

Aktualisierung der hydrologischen Analyse der Bestandsaufnahme zur Niedrigwasserproblematik

Synthesebericht über 60 Jahre Niedrigwassermonitoring
im internationalen Mosel-Saar-Einzugsgebiet



IMPRESSUM

HERAUSGEBER:

IKSMS – Internationale Kommissionen zum Schutze der Mosel und der Saar
Schillerarkaden 2, D-54329 Konz
Tel : +49 (0)6501-6070900
mail@iksms-cipms.org
www.iksms-cipms.org

REDAKTION:

WAGNER, Jean-Pierre (Vorsitzender der Expertengruppe EN „Niedrigwasser“, Frankreich)

Unter Mitwirkung der Mitglieder der Expertengruppe EN:

HENRICHS, Yvonne (Deutschland)
RIGOLL, Klaus (Deutschland)
GERLACH, Torben (Deutschland)
FELTZ, Nicolas (Belgien)
GILBERTZ, Christophe (Luxemburg)

TECHNISCHE UNTERSTÜTZUNG:

HONECKER, Ulrich

BILDNACHWEIS:

Die Mosel bei Uckange – am 4. Juli 2022 – Quelle: DREAL Grand Est

ÜBERSETZUNG:

BRÜNICKE, Sabine
STEPHAN, Johanna

ERSCHEINUNGSORT UND -DATUM: D-Konz, Dezember 2024

Inhaltsverzeichnis

Abkürzungsverzeichnis	6
1 Einleitung.....	7
2 Beschreibung des Einzugsgebiets und des Niedrigwasserbeobachtungsnetzes.....	8
3 Niedrigwasser-Klassifizierung.....	16
3.1 Bewertungsmethode auf Pegel-Ebene	16
3.2 Bewertungsmethode auf Teileinzugsgebiets-Ebene	21
4 Niedrigwasser-Bezugsjahre im Zeitraum von 1960 bis 2020	25
4.1 Welches Jahr ist in Bezug auf Niedrigwasser das kritischste Jahr?.....	25
4.1.1 Untersuchung anhand des kleinsten $NM7Q_{\text{Jahr}}$ (NN7Q)	25
4.1.2 Untersuchung anhand der Dauer des Niedrigwassers	32
4.1.3 Untersuchung anhand des Volumendefizits	37
5 Niedrigwasserentwicklung im Laufe der Zeit	43
5.1 Analyse der Schwellenwerte.....	44
5.1.1 DREAL.....	44
5.1.2 WSV und LUA.....	45
5.1.3 SPW und AGE.....	45
5.1.4 LfU.....	45
5.2 Trends	47
5.2.1 Lineare Regression.....	47
5.2.1.1 Parameter „jährlicher $NM7Q$ “	47
5.2.2 Der Mann-Kendall-Test.....	54
5.2.2.1 Der Parameter „jährlicher $NM7Q$ “	54
5.3 Synthese.....	58

Zusammenfassung

Mit dem vorliegenden Dokument wird der Bericht „Niedrigwasserproblematik im Einzugsgebiet von Mosel und Saar – Aktualisierung der Bestandsaufnahme“ aus dem Jahr 2019 aktualisiert.

In **Kapitel 1** werden die Zielsetzungen der durchgeführten Arbeit dargestellt: Aufbau einer Bewertungsmethode auf Ebene größerer Teileinzugsgebiete, Herausarbeiten von Bezugsjahren an den einzelnen Pegeln, Analyse der Niedrigwasserentwicklung von 1960 bis 2020.

Im **zweiten Kapitel** wird das internationale Mosel-Saar-Einzugsgebiet beschrieben, und die Merkmale des gemeinsamen IKSMS-Niedrigwassermonitoringnetzes werden aufgezeigt: Fläche der Einzugsgebiete, Entwicklung des Netzes seit 1960 und verfügbare Messjahre pro Messstelle.

Im **dritten Kapitel** wird an die Methode zur Einstufung des Niedrigwassers erinnert. An den einzelnen Messstellen beruht diese Einstufung auf dem Wiederkehrintervall des jährlichen NM7Q, und die Aggregationsmethode für das internationale Mosel-Saar-Einzugsgebiet und seine 4 Teileinzugsgebiete (Obere Mosel, Saar, Sauer, Untere Mosel) kombiniert die Einstufung der Lage am Auslasspegel dieser größeren Teileinzugsgebiete mit der Einstufung von mehr als 50 % ihrer jeweiligen Fläche.

Für jede der 59 Messstellen des gemeinsamen IKSMS-Niedrigwasserbeobachtungsnetzes wird in **Kapitel 4** herausgearbeitet, in welchem Jahr von 1960 bis 2020 die Situation am kritischsten war, und zwar je nach:

- jährlichem NM7Q, anhand dessen die Lage in Abhängigkeit des zugeordneten Wiederkehrintervalls bewertet werden kann,
- Dauer des Niedrigwassers, mit der die potenzielle Auswirkung eines Niedrigwassers eingeschätzt werden kann,
- Abflussvolumendefizit, anhand dessen eingeschätzt werden kann, wieviel Niedrigwasserstützung notwendig gewesen wäre, damit das betrachtete Gewässer nicht in eine Niedrigwassersituation gerät.

Dabei lässt sich feststellen, dass die kritischsten Niedrigwasserjahre an 10 der 59 Messstellen des Netzes übereinstimmen. Auch wird erkennbar, dass die Klassifizierung des Bezugsjahres anhand des NM7Q immer strenger ausfällt als die anhand der Parameter Niedrigwasserdauer oder Volumendefizit. **Zur Analyse der Niedrigwassersituation wird daher empfohlen, die Parameter Dauer und Volumendefizit als Zweitparameter ergänzend zum jährlichen NM7Q hinzuzuziehen.**

In **Kapitel 5** schließlich untersucht der Bericht die Niedrigwasserentwicklung von 1960 bis 2020 an 19 Pegeln des Beobachtungsnetzes, um zu ermitteln, ob Trends erkennbar werden und den Auswirkungen des Klimawandels zugeschrieben werden können. Zur Analyse des jährlichen NM7Q, der Niedrigwasserdauer oder des Abflussvolumendefizits wurden zwei Verfahren getestet:

- die einfache lineare Regression, um ggf. den Entwicklungsgradienten im Untersuchungszeitraum quantifizieren zu können,
- den Mann-Kendall-Test, der eine rein qualitative Aussage über eine steigende oder fallende Entwicklung im Untersuchungszeitraum macht.

Für die Parameter Niedrigwasserdauer und Volumendefizit konnte kein Ergebnis herausgearbeitet werden, da diese auf der Grundlage eines Schwellenwerts (NM7Q mit einem Wiederkehrintervall $T =$

2 Jahre) berechnet werden, der die Zeitreihe in zwei unvereinbare Gruppen teilt (einerseits die Jahre mit und andererseits die ohne Niedrigwasser).

Um zeitliche Entwicklungen herauszuarbeiten, scheint sich **für den jährlichen NM7Q der Mann-Kendall-Test als sensibler zu erweisen als das Verfahren der linearen Regression**, denn einerseits bestätigt der Mann-Kendall-Test die Ergebnisse der linearen Regression, und andererseits zeigt er dort Trends auf, wo die lineare Regression keinen Unterschied macht oder nicht anwendbar ist. So lässt sich mit der einfachen linearen Regression für 6 der 19 Pegel ein signifikanter Rückgang des jährlichen NM7Q aufzeigen, und der Mann-Kendall-Test fügt weitere 2 Pegel mit dem gleichen Trend hinzu. **Für den Zeitraum 1960-2020 lässt sich dennoch kein Gradient quantifizieren, der zur Vorhersage der künftigen Entwicklung des jährlichen NM7Q herangezogen werden könnte.** Diese Feststellung darf allerdings nicht so interpretiert werden, dass der Klimawandel keine Auswirkungen zeitigt, denn erstens scheinen die Veränderungen je nach den untersuchten meteorologischen Parametern nicht überall mit der gleichen Geschwindigkeit und auch nicht in die gleiche Richtung zu erfolgen, und zweitens ist die hydrologische Reaktion weder linear noch unmittelbar.

Die Trends zur Verschlechterung der Niedrigwassersituation, die sich an einem Teil der Messstellen zu zeigen scheinen, müssen aber konfrontiert werden mit den Studien zur Modellierung der Tagesabflüsse im Rahmen der Klimaentwicklungsszenarien sowie mit den Ergebnissen, die aus der Aktualisierung der vorliegenden Untersuchung beim nächsten 6-Jahres-Arbeitszyklus der IKSMS hervorgehen werden. Durch die Verlängerung des Beobachtungszeitraums können dann auch weitere Messstellen mit in die Betrachtung aufgenommen werden.

Abkürzungsverzeichnis

AGE : Administration de la gestion de l'eau Luxembourg

DREAL Grand Est : Direction régionale de l'environnement, de l'aménagement et du logement de la région Grand Est

EZG: Einzugsgebiet

IKSMS: Internationale Kommissionen zum Schutze der Mosel und der Saar

LfU: Landesamt für Umwelt Rheinland-Pfalz

LUA: Landesamt für Umwelt und Arbeitsschutz Saarland

MK-Test: Mann-Kendall-Test

M7Q [m³/s]: arithmetischer 7-Tage Mittelwert der mittleren Tagesabflüsse

NM7Q [m³/s]: Niedrigstes arithmetisches Mittel von 7 aufeinanderfolgenden Tagesabflussmitteln innerhalb eines Zeitabschnittes

NM7Q_a [m³/s]: Niedrigstes arithmetisches Mittel von 7 aufeinanderfolgenden Tagesabflussmitteln innerhalb eines Kalenderjahres (auch NM7Q_{Jahr})

NM7Q_T [m³/s]: Schwellenwert der Extremwertanalyse einer NM7Q_a-Zeitreihe mit der Jährlichkeit von T Jahren

NN7Q [m³/s]: niedrigster NM7Q_a einer NM7Q_a-Zeitreihe

SPW ARNE: Service Public de Wallonie Agriculture, Ressources naturelles et Environnement

SumD_a [d]: jährliche Dauer des Niedrigwassers = Anzahl der Niedrigwassertage¹ eines Jahres a

SumVD_a [m³]: jährliches Volumendefizit = Summe der Wasservolumina, die im Laufe des Jahres a notwendig gewesen wäre = $SumVD = \sum_{i=1}^n (NM7Q_2 - M7Q_i) \cdot 86400$, mit n = Anzahl der Niedrigwassertage

TEZG: Teileinzugsgebiet

WRRL: Wasserrahmenrichtlinie

WSV: Wasserstraßen- und Schifffahrtsverwaltung des Bundes

XSumD [d]: maximaler Wert der jährlichen Niedrigwasserdauer in einer Zeitreihe = Max_a (SumD_a)

XSumVD [m³]: maximaler Wert des jährlichen Volumendefizits in einer Zeitreihe = Max_a (SumVD_a)

¹ Tage, an denen M7Q < NM7Q₂

1 Einleitung

Aufgabe der IKSMS ist es, die Arbeit der Staaten, Regionen und Länder des internationalen Mosel-Saar-Einzugsgebiets in folgenden Bereichen zu koordinieren:

- seit 1986 Warnung und Management bei unfallbedingten Verunreinigungen des Oberflächenwassers,
- seit 1988 Hochwasservorhersage,
- seit 2000 Wiederherstellung der Qualität des Oberflächen- und des Grundwassers mit dem Ziel, den von der Wasserrahmenrichtlinie festgelegten guten Zustand (bzw. das gute Potenzial) zu erreichen,
- seit 2007 Hochwasserrisikomanagement im Rahmen der Hochwasserrisikomanagement-Richtlinie
- seit 2015 Niedrigwassermanagement.

Wie es bei allen Tätigkeiten der IKSMS der Fall ist, so erfolgten auch die Arbeiten im Bereich Niedrigwasser nach einem „Bottom-up“-Ansatz, d. h. ausgehend von den Erkenntnissen und Praktiken der Staaten, Regionen und Länder, letztlich mit dem Ziel, eine gemeinsam getragene Analyse der Lage im internationalen Mosel-Saar-Einzugsgebiet zu erreichen.

Nach dem Vorbild der Überwachung der Wasserqualität seit 1964 hat es die in den IKSMS mit der Niedrigwasserproblematik betraute Expertengruppe gelernt und geschafft, ein Netzwerk zur Überwachung von Niedrigwasser aufzubauen, nachdem sie sich über die Auswahl der Abflussmessstellen, einen gemeinsamen hydrologischen Parameter (wöchentlicher NM7Q) und eine gemeinsame sechsstufige, auf den Wiederkehrintervallen des jährlichen NM7Q basierende Bewertungsmethode verständigt hatte.

Auch ist es gelungen, ein Instrument zur Speicherung und Darstellung der Ergebnisse aus diesem Niedrigwasserbeobachtungsnetz zu entwickeln, mit dem sich die vorgefundene Lage an jeder Messstelle chronologisch und räumlich analysieren lässt, indem ein Vergleich zu den Vorjahren sowie zu den übrigen Messstellen flussaufwärts im selben Einzugsgebiet bzw. am selben Gewässer hergestellt wird.

Ursprünglich war dieses Monitoring im Wesentlichen auf den Zeitraum Mai bis Oktober ausgerichtet, in dem Niedrigwasser am wahrscheinlichsten auftritt. Inzwischen hat die Expertengruppe es auf das gesamte Jahr ausgedehnt, damit ggf. auch atypische Niedrigwassersituationen erfasst werden können, also später oder früher im Jahr auftretende oder länger andauernde Niedrigwasser. Darüber hinaus hat die Expertengruppe versucht, die aus den im Rahmen der Hochwasservorhersage ausgetauschten Rohdaten errechneten, wöchentlichen Ergebnisse nahezu „in Echtzeit“ zur Verfügung zu stellen.

Letztlich geht es in den IKSMS darum, einen gemeinsamen Gesamtüberblick über verschiedene Themenbereiche im internationalen Mosel-Saar-Einzugsgebiet zu erhalten. Daher war es Aufgabe im Rahmen des vorliegenden Berichtes, die Arbeit zur Aktualisierung der Bestandsaufnahme zur Niedrigwasserproblematik aus dem Jahr 2019 mit dreifacher Zielsetzung weiterzuverfolgen:

- die Lage auf internationaler Ebene bewerten zu können mit einem Verfahren zur Aggregation der Ergebnisse der einzelnen Abflussmessstellen,
- auf internationaler Ebene eine Referenzsituation ermitteln zu können, mit der eine vorgefundene Lage verglichen werden kann,
- zu prüfen, ob über die letzten 60 Jahre, von 1960 bis 2020, bei der Niedrigwassersituation Entwicklungstrends auszumachen sind.

2 Beschreibung des Einzugsgebiets und des Niedrigwasserbeobachtungsnetzes

Das gemeinsame Niedrigwasserbeobachtungsnetz der IKSMS besteht aus 59 Messstellen, darunter:

- 28 in Frankreich gelegene Messstellen, die von der DREAL Grand Est betrieben werden,
- 23 in Deutschland gelegene Messstellen (13 vom Land Rheinland-Pfalz, 6 vom LUA des Saarlandes und 4 von der WSV betriebene Messstellen),
- 6 in Luxemburg gelegene Messstellen, die von der AGE betrieben werden,
- 2 in Wallonien gelegene Messstellen, die vom SPW ARNE betrieben werden.

Die Messstellen decken vielfältige Fließgewässer ab und reichen von Cochem (Einzugsgebiet = 27 088 km²) am Auslass der Mosel bis zur Messstelle Cleurie (Einzugsgebiet = 63 km²) am Zufluss eines Moselnebenflusses in den Vogesen (Karte 1 & Tabelle 1).

Die Reaktion eines Fließgewässers bei Niedrigwasser kann je nach Größe seines Einzugsgebiets (EZG), je nach örtlichen klimatischen Gegebenheiten und damit auch je nach geografischer Lage und Beschaffenheit des Bodens und Unterbodens signifikant variieren; letztere bedingt das Vorhandensein von Feuchtgebieten oder eines Grundwasserleiters, die in Zeiten starken Niederschlages Wasser speichern und es bei Niedrigwasser wieder ins Gewässer abgeben können.

Dazu wurde das internationale Einzugsgebiet in die folgenden vier hydrologischen Einheiten unterteilt (Karte 2):

- das EZG der Saar,
- das EZG der Sauer,
- das EZG der Mosel oberhalb des Zusammenflusses mit Saar und Sauer, das im weiteren Berichtsverlauf als „Obere Mosel“ bezeichnet wird,²
- das EZG der Mosel unterhalb des Zusammenflusses mit Saar und Sauer, das im weiteren Berichtsverlauf als „Untere Mosel“ bezeichnet wird.

Karten dieser Einheiten mit einer Liste der betreffenden Abflussmessstellen finden sich in Anhang A1 bis A4.

Ein Blick auf die räumliche Verteilung des gemeinsamen Niedrigwasserbeobachtungsnetzes zeigt, dass diese der Flächenverteilung des internationalen Mosel-Saar-Einzugsgebiets nach den vier o. g. hydrologischen Einheiten entspricht³ (Abbildung 1).

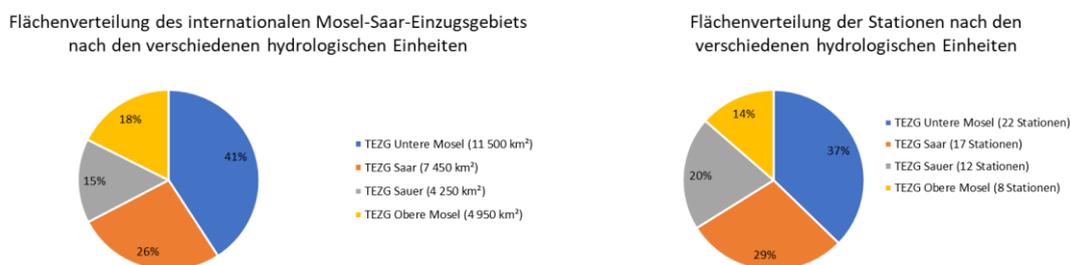


Abbildung 1: Vergleich der Flächenverteilung des internationalen Mosel-Saar-Einzugsgebiets (rechts) mit der räumlichen Verteilung der Messstellen (links)

² Die weitere Unterteilung des Teileinzugsgebiets Obere Mosel in „Oberste Mosel“ (6 800 km²) und „Mittlere Mosel“ (4 700 km²) vor und nach dem Zufluss der Meurthe wurde nicht übernommen, um jedem Teileinzugsgebiet einen internationalen Charakter zu bewahren.

³ Die leichte Abweichung rührt vom EZG der Sauer her, wo die Messstellendichte (= Anzahl der Messstellen pro EZG-Fläche) um 18 % höher ist als die mittlere Dichte der drei übrigen hydrologischen Einheiten.

Tabelle 1: Messstellenliste

Teileinzugsgebiet	Betreiber	Name der Station	Messstellennummer	Gewässer	Fläche des Einzugsgebiets [km ²]	Jahr der Inbetriebnahme
Obere Mosel	DREAL	Rupt sur Moselle	A4050620	Mosel	152	1968
Obere Mosel	DREAL	Cleurie	A4173010	Cleurie	63	1970
Obere Mosel	DREAL	Epinal	A4250640	Mosel	1217	1960
Obere Mosel	DREAL	Tonnoy	A5110610	Mosel	1976	1980
Obere Mosel	DREAL	Mirecourt	A5261010	Madon	381	1965
Obere Mosel	DREAL	Pulligny	A5431010	Madon	943	1964
Obere Mosel	DREAL	Pont-Saint-Vincent	A5500610	Mosel	3070	1988
Obere Mosel	DREAL	Toul	A5730610	Mosel	3338	1960
Obere Mosel	DREAL	Saint-Dié	A6051019	Meurthe	374	1967
Obere Mosel	DREAL	Lunéville	A6561110	Vezouze	559	1969
Obere Mosel	DREAL	Roville	A6711210	Mortagne	300	1992
Obere Mosel	DREAL	Gerbéville	A6731220	Mortagne	493	1969
Obere Mosel	DREAL	Damelevières	A6271010	Meurthe	2280	1969
Obere Mosel	DREAL	Custines	A7010610	Mosel	6830	1973
Obere Mosel	DREAL	Chambrey	A7701010	Seille	560	2003
Obere Mosel	DREAL	Nomény	A7821010	Seille	925	1969
Obere Mosel	DREAL	Metz	A7881010	Seille	1280	1964
Obere Mosel	DREAL	Hauconcourt-Hagondange	A7930610	Mosel	9422	1960
Obere Mosel	DREAL	Boncourt	A8071010	Orne	412	1960
Obere Mosel	DREAL	Briey	A8322010	Woigot	76	1967
Obere Mosel	DREAL	Moyeuvre-Grande	A8401010	Orne	1141	2004
Obere Mosel	DREAL	Uckange	A8500610	Mosel	10770	1981
Sauer	SPW	Martelange	L5610	Sauer	209	1975
Sauer	AGE	Bigonville	17	Sauer	308	2001
Sauer	AGE	Hesperange	2	Alzette	292	2001
Sauer	AGE	Kautenbach	14	Wiltz	428	2001
Sauer	AGE	Hunnebour	6	Eisch	164	2001
Sauer	AGE	Schoenfels	5	Mamer	84	2001
Sauer	AGE	Bissen	10	Attert	292	2001
Sauer	SPW	Ouren	L6330	Our	382	1992
Sauer	RLP	Gemünd Our	26260303	Our	611	1972
Sauer	RLP	Prümzurlay	26280504	Prüm	576	1972
Sauer	RLP	Seffern	26280800	Nims	137	1973
Sauer	RLP	Bollendorf 2	26200505	Sauer	3222	1958
Saar	DREAL	Hermelange	A9021040	Saar	186	1968
Saar	DREAL	Keskastel	A9091050	Saar	879	1967
Saar	DREAL	Oermingen	A9352050	Eichel	277	1968
Saar	DREAL	Wittring	A9301010	Sarre	1716	1997
Saar	LUA	Hangard	1362120	Oster	112	1962
Saar	RLP	Contwig	26420308	Schwarzbach	529	1952
Saar	RLP	Althornbach 2	26420603	Hornbach	425	1962
Saar	LUA	Einöd	1373130	Schwarzbach	1152	1960
Saar	LUA	Reinheim	1062220	Blies	1798	1956
Saar	WSV	Sankt Arnual	26400220	Saar	3945	1993
Saar	LUA	Eppelborn	1341120	Ill	120	1959
Saar	LUA	Lebach	1332220	Theel	207	1958
Saar	LUA	Nalbach	1092220	Prims	712	1959
Saar	DREAL	Varize	A9862010	Deutsche Nied	364	1969
Saar	DREAL	Filstroff-Bouzonville	A9942020	Nied	1170	1964
Saar	WSV	Fremersdorf	26400550	Saar	6983	1952
Saar	RLP	Saarburg 2	26490609	Leuk	76	1962
Untere Mosel	WSV	Trier	26500100	Mosel	23857	1930
Untere Mosel	RLP	Hentern	26560103	Ruwer	102	1972
Untere Mosel	RLP	Densborn 2	26600707	Kyll	472	1972
Untere Mosel	RLP	Kordel	26600900	Kyll	819	1967
Untere Mosel	RLP	Papiermühle	26760306	Dhron	170	1955
Untere Mosel	RLP	Platten 2	26780609	Lieser	378	1972
Untere Mosel	WSV	Cochem	26900400	Mosel	27088	1900
Untere Mosel	RLP	Burgen 2	26980700	Baybach	106	1972

Größenklasse		Dekade des Beginns der Abflussmessreihe	
]0 - 150]]450 - 1000]	[1900 - 1960]	[1981 - 1990]
]150 - 300]]1000 - ∞[[1961 - 1970]	[1991 - 2000]
]300 - 450]		[1971 - 1980]	[2001 - 2010]



Karte 1: Niedrigwassermessnetz

Wenn man sich ansieht, wie sich das Netz entwickelt hat, stellt man eine starke Verdichtung zwischen 1960 und 1980 fest; in dieser Zeit hat sich die Anzahl der Messstellen verdreifacht (von 15 auf 45), und es wurden doppelt so viele Messstellen eingerichtet wie in den 30 Jahren danach (14 von 1981-2010) (Abbildung 2).

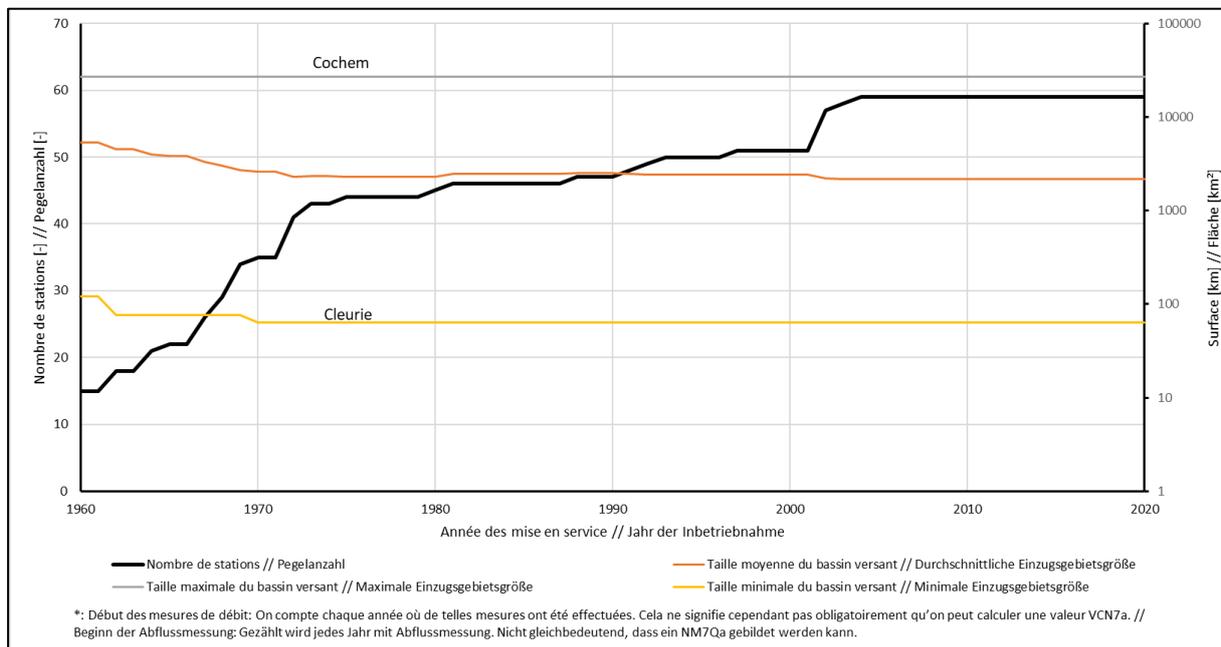


Abbildung 2: Entwicklung der Pegelanzahl (1960-2020) im Niedrigwasserbeobachtungsnetz der IKSMS

Auch lässt sich beobachten, dass $\frac{3}{4}$ der Messstellen des Beobachtungsnetzes von vor 1975 stammen, sodass ausreichend Vorlauf zur Erstellung von Zeitreihen vorhanden ist, insbesondere seit 2000, dem Jahr des Inkrafttretens der Wasserrahmenrichtlinie (WRRL) (Abbildung 3 & Tabelle 2).

