Wasserwirtschaft

Klimawandel und Hochwasser

Erkenntnisse und Anpassungsstrategien beim Hochwasserschutz

Wolfgang Hennegriff, Vassilis Kolokotronis (Karlsruhe), Hans Weber (München) und Hella Bartels (Offenbach)

Zusammenfassung

Die klimatischen Bedingungen in Süddeutschland haben sich im 20. Jahrhundert – insbesondere während der letzten drei Jahrzehnte – erkennbar verändert. Die gefundenen Trends überschreiten regionalspezifisch und interannuell die bisher aus langen Messzeitreihen bekannte natürliche Schwankungsbreite bei einigen Untersuchungsgrößen. Die mittleren, aber auch die extremen Hochwasser werden voraussichtlich deutlich zunehmen, auch wenn die Ergebnisse aus der Modellkette Globalmodell – regionale Klimamodelle – Wasserhaushaltsmodelle noch mit Unsicherheiten behaftet sind. Aus Vorsorgegründen für den Bereich des Hochwasserschutzes wurde eine Anpassungsstrategie entwickelt, die zwar die mögliche Entwicklung der nächsten Jahrzehnte berücksichtigt, aber auch den Unsicherheiten Rechnung trägt.

Schlagwörter: Hydrologie, Wasserwirtschaft, Entwässerungssysteme, Hochwasser, Hochwasserschutz, Klimawandel, Niederschlag, Abfluss

Abstract

Climate Change and Floods
Insights and Adaptation Strategies for Flood Protection

In the course of the 20 th century – and during the last three decades in particular – climatic conditions in Southern Germany have changed considerably. For specific regions and in the course of one year, observed trends exceed natural variation levels, which are established on the basis of long measurement series, for some of the parameters under review. Medium but also extreme flooding events will probably increase considerably, although there are still some uncertainties regarding the results obtained from model chain used, i.e. global model – regional climate model – water management model. In order to prevent the occurrence of floods, an adaptation strategy was developed, which takes into account possible developments during the next decades as well as these uncertainties.

Key words: hydrology, water management, drainage systems, flood, flood protection, climate change, precipitation, run-off

1 Ausgangslage und Anlass

Die zahlreichen extremen und mit hohen Schäden verbundenen Hochwasser der jüngeren Vergangenheit haben sowohl in der Öffentlichkeit als auch in der Fachwelt heftige Diskussionen ausgelöst, ob diese Hochwasserereignisse im Rahmen der natürlichen Schwankungen des Klimageschehens oder als Ergebnisse einer bereits in Gang befindlichen, langfristig in die Zukunft wirkenden Veränderung des Klimas betrachtet werden müssen.

Nach den derzeitigen Prognosen der Klimaforscher wird sich das großräumige Klima über dem europäischen Raum zusätzlich zu den ohnehin natürlichen Schwankungen aufgrund anthropogener Einflüsse verändern, insbesondere wegen des steigenden CO_2-Gehaltes und anderer zunehmender Treibhausgaskonzentrationen in der Luft.

Die Klimaforscher gehen derzeit davon aus, dass sich durch den anthropogen verursachten „Treibhauseffekt" in den nächsten ca. 100 Jahren die mittlere globale Lufttemperatur um 1,4 bis 5,8 °C erhöhen wird [1]. Diese Klimaerwärmung wird

768-779.indd 770 19.07.2006 15:56:03 Uhr

Auswirkungen auf den Wasserkreislauf haben. Allgemein führt ein Temperaturanstieg zu einer Intensivierung des Wasserkreislaufs, was sich in erhöhter Verdunstung, höherer Wolkenbildung und höheren Niederschlägen äußern kann.

Die aus globalen Klimamodellen abgeleiteten Aussagen zur künftigen Klimaveränderung beziehen sich bisher im Wesentlichen auf großräumige Gebiete wie z. B. Europa. Nähere Angaben über die Auswirkungen auf das Klima und auf den Wasserhaushalt im regionalen Maßstab lagen bisher auf Ebene von Bundesländern nicht vor. Die Kenntnis über mögliche Auswirkungen eines sich verändernden Klimas auf den Wasserkreislauf, insbesondere auf eine möglicherweise zunehmende Hochwassergefährdung, liegt im originären Interesse der Bundesländer, da diese für den Hochwasserschutz zuständig sind.

Im Kooperationsvorhaben KLIWA („Klimaveränderung und Konsequenzen für die Wasserwirtschaft“) der Länder Baden-Württemberg und Bayern sowie des Deutschen Wetterdienstes werden mögliche Folgen einer Klimaveränderung auf den Wasserhaushalt in den einzelnen Flussgebieten beider Bundesländer abgeschätzt, die Konsequenzen aufgezeigt und Handlungsempfehlungen im Sinne einer vorsorgenden Wasserwirtschaftspolitik entwickelt. Die 1999 begonnenen Untersuchungen konzentrierten sich zunächst auf die bisherigen und sodann auf die künftigen klimatischen Verhältnisse. Daran knüpfen die wasserwirtschaftlichen Fragestellungen an. Bei den bisherigen Betrachtungen stand die Untersuchung einer möglichen Hochwasserverschärfung im Vordergrund.

2 Klimaentwicklung im 20. Jahrhundert

Die Untersuchung der vorhandenen langen Messreihen hydrometeorologischer und hydrologischer Größen gibt Aufschluss über die bisher beobachteten natürlichen Schwankungsbreiten und eventuell erkennbaren Veränderungen. Solche Untersuchungen sind auf der Grundlage einer großen Datenbasis im Rahmen von KLIWA systematisch für Baden-Württemberg und Bayern durchgeführt worden. Dabei ist das Langzeitverhalten der Hochwasserabflüsse, der mittleren Abflüsse, der Gebiets- und Starkniederschläge, der Lufttemperatur, der Verdunstung und der Schneedeckendauer für die Zeitreihen im 20. Jahrhundert analysiert worden.

