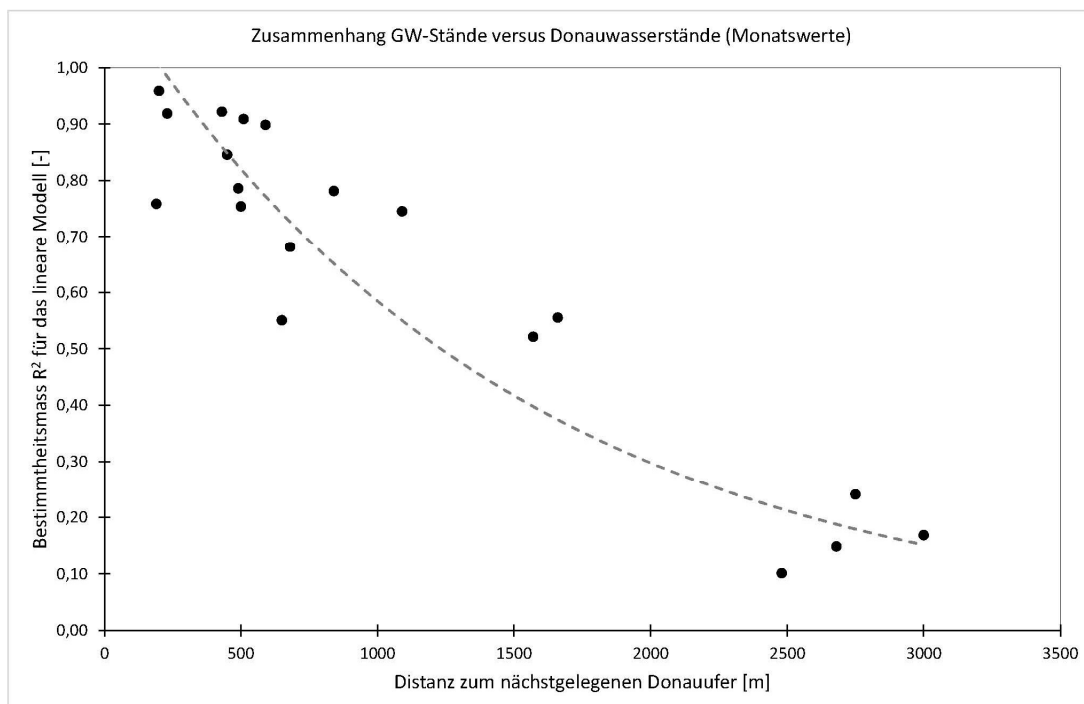


Abbildung 27: Zusammenhang (Regressionsmodell, exponentielles Modell) zwischen Distanz der GW-Messstelle zum nächstgelegenen Donauufer und dem Bestimmtheitsmaß R^2 aus dem linearen Modell; Basiswerte: Monatsmittel der Reihe 1996/2022.

Die primäre Fragestellung betrifft aber die zeitliche Entwicklung der mittleren GW-Stände.

Über die Mittelung der GW-Monatsmittelwerten (über die einzelnen Jahre) erhält man die Zeitreihen der MW- Jahresmittelwerte mGW (in den Graphiken rot geplottet, [Anhang A3](#)). Damit fallen die

saisonalen Schwankungen heraus. Für die damit erhaltenen Zeitreihen werden schließlich Trendanalysen mittels MK-Test und Sen-Neigung durchgeführt, analog zu den Donauwasserständen (Methode 2). Die Ergebnisse dieser Untersuchungen werden in Tabelle 11 aufgelistet und dort (Kap. 3.4) auch diskutiert. Bei der Interpretation ist der bereits unter Pkt. 2.4.4 untersuchte Trend der Donauabflüsse (Jahres-MQ) in Kombination mit den dadurch bedingten Wasserstandänderungen (hydrologisch bedingte Trendkomponente $\beta_{MW,hy}$ zu berücksichtigen.

Bei dieser Korrektur des Gesamttrends $\beta_{GW,ges,i}$ (Abzug der hydrologisch bedingten Komponente β_{hy} , 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 $\beta_{GW,hy,i} = a_{1,i} \cdot \beta_{MW,hy}$. Diese Werte werden schließlich in Tabelle 11 von den jeweiligen Gesamttrendstärken β_{ges} abgezogen,

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

und ergeben dann den morphologisch (durch die Sohlerosion der Donau) bedingten Trend der GW-Absenkungen (letzte Spalte in Tabelle 11). Aus wasserwirtschaftlicher und ökologischer Sicht ist aber der Gesamttrend relevant.

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 A3](#)) aus eHYD übernommen und für die Periode 1996/2022 im Rahmen einer Trendanalyse (MK-Test; Sen-Neigung) untersucht. Dabei soll überprüft werden, ob das Grundwasser ggf. durch stärkere Niederschlags-Trends oder Besonderheiten in den letzten Jahren beeinflusst wird.

3.4 Ergebnisse und Diskussion

Die Zeitreihen der GW-Jahresmittel (Reihe 1996/2022) werden in [Anhang A3](#) graphisch dargestellt. Die daraus abgeleiteten statistischen Parameter und die Ergebnisse der Trendanalysen (MK-Test und Sen-Neigung) werden in Tabelle 11 aufgelistet.

Ein typisches Beispiel (GW6: Messstelle Orth Bl. 1902.5) wird hier mit Abbildung 28 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 $R^2 = 0,899$ ziemlich stark, die (lineare) Dämpfung ist hier mit $a_1 = 0,670$ gegeben (vgl. Tabelle 10). Zweitens ist die Abnahme des mittleren Niveaus der GW-Stände (also der GW-Jahresmittel; rote Markierung / rote Linie) klar erkennbar. 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 1996/2022 rd. -3,0 cm/a und die statistische Signifikanz (mit einer standardisierten Prüfgröße von $|Z| = 3,961$) besonders ausgeprägt. Der Trend wäre hier auch mit einem deutlich strengeren Signifikanzniveau von $\alpha = 1\%$ als statistisch signifikant zu bewerten. Über die Untersuchungsperiode fiel das mittlere GW-Niveau dort um rd. 77 cm.

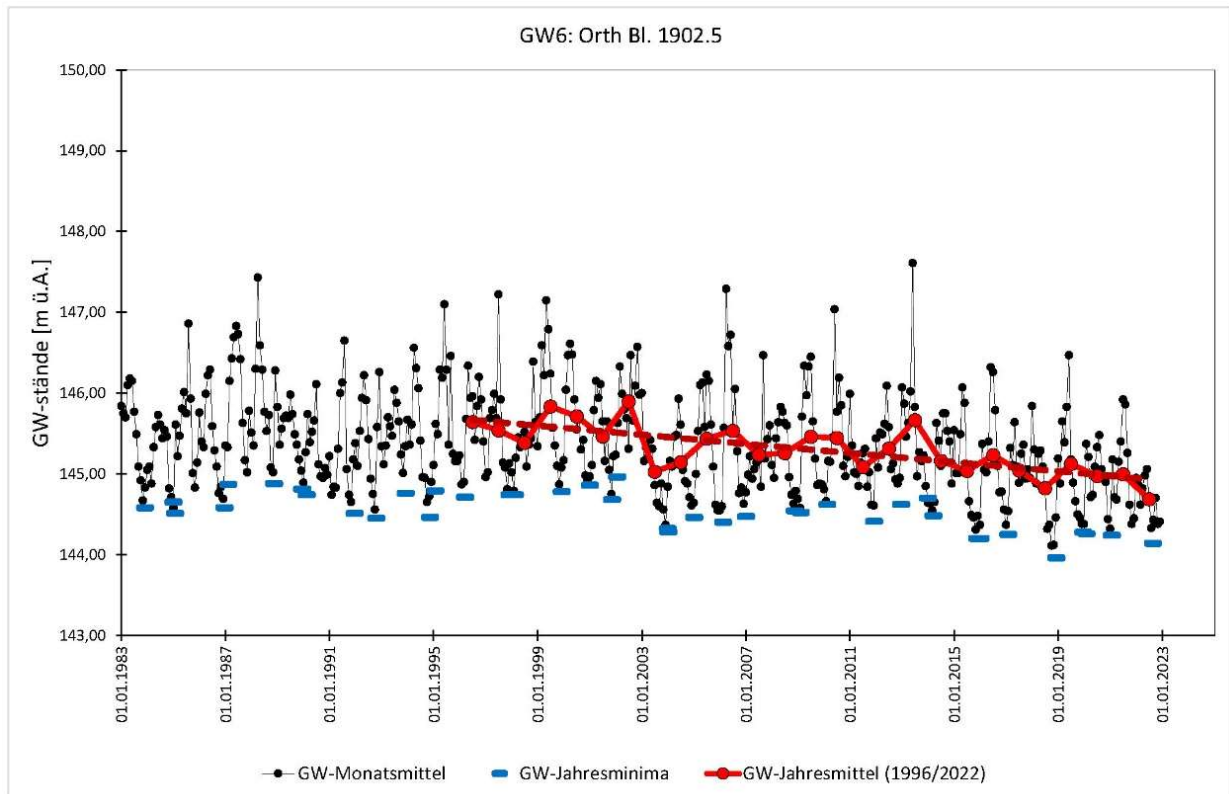


Abbildung 28: GW-Monatsmittel, GW-Jahresminima (beides: 1983/2022) und GW-Jahresmittelwerte (1996/2022) für die GW-Messstelle Orth Bl. 1902.5.

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 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 (ca. -2,5 bis -4,0 cm/a) als jene im unteren Abschnitt (Stopfenreuth und Hainburg) bzw. am oberen Ende in Simmering (ca. -2,3 bis -2,8 cm/a);
- donauernahe Messstellen haben tendenziell stärkere Trendstärken als donauferne Messstellen;

Beide Einflüsse sind gut erklärbar, sie korrespondieren einerseits mit den Befunden zu den Donauwasserständen und andererseits mit den Ergebnissen zur Abnahme des Einflusses der Donauwasserstände mit zunehmender Distanz vom Ufer (Kap. 3.3). Es ist aber bemerkenswert, dass selbst für die beiden bereits recht weit von der Donau entfernten Messstellen GW9 und GW11 (3,0 km bzw. 2,75 km) noch ziemlich starke Trends (Abnahmen) festzustellen sind. Der Einfluss der morphologischen bedingten Änderungen der Donauwasserstände reicht also mindestens so weit, wodurch der gesamte Nationalpark davon betroffen ist, tatsächlich reicht das wohl noch weiter.

Tabelle 11: Ergebnisse der Trenduntersuchungen für mittlere GW-Stände (d.h. die Zeitreihe der GW-Jahresmittel) für die untersuchten donaunahen Messstellen und die Untersuchungsperiode 1996/2022.

Abb.:	GW-Messstelle:	statistische Parameter (1996/2022)			Trendanalyse (1996/2022), MK-Test mit Prewhitening			
		Mittel- wert [m ü.A.]	Stan- dardab- wei- chung [m]	Lag-1- Autokor- relation r_1 [-]	standar- disierte Prüf- größe Z	Trend sta- tistisch signifi- kant ($\alpha =$ 0,10)	Gesamt- trend $\beta_{GW,ges}$ [cm/a]	morphol. Trendkom- ponente $\beta_{GW,m}$ [cm/a]
GW1	Wien 11, Bl 11-50	151,91	0,284	0,224	-3,169	ja	-2,3	-1,6
GW2	Wien 22, Bl 22-186/LRA44	149,66	0,331	0,400	-3,502		-2,8	-1,8
GW2B	Wien 22, Bl 22-187/LSD42	148,57	0,272	0,521	-4,253		-2,5	-2,0
GW3	Fischamend, Bl 1909.6	147,84	0,334	0,345	-3,419		-2,8	-1,8
GW3B	Mannsdorf Bl.	146,23	0,389	0,749	-3,794		-3,3	-3,1
GW4	Schönau a.d.Donau, Br	147,55	0,249	0,348	-3,210		-2,2	-1,6
GW5	Maria Ellend, Bl 1906.2	146,79	0,296	0,340	-3,127		-2,5	-1,4
GW5B	Mannsdorf, Bl. 1906.003	146,78	0,328	0,461	-3,878		-3,3	-2,5
GW6	Orth a.d.D., Bl 1902.5	145,30	0,305	0,453	-3,961		-3,0	-2,0
GW6B	Orth a.d.D., Bl 1902.001	145,33	0,382	0,778	-4,211		-4,0	-3,7
GW7	Orth a.d.D., Bl 1900.003	144,47	0,318	0,665	-4,336		-3,5	-2,9
GW8	Regelsbrunn, Bl 1898.2	143,30	0,221	0,386	-2,919		-1,7	-0,9
GW9	Eckartsau, Bl	142,56	0,282	0,573	-3,919		-2,6	-2,4
GW10	Eckartsau, Bl 1894.5	142,39	0,332	0,431	-3,919		-3,2	-2,3
GW11	Witzelsdorf, Br	141,36	0,211	0,338	-3,252		-1,6	-1,3
GW12	Petronell, Bl 1889.7	140,24	0,266	0,464	-3,794		-2,5	-1,8
GW13	Petronell, Bl 1889.2	140,04	0,288	0,366	-3,377		-2,4	-1,4
GW14	Stopfenreuth, Bl 123	139,35	0,198	0,076	-2,835		-1,2	-0,7
GW15	Hainburg Bl. 21	136,25	0,322	0,226	-1,918		-1,6	-0,3

Es soll hier angemerkt werden, dass die fallenden Trends mit $|Z| > Z_{\alpha/2} = Z_{0,995} = 2,576$ für fast alle Messstellen (mit Ausnahme von GW15) auch mit $\alpha=0,01$, also mit einem deutlich strengerem Kriterium, statistisch signifikant ist.

Mit Abbildung 29 wird eine vergleichende (synoptische) Darstellung der Entwicklung der mittleren GW-Stände aller untersuchten Messstellen gegeben. Dabei werden die Zeitreihen der Jahres-Mittelwerte mGW für jede Messstelle so skaliert, dass die Werte für 1996 gerade null ergeben; mit anderen Worten: es werden die Zeitreihen der Differenzen der mGW gegenüber dem jeweiligen Anfangswert (für 1996) aufgetragen. Dabei zeigen sich dann recht gut „trockene“ (z.B. 2003 oder 2011) und „nasse“ Jahre (z.B. 2002 oder 2013), wobei hier eben primär die Wasserführungen der Donau bestimmend war.

Der generell fallende Trend ist überall direkt erkennbar, für manche Stationen (z.B. GW6B) stärker, für andere (z.B. GW8) etwas schwächer.

Abgesehen von Station GW15, die bereits querab der Stauwurzel von Gabčíkovo liegt, haben alle Messstellen starke Differenzen (für die Periode 2022 gegen 1996), und zwar zwischen -41 cm und -124 cm; der Median dieser Differenzen liegt bei -96 cm.

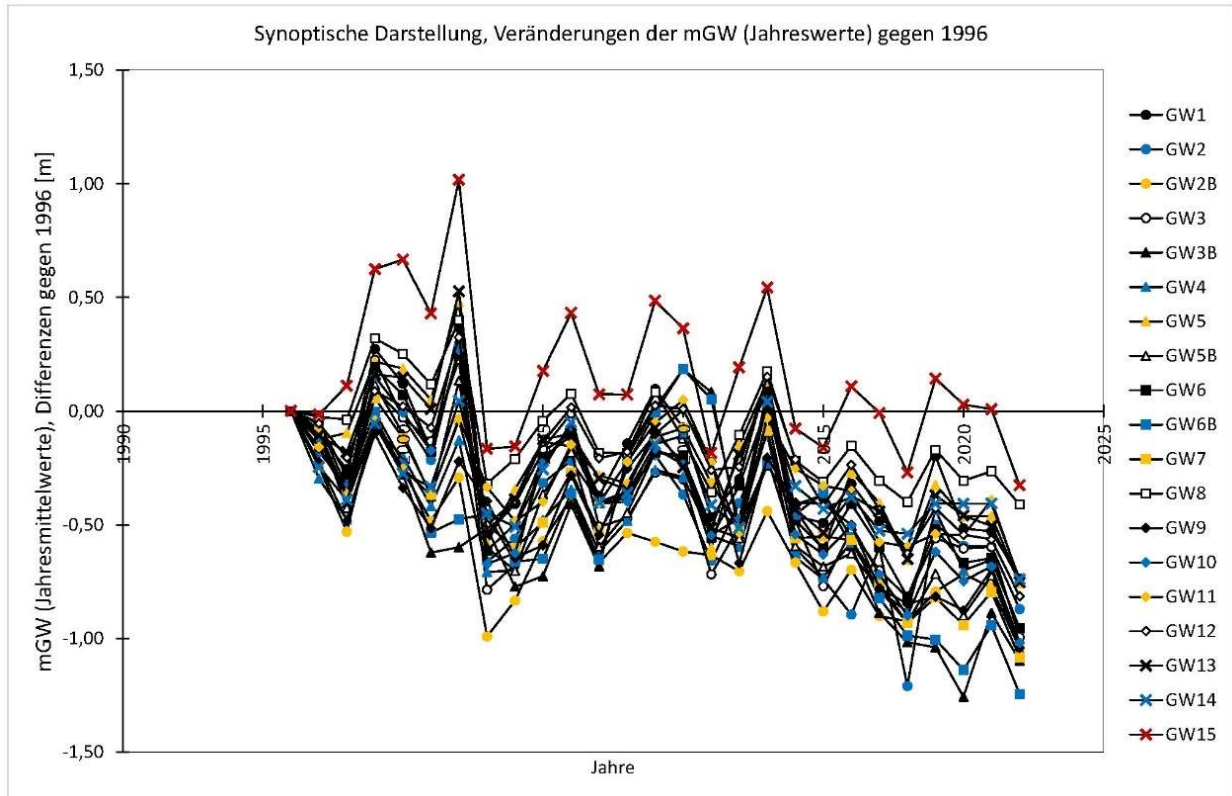


Abbildung 29: Synoptische Darstellung der Entwicklung der Jahresmittel der GW-Stände aller untersuchten Messstellen für die Reihe 1996/2022; es werden die Differenzen der Zeitreihen gegenüber dem jeweiligen Anfangswert (1996) aufgetragen.

Die Zeitreihen der Jahresniederschläge der drei untersuchten Stationen zeigen keine Anzeichen signifikant fallender Trends. Abbildung 30 zeigt dies beispielhaft für Bad Dt. Altenburg (HZB-Nr. 108555), der Trend für den Zeitraum 1996/2022 ist dort praktisch gleichbleibend. Die langjährigen Jahresmittelwerte der Niederschläge 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, mit Ausnahme von 2022, das aber auch nicht tiefer liegt als einige trockene Jahre in den 1970er- und 1980er-Jahren. Generell deutet jedenfalls nichts darauf hin, dass die fallenden Trends bei den mittleren GW-Ständen (Jahresmittelwerten) durch abnehmende Niederschläge verursacht sein könnten. Die Ursachen liegen 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 in dieser Strecke.