In jüngster Zeit am stärksten entwickelt hat sich das Einzugsgebiet der Sauer, wo die Hälfte der Messstellen (6 von 12) im Jahr 2002 am Flussoberlauf, d. h. oberhalb des Zusammenflusses mit dem größten Nebenfluss, der Our, in Betrieb genommen wurde. Die übrigen Messstellen stammen von vor 1975, mit Ausnahme der Messstelle Ouren, die 1991 an der belgisch-deutsch-luxemburgischen Grenze eingerichtet wurde.

Die beständigsten Einzugsgebiete hingegen sind:

- das der unteren Mosel, wo alle Messstellen seit 1972 bestehen,
- das der Saar, wo nur 2 der 17 Messstellen nach 1970 eingerichtet wurden.

Beim Einzugsgebiet der oberen Mosel handelt es sich insofern um ein „Zwischeneinzugsgebiet“, als $\frac{2}{3}$ der Messstellen hier vor 1970 und $\frac{3}{4}$ aller Messstellen (16 von 22, also 72 %) vor 1973 installiert wurden. Die Messstelle Uckange am Auslass des Einzugsgebietes wurde allerdings erst 1981 errichtet, um den Einfluss der Orne mit zu erfassen.

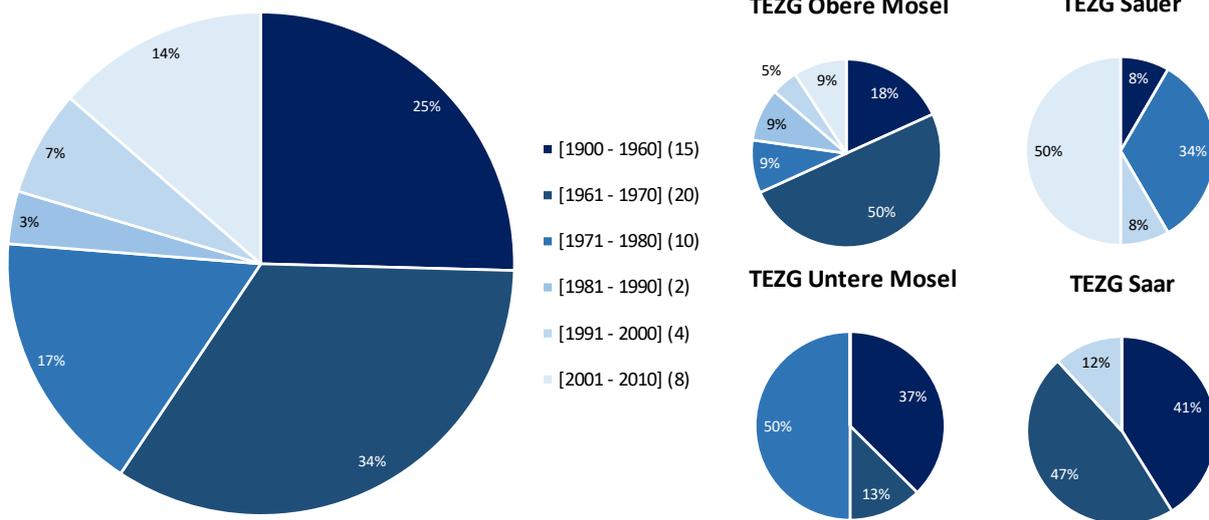


Abbildung 3: Verteilung der Stationen im internationalen Einzugsgebiet Mosel-Saar nach dem Jahr der Inbetriebnahme

Betrachtet man die Verteilung der Messstellen im gesamten internationalen Mosel-Saar-Einzugsgebiet, so zeigt sich, dass die meisten Messstellen Einzugsgebiete von über 450 km² aufweisen (53 %), in den übrigen drei Größenklassen ist die Verteilung der Messstellen ausgewogen (15-17 %). In den vier hydrologischen Einheiten ist diese Verteilung allerdings zum Teil anders, nämlich (Abbildung 4):

- An der Oberen Mosel haben mehr als 2/3 der Messstellen Einzugsgebiete über 450 km² (68 %), fast die meisten sogar über 1000 km² (45 %).
- An der Sauer haben die meisten Messstellen ein Einzugsgebiet zwischen 150 und 450 km² (58 %).
- An der Saar kommt die Verteilung der des internationalen Gesamteinzugsgebietes am nächsten: hier haben die meisten Messstellen Einzugsgebiete über 450 km² (53 %), und die Verteilung in den drei übrigen Größenklassen ist ausgewogen (12-18 %).
- An der Unteren Mosel sind die Messstellen mit einem Einzugsgebiet kleiner 300 km² und die der übrigen drei Größenklassen gleich verteilt (je 25 %).

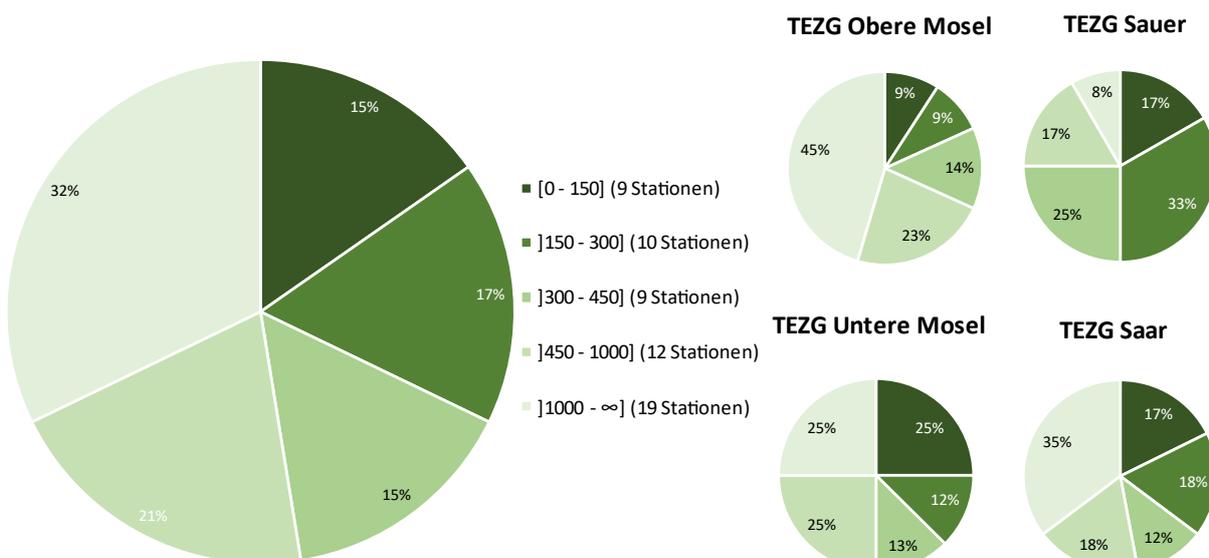


Abbildung 4: Verteilung der Stationen im internationalen Einzugsgebiet Mosel-Saar nach Größenklassen der Einzugsgebiete in km²

3 Niedrigwasser-Klassifizierung

3.1 Bewertungsmethode auf Pegel-Ebene

Das IKSMS-Niedrigwassermonitoring beruht auf dem gleitenden Mittelwert der Tagesabflüsse über 7 aufeinanderfolgende Tage (M7Q), der rückwirkend für alle Tage des Kalenderjahres berechnet wird, also vom 01.01.-31.12. (Beispiel in Abbildung 5).

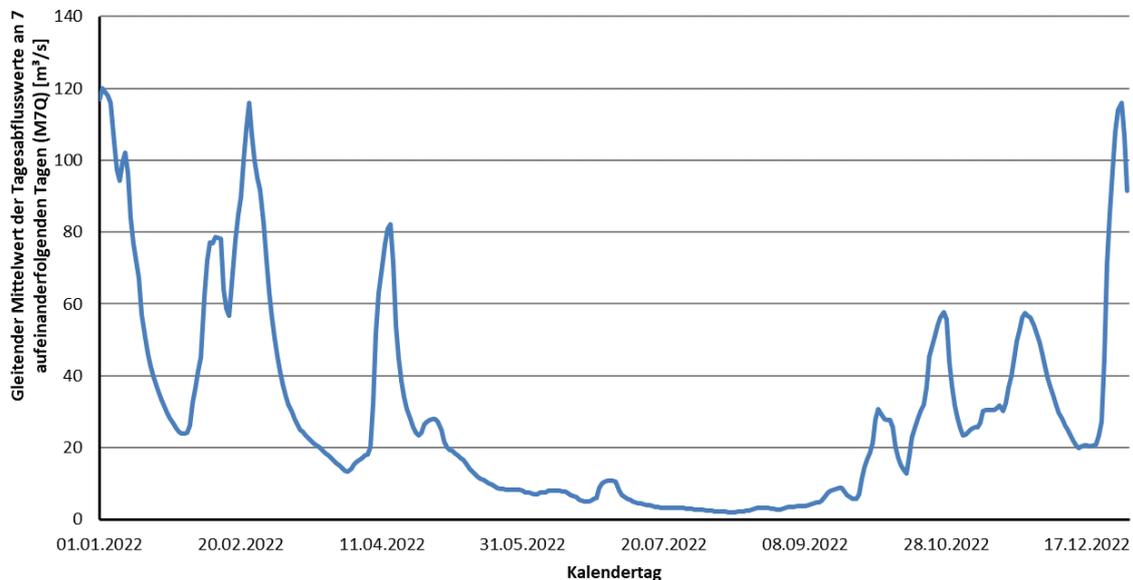


Abbildung 5: M7Q-Ganglinie am Pegel Epinal 2022

Für jede Messstelle und jedes Kalenderjahr⁴ seit Inbetriebnahme bis einschließlich 2020 wurde der Minimalwert ermittelt (NM7Q_{jahr}) (Beispiel in Abbildung 6).

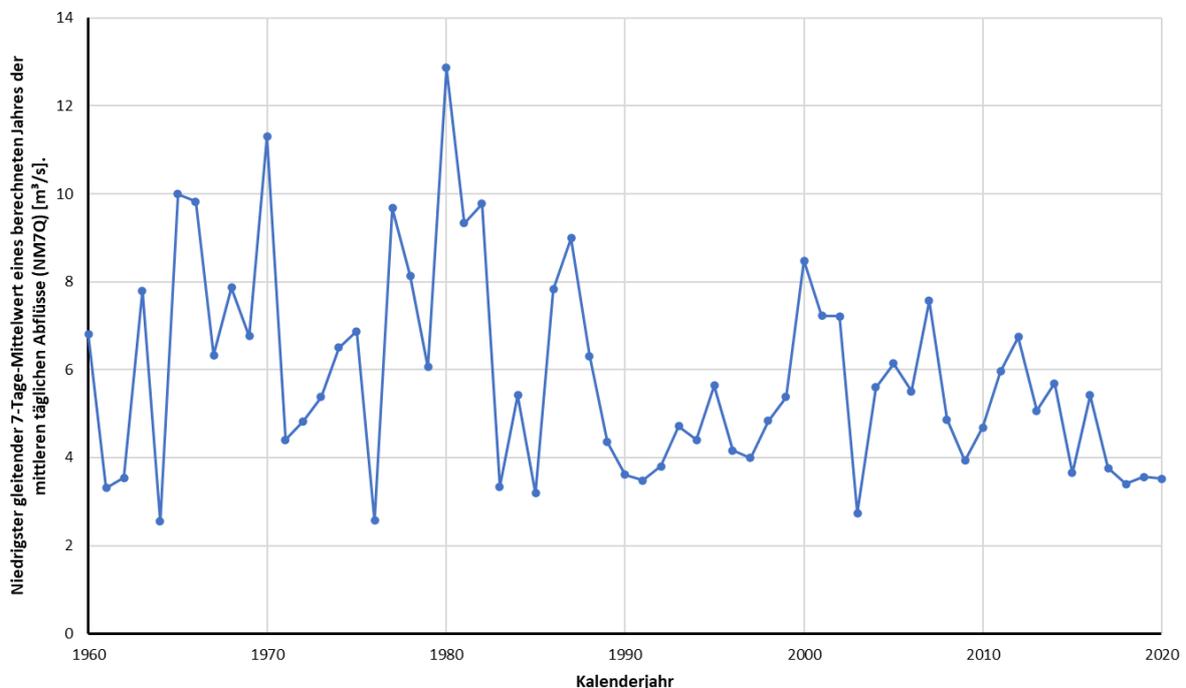


Abbildung 6: Ganglinie des jährlichen NM7Q am Pegel Epinal (1960-2020)

⁴Hinweis: dieselbe jährliche Klassifizierung erhält man, wenn man den niedrigsten Wert der wöchentlichen NM7Q aus der IKSMS-Online-Datenbank des gemeinsamen Niedrigwassermonitorings zugrunde legt (<http://www.iksms-cipms.org/servlet/is/2000120/>)

Ausgehend von den Jahreswerten wurden dann die Werte berechnet, die den Wiederkehrintervallen 2, 5, 10, 20 und 50 Jahren zugeordnet sind, um eine sechsstufige Niedrigwasser-Klassifizierung zu erhalten (Abbildung 7).

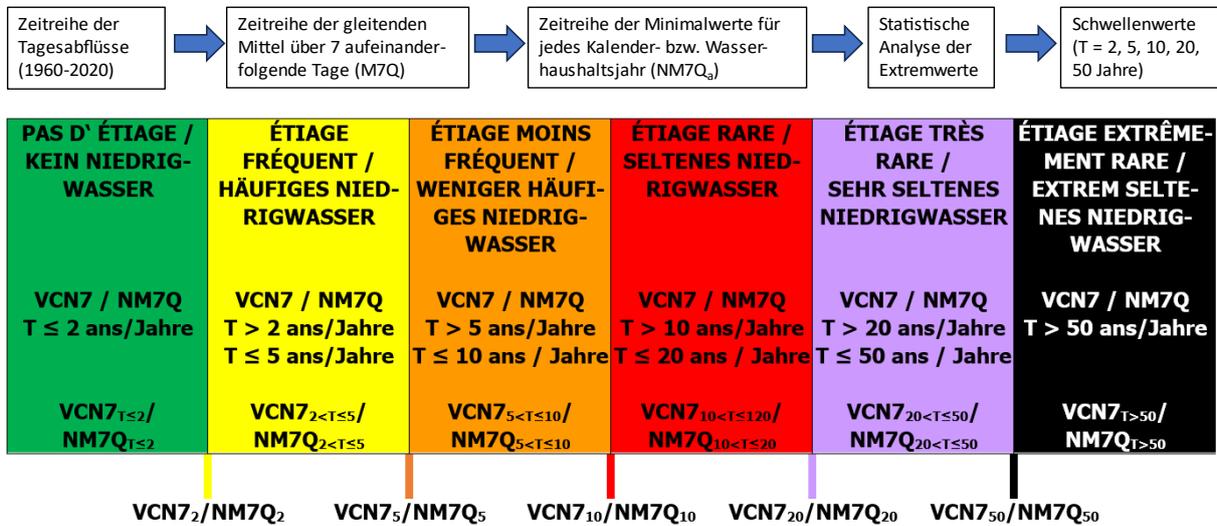


Abbildung 7: Verfahren zur Entwicklung der sechsstufigen Niedrigwasser-Klassifizierung

Klassifiziert wurde die Jahresniedrigwasserlage an einer Messstelle des Beobachtungsnetzes durch Vergleich eines jeden Jahreswertes (Kalenderjahr bzw. im Falle der vom LfU betriebenen Pegel in Rheinland-Pfalz, das Wasserhaushaltsjahr (April bis März)) mit dem entsprechenden Schwellenwert (Tabelle 11, Beispiel in Abbildung 8).

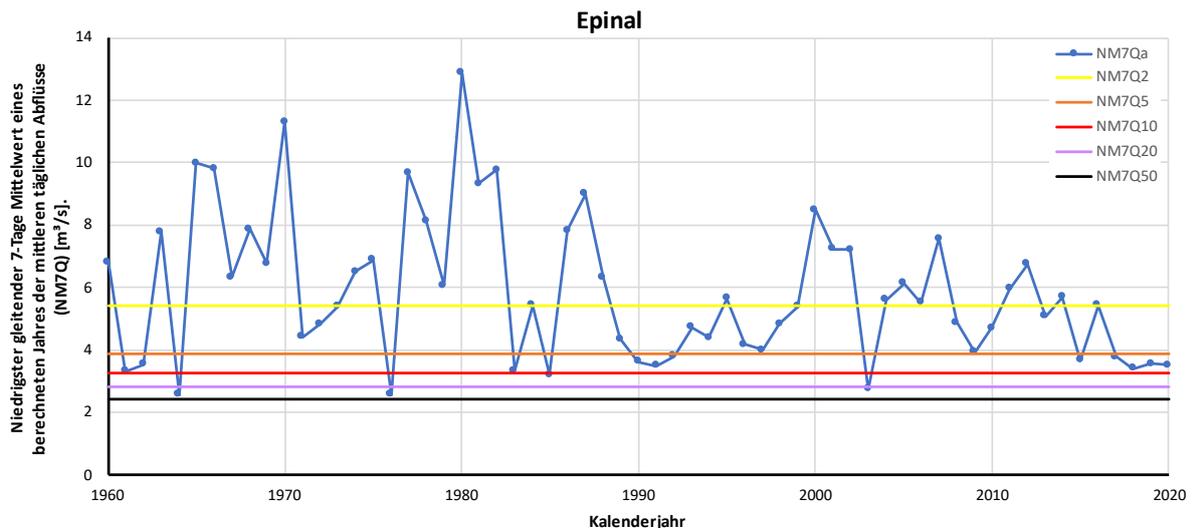
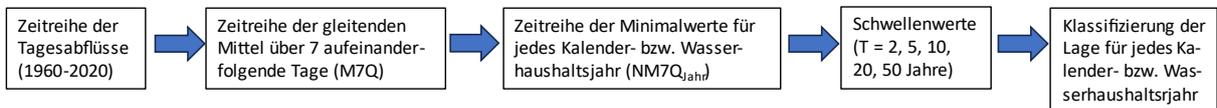


Abbildung 8: Ganglinie des jährlichen NM7Q am Pegel Epinal (1960-2020) mit Schwellenwerten

In der u. s. zusammenfassenden Tabelle 3 sind die Jahresergebnisse der Bewertung für jede Abflussmessstelle angegeben.

Es lässt sich leicht feststellen, dass nicht alle Messstellen eines Teileinzugsgebiets in einem gegebenen Jahr in dieselbe Kategorie eingestuft werden. Auf der Grundlage dieses Farbenpatchworks ist diese Frage deshalb schwer zu beantworten, was uns dazu veranlasst hat, nach einem Verfahren zur Aggregation der Ergebnisse zu suchen.

3.2 Bewertungsmethode auf Teileinzugsgebiets-Ebene

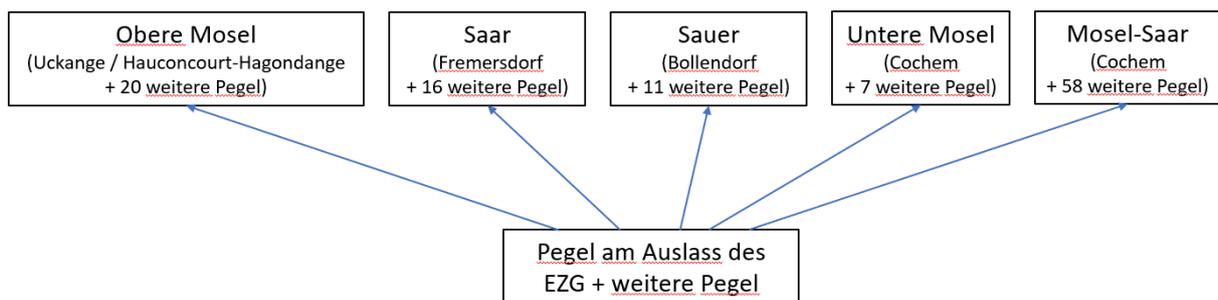
Damit die Vorgehensweise auf allen Arbeitsebenen kohärent und verständlich ist (von der elementaren Untersuchungsebene an jeder Messtelle bis hin zum höchsten Aggregationsniveau für das gesamte internationale Mosel-Saar-Einzugsgebiet), hat die Expertengruppe beschlossen, dieselbe Klassifizierung der Niedrigwasserlage in 6 Kategorien beizubehalten.

Zur Aggregation der an den einzelnen Messstellen erhaltenen Bewertung musste jedoch ein Verfahren gefunden werden, um zu einer Gesamtbewertung auf Ebene des internationalen Mosel-Saar-Einzugsgebiets und jedes Teileinzugsgebietes (Obere Mosel, Saar, Sauer, Untere Mosel) zu gelangen.

Das vorgeschlagene Verfahren beruht ebenfalls auf einem Bottom-up-Ansatz, der für alle Arbeiten der IKSMS richtungsgebend ist, und es berücksichtigt die Besonderheiten des Wasserhaushalts eines jeden der drei Hauptgewässer des internationalen Einzugsgebiets: Mosel, Saar und Sauer.

So erfolgt die Aggregation zunächst auf der Ebene der vier Teileinzugsgebiete Obere Mosel, Saar, Sauer und Untere Mosel, bevor eine Gesamtintegration auf der Ebene des gesamten internationalen Einzugsgebiets vorgenommen wird.

Beschreibung des Vorschlags des Aggregationsverfahrens:



Die Bewertung der Niedrigwasserlage resultiert aus der Kombination der Kategorie der Messtelle am Auslass⁵ mit derjenigen der übrigen Messstellen des Einzugsgebiets nach folgender Methodik:

- Jedes Teileinzugsgebiet erhält zunächst eine Mindesteinstufung N auf der Grundlage der Wiederkehrintervalls des NM7Q, der für das betreffende Jahr am Auslasspegel⁶ beobachtet wurde, da die dort beobachtete Situation es ermöglicht, die flussabwärts gelegenen Staaten, Regionen und Länder vor künftigen Schwierigkeiten zu warnen. Diese 1. Mindesteinstufung wird in Form des Zahlenwerts des überschrittenen Wiederkehrintervalls (N = 1, 2, 5, 10, 20 oder 50 Jahre) und der zugehörigen Farbe (grün, gelb, orange, rot, violett und schwarz) ausgedrückt.

⁵ Im besonderen Fall der oberen Mosel waren wir gezwungen, die Messtelle Hauconcourt-Hagondange als Auslasspegel festzulegen, denn die Messtelle Uckange wurde erst 1981 gebaut.

⁶ vgl. Pegel S1 in der erläuternden Abbildung 8

- Die Mindesteinstufung jedes Teileinzugsgebiets wird dann entsprechend der Einstufung der flussaufwärts gelegenen Pegel⁷ angepasst, indem die überwiegende Klasse in Bezug auf die kumulierte Fläche betrachtet wird. Dabei können drei Fälle auftreten:
 - Die Mehrheitseinstufung ist höher als die Mindesteinstufung N des Auslasspegels: Die endgültige Bewertung wird auf N+1 verschlechtert, ebenso wie der zugehörige Farbcode. Der endgültigen Bewertung N+1 wird ein Minuszeichen (-) angefügt, um anzuzeigen, dass die Situation flussaufwärts schlimmer war als am Auslass des Teileinzugsgebiets.
 - Die Mehrheitseinstufung entspricht der Mindesteinstufung N des Auslasspegels: Die endgültige Bewertung wird dann bei N belassen, ebenso wie der zugehörige Farbcode. Der Endbewertung N wird ein Pluszeichen (+) angefügt, um anzuzeigen, dass die Situation flussaufwärts dieselbe war wie am Auslass des Teileinzugsgebiets.
 - Die Mehrheitseinstufung ist niedriger als die Mindesteinstufung N des Auslasspegels: Die endgültige Bewertung wird bei N belassen, ebenso wie der zugehörige Farbcode. Das Fehlen eines Plus- oder Minuszeichens nach dieser Bewertung lässt darauf schließen, dass die Situation flussaufwärts günstiger war als am Auslass des Teileinzugsgebiets.

Abbildung 9 stellt den Algorithmus dar, der bei der Einstufungsmethode verwendet wird.

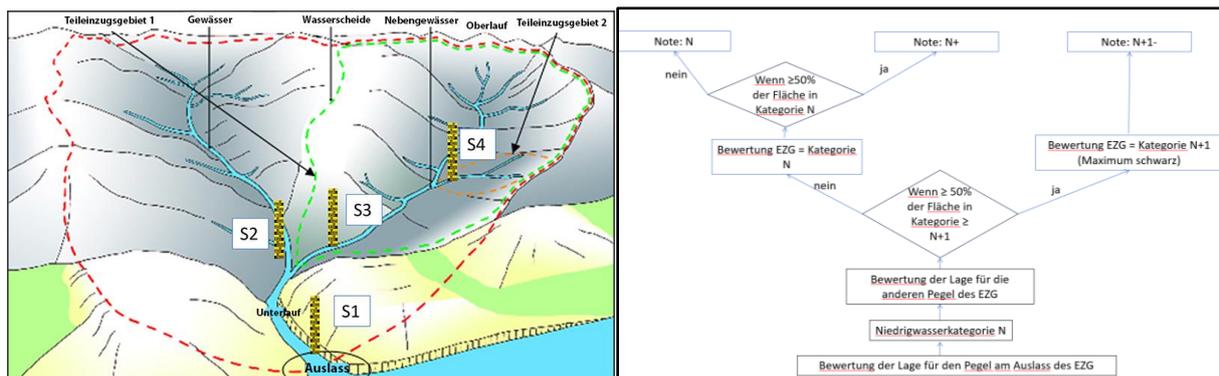


Abbildung 9: Schema der auslassbezogenen Aggregationsmethode auf Ebene der Teileinzugsgebiete und des Gesamteinzugsgebiets

⁷ vgl. Pegel S2, S3 und S4 in der erläuternden Abbildung 8

Die folgende Tabelle 4 zeigt beispielhaft die Ergebnisse der Anwendung der Methode für das Jahr 2016.

Tabelle 4: Detaillierte Schritte und Ergebnisse der Aggregationsmethode für das Jahr 2016

Teileinzugsgebiet Obere Mosel					Teileinzugsgebiet Sauer				
Auslasspegel	Gewässer	Fläche des Einzugsgebiets [km ²]	Jahr	Wiederkehrintervallklasse [a]	Auslasspegel	Gewässer	Fläche des Einzugsgebiets [km ²]	Jahr	Wiederkehrintervallklasse [a]
Uckange	Mosel	10770	2016	1	Bollendorf 2	Sauer	3221,8	2016	2
⇒ Minimalnote = 1					⇒ Minimalnote = 2				

Wiederkehrintervallklasse [a]	Kumulierte Fläche [km ²]	Anteil
1	10130	28,3 %
2	15712	43,9 %
5	9422	26,3 %
10	152	0,4 %
20	300	0,8 %
50	75,8	0,2 %

Klasse N+1 = 2
 Anteil Klasse ≥ N+1 = 71,7 %
 Anteil Klasse N = ohne Belang
 ⇒ endgültige Bewertung = 2-

Wiederkehrintervallklasse [a]	Kumulierte Fläche [km ²]	Anteil
1	583,8	16,8 %
2	2899,2	83,2 %
5	0	0,0 %
10	0	0,0 %
20	0	0,0 %
50	0	0,0 %

Klasse N+1 = 5
 Anteil Klasse ≥ N+1 = 0,0 %
 Anteil Klasse N = 83,2 %
 ⇒ endgültige Bewertung = 2+

Teileinzugsgebiet Saar					Teileinzugsgebiet Untere Mosel				
Auslasspegel	Gewässer	Fläche des Einzugsgebiets [km ²]	Jahr	Wiederkehrintervallklasse [a]	Auslasspegel	Gewässer	Fläche des Einzugsgebiets [km ²]	Jahr	Wiederkehrintervallklasse [a]
Fremersdorf	Saar	6983	2016	5	Cochem	Mosel	27088		2
⇒ Minimalnote = 5					⇒ Minimalnote = 2				

Wiederkehrintervallklasse [a]	Kumulierte Fläche [km ²]	Anteil
1	11791,47	93,6 %
2	604,6	4,8 %
5	207,2	1,6 %
10	0	0,0 %
20	0	0,0 %
50	0	0,0 %

Klasse N+1 = 10
 Anteil Klasse ≥ N+1 = 0,0 %
 Anteil Klasse N = 1,6 %
 ⇒ endgültige Bewertung = 5

Wiederkehrintervallklasse [a]	Kumulierte Fläche [km ²]	Anteil
1	1302,07	5,0 %
2	24600,35	95,0 %
5	0	0,0 %
10	0	0,0 %
20	0	0,0 %
50	0	0,0 %

Klasse N+1 = 5
 Anteil Klasse ≥ N+1 = 0,0 %
 Anteil Klasse N = 95,0 %
 ⇒ endgültige Bewertung = 2+

Tabelle 5 zeigt die Ergebnisse für das internationale Mosel-Saar-Einzugsgebiet und seine 4 Teileinzugsgebiete.