2.1 Zunahme der Lufttemperatur

Die bodennahe Lufttemperatur spielt im Wasserkreislauf eine zentrale Rolle, da sie die Aufnahmefähigkeit für Wasserdampf in einer Luftmasse sowie die Verdunstung beeinflusst. Bei der Lufttemperatur handelt es sich um eine hydrometeorologische Größe, die im Zusammenhang mit der Klimaänderung in den Klimamodellen am besten simuliert werden kann. Insofern ist

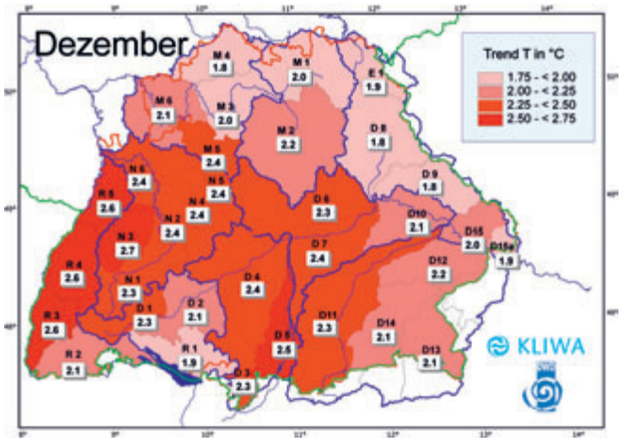


Abb. 1: Zunahme [°C] der Monatsmitteltemperatur im Dezember des Zeitraums 1931 bis 2000 in den KLIWA-Untersuchungsgebieten

die Kenntnis über die Entwicklung dieser Größe von besonderem Interesse. Nach eingehender Überprüfung aller verfügbaren Messreihen des Untersuchungszeitraums 1931 bis 2000 erwiesen sich 354 Wetterstationen für eine weitergehende Regionalisierung der Lufttemperatur als geeignet. Aus den regionalisierten Messreihen wurden für 33 Untersuchungsgebiete, die Baden-Württemberg und Bayern abdecken, Zeitreihen der täglichen Gebietsmitteltemperaturen ermittelt. Folgende bemerkenswerte Ergebnisse wurden gefunden:

- Zunahme der Jahresmitteltemperatur: zwischen 0,5 und 1,2 °C,
- Anstieg der Monatsmitteltemperatur im August: zwischen 0,7 und 1,7 °C,
- Anstieg der Monatsmitteltemperatur im Dezember: zwischen 1,8 und 2,7 °C,
- Temperaturzunahmen – wenn auch weniger deutlich als im August und Dezember – ergeben sich auch in den Monaten Januar, Februar, März und Oktober.
- Regionalspezifische Besonderheiten: z. B. Schwerpunkt der winterlichen Temperaturzunahmen in den unteren Höhenlagen; stärkere Temperaturzunahmen im Westen von Baden-Württemberg.

Die höchste Zunahme der Monatsmitteltemperatur findet in den meisten Gebieten im Dezember statt; die regionalen Größen sind aus Abbildung 1 ersichtlich.

2.2 Mildere, schneeärmere Winter

Langzeituntersuchungen der Schneedeckenverhältnisse sind beachtenswert, weil als Folge einer Klimaerwärmung auch die Schneedeckenhäufigkeit und -dauer sich sehr wahrscheinlich

d.aqua GmbH
Hindenburgstraße 11
D-59302 Oelde
Fon: +49 (0) 2522-9383-0
Fax: +49 (0) 2522-9383-23
Mail: info@d-aqua.de
www.d-aqua.de
Mobile Schlammentwässerung
✓ FLEXIBLER UND SCHNELLER EINSATZ
✓ HOCHLEISTUNGS-ZENTRIFUGE
✓ GERINGER PLATZBEDARF
✓ MAXIMALE TS-WERTE
✓ KONTINUIERLICHER BETRIEB
✓ GERINGER PERSONALEINSATZ
✓ HOHE WIRTSCHAFTLICHKEIT

768-779.indd 771 19.07.2006 15:56:04 Uhr

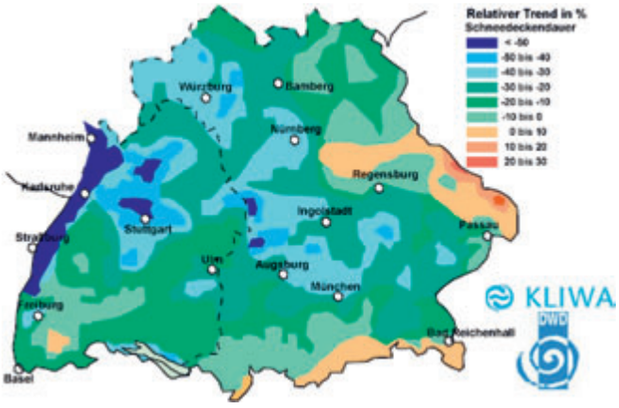


Abb. 2: Relativer Trend [Prozent] der mittleren Schneedeckendauer – Reihe 1951/52 bis 1995/96

