

Langzeitverhalten der potentiellen Verdunstung und der klimatischen Wasserbilanz Ergebnisse aus KLIWA

Adelheid Klämt

Deutscher Wetterdienst, Geschäftsfeld Hydrometeorologie / HM2, Berlin-Buch

1. Einleitung

Die potentielle Verdunstung PET ist als Parameter des in Wasserhaushaltsprozessen wirkenden Energiedargebotes neben dem Niederschlag eine der wichtigsten Basisgrößen zur hydroklimatischen Beschreibung von Standorten bzw. Regionen; sie wird deshalb auch häufig als direkte Inputgröße in Wasserhaushaltsmodellen verwendet. Die Differenzgröße aus (korrigiertem) Niederschlag P_{kor} und der potentiellen Verdunstung, die klimatische Wasserbilanz KWB, kennzeichnet die Höhe der klimatisch bedingten Niederschlagsüberschüsse bzw. -defizite im Wasserhaushalt und ihre regionale Verteilung.

Im Rahmen eines KLIWA-Teilprojektes wurde daher in Analogie zu den Untersuchungen zum Langzeitverhalten des Gebietsniederschlags (REICH, 2000) eine flächendeckende verdunstungsklimatische Analyse anhand der potentiellen Verdunstungshöhen durchgeführt. Der zeitliche und regionale Bezug (Reihe 1931/1997, Rastergröße und Analyse-/Untersuchungsgebiete) und die Anwendung statistischer Analyseverfahren entsprechen der Vorgehensweise bei der Analyse der Niederschlagshöhen.

Nachfolgend wurden die Zeitreihen der klimatischen Wasserbilanzen $KWB = P_{kor} - PET$ für die Untersuchungsgebiete erstellt und einer entsprechenden statistischen Analyse unterzogen.

Nach Voruntersuchungen wurde ein auf dem TURC-Ansatz (s. in: DVWK, 1996) basierendes Berechnungsverfahren der potentiellen Verdunstung für die Untersuchungen in diesem KLIWA-Projekt eingesetzt. Das verwendete TURC-Modell zeigt zum einen eine gute Anpassung an den Werte- und Schwankungsbereich des PENMAN-Modells, zum anderen ist der benötigte meteorologische Dateninput auch für weiter zurückliegende Zeitreihen weitgehend verfügbar sowie mit hoher Genauigkeit ergänzbar und in die Fläche extrapolierbar.

2. Durchführung

Als Datengrundlage zur Berechnung der potentiellen Verdunstungshöhen wurden von 161 Stationen des Klimamessnetzes in Baden-Württemberg die Datenreihen der benötigten meteorologischen Messgrößen für die Zeitreihe 1931/1997 aufbereitet (Nacherfassung, Ergänzung, Prüfung der Messreihen). Durch die bearbeiteten Stationen werden das Untersuchungsgebiet Baden-Württemberg bzw. die hier auftretenden Bereiche der Geländehöhen verdunstungsklimatisch repräsentativ erfasst.

Im Interpolationsverfahren zur Erstellung von Rasterwerten der potentiellen Verdunstungshöhe wurde ein Modell eingesetzt, welches die Abhängigkeit der potentiellen Verdunstung von der Geländehöhe regional und im Jahresverlauf differenziert beschreibt (s. Abschn. 3.1). Aus den Rasterwerten der potentiellen Verdunstungshöhe wurden monatliche Gebietsmittelpunkte für die 14 hydrometeorologischen Untersuchungsgebiete im Rahmen des KLIWA-Projektes erstellt. Die Zeitreihenanalysen wurden zunächst für die in Abbildung 1 gezeigten größeren Gebietseinheiten durchgeführt (Analyseregionen: **1** Neckar/Tauber, **2** Obere Do



nau/Hochrhein, 3 Oberrhein), da für den Gesamttraum Baden-Württemberg ein näherungsweise ähnliches Langzeitverhalten der potentiellen Verdunstung angenommen werden kann.

Auf der Grundlage der für diese Analyseregionen abgeleiteten Ergebnisse wurden weitere regional differenzierte Untersuchungen anhand der Zeitreihen für die KLIWA-Untersuchungsgebiete durchgeführt.

Als Bezugsreihe der statistischen Zeitreihenanalyse der Gebietsmittelwerte konnte die Zeitreihe der potentiellen Verdunstungshöhe von der Wetterstation Karlsruhe verwendet werden. Die von dieser Station vorliegende Zeitreihe ist nach einer umfassenden statistischen Analyse als hinreichend homogen einzuschätzen (BLÜMEL, 2000); sie wurde zur Homogenitätsprüfung und ggf. zur Homogenisierung der Gebietswertereihen der potentiellen Verdunstung von den Analyseregionen bzw. Untersuchungsgebieten von Baden-Württemberg eingesetzt.

3. Ergebnisse

3.1 Höhenabhängigkeit der potentiellen Verdunstung in Baden-Württemberg

Die regionale Verteilung der potentiellen Verdunstung weist in Deutschland zwei grundlegende Aspekte auf: zum einen eine zonale Abhängigkeit, welche die zunehmende Kontinentalität des Klimas mit der Entfernung vom Atlantik widerspiegelt; zum anderen eine Abhängigkeit von der Höhe über dem Meeresspiegel. Für die regionale Interpolation der potentiellen Verdunstung in einem Einzugsgebiet ist insbesondere ihre Höhenabhängigkeit von Bedeutung, weil die zonale Veränderlichkeit in der Regel durch das Messnetz der Klimastationen ausreichend erfasst wird.