Tabelle 5: Jährliche Gesamtbewertung für das internationale Moseleinzugsgebiet und seine 4 Teileinzugsgebiete

Teileinzugsgebiet	Aggregierte Wiederkehrintervallklasse [a]																																																												
	jährlicher NM7Q																																																												
	1960	1961	1962	1963	1964	1965	1966	1967	1968	1969	1970	1971	1972	1973	1974	1975	1976	1977	1978	1979	1980	1981	1982	1983	1984	1985	1986	1987	1988	1989	1990	1991	1992	1993	1994	1995	1996	1997	1998	1999	2000	2001	2002	2003	2004	2005	2006	2007	2008	2009	2010	2011	2012	2013	2014	2015	2016	2017	2018	2019	2020
Obere Mosel	1+	2-	5	2-	20	1+	1+	1+	1+	1+	1+	10	2+	5+	10-	1+	50-	1+	1+	1+	1+	1+	2-	1+	2+	1+	1+	1+	2-	2+	10-	2+	1+	1+	1+	2+	2	2+	1+	1+	2+	1+	1+	2-	1+	1+	2	2	1+	2	1+	5	5-	2-	5-	5+	20	50			
Sauer	1	1	1	10	50	1	1	2	1	1	2	2	1	5+	1+	20	50	2	2	2	1+	1+	2	2-	1+	2	2	1+	1+	1+	2+	2+	2	2+	2	1+	2+	2-	2-	2-	1+	1+	2	2-	1+	2+	1+	1+	1+	2-	10	1+	1+	2+	2+	2+	5	5+	5+	10-	
Saar	2-	1+	2-	5-	5-	1+	1+	1+	1+	1+	1+	5+	5	50	5	2+	5+	2-	1+	1+	1+	1+	1+	1+	1+	1+	1+	1+	2-	2+	5+	2+	5-	1+	1+	2+	2	2	2	1+	1+	1+	5	2+	2+	10	1+	2	2+	2	5	5	2	2+	2+	5	20	5	50	10	
Untere Mosel	1+	1+	2+	50-	1+	1+	1+	1+	1+	1+	1+	5+	2+	10+	10-	5+	50-	2	1+	1+	1+	1+	1+	1+	1+	2-	1+	1+	1+	2-	5-	10-	5-	2-	2+	1+	5+	5-	5-	2+	1+	1+	1+	10-	2-	2+	2+	1+	1+	2+	2+	10	5	2	5	5	2+	10	5-	5-	20
Mosel-Saar	1+	1+	2+	50	2-	1+	1+	1+	1+	1+	1+	5+	2+	10+	5+	5	50-	2	1+	1+	1+	1+	1+	1+	1+	2-	1+	1+	1+	2-	2+	10-	2+	2-	2	1+	5	2+	2+	2	1+	1+	1+	5	2-	2+	2+	1+	1+	2+	2+	10	5	2	5	5	2+	10	5-	5-	20

4 Niedrigwasser-Bezugsjahre im Zeitraum von 1960 bis 2020

4.1 Welches Jahr ist in Bezug auf Niedrigwasser das kritischste Jahr?

Häufig wird bei Niedrigwasser die Frage aufgeworfen, wie die Schwere der Lage eines gegebenen Jahres an einer Messstelle oder in einem Einzugsgebiet eingestuft werden kann.

Um diese Frage zu beantworten, wurden für jede Messstelle 3 Kriterien betrachtet:

- den kleinsten jährlichen NM7Q-Wert mit der entsprechenden Niedrigwasserkategorie,
- die Dauer des Niedrigwassers,
- das Abflussdefizit.

4.1.1 Untersuchung anhand des kleinsten $NM7Q_{\text{Jahr}}$ (NN7Q)⁸

Angaben zum $NM7Q_{\text{Jahr}}$ können herangezogen werden und sind bereits in das IKSMS-Internet-Tool⁹ zur Darstellung der Niedrigwasserergebnisse integriert. Wir haben also den kleinsten jährlichen NM7Q seit Inbetriebnahme jeder einzelnen Messstelle betrachtet. (NN7Q)

Wenn man dieses Kriterium zugrunde legt, ist 1976 das häufigste Jahr (13 Messstellen, das sind 30 % der nach 1971 in Betrieb genommenen Messstellen) (Abbildung 10). Weitere Jahre sind 1964 (4 Messstellen), 2020 (11 Messstellen, darunter eine aus dem Jahr 1992 und drei aus dem Jahr 2001) und 2019 (4 Messstellen, darunter eine, die nach 2001 in Betrieb genommen wurden) sowie 2003 (4 Messstellen).

⁸ NN7Q: kleinster je ermittelter NM7Q aus der Zeitreihe der jährlichen NM7Q der Abflusszeitreihe einer Pegelstation.

⁹Das Datenbanktool der IKSMS verfolgt den Zweck, die Ergebnisse des wöchentlichen gemeinsamen Monitorings zu archivieren. Die dort gespeicherten Informationen sind also Daten, die für jede Kalenderwoche berechnet werden. Den $NM7Q_{\text{Jahr}}$ erhält man, indem man für jedes Kalenderjahr den Minimalwert des wöchentlich berechneten NM7Q ($NM7Q_{\text{Woche}}$) nimmt, also: $NM7Q_{\text{Jahr}} = \text{Min}(NM7Q_{\text{Woche}})$. Die Dauer wird also anhand der Wochenzahl berechnet.

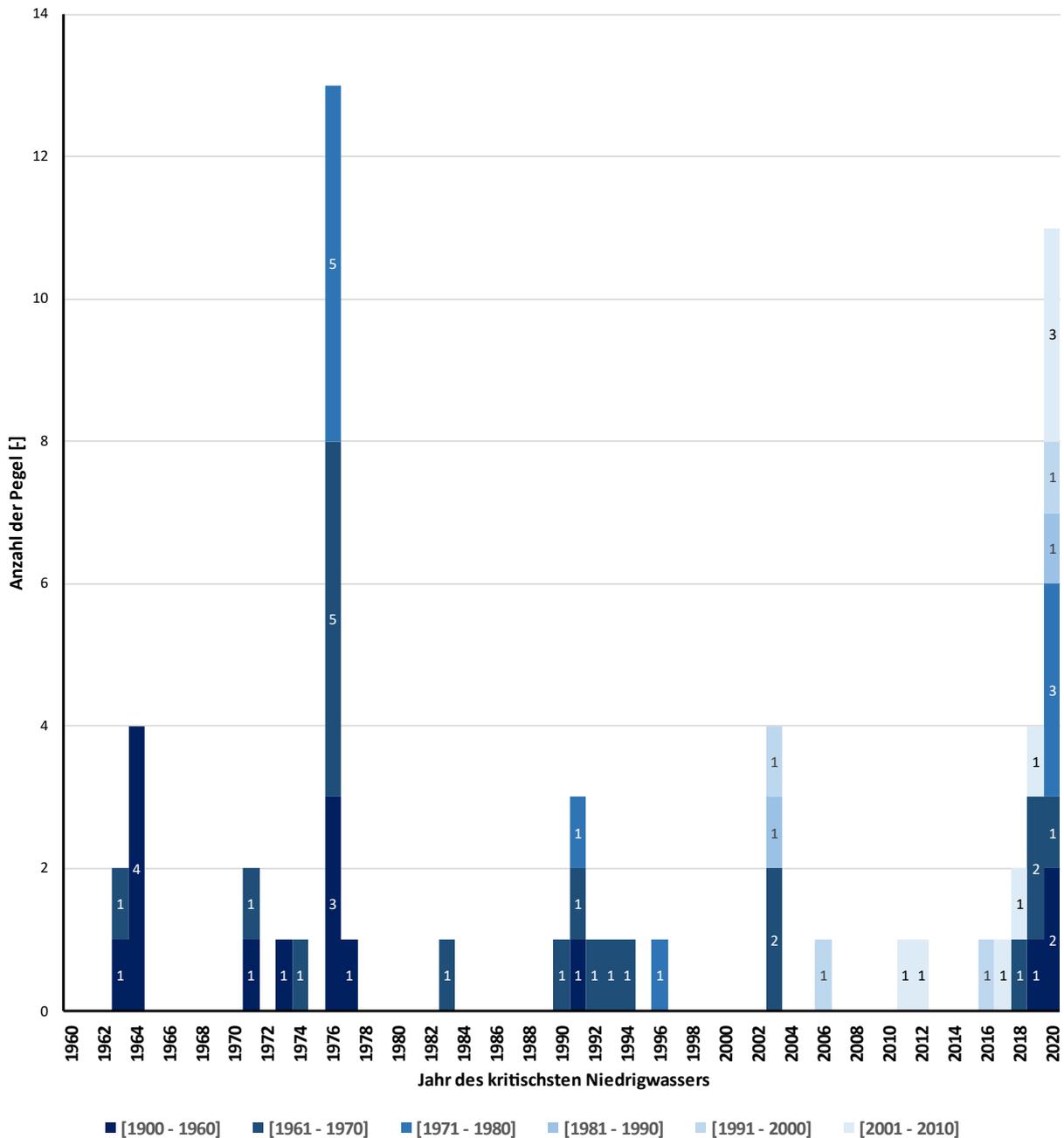


Abbildung 10: Jährliche Anzahl von Pegeln, die das Kriterium des niedrigsten jährlichen NM7Q (NN7Q) erfüllen (1960-2020), mit Verteilung der jährlichen Anzahl nach Altersklassen

Festzustellen ist, dass 63 % der Messstellen bereits die Kategorie „extrem seltenes Niedrigwasser“ erreicht haben (Abbildung 11a). Schließt man die nach 2000 in Betrieb genommenen acht Messstellen sowie die zu viele Fehlwerte aufweisende Messstelle Boncourt¹⁰ aus, liegt dieser Wert bei 72 %, und er erreicht 100 %, wenn man zusätzlich noch die nach 1990 eingerichteten Messstellen unberücksichtigt lässt. 29 % haben schon die Kategorie „sehr seltenes Niedrigwasser“ erreicht und 7 % die Kategorie „seltenes Niedrigwasser“. An einer Messstelle wurde die Kategorie „weniger häufiges Niedrigwasser“ noch nie unterschritten.

¹⁰Die 1960 in Betrieb genommene Messstelle Boncourt wurde von der Analyse ausgenommen, da dieser Parameter hier mangels ausreichender Abflussdaten für 18 Jahre des Zeitraums 1960-2020 (das sind 30 % der Zeit) nicht berechnet werden konnte.

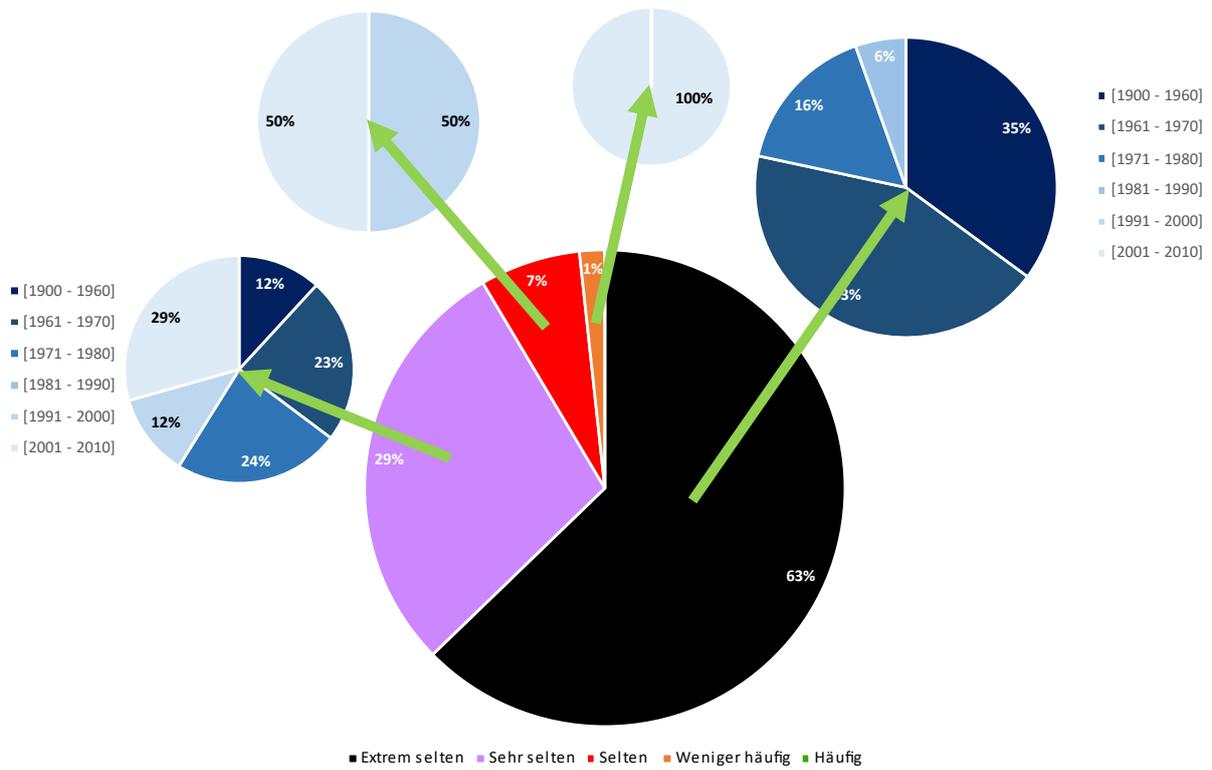


Abbildung 11a: Verteilung der Pegel nach maximal erreichter Niedrigwasserkategorie zwischen 1960 und 2020 und für jede Kategorie nach Altersklassen

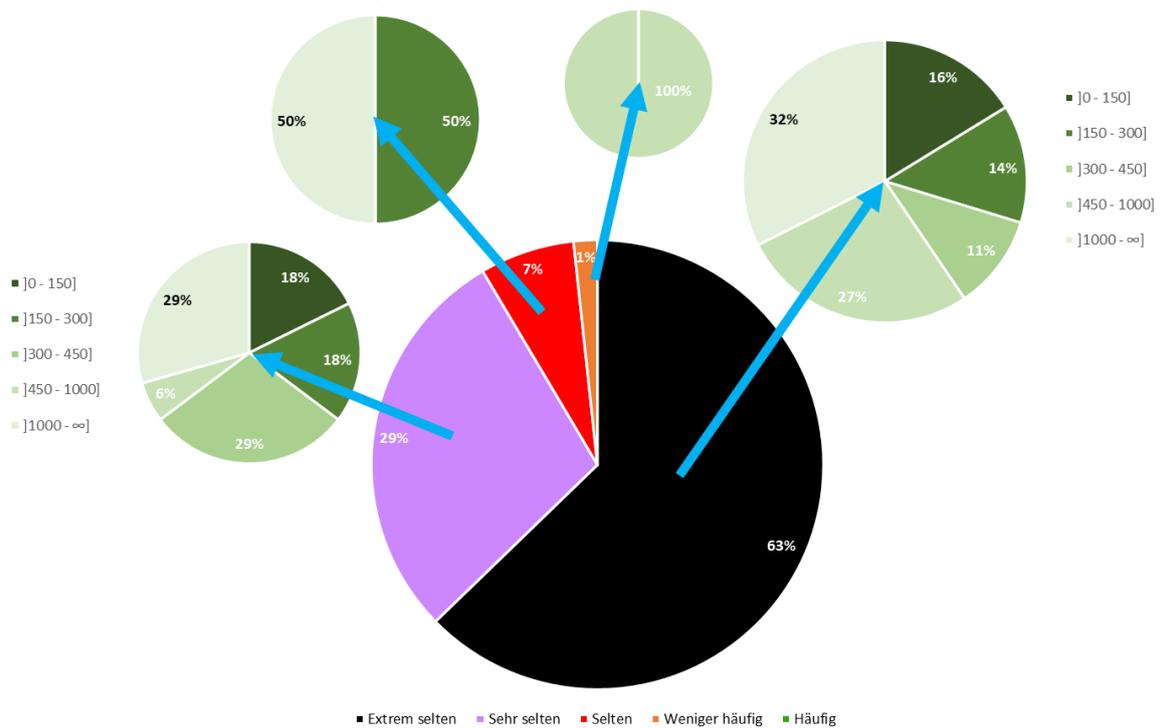


Abbildung 11b: Verteilung der Pegel nach maximal erreichter Niedrigwasserkategorie zwischen 1960 und 2020 und für jede Kategorie nach Größenklassen der Einzugsgebiete

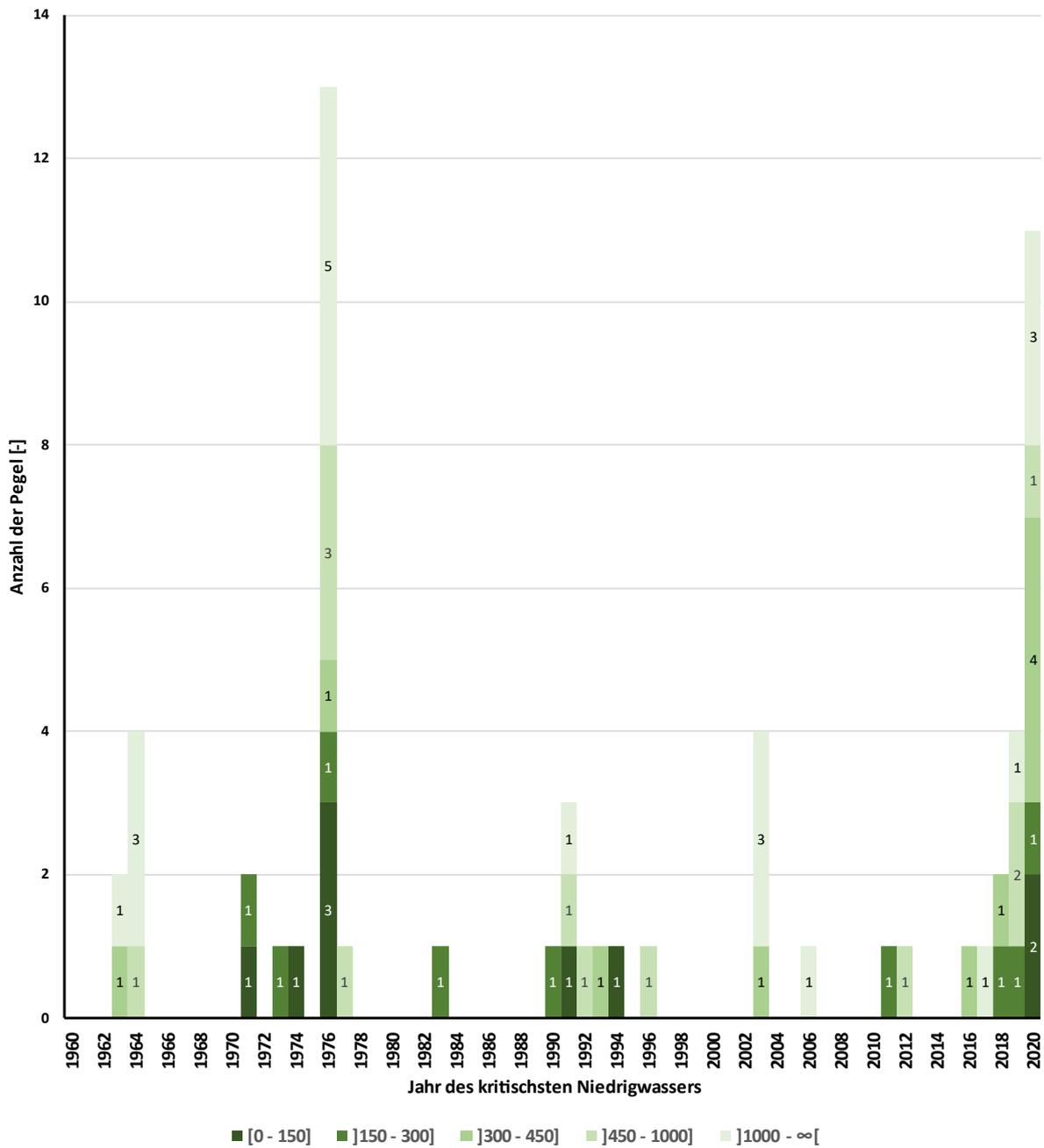


Abbildung 12: Jährliche Anzahl von Pegeln, die das Kriterium des niedrigsten jährlichen NM7Q (NN7Q) erfüllen (1960-2020), mit Verteilung der jährlichen Anzahl nach Größenklassen

Tabelle 6: Jahr des kritischsten Niedrigwassers an jedem Pegel (1960-2020) nach dem Kriterium des jährlichen NM7Q

Teileinzugsgebiet	Name der Station (Gewässer)	Fläche des Einzugsgebiets [km²]	Jahr der Inbetriebnahme [a]	Anteil der Jahre mit Lücken [%]	Jahr [a] mit zugeordnetem NN7Q-Wert [m³/s]
Obere Mosel	Rupt sur Moselle (Mosel)	152	1968	7,5	1983 (0,196)
	Cleurie (Cleurie)	63	1970	7,8	2020 (0,165)
	Epinal (Mosel)	1217	1960	0,0	1964 (2,55)
	Tonnoy (Mosel)	1976	1980	9,8	2020 (2,42)
	Mirecourt (Madon)	381	1965	1,8	2018 (0,320)
	Pulligny (Madon)	943	1964	1,8	2019 (0,475)
	Pont-Saint-Vincent (Mosel)	3070	1988	6,1	2003 (2,37)
	Toul (Mosel)	3338	1960	0,0	1991 (1,89)
	Saint-Dié (Meurthe)	374	1967	1,9	2003 (0,427)
	Lunéville (Vezouze)	559	1969	1,9	2019 (0,394)
	Roville (Mortagne)	300	1992	6,9	2016 (0,275)
	Gerbéville (Mortagne)	493	1969	0,0	1991 (0,419)
	Damelevières (Meurthe)	2280	1969	5,8	1976 (2,96)
	Custines (Mosel)	6830	1973	2,1	1976 (6,11)
	Chambrey (Seille)	560	2003	0,0	2012 (0,534)
	Nomény (Seille)	925	1969	1,9	1976 (0,427)
	Metz (Seille)	1280	1964	5,3	1976 (0,551)
	Hauconcourt-Hagondange (Mosel)	9422	1960	3,3	1976 (8,62)
	Boncourt (Orne)	412	1960	21,3	2020 (0,008)
	Briey (Woigot)	76	1967	3,7	1994 (0,004)
Moyeuivre-Grande (Orne)	1141	2004	0,0	2017 (0,124)	
Uckange (Mosel)	10770	1981	0,0	2020 (10,8)	
Sauer	Martelange (Sauer)	209	1975	23,9	2020 (0,004)
	Bigonville (Sauer)	308	2001	5,0	2020 (0,010)
	Hesperange (Alzette)	292	2001	5,0	2011 (0,398)
	Kautenbach (Wiltz)	428	2001	5,0	2020 (0,159)
	Hunnebour (Eisch)	164	2001	5,0	2018 (0,411)
	Schoenfels (Mamer)	84	2001	5,0	2020 (0,192)
	Bissen (Attert)	292	2001	5,0	2019 (0,567)
	Ouren (Our)	382	1992	3,3	2020 (0,116)
	Gemünd Our (Our)	611	1972	2,0	2020 (0,103)
	Prümzurlay (Prüm)	576	1972	2,0	1976 (0,289)
	Seffern (Nims)	137	1973	2,1	1976 (0,250)
	Bollendorf 2 (Sauer)	3222	1958	0,0	1964 (2,81)
	Saar	Hermelange (Saar)	186	1968	22,6
Keskastel (Saar)		879	1967	11,1	1992 (0,469)
Oermingen (Eichel)		277	1968	7,5	1990 (0,024)
Wittring (Saar)		1716	1997	12,5	2003 (1,94)
Hangard (Oster)		112	1962	3,4	1976 (0,060)
Contwig (Schwarzbach)		529	1952	0,0	1964 (0,898)
Althornbach 2 (Hornbach)		425	1962	1,7	1963 (1,18)
Einöd (Schwarzbach)		1152	1960	1,6	2020 (3,17)
Reinheim (Blies)		1798	1956	0,0	1964 (4,81)
Sankt Annual (Saar)		3945	1993	3,6	2006 (8,09)
Eppelborn (Ill)		120	1959	0,0	1971 (0,073)
Lebach (Theel)		207	1958	0,0	1976 (0,111)
Nalbach (Prims)		712	1959	0,0	1977 (0,639)
Varize (Deutsche Nied)		364	1969	3,8	1993 (0,132)
Filstroff-Bouzonville (Nied)		1170	1964	3,5	2003 (0,738)
Fremersdorf (Saar)		6983	1952	0,0	2019 (12,3)
Saarburg 2 (Leuk)		76	1962	5,1	1974 (0,128)
Untere Mosel		Trier (Mosel)	23857	1930	0,0
	Hentern (Ruwer)	102	1972	2,0	1991 (0,087)
	Densborn 2 (Kyll)	472	1972	2,0	1996 (0,864)
	Kordel (Kyll)	819	1967	1,9	1976 (1,70)
	Papiermühle (Dhron)	170	1955	0,0	1973 (0,063)
	Platten 2 (Lieser)	378	1972	2,0	1976 (0,210)
	Cochem (Mosel)	27088	1900	0,0	1976 (15,4)
	Burgen 2 (Baybach)	106	1972	2,0	1976 (0,012)

Größenklasse	Dekade des Beginns der Abflussmessreihe	Wiederkehrintervallklassen
[0 - 150]	[1900 - 1960]	[0 - 2]
[150 - 300]	[1961 - 1970]	[2 - 5]
[300 - 450]	[1971 - 1980]	[5 - 10]
	[1981 - 1990]	[10 - 20]
	[1991 - 2000]	[20 - 50]
	[2001 - 2010]	[50 - ∞[

Mit der beschriebenen Niedrigwasserklassifizierung kann die Frage der Bewertung der Schwere nur zum Teil beantwortet werden, da es damit nicht möglich ist, die Lage dann zu unterscheiden, wenn eine Messstelle oder ein Einzugsgebiet in mehreren Jahren in derselben Niedrigwasserkategorie bewertet wird.