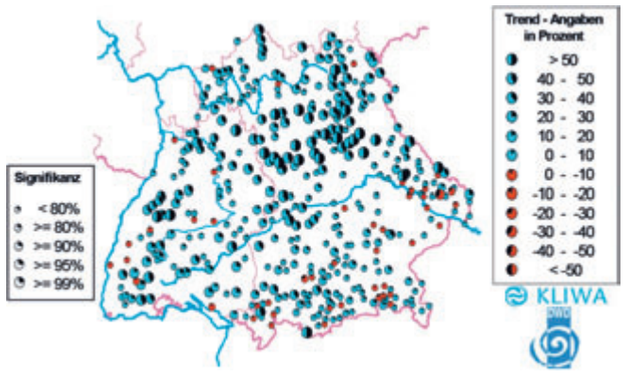


Abb. 3: Stationsbezogene Zunahme [Prozent] der Starkniederschläge von 24 h-Dauer im Winterhalbjahr während des Zeitraums 1931–2000

verändern werden. Veränderungen des Schneedeckenregimes und seiner Parameter haben Auswirkungen auf den Wasserhaushalt, insbesondere auf den Bodenwasserhaushalt, auf die Grundwasserneubildung und auf das Regime des Gebietsabflusses (Hochwasserbildung). Zur Beschreibung der Schneedeckenverhältnisse und der in der Schneedecke gespeicherten Wasservorräte sind die Parameter Schneedeckendauer, Schneedeckenzeit, Andauer der längsten Schneedeckenperiode (Winterdecke), Eintrittsdatum der maximalen Schneedeckenhöhe, Beständigkeit der Schneedecke, Erhaltung der Winterdecke und Maximalwerte des Wasseräquivalents am besten geeignet. Alle genannten Schneedeckenparameter korrelieren streng mit der Geländehöhe. Die Winterdecke lässt Rückschlüsse auf Veränderungen der Charakteristik der Winterperioden zu. Der Trend zu schneeärmeren Wintern mit weniger dauerhaften Schneedecken ist zweifelsfrei erkennbar (Abbildung 2).

Bis in die mittleren Höhenlagen gehen die Dauern allgemein verbreitet deutlich zurück. Im betrachteten Zeitraum zeigen sich allerdings einige regionale Besonderheiten. In den östlichen Teilen des Untersuchungsgebietes (östlicher Alpenbereich und Bayerischer Wald) erreicht die Abnahme in den unteren Höhenlagen (< ca. 300 m ü. NN) Beträge von 20 bis 30 Prozent bei Abschwächung mit zunehmender Geländehöhe sowie Trendumkehr (positiver Trend) in den höheren Lagen. In den westlichen Gebietsteilen (Oberrheinebene und die westliche Abdachung des Schwarzwaldes) gehen die Schneedeckendauern in den unteren Höhenlagen um ca. 50 Prozent und mehr zurück und verringern sich in den mittleren Lagen (zwischen 300 und 800 m ü. NN) auf 10 bis 20 Prozent. In den höheren Regionen (> ca. 800 m ü. NN) werden hier im Mittel Werte unter 10 Prozent beobachtet. Zwar ist auch hier eine Abschwächung des Trends mit zunehmender Geländehöhe zu verzeichnen, jedoch sind nur ganz vereinzelt Werte mit Trendumkehr zu beobachten.

2.3 Zunahme der Niederschläge

Umfangreiche und möglichst homogene Daten zum Niederschlagsverhalten sind eine wesentliche Voraussetzung zum besseren Verständnis des Zusammenwirkens von Klima und Wasserkreislauf. Zu diesem Zweck wurden die langen Niederschlagszeitreihen an allen verfügbaren Stationen in Süddeutschland mit einem geostatistischen Verfahren zu Gitterpunktniederschlägen interpoliert und tägliche Gebietsniederschlagshöhen berechnet. Statistische Kenngrößen für die Gebietstageswerte eines Monats wurden dann als repräsentative Teilstichproben ausgewertet. Die auf diese Weise gebildeten Monatswertreihen wurden danach einer detaillierten Zeitreihenanalyse unterzogen. Zur Untersuchung der Starkniederschläge wurden Stationszeitreihen verwendet. Folgende Änderungen des Niederschlagsverhaltens erscheinen besonders bemerkenswert:

- signifikanter Rückgang der Gebietsniederschläge im Sommerhalbjahr insbesondere in Nordwürttemberg und Unterfranken; im Osten Bayerns zeigen die Rückgänge nur geringe Signifikanz, in Südbayern ist eine geringfügige Zunahme zu verzeichnen,
- überwiegend signifikante Zunahme der Gebietsniederschläge im Winterhalbjahr; eine Ausnahme bildet das Alpenvorland, wo die geringfügige Zunahme statistisch nicht signifikant ist,
- regional deutliche Zunahme der Starkniederschläge um 30 bis 35 Prozent im Winterhalbjahr; im Sommer dagegen nur geringe Änderungen,
- regionale Schwerpunkte der winterlichen Starkniederschläge sind im Schwarzwald, im Nordosten Baden-Württembergs und im nordbayerischen Raum feststellbar (Abbildung 3),
- Winterhalbjahr feuchter, Sommerhalbjahr trockener.

Im Winterhalbjahr haben gerade die für die Hochwasserbildung bedeutsamen niederschlagsbringenden Westwetterlagen in Süddeutschland zugenommen, was eine gewisse Erklärung für die festgestellten Änderungen sein kann; dies ist deutlich aus Abbildung 3 ersichtlich.

2.4 Langzeitverhalten der Hochwasserabflüsse

Die Untersuchung des Langzeitverhaltens erstreckte sich auf die Ermittlung eventuell vorhandener linearer Trends in den Zeitreihen der jährlichen und monatlichen Höchstabflüsse. Den Trenduntersuchungen lagen die Jahres- bzw. Monatshöchstwerte der Abflüsse an 107 Pegeln zugrunde, die über lange Beobachtungsreihen seit mindestens 1931 verfügen. Des Weiteren wurden noch 51 Pegel mit kürzeren Zeitreihen, d. h. mit Beobachtungsbeginn nach 1932, in die Analyse einbezo-

768-779.indd 772 19.07.2006 15:56:07 Uhr

gen. Das Langzeitverhalten der Höchstabflüsse kann folgendermaßen charakterisiert werden:

- Bei Betrachtung der Jahresserien von 70 bis 150 Jahren Dauer weisen die jährlichen Höchstabflüsse beim überwiegenden Teil der Pegel keine signifikanten Veränderungen in der Höhe des Abflusses auf.
- Bei Betrachtung der letzten ca. 30 Jahre zeigen sich bei den Höchstabflüssen bei vielen Pegeln zunehmende Trends.
- Die Häufigkeit von Winterhochwasser hat seit den 70er Jahren mit Ausnahme von Südbayern zugenommen.
- Die monatlichen Hochwasserabflüsse sind im Winterhalbjahr ab den 70er Jahren höher als in der Zeit davor.