Die Höhenabhängigkeit der potentiellen Verdunstung weist einen markanten Jahresgang mit regional unterschiedlicher Ausprägung auf. In Abbildung 2 werden am Beispiel der Analyseregion 1 (Neckar/Tauber) die für die einzelnen Monate im Jahresverlauf berechneten linearen Regressionen zwischen den Stationswerten der potentiellen Verdunstung und der Höhe der Stationen über dem Meeresspiegel dargestellt. In Abbildung 3 werden die Korrelationskoeffizienten r und die Anstiege m der Regressionsgeraden für die drei Analyseregionen gegenübergestellt. Im Jahresabschnitt von November bis Februar ist aufgrund der häufigeren Inversionswetterlagen die Korrelation zwischen potentieller Verdunstung und Höhenlage am geringsten; der mittlere Höhengradient beläuft sich in allen drei Analyseregionen auf ca. $-0,5 \text{ mm}/100\text{m}$. Im Zeitraum März/Oktober wurde bei den Regionen 2 und 3 eine straffe Korrelation ermittelt. Die Korrelationskoeffizienten für die Region 1 liegen ganzjährig unter denen der beiden anderen Analyseregionen und zeigen insbesondere im Jahresabschnitt Juli/Oktober deutliche Abweichungen zu den Koeffizienten dieser Regionen. Der Höhengradient der potentiellen Verdunstung weist im gesamten Untersuchungsgebiet Baden-Württemberg einen einheitlichen mittleren Jahresverlauf mit den stärksten Abnahmen im April/Mai auf. Hinsichtlich der Beträge dieses Gradienten bestehen jedoch deutliche Unterschiede zwischen den Analyseregionen: Die größten Gradienten sind in der Region 2 (Obere Donau/Hochrhein) zu verzeichnen, wo z.B. im Juni die Abnahme der potentiellen Verdunstung $3,8 \text{ mm}$ je 100 m Höhenunterschied beträgt, während der entsprechende Gradient in der Nachbarregion 1 (Neckar/Tauber) nur $-2,5 \text{ mm}/100\text{m}$ beträgt.

3.2 Zeitreihenverhalten der potentiellen Verdunstung in Baden-Württemberg, 1931/1997

3.2.1 Homogenitätsanalyse der PET-Zeitreihen

Die Zeitreihen der PET-Gebietsmittelwerte für die o.g. 3 Analyseregionen und die im KLIWA-Projekt abgestimmten 14 Untersuchungsgebiete in Baden-Württemberg wurden zunächst auf der Grundlage absoluter und relativer Tests einer Homogenitätsprüfung unterzogen. Als Kriterien der Homogenitätsbewertung dienten die Ergebnisse der Testverfahren von ALEXANDERSSON, 1986 bzw. ALEXANDERSSON/MOBERG, 1997; BUISSAND, 1982; PETTIT, 1979. Die für die relativen Tests verwendete Referenzreihe der potentiellen Verdunstung der Station Karlsruhe hatte sich ihrerseits bei einer umfassenden Homogenitäts- und Zeitreihenanalyse als hinreichend homogen erwiesen.

Die Homogenitätstestung der PET-Gebietswertreihen erbrachte Hinweise auf einige leichte und stärkere Inhomogenitäten (Sprünge, Trends), die tlw. auch die Aussagen zur Zeitreihenentwicklung beeinflussen und deshalb durch Homogenisierung der Reihe behoben wurden.

3.2.2 Trendverhalten der jährlichen potentiellen Verdunstungshöhen

Abbildung 4 gibt am Beispiel der jährlichen Gebietsmittelwerte der potentiellen Verdunstung aus der Analyseregion 1 (Neckar/Tauber) einen Überblick über den zeitlichen Verlauf der PET im Untersuchungszeitraum 1931/1997. Zwischen 1945 und 1953 trat eine mit 9 Jahren relativ lang andauernde Jahresfolge mit überdurchschnittlich hoher potentieller Verdunstung auf. 1947 wurde mit 716 mm die höchste jährliche Verdunstungssumme in der Untersuchungsreihe (und entsprechend der PET-Reihe von Karlsruhe vermutlich auch der Höchstwert des Jahrhunderts) erreicht. Im Zeitabschnitt zwischen 1954 und 1988 sind in der Mehrzahl der Jahre unterdurchschnittliche jährliche Summen der PET zu verzeichnen. Zum Ende der Untersuchungsreihe trat von 1989 bis 1994 wiederum eine längere Periode mit erheblich überdurchschnittlichen Jahreswerten der PET auf; von der zuvor genannten, extremen Periode 1945/1953 wird sie aber sowohl bezüglich der Andauer als auch der Höhe der positiven Abweichungen vom vieljährigen Mittelwert der Untersuchungsreihe übertroffen. Der Verlauf der jährlichen Summen zeigt die hohe interannuelle Veränderlichkeit und die Schwankungsbreite der potentiellen Verdunstung - die Variabilität der jährlichen PET-Summen liegt bei 6 %. Neben den einzelnen jährlichen Werten der potentiellen Verdunstung werden in der Abbildung 4 die Tiefpass-gefilterte Zeitreihe (GAUß-Filter, $T_s = 10$ Jahre) und der lineare Trend angegeben, der für die Zeitreihe dieser Region eine nichtsignifikante Abnahme von - 0,22 mm/Jahr zeigt.

Entsprechende Auswertungen wurden für alle drei Analyseregionen sowie die kleineren Flächeneinheiten der 14, im KLIWA-Projekt abgestimmten Untersuchungsgebiete und zwar jeweils für die jährlichen und die einzelnen monatlichen Werte sowie für Jahreszeitenwerte durchgeführt.