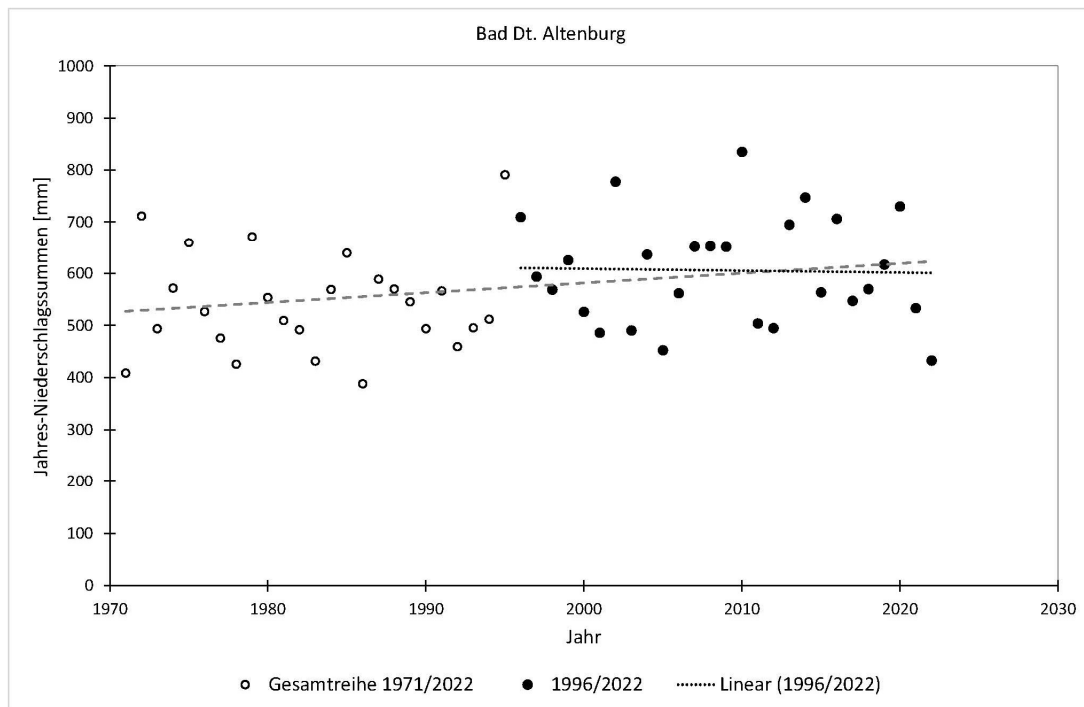


Abbildung 30: Jahres-Niederschlagssummen der Station Bad Dt. Altenburg (Reihe 1971/2022) mit besonderer Kennzeichnung der Werte der Untersuchungsperiode 1996/2022.

hoits eing zaum
hoits eing zaum
es dauert nimma laung
(Attwenger; aus: „most“)

4 Pegelbezogenen Auswertungen: Die Entwicklung der letzten Jahre (ab 2018), Suche nach Trendbrüchen

Für die Klärung der Frage, ob sich ab 2018 (Erhöhung der VHP-Zugabemengen) die Eintiefungsraten reduziert haben bzw. möglicherweise sogar Gleichgewicht in der Sohlage eingestellt hat, werden die Änderungsraten der charakteristischen Wasserstände (Methode 1) der gesamten Untersuchungsperiode (1996/2023) mit jenen der kurzen Reihe (2018/2023) verglichen, sh. Tabelle 12. Es wird aber für die kurze Reihe (für sich genommen) keine Teststatistik (MK-Test) vorgenommen, das hätte für solche, sehr kurzen ($n=6$ Jahre) Zeitreihen aus rein mathematisch-statistischen Gründen keinen Sinn. Denn es ist klar, dass für kürzere Zeitreihen (allgemeiner: kleinere Stichproben) die Streuung (allgemeiner: der Zufall) eine zunehmend dominante Rolle übernimmt. Aber man kann sich dennoch ansehen, also ohne Teststatistik, wie sich die Trendstärken dieser kurzen Reihen verhalten.

Auf diesem Weg zeigt sich, dass auch für die kurzen Reihen (ab 2018) an den Pegelstellen zwischen den Kraftwerks-UW und Hainburg Eintiefung herrscht, die damit abgeleiteten Änderungsraten sind teilweise sogar stärker als jene der Gesamtreihe (z.B. für Orth oder Bad Dt. Altenburg), teilweise von gleicher Größenordnung, vgl. Tabelle 12. Ein klarer Trendwechsel (von Eintiefung zu Auflandung oder auch nur zu gleichbleibender Tendenz) ist nirgends zu beobachten! Es stehen (im Rahmen der Methode 1) zwei Referenzzustände (RNQ und MQ) zur Verfügung und methodisch zwei Ansätze, und zwar (a.) eine lineare Regressionsanalyse (mit der Zeit als unabhängiger Variablen) und (b.) die Sen-Slopes, somit also vier Steigungsparameter: ϑ_{RNQ} und ϑ_{MQ} (Steigungen im Regressionsmodell) und β_{RNQ} und β_{MQ} (Sen-Slopes). Da zwei Untersuchungsperioden (1996/2023 versus 2018/2023) miteinander verglichen werden, gibt es in Tabelle 12 also acht Spalten mit Ergebnissen.

Tabelle 12: Änderungsraten für charakteristische Wasserstände nach Methode 1 ($w(RNQ)$ und $w(MQ)$); Gegenüberstellung der Ergebnisse für die gesamte Untersuchungsperiode (1996/2023) und die letzten Jahre (2018/2023), also „kurze Reihe“, wobei jeweils zwei konzeptiv verschiedene Steigungsmaße (Sen-Slope: β_Q und die Neigung nach linearer Regressionsanalyse mit der Zeit als unabhängiger Variable: ϑ_Q) betrachtet werden

Reihe:	Referenz-Zustand: RNQ				Referenz-Zustand: MQ			
	1996/2023 (Gesamtreihe)		2018/2023 (kurze Reihe)		1996/2023 (Gesamtreihe)		2018/2023 (kurze Reihe)	
Pegelstelle:	ϑ_{RNQ} [cm/a]	β_{RNQ} [cm/a]	ϑ'_{RNQ} [cm/a]	β'_{RNQ} [cm/a]	ϑ_{MQ} [cm/a]	β_{MQ} [cm/a]	ϑ'_{MQ} [cm/a]	β'_{MQ} [cm/a]
KW Freudenu, UW	-0,8	-0,8	-0,2	-0,5	-0,6	-0,6	-0,8	-1,0
Fischamend	-1,3	-1,2	-0,8	-0,6	-1,4	-1,4	-1,7	-1,7
Orth	-1,8	-1,6	-1,2	-1,9	-1,6	-1,7	-2,3	-2,4
Wildungsmauer	-1,4	-1,2	-0,8	-0,9	-1,3	-1,4	-2,1	-2,2
Bad Dt. Altenburg	-0,4	-0,5	-2,2	-2,8	-0,6	-0,5	-4,8	-4,7
Hainburg	-0,5	-0,5	-0,3	-0,5	-0,5	-0,6	-2,8	-2,7
Thebnerstraßl	+0,6	+0,5	-0,1	0,0	+0,7	+0,6	-1,1	-1,0
Wolfsthal	+0,7	+0,7	+0,7	+0,8	+0,9	+0,8	-0,2	-0,2

Für die einzelnen Pegelstellen und Zustände liefern beide Ansätze (also mit den Thetas und Betas) meist ähnliche Werte; die Methode zur Ermittlung der Trendstärke hat also einen geringen Einfluss auf die Ergebnisse. Das liegt daran, dass es bei den Werten nach Methode 1 (charakteristische Wasserstände) keine richtigen Ausreißer gibt. Etwas größere Differenzen gibt es aber für die kurze Reihe und RNQ in Bad Dt. Altenburg (-2,2 versus -2,8 cm/a), aber das ändert auch dort nichts Grundsätzliches. Aus methodischer Sicht (im Sinn einer robusten Statistik) wären die Betas höher zu gewichten als die Thetas. Für den Chow-Test (siehe weiter unten) sind hingegen die Thetas relevant.

Auffällig ist zunächst, dass die Ergebnisse für die kurze Reihe zwischen den beiden Zuständen (RNQ und MQ) stärker auseinanderklaffen, was für die Gesamtreihe nicht der Fall ist. Die Absolutbeträge der Änderungsraten der kurzen Reihen sind für RNQ meist schwächer und für MQ meist stärker; das ist für alle Pegelstellen im oberen Teilabschnitt (KW Freudenu UW bis Wildungsmauer) der Fall, im unteren Bereich aber nicht. Eine Erklärung für dieses Auseinanderklaffen ist nicht bekannt. Gewichtet man die Ergebnisse beider Zustände (RNQ und MQ) gleich stark, also mittelt man über beide Fälle, dann ergibt sich das Bild einer annähernd unverändert stark ablaufenden Sohlerosion. Das ist auch für den Pegel im UW des Kraftwerkes Freudenu der Fall.

Auffällig ist auch, dass sich zuletzt, also ab 2018 (und zwar hauptsächlich für die MQ-Werte), die Erosionsraten für Bad Deutsch Altenburg und Hainburg deutlich verstärkt haben, man sieht das auch direkt an den graphischen Darstellungen der Zeitreihen (vgl. Abbildung 10 und Abbildung 11), und auch für Thebnerstraßl und Wolfsthal zeigen sich zuletzt Eintiefungen, wo es zuvor Auflandungen gab. Ob dies mit den Geschieberückführungen der viadonau (Geschiebefang bei Treuschütt) zusammenhängt, werden erst die nächsten Jahre klarer zeigen; dies ist jedenfalls eine naheliegende Vermutung. Irritierend ist dabei allerdings, dass die RNQ-gestützten Werte dort weiterhin nur schwache Eintiefungen

bzw. ab Thebnerstraßl weiterhin Auflandungen zeigen, dass also beide Zustände unterschiedliche Aussagen liefern, was für die Gesamtreihe (1996/2023) nicht der Fall ist.

Man muss sich für die Interpretation bewusst halten, dass die Ergebnisse der kurzen Reihen viel stärker durch zufalls- bzw. fehlerbedingte Streuungen beeinflusst werden als jene zur Gesamtperiode, man sollte in dieser Hinsicht sehr vorsichtig mit dem „Erkennen“ von Mustern oder Zusammenhängen sein. Relevant ist aber, dass sich in dieser Stufe der Analyse und generell für alle Pegelstellen keine Hinweise darauf ergeben, dass die Sohlerosion zuletzt (ab 2018) deutlich abgenommen hätte.

Der primäre Ansatz zur Beurteilung der Frage, ob sich in den letzten Jahren (ab 2018) ein anderes Bild bezüglich der Sohlerosionen ergibt, erfolgt indirekt, und zwar über die Suche nach Trendbrüchen. Wenn es (für 2018 oder knapp danach) keinen Trendbruch gibt, dann bedeutet das, dass die ab 1996 bestehende Dynamik und die damit verbundenen Trends weiterlaufen, auch wenn die Werte naturgemäß und unvermeidbar mit gewissen Streuungen überlagert sind. Die Grundidee ist, dass man sich nicht auf wenige Jahre beschränkt, sondern nach wie vor den längeren Untersuchungszeitraum (eben seit 1996) im Blick hat, aber man sucht nun nach Inhomogenitäten²² bzw. Trendbrüchen, und nicht nach dem bloßen Trend an sich.

Diese Suche erfolgt im Folgenden dreistufig: Zunächst werden die Methode-1-Zeitreihen $w(RNQ)$ und $w(MQ)$ rein visuell beurteilt, mit der Frage, ob es visuell erkennbare Trendbrüche gibt oder nicht, sh. Tabelle 13. Im zweiten Schritt werden die Zeitreihen einem Homogenitäts- bzw. Bruchpunkttest unterzogen (Standard Normal Homogeneity-Test: SNHT; vgl. Wijngaard et al., 2003; sh. auch [Anhang A1](#)). Es gibt auch verschiedene ähnliche Tests (Pettitt-Test, Buishand Test, Von Neumann Ratio Test), der SNHT wird hier angewendet, weil er in Randbereichen (der Zeitreihe), wo solche Tests grundsätzlich problematisch sind, stärker sensitiv als die anderen Tests reagiert (Wijngaard et al., 2003).

Der SNHT ist – ähnlich wie die anderen Bruchpunkt-Tests – nicht direkt für Trendbrüche²³ (wenn also ein Trend mit Trendstärke β_1 mit einem anderen Trend mit Trendstärke β_2 wechselt) konzipiert; ein direkter Anwendungsfall ist die Suche nach Stellen, wo eine Zeitreihe abrupt ein mittleres Niveau, um das ihre Werte streuen, auf ein anderes mittleres Niveau wechselt (shifts, Sprünge). Dort hat die Prüfgröße (Teststatistik) des SNHT eine Spitze (nach oben oder unten, also ein Maximum in den Absolutbeträgen). Hat hingegen eine Zeitreihe einen (annähernd) konstanten Trend, dann stellt sich ein ungefähr parabelförmiger Verlauf der Prüfgröße zwischen dem Anfangs- und Endpunkt ein. Ein gutes Beispiel dafür ist der Verlauf für Wildungsmauer, Abbildung 33. Gibt es in der Zeitreihe einen Trendwechsel, dann sollte dort dieser etwa parabelförmige Verlauf durch eine ausgeprägte Spitze überlagert werden, Beispiele dafür sind die SNHT-Verläufe für Bad Dt. Altenburg und Hainburg (Abbildung 34 und Abbildung 35). Die Anwendung von Bruchpunkttests im Zusammenhang mit Trendanalysen wird in der wissenschaftlichen Literatur öfters empfohlen, vgl. u.a. Wijngaard et al., 2003, Jaiswal et al., 2015²⁴, in der wasserwirtschaftlichen Praxis werden sie aber offensichtlich noch kaum angewendet, obwohl der numerische Aufwand gering ist. Somit fehlen damit Erfahrungen. Der SNHT wird hier auch nur

²² Unter Inhomogenität versteht man in diesem Zusammenhang, dass sich die Verteilungsfunktion, die die Grundgesamtheit beschreibt, im Lauf der Zeit verändert, entweder abrupt (sprunghaft), oder allmählich (Trend).

²³ Die Formulierungen „Trendbrüche“ und „Trendwechsel“ werden in dieser Studie synonym verwendet.

²⁴ Jaiswal, R. K., Lohani, A. K., & Tiwari, H. L. (2015). Statistical analysis for change detection and trend assessment in climatological parameters. *Environmental Processes*, 2(4), 729-749.

ergänzend (zu den zuvor genannten Auswertungen) vorgenommen; die visuelle Beurteilung der Zeitreihen (sh. [Tabelle 13](#)) bleibt das primäre und anschaulichste Werkzeug.

Tabelle 13: Visuelle Beurteilung der nach Methode 1 ermittelten Zeitreihen $w(RNQ)$ und $w(MQ)$ auf das Vorliegen von Trendbrüchen (speziell bei bzw. nach 2018)

Pegelstelle:	graphische Darstellung	visuelle Beurteilung		Anmerkungen / Besonderheiten
		für $w(RNQ)$	für $w(MQ)$	
KW Freudenau, UW	Abb. 6	kein Anzeichen für einen Trendbruch bei (oder nach) 2018; auch zuletzt schwach fallender Trend	kein Anzeichen für einen Trendbruch bei (oder nach) 2018; auch zuletzt schwach fallender Trend	
Fischamend	Abb. 7	kein Anzeichen für einen Trendbruch bei (oder nach) 2018; auch zuletzt schwach fallender Trend	kein Anzeichen für einen Trendbruch bei (oder nach) 2018; auch zuletzt fallender Trend	insgesamt sehr unruhig; d.h. stärkere Streuungen / Residuen; Trendbruch bei etwa 2009
Orth	Abb. 8	kein Anzeichen für einen Trendbruch bei (oder nach) 2018; auch zuletzt fallender Trend	kein Anzeichen für einen Trendbruch bei (oder nach) 2018; auch zuletzt fallender Trend	für das Jahr 2020 stärkere Residuen nach oben; zuvor (etwa 2010) für RNQ ein möglicher Trendbruch (von stark fallend auf schwächer fallend); aber unklar
Wildungsmauer	Abb. 9	kein Anzeichen für einen Trendbruch bei (oder nach) 2018; auch zuletzt fallender Trend	kein Anzeichen für einen Trendbruch bei (oder nach) 2018; auch zuletzt fallender Trend	Trendbruch für RNQ bei ca. 2007; insgesamt sehr glatter Verlauf, geringe Streuungen / Residuen
Bad Dt. Altenburg	Abb. 10	möglicher Trendbruch bei 2020 von schwach fallend auf stark fallend	möglicher Trendbruch bei 2020 von schwach fallend zu stark fallend	für RNQ bei 2013 stärkerer Anstieg (nicht für MQ)
Hainburg	Abb. 11	möglicher Trendbruch bei 2021 von schwach fallend zu fallend	noch unklar, aber jedenfalls keine Abschwächung der Eintiefung	für 2020 stärkere Abweichung (Residuen) nach oben
Thebnerstraßl	Abb. 12	möglicher Trendbruch bei 2020 von schwach steigend zu gleichbleibend	möglicher Trendbruch bei 2020 von schwach steigend zu schwach fallend; noch unklar	insgesamt sehr glatter Verlauf, geringe Streuungen / Residuen
Wolfsthal	Abb. 13	kein Anzeichen für einen Trendbruch bei (oder nach) 2018; auch zuletzt schwach steigender Trend	möglicher Trendbruch bei 2020 von schwach steigend auf gleichbleibend; noch unklar	für MQ sehr glatter Verlauf, geringe Streuungen / Residuen

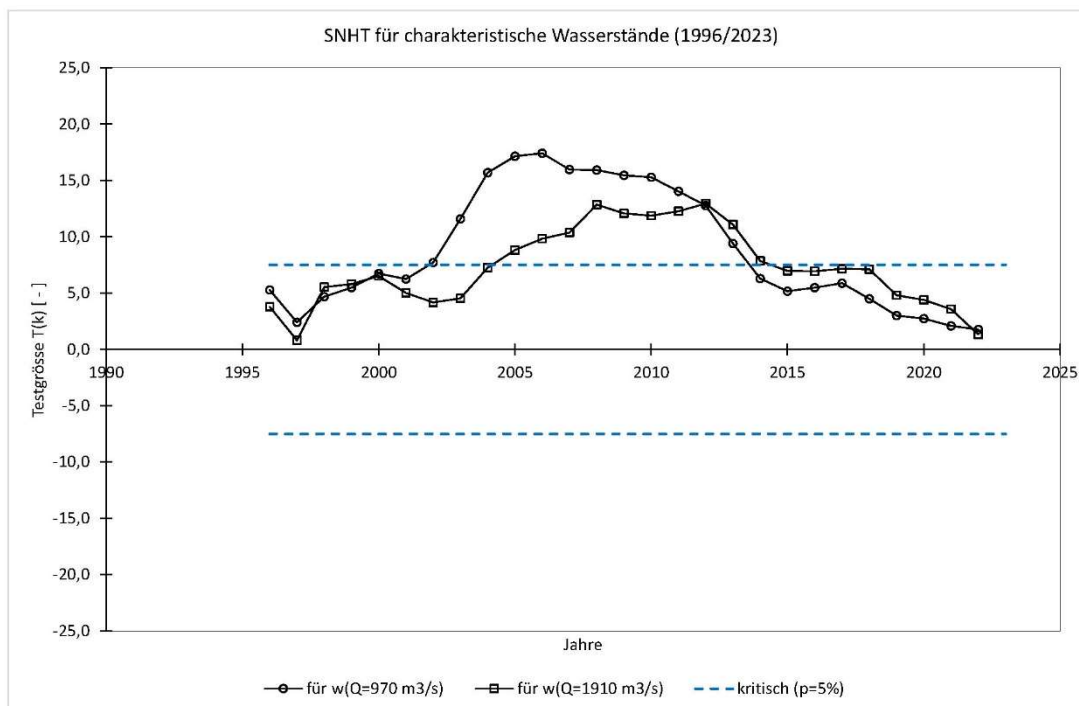


Abbildung 31: SNHT (Standard Normal Homogeneity Test) für die Zeitreihen $w(RNQ)$ und $w(MQ)$ am Pegel KW Freudenua UW; Untersuchungsperiode 1996/2023. Das Überschreiten des kritischen Wertes hat damit zu tun, dass diese Zeitreihen durch die Trends grundsätzlich inhomogen sind.

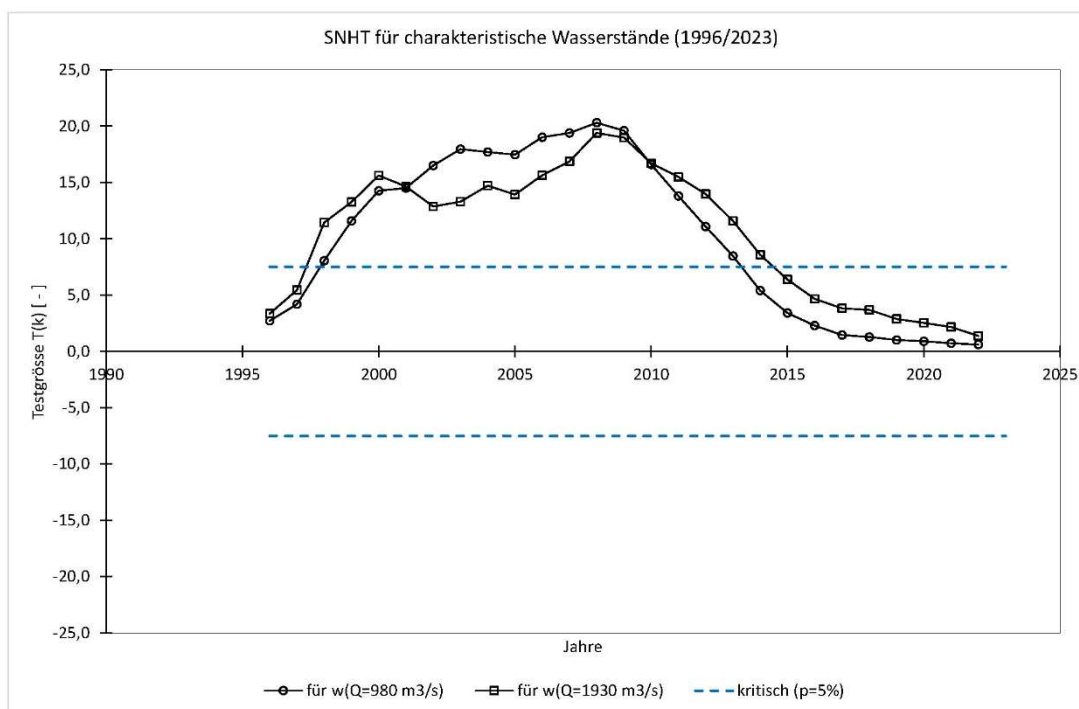


Abbildung 32: SNHT (Standard Normal Homogeneity Test) für die Zeitreihen $w(RNQ)$ und $w(MQ)$ am Pegel Fischamend; Untersuchungsperiode 1996/2023. Das Überschreiten des kritischen Wertes hat damit zu tun, dass diese Zeitreihen durch die Trends grundsätzlich inhomogen sind.