Zusammenfassend ergibt sich damit die Feststellung: Die untersuchten Abflusszeitreihen lassen nur während der letzten 30 bis 40 Jahre regional eine Zunahme bei den Hochwasserabflüssen erkennen.

2.5 Allgemeine Schlussfolgerung

Die klimatischen Bedingungen in Süddeutschland mit Auswirkungen auf den gesamten Wasserhaushalt haben sich im vergangenen Jahrhundert – insbesondere während der letzten drei Jahrzehnte – erkennbar verändert. Die gefundenen Trends überschreiten regionalspezifisch die bisher aus langen Messzeitreihen bekannte natürliche Schwankungsbreite bei einigen Untersuchungsgrößen. Die Ergebnisse legen daher als eine Erklärung den Einfluss des Menschen auf das globale und regionale Klima nahe, was in der internationalen Klimaforschung grundsätzlich nicht mehr in Frage gestellt wird. Die für Süddeutschland im Rahmen von KLIWA durchgeführten Untersuchungen decken sich insoweit mit den Tendenzaussagen vergleichbarer Studien. Insbesondere die KLIWA-Ergebnisse über die Veränderungen der Starkniederschläge waren in der Folge für den Deutschen Wetterdienst (DWD) auch Anlass, die KOSTRA-Werte als KOSTRA-DWD-2000 auf eine neue Basis zu stellen, was für die wasserwirtschaftliche Bemessungspraxis von Bedeutung sein wird.

3 Szenarien der Klimaentwicklung bis 2050

Die bisher in den Messzeitreihen festgestellten Trends der klimatologischen und hydrologischen Parameter sind nicht direkt in die Zukunft extrapolierbar, da es sich bei den Klimaprozessen und ihren komplexen Wechselwirkungen um nichtlineare und möglicherweise zeitlich veränderliche Prozesse handelt. Um Aussagen über mögliche Veränderungen des Klimas in Süddeutschland für die nächsten Jahrzehnte zu erhalten, mussten daher regionale Klimaszenarien entwickelt werden. Da es hierfür bis jetzt noch kein optimales Verfahren gibt, wurden im Rahmen von KLIWA verschiedene Institutionen beauf-

768-779.indd 773 19.07.2006 15:56:12 Uhr

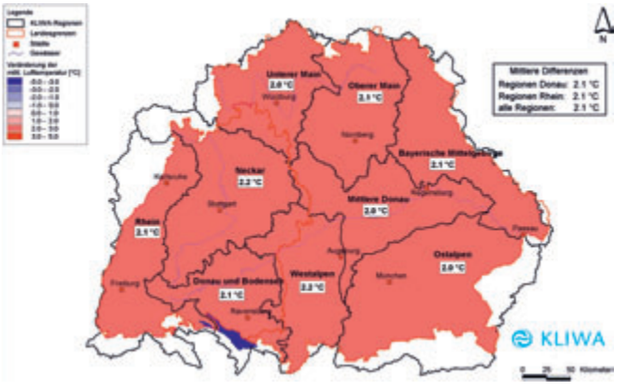


Abb. 4: Änderung der künftigen Lufttemperatur [°C] im Winterhalbjahr gegenüber heute mit Differenzen des Szenarios (2021 bis 2050) zum Ist-Zustand (1971 bis 2000)

tragt, regionale Klimaszenarien mit drei unterschiedlichen Verfahren zu erstellen, nämlich

- mit einem statistischen Downscaling-Verfahren mittels Clusteranalyse [Potsdam Institut für Klimafolgenforschung (PIK)],
- mit einem statistisch-dynamischen Downscaling mittels Wetterlagenklassifikation [Fa. Meteo-Research (MR)] und
- mit einem regionalen dynamischen Klimamodell (REMO) [Max-Planck-Institut für Meteorologie (MPI)].

Um vergleichbare Ergebnisse zu bekommen, gaben die Partner von KLIWA weitgehend identische Randbedingungen vor: Messdaten von 1951 bis 2000, Verifikationszeitraum 1971 bis 2000, Globalmodell ECHAM 4, IPCC-Emissionsszenario B2, Szenariozeitraum 2021 bis 2050.

Nach dem Vergleich und der Bewertung der Ergebnisse aus den drei Verfahren, die erwartungsgemäß eine gewisse Bandbreite bei den Ergebnissen lieferten, wurden den weiteren Auswertungen primär die Ergebnisse der Methode von Meteo-Research zugrunde gelegt. Insgesamt ist bei diesem Szenario für den Zeitraum 2021 bis 2050 festzuhalten:

3.1 Lufttemperatur

Die Lufttemperatur wird in Baden-Württemberg und Bayern auch in der Zukunft weiter deutlich zunehmen. Die Temperaturzunahme beträgt im Jahresdurchschnitt ca. 1,7 °C, im Winter ist die Zunahme mit ca. 2 °C am stärksten, und die Zunahme im Sommer beträgt ca. 1,4 °C, wie aus Abbildung 4 erkennbar ist. Die erwartete Temperaturzunahme im Winter ist von besonderer Bedeutung, da die Temperatur großen Einfluss auf die Zwischenspeicherung von Niederschlag als Schnee hat und somit entscheidend für die zukünftig zu erwartenden Abflussverhältnisse sein kann.