In der Abbildung 5 werden die tiefpass-gefilterten Jahreswertreihen und die Trendgeraden der drei Analyseregionen und der Stationswertreihe von Karlsruhe gegenübergestellt. Das unterschiedliche Wertenniveau der PET-Reihen ergibt sich aufgrund der mittleren Geländehöhen der Regionen. Das höchste PET-Niveau weist die Station Karlsruhe (Stationshöhe: 130 m ü.NN) auf, die geringste PET die Analyseregion 2 (Obere Donau/Hochrhein) mit einer mittleren Gebietshöhe von 628 m ü.NN. Keiner der gezeigten Trends ist signifikant von Null verschieden - die mit Hilfe des einseitigen Mann-Kendall-Tests berechneten Signifikanzsicherheiten liegen im Bereich von 50 % bis 60 %; nur für die Region 2 ergibt sich ein höherer Signifikanzwert von 90 %. Zu bemerken ist noch, dass sich für Karlsruhe mit der geringsten Höhenlage ein leicht positiver Trendwert errechnete und die Beträge der negativen Trends der Analyseregionen mit der Höhenlage zunehmen. Auf diesen Befund der Höhenabhängigkeit der Trends wird später noch eingegangen; zunächst werden die Untersuchungsergeb



nisse zum Zeitreihenverhalten des innerjährlichen Ganges der potentiellen Verdunstung dargestellt.

3.2.3 Trendverhalten im Jahresgang der potentiellen Verdunstung

Mit Tabelle 1 wird eine Übersicht über die für die einzelnen Monatswertreihen und Jahreszeitenreihen der drei Analyseregionen berechneten linearen Trendwerte gegeben. Die Ergebnisse zeigen eine weitgehende Übereinstimmung im Zeitreihenverhalten der Regionen. Für die meisten Monate im Jahresablauf sowie für die Jahresabschnitte Frühjahr, Sommer, Herbst und das hydrologische Sommerhalbjahr (Mai-Oktober) werden fast durchweg (Ausnahme: August) negative Trends berechnet. Positive Trends sind im Wesentlichen auf den Jahresabschnitt Oktober bis Februar beschränkt; daher ergeben sich auch für den meteorologischen "Winter"-Zeitraum (Dezember-Februar) und das hydrologische Winterhalbjahr (November-April) meist positive oder nur schwach negative Trends.

Statistisch sichere Aussagen sind jedoch nur für den Monat Juni, der in allen Analyseregionen einen negativen Trend der potentiellen Verdunstung zeigt, und für den Dezember bzw. meteorologischen Winter mit positiven Trends in den Regionen 1 (Neckar-Tauber) und 3 (Oberrhein) zu treffen. Die Signifikanz dieser Trendwerte wird durch den einseitigen Mann-Kendall-Test zu größer 99 % bestimmt. Untersuchungen zur Trendstabilität (vorwärts-/rückwärtsschreitender Trend) zeigten für diese Monatswertreihen ein stabiles Trendverhalten mit hoher statistischer Sicherheit und unabhängig von der Trendlänge.

Die in der Tabelle 1 angegebenen Trends aller übrigen Monate und Jahresabschnitte weisen keine statistische Signifikanz auf; der Mann-Kendall-Test erbringt Signifikanzsicherheiten um 50 % und darunter. Die teilweise geringen Trendbeträge müssen in Relation zu den Vertrauensgrenzen betrachtet werden; daraus ergibt sich, dass nicht nur der errechnete Betrag sondern auch das Vorzeichen der Trends kritisch zu hinterfragen ist. Bei der Berechnung vor- und rückwärtsschreitender Trends für die Zeitreihen dieser Monate konnten in der Regel keine Stabilität sondern ein eher zufälliges Verhalten der Trends festgestellt werden.

Die Trendwerte für Monats- und Jahreszeitenreihen geben - ebenso wie die Trends in der jährlichen potentiellen Verdunstung (vgl. Abbildung 5) - einen Hinweis auf eine Abhängigkeit der Trends von der Höhenlage der Regionen über dem Meeresspiegel. Zur Untersuchung dieser Vermutung wurden für die beiden signifikanten Monate Juni und Dezember die in den kleineren Gebietseinheiten der 14 Untersuchungsgebiete zu verzeichnenden Trends in Abhängigkeit von der mittleren Gebietshöhe ü.NN in Abbildung 6 aufgetragen. Es zeigt sich, dass sich im Juni die Beträge der negativen Trends aller Untersuchungsgebiete in einem einheitlichen Bereich um - 0,20 bis -0,25 mm/Jahr einordnen. Die positiven Trends in den Dezember-Reihen zeigen hingegen einen Einfluss der Höhenlage der Untersuchungsgebiete. Die größten Trends sind in den unteren Gebietslagen zu finden; bis in Höhenbereiche von etwa 500 m bis 600 m ü.NN nehmen die Trendwerte ab, in größeren Gebietshöhen bleiben sie stabil. Dieser Befund korrespondiert in qualitativer Sicht mit den im Rahmen des KLIWA-Projektes erhaltenen Ergebnissen zur Schneedeckenentwicklung in Baden-Württemberg (GÜNTHER, 2000), wonach ein Rückgang der Schneedeckenparameter schwerpunktmäßig in den unteren Höhenlagen bei deutlicher Trendabschwächung mit zunehmender Geländehöhe und in den Hochlagen tlw. auch eine Trendumkehr zu verzeichnen ist.

3.3 Zeitreihenanalysen der klimatischen Wasserbilanzen von Baden-Württemberg

Für den Untersuchungsraum Baden-Württemberg wurden für die Zeitreihe 1931/1997 monatliche Gebietsmittelwertreihen der KWB einer entsprechenden nach Gebieten und Zeitabschnitten differenzierten, statistischen Analyse unterzogen wie zuvor für die Komponente potentielle Verdunstung beschrieben.

Am Beispiel der Gebietsmittelwerte der Analyseregion 2 (Obere Donau/Hochrhein) werden mit den Abbildungen 7 und 8 wesentliche Aspekte im Verhalten der klimatischen Wasserbilanzen in Baden-Württemberg beschrieben.