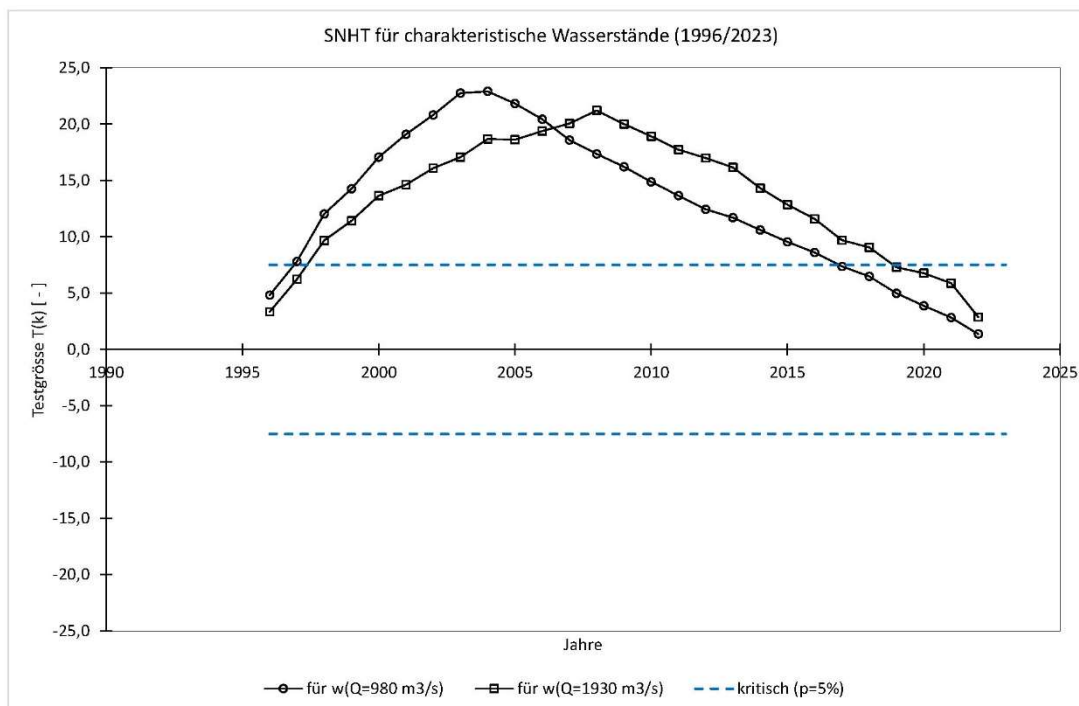


Abbildung 33: SNHT (Standard Normal Homogeneity Test) für die Zeitreihen $w(RNQ)$ und $w(MQ)$ am Pegel Wildungsmauer; Untersuchungsperiode 1996/2023. Das Überschreiten des kritischen Wertes hat damit zu tun, dass diese Zeitreihen durch die Trends grundsätzlich inhomogen sind.

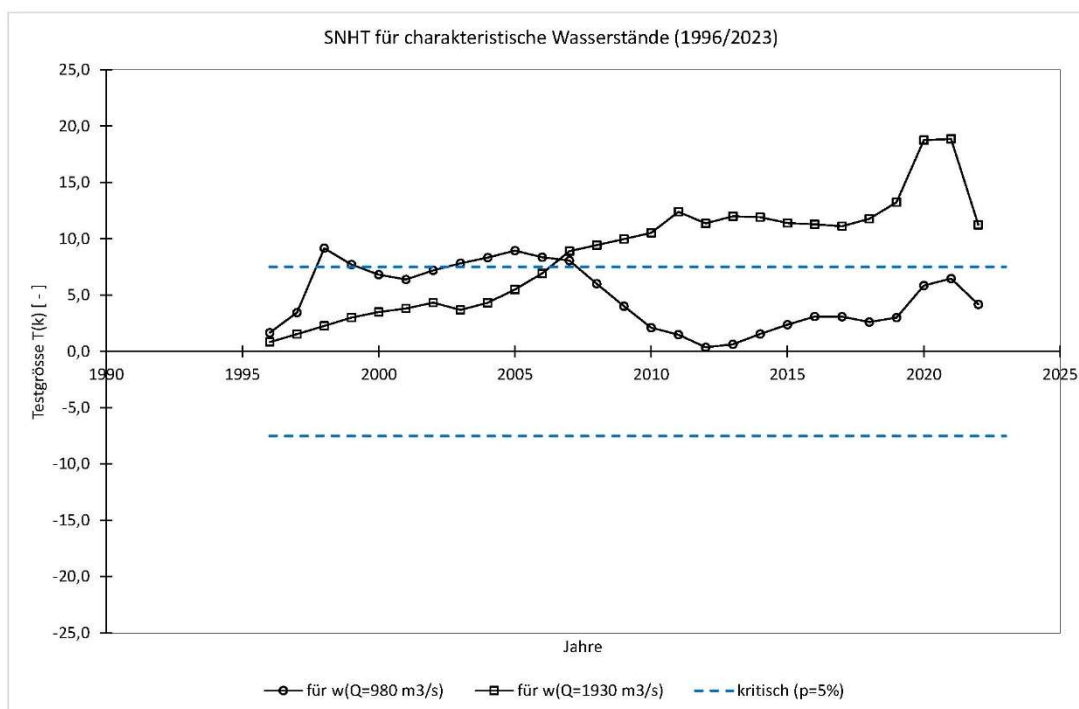


Abbildung 34: SNHT (Standard Normal Homogeneity Test) für die Zeitreihen $w(RNQ)$ und $w(MQ)$ am Pegel Bad Dt. Altenburg; Untersuchungsperiode 1996/2023. Das Überschreiten des kritischen Wertes hat damit zu tun, dass diese Zeitreihen durch die Trends grundsätzlich inhomogen sind. Die ausgeprägte Spitze (speziell für $w(MQ)$) bei 2020/2021 deutet auf eine zusätzliche Inhomogenität.

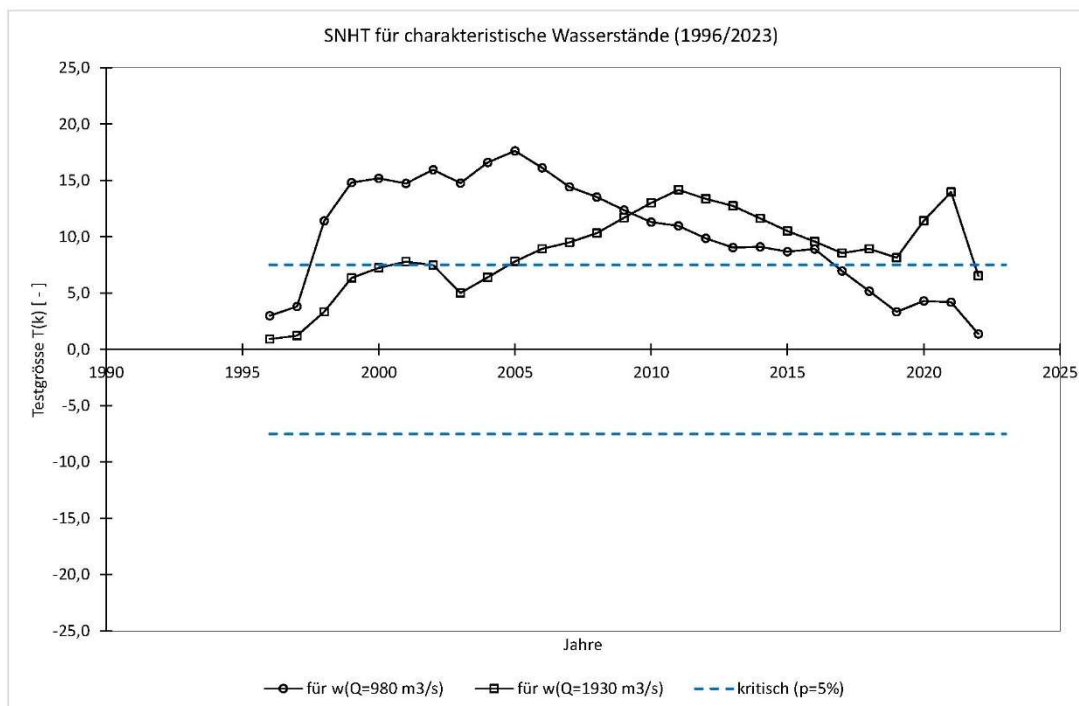


Abbildung 35: SNHT (Standard Normal Homogeneity Test) für die Zeitreihen $w(RNQ)$ und $w(MQ)$ am Pegel Hainburg; Untersuchungsperiode 1996/2023. Das Überschreiten des kritischen Wertes hat damit zu tun, dass diese Zeitreihen durch die Trends grundsätzlich inhomogen sind. Die ausgeprägte Spitze (speziell für $w(MQ)$) bei 2021 deutet auf eine zusätzliche Inhomogenität.

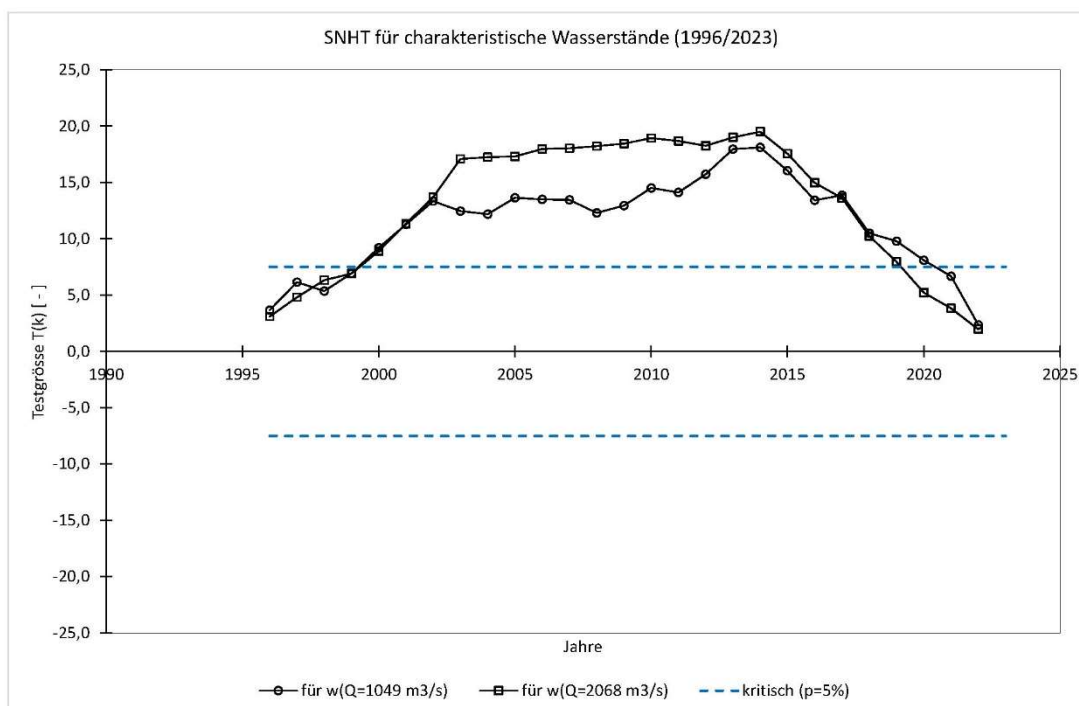


Abbildung 36: SNHT (Standard Normal Homogeneity Test) für die Zeitreihen $w(RNQ)$ und $w(MQ)$ am Pegel Wolfsthal; Untersuchungsperiode 1996/2023.

Die Verläufe der SNHT-Testgrößen²⁵ zeigen, dass die Zeitreihen grundsätzlich inhomogen sind; das entspricht den dort wirksamen Trends. Annähernd parabelförmige Verläufe, wie sie bei linearen Trends zu erwarten sind, zeigen sich für den Pegel Wildungsmauer (Abbildung 33). Die Verläufe für die Pegel KW Freudenua UW und Fischamend (Abbildung 31 und Abbildung 32) sind unruhiger, ungleichmäßiger, stärker von Streuung überlagert, aber sie haben keine ausgeprägten Spitzen, vor allem für die letzten Jahre (also ab 2018) zeigen sie, ähnlich wie Wildungsmauer, keine Anzeichen einer stärker ausgeprägten Inhomogenität (Sprung oder Trendwechsel). Solche Anzeichen sind auch für Wolfsthal (Abbildung 36) nicht erkennbar.

Ausnahmen sind aber die SNHT-Verläufe für Bad Dt. Altenburg (Abbildung 34) und Hainburg (Abbildung 35), wo man für MQ und 2020/2021 solche Spitzen tatsächlich findet. Der Vergleich mit den zugehörigen Plots der Zeitreihen $w(RNQ)$ und $w(MQ)$ zeigt, dass es dort Brüche hin zu stärker fallenden Trends gibt; wie bereits zuvor kurz diskutiert, könnte dies mit zuletzt stärkeren Geschieberückführungen der viadonau zusammenhängen, andererseits klaffen die Befunde für die zwei Zustände RNQ und MQ auseinander, was derzeit nicht erklärt werden kann. Eine Abschwächung der Eintiefungstendenz für die letzten Jahre – um auf die hier relevante Fragestellung zurückzukommen – ist dort jedenfalls nicht zu beobachten.

Für die beiden Pegelstellen Orth und Thebnerstraßl wurden solche Auswertungen (SNHT) wegen der dort verkürzten Reihen nicht vorgenommen.

Im dritten Schritt wird ein spezieller F-Test, der Chow-Strukturbruchtest (Chow, 1960) angewandt. Dieser Test prüft die Nullhypothese H_0 , dass ein Modell mit Strukturbruch, hier mit Trendbruch ab dem Jahr 2018, statistisch signifikant bessere Ergebnisse ergibt als ein über die gesamte Reihe (1996/2023) reichendes lineares Regressionsmodell (mit der Neigung ϑ_c).

Präziser formuliert lautet die Nullhypothese H_0 , dass das Modell mit Trendbruch (also mit den Neigungen ϑ_1 für 1996/2017 und ϑ_2 für 2018/2023) keine Verbesserungen gegenüber dem einfachen linearen Regressionsmodell (1996/2023, mit Neigung ϑ_c) ergibt. Dabei werden (unter Anwendung einer Varianzanalyse bzw. Varianzzerlegung) Residualquadratsummen des einfachen Modells (ohne Trendbruch) RSS_c mit dem geteilten Modell (d.h. mit Trendwechsel) mit RSS_1 (erster Teilabschnitt) und RSS_2 (zweiter Teilabschnitt) in Beziehung gesetzt, wobei aus den Residualquadratsummen (durch Division mit den zugehörigen Freiheitsgraden) schließlich mittlere Residualquadratsummen gebildet werden. Die zugehörige Teststatistik (Prüfgröße) lautet:

$$T = \frac{(RSS_c - (RSS_1 + RSS_2))/k}{(RSS_1 + RSS_2)/(n - 2k)} \quad (\text{Gl. 8})$$

vgl. auch Anhang A1 bzw. ausführlicher: Chow (1960).

Diese Prüfgröße wird mit dem kritischen Wert der F-Verteilung mit Irrtumswahrscheinlichkeit α und den beiden Freiheitsgraden k und $(n - 2k)$, also $F(\alpha; k; n - 2k)$ verglichen; denn das Verhältnis zweier Varianzen σ_x^2/σ_y^2 folgt (unter Annahme weiterer Voraussetzungen) der F-Verteilung.

Wenn $T \geq F_{crit} = F(\alpha; k; n - 2k)$, dann wird die Nullhypothese H_0 verworfen, dann liefert das Modell mit unterschiedlichen Regressionsgeraden auf den Teilintervallen [1996; 2017] und [2018; 2023] (und einem Trendwechsel von ϑ_1 zu ϑ_2 bei 2018) statistisch signifikant bessere Ergebnisse als das

²⁵ Aus numerischen Gründen (vgl. Anlage A) liefert der SNHT für den letzten Zeitschritt (hier das Jahr 2023) keinen Wert, daher ist der letzte Punkt in den SNHT-Abbildungen die Testgröße für 2022; es werden aber alle Werte (also bis 2023) berücksichtigt.

lineare Regressionsmodell über die gesamte Zeitreihe (1996/2023) mit Neigung ϑ_c . Mit anderen Worten: Dann ist es (im Sinn einer schließenden Statistik) vernünftig, von einem Strukturbruch (hier: Trendwechsel) auszugehen. Da dieser Test gerade in den Randbereichen ziemlich sensitiv reagiert (vgl. Tabelle 14), wurde hier – abweichend von den anderen Teststatistiken zuvor – ein strengeres Signifikanzniveau (geringere Irrtumswahrscheinlichkeit) angewandt, nämlich $\alpha = 1\%$.

Für die Zeitreihen mit Werten ab 1996 ($n = 28$) ist $F(0,01; 2; 24) = 5,614$; für Orth (Werte ab 2003; $n = 21$) ist $F(0,01; 2; 17) = 6,112$ und für Thebnerstraßl (Werte ab 2000; $n = 24$) ist $F(0,01; 2; 20) = 5,489$ (vgl. z.B. Weber, 1983)²⁶.

Abbildung 37 zeigt die dahinterstehende Modellbildung exemplarisch für Bad Dt. Altenburg und die Zeitreihe $w(MQ)$, wo für 2018 tatsächlich (und statistisch stark signifikant) ein Trendwechsel (dort von schwach fallend auf stark fallend) vorliegt, also mit den beiden linearen Regressionsmodellen, die miteinander verglichen werden. In Tabelle 14 werden die wesentlichen Ergebnisse für die beiden untersuchten Zustände und alle Pegelstellen aufgelistet. Die Neigungen ϑ_2 (für die Phase 2018/2023) und ϑ_c (für die gesamte Phase 1996/2023) entspricht den bereits in Tabelle 12 angegebenen Werten (dort mit etwas anderen Indizes).