3.2 Sommertage und heiße Tage

Die Anzahl der Sommertage (Tage mit $T_{max} \geq 25$ °C) und der heißen Tage (Tage mit $T_{max} \geq 30$ °C) wird in Süddeutschland deutlich steigen. Die durchschnittliche Anzahl von Sommertagen ist im Zukunftsszenario gegenüber dem Ist-Zustand an allen Klimastationen um ca. 17 Tage pro Jahr höher. Auch die maximale Andauer von Perioden mit Sommertagen nimmt für

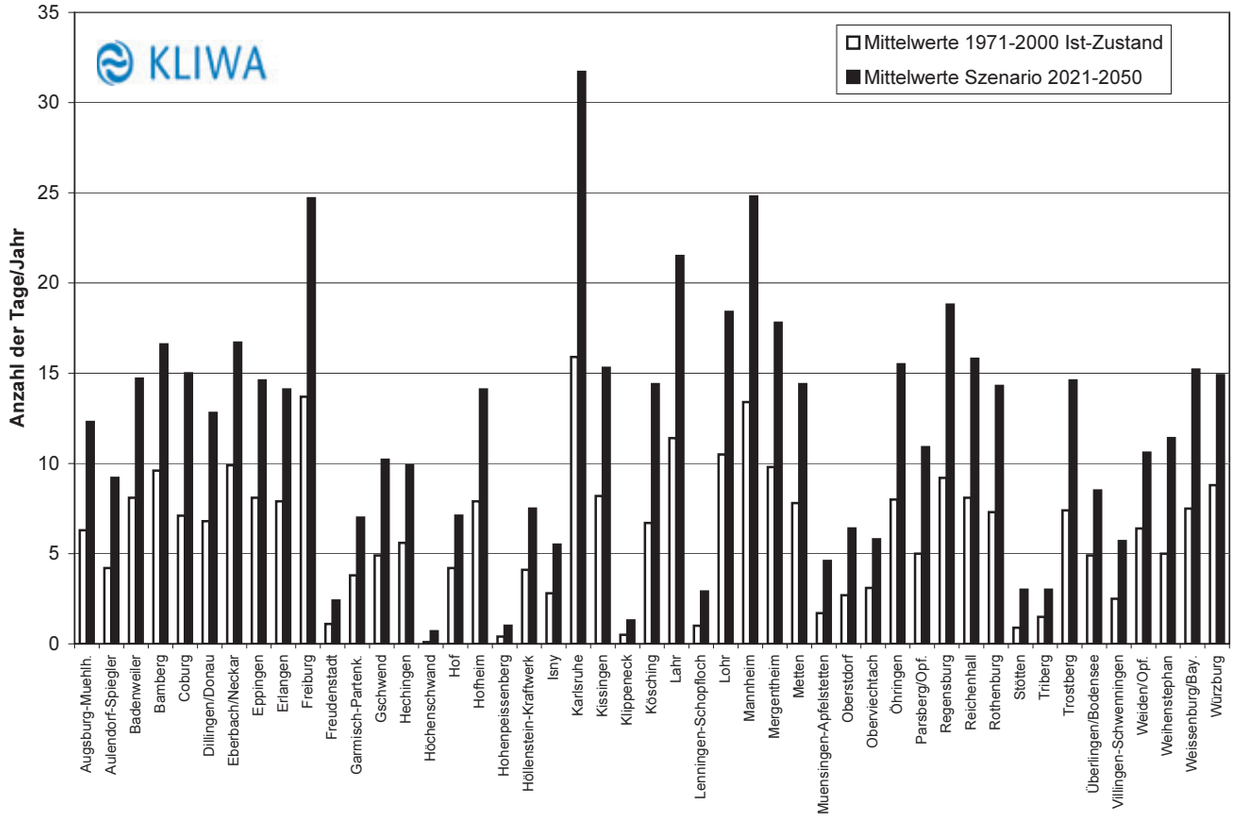


Abb. 5: Anzahl der bisherigen und künftigen heißen Tage ($T_{max} \geq 30$ °C) pro Jahr

768-779.indd 774 19.07.2006 15:56:16 Uhr

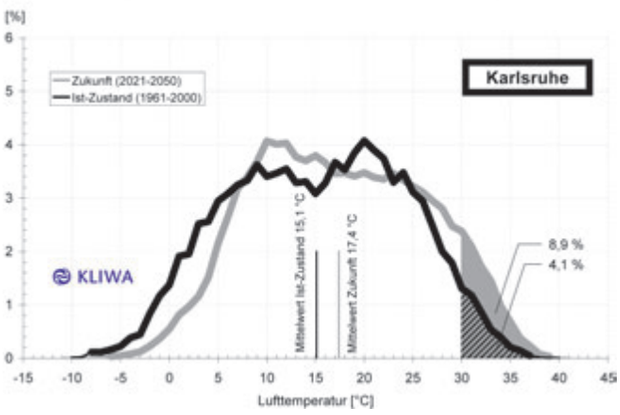


Abb. 6: Häufigkeit der Tagesmaxima der Lufttemperatur – Vergleich von Ist-Zustand mit Zukunft

Abb. 7: Änderung der künftigen Niederschlagshöhen im Winterhalbjahr gegenüber heute mit Differenzen des Szenarios (2021 bis 2050) zu Ist-Zustand (1971 bis 2000)

die Mehrzahl der Klimastationen zu. In Abbildung 5 ist die Anzahl der heißen Tage an einzelnen Klimastationen des Untersuchungsgebietes für die Ist-Zeit (1971 bis 2000) und für die Zukunft (Szenario 2021 bis 2050) dargestellt; die Anzahl wird sich danach nahezu verdoppeln.