Abbildung 7 zeigt den Verlauf der jährlichen Niederschlags- und potentiellen Verdunstungshöhen in der Region 2 - die Fläche zwischen den beiden Kurven entspricht der Höhe der klimatischen Wasserbilanz. Unter den niederschlagsreichen klimatischen Bedingungen Baden-Württembergs treten in der Regel positive Jahreswerte der KWB auf. Die Variabilität der jährlichen Niederschlagssummen ist mit ca. 15 % deutlich höher als die der potentiellen Verdunstung (6 %). Daraus ergibt sich, dass der Schwankungsbereich und das Zeitreihenverhalten der klimatischen Wasserbilanzen im Wesentlichen durch den Niederschlag bestimmt werden und die Aussagen zum Zeitreihenverhalten des Niederschlags qualitativ auch für die klimatische Wasserbilanz gelten.

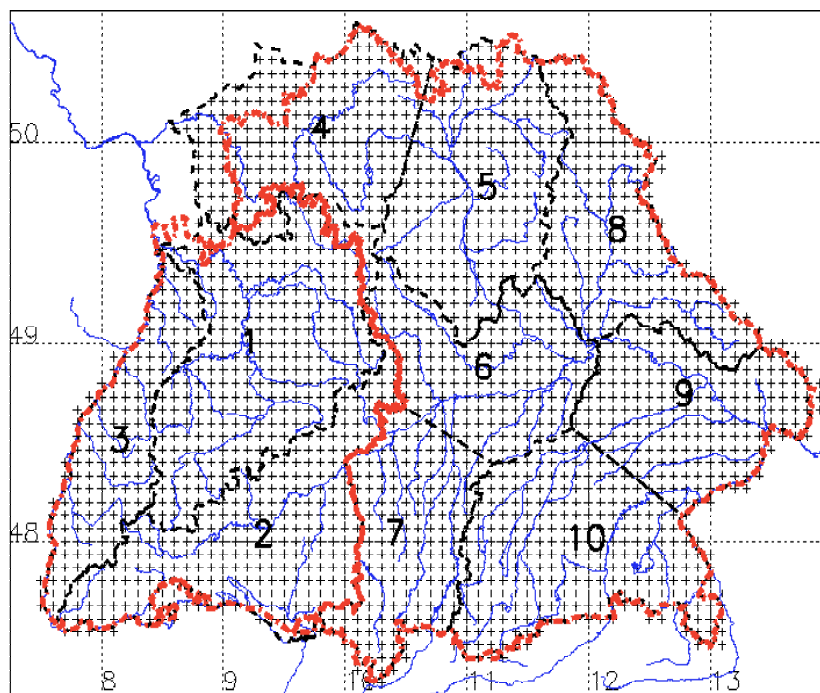
Abbildung 8 zeigt am Beispiel der Zeitreihen der Halbjahressummen der klimatischen Wasserbilanz von Winter- bzw. Sommerhalbjahr, dass die Zunahme der jährlichen Bilanzwerte im Untersuchungszeitraum 1931/1997 auf eine Zunahme im Winterhalbjahr zurückzuführen ist, während für das Sommerhalbjahr ein leichter Rückgang der klimatischen Wasserbilanzen verzeichnet wird. Als Ursache ist ein entsprechendes Verhalten in den Zeitreihen der Niederschlagshöhe der Analyseregion zu sehen, welches im Winterhalbjahr durch die abnehmende Tendenz in der Zeitreihe der potentiellen Verdunstung noch verstärkt wird.

Das beschriebene Langzeitverhalten in den Zeitreihen der klimatischen Wasserbilanz ist qualitativ im gesamten Untersuchungsraum Baden-Württemberg festzustellen.

4. Literatur

- Alexandersson, H., 1986: A Homogeneity Test Applied to Precipitation Data. J. of Climatol., **6**, 661-675
- Alexandersson, H & Moberg, A. 1997: Homogenization of Swedish Temperature Data. Part I: Homogeneity Test for Linear Trends. J. of Climatol., **17**, 25-34
- Blümel, K., 2000: Homogenitätsbewertung und statistische Analyse der Zeitreihe der potentiellen Verdunstung PET an der Station Karlsruhe Werkvertrag im Rahmen des KLIWA-Teilprojektes A1.2.1/BW
- Buishand, T.A., 1982: Some Methods for Testing the Homogeneity of Rainfall Records. J. of Hydrol., **58**, 11-27
- DVWK, 1996: Ermittlung der Verdunstung von Land- und Wasserflächen. DVWK-Merkblätter 238, Bonn
- Günther, T., 2000: Langzeitverhalten von Schneedeckenparametern. Ergebnisse aus KLIWA Symposium Klimaveränderung und Konsequenzen für die Wasserwirtschaft, 29./30. Nov. Karlsruhe
- Pettitt, A.N., 1979: A Non-parametric Approach to the Change-point Problem. Appl. Statist. **28**, No. 2, 126-135
- Reich, T., 2000: Langzeitverhalten von Gebietsniederschlägen. Ergebnisse aus KLIWA Symposium Klimaveränderung und Konsequenzen für die Wasserwirtschaft, 29./30. Nov. Karlsruhe

Grenzen und Gitterpunkte der Analyseregionen in Baden-Württemberg und Bayern



© Deutscher Wetterdienst, Geschäftsfeld Hydrometeorologie

Größe der
Analyseregionen:
10 000 - 20 000 km²

Gitterpunkt Abstand:
 \updownarrow 4' (\approx 7 km)
 \leftrightarrow 6' (\approx 7 km)

Abb.1: Grenzen und Gitterpunkte der Analyseregion in Baden-Württemberg und Bayern