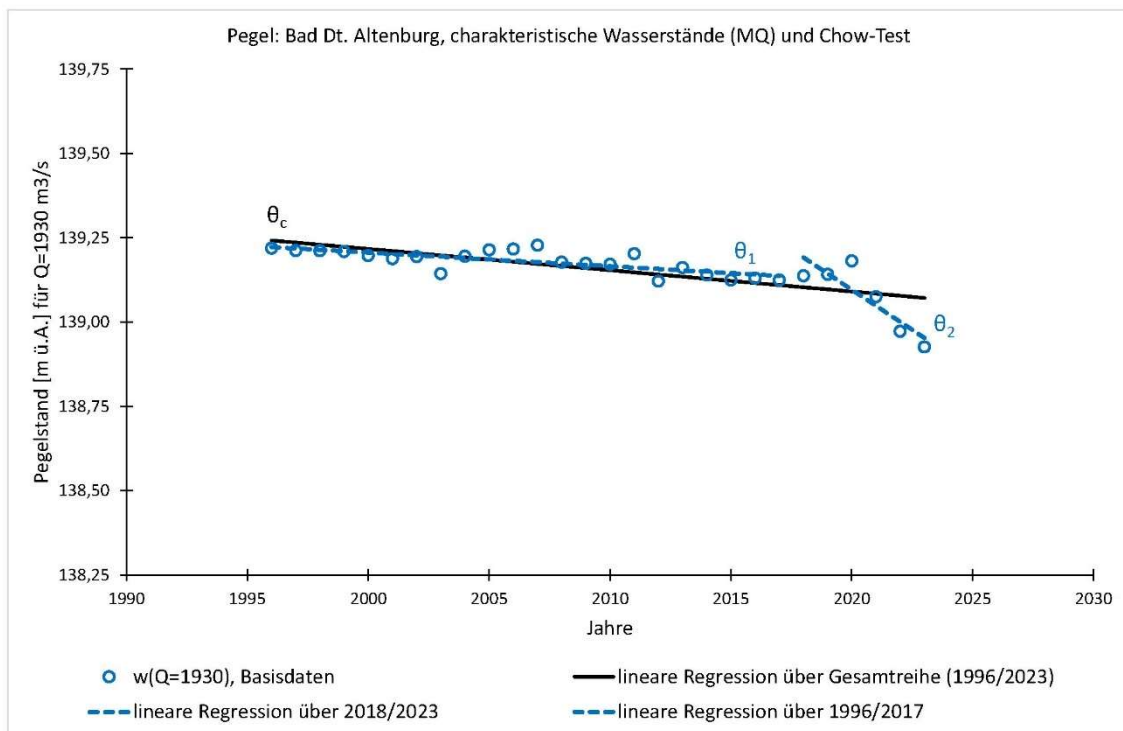


Abbildung 37: Chow-Test für die Zeitreihen $w(MQ)$ am Pegel Bad Dt. Altenburg; Untersuchungsperiode 1996/2023; eingetragen sind die beiden miteinander verglichenen linearen Regressionsmodelle, einerseits das Modell (schwarz) ohne Trendwechsel (über die gesamte Reihe 1996/2023) und andererseits das Modell (blau) mit Trendwechsel (bei 2018), also mit abschnittsweise unterschiedlichen Neigungen.

Der Chow-Test korrespondiert mit den bereits unter Tabelle 12 angegebenen Neigungen, wobei dort die ϑ_1 (Neigung des linearen Regressionsmodells 1996/2017) nicht angegeben sind. Alle relevanten Werte sind in Tabelle 14 aufgelistet.

²⁶ Die Berechnung solcher Werte (p-Quantile) wird auch durch diverse Computerprogramme (Excel, Statistikprogramme) geleistet.

Tabelle 14: Ergebnisse des Chow-Strukturbruchtests für die beiden Zeitreihen nach Methode 1, $w(RNQ)$ und $w(MQ)$; n ist die Anzahl der Beobachtungswerte (Jahre), $F_{\alpha;k;n-2k}$ ist die kritische Prüfgröße mit dem gewählten Signifikanzniveau $\alpha = 1\%$ und den relevanten Nenner- und Zählerfreiheitsgraden; ϑ_c ist die Neigung des linearen Regressionsmodells über die Gesamtreihe (1996/2023), ϑ_1 und ϑ_2 sind die Neigungen des Modells mit Trendbruch (lineare Regression über 1996/2017 + lineare Regression über 2018/2023) und T ist die jeweilige Teststatistik (Prüfgröße) gem. Chow-Test. Für Orth und Thebnerstraßl liegen kürzere Zeitreihen vor, n ist also geringer, was u.a. auch bei der kritischen Prüfgröße berücksichtigt wird. Fett gedruckte Zahlen stehen für Fälle, wo die Nullhypothese („es gibt keinen Trendbruch“) zu verwerfen ist.

Pegelstelle:	n	$F_{\alpha;k;n-2k}$ [-]	Ref.-Zustand: RNQ				Ref.-Zustand: MQ			
			ϑ_c [cm/a]	ϑ_1 [cm/a]	ϑ_2 [cm/a]	T [-]	ϑ_c [cm/a]	ϑ_1 [cm/a]	ϑ_2 [cm/a]	T [-]
KW Freudenau, UW	28	5,614	-0,8	-0,9	-0,2	0,666	-0,6	-0,6	-0,8	0,021
Fischamend	28	5,614	-1,3	-2,2	-0,8	24,68	-1,4	-2,0	-1,7	6,972
Orth	21	6,112	-1,8	-2,3	-1,2	3,468	-1,6	-2,0	-2,3	3,418
Wildungsmauer	28	5,614	-1,4	-1,7	-0,8	7,271	-1,3	-1,4	-2,1	7,466
Bad Dt. Altenburg	28	5,614	-0,4	-0,4	-2,2	1,116	-0,6	-0,4	-4,8	18,29
Hainburg	28	5,614	-0,5	-0,6	-0,3	0,875	-0,5	-0,5	-2,8	4,293
Thebnerstraßl	24	5,849	+0,6	+0,5	-0,1	2,702	+0,7	+0,7	-1,1	7,828
Wolfsthal	28	5,614	+0,7	+0,6	+0,7	0,810	+0,9	+0,9	-0,2	2,782

Statistisch signifikante Trendwechsel (von Neigung ϑ_1 auf ϑ_2) zeigen sich für die Pegelstellen Fischamend (beide Referenzzustände), Wildungsmauer (beide Referenzzustände), Bad Dt. Altenburg (nur MQ) und Thebnerstraßl (nur MQ).

Für die Pegelstellen KW Freudenau UW, Orth, Hainburg und Wolfsthal ergibt der Chow-Test keine statistisch signifikanten Trendwechsel.

Für Fischamend zeigt der Test tatsächlich eine statistisch signifikante Abnahme der Eintiefungsraten (ab 2018) für beide Referenzzustände, aber die Absenkraten für $w(MQ)$ sind mit zuletzt -1,7 cm/a immer noch stark, und auch für $w(RNQ)$ bleibt es ein Eintiefungsregime.

Für Wildungsmauer sind die Ergebnisse des Chow-Tests unerwartet (visuell sind Trendwechsel bei 2018 nicht augenfällig) und widersprüchlich, weil die Trendwechsel für beide Zustände in unterschiedliche Richtungen gehen: Für $w(RNQ)$ in Richtung geringerer Eintiefungsraten (von -1,7 auf -0,8 cm/a), für $w(MQ)$ jedoch in Richtung stärkerer Eintiefungen (von -1,4 auf -2,1 cm/a); in einer Gesamtbeurteilung (Berücksichtigung beider Zustände) ist von einem Weiterlaufen des früheren Trends auszugehen.

Für Bad Dt. Altenburg zeigt sich, dort hauptsächlich für $w(MQ)$, und wie bereits weiter oben beschrieben, eine starke Zunahme der Eintiefungsraten, jedenfalls keine Abnahme, während $w(RNQ)$ ebenfalls zunehmenden Trend zeigt, dies aber nicht statistisch signifikant. Für Hainburg nehmen nur die Eintiefungsraten der $w(MQ)$ zu, was aber (noch) nicht statistisch signifikant ist.

Die Ergebnisse für Thebnerstaßl sind ähnlich wie jene für Bad Deutsch Altenburg, auch dort ist ein Trendwechsel (ab 2018) für $w(MQ)$ statistisch signifikant, allerdings wechselt der Trend dort das

Vorzeichen, also von steigend zu fallend, und nicht bloß von fallend auf stärker fallend. Für $w(RNQ)$ ist die Entwicklung ähnlich, aber schwächer, und der Trendwechsel (noch) nicht statistisch signifikant.

4.1 Zusammenführen der Ergebnisse

Hier werden zunächst die Ergebnisse im Zusammenhang mit der Suche nach Trendbrüchen (ab 2018) zusammengeführt, Tabelle 15:

Tabelle 15: Hinweise auf Trendbrüche (2018 oder knapp danach), Zusammenführen der Ergebnisse nach verschiedenen Methoden

Pegelstelle:		visuelle Beurteilung:	Homogenitätstest, SNHT:	Strukturbruchtest nach Chow (1960):
KW Freudenau, UW	Abb. 6	keine Hinweise	keine Hinweise	Neigung der Regressionsgeraden für RNW geringer werdend, für MW stärker werdend; aber keine statistisch signifikanter Trendbrüche; weiter Eintiefungen
Fischamend	Abb. 7	keine Hinweise; (aber Trendbrüche vor 2018), starke Variabilität	keine Hinweise	Neigung der Regressionsgeraden für RNW und MW geringer werdend, Trendbruch statistisch signifikant, aber zuletzt immer noch starke Eintiefungen (speziell für MW); weiter (stärkere) Eintiefungen
Orth	Abb. 8	keine Hinweise	nicht untersucht	keine statistisch signifikanter Trendbrüche; weiter stärkere Eintiefungen
Wildungsmauer	Abb. 9	keine Hinweise (aber Trendbrüche vor 2018)	keine Hinweise	widersprüchliche; statistisch signifikante Trendbrüche; für RNW schwächer werdende, aber für MW stärker werdende Neigungen; weiter (stärkere) Eintiefungen
Bad Dt. Altenburg	Abb. 10	Trendbruch bei 2020 von schwach fallend auf stark fallend	Hinweis auf Trendbruch 2020/21 für MW	Neigung der Regressionsgeraden für RNW und MW von schwach fallend auf stärker fallend; Trendbruch für MW statistisch signifikant; weiter stärkere Eintiefungen
Hainburg	Abb. 11	Trendbruch bei 2021 von schwach fallend zu fallend	Hinweis auf Trendbruch 2020/21 für MW	Neigung der Regressionsgeraden für MW von schwach fallend auf stärker fallend; Trendbruch aber noch nicht statistisch signifikant; weiter Eintiefungen
Thebnerstraße	Abb. 12	Trendbruch bei 2020 von schwach steigend zu schwach fallend	nicht untersucht	Neigung der Regressionsgeraden für MW von schwach steigend zu fallend; Trendbruch für MW statistisch signifikant; nun wieder Eintiefungen
Wolfsthal	Abb. 13	Trendbruch bei 2020 von schwach steigend auf gleichbleibend? noch unklar	keine Hinweise	Neigung der Regressionsgeraden für MW von schwach steigend auf schwach fallend; keine statistisch signifikanter Trendbrüche; noch unklar

Es gibt für keinen Pegel klare Hinweise auf Trendwechsel von Eintiefungen auf eine gleichbleibende Tendenz oder vielleicht sogar zu Auflandungen. Ganz im Gegenteil, für Bad Dt. Altenburg gibt es einen statistisch signifikanten Trendwechsel zu stärker fallenden MW-Ständen, was sich in abgeschwächter (und nicht statistisch signifikanter Form) auch bei Hainburg zeigt und für Thebnerstraßl mit einem Wechsel von schwacher Auflandung zu Eintiefungen (statistisch signifikant für MW) korrespondiert. Wie bereits weiter oben erwähnt, könnte das an den stärkeren Geschieberückführungen (Geschiebefang Furt Treuschütt) der viadonau liegen, allerdings klaffen die Ergebnisse für RNW und MW auseinander, ob dies damit erklärt werden kann, werden erst die nächsten Jahre klarer zeigen.

Für den oberen Teilabschnitt (KW Freudenau UW bis Orth) überwiegen die Hinweise auf ein Weiterlaufen der bisherigen Trends. Das gilt im Besonderen für KW Freudenau UW und Orth. Für Fischamend findet man zwar (ab 2018) mit dem Chow-Test statistisch signifikante Trendwechsel hin zu schwächeren Eintiefungen (sowohl für RNW als auch für MW), aber die Eintiefungen bleiben weiter stark (vor allem für MW). Generell dürfte der Bereich beim Pegel Fischamend stark durch die Geschieberückführungen der viadonau beeinflusst und gestützt werden, was die dortige sehr starke Variabilität erklären kann.

Etwas widersprüchlich sind die Befunde für Wildungsmauer, wo man mit dem Chow-Test statistisch signifikante Trendbrüche (ab 2018) für RNW und für MW findet, aber mit konträren Richtungen, für RNW nehmen die Trends ab, für MW nehmen sie zu. Bei visueller Beurteilung zeigt sich ein primärer Trendbruch (hin zu schwächeren Trends) lange vor 2018, und zwar etwa bei 2010 (oder knapp zuvor). In der Gesamtbewertung wird auch die Tendenz für Wildungsmauer als annähernd gleichbleibend eingeschätzt.

5 Berücksichtigung der hydrologischen Randbedingungen der letzten Jahre (2018/2023) für die Interpretation

Für die Beurteilung der Wirkung der VHP-Geschiebezugaben der letzten Jahre (ab 2018) ist auch zu berücksichtigen, dass diese Phase außergewöhnlich abflussschwach war (vgl. auch Kap. 2.4.4); der Durchschnitt über 2018/2023 lag bei $MQ=1721 \text{ m}^3/\text{s}$, das ist nur ca. 90,1% des MQ-Wertes gem. KWD-2020 (Abflussdaten für 2023 noch Rohdaten), sh. Tabelle 16, somit wurde auch weniger Geschiebe bewegt als im langjährigen Durchschnitt.

Die Differenzen sind auch für die zugehörigen Abflussdauerlinien klar erkennbar, vgl. Abbildung 38. Dabei zeigt sich, dass die relativen Differenzen über große Teile des Abflussspektrums ähnlich waren, für Niederwasser (Überschreitung \rightarrow 100%) laufen die Dauerlinien aber zusammen.

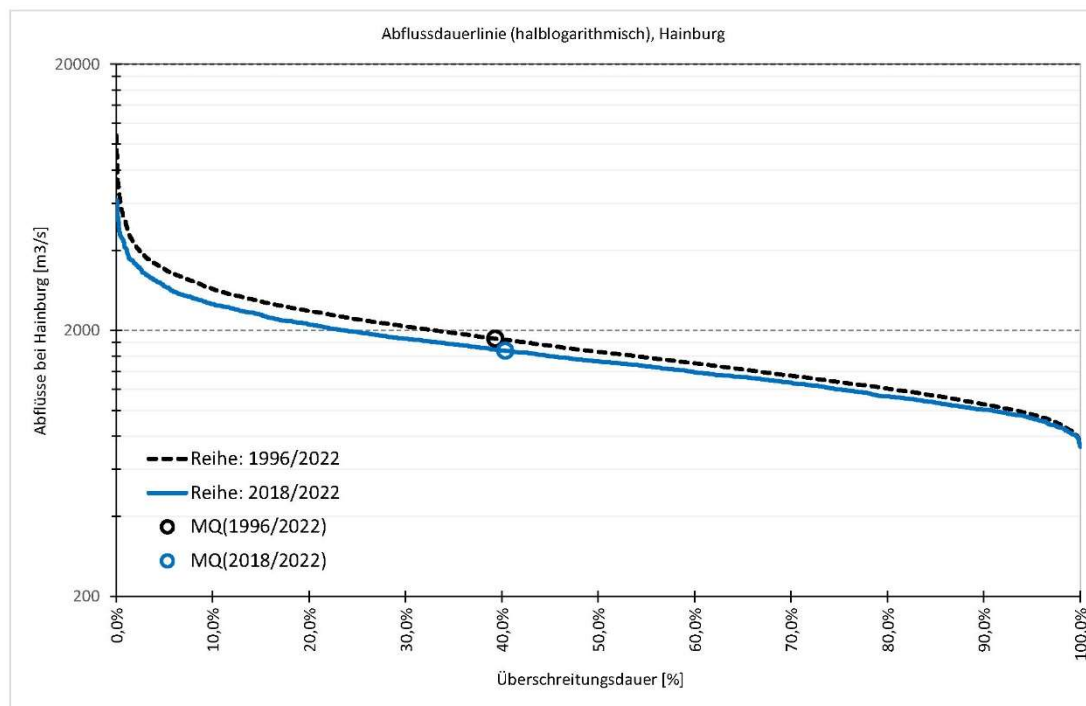


Abbildung 38: Dauerlinie für die Abflüsse bei Hainburg, Gegenüberstellung der Reihe 1996/2022 (schwarz, strichliert) versus 2018/2022 (blau, durchgängig); Basisdaten über eHYD; Skalierung halblogarithmisch (Abflüsse logarithmisch, Dauer linear).

Die Beziehung zwischen Durchflüssen und Geschiebetransport ist überlinear (mit einem Exponenten $\geq 1,5$, meist auch ≥ 2), was durch Geschiebemessungen und Fachliteratur nachweisbar ist (z.B. für die Donau in der österreichisch/slowakischen Grenzstrecke: Holubova, 2005)²⁷. Damit wird die Diskrepanz gegenüber dem langjährigen Durchschnitt noch größer. Dabei wäre allerdings auch zu berücksichtigen, dass höhere Abflüsse (die eben überproportional zum Feststofftransport beitragen) möglicherweise weniger stark abgenommen haben; die Abflussdauerlinie (Abbildung 38) zeigt, dass das hier über weite Teile des Abflussspektrums nicht der Fall war.

Diese Aspekte kann man nach aktuellem Kenntnisstand gut berücksichtigen, wenn man die Werte zum Geschiebetransport verwendet, die vom Hydrographischen Dienst für Hainburg Straßenbrücke über eHYD (bzw. die digitalen Hydrographischen Jahrbücher) veröffentlicht werden. Diese Daten liegen nur bis 2022 vor, und die Vergleichs-Reihe (für den langjährigen Durchschnitt) beginnt erst 2008. Mit dem langjährigen Mittelwert (also 2008/2022) von 11,38 kg/s und den Werten zwischen 2018 und 2022 (vgl. Tabelle 16) ergibt sich, dass in dieser Phase der Geschiebetransport nur rd. 86% des langjährigen Mittelwertes ausgemacht hat. Unter dem langjährig gemittelten Abflussregime wären, also höhere Geschiebeausträge (Faktor: $100\%/85,7\% \approx 1,17$) zu erwarten.

Dies ist bei der Interpretation der Daten der letzten Jahre jedenfalls zu berücksichtigen.

²⁷ Holubová, K., Capeková, Z., & Szolgay, J. (2004, June). Impact of hydropower schemes at bedload regime and channel morphology of the Danube River. In River Flow (Vol. 1, pp. 135-142). Balkema Publisher.

Tabelle 16: Mittlere Abflüsse MQ_i (Wildungsmauer) der letzten Jahre (2018/2023), Werte nach eHYD (für 2023 vorläufiger Wert gem. viadonau-Rohdaten), absolut und relativ, bezogen auf den mittleren Abfluss gem. KWD-2020; mittlerer Geschiebetransport GT_i (Jahresmittel) gem. digitaler Hydrographischer Jahrbücher, relativ, bezogen auf das Mittel 2008/2022

Jahre / Reihe:	MQ_i [m³/s]	MQ_i/MQ_{KWD} [%]	GT_i [kg/s]	$GT_i/GT_{2008/2022}$ [%]
2018	1570,6	82,2%	8,74	76,8%
2019	1875,3	98,2%	12,10	106,4%
2020	1674,2	87,7%	9,34	82,1%
2021	1720,1	90,1%	10,60	93,2%
2022	1537,9	80,5%	7,94	69,8%
2023	1947,6	102,0%		
Mittel (2018/2023) =	1720,9	90,1%		
Mittel (2018/2022) =			9,74	85,7%

6 Zum Risiko eines Sohldurchschlages

Das bisher nicht gelöste und primäre Problem dieses Flussabschnittes ist das Geschiebedefizit und die dadurch verursachte laufenden Sohlerosionen und Wasserspiegelabsenkungen. Da in der öffentlichen (bzw. medialen) Diskussion ab 1984 (rund um das Kraftwerk Hainburg) und bis heute das Detailthema „Sohldurchschlag“ immer wieder auftaucht und eine spezielle Rolle spielt, und weil außerdem bei diesem Mechanismus ein besonderes Risiko liegt, werden hier die wesentlichen Informationen und Überlegungen dazu zusammengeführt.

6.1 Zum Begriff und bisherigen Kenntnisstand

Die folgenden Informationen werden aus der (im Auftrag des Nationalparks Donau-Auen erstellten) Studie zur Geschiebemanagement (Klasz, 2014)²⁸ übernommen und teilweise überarbeitet, aktualisiert und ergänzt:

- Der Begriff des „Sohldurchschlages“ bezeichnet eine sehr rasche (Größenordnung: Wochen bis Monate), progressiv und über eine längere Strecke ablaufende Sohlerosion, wenn die obere, aus grobkörnigem Material (Kies und/oder Steine) bestehende Sohlschicht aufreißt und eine darunter liegende feinkörnigere und daher erosionsanfällige Schicht (z.B. Sande; Schluffe; Seetone) freigelegt wird. Damit verbundene Sohleintiefungen können mehrerer Meter betragen. Das Gerinne wird enger und tiefer (Bildung einer Erosionsrinne; Reduktion des Breiten-

²⁸ Klasz, G. (2014): Zu den Möglichkeiten einer Geschiebemanagement und den zugehörigen Optimierungspotentialen für die Donau östlich von Wien. Studie im Auftrag der Nationalpark Donau-Auen GmbH. Wissenschaftliche Reihe des Nationalparks Donau-Auen, Heft 37 /2015.