So erscheint es beispielsweise an der Messstelle Trier offensichtlich schwierig, den 1963 und 1976 aufgetretenen Niedrigwasserereignissen die gleiche Schwere zuzuschreiben, denn die hier erreichte Maximalkategorie ist die eines „extrem seltenen Niedrigwassers“ (= Farbe Schwarz), aber die Gesamtdauer des Niedrigwassers war sehr unterschiedlich (vgl. Abbildung und Tabelle).

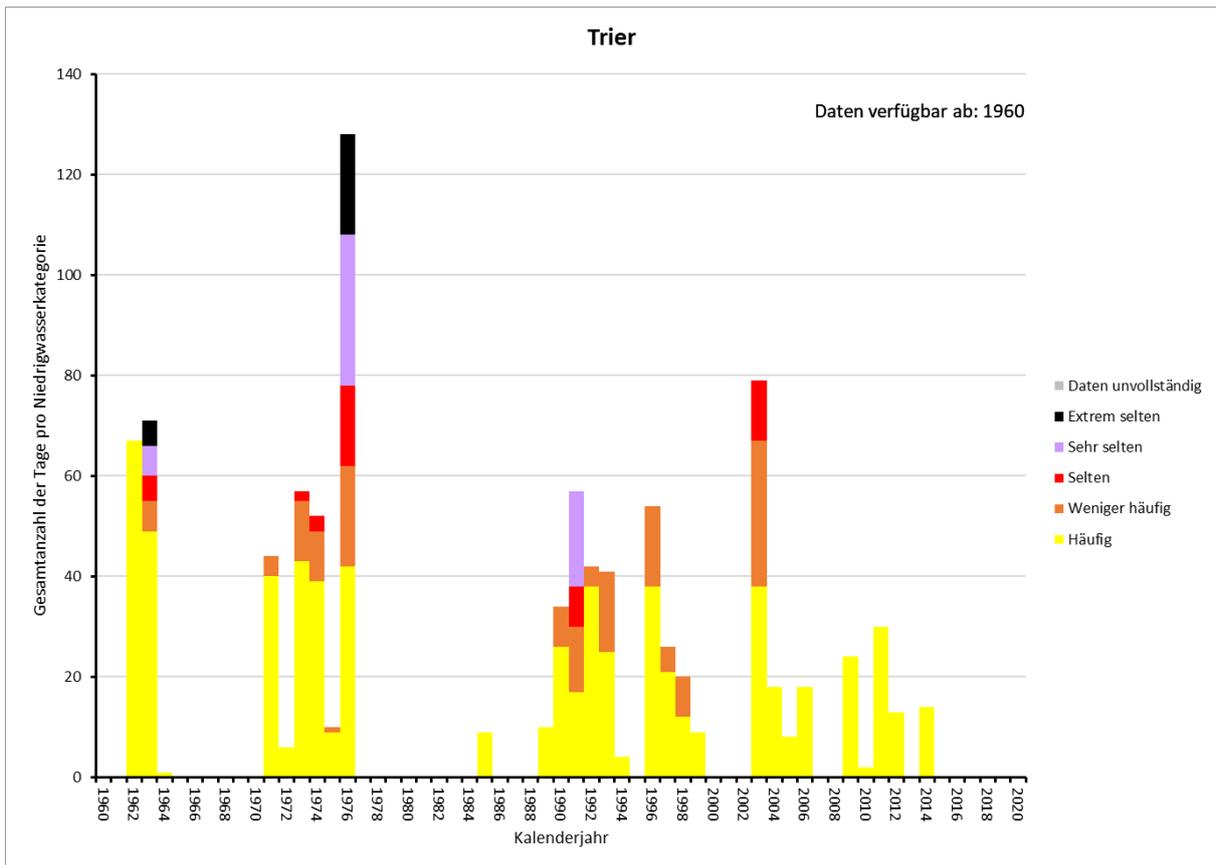


Abbildung 13: Dauer des Niedrigwassers in Tagen, Messstelle Trier

Tabelle 7: Übersicht der jährlichen NM7Q-Niedrigwasserkategorien sowie der Anzahl an Tagen in der maximalen Niedrigwasserkategorie und der Niedrigwassertage insgesamt, sortiert nach Niedrigwasserkategorie (Messstelle Trier)

Station Trier			
Jahr	Erreichte maximale Niedrigwasserkategorie	Anzahl der Tage in der maximalen Niedrigwasserkategorie	Gesamtanzahl der Niedrigwassertage
1963	Extrem selten	5	71
1976	Extrem selten	20	128
1991	Sehr selten	19	57
1973	Selten	2	57
1974	Selten	3	52
2003	Selten	12	79
1971	Weniger häufig	4	44
1975	Weniger häufig	1	10
1990	Weniger häufig	8	34
1992	Weniger häufig	4	42
1993	Weniger häufig	16	41
1996	Weniger häufig	16	54
1997	Weniger häufig	5	26
1998	Weniger häufig	8	20
1962	Häufig	67	67
1964	Häufig	1	1
1972	Häufig	6	6
1985	Häufig	9	9
1989	Häufig	10	10
1994	Häufig	4	4
1999	Häufig	9	9
2004	Häufig	18	18
2005	Häufig	8	8
2006	Häufig	18	18
2009	Häufig	24	24
2010	Häufig	2	2
2011	Häufig	30	30
2012	Häufig	13	13
2014	Häufig	14	14

Aus diesem Grund wurde diese erste Analyse um die Kriterien Niedrigwasser-Ereignisdauer und Volumendefizit ergänzt.

4.1.2 Untersuchung anhand der Dauer des Niedrigwassers

Angaben zur Bestimmung der Dauer von Niedrigwasserereignissen sind bereits im IKSMS-Internet-Tool¹¹ zur Darstellung der Niedrigwasserergebnisse vorhanden.

Im Rahmen dieser Arbeit hat man sich für eine feinere Bewertung entschieden, die dadurch erzielt wird, dass man von einer wöchentlichen Betrachtung (= wöchentlicher NM7Q), wie sie im IKSMS-Internettool zur Darstellung der Niedrigwasserergebnisse vorhanden ist, auf eine tägliche Betrachtung (= kalendertäglicher M7Q) übergeht.

Also wurde die Anzahl von Tagen errechnet, an denen der Parameter M7Q unter dem NM7Q-Schwellenwert für $T = 2$ Jahre liegt. Für alle Messstellen wurde die maximale Niedrigwasserdauer mit dem niedrigsten NM7Q verglichen (vgl. Tabelle 8).

¹¹Das Datenbanktool der IKSMS verfolgt den Zweck, die Ergebnisse des wöchentlichen gemeinsamen Monitorings zu archivieren. Die dort gespeicherten Informationen sind also Daten, die für jede Kalenderwoche berechnet werden. Die Dauer wird also anhand der Wochenzahl berechnet. Eine Woche gilt als Niedrigwasserwoche, sobald der für diese Woche berechnete NM7Q kleiner ist als der Schwellenwert, der dem NM7Q mit einer Wiederkehrwahrscheinlichkeit von $T = 2$ Jahre entspricht. Um Doppelzählungen zu vermeiden, wird eine Woche nur einer einzigen Niedrigwasserkategorie zugeordnet. Die Summe der Wochen aller Niedrigwasserkategorien entspricht also der Gesamtzahl von Wochen mit Niedrigwasser, das sind Wochen, in denen der wöchentliche NM7Q < NM7Q mit Wiederkehrintervall $T = 2$ Jahre.

Tabelle 8: Pegelweiser Vergleich der kritischsten Niedrigwasserjahre im Zeitraum 1960-2020 nach dem Kriterium des jährlichen NM7Q (vorletzte Spalte rechts) und nach dem Kriterium der maximalen Dauer des Niedrigwassers (letzte Spalte rechts), mit jährlicher Klassifizierung nach erreichtem Wiederkehrintervall

Teileinzugsgebiet	Name der Station (Gewässer)	Fläche des Einzugsgebiets [km²]	Jahr der Inbetriebnahme [a]	Jahr [a] mit NN7Q [m³/s]	Jahr [a] mit XSumD [d]
Obere Mosel	Rupt sur Moselle (Mosel)	152	1968	1983 (0,196)	2018 (113)
	Cleurie (Cleurie)	63	1970	2020 (0,165)	2018 (126)
	Epinal (Mosel)	1217	1960	1964 (2,55)	2018 (94)
	Tonnoy (Mosel)	1976	1980	2020 (2,42)	2018 (129)
	Mirecourt (Madon)	381	1965	2018 (0,320)	2017 (120)
	Pulligny (Madon)	943	1964	2019 (0,475)	1976 (153)
	Pont-Saint-Vincent (Mosel)	3070	1988	2003 (2,37)	2018 (111)
	Toul (Mosel)	3338	1960	1991 (1,89)	2018 (139)
	Saint-Dié (Meurthe)	374	1967	2003 (0,427)	2018 (116)
	Lunéville (Vezouze)	559	1969	2019 (0,394)	2019 (115)
	Roville (Mortagne)	300	1992	2016 (0,275)	2017 (78)
	Gerbéviller (Mortagne)	493	1969	1991 (0,419)	1976 (171)
	Damelevières (Meurthe)	2280	1969	1976 (2,96)	1976 (160)
	Custines (Mosel)	6830	1973	1976 (6,11)	2018 (104)
	Chambrey (Seille)	560	2003	2012 (0,534)	2019 (96)
	Nomény (Seille)	925	1969	1976 (0,427)	1976 (146)
	Metz (Seille)	1280	1964	1976 (0,551)	1976 (143)
	Hauconcourt-Hagondange (Mosel)	9422	1960	1976 (8,62)	2018 (100)
	Boncourt (Orne)	412	1960	2020 (0,008)	2011 (104)
	Briey (Woigot)	76	1967	1994 (0,004)	1994 (197)
Moyeuvre-Grande (Orne)	1141	2004	2017 (0,124)	2017 (89)	
Uckange (Mosel)	10770	1981	2020 (10,8)	2018 (94)	
Sauer	Martelange (Sauer)	209	1975	2020 (0,004)	1976 (118)
	Bigonville (Sauer)	308	2001	2020 (0,010)	2018 (88)
	Hesperange (Alzette)	292	2001	2011 (0,398)	2011 (54)
	Kautenbach (Wiltz)	428	2001	2020 (0,159)	2011 (94)
	Hunnebour (Eisch)	164	2001	2018 (0,411)	2011 (152)
	Schoenfels (Mamer)	84	2001	2020 (0,192)	2018 (71)
	Bissen (Attert)	292	2001	2019 (0,567)	2011 (142)
	Ouren (Our)	382	1992	2020 (0,116)	2020 (73)
	Gemünd Our (Our)	611	1972	2020 (0,103)	2020 (82)
	Prümzurlay (Prüm)	576	1972	1976 (0,289)	1976 (153)
	Seffern (Nims)	137	1973	1976 (0,250)	1976 (174)
	Bollendorf 2 (Sauer)	3222	1958	1964 (2,81)	2011 (154)
	Saar	Hermelange (Saar)	186	1968	1971 (0,087)
Keskastel (Saar)		879	1967	1992 (0,469)	1971 (122)
Oermingen (Eichel)		277	1968	1990 (0,024)	1991 (213)
Wittring (Saar)		1716	1997	2003 (1,94)	2003 (88)
Hangard (Oster)		112	1962	1976 (0,060)	1976 (135)
Contwig (Schwarzbach)		529	1952	1964 (0,898)	1964 (247)
Althornbach 2 (Hornbach)		425	1962	1963 (1,18)	1964 (127)
Einöd (Schwarzbach)		1152	1960	2020 (3,17)	2020 (187)
Reinheim (Blies)		1798	1956	1964 (4,81)	1976 (193)
Sankt Arnual (Saar)		3945	1993	2006 (8,09)	2015 (68)
Eppelborn (Ill)		120	1959	1971 (0,073)	2020 (135)
Lebach (Theel)		207	1958	1976 (0,111)	1996 (140)
Nalbach (Prims)		712	1959	1977 (0,639)	1976 (138)
Varize (Deutsche Nied)		364	1969	1993 (0,132)	2004 (99)
Filstroff-Bouzonville (Nied)		1170	1964	2003 (0,738)	2019 (97)
Freimersdorf (Saar)		6983	1952	2019 (12,3)	2018 (107)
Saarburg 2 (Leuk)		76	1962	1974 (0,128)	1976 (121)
Untere Mosel		Trier (Mosel)	23857	1930	1963 (23,6)
	Hentern (Ruwer)	102	1972	1991 (0,087)	1976 (110)
	Densborn 2 (Kyll)	472	1972	1996 (0,864)	1976 (165)
	Kordel (Kyll)	819	1967	1976 (1,70)	1976 (143)
	Papiermühle (Dhron)	170	1955	1973 (0,063)	1976 (123)
	Platten 2 (Lieser)	378	1972	1976 (0,210)	1976 (103)
	Cochem (Mosel)	27088	1900	1976 (15,4)	1976 (148)
	Burgen 2 (Baybach)	106	1972	1976 (0,012)	1976 (93)

Größenklasse	Dekade des Beginns der Abflussmessreihe	Wiederkehrintervallklassen
[0 - 150]	[1900 - 1960]	[0 - 2]
[150 - 300]	[1961 - 1970]	[2 - 5]
[300 - 450]	[1971 - 1980]	[5 - 10]

Es lässt sich feststellen, dass dabei für 68 % der Messstellen andere Niedrigwasserjahre herauskommen. Auch lässt sich feststellen, dass in diesen Fällen bei 78 % der Messstellen die Niedrigwasserkategorien voneinander abweichen.

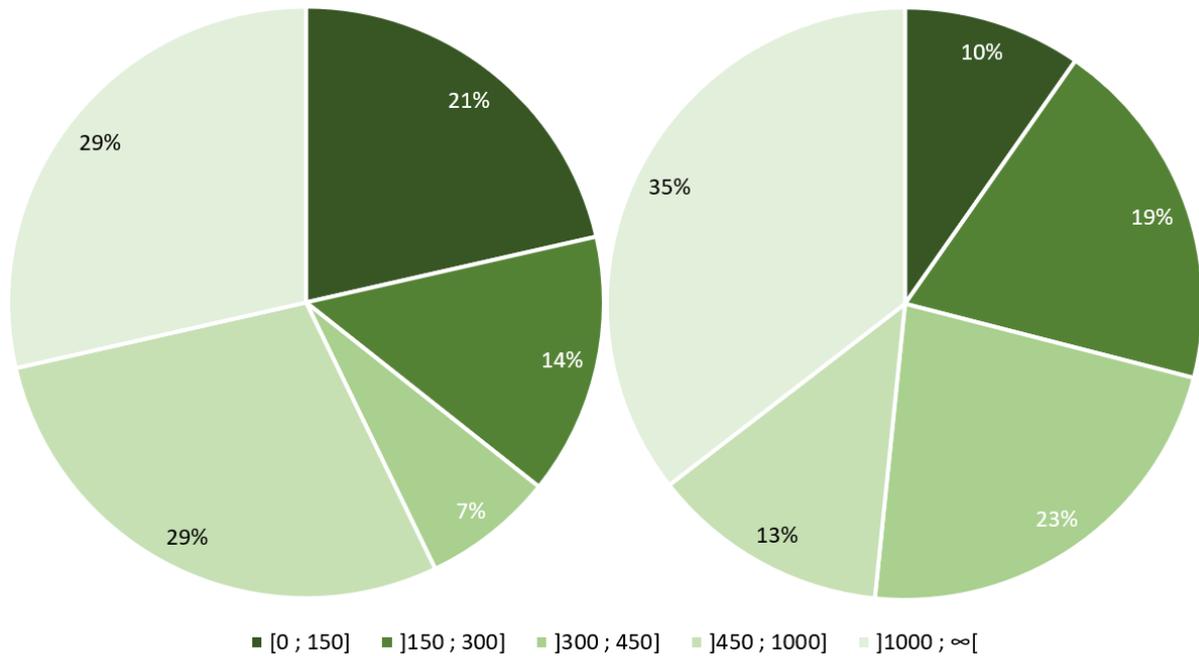


Abbildung 14: Verteilung nach Größenklassen der Einzugsgebiete in km² bei gleicher Niedrigwasserkategorie von NN7Q-Ereignis und jährlichem NM7Q mit maximaler Niedrigwasserdauer (links) sowie unterschiedlicher Niedrigwasserkategorie der beiden Ereignisse (rechts)

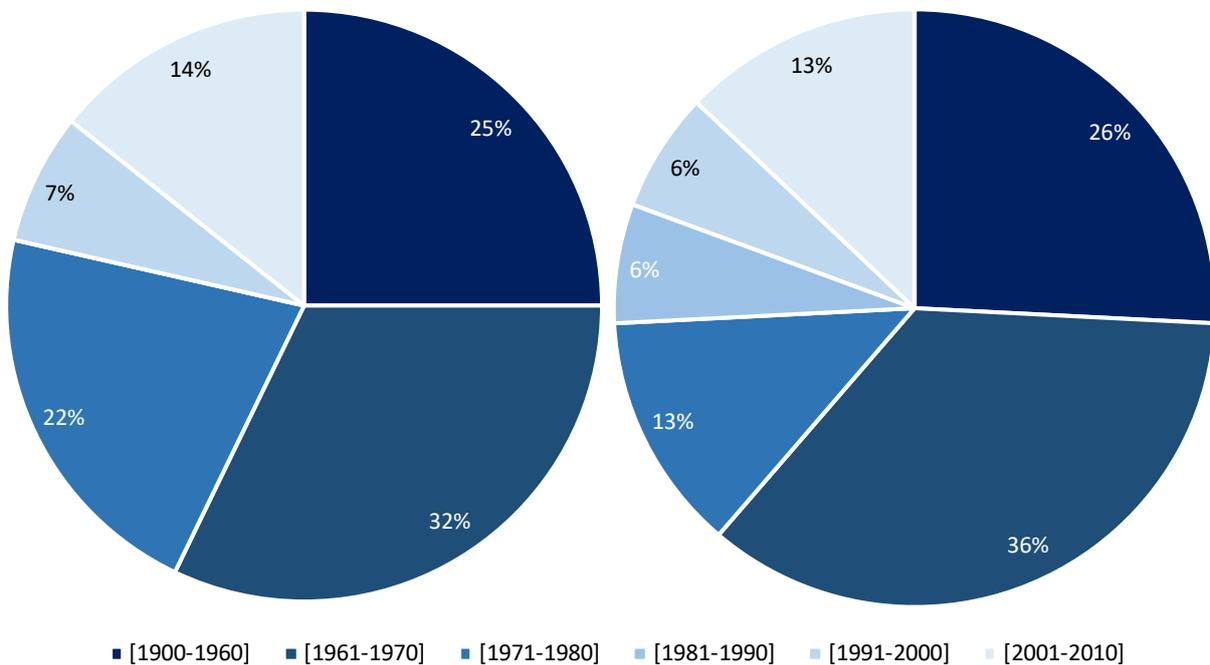


Abbildung 15: Verteilung nach Altersklassen der Messstellen bei gleicher Niedrigwasserkategorie von NN7Q-Ereignis und jährlichem NM7Q mit maximaler Niedrigwasserdauer (links) sowie unterschiedlicher Niedrigwasserkategorie der beiden Ereignisse (rechts)

Legt man dieses neue Kriterium zugrunde, ist 1976 immer noch das häufigste Jahr (20 Messstellen, das sind 34 % aller und 70 % der zwischen 1971 und 1980 eingerichteten Messstellen) (Abbildung 16). Weitere Jahre sind 2018 (13 Messstellen, davon 2 nach 2002 eingerichtet) und 2011 (6 Messstellen, darunter vier, die nach 2002 in Betrieb genommen wurden).

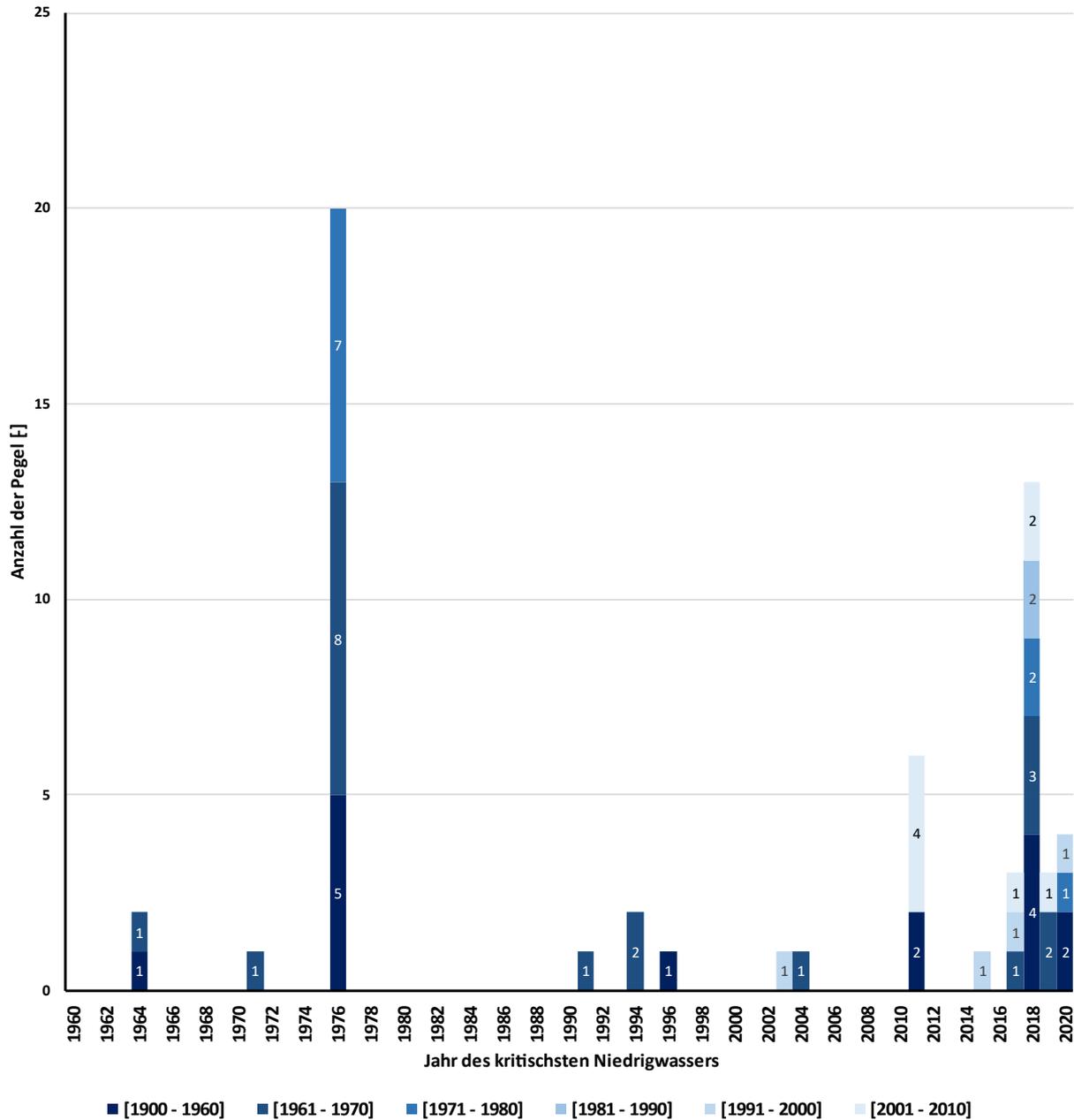


Abbildung 16: Jährliche Anzahl von Pegeln, die das Kriterium der maximalen Anzahl von Niedrigwassertagen erfüllen (1960-2020), mit Verteilung der jährlichen Anzahl nach Altersklassen

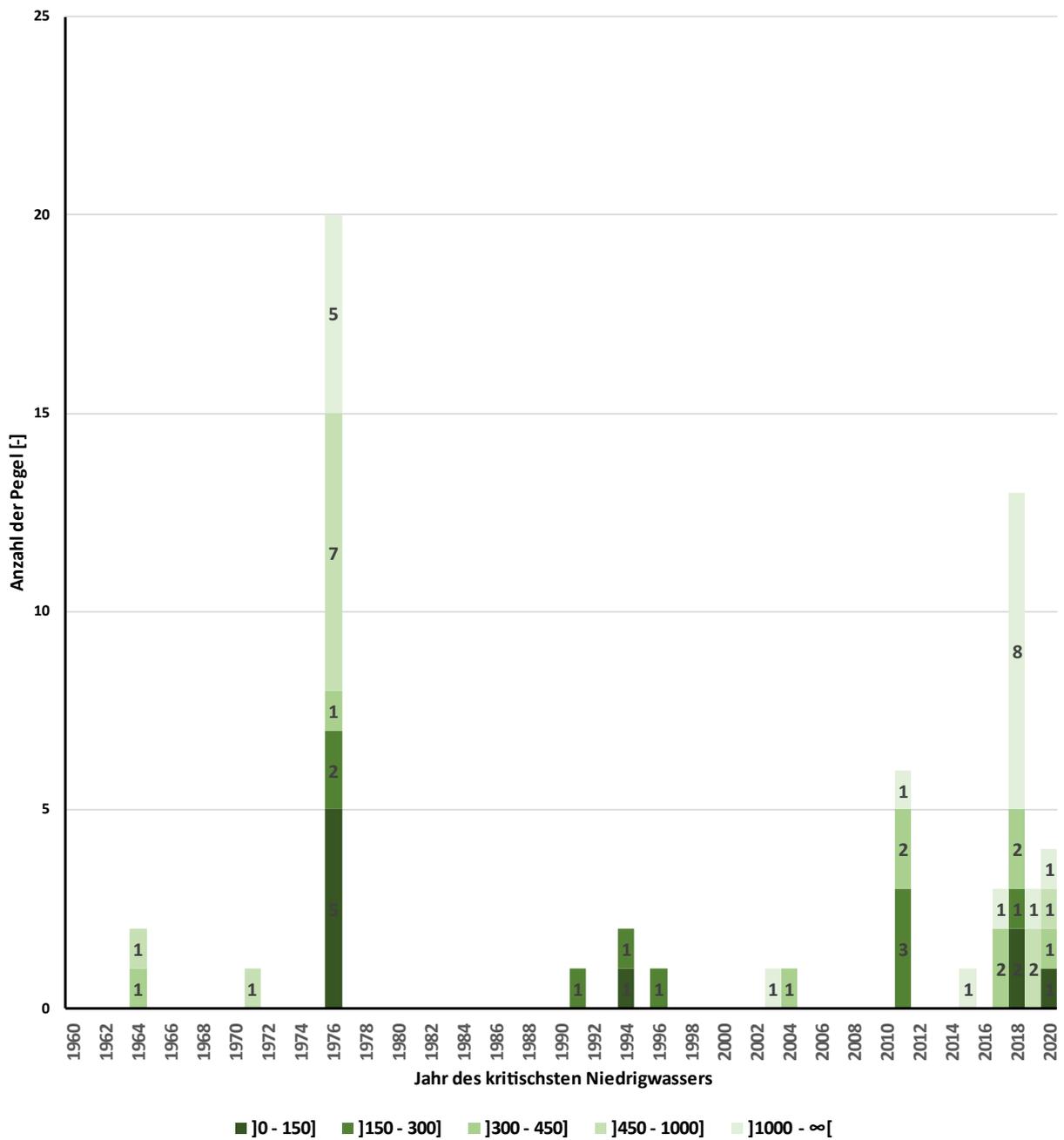


Abbildung 17: Jährliche Anzahl von Pegeln, die das Kriterium der maximalen Anzahl von Niedrigwassertagen erfüllen (1960-2020), mit Verteilung der jährlichen Anzahl nach Größenklassen der betreffenden Pegel

4.1.3 Untersuchung anhand des Volumendefizits

Die Abflusssituation bei gleicher Niedrigwasserdauer objektiv umso schlimmer, je größer das Volumendefizit im Vergleich zu einem gleichen Referenzschwellenwert ist.