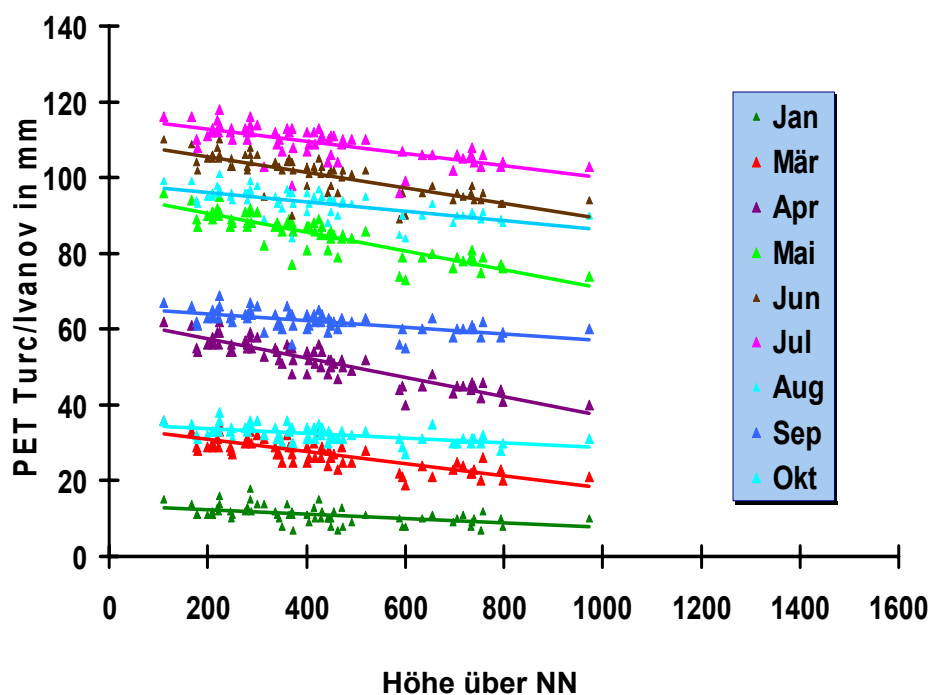
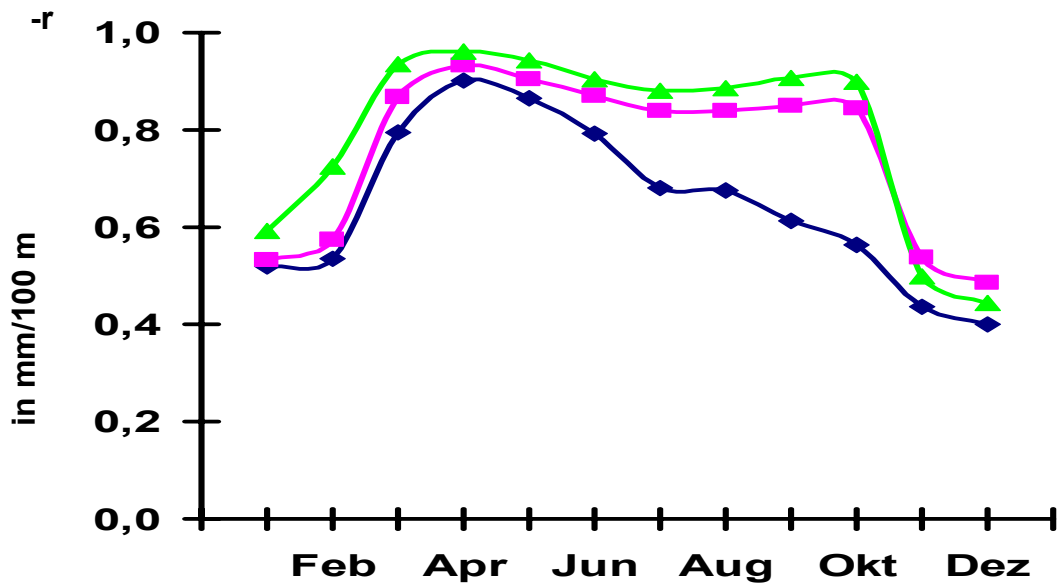
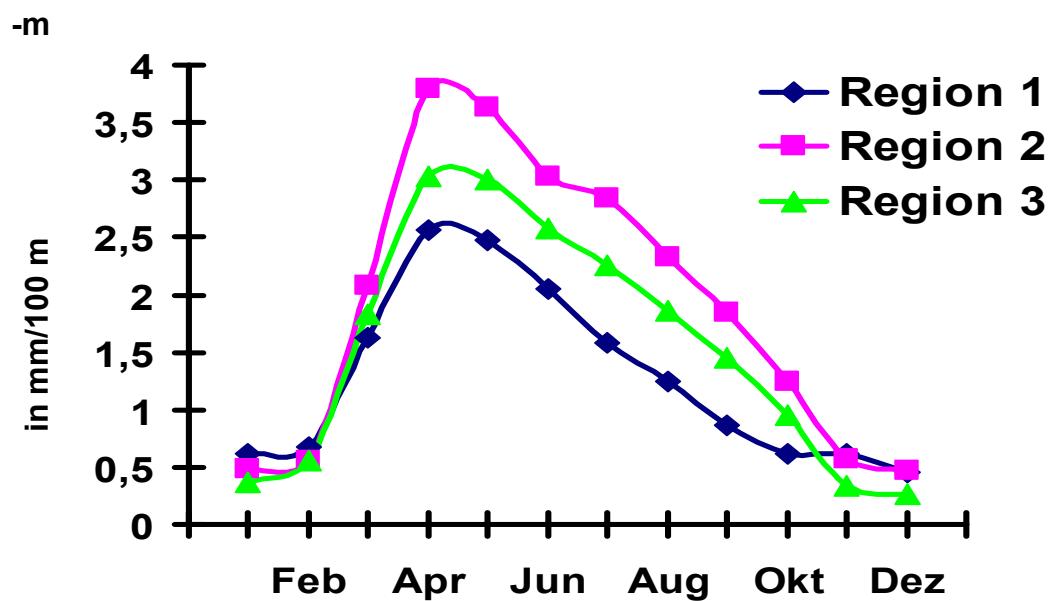