/Tiefen-Verhältnisses) und verliert stark an morphologischer Diversität; Wasserspiegel und damit verbundene GW-Spiegel sinken stark ab.

- Ein Beispiel dafür ist die Salzach unterhalb der Saalachmündung (Abschnitt Freilassing/Laufen), wo es im Zuge des Hochwassers vom August 2002 auf einer Länge von mehreren Kilometern zu einer Sohlerosion im Ausmaß von mehreren Metern (3 bis 4 m) kam; die erosionsempfindlichen Schichten im Liegenden der Kiese werden dort durch Seetone gebildet. Und auch schon zuvor kam es an der Salzach in einzelnen Teilabschnitten zu Sohldurchschlägen, etwa 1959 bei Hallein (Donauconsult, 2003)²⁹.
- Die geologischen Verhältnisse im Bearbeitungsbereich lassen ebenfalls das erhebliche Risiko eines solchen Sohldurchschlages erkennen, weil sich im Liegenden der quartären Donauschotter miozäne³⁰ Feinklastika (Schluffe, Sande, toniges Material, tw. auch Kalkmergel, Kalksandsteine usw.) befinden, die teilweise als besonders erosionsgefährdet eingestuft werden müssen (vor allem die Sande und Schluffe) und die derzeitige Kiesmächtigkeit (unter der Stromsohle) über weite Strecken nur sehr gering (etwa 1 bis 5 m) ausfällt. Einzelne lokale Kolke reichen offensichtlich auch schon in die miozänen Schichten. Ganz allgemein haben Sande und (Grob)Schluffe noch keine nennenswerte Kohäsion während sie andererseits mit ihrem geringen Korngewichten nur sehr schwache gravitative Widerstände gegen Strömungsangriff leisten können (Donauconsult, 2003).
- Die miozänen Feinklastika (nach ihrer Entstehung / Fazies: marin, brackisch, limnisch, tw. fluvial) im Liegenden der quartären Donaukiese verhalten sich gegen fluviale Erosion mutmaßlich lokal stark unterschiedlich: locker gelagerte Sande z.B. extrem erosionsgefährdet; stärker verfestigte Tone oder Kalkmergel hingegen sehr resistent.
- Über die räumliche Heterogenität dieser Sedimente ist wenig bekannt; es bestehen auch große methodische Schwierigkeiten. Bohrungen liefern dazu Informationen, aber nur punktuell, und es gelingt mit üblichen Bohrverfahren nicht, ungestörte Proben zu gewinnen. Sand- und Schluffsteine können durch das Bohren aufgelockert oder zerrieben werden, die Beschreibung von Verhärtungs- und Verfestigungsschichten hängt erfahrungsgemäß sehr stark vom jeweiligen Bohrmeister (bzw. Techniker) ab, ist also teilweise subjektiv. Eine vergleichsweise detaillierte geologische Beschreibung der Bandbreite der möglichen Locker- oder Festgesteine im Liegenden der quartären Kiese wird in Donauconsult (2007)³¹ gegeben.

²⁹ Donauconsult Zottl & Erber Ziviltechniker-GmbH. (2003) im Auftrag der Wasserstraßendirektion: Donau östlich von Wien, Flussbauliches Gesamtprojekt, Untersuchung der Nullvariante – Geologische Bearbeitung.

³⁰ Früher als „tertiäre“ (bzw. hier auch: jungtertiäre) Schichten bezeichnet. Der Begriff „Tertiär“ (Erdzeitalter, 66 bis 2,588 Millionen Jahre vor der Gegenwart) wurde im Jahr 2000 von der Internationalen Kommission für Stratigraphie (ICS) für veraltet erklärt bzw. durch die Perioden „Paläogen“ (früher: Alttertiär) und Neogen (früher: Jungtertiär) ersetzt. Die für die Donau relevanten Sedimente (im Liegenden der quartären Kiese) sind weitestgehend dem Miozän (eine Serie des Neogens) zuzuordnen. Sie wurden früher auch als „jungtertiär“ bezeichnet. In verschiedenen neueren Untersuchungen (nach 2000) wird der Begriff „Tertiär“ weiterverwendet, etwa auch in BMNT (2018), zumal veraltete Begriffssysteme üblicherweise frühestens mit jenen aussterben, die sich an diese Begriffe (im Zuge ihrer Ausbildung) gewöhnt haben.

³¹ Donauconsult (2007): Flussbauliches Gesamtprojekt, Umweltverträglichkeitserklärung, Fachbeitrag Geologie - Bericht; im Auftrag der viadonau.

- Das Risiko eines Sohldurchschlages war bereits der Ökologiekommission im Jahr 1985 bewusst: „Das Problem eines etwaigen Sohldurchschlages und der Sicherung lokaler Kolke sind kurzfristig zu prüfen.“ (Ökologiekommission, Arbeitspapier Nr.11; 1985); ursprünglich war dieser Aspekt massiv von Vertretern der Donaukraft AG thematisiert worden, mit dem zusätzlichen Argument, gerade wegen dieses Risikos sei der Bau von Hainburg (oder einer anderen Kraftwerkslösung) unabdingbar. Auch im Zusammenhang mit der wasserrechtlichen Genehmigung zum KW Wien-Freudenau hat diese Frage eine größere Rolle gespielt, im Zuge der UW-Sicherung in der Erhaltungsstrecke mussten mehrere Kolke unter Hinweis auf die Gefahr eines Sohldurchschlages speziell gesichert werden, vgl. Kap. 6.2.
- Sobald ein Sohldurchschlag erst einmal über eine längere Strecke einsetzt, kann nicht mehr davon ausgegangen werden, dass diese Situation mit flussbaulichen Mitteln unter Kontrolle gebracht werden kann. Das gilt speziell dann, wenn das während eines stärkeren oder länger anhaltenden Hochwassers abläuft. Eine solche Situation wäre wohl nicht mehr kontrollierbar.
- Im Zuge der UVE-Erstellung zum FGP wurde ein Modell der Kies-UK (im Sinn eines digitalen Geländemodells) erstellt; Basis waren mehr als 1600 Bohrungen (bzw. Bohrprofile), davon 728 mit gesicherter Kies-UK; dazwischen wurde (unter Berücksichtigung tektonischer Störungen) interpoliert; die Datenlage ist zumindest im Bereich der heutigen Donau relativ dicht, und zwar hauptsächlich durch die Bohrungen der Österreichische Donaukraft AG in den 1980er-Jahren (Donauconsult, 2007).
- Die Mächtigkeiten der quartären Kiese unter der Sohle (entlang des Talweges) wird mit durchschnittlich rd. 5 m angegeben, die Werte schwanken aber zwischen null (in einzelnen Kolken, die also bereits in die miozänen Feinklastika reichen, sh. weiter unten) und ca. 20 m (im Bereich des Schwechat-Tiefs, mit einem Maximum etwa bei der Donaukanalmündung), wo es tektonisch bedingt zu stärkeren Absenkungen des Wiener Beckens und damit zu stärkeren Kiesablagerungen in rezenter Zeit (Holozän) kam, vgl. Donauconsult (2007).
- Auf dieser Grundlage, also unter Berücksichtigung der Kiesmächtigkeiten (Verschnitt aus Kies-UK und der aktuellen Höhenlage Sohle im Talweg) und der geologischen Bewertung der Erosionsempfindlichkeit der im Liegenden des Kieselies gelegenen miozänen (jungtertiären) Feinklastika wurden schließlich im Auftrag der via donau die folgenden primäre Problembereiche identifiziert (Donauconsult, 2011³² und BMNT, 2018):
 - ca. Strom-km 1909,8 ... 1908,7 (linksseitig),
 - ca. Strom-km 1908,2 ... 1907,4 (rechtsseitig),
 - ca. Strom-km 1907,2 ... 1905,8 (linksseitig),
 - ca. Strom-km 1895,8 ... 1894,2 (Krümmungskolk bei Wildungsmauer),
 - ca. Strom-km 1889,8 ... 1888,8 (Kolk bei der Schwalbeninsel),
 - ca. Strom-km 1884,3 ... 1882,8 (Krümmungskolk bei Hainburg);
- Diese fachliche Einschätzung entsprach dem damaligen Kenntnisstand und der damaligen Sohlmorphologie. Die Situation sollte laufend auch unter Bedacht auf das Risiko eines möglichen Sohldurchschlags beobachtet werden; dabei könnten auch andere Kolke bzw. Erosionszonen als gefährdet eingestuft werden. Es gibt auch neuere Untersuchungen durch das IWA

32

Donauconsult (2011) im Auftrag der viadonau: Notfallkonzept Sohldurchschlag.

(Institut für Wasserbau, Hydraulik und Fließgewässerforschung) der Universität für Bodenkultur (Arbeitsgruppe Prof. Habersack) und möglicherweise auch durch die VHP, diese Untersuchungen wurden (soweit recherchierbar) nicht (bzw. noch nicht) veröffentlicht, scheinen aber keine grundsätzlich neuen Ergebnisse erbracht zu haben.

- Generell ist für eine nachvollziehbare Abschätzung dieses Risikos kein Rechenverfahren und keine Methodik verfügbar, das Risiko eines Sohldurchschlages mithin auch nicht nachvollziehbar quantifizierbar. Klar ist aber, dass mit jedem Jahr, in dem sich die Sohlerosion weiter fortsetzen kann, die Kiesmächtigkeit unter der Sohle weiter abnimmt und damit das Risiko des Sohldurchschlages zunimmt. Letztlich gilt: Wenn die Sohlerosion weiterläuft, dann ist irgendwann mit einem Sohldurchschlag zu rechnen. Es ist nicht die Frage, ob das eintritt, sondern lediglich wann es eintritt.
- Im Sinn einer laufenden Sofortmaßnahme wurde von der via donau festgelegt, dass Baggergut aus Instandhaltungsbaggerungen (bzw. mittlerweile auch bereits aus Geschiebefängen im unteren Teil dieser Strecke) primär in jenen gefährdeten Kolken verklappt wird, um die dortige Kiesmächtigkeit möglichst stabil zu halten; es ist aber klar, dass es sich dabei nicht um eine nachhaltige Lösung handeln kann, der Kies wird ja aus den Kolken wieder ausgetragen.
- Eine dauerhafte wasserbauliche Lösung nach dem ‚Stand der Technik‘ wäre die Herstellung eines Steindeckwerkes (mit Wasserbausteinen) über allen gefährdeten Zonen, in Übereinstimmung mit den Maßnahmen der VHP in der Erhaltungsstrecke, vgl. Kap. 6.2 und Kap. 6.3. Andere Konzepte, etwa Aufweitungen (mit Uferrückbau und ggf. auch Ausleitungen über Gewässervernetzung) und/oder Kiesschüttungen mit Grobkornabdeckung bzw. Grobkornanreicherung (temporäre Kolkabdeckung) könnten im Rahmen eines neuen (wenngleich räumlich und thematisch eng begrenzten) Naturversuch getestet werden.

6.2 Bisherige Maßnahmen zur Kolsicherung in der Erhaltungsstrecke

- Im Rahmen der wasserrechtlichen Genehmigung des Kraftwerkes Freudenua wurde festgelegt, dass Kolkabschnitte, die bereits in miozäne (jungtertiäre) Schichten reichen oder beinahe in sie reichen (weniger als 1 m Quartärüberdeckung) und damit „knapp vor dem Durchschlag stehen“, durch Steinberollungen zu sichern sind. Dazu wurde von Donaukraft AG (nunmehr: VHP) ein eigenes Projekt (auf Grundlage von Untersuchungen von Prof. Strobl, TU-München) vorgelegt und über einen eigenen Detail-Bescheid (Zl. 14.570/171-Id/94 vom 12.09.1994)³³ genehmigt.
- Insgesamt wurden fünf Kolke (Tabelle 17) in Form von rd. 60 cm starken Steindeckwerken (teilweise, in Zonen mit noch größerer Kiesüberdeckung, auf 40 cm reduziert; Steindurchmesser 7 ... 20 cm; Einzelsteingewicht rd. 1 bis 20 kg) gesichert, dafür wurden rd. 320.000 m³ gebrochenes Steinmaterial verwendet. Die Schütt-OK wurde so festgelegt, dass unter RNW-Bedingungen unter dem 2,5 m tiefen Fahrwasserkasten ein Sicherheitsabstand (zw. Kolkenschutz und Schiff) von mindestens 1,2 m (d.h. 3,7 m unter RNW) gegeben ist (Schimpf et al., 2009)³⁴. Die

³³ Bundesministerium für Land- und Forstwirtschaft (1996): KW Freudenua, Detailprojekt „Unterwasserbereich“ wasserrechtliche Genehmigung, Zl. 14.570/264-Id/94; vom 4.4.1996.

³⁴ Schimpf, H., Harreiter, H., Ziss, H. (2009): Zehn Jahre Erfahrungen mit der Unterwassersicherung zum Kraftwerk Freudenua; Österreichische Ingenieur- und Architekten-Zeitschrift (ÖIAZ) 154, Heft 1-6/2009.

beiden Kolke 4 und 5, die knapp hintereinander liegen („Doppelkolk“) und daher gemeinsam saniert wurden, reichten bereits in die tertiären Schichten, dort wurde eine 50 cm starke Filterschicht aus Kies („Kies-Pufferschicht“) unter der Steinschüttung aufgebracht (Projektbeschreibung im Bescheid Zl. 14.570/171-14/94 der Obersten Wasserrechtsbehörde).

Tabelle 17: Kolksicherung in der VHP-Erhaltungsstrecke; Projektbeschreibung im Bescheid Zl. 14.570/171-14/94 der Obersten Wasserrechtsbehörde

Kolk	Bereich:	Länge:	Angabe zur Breite:	Anm.:
Kolk 1	Strom-km 1916,26 ... 1915,8	460 m	im Mittel ca. 30 m	ca. 23.000 t
Kolk 2	Strom-km 1915,2 ... 1914,21	ca. 1000 m	-	bereits im Rahmen eines 1:1 Naturversuchs
Kolk 3	Strom-km 1913,02 ... 1912,3	720 m	maximal ca. 85 m	ca. 76.000 t
Kolk 4	Strom-km 1911,82 ... 1910,43	1390 m	maximal ca. 80 m	ca. 104.000 t
Kolk 5			minimal ca. 30 m	

- In BMNT (2018) wird zum Erfolg dieser Maßnahme angemerkt, dass durch Sohlaufnahmen belegt sei, dass es in diesen Bereichen zu keinen weiteren Eintiefungen gekommen ist, auch nicht in Nachkolkbereichen.

6.3 Ergänzende Überlegungen zu den Maßnahmen

Als Stand der Technik für solche Kolksicherungen, wenn sie als Steinberollungen (Steindeckwerke; auch: Deckschichten aus losen Wasserbausteinen) ausgeführt werden, können die durch die deutsche Bundesanstalt für Wasserbau (BAW) erarbeiteten Richtlinien:

- BAW-Merkblatt, Anwendung von Regelbauweisen für Böschungs- und Sohlensicherungen an Binnenwasserstraßen (MAR), Ausgabe 2008;
- BAW-Merkblatt, Anwendung von Kornfiltern an Bundeswasserstraßen (MAK), Ausgabe 2013;
- BAW-Merkblatt, Grundlagen zur Bemessung von Böschungs- und Sohlensicherungen an Binnenwasserstraßen (GBB), Ausgabe 2010;

und zweitens die in der Erhaltungsstrecke bereits ausgeführten Kolksicherungen (Kap. 6.2) gelten. Dies bedeutet im Detail (nach bisherigen Erfahrungen und Vorgaben):

- Schüttung eines Steindeckwerkes, d.h. flächiges Verklappen von Wasserbausteinen mittels Klappschuten,
- Vorarbeiten (optional) und Nacharbeiten (u.a. bei Überschüttungen) mit schwimmendem Hydraulikbagger;
- Erfolgskontrolle mittels Flächenecholot;
- Wasserbausteine mit Durchmesser zwischen etwa 7 und 20 cm (Einzelsteingewicht bis 20 kg, oder ähnlich);
- Schüttstärke (flächig) 50 bis 60 cm;

- wenn Steindeckwerk auf Sande oder sonstige Feinklastika, feiner als das natürliche Kiesmaterial der Donausohle geschüttet werden, dann Aufbau einer Filterschichte („Kies-Pufferschichte“) unter der Steinschüttung unter Einhaltung eines Filterkriteriums;
- Schütt-OK so, dass im RNW-Fall (und Abladetiefe 2,5 m) eine zusätzliche Sicherheitshöhe von mindestens 1,2 m (oder ähnlich) gegeben;
- Monitoring (durch flächige Sohlaufnahmen) nach Bau;

Nachteilig und letztlich schädlich wäre es, Kolke weitgehend mit Wasserbausteinen aufzufüllen, also die Kolkkonfiguration bzw. Querschnittsform stark zu verändern. Solche Kolke entstehen nicht zufällig, sondern weil es der flussmorphologischen Situation (mit den jeweiligen Sekundärströmungen) entspricht. Das gilt für Krümmungskolke, und es gilt auch für die den alternierenden Kiesbänken in weitgehend geradlinigen Abschnitten (d.h. im obersten Teilabschnitt, etwa bis zur Furt Fischamend) gegenüberliegenden langgezogenen Kolken. Würden diese Kolke weitgehend aufgefüllt, dann wäre mit der Entstehung von Sekundärkolken direkt unterhalb (Nachkolkbereiche) bzw. in bestimmten Situationen auch seitlich / parallel der „gesicherten“ Kolke zu rechnen, mit allen nachteiligen Folgewirkungen.

Somit sollen Steinberollungen (ggf. mit Kiesfilter darunter), wenn sie überhaupt als erforderlich eingestuft werden, möglichst dünn ausgeführt werden (vgl. auch die Angaben weiter oben).

6.4 Bewertung aus flussmorphologischer und wasserbaulicher Sicht

Das Risiko eines Sohldurchschlages ergibt sich aus der starken, über viele Jahrzehnte und nach wie vor ablaufenden Sohlerosion in dieser Strecke. Es ist also ein Symptom, eine Folge des Geschiebedefizits. Wenn es in der bisherigen Diskussion einen besonderen Stellenwert bekommen hat, dann wohl aus zwei Gründen: (a.) Wenn ein solcher Sohldurchschlag beginnen würde, speziell während eines extremen und/oder lange dauernden Hochwassers, dann wäre diese Situation kaum noch zu beherrschen, und die Schäden wären gravierend, das Risiko (Produkt aus Schadenserwartungswert und Wahrscheinlichkeit) ist also als sehr hoch einzuschätzen; (b.) Ein solches Szenario eignet sich sehr gut für eine mediale Inszenierung; Journalisten interessieren sich sehr für Katastrophen, Skandale und dramatische Situationen („*only bad news are good news*“), aber nur selten für lange anhaltende und gewissermaßen permanente Probleme, an die sich die Gesellschaft allmählich (und notgedrungen) gewöhnt hat, vor allem wenn die Zusammenhänge bei den langfristigen Themen vielschichtig sind und nicht eingängig erzählt werden können. Daher scheint die langfristig wirksame Sohlerosion, die den Nationalpark und verschiedenste wasserwirtschaftlichen Nutzungen massiv gefährdet, viel weniger „spannend“ als das Szenario eines Sohldurchschlages³⁵. Das ursächlich primäre Thema ist aber die seit Jahrzehnten unzureichende Form der UW-Sicherung bzw. der Geschiebemanagement. Wird dieses Geschiebedefizit endlich beendet und werden die Sohlerosionen (zumindest) der letzten zwei bis drei Jahrzehnte saniert, dann wird sich damit auch das Risiko des Sohldurchschlages entscheidend vermindern.

Würden aber nur lokale Kolksicherungen (an den „Gefahrenkolken“) vorgenommen, ohne dass das Geschiebedefizit beendet wird, dann bliebe das eine reine Symptombekämpfung. Es wird dann weiterhin die mittlere Sohllage absinken, die Mächtigkeit der quartären Kiesschichte (unter der Sohle) wird weiter reduziert; es werden dann mittel- bis langfristig andere Problembereiche (durch Kolkbildung) auftreten, die dann nachträglich wieder zu sichern sein würden, und so weiter.