Aus diesem Grund erschien es hilfreich, für jede Messstelle und jedes Teileinzugsgebiet das Volumendefizit nach folgender Formel zu berechnen:

Volumendefizit [m³] = $SumVD = \sum_{i=1}^n (NM7Q_2 - M7Q_i) \cdot 86400$, wobei n = Anzahl der Niedrigwassertage

Festzustellen ist, dass die drei Parameter (kleinster Jahres-NM7Q, maximale Dauer und größtes Volumendefizit) an 27 Messstellen (d. h. 46 %) übereinstimmen.

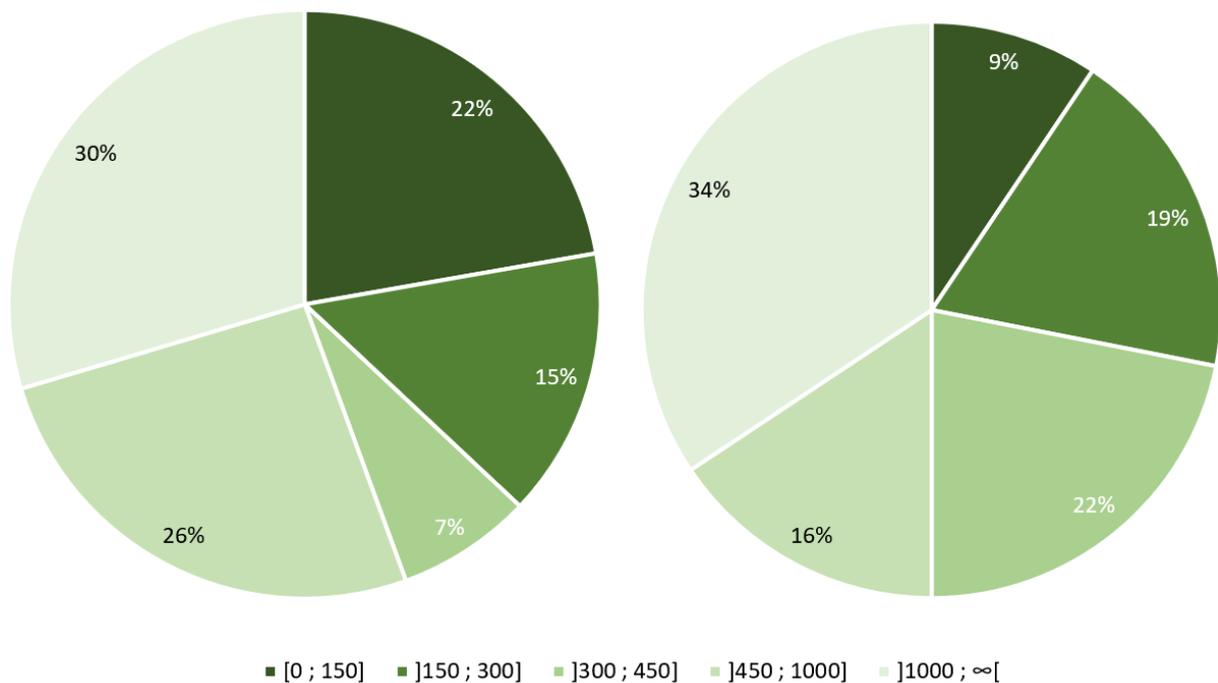


Abbildung 18: Verteilung nach Größenklassen der Einzugsgebiete in km² bei gleicher Niedrigwasserkategorie von NN7Q-Ereignis, jährlichem NM7Q mit maximaler Niedrigwasserdauer sowie maximalem Volumendefizit (links) sowie unterschiedlicher Niedrigwasserkategorie der drei Ereignisse (rechts)

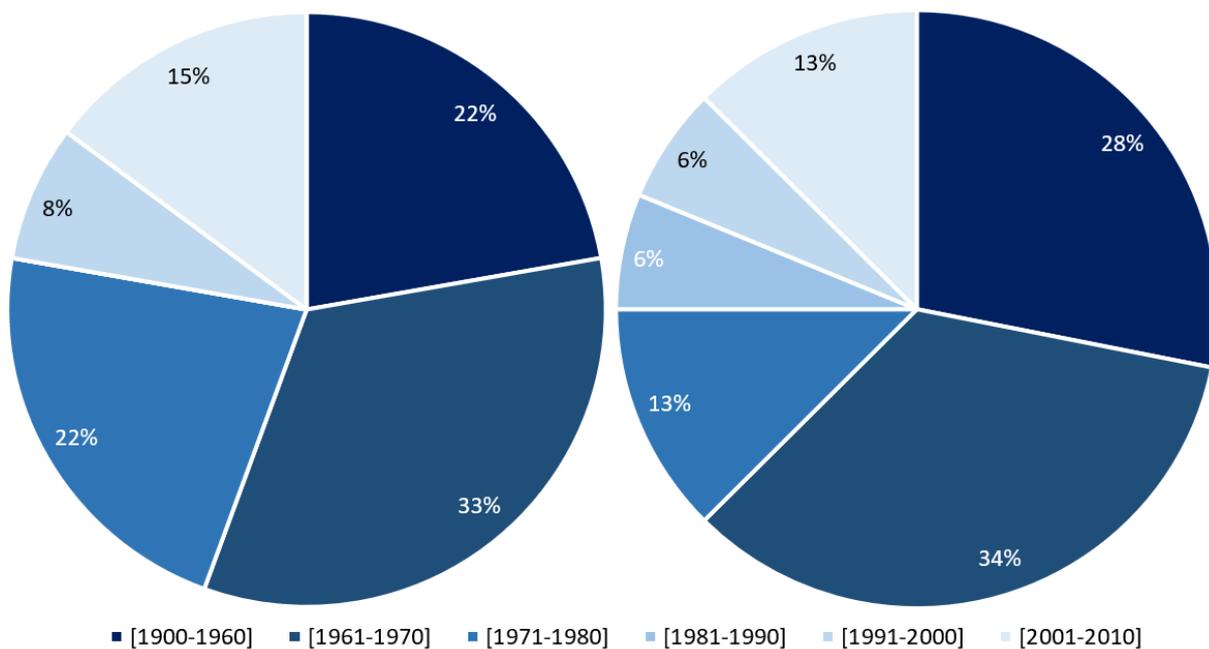


Abbildung 19: Verteilung nach Altersklassen der Messstellen bei gleicher Niedrigwasserkategorie von NN7Q-Ereignis, jährlichem NM7Q mit maximaler Niedrigwasserdauer sowie maximalem Volumendefizit (links) sowie unterschiedlicher Niedrigwasserkategorie der drei Ereignisse (rechts)

Eine Übereinstimmung zwischen dem kleinsten Jahres-NM7Q und dem größten Volumendefizit lässt sich an 44 Messstellen ($\cong 75\%$) beobachten.

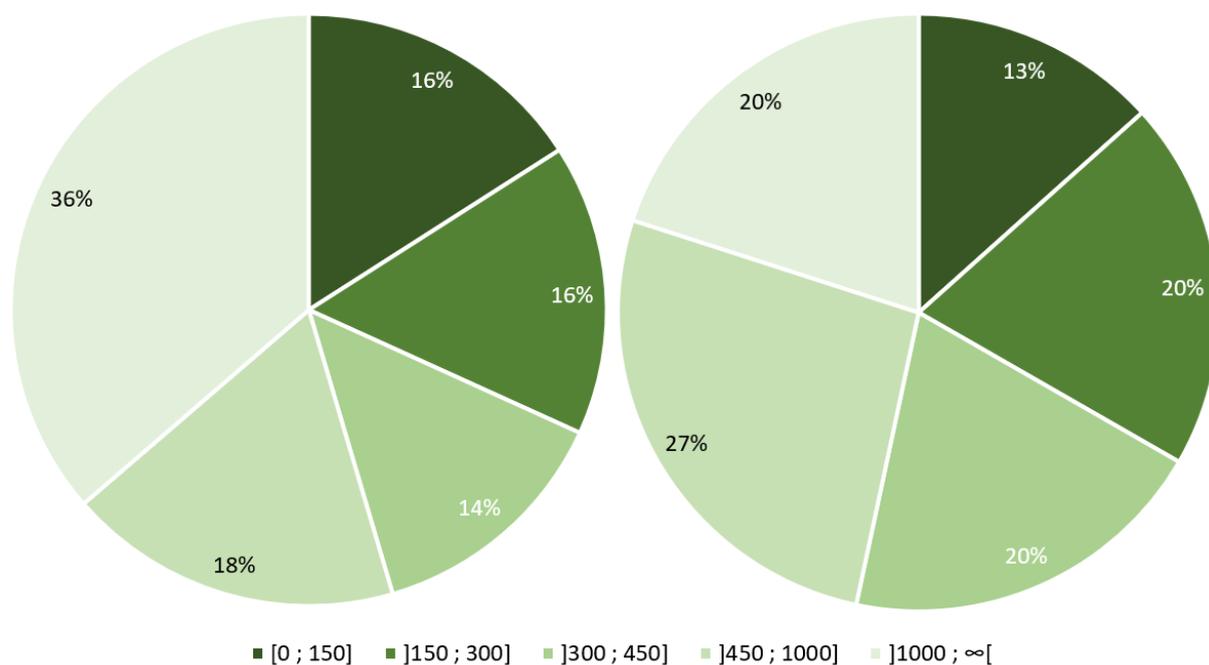


Abbildung 20: Verteilung nach Größenklassen der Einzugsgebiete in km² bei gleicher Niedrigwasserkategorie von NN7Q-Ereignis und jährlichem NM7Q bei maximalem Volumendefizit (links) sowie unterschiedlicher Niedrigwasserkategorie der beiden Ereignisse (rechts)

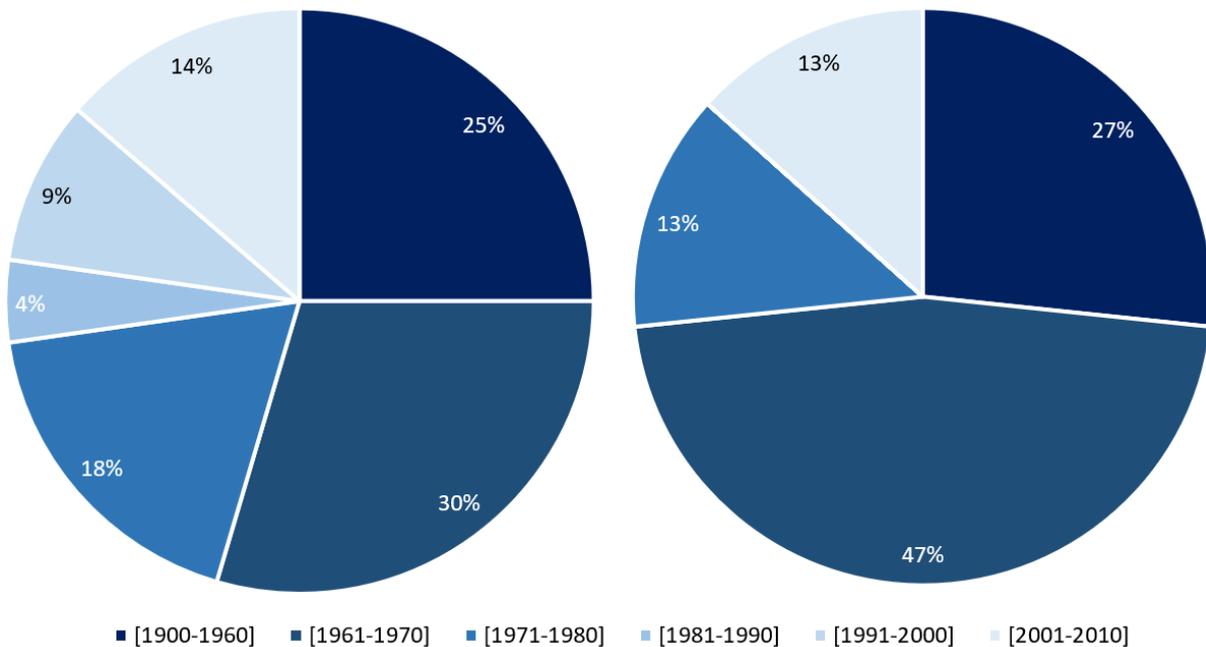


Abbildung 21: Verteilung nach Altersklassen der Messstellen bei gleicher Niedrigwasserkategorie von NN7Q-Ereignis und jährlichem NM7Q bei maximalem relativem Volumendefizit (links) sowie unterschiedlicher Niedrigwasserkategorie der beiden Ereignisse (rechts)

Eine Übereinstimmung zwischen der größten Anzahl an Niedrigwassertagen und dem größten Volumendefizit lässt sich an 37 Messstellen ($\hat{=} 63\%$) beobachten.

Zusammenfassung: Dabei lässt sich feststellen, dass die kritischsten Niedrigwasserjahre für die 3 Kriterien getrennt betrachtet an 10 der 59 Messstellen des Netzes übereinstimmen (siehe Tabelle 9). Auch wird erkennbar, dass die Klassifizierung des Bezugsjahres anhand des NM7Q immer strenger ausfällt als die anhand der Parameter Niedrigwasserdauer oder Volumendefizit. **Zur Analyse der Niedrigwassersituation wird daher empfohlen, die Parameter Dauer und Volumendefizit als Zweitparameter ergänzend zum jährlichen NM7Q hinzuzuziehen.**

Tabelle 9: Vergleich der kritischsten Niedrigwasserjahre im Zeitraum 1960-2020 nach dem Kriterium des jährlichen NM7Q (4.Spalte), nach dem Kriterium der maximalen Dauer des Niedrigwassers (5. Spalte) und nach dem Kriterium des maximalen Volumendefizits (6.Spalte), mit jährlicher Klassifizierung nach erreichtem Wiederkehrintervall

Teileinzugsgebiet	Name der Station (Gewässer)	Fläche des Einzugsgebiets [km ²]	Jahr der Inbetriebnahme [a]	Jahr [a] mit NN7Q [m ³ /s]	Jahr [a] mit XSumD [d]	Jahr [a] mit XSumVD [Mio. m ³]
Obere Mosel	Rupt sur Moselle (Mosel)	152	1968	1983 (0,196)	2018 (113)	2018 (1,57)
	Cleurie (Cleurie)	63	1970	2020 (0,165)	2018 (126)	2018 (1,43)
	Epinal (Mosel)	1217	1960	1964 (2,55)	2018 (94)	2003 (13,33)
	Tonnoy (Mosel)	1976	1980	2020 (2,42)	2018 (129)	2018 (16,32)
	Mirecourt (Madon)	381	1965	2018 (0,320)	2017 (120)	2015 (1,16)
	Pulligny (Madon)	943	1964	2019 (0,475)	1976 (153)	1976 (4,12)
	Pont-Saint-Vincent (Mosel)	3070	1988	2003 (2,37)	2018 (111)	2003 (11,31)
	Toul (Mosel)	3338	1960	1991 (1,89)	2018 (139)	2018 (26,21)
	Saint-Dié (Meurthe)	374	1967	2003 (0,427)	2018 (116)	2003 (5,25)
	Lunéville (Vezouze)	559	1969	2019 (0,394)	2019 (115)	2019 (3,12)
	Roville (Mortagne)	300	1992	2016 (0,275)	2017 (78)	2016 (1,16)
	Gerbéville (Mortagne)	493	1969	1991 (0,419)	1976 (171)	1976 (5,43)
	Damelevières (Meurthe)	2280	1969	1976 (2,96)	1976 (160)	1976 (39,43)
	Custines (Mosel)	6830	1973	1976 (6,11)	2018 (104)	1976 (73,31)
	Chambrey (Seille)	560	2003	2012 (0,534)	2019 (96)	2019 (1,62)
	Nomény (Seille)	925	1969	1976 (0,427)	1976 (146)	1976 (3,84)
	Metz (Seille)	1280	1964	1976 (0,551)	1976 (143)	1976 (5,01)
	Hauconcourt-Hagondange (Mosel)	9422	1960	1976 (8,62)	2018 (100)	1976 (61,63)
	Boncourt (Orne)	412	1960	2020 (0,008)	2011 (104)	2020 (0,42)
	Briey (Woigot)	76	1967	1994 (0,004)	1994 (197)	1994 (1,81)
Moyeuivre-Grande (Orne)	1141	2004	2017 (0,124)	2017 (89)	2017 (1,20)	
Uckange (Mosel)	10770	1981	2020 (10,8)	2018 (94)	2020 (36,00)	
Sauer	Martelange (Sauer)	209	1975	2020 (0,004)	1976 (118)	2020 (1,05)
	Bigonville (Sauer)	308	2001	2020 (0,010)	2018 (88)	2020 (1,32)
	Hesperange (Alzette)	292	2001	2011 (0,398)	2011 (54)	2011 (0,30)
	Kautenbach (Wiltz)	428	2001	2020 (0,159)	2011 (94)	2018 (1,06)
	Hunnebour (Eisch)	164	2001	2018 (0,411)	2011 (152)	2018 (0,73)
	Schoenfels (Mamer)	84	2001	2020 (0,192)	2018 (71)	2020 (0,10)
	Bissen (Attert)	292	2001	2019 (0,567)	2011 (142)	2011 (1,29)
	Ouren (Our)	382	1992	2020 (0,116)	2020 (73)	2020 (0,77)
	Gemünd Our (Our)	611	1972	2020 (0,103)	2020 (82)	2020 (1,74)
	Prümzurlay (Prüm)	576	1972	1976 (0,289)	1976 (153)	1976 (4,26)
	Seffern (Nims)	137	1973	1976 (0,250)	1976 (174)	1976 (1,54)
	Bollendorf 2 (Sauer)	3222	1958	1964 (2,81)	2011 (154)	1964 (29,93)
	Saar	Hermelange (Saar)	186	1968	1971 (0,087)	1994 (145)
Keskastel (Saar)		879	1967	1992 (0,469)	1971 (122)	1992 (4,91)
Oermingen (Eichel)		277	1968	1990 (0,024)	1991 (213)	1991 (4,24)
Wittring (Saar)		1716	1997	2003 (1,94)	2003 (88)	2003 (3,78)
Hangard (Oster)		112	1962	1976 (0,060)	1976 (135)	1976 (0,78)
Contwig (Schwarzbach)		529	1952	1964 (0,898)	1964 (247)	1963 (17,34)
Althornbach 2 (Hornbach)		425	1962	1963 (1,18)	1964 (127)	1963 (2,35)
Einöd (Schwarzbach)		1152	1960	2020 (3,17)	2020 (187)	2020 (21,37)
Reinheim (Blies)		1798	1956	1964 (4,81)	1976 (193)	1976 (24,61)
Sankt Arnual (Saar)		3945	1993	2006 (8,09)	2015 (68)	2019 (4,32)
Eppelborn (Ill)		120	1959	1971 (0,073)	2020 (135)	2020 (0,82)
Lebach (Theel)		207	1958	1976 (0,111)	1996 (140)	1964 (1,79)
Nalbach (Prims)		712	1959	1977 (0,639)	1976 (138)	1978 (8,33)
Varize (Deutsche Nied)		364	1969	1993 (0,132)	2004 (99)	2019 (1,21)
Filstroff-Bouzonville (Nied)		1170	1964	2003 (0,738)	2019 (97)	2020 (3,15)
Fremersdorf (Saar)		6983	1952	2019 (12,3)	2018 (107)	1973 (26,18)
Saarburg 2 (Leuk)		76	1962	1974 (0,128)	1976 (121)	1963 (0,41)
Untere Mosel	Trier (Mosel)	23857	1930	1963 (23,6)	1976 (128)	1976 (208,92)
	Hentern (Ruwer)	102	1972	1991 (0,087)	1976 (110)	1976 (0,72)
	Densborn 2 (Kyll)	472	1972	1996 (0,864)	1976 (165)	1976 (5,70)
	Kordel (Kyll)	819	1967	1976 (1,70)	1976 (143)	1976 (6,45)
	Papiermühle (Dhron)	170	1955	1973 (0,063)	1976 (123)	1976 (0,79)
	Platten 2 (Lieser)	378	1972	1976 (0,210)	1976 (103)	1976 (1,06)
	Cochem (Mosel)	27088	1900	1976 (15,4)	1976 (148)	1976 (302,44)
	Burgen 2 (Baybach)	106	1972	1976 (0,012)	1976 (93)	1976 (0,20)

Größenklasse	Dekade des Beginns der Abflussmessreihe	Wiederkehrintervallklassen
[0 - 150]	[450; 1000]	[1900 - 1960]
[150 - 300]	[1000 - ∞[[1961 - 1970]
[300 - 450]	[1971 - 1980]	[2001 - 2010]
		[1981 - 1990]
		[1991 - 2000]
		[2001 - 2010]
		[0 - 2]
		[2 - 5]
		[5 - 10]
		[10 - 20]
		[20 - 50]
		[50 - ∞[

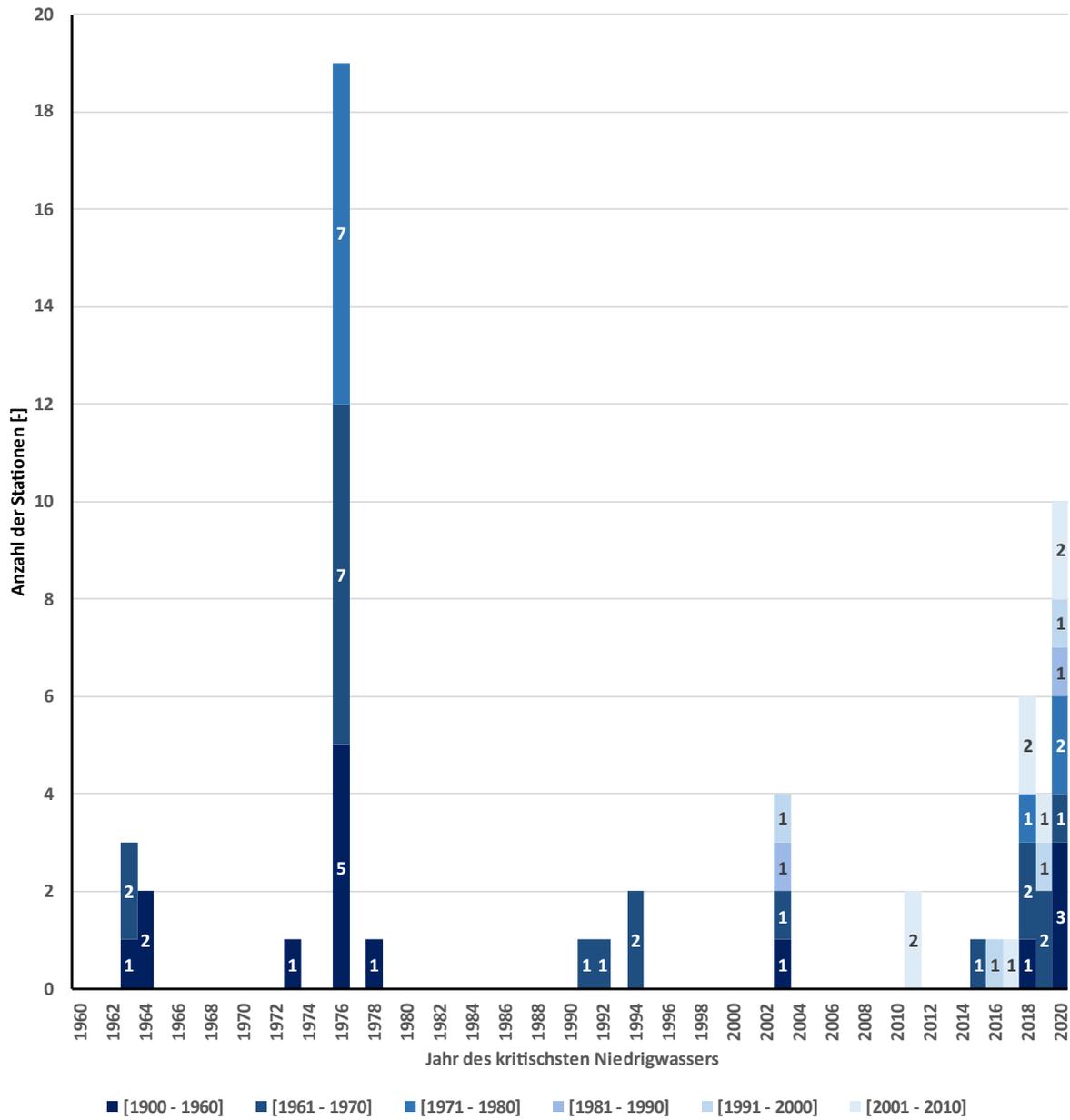


Abbildung 22: Jährliche Anzahl der Pegel, die das Kriterium des maximalen Volumendefizits im Zeitraum 1960-2020 erfüllen, mit Verteilung der jährlichen Anzahl nach Altersklassen

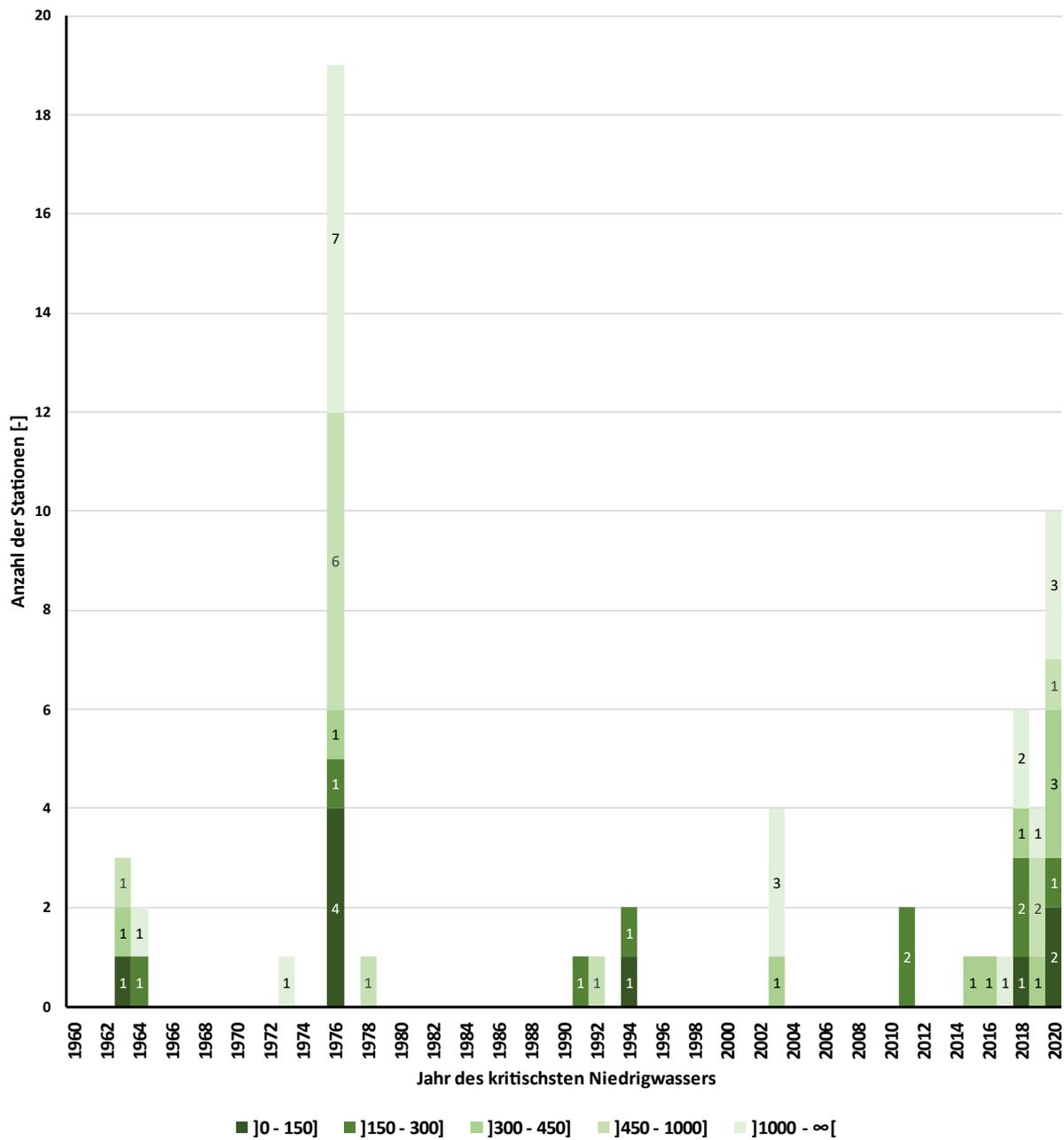


Abbildung 23: Jährliche Anzahl der Pegel, die das Kriterium des maximalen Volumendefizits (1960-2020) erfüllen, mit Verteilung der jährlichen Anzahl nach Größenklassen der betreffenden Pegel

5 Niedrigwasserentwicklung im Laufe der Zeit

Eine letzte Frage, die bei Niedrigwasser immer häufiger gestellt wird, ist die Frage, ob es einen Zusammenhang mit der Klimaerwärmung gibt.