Ebenso wird die Häufigkeit des Auftretens von extrem hohen Temperaturen künftig zunehmen. Am Beispiel der Station Karlsruhe kann man erkennen, dass bei einer Zunahme der mittleren maximalen Lufttemperatur, die im Szenario mit 2,3 °C ermittelt wurde, mehr als eine Verdoppelung der Wahrscheinlichkeit des Auftretens von Temperaturen von mehr als 30 °C zu erwarten ist (Abbildung 6).

3.3 Frost- und Eistage

Infolge der Klimaerwärmung wird die Zahl der Frosttage (Tage mit $T_{min} < 0$ °C) und auch die Zahl der Eistage (Tage mit $T_{max} < 0$ °C) deutlich abnehmen. Die durchschnittliche Anzahl von Frosttagen ist im Zukunftsszenario gegenüber dem Ist-Zustand an allen Klimastationen um ca. 30 Tage pro Jahr niedriger. Die maximale Andauer von Perioden mit Frosttagen nimmt an den meisten Klimastationen ebenfalls deutlich ab. Die Anzahl der Eistage im Zukunftsszenario ist größtenteils um mehr als die Hälfte geringer als im Ist-Zustand.

3.4 Niederschlag

Für das gewählte Zukunftsszenario betragen die Zunahmen der Jahresmittelwerte der Niederschläge ca. 8 Prozent mit einer Spannweite von ca. 4 bis ca. 17 Prozent. Die großräumigen Niederschläge werden sich im Sommer in Süddeutschland im Schnitt um ca. 4 Prozent abnehmen. Andererseits ist zu erwarten, dass die Winterniederschläge deutlich zunehmen werden (Abbildung 7). Je nach Region kann die unterschiedlich stark ausgeprägte Zunahme bis zu 35 Prozent betragen. Markant ist für die jährlichen Niederschlagssummen ein Bereich mit relativ hohen Änderungen auf dem südwestlich-nordöstlichen Halbbogen (Schwarzwald – Odenwald – Spessart – Frankenwald).

Quantitative Aussagen zur künftigen Entwicklung von konvektiven Kurzzeit-Niederschlägen (Gewitter), die für die Siedlungsentwässerung und für Hochwasser in kleinen Einzugsgebieten von Bedeutung sind, können von den verfügbaren regionalen Klimamodellen derzeit jedoch noch nicht erbracht werden.

3.5 Wetterlagen

Im Winter ist mit einer Zunahme von Häufigkeit und Dauer der für die Hochwasserbildung bedeutsamen Westwetterlagen (Westlage zyklonal) zu rechnen. Im Sommer sind keine größeren Änderungen zu erwarten.

Wir liefern schnell, zuverlässig, preiswert passend für Aerzenanlagen:

- Gummihaar-Filter für Gebläse und Kompressoren,
- Rundfilter mit Boden, Ringpackfilter,
- Gummihaarplatten,
- Synthetikfilter für Luft- und Klimaanlagen.

Umminger LUM-Air Filter GmbH
Florianstraße 12, 71665 Vaihingen/Enz
Tel.: 07042/3934
Fax: 07042/345-45
E-Mail: info@lumair-filter.de
Internet: www.lumair-filter.de

www.AQUADATA.de

Die Redox-Regelung, das Original !

Regelung der Nitrifikation / Denitrifikation
Nach- und Umrüstung bestehender Kläranlagen
Kontrolle der Schlammstabilisierung

AQUADATA Abwassertechnik GmbH
Friedrich-Seele-Straße 1b • 38122 Braunschweig
Tel.: (05 31) 50 14 52 • Fax: (05 31) 50 09 07
E-Mail: info@aquadata.de

768-779.indd 776 19.07.2006 15:56:20 Uhr

3.6 Allgemeine Schlussfolgerungen

Die Ergebnisse der weiteren Entwicklung des Klimawandels auf Basis regionaler Klimamodelle lassen sich allgemein wie folgt zusammenfassen:

- Die Erwärmung geht weiter. Die Lufttemperatur wird insbesondere im Winter weiter steigen.
- Die Niederschläge im Winter werden zunehmen.
- Auch bei Dauer und Häufigkeit von regenreichen Westwetterlagen (vor allem Westlage zyklonal), die für die Hochwasserentstehung im Winter bedeutsam sind, ist mit einer Zunahme zu rechnen.

Von diesen Veränderungen wird auch der Wasserhaushalt, insbesondere die Abflüsse in den Gewässern, künftig erheblich betroffen werden.

4 Anpassung der Hochwasserschutzplanungen

4.1 Klimawandel und Hochwasserabflüsse

Die Daten der regionalen Klimaszenarien wurden als Eingangsgrößen für die Wasserhaushaltsmodelle (WHM) verwendet, um Aussagen über die Auswirkungen der Klimaänderung auf den Wasserhaushalt (z. B. Abflüsse in den Gewässern) treffen zu können. WHM auf der Basis von LARSIM liegen flächendeckend im 1-km-Raster für Baden-Württemberg vor; in Bayern ist bisher für die Flussgebiete nördlich der Donau das Modellsystem ASGi angepasst worden. Die Wasserhaushaltsmodellierungen konzentrierten sich zunächst auf die mögliche Veränderung des Abflussgeschehens in der Zukunft, wobei zuerst die Auswirkungen bei den Hochwasserabflüssen im Blickfeld waren. Die ermittelten Abflüsse aus der Wasserhaushaltsmodellierung wurden dafür mit Methoden der Extremwertstatistik analysiert.

Die Ergebnisse lassen eine deutliche Zunahme der mittleren Hochwasser (MHQ), aber auch der extremen Abflüsse erwarten. Auch wenn die Ergebnisse aus der Modellkette (Globalmodell – regionales Klimamodell – Wasserhaushaltsmodelle) und den Modellannahmen noch mit Unsicherheiten behaftet sind, zeigen sie alle in dieselbe Richtung, so dass von einer Hochwasserverschärfung durch die Klimaveränderung für den betrachteten Zeitraum bis zum Zieljahr 2050 in Baden-Württemberg und Bayern auszugehen ist.