³⁵ Vgl. z.B. den „ORF-Report“ vom 28.05.2024 zum Thema („Donau in Gefahr“).

In diesem Zusammenhang sind auch die seitens viadonau getroffenen Maßnahmen (laufende Beobachtung dieser Risikobereiche mittels Flächenecholot; Verklappen von Baggergut aus talwärtigen Instandhaltungsbaggerungen oder Geschiebefängen) notwendig und wichtig, sie können aber das Problem nicht grundsätzlich entschärfen. Es bleibt eine – wenngleich notwendige – Symptombekämpfung, nicht mehr.

Eine lokale wasserbauliche Kolkssicherung ist somit nur in Verbindung mit einer insgesamt funktionierenden Geschiebebewirtschaftung (mit ausreichenden Geschiebezugaben, aus primär externen Quellen) sinnvoll. Wenn es aber gelingt, was aus ökologisch-wasserwirtschaftlicher Sicht ohnehin zu fordern ist, die mittleren Sohllagen wieder etwas anzuheben und damit die Defizite und Schäden der letzten zwei bis drei Jahrzehnte zu sanieren, dann gewinnt man auch in Bezug auf diese „Gefahrenkolke“ ausreichend Sicherheiten.

In diesem Zusammenhang ist eine Aussage in BMNT (2018) sehr relevant: „Es ist von Seiten des BMNT an die Überdeckung mit Normalgeschiebe gedacht und nicht an Abpflasterungen.“

7 Eine nicht erfüllte Voraussetzung des Genehmigungsbescheides zum Kraftwerk Freudenau

Es ist nachweisbar, dass die Wasserrechtsbehörde bei der Genehmigung des Kraftwerkes Freudenau davon ausgegangen ist, dass mit der Einhaltung des Kriteriums des Haltens der Bestandssohle auch die Höhenlage der Wasserspiegel gehalten werden kann, und dass diese Überlegungen wichtig für die Genehmigungen waren.

Im wasserrechtlichen Detailbescheid (Zl. 14.570/264-I 4/95 vom 04.04.1996, Seite 16)³⁶ findet man (im Teil C: Begründung) die folgenden Überlegungen dazu

Bereits im Grundsatzgenehmigungsbescheid wurde Donaukraft zur Erhaltung der Bestandssohle verpflichtet. Diese Forderung ist darüber hinaus die schärfere Bedingung, die ein Halten des Wasserspiegels inkludiert. Lediglich im untersten Teil der Erhaltungsstrecke ist nach vielen Jahren und Fortschreiten der natürlichen Sohlintiefung außerhalb der Erhaltungsstrecke eine geringe (Größenordnung einige cm) Wasserspiegelabsenkung möglich. Dieser Zustand ist aber immer noch weitaus besser als der natürliche Zustand, bei dem auch in der Erhaltungsstrecke die bisherige Eintiefung fortgeschritten wäre.

Diese Annahme der Behörde blieb und bleibt aber unerfüllt (auch mit der Erhöhung der Zugabemengen auf rd. 235.000 m³/a im Jahr 2018).

Tatsächlich sind nach der Genehmigung des Kraftwerkes wesentlich stärkere Wasserspiegeldifferenzen aufgetreten, was sowohl durch die KWD-2010 und KWD-2020 (in Vergleich zu den KWD-1996) als auch durch pegelgestützte Detailauswertungen (u.a. auch zum Pegel direkt im Unterwasser des Kraftwerkes) belegt wird, vgl. Kap. 2.4 und im Besonderen Abbildung 22.

Es ist im Rahmen eines §21a-Verfahrens wohl unerheblich, ob diese Differenzen (zwischen Erwartung bzw. Voraussetzung für die Genehmigung und Realität) auf irrtümliche Annahmen der Behörde (des

³⁶ Bundesministerium für Land- und Forstwirtschaft (1996): KW Freudenau, Detailprojekt „Unterwasserbereich“ wasserrechtliche Genehmigung, Zl. 14.570/264-I 4/94; vom 4.4.1996.

damaligen Amtssachverständigen) oder auf unzureichende, möglicherweise auch mißverständliche Projektunterlagen des Projektwerbers oder auf damals nicht bekannte Zusammenhänge (unzureichendes Prozessverständnis) beruhen; nachweisbar und relevant ist, dass eine wesentliche Voraussetzung der Genehmigung des Kraftwerkes Freudenau verletzt wurde, wobei das Ausmaß dieser Diskrepanzen laufend weiter zunehmen, und durch diese starken Wasserspiegelabsenkungen werden mutmaßlich (jedenfalls aus wasserwirtschaftlicher und ökologischer Sicht) öffentliche Interessen nach §105 WRG fortlaufend verletzt bzw. gefährdet.

8 Zum Problem der Aufnahmebreiten

Der Fehlbetrag bei den VHP-Geschiebezugaben führte dazu, dass selbst in der „Erhaltungsstrecke“ (Strom-km 1921 bis 1910), wo aufgrund der Zielsetzungen der wasserrechtlichen Genehmigungsbescheide überhaupt keine Sohlerosion geschehen hätte dürfen, zumindest 45.000 m³/a an Sohlmaterial ausgetragen wurde (zwischen 1996 und 2018), sh. BMNT (2018).

Dieses Problem beruhte von Anfang an darauf, dass Messboote nur dort die Stromsohle aufnehmen können, wo (zum Aufnahmezeitpunkt) ausreichend Wassertiefe vorliegt. Damit bleiben alle seichten Bereiche und Randzonen unberücksichtigt. Die mittlere VHP-Aufnahmebreiten lagen bei rd. 200 m, während die davon unabhängigen viadonau-Stromsohlaufnahmen rd. 240 m abgedeckt haben (BMNT, 2018), vgl. Tabelle 18, auf diesem Weg konnte der oben genannte Fehlbetrag (von ca. 45.000 m³/a) ja erst nachgewiesen werden.

Entscheidend ist aber, dass selbst die größeren Aufnahmebreiten der viadonau nicht die gesamte relevante Flusssohle abdecken können; die Donau ist dort bei Mittelwasser rund 270 m breit, und bei höheren Wasserführungen noch breiter (bordvoll ca. 350 m). Es ist davon auszugehen, dass in diesen Randzonen ebenfalls Geschiebe ausgetragen wurde und immer noch ausgetragen wird. Somit wären die 45.000 m³/a für den Zeitraum 1996/2018 nur eine Untergrenze, und auch heute wäre / ist ein Geschiebedefizit wirksam.

In Abbildung 39 werden die Ergebnisse (also die erkannten Werte für das Geschiebedefizit) für die fünf in BMNT (2018) verwendeten Fälle (Untersuchungszeiträume) gegen die zugehörigen Aufnahmebreiten aufgetragen; dies entspricht den in Tabelle 18 angegebenen Wertepaaren. Es ist unverkennbar, dass das erkannte Geschiebedefizit mit der Aufnahmebreite zunimmt; das Bestimmtheitsmaß ist mit $R^2 = 0,843$ relativ hoch, und es lässt sich (auf Basis eines F-Test) nachweisen, dass dieses Modell statistisch signifikant (gegenüber der Anpassung durch einen Mittelwert oder dgl.) ist, auch auf einem hohen Signifikanzniveau. Aus dem Modell selbst ergibt sich noch nicht die Gültigkeit einer Extrapolation (für noch größere Breiten); wenn man aber annimmt, dass die (bei höheren Wasserführungen) geschiebeaktive Sohlbreite größer als die MW-Breite ist (schätzungsweise rd. 300 bis 320 m) und nicht vom Dogma einer stabilen Sohle in den seitlichen Zonen dieses Teils des Querschnitts ausgeht, dann ist ein deutlich über dem BMNT (2018)-Wert von 45.000 m³/a liegendes Geschiebedefizit für die Erhaltungsstrecke und den Zeitraum 1996/2018 plausibel.

Setzt man für den Zeitraum 1996/2020 eine auf MW bezogene mittlere Eintiefungsrate von $\partial z_b / \partial t = 0,020$ m/a in der Erhaltungsstrecke voraus, was sich durch den Vergleich der KWD-2020 gegen die KWD-1996 ergibt, dann entspricht dies unter Annahme gleichförmiger Verhältnisse einem Geschiebedefizit in der Größenordnung von:

$$\frac{\partial V_{\text{Sohle}}}{\partial t} = \frac{\partial z_b}{\partial t} \cdot B \cdot L \sim 0,020 \cdot 270 \cdot 11000 \sim 60'000 \text{ m}^3/\text{a} \quad (\text{Gl. 9})$$

also einen Wert, der gut mit den obigen Überlegungen zusammenpasst und der eben über dem Wert von 45.000 m³/a liegt. Die Verhältnisse in der Erhaltungsstrecke sind nicht exakt gleichförmig, aber es geht hier nur um differentielle mittlere Änderungen $\partial z_b / \partial t$ bzw. $\partial V_{\text{sohle}} / \partial t$ und um eine Plausibilitätsüberlegung.

In BMNT (2018) wurde dieses Problem der unzureichenden Aufnahmebreiten erkannt (und auch nachgewiesen), es wurde aber noch nicht zu Ende gedacht!

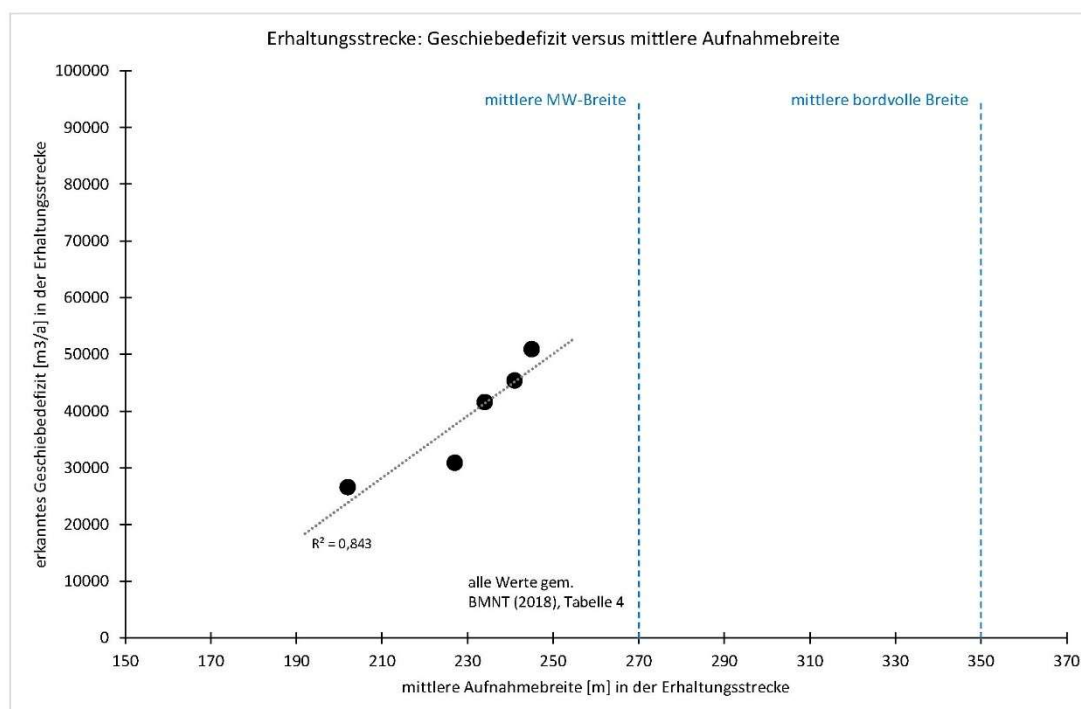


Abbildung 39: Erkanntes Geschiebedefizit in der Erhaltungsstrecke, abhängig von der zugehörigen mittleren Aufnahmebreite, Auftragung der Werte der fünf Einzelauswertungen (unterschiedliche Untersuchungszeiträume) gem. BMNT (2018) bzw. Tabelle 18.

Tabelle 18: Mittlere Aufnahmebreiten und damit verbundene Werte für den Austrag an Sohlmaterial in der VHP-Erhaltungsstrecke; für verschiedene viadonau-Aufnahmen; Quelle: BMNT (2018)

von	bis	mittlere Aufnahmebreite [m]	Sohlspeicher, Austrag [m³/a]	Anm.:
1997/12	2015/10	202	26.600	viadonau-Aufnahmen, gem. (BMNT, 2018)
1998/12	2016/10	227	30.900	
1999/04	2015/03	245	50.900	
2000/04	2016/03	234	41.600	
2000/04	2017/04	241	45.400	

8.1 Folgerungen aus diesem Umstand

Die Methode der Stromsohlvermessung (bzw. der daraus ermittelten Differenzvolumina) reicht zur Erfolgskontrolle nicht aus, Sohlerosionen in Randbereichen bleiben unerkannt. Die VHP-Aufnahmen der letzten Jahre decken wieder nur rd. 210 bis 215 m ab (vgl. Tabelle 19). Sie sind also weiter schmaler als die bisherigen viadonau-Aufnahmen und deutlich schmaler als die erosionsgefährdete (bzw. geschiebeaktive) Sohle der Donau. In der Besprechung am 23.10.2023 wurde von einer Vertreterin des Kraftwerksbetreibers angemerkt, dass dieses Problem nicht behoben werden kann³⁷. Daher ist die gewählte Methodik des Monitorings unzureichend, wodurch in Verbindung mit den weiter oben genannten Problemen durch die Sohlerosionen ebenfalls öffentliche Interessen nachteilig berührt bzw. gefährdet werden.

Über Beobachtung und Vergleich der Wasserstände (bzw. Wasserspiegel) für charakteristische Abflüsse (speziell: MQ und RNQ) besteht eine praxistaugliche und einfach zu überprüfende Alternative, die im Übrigen das direkt für Ökologie und Wasserwirtschaft relevante Zielkriterium (nämlich die Wasserspiegel) beschreibt. In diesem Zusammenhang sollten einige „fallweise beobachteten“ Pegelstellen (Donaukanalmündung, Strom-km 1919,43; Mannswörther Rohrbrücke, Strom-km 1917,7; Barbara-Brücke, Strom-km 1914,24) auf permanente Wasserstandbeobachtungen aufgestuft (und über eHYD abrufbar gemacht) werden; der Aufwand wäre in Relation zum Nutzen (bzw. der Relevanz solcher Daten) gering; besonders wertvoll wären laufende Daten zum Pegel Donaukanalmündung.

Tabelle 19: VHP-Stromsohlvermessungen in der Erhaltungsstrecke; mittlere Aufnahmebreiten, Angaben gem. Verbund Hydro Power (Vortrag / Unterlagen Frau Dr. Drabek, 23.10.2023)

Aufnahme:	05/2018	12/2018	11/2019	11/2020	12/2021	01/2023
mittlere Aufnahmebreite [m]	245	229	234	210	215	215

³⁷ Diese Aufnahmen müssen zur Planung der Maßnahmen innerhalb eines engen Zeitfensters (Winter / Frühling) durchgeführt werden, unter den dann gegebenen Wasserführungen, und das ist dann meist Niederwasser (Dr. Drabek, 23.10.2023).

9 Gesamtheitliche Bewertung der Geschiebemanagement unter Berücksichtigung der aktuellen Ergebnisse

9.1 Ausgangssituation (vor 2018)

Ohne permanente Geschiebezugaben wären stromab des Kraftwerkes Freudenua starke Sohlerosionen zu erwarten. Kresser (1987)³⁸ nahm dafür, wenn man der Erosion freien Lauf ließe, eine mittlere Eintiefungsrate von 2,5 bis 3,5 cm/a an. Das Ingenieurbüro Zottl & Erber (1987)³⁹ kam auf Basis einer anderen Methodik für den obersten Teil dieser Strecke auf noch höhere Werte, und zwar auf ca. 5,5 bis 6,6 cm/a (innerhalb der ersten 30 Jahre). Und Gruber (1969)⁴⁰ fand empirisch für Teilstrecken unterhalb von Donaukraftwerken (Ybbs-Persenbeug und Aschach) Eintiefungsraten von etwa 5 cm/a.

Die Methode der permanenten Geschiebezugabe mit flächenhafter Verklappung wurde in den 1970er-Jahren von der deutschen BAW für den Oberrhein flussab der Staustufe Iffezheim (Rhein-km 334) entwickelt (erste Ideenstudie: Felkel, 1970)⁴¹ und ab 1978/79 realisiert. Die hydrologischen und sedimenthydraulischen Verhältnisse (Gefälle, Kornverteilung des Bettmaterials, Abflüsse, Strömungsintensität) sind dort recht ähnlich zur Donau bei Wien (vgl. Klasz, 2014). Felkel (1987)⁴² berichtet, dass damit das Ziel, die Wasserstände (im Unterwasser der Staustufe) auf das Niveau vom Jänner 1978 zu halten (bzw. nach zwischenzeitlichen Erosionen wieder anzuheben) und den Geschiebetransport unterhalb der Zugabestrecke weitgehend unverändert beizubehalten, jedenfalls erreicht wurde. Nestmann (1996)⁴³ gibt den dort erforderlichen Kiesbedarf (im langjährigen Mittel) mit rd. 200.000 m³/a an. Durch Stromsohl- und Wasserspiegelaufnahmen wird die Maßnahme überwacht, gesteuert und dokumentiert (Kuhl, 1993)⁴⁴. Spätestens ab den späten 1980er-Jahren kann diese Form der dynamischen Sohlstabilisierung als „Stand der Technik“ gelten.

Im Zuge der Planung des Kraftwerkes Freudenua wurde diese Methode vom Kraftwerksbetreiber (Donaukraft AG, nunmehr: Verbund Hydro Power) als Basis der Unterwasser-Sicherung vorgesehen und schließlich auch von der Wasserrechtsbehörde (mit einer Reihe von Auflagen) genehmigt.

Allerdings wurden vom Projektwerber von Anfang an viel zu geringere Zugabemengen angenommen. Deren erste Abschätzung lag bei 52.000 m³/a; dem stellte der Amtssachverständige der WR-Behörde

³⁸ Kresser, W. (1987): Auswirkungen des geplanten KW Wien auf den Geschiebetrieb und die Sohlstabilität der Donau im Bereich stromab von Greifenstein; Gutachten; Wien.

³⁹ Zottl & Erber Ingenieurbüro (1987): Donau im Raum Wien - Bad Deutsch-Altenburg, Untersuchung der Sohlstabilität im Zusammenhang mit der Staustufe Wien; Studie im Auftrag der Stadt Wien – MA 45 (Wasserbau).

⁴⁰ Gruber, O. (1969): Gewässerkunde und Hydrografie im Bundesstrombauamt; Österreichische Wasserwirtschaft, Jahrgang 21 – Heft 1/2 – 1969.

⁴¹ Felkel, K. (1970): Ideenstudie über die Möglichkeit der Verhütung von Sohlenerosion durch Geschiebezufuhr aus der Talaue ins Flussbett, dargestellt am Beispiel des Oberrhein. Mitteilungsblatt der BAW, 1970, H. 30, S. 21 – 29.

⁴² Felkel, K. (1987): Acht Jahre Geschiebezugabe am Oberrhein; Wasserwirtschaft, 77. Jahrgang, Heft 4 – 1987.

⁴³ Nestmann, F. (1996): Eigenschaften und Nutzungen von Fließgewässern; Wasserwirtschaft, 86. Jahrgang, Heft 7/8 – 1996.

⁴⁴ Kuhl, D. (1993): Die Geschiebezugabe unterhalb der Staustufe Iffezheim von 1978 bis 1992: Mitteilungsblatt der BAW, 1993, Nr. 70.

einen Wert von 135.000 m³/a gegenüber; schließlich wurde im Detailprojekt und dem darauf aufbauenden Bescheid (Zl. 14.570/264-14/95) der Wert von 160.000 m³/a für ein Regeljahr festgelegt; Grundlage waren Stromgrundaufnahmen zwischen 1989 und 1994 über den Stauraum Freudenau und die daraus abgeleiteten Erosionsvolumen; weiters wurde ein Rechenalgorithmus für die Festlegung der Mengen von Einzeljahren festgelegt, um die Zugabemengen den aktuellen Wasserführungen (trockene/nasse Jahre) anzupassen. Im Durchschnitt der Jahre 1996 bis 2016 lag die Zugabemenge schließlich bei etwa 188.000 m³/a (BMNT, 2018), also weit über den ersten Annahmen.