Abb.2: Höhenabhängigkeit der potentiellen Verdunstung Baden-Württemberg,
Region 1: Neckar-Tauber 1931/1997



Korrelationskoeffizient



Höhenkoeffizient

Abb.3: Mittlerer Jahresgang der Höhenabhängigkeit der Verdunstung (PET)
Baden-Württemberg 1931/1997

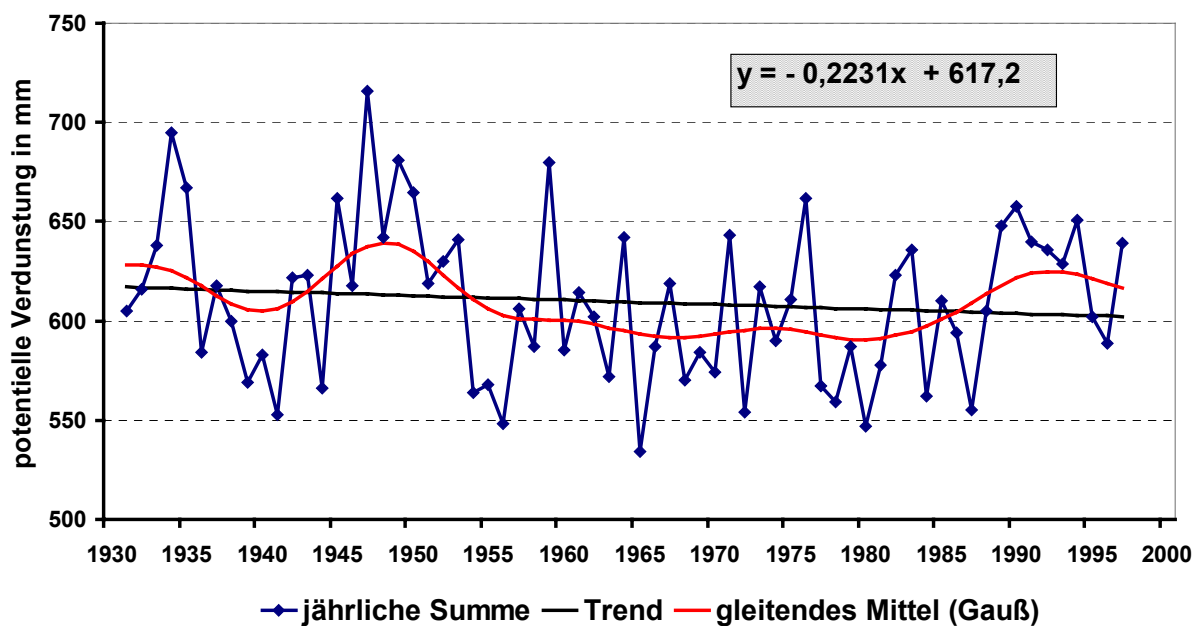


Abb.4: Jährliche Summen der potentiellen Verdunstung (PET)
Region 1 (Neckar/Tauber), 1931 bis 1997

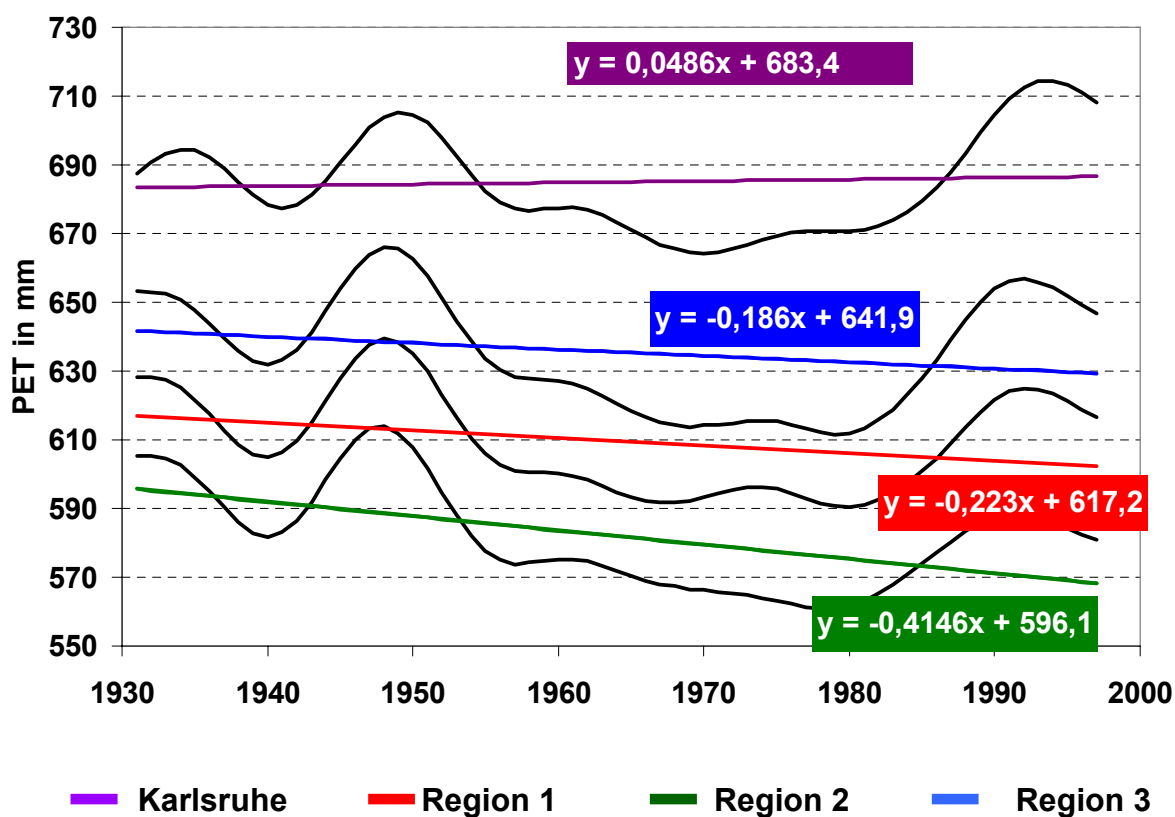


Abb.5: Trends der potentiellen Verdunstung PET in Baden-Württemberg
Vergleich der Analyseregionen, 1931 bis 1997