4.2 Anpassung der Hochwasserschutzplanungen

Vor diesem Hintergrund galt es aus Vorsorgegründen, für den Bereich des Hochwasserschutzes eine Anpassungsstrategie zu entwickeln, die zwar die mögliche Entwicklung der nächsten Jahrzehnte berücksichtigt, aber auch den bestehenden Unsicherheiten Rechnung trägt. Festlegungen sollten daher als Kernpunkt enthalten, dass sie einerseits langfristig unschädlich und gleichzeitig bei Bedarf (z. B. bei neuen Erkenntnissen der Klimaforschung) anpassbar sind („flexible and no regret"-Strategie).

Die Auswertungen gaben Anlass, den bisherigen Weg bei der Festlegung von Bemessungsabflüssen zu modifizieren und auf Grund des Klimawandels einen „Lastfall Klimaänderung" zu berücksichtigen. Anhand von Fallbeispielen aus der Praxis wurde dazu nachgewiesen, dass eine Berücksichtigung der Auswirkungen der Klimaänderung bei technischen Hochwasserschutzmaßnahmen in den meisten Fällen zu relativ moderaten Kostensteigerungen geführt hätte, wenn dieser Lastfall bereits bei der Planung berücksichtigt und beim Bau zumindest entsprechende Vorkehrungen für eine spätere Anpassung getroffen worden wären. Nachträgliche Anpassungen sind hingegen meist mit sehr hohen Kosten verbunden.

Der Lastfall Klimaänderung soll deshalb künftig bei Planungen von neuen Hochwasserschutzmaßnahmen mit untersucht werden. Dabei ist aufzuzeigen, welche Konsequenzen sich durch den Lastfall auf die Auslegung der Maßnahmen ergeben und welche Mehrkosten dadurch zu erwarten sind. Auf Grund der dann vorliegenden Erkenntnisse soll dann entschieden werden, inwieweit die notwendige Anpassung an den künftigen Klimawandel bereits jetzt bei der Ausführung berücksichtigt werden soll. Dabei sind auch Möglichkeiten für eine spätere Nachrüstung in Betracht zu ziehen. Die Anwendung des Lastfalls Klimaänderung ist für Hochwasserschutzkonzeptionen, mit deren Umsetzung bereits begonnen wurde bzw. deren Umsetzung bereits abgeschlossen ist, derzeit nicht vorgesehen.

4.3 Erhöhung der Bemessungsabflüsse

Dem Lastfall Klimaänderung müssen erhöhte Bemessungsabflüsse zugrunde gelegt werden. Dies erfolgt durch einen Zuschlag („Klimaänderungsfaktor") zum derzeit gültigen Bemessungswert (z. B. HQ_{100}). In Baden-Württemberg ergeben sich je

Neue Erkenntnisse, Methoden, Strategien und Produkte im kollegialen und interdisziplinären Austausch bei der „acqua alta 06" in Hamburg

- **für Besucher** auf der Messe, im Industrie-Forum, im EU-Forum und im RIMAX-Seminar – alles mit einer Tageskarte
- **für Kongressteilnehmer** ein 3-tägiges Kongressprogramm zu den Themen
  1. Klimafolgen
  2. Hochwasserschutz
  3. Küstenschutz
  4. Langfristige Hochwasservorsorge
  5. Medizinische Notfallvorsorge
  6. Risiko- und Katastrophenmanagement

Blockweise einzeln buchbar, inkl. Messebesuch, EU-Forum, Industrie-Forum, RIMAX-Seminar und Wetter-Forum. Preisgünstige Anreise mit Bahnspezialangebot.

Hotline: +49 (0) 30 27 59 39 66/67 · E-Mail: info@contrac-berlin.de

768-779.indd 777 19.07.2006 16:42:21 Uhr

T [a]	Klimaänderungsfaktoren $f_{T,K}$				
	1	2	3	4	5
2	1,25	1,50	1,75	1,50	1,75
5	1,24	1,45	1,65	1,45	1,67
10	1,23	1,40	1,55	1,43	1,60
20	1,21	1,33	1,42	1,40	1,50
50	1,18	1,23	1,25	1,31	1,35
100	1,15	1,15	1,15	1,25	1,25
200	1,12	1,08	1,07	1,18	1,15
500	1,06	1,03	1,00	1,08	1,05
1 000*)	1,00	1,00	1,00	1,00	1,00

*) Für Jährlichkeiten T > 1 000 a ist der Faktor gleich 1,00

Tabelle 1: Klimaänderungsfaktoren $f_{T,K}$ zur Festlegung des Bemessungshochwassers für die Bereiche bzw. Flusseinzugsgebiete in Baden-Württemberg

nach Wiederkehrzeit (Jährlichkeit T_n) regional unterschiedliche Klimaänderungsfaktoren des Abflusses.

Um die Größe des Klimaänderungsfaktors abschätzen zu können, wurden die Ergebnisse der im Rahmen von KLIWA erstellten regionalen Klimaszenarien als Eingangsgrößen für Wasserhaushaltsmodelle genutzt und die ermittelten Abflüsse aus der Wasserhaushaltsmodellierung extremwertstatistisch ausgewertet. Die Ergebnisse des Zukunftsszenarios wurden mit denen des Ist-Zustandes verglichen. Daraus wurden für verschiedene Jährlichkeiten regionale Klimaänderungsfaktoren des Abflusses festgelegt.

Zusammenfassend ergeben sich damit für Baden-Württemberg die in Abbildung 8 dargestellten fünf Bereiche mit jeweils einheitlichen Klimaänderungsfaktoren. Durch räumliche Zuordnung zu einem der fünf Bereiche stehen damit Klimaänderungsfaktoren für beliebige Untersuchungsgebiete im Land und unterschiedliche Jährlichkeiten zur Verfügung. Die entsprechenden Werte sind in Tabelle 1 zusammengestellt.