Aus geschiebehydraulischer (und letztlich physikalischer) Sicht ist evident und unstrittig, dass mit dieser Methode auch die Sohllage der Donau östlich von Wien stabilisiert werden kann, wie ja auch am Oberrhein, wenn der Geschiebeaustrag in voller Höhe kompensiert wird. Dieses Geschiebedefizit wurde in BMNT (2018) auf guter Datenbasis mit ca. 340.000 m³/a abgeschätzt. Frühere Schätzungen lagen nur wenig höher, etwa Kresser (1987) bei rd. 400.000 m³/a, oder bereits in diesem Bereich, speziell mit Klasz et al. (2016)⁴⁵ mit (Bandbreite) 320.000 bis 345.000 m³/a. All diese Werte beziehen sich auf das langjährige Mittel („Regeljahr“).

Entscheidend für die derzeitige Situation und gegenständliche Fragestellung ist aber, dass aus rein rechtlichen Gründen zunächst, also im Zuge der Bewilligung des Kraftwerkes Freudenau, keine „volle“ Geschiebebewirtschaftung vorgeschrieben wurde, sondern nur eine teilweise. Es sollte nur die Verschlechterung der Geschiebezulieferung durch das neue Kraftwerk kompensiert, und nicht die Sohlerosion an sich beendet werden. Es wurde also vorgeschrieben, jene Kiesmenge einzubringen, die nach Abschätzung des Amtssachverständigen zwischen Greifenstein und dem Kraftwerk Freudenau nach Stauerrichtung nicht mehr ausgetragen und in die Unterliegerstrecke transportiert werden kann, aber eben nicht das volle Defizit.

Zusätzlich wurde aber von der Wasserrechtsbehörde festgelegt, dass die Stromsohle zwischen dem Kraftwerk Freudenau und Strom-km 1910, also auf einer Länge von 11 km („Erhaltungsstrecke“), vollständig stabil zu halten ist. Aber mit der Zeit wurde erkennbar, dass sich der untere Teil dieser Erhaltungsstrecke stärker eintieft; mehr noch: die Sohlerosionen waren dort besonders stark, das zeigen sowohl Sohlvermessungen als auch Wasserspiegelvergleiche über verschiedene Untersuchungszeiträume (Klasz et al., 2013⁴⁶; Klasz, 2014). Dieser Sachverhalt wurde schließlich auch seitens der Wasserrechtsbehörde bestätigt, mit einem Fehlbetrag (bezogen auf die Erhaltungsstrecke und den Zeitraum 1996/2017) von rund 45.000 m³/a (BMNT, 2018). In Summe (also über den Zeitraum 1996/2018) gingen dieser Strecke damit rund 1,0 Mio. Kubikmeter Kies verloren, was im Sinn der wasserrechtlichen Auflagen nie hätte passieren dürfen (Klasz & Baumgartner, 2024).

Das dahinterstehende Problem lag und liegt beim Monitoring, also bei den unzureichenden Aufnahmebreiten, vgl. auch Pkt. 8. Mit Messbooten kann nur dort die Stromsohle aufgenommen werden, wo (zum Aufnahmezeitpunkt) ausreichende Wassertiefen vorliegen, alle seitlichen Bereiche und Randzonen bleiben unberücksichtigt (Klasz & Baumgartner, 2024). Aus rein betrieblichen (bzw. praktischen) Gründen ist es nicht möglich, nur bei höheren Wasserführungen zu vermessen, im Gegenteil, die Aufnahmen erfolgen meist unter Niederwasser oder bestenfalls bei etwa Mittelwasser. Daraus ergibt sich,

⁴⁵ Klasz, G., Gabriel, H., Habersack, H., Schmalfuß, R., Baumgartner, C. und Gutknecht, D. (2016): Ausmaß und Dynamik der Sohlerosion der Donau östlich von Wien – flussmorphologische und wasserwirtschaftliche Aspekte. Österreichische Wasser- u. Abfallwirtschaft, 68 (5-6), 199-207.

⁴⁶ Klasz G., Reckendorfer W., Baumgartner C., Gabriel H., Gutknecht D. (2013): River-bed degradation and overbank deposition: A human induced geomorphic disequilibrium in the Donau-Auen National Park. 5th Symposium for Research in Protected Areas (10 to 12 June, Mittersill); Conference Volume, 379-384.

dass diese Form des Monitorings (mit Stromsohlvermessungen und daraus ermittelten Differenzvolumina) zur Erfolgskontrolle grundsätzlich nicht ausreicht. Als geeignete (und auch praxistaugliche und einfache) Alternative steht die hydrographische Beobachtung von charakteristischen Wasserständen (bzw. Wasserspiegeln) und deren zeitlicher Vergleich zur Verfügung. Dieses Kriterium zielt auch auf den für Ökologie und Wasserwirtschaft unmittelbar relevanten Indikator.

Eine detailliertere Analyse des Zusammenhangs zwischen dem mit Sohlaufnahmen erkannten Geschiebedefizit und der zugehörigen Aufnahmebreite (vgl. Pkt. 8) zeigt außerdem, dass der in BMNT (2018) angegebene Fehlbetrag (für die Erhaltungsstrecke) von rd. 45.000 m³/a nur eine Untergrenze sein kann, der mit dem damals breitesten (im Mittel ca. 245 m) Vergleichspolygon korrespondiert. Die geschiebeaktive Sohle (unter höheren Abflüssen) ist mit größter Wahrscheinlichkeit breiter, das langjährig gemittelte Defizit in der Erhaltungsstrecke (vor 2018) dürfte höher, wahrscheinlich bei rund 60.000 m³/a gelegen sein. In Summe (über den Zeitraum 1996/2018) macht das einen Verlust von rund 1,3 Mio. Kubikmeter Kies aus.

9.2 Nicht erfüllte Voraussetzungen, was die Genehmigungsbescheide zum Kraftwerk Freudenua betrifft

Die WR-Behörde (bzw. deren wasserbautechnischer Amtssachverständiger) ist bei der wasserrechtlichen Detailgenehmigung ausdrücklich davon ausgegangen, dass mit dem per Auflagen vorgeschriebenen Halten der Bestandssohle auch das Halten der Wasserspiegel inkludiert sei, dass es also zu keinen nennenswerten Wasserspiegelabsenkungen in der Erhaltungsstrecke kommen würde, mit Ausnahme des untersten Teiles dieser Strecke, wo man von geringen Differenzen („Größenordnung einige cm“) ausgegangen war, sh. auch Pkt. 7. Tatsächlich sind nach der Bewilligung und dem Bau des Kraftwerkes wesentlich stärkere Wasserspiegeldifferenzen aufgetreten, und zwar über die gesamte Erhaltungsstrecke, vor allem im mittleren Teil, was sowohl durch die KWD-2010 und KWD-2020 (im Vergleich zu den KWD-1996) als auch durch pegelgestützte Auswertungen (zum Pegel direkt im Unterwasser des Kraftwerkes) belegt wird, vgl. Pkt. 2.4.1 und 2.4.2. Damit blieb eine der wesentlichen Voraussetzungen der Bewilligung der UW-Sicherung unerfüllt, und das in einer zentralen Frage des WR-Verfahrens, zu der viele Parteien Einwendungen erhoben hatten, und die auch von der Behörde als besonders relevant bewertet wurde. Diese Diskrepanzen nahmen in den letzten Jahren weiter zu, und durch diese starken Wasserspiegelabsenkungen werden mutmaßlich (jedenfalls aus wasserwirtschaftlicher und ökologischer Sicht) öffentliche Interessen nach §105 WRG fortlaufend gefährdet bzw. verletzt.

Ein zweiter Aspekt betrifft die Überlegung des wasserbautechnischer Amtssachverständigen, dass die Situation mit fortschreitenden Sohlerosionen stromab der Erhaltungsstrecke nicht über mehrere Jahrzehnte toleriert werden kann und daher auch beendet wird, vgl. z.B.: *„Diesbezügliche Überlegungen, die über ein oder zwei Jahrzehnte hinausgehen, sind aus wasserbautechnischer Sicht aber rein theoretischer Natur, da eine fortschreitende Sohleerintiefung der freifließenden Donau unterhalb der Erhaltungsstrecke im bisherigen Ausmaß von 2 bis 3 cm/a sicher nicht über mehrere Jahrzehnte toleriert werden kann und für eine endgültige Sohlsicherung andere Maßnahmen – Stauhaltung oder Abpflasterung mit auch bei Hochwasser standfestem Material – vorzuziehen sind.“* (Wasserrechtliche Grundsatzzugenehmigung zum Donaukraftwerk Freudenua, Bescheid der Obersten Wasserrechtsbehörde, Zl. 14.570/182-I 4/91 vom 31.07.1991; Erläuterungen der wasserbautechnischen Amtssachverständigen; S. 195). Auch diese Voraussetzung ist nach rund 35 Jahren unerfüllt, also auch in dieser Hinsicht baut die Bewilligung des Kraftwerkes Freudenua und die Konzeption von Auflagen auf Prämissen auf, die fortschreitend verletzt werden.

9.3 Entwicklungen in die Richtung und im Zuge des ersten §21a-WRG-Verfahrens

In einer Studie zur Optimierung der Geschiebemanagement in dieser Strecke (Klasz, 2014) wurde argumentiert, dass die Sohlerosionen aus wasserwirtschaftlicher und ökologischer Sicht erheblich und stark nachteilig sind, dass damit öffentliche Interessen (nach §105 WRG) gefährdet werden, und dass somit eine Korrektur nach §21a WRG (Abänderung von Bewilligungen) geboten ist. Dies wurde auch in einer juristischen Bewertung von Dr. Mauerhofer (im Auftrag der Nationalpark Donau-Auen GmbH.) bestätigt, vgl. Mauerhofer & Klasz (2018)⁴⁷. Tatsächlich wurden seitens der Wasserrechtsbehörde durch Einsetzung einer Arbeitsgruppe (2017/18) entsprechende Vorarbeiten eingeleitet, mit den in BMNT (2018) dokumentierten Ergebnissen, und es kam zu einem ersten §21a-Bescheid (April 2019; BMNT-UW.4.1.12/0036-I/2/2019).

Mit dem Instrument eines §21a-WRG-Verfahrens bildet das öffentliche Interesse (nach §105 WRG) den Ausgangspunkt, und nicht mehr die Frage, ob bzw. wie ein einzelnes eingereichtes Projekt zu bewilligen ist. Dass die fortschreitende Sohlerosion und die damit verbundenen Wasserspiegelabsenkungen öffentliches Interesse berühren (Klasz, 2014; Mauerhofer & Klasz, 2018), steht mittlerweile außer Zweifel; das wurde ja auch mit dem ersten §21a-WRG-Bescheid vom April 2019 bestätigt.

In Hinblick auf die Zugabemengen ist aber nicht nur das spätestens mit BMNT (2018) erkannte Defizit von zumindest 45.000 m³/a und das Ziel der Stabilität in der Erhaltungsstrecke relevant. Denn darüber hinausgehend wurde in BMNT (2018) endgültig nachgewiesen, dass in der Strecke östlich von Wien ein von der gesamten Kraftwerkskette (Kraftwerke Altenwörth, Greifenstein und Freudenau) bedingtes Geschiebedefizit von ca. 270.000 m³/a besteht (BMNT, 2018), und dass damit nach wie vor fortschreitende Wasserspiegelabsenkungen verbunden sind, wodurch öffentliches Interesse gefährdet wird. Mit dem §21a-WRG-Bescheid (April 2019) wurde diesem Befund aber letztlich nicht Rechnung getragen, die Erhöhung der Zugabemengen auf 235.000 m³/a war aus wasserbautechnischer und wasserwirtschaftlicher Sicht unzureichend (Klasz & Baumgartner, 2024). Offensichtlich wollte die Wasserrechtsbehörde nur den Bewilligungsbescheid des Kraftwerkes Freudenau abändern, nicht aber jene der Kraftwerke Greifenstein und Altenwörth. Da aber auch nach einer weiteren Evaluierung (Zeitraum 2018/2023) das Fortschreiten der Sohlerosionen erkennbar ist, wäre das immer noch bestehende Defizit nun zu beheben.

9.4 Entwicklungen und Veränderungen ab 2018 und deren Bewertung

Die in dieser Studie dokumentierten Untersuchungen zeigen, dass ein Trendwechsel von den fallenden Wasserständen hin zu stabilen (oder noch besser: zu schwach steigenden) Verhältnissen zwischen Wien und Hainburg noch nicht gelungen ist. Zweifellos wurden bereits durch die forcierten Geschieberückführungen seitens der viadonau und zweitens auch durch die ab 2018 erhöhten VHP-Zugaben (von ca. 188.000 auf 235.000 m³/a) Verbesserungen erzielt. Günstig haben sich in dieser Hinsicht auch die unterdurchschnittlichen Abflüsse in den letzten Jahren ausgewirkt, vgl. Pkt. 5. Aber das volle Geschiebedefizit wurde auch in den letzten Jahren offensichtlich nicht abgedeckt, und der Nachweis eines statistisch signifikanten Trendwechsels hin zu jedenfalls nicht-negativen Wasserstandänderungen ist mit den vorliegenden hydrographischen Daten eben noch nicht zu erbringen, vgl. Pkt. 4. Verbesserungen, wenngleich auch unzureichend, wurden speziell beim Pegel Fischamend erzielt.

⁴⁷ Mauerhofer, V. und Klasz, G. (2018): Wasserkraftwerke, Flusseintiefungen und nachträgliche Änderungen rechtskräftiger Bewilligungen. Recht der Umwelt (RdU), Heft 02 (April) 2018.

Aus fachlicher Sicht ist klar, dass ein Trendwechsel hin zu tatsächlich stabilen Sohl- und Wasserspiegelniveaus dann erzielt werden wird, wenn das Geschiebedefizit vollständig abgedeckt wird. In diesem Zusammenhang ist nicht nur die weitere Erhöhung der VHP-Zugabemengen (auf zumindest 270.000 m³/a) vorrangig, sondern auch die Implementierung des Kriteriums stabiler charakteristischer Wasserstände (bzw. Wasserspiegel) als Steuer- und Zielkriterium. Die dafür relevanten Überlegungen werden in Kap. 8 näher beschrieben.

In der Erhaltungsstrecke stehen bisher keine Pegel des Hydrographischen Dienstes zu Verfügung, nur der von der VHP zu betreibende Pegel KW Freudenau – UW. Das ist unter der hier diskutierten Problemstellung unzureichend. Es gibt dort (gem. KWD-2020) aber mehrere Pegelstellen der viadonau mit nur intern verfügbaren Daten. Der Pegel Donaukanalmündung (Strom-km 1919,43; bereits mit Datensammler) hätte die höchste Priorität, der Pegel Barbarabrücke (Strom-km 1914,24; „fallweise beobachtet“) hätte zweithöchste Priorität, in beiden Fällen wären Tagesmittel der Wasserstände erforderlich (ähnlich wie bei den verfügbaren Pegeln Fischamend oder Orth), möglichst über eHYD abrufbar, d.h. im Rahmen des Hydrographischen Dienstes.

Das Problem der bisherigen Nichterfassung von Sohlerosionen in den für Sohlaufnahmen meist zu seichten Randbereichen besteht im Übrigen in der gesamten Strecke und nicht bloß für die Erhaltungsstrecke, auch wenn die viadonau-Aufnahmen im Mittel breiter als jene der VHP ausfallen. Es wäre also durchaus möglich, dass der Wert von 340.000 m³/a für den Geschiebeaustrag der Gesamtstrecke (BMNT, 2018) noch etwas nach oben zu korrigieren sein wird; darauf sollte bei zukünftigen Untersuchungen geachtet werden. Auch in diesem Zusammenhang ist wichtig, dass stabile (bzw. möglichst wieder anzuhebende) Wasserspiegellagen (bezogen auf charakteristische Abflüsse, speziell RNQ und MQ) als Steuer- und Zielkriterien implementiert werden müssen, um diese Unsicherheiten zu beenden. Dazu ist auch anzumerken, dass das Kriterium, NW- und MW-Spiegel zu erhalten bzw. wieder anzuheben, auch im „Flussbaulichen Management-Leitbild“ der viadonau (2018)⁴⁸ als wichtiges Ziel genannt wird.

9.5 Weitere Aspekte

Für eine vollständige Geschiebebewirtschaftung muss auch die Zugabe des Restbetrages von ca. 70.000 m³/a, der (gem. BMNT, 2018) nicht dem Kraftwerksbetreiber zuzuordnen ist, sondern der Republik Österreich, langfristig und (rechtlich) verbindlich abgesichert werden. Da dies über Geschieberückführungen aus dem untersten Teil der Strecke erfolgt bzw. noch verstärkt werden muss, sind die zugehörigen Transportweiten (Konzept des Zugabeäquivalentes) und die Abriebeffekte (Kornverkleinerung und damit reduzierte Wirksamkeit) zu berücksichtigen (Klasz et al., 2017)⁴⁹. Außerdem besteht das Risiko, dass als Konsequenz starker Rückführungen stromab der Geschiebefänge, also im untersten Teilabschnitt, wieder stärkere Sohlerosionen verursacht werden. Für diese Frage sollten die charakteristischen Wasserstände an den Pegelstellen Hainburg, Thebnerstraßl und Wolfsthal beobachtet und ausgewertet werden, entsprechend der in dieser Studie entwickelten Methodik.

Unter Berücksichtigung der genannten Aspekte besteht nun erstmals die Chance, nun unter Regie bzw. Kontrolle der Wasserrechtsbehörde, dass das Problem der seit Jahrzehnten laufenden Sohlerosion in

⁴⁸ viadonau (2018): Flussbauliches Management-Leitbild für die Donau östlich von Wien.

⁴⁹ Klasz, G., Kübläck, 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.

der Donau östlich von Wien endlich beendet wird. Als „nachhaltig“ können solche Geschiebezugaben nicht bewertet werden; wobei sich dieses Kriterium (konzeptiv) ja eigentlich nur auf die Nutzung natürlicher Ressourcen (z.B. in der Forstwirtschaft) sinnvoll bezieht, und jedenfalls nicht auf geologische Prozesse. Das dafür relevante Kriterium wäre die Materialeffizienz (bzw. allgemeiner: die Ressourceneffizienz). In dieser Hinsicht gibt es durch Sohlvergrößerungen, Aufweitungen und Ausleitungen (im Bereich höherer Wasserstände) und ggf. durch die Verwendung von klein gebrochenem Kantkorn (unter Beibehaltung einer grundsätzlich dynamischen Sohle) ein erhebliches Optimierungspotential, vgl. u.a. Klasz (2014). Der Wert von ca. 340.000 m³/a für das Gesamt-Geschiebedefizit ist keine Konstante; durch geeignete Maßnahmen könnte dieses Defizit, also der Materialbedarf, wieder reduziert werden. Auch der in dieser Studie nachgewiesene fallende Trend bei den (mittleren) Abflüssen könnte – zumindest langfristig – in diese Richtung wirken; wobei mit einer niedrigeren Wasserführung andere Nachteile verbunden sein werden.

Bisher völlig ungeklärt ist schließlich, wie mit dem zwischen 1996 und 2018 aufsummierten Geschiebedefizit umzugehen ist. Für die Erhaltungsstrecke ist klar, dass nach den wasserrechtlichen Genehmigungen stabile Sohl- und Wasserspiegelniveaus vorgesehen waren, dieses Defizit von mindestens rd. 1,0 Mio. Kubikmeter, wahrscheinlich eher 1,3 Mio. Kubikmeter, hätte nie entstehen dürfen, es wäre also – über einen längeren Zeitraum – wieder zuzugeben, also auf den Ausgangszustand von 1996 zu kompensieren. Wird das nicht behoben, dann bleiben die damit verbundenen Wasserspiegelabsenkungen (für Mittelwassern in der Größenordnung von rd. 50 cm, bei Niederwasser teilweise noch stärker), die nicht geschehen hätten dürfen, auch in Zukunft bestehen, und das in einer ökologisch und wasserwirtschaftlich besonders sensiblen Umgebung (u.a. Lobau). Auch damit würde öffentliches Interesse nachteilig berührt bzw. gefährdet.

Schließlich stellt sich die Frage, ob die seit fast 30 Jahren betriebene Geschiebezugabe des Kraftwerksbetreibers und das seit 15 Jahren durchgeführte Geschiebemanagement der viadonau zu rechtfertigen sind, wenn trotz dieser Maßnahmen noch immer eine Sohlerosionen wirksam sind.