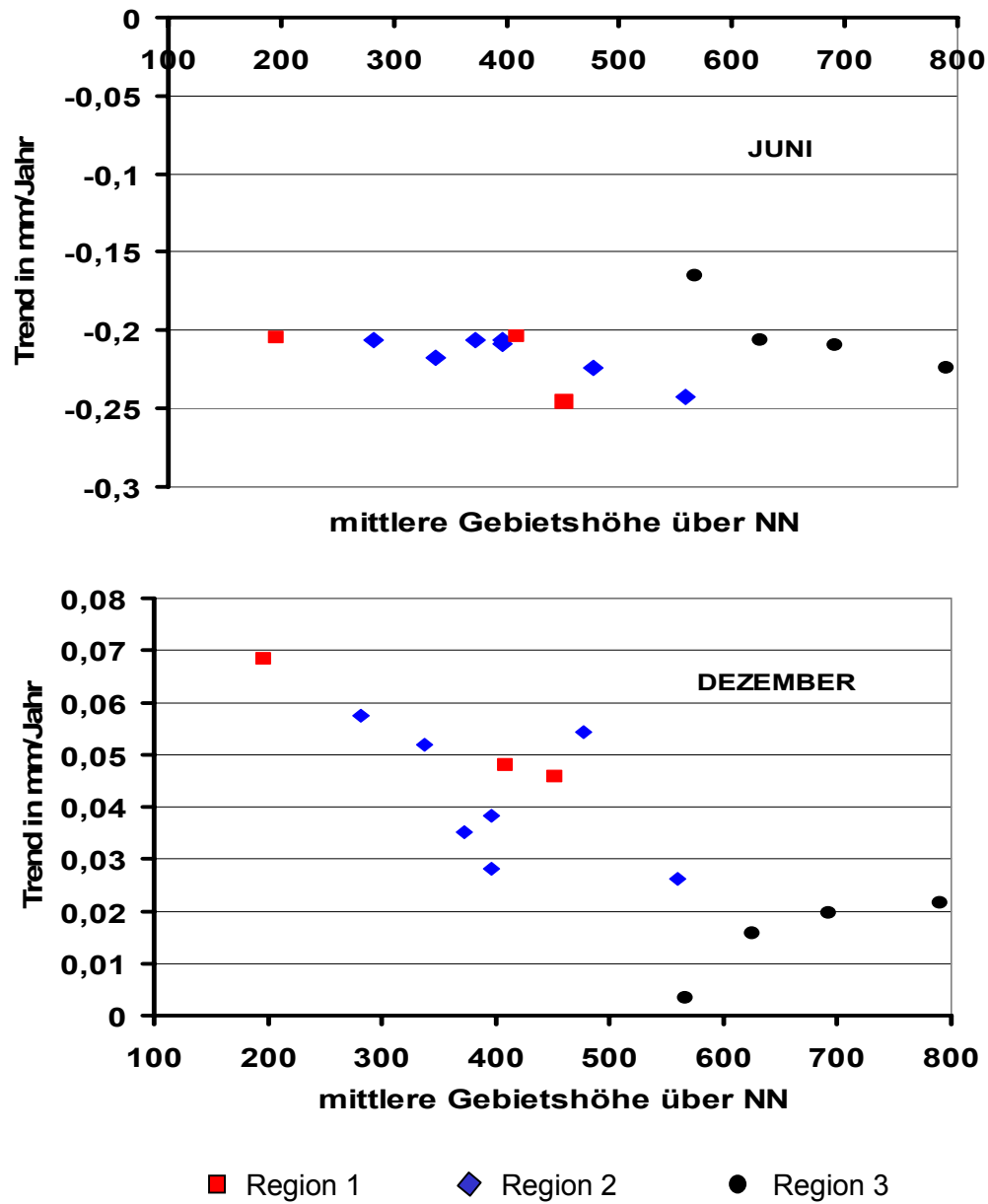


Abb.6: Trends der potentiellen Verdunstung in Baden-Württemberg
14 Untersuchungsgebiete, 1931/1997