Da die Mitglieder der Expertengruppe keine Meteorologen sind, haben sie davon abgesehen, Korrelationen zwischen Abfluss- und Temperaturdaten herzustellen, zumal bekannt ist, dass die Beziehung zwischen diesen Parametern sehr indirekt ist.

Sie haben sich daher auf die Analyse der vorliegenden hydrologischen Daten konzentriert.

Dazu haben sie die 21 Messstellen herangezogen, für die seit 1960 weniger als 10 % der Daten fehlten. Diese Stichprobe repräsentiert 36 % des Netzes und deckt alle Einzugsgebietsgrößen ab (Tabelle 10).

Tabelle 10: Liste der Messstellen mit weniger als 10 % Fehlzeiten seit 1960

Teileinzugsgebiet	Betreiber	Name der Station	Messstellennummer	Gewässer	Fläche des Einzugsgebiets [km ²]	Jahr der Inbetriebnahme
Obere Mosel	DREAL	Epinal	A4250640	Mosel	1217	1960
Obere Mosel	DREAL	Mirecourt	A5261010	Madon	381	1965
Obere Mosel	DREAL	Pulligny	A5431010	Madon	943	1964
Obere Mosel	DREAL	Toul	A5730610	Mosel	3338	1960
Obere Mosel	DREAL	Metz	A7881010	Seille	1280	1964
Obere Mosel	DREAL	Hauconcourt-Hagondange	A7930610	Mosel	9422	1960
Sauer	RLP	Bollendorf 2	26200505	Sauer	3222	1958
Saar	LUA	Hangard	1362120	Oster	112	1962
Saar	RLP	Contwig	26420308	Schwarzbach	529	1952
Saar	RLP	Althornbach 2	26420603	Hornbach	425	1962
Saar	LUA	Einöd	1373130	Schwarzbach	1152	1960
Saar	LUA	Reinheim	1062220	Blies	1798	1956
Saar	LUA	Eppelborn	1341120	Ill	120	1959
Saar	LUA	Lebach	1332220	Theel	207	1958
Saar	LUA	Nalbach	1092220	Prims	712	1959
Saar	DREAL	Filstroff-Bouzonville	A9942020	Nied	1170	1964
Saar	WSV	Fremersdorf	26400550	Saar	6983	1952
Saar	RLP	Saarburg 2	26490609	Leuk	76	1962
Untere Mosel	WSV	Trier	26500100	Mosel	23857	1930
Untere Mosel	RLP	Papiermühle	26760306	Dhron	170	1955
Untere Mosel	WSV	Cochem	26900400	Mosel	27088	1900

5.1 Analyse der Schwellenwerte

Nachfolgend wird in Tabelle die Entwicklung der NM7Q-Schwellenwerte für jeden Pegel und für jede Niedrigwasserkategorie dargestellt. Die Tabelle zeigt Wertepaare der NM7Q-Schwellenwerte. Die erste Zahl des Wertepaares repräsentiert den NM7Q-Schwellenwert auf Grundlage der NM7Q-Zeitreihe von 1960-2014 und die zweite Zahl stellt den fortgeschriebenen NM7Q-Schwellenwert der NM7Q-Zeitreihe von 1960-2020 dar. Farblich hervorgehoben sind die Wertepaare, bei denen sich die beiden Schwellenwerte um mehr als 20 % (helle Farbschattierung) bzw. 50 % (dunkle Farbschattierung) unterscheiden. Zusätzlich wird die Richtung des Unterschieds farblich verdeutlicht, d. h. ob ansteigend (blau) oder rückgängig (grün).

In den folgenden Abschnitten werden die Änderungen der Schwellenwerte nach Betreiber analysiert.

5.1.1 DREAL

Die am Pegel Boncourt an der Orne festgestellten signifikanten Veränderungen können nicht auf Veränderungen des Wasserhaushalts in diesem Teil des Einzugsgebiets zurückgeführt werden, sondern resultieren aus Lücken in den verfügbaren Daten, die eine Berechnung des jährlichen NM7Q für 14 Jahre zwischen 1964 und 1978 unmöglich machten (siehe Tabelle 2). Diese Situation hat im Übrigen dazu geführt, dass diese Station aus der Analyse der Niedrigwasserentwicklung zwischen 1960 und 2020 herausgenommen wurde.

Ein ähnliches Problem besteht an der Station Hermelange (Datenlücken, die die Berechnung eines jährlichen NM7Q für 12 der 33 Jahre der Zeitreihe nicht möglich machten – siehe Tabelle 2). Die Abflüsse dieser Station werden außerdem durch die Entnahmen in Laneuveville-lès-Lorquin und Nitting für die drei Rückhalteweiherr Gondrexange, Stock und Mittersheim beeinflusst, die der Speisung des parallel zur Saar verlaufenden kleinen Saar-Kohle-Kanals dienen.

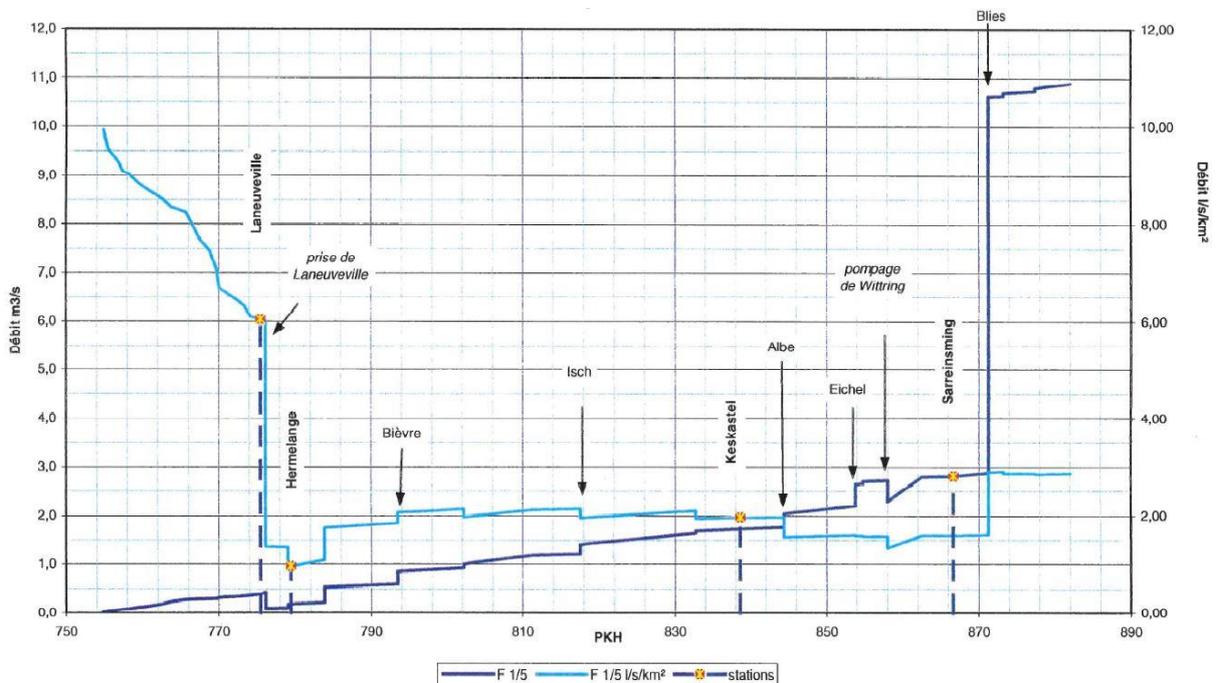


Abbildung 24: Entwicklung des monatlichen Mindestabflusses bei einer Wiederkehrzeit von $T = 5$ Jahren für die Saar (Quelle = Verzeichnis der Niedrigwasserabflüsse des Rhein-Maas-Einzugsgebiets – 2000)

Die am Pegel Moyeuve beobachteten Veränderungen resultieren aus der Einstellung der Grubenwasserhaltung in den Eisenerzminen Lothringens Anfang der 2010er Jahre und der

allmählichen Rückkehr zu einer natürlichen Funktionsweise des Grundwassers, das die Orne in diesem Bereich speist.

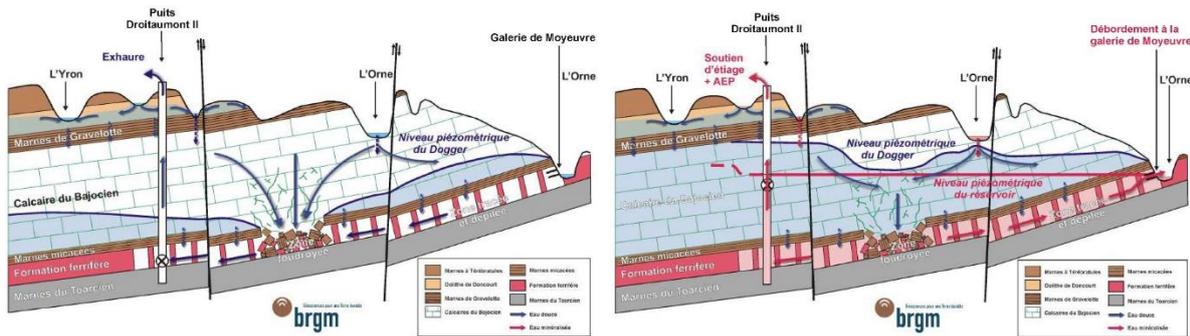


Abbildung 25: Prinzip der oberflächennahen Grundwasserführung der Orne bei Betrieb der Eisenminen Lothringens (links) und nach deren Stilllegung (rechts).

5.1.2 WSV und LUA

An den Pegeln der WSV und des LUA zeigt der Vergleich der Schwellenwerte von 2014 zu 2022 keine signifikanten (<20 %) Unterschiede. Meist sind die Werte aus 2014 größer oder etwa gleich als die aus 2022. Lediglich am Pegel Trier ist eine leichte Tendenz zu etwas höheren Abflüssen aller Schwellenwerte 2022 zu erkennen, wobei diese Werte aufgrund der verlängerten Zeitreihe nur begrenzt zu vergleichen sind.

5.1.3 SPW und AGE

Die statistischen Schwellenwerte der Messstellen im oberen Sauerinzugsgebiet – Martelange und Bigonville an der Sauer selbst und Kautenbach an der Wiltz – verringern sich von 2014 bis 2020 signifikant. In Belgien und Luxemburg hat die Trockenheit gegen Ende der 2010er Jahre in den Sommern 2018, 2019 und 2020 besonders ausgeprägte Niedrigwasserereignisse hervorgerufen. Diese Aufeinanderfolge mehrerer ausgeprägter Niedrigwasserereignisse (der stärksten Niedrigwasser überhaupt seit Einrichtung dieser Pegel) hat unweigerlich eine große Auswirkung auf die statistischen Schwellenwerte.

Dank des direkt unterhalb von Bigonville gelegenen Obersauer-Stausee können diese Niedrigwasser gestützt bzw. abgeschwächt werden. An den Messstellen unterhalb des Obersauer-Stausees sind die statistischen Schwellenwerte daher von 2014-2020 konstanter, denn die Niedrigwasserereignisse Ende der 2010er Jahre wurden vom Obersauer-Stausee abgeschwächt.

5.1.4 LfU

An den Pegeln des Landes Rheinland-Pfalz sind beim Vergleich der Schwellenwerte von 2014 zu 2022 mit einer Ausnahme keine signifikanten Unterschiede feststellbar. Unabhängig von der Größe des Einzugsgebietes und der Zuordnung zum Flussgebiet gibt es insgesamt sowohl leichte Tendenzen in Richtung niedriger als auch höherer Schwellenwerte. Lediglich am Pegel Papiermühle / Dhron haben sich die Schwellenwerte 2020 für den 20- und den 50-jährlichen NM7Q-Wert signifikant, d.h. um mehr als 20% gegenüber 2014 erhöht. Die am Pegel Papiermühle festgestellten Veränderungen können nicht auf Veränderungen des Wasserhaushalts in diesem Teil des Einzugsgebietes zurückgeführt werden, sondern sind die Folge von größeren Datenkorrekturen im Zeitraum vor 1989, die nach 2014 rückwirkend vorgenommen worden waren.

Tabelle 11: Vergleich der Schwellenwerte nach den Berechnungen von 2014 und 2022

Land	Betreiber	Einzugsgebiet	Teileinzugsgebiet	Pegelnummer	Gewässer	Einzugsgebietsgröße [km²]	Pegel	Größe des Einzugsgebiets [km²]	Jahr der Inbetriebnahme	HÄUFIG	WENIGER HÄUFIG	SELTEN	SEHR SELTEN	EXTREM SELTEN				
										NM7Q T = 2 Jahre	NM7Q T = 5 Jahre	NM7Q T = 10 Jahre	NM7Q T = 20 Jahre	NM7Q T = 50 Jahre				
Frankreich	DREAL Grand Est	MOSEL - NIED	Mosel oberhalb der Meurthe	A4050620	MOSEL	152	Rupt sur Moselle	152	1968	0,620 / 0,578	0,410 / 0,374	0,330 / 0,298	0,280 / 0,247	0,230 / 0,200				
				A4250640	MOSEL	1217	Epinal	1217	1960	5,60 / 5,43	4,00 / 3,89	3,40 / 3,27	2,90 / 2,83	2,50 / 2,41				
				A4173010	CLEURIE	63	Cleurie	63	1970	0,450 / 0,421	0,330 / 0,302	0,290 / 0,254	0,250 / 0,220	0,220 / 0,187				
				A5261010	MADON	381	Mirecourt	381	1965	0,670 / 0,653	0,500 / 0,477	0,430 / 0,404	0,380 / 0,353	/				
				A5110610	MOSELLE	1976	Tonnoy	1976	1980	6,40 / 5,99	4,50 / 4,11	3,70 / 3,38	3,20 / 2,87	2,70 / 2,39				
				A5431010	MADON	943	Pulligny	943	1964	1,20 / 1,18	0,930 / 0,894	0,800 / 0,774	0,720 / 0,686	0,630 / 0,600				
				A5500610	MOSEL	3070	Pont-Saint-Vincent	3070	1988	6,20 / 5,89	4,70 / 4,55	4,10 / 3,98	3,60 / 3,56	3,20 / 3,15				
			A5730610	MOSEL	3338	Toul	3338	1960	7,60 / 7,37	5,30 / 5,11	4,40 / 4,21	3,80 / 3,60	3,20 / 3,01					
			A6051019	MEURTHE	374	Saint-Dié	374	1967	1,50 / 1,47	1,10 / 1,09	0,940 / 0,928	0,830 / 0,814	0,710 / 0,703					
			A6711210	MORTAGNE	300	Roville	300	1992	0,900 / 0,740	0,710 / 0,529	0,630 / 0,444	0,570 / 0,384	/					
			A6271010	MEURTHE	2280	Damelevières	2280	1969	7,60 / 7,71	5,90 / 6,21	5,10 / 5,55	4,60 / 5,06	4,10 / 4,56					
			A6561110	VEZOUZE	559	Lunéville	559	1969	1,10 / 1,03	0,860 / 0,768	0,750 / 0,661	0,680 / 0,583	0,600 / 0,507					
			A6731220	MORTAGNE	493	Gerbéville	493	1969	1,30 / 1,23	0,950 / 0,867	0,790 / 0,721	0,690 / 0,619	0,580 / 0,522					
			A7701010	SEILLE	560	Chambrey	560	2003	0,870 / 0,822	0,630 / 0,597	0,530 / 0,505	0,460 / 0,440	/					
			A7821010	SEILLE	925	Nomény	925	1969	1,10 / 1,10	0,850 / 0,828	0,740 / 0,716	0,660 / 0,634	0,570 / 0,554					
			A7881010	SEILLE	1280	Metz	1280	1964	1,30 / 1,22	0,940 / 0,905	0,800 / 0,773	0,710 / 0,678	0,610 / 0,586					
			A8071010	ORNE	412	Boncourt	412	1960	0,120 / 0,098	0,058 / 0,042	0,039 / 0,027	0,029 / 0,019	0,020 / 0,013					
			A8401010	ORNE	1141	Moyeuville-Grande	1141	2004	0,560 / 0,388	0,380 / 0,219	0,320 / 0,163	0,270 / 0,127	/					
			A8322010	WOIGOT	75,8	Briey	75,8	1967	0,250 / 0,233	0,120 / 0,125	0,085 / 0,089	0,063 / 0,068	0,044 / 0,050					
			A7010610	MOSEL	6830	Custines	6830	1973	20,0 / 19,6	15,0 / 14,9	13,0 / 12,9	12,0 / 11,4	10,0 / 9,99					
			A7930610	MOSEL	9422	Hauconcourt-Hagondange	9422	1960	22,0 / 20,9	16,0 / 15,7	14,0 / 13,5	12,0 / 11,9	11,0 / 10,4					
		A8500610	MOSEL	10770	Uckange	10770	1981	23,0 / 21,7	19,0 / 17,0	17,0 / 15,0	16,0 / 13,5	14,0 / 12,0						
		A9942020	NIED	1170	Filstroff-Bouzonville	1170	1964	1,60 / 1,48	1,10 / 1,06	0,950 / 0,892	0,830 / 0,772	0,710 / 0,656						
		A9862010	DEUTSCHE NIED	364	Varize	364	1969	0,360 / 0,356	0,240 / 0,225	0,190 / 0,178	0,160 / 0,146	0,130 / 0,117						
		A9021040	SAAR	186	Hermelange	186	1968	0,210 / 0,245	0,150 / 0,190	0,120 / 0,166	0,110 / 0,149	0,090 /						
		A9091050	SAAR	879	Keskastel	879	1967	1,70 / 1,70	1,20 / 1,21	0,980 / 1,01	0,840 / 0,875	0,700 / 0,742						
		A9301010	SAAR	1716	Wittring	1716	1968	3,10 / 2,93	2,50 / 2,34	2,30 / 2,08	2,10 / 1,89	/ 1,70						
		A9352050	EICHEL	277	Oermingen	277	1968	0,420 / 0,412	0,220 / 0,231	0,150 / 0,171	0,120 / 0,133	0,084 / 1,10						
		Deutschland	LUA	SAAR-BLIES	Blies	1062220	BLIES	1798	Reinheim	1798	1956	7,60 / 7,63	6,43 / 6,36	5,89 / 5,74	5,48 / 5,27	5,05 / 4,81		
						1373130	SCHWARZBACH	1152	Einöd	1152	1960	5,65 / 5,60	5,06 / 4,93	4,78 / 4,49	4,56 / 4,06	4,32 / 3,47		
						1362120	OSTER	112	Hangard	112	1962	0,196 / 0,196	0,132 / 0,134	0,108 / 0,108	0,091 / 0,089	0,075 / 0,070		
					Prims	1341120	ILL	120	Eppelborn	120	1959	0,245 / 0,239	0,171 / 0,157	0,141 / 0,128	0,121 / 0,112	0,101 / 0,099		
						1092220	PRIMS	712	Nalbach	712	1959	2,05 / 2,04	1,47 / 1,54	1,22 / 1,28	1,04 / 1,06	0,860 / 0,804		
1332220	THEEL					207,2	Lebach	207,2	1958	0,415 / 0,410	0,293 / 0,304	0,244 / 0,250	0,210 / 0,206	0,177 / 0,155				
LfU	MOSEL - SAAR - SAUER		Blies	26420308	SCHWARZBACH	528,60	Contwig	528,60	1952	2,64 / 2,54	1,97 / 1,99	1,62 / 1,69	1,34 / 1,44	1,01 / 1,13				
				26420603	HORNACH	425,47	Althornbach 2	425,47	1962	1,86 / 1,85	1,60 / 1,59	1,48 / 1,48	1,38 / 1,39	1,27 / 1,31				
			Sauer	26260303	OUR	611,47	Gemünd Our	611,47	1972	0,552 / 0,491	0,350 / 0,314	0,276 / 0,245	0,227 / 0,196	0,182 / 0,149				
				26200505	SAUER	3221,80	Bollendorf 2	3221,80	1958	7,69 / 7,58	6,03 / 6,08	5,27 / 5,26	4,69 / 4,55	4,10 / 3,71				
				26280800	NIMS	136,71	Seffern	136,71	1973	0,426 / 0,409	0,348 / 0,334	0,313 / 0,296	0,287 / 0,264	0,260 / 0,227				
				26280504	PRÜM	576,12	Prümzurley	576,12	1972	0,924 / 0,857	0,653 / 0,650	0,535 / 0,559	0,450 / 0,489	0,367 / 0,418				
			Saar	26490609	LEUK	76,00	Saarburg 2	76,00	1962	0,239 / 0,231	0,192 / 0,194	0,171 / 0,179	0,155 / 0,169	0,139 / 0,158				
				Mosel	26560103	RUWER	101,64	Hentern	101,64	1972	0,255 / 0,238	0,181 / 0,175	0,151 / 0,149	0,131 / 0,129	0,111 / 0,109			
			26600707		KYLL	472,10	Densborn 2	472,10	1972	1,51 / 1,49	1,20 / 1,15	1,07 / 0,994	0,967 / 0,883	0,866 / 0,778				
			26600900		KYLL	818,51	Kordel	818,51	1967	2,66 / 2,61	2,28 / 2,30	2,09 / 2,15	1,95 / 2,03	1,80 / 1,89				
			26760306		DHRON	169,61	Papiermühle	169,61	1955	0,224 / 0,197	0,133 / 0,134	0,098 / 0,110	0,075 / 0,093	0,054 / 0,078				
			26780609		LIESER	377,83	Platten 2	377,83	1972	0,494 / 0,480	0,377 / 0,368	0,327 / 0,320	0,291 / 0,285	0,255 / 0,250				
26980700	BAYBACH		105,73		Burgen 2	105,73	1972	0,062 / 0,056	0,034 / 0,031	0,024 / 0,023	0,018 / 0,017	0,012 / 0,011						
WSV	MOSEL-SAAR		Saar	26400220	SAAR	3945	Sanct Arnual	3945	1993	11,2 / 10,6	9,14 / 8,92	8,36 / 8,34	7,88 / 7,99	7,50 / 7,71				
				26400550	SAAR	6983	Fremersdorf	6983	1952	18,0 / 19,1	15,2 / 14,8	14,2 / 13,5	13,5 / 12,8	12,8 / 12,5				
		Mosel	26500100	MOSEL	23857,00	Trier	23857,00	1930	58,0 / 59,0	43,7 / 46,6	37,0 / 40,0	32,0 / 34,4	26,8 / 27,9					
Luxemburg	AGE	SAUER - OUR	Sauer	26900400	MOSEL	27088,00	Cochem	27088,00	1900	66,3 / 65,6	49,8 / 49,9	41,1 / 41,7	33,8 / 34,6	25,2 / 26,4				
				17	SAUER	308,40	Bigonville	308,40	2001	0,350 / 0,258	0,205 / 0,126	0,150 / 0,069	0,113 / 0,027	/				
			Alzette	14	WILTZ	427,70	Kautenbach	427,70	2001	0,589 / 0,458	0,449 / 0,282	0,389 / 0,207	0,346 / 0,153	/				
				2	ALZETTE	291,50	Hesperange	291,50	2001	0,517 / 0,508	0,459 / 0,459	0,431 / 0,434	0,409 / 0,413	/				
				10	ATTERT	292,30	Bissen	292,30	2001	0,865 / 0,835	0,779 / 0,696	0,734 / 0,616	0,697 / 0,545	/				
				6	EISCH	164,20	Hunnebour	164,20	2001	0,662 / 0,578	0,538 / 0,469	0,482 / 0,431	0,441 / 0,408	/				
				5	MAMER	83,60	Schoenfels	83,60	2001	0,247 / 0,229	0,223 / 0,208	0,211 / 0,200	0,202 / 0,194	/				
				Belgien	SPW	SAUER - OUR	Sauer	L5610	SAUER	209	Martelange	209	1975	0,231 / 0,212	0,127 / 0,099	0,093 / 0,060	0,072 / 0,035	0,054 / 0,013
							Our	L6330	OUR	382	Ouren	382	1992	0,400 / 0,355	0,246 / 0,229	0,191 / 0,179	0,154 / 0,144	0,122 / 0,110

Anmerkung: NM7Qa-Zeitreihe am Pegel Trier wurde zur Berechnung der neuen Schwellenwerte (2020) gegenüber der Berechnung zum Jahr 2014 auf zurückliegende Jahre verlängert, die NM7Qa-Zeitreihen an den Pegeln Saarburg 2 und Martelange wurden zur Berechnung der neuen Schwellenwerte (2020) gegenüber der Berechnung zum Jahr 2014 verkürzt.

5.2 Trends

5.2.1 Lineare Regression

5.2.1.1 Parameter „jährlicher NM7Q“

Zur Untermauerung dieser ersten Analysenreihe haben wir auch untersucht, ob sich ein Trend ausmachen lässt. Dazu haben wir eine lineare Regression zwischen den Niedrigwasserkennwerten und den Kalenderjahren nach der gewöhnlichen Methode der kleinsten Quadrate durchgeführt.

Bei dieser Methode wird versucht nachzuweisen, ob sich die Entwicklung der Niedrigwasserkennwerte von 1960 bis 2020 durch eine lineare Beziehung des Typs $y = a x + b$ erklären lässt, wobei y für die Werte des Niedrigwasserkennwerts und x für die Kalenderjahre steht.