Wie die oben (Kap. 9.1.) angeführten Untersuchungen und Abschätzungen zeigen, wäre ohne Gegenmaßnahmen eine Sohlerosion von rd. 5 cm/a zu erwarten gewesen, im Betrachtungszeitraum 1996 bis 2026 würde sich das auf etwa 1,5 m aufsummieren. Eine so starke Sohlerosion hätte wegen der damit verbundenen Absenkung des Donau- und des Grundwasserspiegels die ökologische Qualität der Auenlandschaft in so erheblicher Weise beeinträchtigt, dass die Berechtigung eines Nationalparks und die Erhaltungswürdigkeit als Auenschutzgebiet in Frage gestellt wäre. Mit der bisher praktizierten Form der Geschiebebewirtschaftung konnte die Sohlerosion in diesem Zeitraum (ca. 30 Jahre) auf insgesamt etwa 0,5 m begrenzt werden, obwohl sie in den ersten beiden Jahrzehnten nur in eingeschränkter Weise umgesetzt wurden. Die Sohlerosion konnte also in einem gerade noch erträglichen Rahmen (unter Berücksichtigung des beschränkten Zeitraumes) gehalten werden. Das ist ein großer Erfolg. Zugleich wurde dadurch gezeigt, dass Geschiebebewirtschaftung und Geschieberückführung auch in dieser Strecke möglich und wirksam sind.

Die derzeit laufenden Maßnahmen sind jedoch noch nicht ausreichend und entsprechend auszuweiten, derart, dass das volle Geschiebedefizit kompensiert wird. Das bedeutet, dass die als wirksam, sinnvoll und durchführbar erwiesenen Maßnahmen von den Verursachern der Sohlerosion im vollen Umfang umgesetzt werden. Nötigenfalls ist dies von der Behörde mit Vorschriften (Auflagen) sicherzustellen.

Diese zweifellos möglichen und notwendigen Nachbesserungen können in das laufende Geschiebemanagement implementiert werden und wären auch weiterhin in geeigneten Zeitabständen (z.B. fünf Jahre) zu evaluieren.

Anhänge

Anhang A1	6 Seiten	Zur Methodik (Mann-Kendall-Test, Sen-Neigung; Standard Normal Homogeneity Test; Chow-Test)
Anhang A2	8 Seiten	Charakteristische Wasserstände (entsprechend RNQ und MQ) für die Donaupegel und Vergleich mit KWD-Werten (KWD-1985, KWD-1996, KWD-2010, KWD-2020; Q-kompensiert)
Anhang A3	19 Seiten	Zeitreihen der GW-Stände (Monats- und Jahresmittel; Jahres-Minima) für 19 GW-Messstellen und ergänzende Auswertungen

Verwendete Abkürzungen:

BMNT	Bundesministerium für Nachhaltigkeit und Tourismus (alias: BMLFRW: Bundesministerium für Land- und Forstwirtschaft, Regionen und Wasserwirtschaft; heute: BMLUK: Bundesministerium Land- und Forstwirtschaft, Klima- und Umweltschutz, Regionen und Wasserwirtschaft) ⁵⁰
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)
MK-Test	Mann-Kendall-Test
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
VHP	Verbund Hydro Power (früher: Austrian Hydro Power bzw. Donaukraftwerke)
w/Q	Wasserstands-/Durchfluss-Beziehung (auch als Abflusskurve oder Pegelschlüssel bezeichnet)
WR	Wasserrechts... (bzw. wasserrechtlich)
WRG	Wasserrechtsgesetz

⁵⁰

In der Vergangenheit auch noch diverse weitere Namensänderungen ...

Verwendete Fachliteratur und Unterlagen:

- Birsan, M. V., Molnar, P., Burlando, P., & Pfaundler, M. (2005): Streamflow trends in Switzerland. *Journal of hydrology*, 314 (1-4), 312-329.
- 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.
- BMNT (2018): Bundesministerium für Nachhaltigkeit und Tourismus, 2018: Endbericht der Arbeitsgruppe „Sohlentwicklung in der freien Fließstrecke unterstrom Kraftwerk Freudenau.
- Bundesministerium für Land- und Forstwirtschaft (1996): KW Freudenau, Detailprojekt „Unterwasserbereich“ wasserrechtliche Genehmigung, Zl. 14.570/264-I 4/94; vom 4.4.1996.
- Burn, D. H., & Elnur, M. A. H. (2002). Detection of hydrologic trends and variability. *Journal of hydrology*, 255(1-4), 107-122.
- Chow, G. C. (1960). Tests of equality between sets of coefficients in two linear regressions. *Econometrica: Journal of the Econometric Society*, 591-605.
- Donaucosult Zottl & Erber Ziviltechniker-GmbH. (2003) im Auftrag der Wasserstraßendirektion: Donau östlich von Wien, Flussbauliches Gesamtprojekt, Untersuchung der Nullvariante – Geologische Bearbeitung.
- Donaucosult (2007): Flussbauliches Gesamtprojekt, Umweltverträglichkeitserklärung, Fachbeitrag Geologie - Bericht; im Auftrag der viadonau.
- Donaucosult (2011) im Auftrag der viadonau: Notfallkonzept Sohldurchschlag.
- Felkel, K. (1970): Ideenstudie über die Möglichkeit der Verhütung von Sohlenerosion durch Geschiebezufuhr aus der Talaue ins Flussbett, dargestellt am Beispiel des Oberrhein. *Mitteilungsblatt der BAW*, 1970, H. 30, S. 21 – 29.
- Felkel, K. (1987): Acht Jahre Geschiebezugabe am Oberrhein; *Wasserwirtschaft*, 77. Jahrgang, Heft 4 – 1987.
- Fenton, J. (2018): On the generation of Stream rating curves; *Journal of Hydrology* (564) 748-757.
- 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.
- Gruber, O. (1969): Gewässerkunde und Hydrografie im Bundesstrombauamt; *Österreichische Wasserwirtschaft*, Jahrgang 21 – Heft 1/2 – 1969.
- Holubová, K., Capeková, Z., & Szolgay, J. (2004, June). Impact of hydropower schemes at bedload regime and channel morphology of the Danube River. In *River Flow* (Vol. 1, pp. 135-142). Balkema Publisher.
- Jaiswal, R. K., Lohani, A. K., & Tiwari, H. L. (2015). Statistical analysis for change detection and trend assessment in climatological parameters. *Environmental Processes*, 2(4), 729-749.
- Kendall, M. G. (1975). Rank correlation methods. Griffin, London.
- Klasz, G. (2014): Zu den Möglichkeiten einer Geschiebebewirtschaftung und den zugehörigen Optimierungspotentialen für die Donau östlich von Wien. Studie im Auftrag der Nationalpark Donau-Auen GmbH. *Wissenschaftliche Reihe des Nationalparks Donau-Auen*, Heft 37 /2015.

- Klasz G., Reckendorfer W., Baumgartner C., Gabriel H., Gutknecht D. (2013): River-bed degradation and overbank deposition: A human induced geomorphic disequilibrium in the Donau-Auen National Park. 5th Symposium for Research in Protected Areas (10 to 12 June, Mittersill); Conference Volume, 379-384.
- Klasz, G., Gabriel, H., Habersack, H., Schmalfuß, R., Baumgartner, C. und Gutknecht, D. (2016): Ausmaß und Dynamik der Sohlerosion der Donau östlich von Wien – flussmorphologische und wasserwirtschaftliche Aspekte. Österreichische Wasser- u. Abfallwirtschaft, 68 (5-6), 199-207.
- 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.
- Klasz, G. (2023): Untersuchung zur Sohlerosion der Donau östlich von Wien über den Zeitraum 1996/2020 und damit zusammenhängende Änderungen der mittleren Grundwasserstände an donau-nahen Messstellen. Veröffentlicht in der Wissenschaftliche Reihe des Nationalparks Donau-Auen, Heft 76 /2024.
- Klasz, G., C. Baumgartner (2024): Trends bei Wasserständen und mittleren Abflüssen in der Donau östlich von Wien und donau-nahen Grundwasserständen: Starke Effekte durch Sohlerosion und Klimawandel. Österreichische Wasser- und Abfallwirtschaft, doi.org/10.1007/s00506-024-01090-z.
- Kresser, W. (1987): Auswirkungen des geplanten KW Wien auf den Geschiebetrieb und die Sohlstabilität der Donau im Bereich stromab von Greifenstein; Gutachten; Wien.
- Kuhl, D. (1993): Die Geschiebezugabe unterhalb der Staustufe Iffezheim von 1978 bis 1992: Mitteilungsblatt der BAW, 1993, Nr. 70.
- Mann, H. B. (1945). Non-parametric tests against trend: *Econometrica* 13, 245-259.
- Mauerhofer, V. und Klasz, G. (2018): Wasserkraftwerke, Flusseintiefungen und nachträgliche Änderungen rechtskräftiger Bewilligungen. *Recht der Umwelt (RdU)*, Heft 02 (April) 2018.
- Nestmann, F. (1996): Eigenschaften und Nutzungen von Fließgewässern; *Wasserwirtschaft*, 86. Jahrgang, Heft 7/8 – 1996.
- Ökologiekommission (1985): Arbeitspapier Nr.11.
- 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.
- Schimpf, H., Harreiter, H., Ziss, H. (2009): Zehn Jahre Erfahrungen mit der Unterwassersicherung zum Kraftwerk Freudenau; *Österreichische Ingenieur- und Architekten-Zeitschrift (ÖIAZ)* 154, Heft 1-6/2009.
- Sen, P. K. (1968). Estimates of the regression coefficient based on Kendall's tau. *Journal of the American statistical association*, 63(324), 1379-1389.
- viadonau (2012): Die kennzeichnenden Wasserstände der österreichischen Donau. KWD 2010. Nach dem Stande vom 31. Dezember 2010. (digital verfügbare Version)
- viadonau (2018): Flussbauliches Management-Leitbild für die Donau östlich von Wien.
- viadonau (2023): Die kennzeichnenden Wasserstände der österreichischen Donau. KWD 2020. (digital verfügbare Version)

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

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

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

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

Wijngaard, J.B., A.M.G. Klein Tank & G.P. Können (2003): Homogeneity of 20th century European daily temperature and precipitation series. International Journal of Climatology: A Journal of the Royal Meteorological Society, 23, 679-692.

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.

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.

Zottl & Erber Ingenieurbüro (1987): Donau im Raum Wien - Bad Deutsch-Altenburg, Untersuchung der Sohlstabilität im Zusammenhang mit der Staustufe Wien; Studie im Auftrag der Stadt Wien – MA 45 (Wasserbau).

Anhang A1

Die Trendanalysen in dieser Studie werden als Teststatistik mit der Methode des Mann-Kendall-Tests (Mann⁵¹, 1945; Kendall⁵², 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; in diesem Zusammenhang wird die Trenduntersuchung zweistufig ausgeführt: (a.) auf Basis der Originalzeitreihe (also mit der darin enthaltenen 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 & Elnur⁵³, 2002; Yue et al.⁵⁴, 2002; Birsan et al., 2005; Petrow & Merz, 2009; Gocic & Trajkovic⁵⁵, 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 MK-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 MK-Teststatistik wird mit der Prüfgröße S berechnet:

⁵¹ Mann, H. B. (1945). Non-parametric tests against trend: *Econometrica* 13, 245-259.

⁵² Kendall, M. G. (1975). Rank correlation methods. Griffin, London.

⁵³ Burn, D. H., & Elnur, M. A. H. (2002). Detection of hydrologic trends and variability. *Journal of hydrology*, 255(1-4), 107-122.

⁵⁴ 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.

⁵⁵ 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-Werte⁵⁶ 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 Vorgehensweise 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

⁵⁶ 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).

Auch in dieser Studie wird ein Signifikanzniveau $\alpha = 0,10$ gewählt, analog zu den sehr ähnlichen Bearbeitungen und Fragestellungen in Blöschl et al. (2011) bzw. Petrow und Merz (2009)); dafür ist der kritische Wert $Z_{\alpha/2} = 1,645$ (95%-Quantile der Standardnormalverteilung; 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 $1/2 \cdot n \cdot (n - 1)$ Steigungen⁵⁷, 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 Storch⁵⁸, 1995; Yue et al., 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 MK-Test), desto eher wird also die Nullhypothese verworfen und damit ein Trend vorgetäuscht (Fehler erster Art)⁵⁹; dies gilt für positive Autokorrelations-Koeffizienten, für negative Koeffizienten ist es hingegen umgekehrt, der MK-Test wird dann die Signifikanz eines Trends unterschätzen (vgl. Yue et al., 2002b).

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

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

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 ($k=1$)

⁵⁷ In dieser Studie mit $n=28$ sind das jeweils 378 Wertepaare.

⁵⁸ Von Storch, H. (1999). Misuses of statistical analysis in climate research. In *Analysis of climate variability* (pp. 11-26). Springer, Berlin, Heidelberg.

⁵⁹ Mit anderen Worten: Positive Autokorrelation führt dazu, dass die Signifikanz eines positiven Trends überschätzt wird (Petrow und Merz, 2009).

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 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. 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 MK-Test durchgeführt wird, enthält einerseits keine Autokorrelation, andererseits aber den Trend. Falls keine signifikante Lag1-Autokorrelation vorliegt (vgl. Gl. [A1.9]) kann man den MK-Test direkt auf die Original-Zeitreihe anwenden (Blöschl et al., 2011).

In dieser Studie wird das Prewhitening generell angewandt, also auch dann, wenn die Lag1-Autokorrelation schwach ausfällt, also innerhalb der in Gl. [A.1.9] angegebenen Grenzen.

Bruchpunkt- bzw. Homogenitätstest

Für das Erkennen von Bruchpunkten, allgemeiner von Inhomogenitäten, wird der Standard Normal Homogeneity-Test (SNHT) in der bei Wijngaard et al. (2003) angegebenen Form angewandt. Dabei wird eine Prüfgröße für alle k Stellen (hier: die einzelnen Jahre) der aus n Elementen (Jahren) bestehenden Zeitreihe gebildet, also $k = 1, 2, \dots, n$:

$$T_k = k \cdot Z_1^2 + (n - k) \cdot Z_2^2 \quad [\text{A1.13}]$$

wobei die beiden Parameter Z_1 und Z_2 mit

$$Z_1 = \frac{1}{k} \sum_{i=1}^k \frac{(X_i - \bar{X})}{\sigma_x} \quad [\text{A1.14a}]$$

und

$$Z_2 = \frac{1}{n-k} \sum_{i=k}^n \frac{(X_i - \bar{X})}{\sigma_x} \quad [\text{A1.14b}]$$

definiert sind; \bar{X} und σ_x sind arithmetischer Mittelwert und Standardabweichung der gesamten Zeitreihe.

Es wird also für jeden Punkt in der Zeitreihe (mit dem Laufindex k) ein Mittelwert der Daten vor und nach diesem Punkt berechnet; die Differenzen zwischen diesen Mittelwerten und dem Gesamt-Mittelwert werden standardisiert (durch die Standardabweichung der gesamten Zeitreihe dividiert). Große Werte dieser Testgröße deuten auf Bruchpunkte (breaks; change points) bzw. Inhomogenitäten hin. Um die Nullhypothese („es gibt keinen Bruchpunkt“) zu verwerfen, sollte die Teststatistik T_k dort einen kritischen Wert $T_{o,krit}$, der von Stichprobengröße und Signifikanzniveau abhängt, überschreiten; solche Werte sind u.a. in Wijngaard et al. (2003) tabelliert; für $\alpha = 5\%$ und $n = 28$ erhält man damit (Interpolation zwischen den Werten für $n = 20$ und $n = 30$) $T_{o,krit} = 7,51$.

Der Chow-Test

Der Chow-Strukturbruchtest (Chow, 1960) ist eine spezielle Form des globalen F-Tests, bei der die Teststatistik (hier T gem. Gl. [A.16]) unter der Nullhypothese einer F-Verteilung folgt; dies auf Grundlage eines Konzeptes von R. A. Fisher. „Global“ bezieht sich darauf, dass geprüft wird, ob ein Modell als Ganzes signifikant ist, und nicht bloß ein einzelner Parameter. Es baut u.a. auch auf der Idee der Varianzzerlegung auf.

F-Verteilungen ergeben sich, wenn Quotienten aus Chi-Quadrat-verteilten Zufallsvariablen, die durch die zugeordnete Anzahl von Freiheitsgraden (m, n) geteilt sind, gebildet werden, also (vom Typ):

$$F = \frac{\chi_m^2/m}{\chi_n^2/n} \quad [\text{A1.15}]$$

Solche Zufallszahlen treten speziell im Zusammenhang mit Stichprobenvarianzen auf.

Der Test prüft die Nullhypothese H_0 , dass das Modell mit Trendbruch (hier bei 2018), also mit zwei linearen Regressionsmodellen, eines für das Teilintervall [1996; 2017] (mit Neigung ϑ_1) und das zweite für das Teilintervall [2018; 2023] (mit Neigung ϑ_2) keine Verbesserung gegenüber dem einfachen linearen Modell für die gesamte Untersuchungsperiode [1996; 2023] (mit Neigung ϑ_c) ergibt.

Die zugehörige Teststatistik (Prüfgröße) lautet:

$$T = \frac{(RSS_c - (RSS_1 + RSS_2))/k}{(RSS_1 + RSS_2)/(n - 2k)} \quad [\text{A1.16}]$$

Dabei werden (unter Anwendung einer Varianzanalyse bzw. Varianzzerlegung) Residualquadratsummen des einfachen Modells (d.h. ohne Trendbruch) RSS_c mit dem geteilten Modell (mit Trendwechsel) mit RSS_1 (erster Teilabschnitt) und RSS_2 (zweiter Teilabschnitt) in Beziehung gesetzt, wobei aus den Residualquadratsummen (durch Division mit den zugehörigen Freiheitsgraden k und $(n - k)$) schließlich „mittlere Residualquadratsummen“ gebildet werden. k ist hier $k = 2$ und n ist die Anzahl der Beobachtungswerte (d.h. Jahre).

Die Größe RSS_c ist die Residualquadratsumme für das lineare Modell ohne Trendbruch

$$RSS_c = \sum_{i=1}^n (y_i - \bar{y}_c)^2 \quad [A1.17]$$

mit den Beobachtungswerten y_i ; die \bar{y}_c sind die vom linearen Regressions-Modell über die gesamte Untersuchungsperiode vorhergesagten Werte; analog beziehen sich RSS_1 und RSS_2 auf die Residualquadratsummen des geteilten Modells (mit Trendbruch):

$$RSS_1 = \sum_{i=1}^{n_1} (y_i - \bar{y}_1)^2 \quad [A1.18a]$$

und

$$RSS_2 = \sum_{i=n_1+1}^n (y_i - \bar{y}_2)^2 \quad [A1.18a]$$

wobei \bar{y}_1 und \bar{y}_2 die von den linearen Regressions-Modellen über dem ersten bzw. zweiten Teilintervall (mit Ende des ersten Teilintervalls beim n_1 -ten Zeitreihen-Glied (hier 2017) bzw. Anfang des zweiten Teilintervalls beim $(n_1 + 1)$ -ten Glied (hier 2018)).

Die Prüfgröße T wird mit dem kritischen Wert der F-Verteilung mit Irrtumswahrscheinlichkeit α und den beiden Freiheitsgraden k und $(n - 2k)$, also $F(\alpha; k; n - 2k)$ verglichen.

Wenn $T \geq F_{crit} = F(\alpha; k; n - 2k)$, dann wird die Nullhypothese H_0 verworfen, dann liefert das Modell mit unterschiedlichen Regressionsgeraden auf den Teilintervallen [1996; 2017] und [2018; 2023] (und einem Trendwechsel von ϑ_1 zu ϑ_2 ab 2018) statistisch signifikant bessere Ergebnisse als das lineare Regressionsmodell über die gesamte Zeitreihe (1996/2023) mit Neigung ϑ_c . Mit anderen Worten: Dann ist es (im Sinn der schließenden Statistik) vernünftig, von einem Strukturbruch (hier: Trendwechsel) auszugehen. Für das Signifikanzniveau $\alpha = 1\%$ und Werte zwischen 1996 und 2023 ($n = 28$) ist $F(0,01; 2; 24) = 5,614$; für Orth (Werte ab 2003; $n = 21$) ist $F(0,01; 2; 17) = 6,112$ und für Thebnerstraße (Werte ab 2000; $n = 24$) ist $F(0,01; 2; 20) = 5,489$; F-Quantile sind in Statistiklehrbüchern tabelliert (z.B. Weber, 1983) bzw. direkt über Excel oder Statistikprogramme verfügbar.