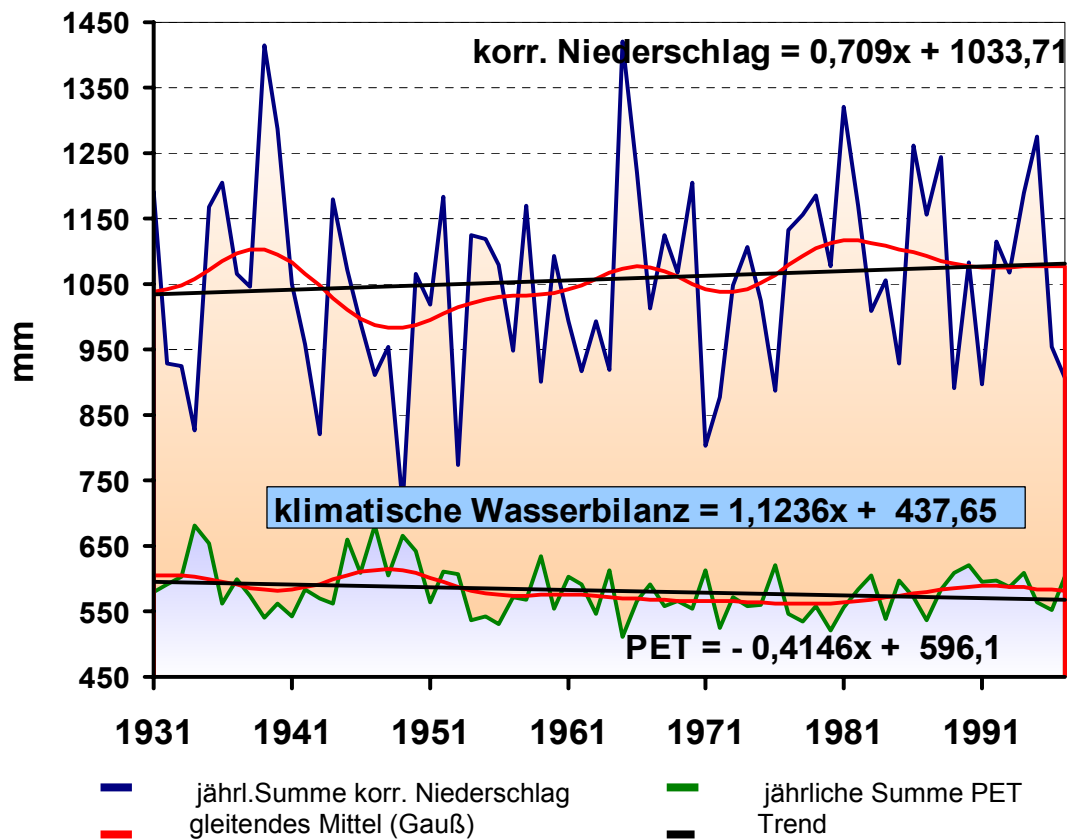


Abb.7: Korrigierter Niederschlag, potentielle Verdunstung, klimatische Wasserbilanz Region 2, Jahreswerte 1931 bis 1997

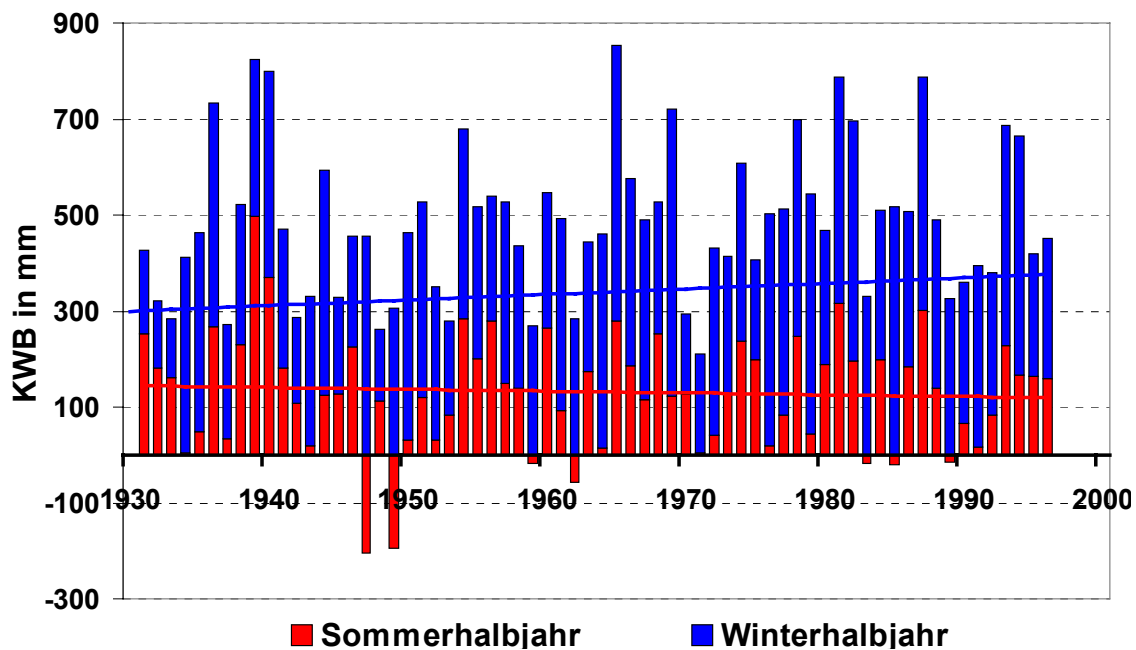


Abb.8: Klimatische Wasserbilanz (KWB) Sommerhalbjahr, Winterhalbjahr Region 2, 1931 bis 1996

	Neckar/ Tauber Region 1	Obere Donau/ Hochrhein Region 2	Oberrhein Region 3
Jahr	-0,223	-0,415	-0,186
Sommerhalbjahr	-0,231	-0,296	-0,251
Winterhalbjahr	+0,020	-0,119	+0,065
Frühjahr	-0,123	-0,180	-0,164
Sommer	-0,181	-0,196	-0,185
Herbst	-0,009	-0,050	+0,039
Winter	<u>+0,090</u>	+0,011	<u>+0,124</u>
November	+0,016	-0,006	+0,030
Dezember	<u>+0,040</u>	+0,010	<u>+0,058</u>
Januar	-0,022	-0,004	+0,026
Februar	-0,028	+0,005	+0,041
März	-0,027	-0,021	-0,031
April	-0,060	-0,103	-0,058
Mai	-0,036	-0,056	-0,075
Juni	<u>-0,215</u>	<u>-0,197</u>	<u>-0,224</u>
Juli	-0,010	+0,002	-0,005
August	+0,044	+0,000	+0,044
September	-0,042	-0,047	-0,021
Oktober	+0,016	+0,003	+0,029

fett → Signifikanz > 95% (eins. Mann-Kendall-Test)

Tab. 1 Trend der potentiellen Verdunstung in mm/Jahr Baden-Württemberg, 1931 bis 1997