Zu diesem Zweck betrachtet man von allen möglichen Geraden jene mit der geringsten Quadratsumme der vertikalen Abweichungen ($S = \sum_{i=1}^n e_i^2$) zwischen den für das Jahr x_i beobachteten y_i -Werten und dem durch diese Gerade vorhergesagten Wert $y_i^* = a x_i + b$.

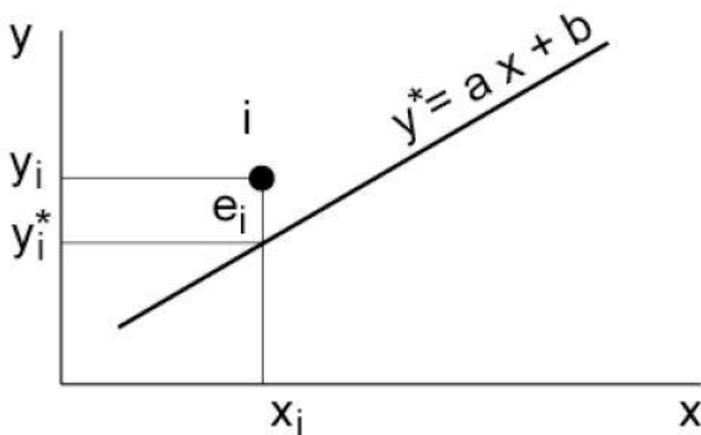


Abbildung 26: Prinzip zur Berechnung einer linearen Regressionsgerade

Die Koeffizienten a und b dieser sogenannten gewöhnlichen Gerade der kleinsten Quadrate erhält man mit den beiden folgenden Formeln:

$$a = \frac{\sum_{i=1}^n (x_i - \bar{x})(y_i - \bar{y})}{\sum_{i=1}^n (x_i - \bar{x})^2} \quad \text{und} \quad b = \bar{y} - a \bar{x}$$

mit

x_i für die einzelnen Kalenderjahre von 1960 bis 2020

y_i für den Wert des Niedrigwasserkennwerts im Jahr x_i

\bar{x} und \bar{y} für die arithmetischen Mittel der Werte x_i und y_i

Der Entwicklungstrend entspricht dann der Steigung der Geraden.

Offensichtlich gilt: Je näher die Punkte an der Geraden liegen, desto kleiner ist die Quadratsumme der vertikalen Abweichungen und desto stichhaltiger ist die Verwendung einer linearen Beziehung zur Vorhersage der Entwicklung des untersuchten Niedrigwasserkennwerts über die Zeit.

Diese Summe $S = \sum_{i=1}^n e_i^2$ lässt sich aus der Streuung der beobachteten y_i -Werte herleiten, und zwar mittels eines Parameters r^2 nach folgender Formel:

$S = (1 - r^2) s_y^2$ wobei s_y^2 der Varianz der beobachteten y_i -Werte des untersuchten Niedrigwasserkennwerts entspricht.

$$r^2 = \frac{s^2 \sum_{i=1}^n (x_i - \bar{x})^2}{\sum_{i=1}^n (y_i - \bar{y})^2} = \frac{[\sum_{i=1}^n (x_i - \bar{x})(y_i - \bar{y})]^2}{\sum_{i=1}^n (x_i - \bar{x})^2 \sum_{i=1}^n (y_i - \bar{y})^2}$$

Abbildung 27 zeigt beispielhaft die Ergebnisse für die Messstelle Cochem an der Mosel.

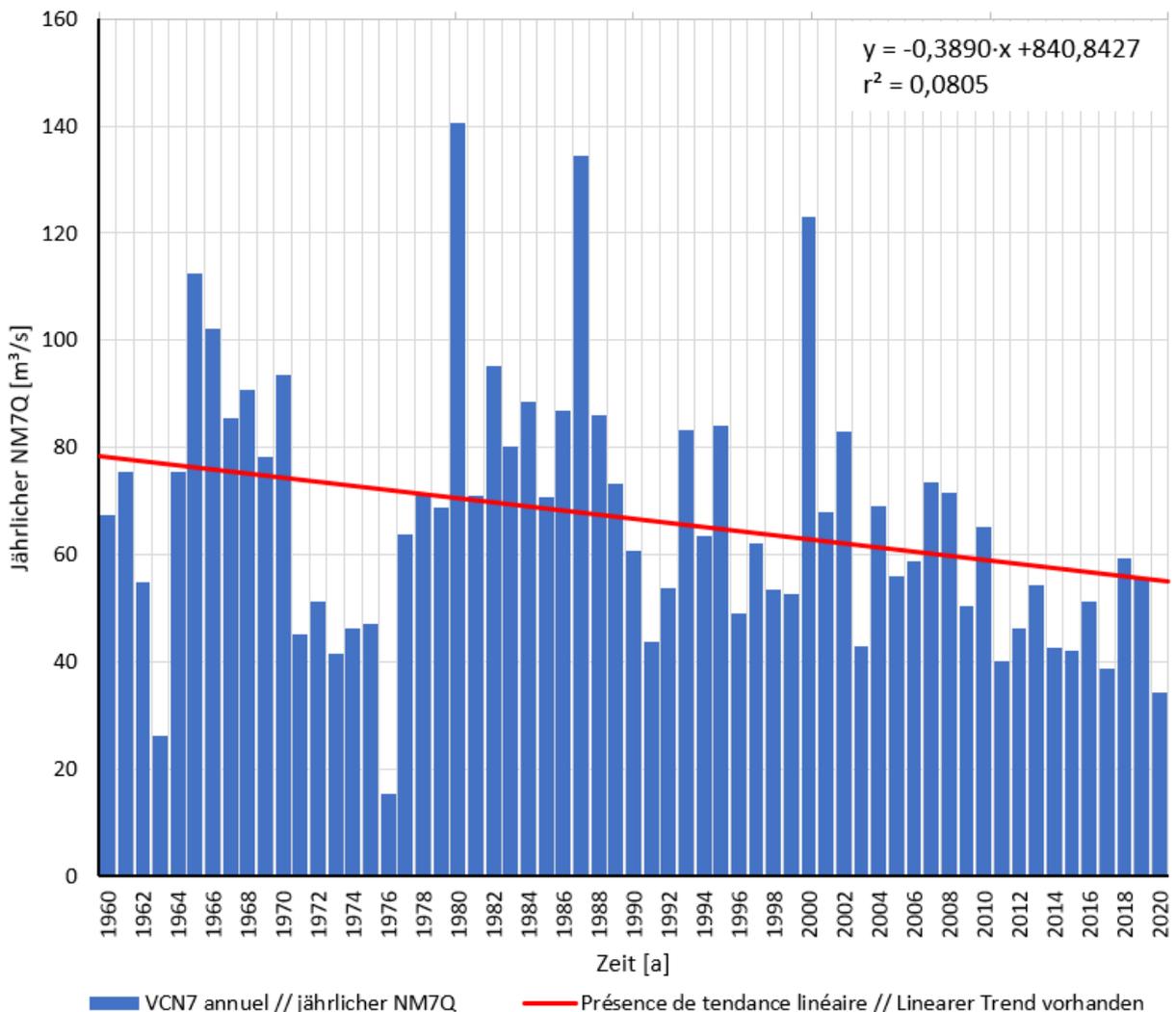


Abbildung 27: Lineare Trendkurve für die Messstelle Cochem

Daraus lässt sich schließen, dass die berechnete lineare Beziehung zwischen den beobachteten y_i -Werten des untersuchten Niedrigwasserkennwerts und den Kalenderjahren x_i umso stichhaltiger ist, als sich r^2 dem Wert 1 nähert.

- Eine perfekte lineare Beziehung entspricht also einem Wert $r^2=1$, und
- das völlige Fehlen einer Beziehung entspricht einem Wert von $r^2 = 0$ und einer Steigung von $a = 0$.

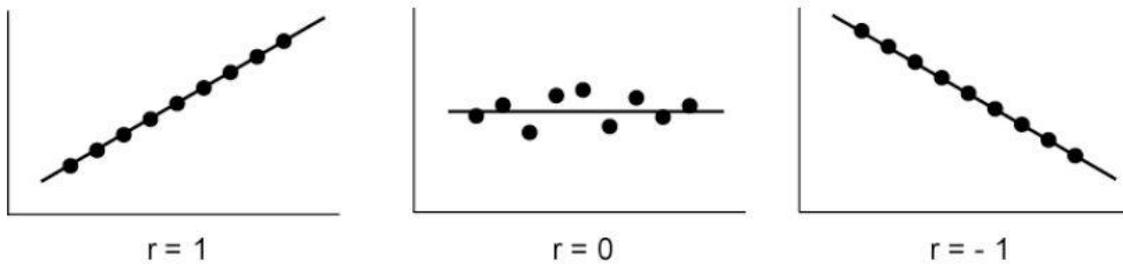


Abbildung 28: Veränderung von r je nach Ausprägung der linearen Korrelation

In unserem Fall variiert r^2 für den jährlichen NM7Q zwischen 0,0003 und 0,4245 (Tabelle 12). Also ist es schwierig, von vorneherein einen linearen Trend vorauszusetzen oder völlig auszuschließen.

Tabelle 12: Lineare Regressionen auf der Grundlage des jährlichen NM7Q

Name der Station	Trend jährlicher NM7Q		
	Anzahl der Jahre	Regressionsgerade	
		R^2	Gleichung
Epinal	61	0,0995	$y = -0,0410 \cdot x + 87,5021$
Pulligny	56	0,0056	$y = 0,0027 \cdot x - 3,9599$
Toul	61	0,0611	$y = -0,0468 \cdot x + 101,2566$
Hauconcourt-Hagondange	58	0,0831	$y = -0,1465 \cdot x + 314,7030$
Bollendorf 2	61	0,0039	$y = -0,0071 \cdot x + 21,8814$
Hangard	57	0,0159	$y = 0,0009 \cdot x - 1,5577$
Contwig	61	0,0095	$y = -0,0041 \cdot x + 10,7929$
Althornbach 2	58	0,0216	$y = -0,0027 \cdot x + 7,2782$
Einöd	60	0,0102	$y = -0,0047 \cdot x + 14,9215$
Reinheim	61	0,0003	$y = 0,0015 \cdot x + 4,6543$
Eppelborn	61	0,0039	$y = -0,0004 \cdot x + 1,1063$
Lebach	61	0,0069	$y = 0,0008 \cdot x - 1,0619$
Nalbach	61	0,0021	$y = 0,0019 \cdot x - 1,7577$
Filstroff-Bouzonville	55	0,4345	$y = -0,0252 \cdot x + 51,7186$
Fremersdorf	61	0,2223	$y = -0,1239 \cdot x + 265,6818$
Saarburg 2	56	0,0191	$y = -0,0005 \cdot x + 1,2994$
Trier	61	0,0760	$y = -0,2748 \cdot x + 604,4024$
Papiermühle	61	0,0280	$y = -0,0016 \cdot x + 3,3578$
Cochem	61	0,0805	$y = -0,3890 \cdot x + 840,8427$

Daher greifen wir zu einem tiefergehenden statistischen Test, dem sogenannten Student'schen t-Test der zunächst voraussetzt, dass wir vorab prüfen, dass die Verteilung der Residuen $e_i = y_i - y_i^*$ der sogenannten „Glockenkurve“ der Normalverteilung nach Laplace-Gauss entspricht (Abb. 29).

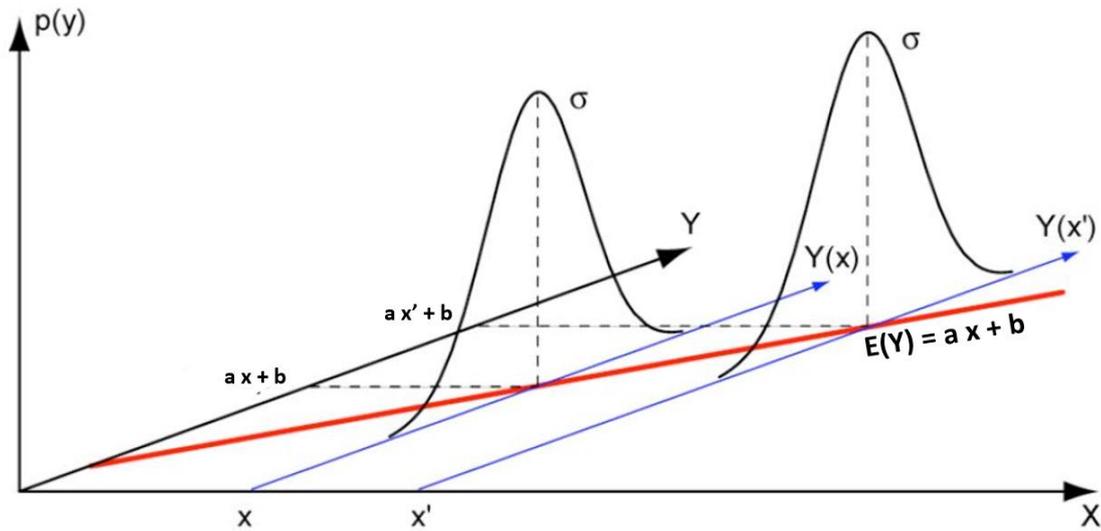


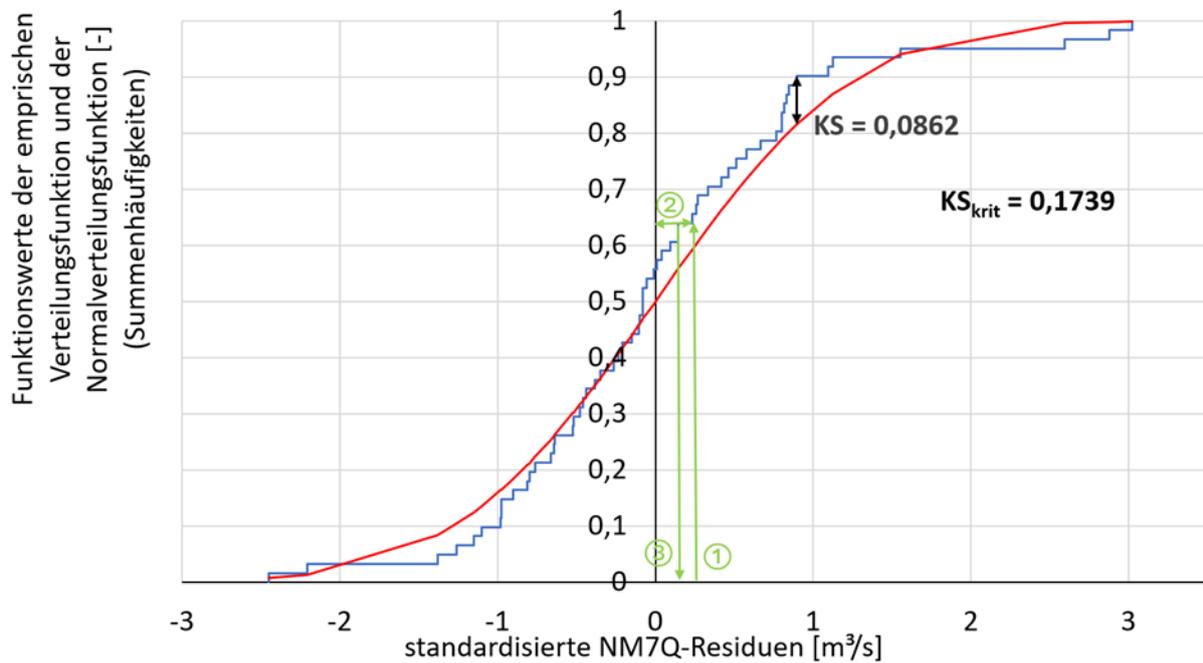
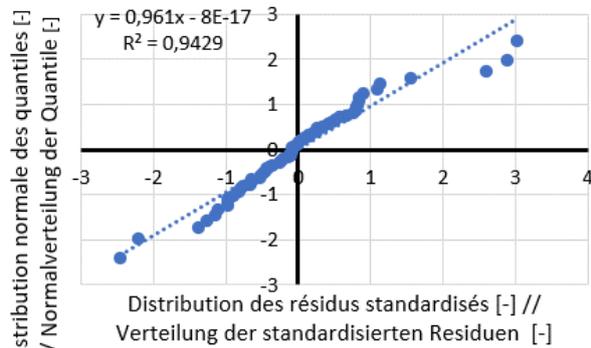
Abbildung 29: Lineare Regression eines Parameters Y als Funktion des Parameters X mit Normalverteilung der Residuen

Um die Annahme normalverteilter Residuen zu prüfen¹², realisierte man gleichzeitig (Abb. 30):

- ein Quantil-Quantil-Diagramm, mit dem man die Residuenverteilung grafisch mit einer Normalverteilung vergleichen kann,
- ein Kolmogorov-Smirnov-Test, der numerisch die größte Differenz zwischen den beiden Verteilungen (KS) mit einem Schwellenwert (KS_{krit}) vergleicht, der von der Stichprobengröße und von der Irrtumswahrscheinlichkeit α bei diesem Test abhängt (Anhang 1).

¹² Aus Gründen der Lesbarkeit der grafischen Darstellungen sind wir in der Praxis von den standardisierten Residuen ausgegangen, d. h. von der Differenz zwischen dem vom Modell geschätzten Wert (y_i^*) und dem beobachteten Wert (y_i), geteilt durch die Varianz der Residuen (σ_e).

Q-Q-Plot des résidus // Q-Q-Plot der Residuen



- Empirische Verteilungsfunktion
- Verteilungsfunktion der Normalverteilung
- ↔ maximale Differenz (KS-Prüfkriterium)

Abbildung 30: Pegel Cochem – oben: Quantil-Quantil-Diagramm der standardisierten Residuen – unten: Vergleich zwischen der Verteilungsfunktion der standardisierten Residuen (blaue Kurve) und der Normalverteilung (rote Kurve)

In unserem Beispiel des Pegels Cochem wurden die 61 Werte der standardisierten Residuen aufsteigend sortiert, und für jeden Wert wurden die zugehörigen kumulierten Quantile in $1/61$ - Schritten berechnet.

Mit dieser Tabelle konnte die blaue Kurve der unteren Grafik in Abbildung 30 erstellt werden (Beispiele: Punkte ① und ②). Ausgehend von der kumulierten Häufigkeit eines jeden der 61 Werte der standardisierten Residuen (vgl. Punkt ②) wurden die entsprechenden normalverteilten Werte abgeleitet (vgl. Punkt ③ und Anhang 1), sodass die Tabelle 13 sowie die obere Grafik der Abbildung 30 erstellt werden konnten.

Tabelle13: Werte der Normalfunktion, die den kumulierten Häufigkeiten jedes standardisierten Residuums für den Pegel Cochem zugeordnet werden

0,016	0,033	0,049	0,066	0,082	0,098	0,115	0,131	0,148	0,164	0,180	0,197	0,213	0,230	0,246	0,262
-2,135	-1,841	-1,653	-1,510	-1,392	-1,291	-1,202	-1,121	-1,047	-0,978	-0,914	-0,853	-0,796	-0,740	-0,687	-0,636
0,279	0,295	0,311	0,328	0,344	0,361	0,377	0,393	0,410	0,426	0,443	0,459	0,475	0,492	0,508	0,525
-0,587	-0,539	-0,492	-0,446	-0,401	-0,357	-0,313	-0,270	-0,228	-0,186	-0,144	-0,103	-0,062	-0,021	0,021	0,062
0,541	0,557	0,574	0,590	0,607	0,623	0,639	0,656	0,672	0,689	0,705	0,721	0,738	0,754	0,770	0,787
0,103	0,144	0,186	0,228	0,270	0,313	0,357	0,401	0,446	0,492	0,539	0,587	0,636	0,687	0,740	0,796
0,803	0,820	0,836	0,852	0,869	0,885	0,902	0,918	0,934	0,951	0,967	0,984	1,000			
0,853	0,914	0,978	1,047	1,121	1,202	1,291	1,392	1,510	1,653	1,841	2,135	∞			

Tabelle 14 enthält die Ergebnisse des Vortests auf Normalverteilung, der für die Messstellen des Mosel-Saar-Einzugsgebiets durchgeführt wurde.

Tabelle 14: Ergebnisse der Vortests auf Normalverteilung

Name der Station	Regressionsgerade mit jährlichem NM7Q			
	Anzahl der Jahre	Kolmogorov-Smirnov-Test auf Normalverteilung		
		KS	KS _{krit} $\alpha=0,05$	Normalverteilung
Epinal	61	0,0814	0,1739	ja
Pulligny	56	0,1243	0,1815	ja
Toul	61	0,0986	0,1739	ja
Hauconcourt-Hagondange	58	0,1287	0,1783	ja
Bollendorf 2	61	0,0973	0,1739	ja
Hangard	57	0,1849	0,1799	nein
Contwig	61	0,0704	0,1739	ja
Althornbach 2	58	0,0867	0,1783	ja
Einöd	60	0,1159	0,1753	ja
Reinheim	61	0,0727	0,1739	ja
Eppelborn	61	0,1357	0,1739	ja
Lebach	61	0,1204	0,1739	ja
Nalbach	61	0,1119	0,1739	ja
Filstroff-Bouzonville	55	0,1046	0,1831	ja
Fremersdorf	61	0,0664	0,1739	ja
Saarburg 2	56	0,1061	0,1815	ja
Trier	61	0,0958	0,1739	ja
Papiermühle	61	0,2429	0,1739	nein
Cochem	61	0,0862	0,1739	ja

Trifft diese Vorüberprüfung zu, so wird anschließend mit dem Student'schen t-Test die Hypothese H₀ getestet, dass es keine lineare Beziehung zwischen den Werten des untersuchten Niedrigwasserkennwerts und den Kalenderjahren gibt, was, wie oben erläutert, einer Steigung von Null ($a = 0$) entspricht¹³.

¹³ Wenn die Werte des untersuchten Niedrigwasserkennwerts nicht normalverteilt sind, kann dieser Test nicht durchgeführt werden. Dies ist der Fall bei den Parametern der Dauer oder des Volumendefizits, bei denen manchen Jahren kein Wert zugewiesen ist, da das gleitende Mittel der Tagesabflüsse über 7 aufeinanderfolgende Tage immer größer war als der dem NM7Q-Wert entsprechende Niedrigwasserschwelwert für T = 2 Jahre.

Dazu muss man einen Wert t berechnen und diese mit einem Wert $t_{\text{crit}} (\alpha/2)$ vergleichen, der durch eine Student'sche t -Verteilung mit $n-2$ Freiheitsgraden ermittelt wurde. Dabei gilt:

$$t = \frac{a}{\sigma^* / \sqrt{\sum_{i=1}^n (x_i - \bar{x})^2}} \quad \text{mit} \quad \sigma^{*2} = \frac{(1-r^2) \sum_{i=1}^n (y_i - \bar{y})^2}{n-2}$$

n = Anzahl der Werte y_i des untersuchten Niedrigwasserkennwerts

α = Irrtumswahrscheinlichkeit bei diesem Test, die wir auf 5 % festgesetzt haben.

Die Hypothese H_0 „Nullsteigung“ wird verworfen, wenn $|t| \geq |t_{\text{crit}} (\alpha/2)|$. Im Anhang sind die Werte für $t_{\text{crit}} (\alpha/2)$ aufgeführt, die einer Student'schen t -Verteilung mit $n-2$ Freiheitsgraden entsprechen.

Aus Tabelle 15 gehen die Ergebnisse des Student'schen t -Tests hervor, mit dem geprüft wird, ob die Steigung der Regressionsgerade als signifikant gelten kann oder nicht.

Tabelle 15: Ergebnisse des Student'schen t -Tests zur Signifikanz der Steigung der Regressionsgeraden¹⁴

Name der Station	Regressionsgerade mit jährlichem NM7Q					
	Anzahl der Jahre	Student-Test der Steigung der Regressionsgeraden				
		Gleichung	t	t _{krit} α=0,05	p(t)	Trend
Epinal	61	$y = -0,0410 \cdot x + 87,5021$	2,5529	2,0010	0,0133	signifikanter Rückgang
Pulligny	56	$y = 0,0027 \cdot x - 3,9599$	0,5494	2,0049	0,5850	kein Trend vorhanden
Toul	61	$y = -0,0468 \cdot x + 101,2566$	1,9600	2,0010	0,0547	kein Trend vorhanden
Hauconcourt-Hagondange	58	$y = -0,1465 \cdot x + 314,7030$	2,2532	2,0032	0,0282	signifikanter Rückgang
Bollendorf 2	61	$y = -0,0071 \cdot x + 21,8814$	0,4804	2,0010	0,6327	kein Trend vorhanden
Hangard	57	$y = 0,0009 \cdot x - 1,5577$	Test nicht anwendbar			
Contwig	61	$y = -0,0041 \cdot x + 10,7929$	0,7538	2,0010	0,4540	kein Trend vorhanden
Althornbach 2	58	$y = -0,0027 \cdot x + 7,2782$	1,1115	2,0032	0,2711	kein Trend vorhanden
Einöd	60	$y = -0,0047 \cdot x + 14,9215$	0,7747	2,0017	0,4417	kein Trend vorhanden
Reinheim	61	$y = 0,0015 \cdot x + 4,6543$	0,1416	2,0010	0,8879	kein Trend vorhanden
Eppelborn	61	$y = -0,0004 \cdot x + 1,1063$	0,4819	2,0010	0,6317	kein Trend vorhanden
Lebach	61	$y = 0,0008 \cdot x - 1,0619$	0,6381	2,0010	0,5259	kein Trend vorhanden
Nalbach	61	$y = 0,0019 \cdot x - 1,7577$	0,3512	2,0010	0,7267	kein Trend vorhanden
Filstroff-Bouzonville	55	$y = -0,0252 \cdot x + 51,7186$	6,3816	2,0057	0,0000	signifikanter Rückgang
Fremersdorf	61	$y = -0,1239 \cdot x + 265,6818$	4,1071	2,0010	0,0001	signifikanter Rückgang
Saarburg 2	56	$y = -0,0005 \cdot x + 1,2994$	1,0266	2,0049	0,3092	kein Trend vorhanden
Trier	61	$y = -0,2748 \cdot x + 604,4024$	2,2037	2,0010	0,0315	signifikanter Rückgang
Papiermühle	61	$y = -0,0016 \cdot x + 3,3578$	Test nicht anwendbar			
Cochem	61	$y = -0,3890 \cdot x + 840,8427$	2,2727	2,0010	0,0267	signifikanter Rückgang

Mit Ausnahme der Messstelle Toul, die den Student'schen Signifikanztest ganz knapp verfehlt, zeigt sich für alle Messstellen entlang der Mosel (Epinal, Hauconcourt-Hagondange, Trier und Cochem) ein Trend zum Rückgang.

Dies gilt auch für die Saar an der Messstelle Fremersdorf.

¹⁴ Der in der Tabelle aufgeführte Wert $p(t)$ entspricht der Wahrscheinlichkeit, mit der für den Test verwendeten Student'schen Verteilung zwischen $]-\infty; -t]$ und $[t; +\infty[$ zu liegen. Es ist festzustellen, dass $p(t) \leq \alpha$ wenn $|t| \geq |t_{\text{crit}}|$ und umgekehrt.

Dass an der Sauer in Bollendorf kein Trend ersichtlich wird, erklärt sich zum Teil durch den Obersauer-Stausee mit einer Fläche von 380 ha und einem Volumen von 59 Millionen m³, der 1961 in Betrieb genommen wurde und der Trinkwasserversorgung, der Energieerzeugung, der Hoch- und Niedrigwasserregulierung sowie touristischen Zwecken dient.

Die Nied bei Filstroff-Bouzonville ist der einzige Zufluss dieser drei großen Flüsse, der einen signifikant rückläufigen Trend aufweist. Dies lässt sich zum Teil durch die kaum wasserführende Geologie im Tal der *Nied Réunion* erklären, das in den mergelreichen Sedimentschichten des Unteren Keuper (Typ 7a) verläuft. Bei diesen Steinsalz- und Gipsmergeln handelt es sich um graues Dolomitgestein, das Anhydrit- und Salzlehmschichten überlagert. An höheren Stellen werden diese Mergel noch von Schilfsandstein (t7b) und Rotmergeln überdeckt. Die Verwitterung dieser leicht erodierbaren Gesteine führte zu großen Lehmplatten, feinkörnigen Tongesteinen, die mitunter entlang der Nied zu finden sind (siehe geologischer Schnitt).

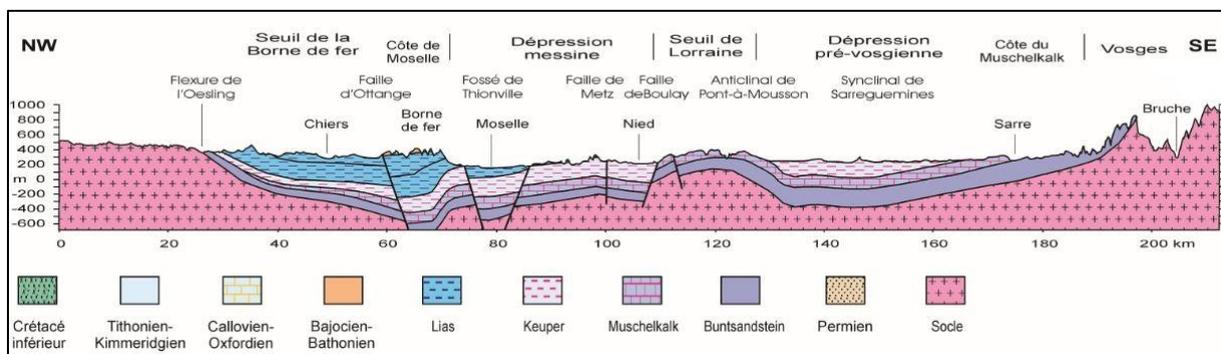


Abbildung 31: Geologischer Schnitt der Lothringischen Hochebene (Quelle J. Le Roux – Universität Nancy)

Die in den Trendberechnungen betrachteten Pegel der WSV haben große Einzugsgebiete und repräsentieren das gesamte Mosel-Einzugsgebiet (Pegel Cochem) bzw. Untereinzugsgebiete (Obermosel + Sauer: Pegel Trier, Saar: Pegel Fremersdorf). Kleinräumige und lokale Einflüsse auf das Abflussverhalten bei Niedrigwasser oder Maßnahmen zur Stützung des Abflusses haben daher geringere Auswirkungen.

Die Trendanalyse des jährlichen NM7Q (Tab. 15) zeigt für alle drei Pegel (Cochem, Trier und Fremersdorf) einen Rückgang des Wertes und deutet so auf eine Verschärfung der Niedrigwassersituation hin. Dies spiegelt sich jedoch nicht bei der Analyse für die Dauer der Niedrigwasserereignisse und des jährlichen Volumendefizits (Tab. 17 u. 21) wider. Hier ist kein signifikanter Trend vorhanden.

Für die überwiegende Mehrheit der von Rheinland-Pfalz betriebenen Pegel, konnten keine Trends aus linearer Regression festgestellt werden.

5.2.2 Der Mann-Kendall-Test

5.2.2.1 Der Parameter „jährlicher NM7Q“

Der Mann-Kendall-Test ist ein nicht-parametrischer Test zur Ermittlung von Trends in Zeitreihen. Der Test vergleicht die Abweichungen zwischen jedem Wert des untersuchten Niedrigwasserparameters über den Zeitraum 1960-2020. Der Vorteil dieses Tests gegenüber der linearen Regressionsmethode besteht darin, dass die Daten nicht unbedingt einer Normalverteilung entsprechen müssen.

Für ein bestimmtes Jahr j wird der Wert x_j des untersuchten Niedrigwasserparameters mit allen Werten x_k des Niedrigwasserparameters für alle späteren Jahre verglichen, d. h. wenn $k > j$ ist, wobei jedem Vergleich die Werte 1, 0 oder -1 zugewiesen werden, je nachdem, ob x_k kleiner, gleich oder größer x_j ist.

Anschließend wird die Summe S der erhaltenen Reihe von 1, 0 oder -1 berechnet, die sich nach dem Vergleich jedes Wertepaars (x_j, x_k) für die untersuchte Zeitreihe ergibt, also

$$S = \sum_{k=1}^{n-1} \sum_{j=k+1}^n \text{sign}(x_j - x_k)$$

mit

n = Anzahl der Jahre in der Zeitreihe

$\text{sign}(x_j - x_k) = 1$ wenn $x_j - x_k > 0$

$\text{sign}(x_j - x_k) = 0$ wenn $x_j - x_k = 0$

$\text{sign}(x_j - x_k) = -1$ wenn $x_j - x_k < -1$

Ein sehr hoher positiver Wert der Summe S zeigt einen steigenden Entwicklungstrend des untersuchten Niedrigwasserparameters an, umgekehrt zeigt ein sehr hoher negativer Wert von S einen fallenden Trend an.

Der Mittelwert von S ist $E(s) = 0$ und seine Varianz ist $\sigma^2 = \frac{1}{18}[n(n-1)(2n+5) - \sum_{p=1}^g t_p(t_p-1)(2t_p+5)]$,

wobei g die Anzahl der Gruppen mit identischen Werten des untersuchten Parameters und t_p die Anzahl der identischen Werte in der p -ten Gruppe ist¹⁵.

Für die Beispielstation Cochem wird S berechnet, indem eine Tabelle 23 erstellt wird, in der die erste Zeile und die erste Spalte die Reihe der 61 jährlichen NM7Q-Werte enthält. Die NM7Q-Werte für verschiedene Jahre werden einzeln verglichen und die einzelnen Werte mit dem Vorzeichen der Differenz $\text{NM7Q } k - \text{NM7Q } k+1$ vervollständigt, wobei k für ein betrachtetes Jahr steht.

Im Fall der Station Cochem ergibt sich $S = -463$ und $\sigma^2 = 25822,33$

¹⁵ In der Wertereihe {23, 24, 29, 6, 29, 24, 29, 23} gibt es 3 Gruppen mit identischen Werten mit $t_1 = 2$ für die Gruppe mit identischem Wert 23, $t_2 = 2$ für die Gruppe mit identischem Wert 24 und $t_3 = 3$ für die Gruppe mit identischem Wert 29.

Ob ein statistisch signifikanter Trend vorliegt, kann durch die Berechnung eines Z-Wertes beurteilt werden, der definiert ist als

$$Z = \frac{S-1}{\sigma}, \text{ wenn } S > 0$$

$$Z = 0 \text{ wenn } S = 0$$

$$Z = \frac{S+1}{\sigma}, \text{ wenn } S < 0$$

Im Fall der Station Cochem ergibt sich $Z = -2,8750$

Wir legen ein Fehlerrisiko $\alpha = 0,05$ fest.

$$\text{Da wir } Z \text{ kennen, berechnen wir } P(|Z|) = \int_{-\infty}^{|Z|} \frac{1}{\sqrt{2\pi}} e^{-\frac{x^2}{2}} dx^{16}$$

Der Mann-Kendall-Test sagt uns, dass es einen signifikanten positiven Bewertungstrend (= Zunahme oder Wachstum der Werte des jährlichen NM7Q in Abhängigkeit von der Zeit) gibt, wenn $Z > 0$ und $P(|Z|) \geq 1 - \alpha$. Umgekehrt gibt es einen negativen Bewertungstrend (= Abnahme oder Rückgang der Werte des jährlichen NM7Q), wenn $Z < 0$ und $P(|Z|) \geq 1 - \alpha$. Wenn $P(|Z|) < 1 - \alpha$, gibt es keinen signifikanten Trend in der Entwicklung des Parameters jährlicher NM7Q.

Im Fall der Station Cochem ergibt sich $P(|Z|) = 0,9980$, was bedeutet, dass es einen signifikanten Trend zu, Rückgang der Werte des NM7Q zwischen 1960 und 2020 gibt.

Tabelle 23 zeigt die Ergebnisse für alle Stationen.

Tabelle 23: Ergebnisse des Mann-Kendall-Tests zu den Entwicklungstrends des Parameters jährlicher NM7Q zwischen 1960 und 2020

Name der Station	Trend jährlicher NM7Q			
	Anzahl der Jahre	MK-Test		
		Z	P(Z)	Trend
Epinal	61	2,1594	0,9846	signifikanter Rückgang
Pulligny	56	0,5018	0,6921	kein Trend vorhanden
Toul	61	1,7113	0,9565	signifikanter Rückgang
Hauconcourt-Hagondange	58	2,7100	0,9966	signifikanter Rückgang
Bollendorf 2	61	0,6907	0,7551	kein Trend vorhanden
Hangard	57	1,1427	0,8734	kein Trend vorhanden
Contwig	61	1,4624	0,9282	kein Trend vorhanden
Althornbach 2	58	1,2410	0,8927	kein Trend vorhanden
Einöd	60	0,0829	0,5330	kein Trend vorhanden
Reinheim	61	0,0560	0,5223	kein Trend vorhanden
Eppelborn	61	1,2197	0,8887	kein Trend vorhanden
Lebach	61	0,8961	0,8149	kein Trend vorhanden
Nalbach	61	0,0187	0,5074	kein Trend vorhanden
Filstroff-Bouzonville	55	5,1252	1,0000	signifikanter Rückgang
Fremersdorf	61	4,2005	1,0000	signifikanter Rückgang
Saarburg 2	56	1,4206	0,9223	kein Trend vorhanden
Trier	61	2,5640	0,9948	signifikanter Rückgang
Papiermühle	61	2,2838	0,9888	signifikanter Rückgang
Cochem	61	2,8750	0,9980	signifikanter Rückgang

¹⁶ S. Tabelle in Anhang 2

Mit dem Mann-Kendall-Test zum Entwicklungstrend des Parameters jährlicher NM7Q zwischen 1960 und 2020 konnten mit Ausnahme des Pegels Papiermühle / Dhron für die rheinland-pfälzischen Pegel keine Trends nachgewiesen werden. Der am Pegel Papiermühle / Dhron festgestellte signifikante Rückgang des jährlichen NM7Q ist auf die in Kapitel 5.1.4 bereits erläuterten nachträglichen Datenkorrekturen zurückzuführen.

5.3 Synthese

Tabelle 26: Übersicht der Trendaussagen aus linearer Regression und Mann-Kendall-Test für NM7Q, Dauer des Niedrigwassers und Volumendefizit

Stationsname	NM7Q	
	Lineare Regression	MK-Test
Epinal	signifikanter Rückgang	signifikanter Rückgang
Pulligny	kein Trend vorhanden	kein Trend vorhanden
Toul	kein Trend vorhanden	signifikanter Rückgang
Hauconcourt-Hagondange	signifikanter Rückgang	signifikanter Rückgang
Bollendorf 2	kein Trend vorhanden	kein Trend vorhanden
Hangard	Nicht anwendbar	kein Trend vorhanden
Contwig	kein Trend vorhanden	kein Trend vorhanden
Althornbach 2	kein Trend vorhanden	kein Trend vorhanden
Einöd	kein Trend vorhanden	kein Trend vorhanden
Reinheim	kein Trend vorhanden	kein Trend vorhanden
Eppelborn	kein Trend vorhanden	kein Trend vorhanden
Lebach	kein Trend vorhanden	kein Trend vorhanden
Nalbach	kein Trend vorhanden	kein Trend vorhanden
Filstroff-Bouzonville	signifikanter Rückgang	signifikanter Rückgang
Fremersdorf	signifikanter Rückgang	signifikanter Rückgang
Trier	signifikanter Rückgang	signifikanter Rückgang
Papiermühle	Nicht anwendbar	signifikanter Rückgang
Cochem	signifikanter Rückgang	signifikanter Rückgang

Um zeitliche Entwicklungen herauszuarbeiten, scheint sich **der Mann-Kendall-Test als sensibler zu erweisen als das Verfahren der linearen Regression**, denn einerseits bestätigt der Mann-Kendall-Test die Ergebnisse der linearen Regression, und andererseits zeigt er dort Trends auf, wo die lineare Regression keinen Unterschied macht oder nicht anwendbar ist.

Ähnlich wie bei der Analyse in Kapitel 4 scheinen die Ergebnisse der beobachteten Entwicklungstrends bei der Niedrigwasserdauer sowie beim Volumendefizit weniger aussagekräftig zu sein als bei dem Parameter NM7Q.

Es ist jedoch zu bedenken, dass, wie das Sprichwort sagt, „das Fehlen eines Beweises nicht das Fehlen an sich beweist“, da einerseits die Veränderungen je nach untersuchtem meteorologischem Parameter nicht überall mit der gleichen Geschwindigkeit oder in die gleiche Richtung zu erfolgen scheinen (zwischen dem südlichsten Pegel im Einzugsgebiet in Rupt-sur-Moselle und dem nördlichsten Pegel in Burgen liegen mehr als 260 km), und andererseits die hydrologische Reaktion nicht unmittelbar erfolgt.

ANHANG

Anhang 1: Kolmogorov-Smirnov-Test

Anhang 2: Mit einer Standardnormalverteilung verbundene Wahrscheinlichkeit

Anhang 3: Student'scher t-Test

Anhang 1: Kolmogorov-Smirnov-Test

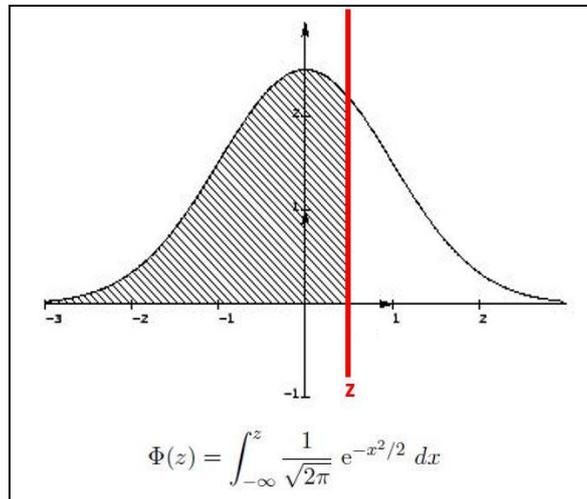
Aus der folgenden Tabelle geht der Wert von K_{Scrit} für die Anwendung des Kolmogorov-Smirnov-Tests mit einer reduzierten zentrierten Normalverteilung in Abhängigkeit von der Stichprobengröße n und dem Fehlerrisiko α hervor.

$n \setminus \alpha$	0.01	0.05	0.1	0.15	0.2
1	0.995	0.975	0.950	0.925	0.900
2	0.929	0.842	0.776	0.726	0.684
3	0.828	0.708	0.642	0.597	0.565
4	0.733	0.624	0.564	0.525	0.494
5	0.669	0.565	0.510	0.474	0.446
6	0.618	0.521	0.470	0.436	0.410
7	0.577	0.486	0.438	0.405	0.381
8	0.543	0.457	0.411	0.381	0.358
9	0.514	0.432	0.388	0.360	0.339
10	0.490	0.410	0.368	0.342	0.322
11	0.468	0.391	0.352	0.326	0.307
12	0.450	0.375	0.338	0.313	0.295
13	0.433	0.361	0.325	0.302	0.284
14	0.418	0.349	0.314	0.292	0.274
15	0.404	0.338	0.304	0.283	0.266
16	0.392	0.328	0.295	0.274	0.258
17	0.381	0.318	0.286	0.266	0.250
18	0.371	0.309	0.278	0.259	0.244
19	0.363	0.301	0.272	0.252	0.237
20	0.356	0.294	0.264	0.246	0.231
25	0.320	0.270	0.240	0.220	0.210
30	0.290	0.240	0.220	0.200	0.190
35	0.270	0.230	0.210	0.190	0.180
40	0.250	0.210	0.190	0.180	0.170
45	0.240	0.200	0.180	0.170	0.160
50	0.230	0.190	0.170	0.160	0.150
OVER 50	1.63	1.36	1.22	1.14	1.07
	\sqrt{n}	\sqrt{n}	\sqrt{n}	\sqrt{n}	\sqrt{n}

Anhang 2: Mit einer Standardnormalverteilung verbundene Wahrscheinlichkeit

Die folgende Tabelle zeigt den Wert z , der einer Wahrscheinlichkeit $\Phi(z') = 0.5 - \Phi(z)$ für eine reduzierte zentrierte Normalverteilung entspricht.

Wenn $\Phi(z) < 0.5$ ist, wird die Wahrscheinlichkeit $\Phi(z') = 0.5 - \Phi(z)$ betrachtet, z' geht aus der Tabelle hervor und es gilt $z = -z'$.

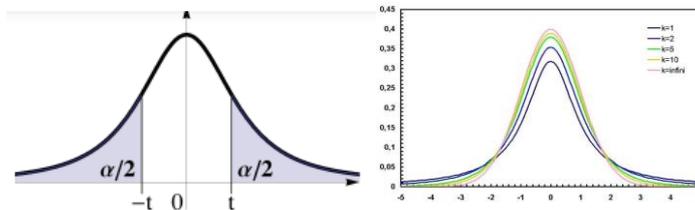


z	0.00	0.01	0.02	0.03	0.04	0.05	0.06	0.07	0.08	0.09
0.0	0.5000	0.5040	0.5080	0.5120	0.5160	0.5199	0.5239	0.5279	0.5319	0.5359
0.1	0.5398	0.5438	0.5478	0.5517	0.5557	0.5596	0.5636	0.5675	0.5714	0.5753
0.2	0.5793	0.5832	0.5871	0.5910	0.5948	0.5987	0.6026	0.6064	0.6103	0.6141
0.3	0.6179	0.6217	0.6255	0.6293	0.6331	0.6368	0.6406	0.6443	0.6480	0.6517
0.4	0.6554	0.6591	0.6628	0.6664	0.6700	0.6736	0.6772	0.6808	0.6844	0.6879
0.5	0.6915	0.6950	0.6985	0.7019	0.7054	0.7088	0.7123	0.7157	0.7190	0.7224
0.6	0.7257	0.7291	0.7324	0.7357	0.7389	0.7422	0.7454	0.7486	0.7517	0.7549
0.7	0.7580	0.7611	0.7642	0.7673	0.7704	0.7734	0.7764	0.7794	0.7823	0.7852
0.8	0.7881	0.7910	0.7939	0.7967	0.7995	0.8023	0.8051	0.8078	0.8106	0.8133
0.9	0.8159	0.8186	0.8212	0.8238	0.8264	0.8289	0.8315	0.8340	0.8365	0.8389
1.0	0.8413	0.8438	0.8461	0.8485	0.8508	0.8531	0.8554	0.8577	0.8599	0.8621
1.1	0.8643	0.8665	0.8686	0.8708	0.8729	0.8749	0.8770	0.8790	0.8810	0.8830
1.2	0.8849	0.8869	0.8888	0.8907	0.8925	0.8944	0.8962	0.8980	0.8997	0.9015
1.3	0.9032	0.9049	0.9066	0.9082	0.9099	0.9115	0.9131	0.9147	0.9162	0.9177
1.4	0.9192	0.9207	0.9222	0.9236	0.9251	0.9265	0.9279	0.9292	0.9306	0.9319
1.5	0.9332	0.9345	0.9357	0.9370	0.9382	0.9394	0.9406	0.9418	0.9429	0.9441
1.6	0.9452	0.9463	0.9474	0.9484	0.9495	0.9505	0.9515	0.9525	0.9535	0.9545
1.7	0.9554	0.9564	0.9573	0.9582	0.9591	0.9599	0.9608	0.9616	0.9625	0.9633
1.8	0.9641	0.9649	0.9656	0.9664	0.9671	0.9678	0.9686	0.9693	0.9699	0.9706
1.9	0.9713	0.9719	0.9726	0.9732	0.9738	0.9744	0.9750	0.9756	0.9761	0.9767
2.0	0.9772	0.9778	0.9783	0.9788	0.9793	0.9798	0.9803	0.9808	0.9812	0.9817
2.1	0.9821	0.9826	0.9830	0.9834	0.9838	0.9842	0.9846	0.9850	0.9854	0.9857
2.2	0.9861	0.9864	0.9868	0.9871	0.9875	0.9878	0.9881	0.9884	0.9887	0.9890
2.3	0.9893	0.9896	0.9898	0.9901	0.9904	0.9906	0.9909	0.9911	0.9913	0.9916
2.4	0.9918	0.9920	0.9922	0.9925	0.9927	0.9929	0.9931	0.9932	0.9934	0.9936
2.5	0.9938	0.9940	0.9941	0.9943	0.9945	0.9946	0.9948	0.9949	0.9951	0.9952
2.6	0.9953	0.9955	0.9956	0.9957	0.9959	0.9960	0.9961	0.9962	0.9963	0.9964
2.7	0.9965	0.9966	0.9967	0.9968	0.9969	0.9970	0.9971	0.9972	0.9973	0.9974
2.8	0.9974	0.9975	0.9976	0.9977	0.9977	0.9978	0.9979	0.9979	0.9980	0.9981
2.9	0.9981	0.9982	0.9982	0.9983	0.9984	0.9984	0.9985	0.9985	0.9986	0.9986
3.0	0.9987	0.9987	0.9987	0.9988	0.9988	0.9989	0.9989	0.9989	0.9990	0.9990
3.1	0.9990	0.9991	0.9991	0.9991	0.9992	0.9992	0.9992	0.9992	0.9993	0.9993
3.2	0.9993	0.9993	0.9994	0.9994	0.9994	0.9994	0.9994	0.9995	0.9995	0.9995
3.3	0.9995	0.9995	0.9995	0.9996	0.9996	0.9996	0.9996	0.9996	0.9996	0.9997
3.4	0.9997	0.9997	0.9997	0.9997	0.9997	0.9997	0.9997	0.9997	0.9997	0.9998
3.5	0.9998	0.9998	0.9998	0.9998	0.9998	0.9998	0.9998	0.9998	0.9998	0.9998
3.6	0.9998	0.9998	0.9999	0.9999	0.9999	0.9999	0.9999	0.9999	0.9999	0.9999

Anhang 3: Student'scher t-Test

Aus der folgenden Tabelle geht der Wert t_{crit} des Student'schen t-Tests in Abhängigkeit von der Anzahl k der Freiheitsgrade (in unserem Fall $k = n - 2$, wobei $n =$ Anzahl der Werte in der Stichprobe) und dem Quantil $\gamma = \alpha / 2$ hervor, wobei in unserem Fall $\alpha = 0.05$ das mit dem durchgeführten Student'schen t-Test verbundene Fehlerrisiko ist.

k	γ										
	0.25	0.20	0.15	0.10	0.05	0.025	0.010	0.005	0.0025	0.0010	0.0005
1	1.000	1.376	1.963	3.078	6.314	12.71	31.82	63.66	127.3	318.3	636.6
2	0.816	1.061	1.386	1.886	2.920	4.303	6.965	9.925	14.09	22.33	31.60
3	0.765	0.978	1.250	1.638	2.353	3.182	4.541	5.841	7.453	10.21	12.92
4	0.741	0.941	1.190	1.533	2.132	2.776	3.747	4.604	5.598	7.173	8.610
5	0.727	0.920	1.156	1.476	2.015	2.571	3.365	4.032	4.773	5.893	6.869
6	0.718	0.906	1.134	1.440	1.943	2.447	3.143	3.707	4.317	5.208	5.959
7	0.711	0.896	1.119	1.415	1.895	2.365	2.998	3.499	4.029	4.785	5.408
8	0.706	0.889	1.108	1.397	1.860	2.306	2.896	3.355	3.833	4.501	5.041
9	0.703	0.883	1.100	1.383	1.833	2.262	2.821	3.250	3.690	4.297	4.781
10	0.700	0.879	1.093	1.372	1.812	2.228	2.764	3.169	3.581	4.144	4.587
11	0.697	0.876	1.088	1.363	1.796	2.201	2.718	3.106	3.497	4.025	4.437
12	0.695	0.873	1.083	1.356	1.782	2.179	2.681	3.055	3.428	3.930	4.318
13	0.694	0.870	1.079	1.350	1.771	2.160	2.650	3.012	3.372	3.852	4.221
14	0.692	0.868	1.076	1.345	1.761	2.145	2.624	2.977	3.326	3.787	4.140
15	0.691	0.866	1.074	1.341	1.753	2.131	2.602	2.947	3.286	3.733	4.073
16	0.690	0.865	1.071	1.337	1.746	2.120	2.583	2.921	3.252	3.686	4.015
17	0.689	0.863	1.069	1.333	1.740	2.110	2.567	2.898	3.222	3.646	3.965
18	0.688	0.862	1.067	1.330	1.734	2.101	2.552	2.878	3.197	3.610	3.922
19	0.688	0.861	1.066	1.328	1.729	2.093	2.539	2.861	3.174	3.579	3.883
20	0.687	0.860	1.064	1.325	1.725	2.086	2.528	2.845	3.153	3.552	3.850
21	0.686	0.859	1.063	1.323	1.721	2.080	2.518	2.831	3.135	3.527	3.819
22	0.686	0.858	1.061	1.321	1.717	2.074	2.508	2.819	3.119	3.505	3.792
23	0.685	0.858	1.060	1.319	1.714	2.069	2.500	2.807	3.104	3.485	3.767
24	0.685	0.857	1.059	1.318	1.711	2.064	2.492	2.797	3.091	3.467	3.745
25	0.684	0.856	1.058	1.316	1.708	2.060	2.485	2.787	3.078	3.450	3.725
26	0.684	0.856	1.058	1.315	1.706	2.056	2.479	2.779	3.067	3.435	3.707
27	0.684	0.855	1.057	1.314	1.703	2.052	2.473	2.771	3.057	3.421	3.690
28	0.683	0.855	1.056	1.313	1.701	2.048	2.467	2.763	3.047	3.408	3.674
29	0.683	0.854	1.055	1.311	1.699	2.045	2.462	2.756	3.038	3.396	3.659
30	0.683	0.854	1.055	1.310	1.697	2.042	2.457	2.750	3.030	3.385	3.646
40	0.681	0.851	1.050	1.303	1.684	2.021	2.423	2.704	2.971	3.307	3.551
50	0.679	0.849	1.047	1.299	1.676	2.009	2.403	2.678	2.937	3.261	3.496
60	0.679	0.848	1.045	1.296	1.671	2.000	2.390	2.660	2.915	3.232	3.460
80	0.678	0.846	1.043	1.292	1.664	1.990	2.374	2.639	2.887	3.195	3.416
100	0.677	0.845	1.042	1.290	1.660	1.984	2.364	2.626	2.871	3.174	3.390
120	0.677	0.845	1.041	1.289	1.658	1.980	2.358	2.617	2.860	3.160	3.373
∞	0.674	0.842	1.036	1.282	1.645	1.960	2.326	2.576	2.807	3.090	3.291



t_{crit} und $-t_{crit}$ entsprechen den Werten, bei denen die Fläche unter der Kurve, die die Wahrscheinlichkeitsfunktion der Student'schen t-Verteilung für $x \leq -t_{crit}$ und $x \geq t_{crit}$ darstellt, gleich α ist.