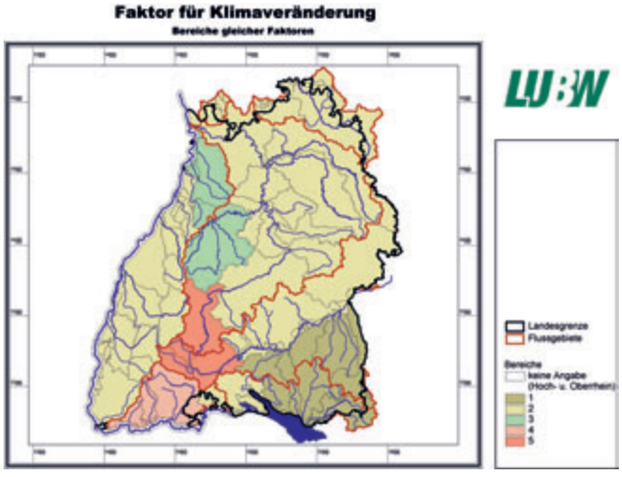


Abb. 8: Bereiche in Baden-Württemberg mit einheitlichen Klimaänderungsfaktoren $f_{T,K}$

In Bayern ist zunächst ein pauschaler Zuschlagsfaktor von 1,15 für Hochwasserabflüsse der Jährlichkeiten bis zum HQ_{100} eingeführt worden, der jedoch in begründeten Fällen auch regional modifiziert werden kann. Auch auf Grund der derzeit noch bestehenden Unsicherheiten bei den Klimamodellen und den Modellannahmen ist eine Fortschreibung der Klimaänderungsfaktoren zu gegebener Zeit vorgesehen.

Für die Abflüsse beim Lastfall Klimaänderung ($HQ_{Tn,\,K}$) können die aus der Hochwasserregionalisierung oder hydrologischen Modellberechnung vorliegenden Abflüsse HQ_{Tn} direkt mit dem Klimaänderungsfaktor $f_{T,K}$ erhöht werden:

$$HQ_{Tn,\,K} = f_{T,K} \times HQ_{Tn}$$

Im mittleren und unteren Flusseinzugsgebiet des Neckars z. B. liegt beim hundertjährlichen Hochwasserabfluss (HQ_{100}) der Klimaänderungsfaktor bei einem Wert von 1,15. Für den Lastfall Klimaveränderung wird man daher hier den Wert für HQ_{100} mit dem Klimaänderungsfaktor von 1,15 multiplizieren müssen (Tabelle 1).

Die Vorgehensweise beim Lastfall Klimaänderung bei neuen Hochwasserschutzplanungen ist in Baden-Württemberg zusammen mit Beispielen in den Leitfaden „Festlegung des Bemessungshochwassers für Anlagen des technischen Hochwasserschutzes“ mit aufgenommen worden. In Bayern wird ebenfalls ein „Lastfall Klimaänderung“ zunächst pauschal angewendet; diese Vorgehensweise ist für staatliche Hochwasserschutzplanungen mit Ministerialschreiben eingeführt. Eine vergleichbare Vorgehensweise wurde den Trägern nichtstaatlicher Vorhaben empfohlen.

4.4 Beispiele

Die nachfolgend aufgeführten Beispiele sollen verdeutlichen, wie unter dem Aspekt erhöhter Bemessungswerte, also der Berücksichtigung des Lastfalls Klimaänderung, bei der Umsetzung von Planungen vorgegangen werden kann:

- Planung eines Hochwasserdammes: Der Damm wird nach derzeitigen Vorgaben gebaut, es werden jedoch zusätzliche Maßnahmen vorgenommen, die nach bisherigen Planungsgesichtspunkten nicht erforderlich wären. Zum Beispiel wird zusätzlich ein Geländestreifen auf der Luftseite beansprucht und freigehalten, der eine zukünftig eventuell notwendige Dammerhöhung ohne zusätzliche Probleme ermöglicht.
- Neue Bauobjekte, bei denen eine zukünftige Änderung und Anpassung nicht oder nur sehr aufwändig möglich ist (z. B. Brücken), sollten sofort auf zukünftig eventuell erhöhte Bemessungsgrößen beim Wasserstand ausgelegt werden.
- Neue Bauobjekte, bei denen eine zukünftige Anpassung weniger problematisch ist (z. B. Ufermauern), sollten hinsichtlich ihrer Konstruktionsmerkmale (z. B. der Statik) über den derzeitigen Bedarf hinaus so ausgelegt werden, dass eine eventuell später notwendig werdende Anpassung (z. B. Erhöhung durch feste oder mobile Elemente) kostengünstig möglich ist.

5 Ausblick

Ausgehend von den Erkenntnissen der globalen Klimaforschung über den Klimawandel haben die Wasserwirtschaftsverwaltungen der Länder Baden-Württemberg und Bayern in Kooperation mit dem Deutschen Wetterdienst und unter Mitwirkung der Bundesanstalt für Gewässerkunde das breit angelegte

768-779.indd 778 19.07.2006 16:42:24 Uhr

Untersuchungsprogramm KLIWA begonnen. Die bisherigen Erkenntnisse haben nicht zuletzt auch unter Vorsorgegesichtspunkten bereits zu konkreten Konsequenzen geführt. Bei der Bemessung neuer Hochwasserschutzanlagen werden die erwarteten Folgen des Klimawandels bereits jetzt berücksichtigt. Die Untersuchung der Auswirkungen des Klimawandels in weiteren wasserwirtschaftlichen Bereichen, zunächst hinsichtlich der künftigen Entwicklung der Niedrigwasserabflüsse und der Grundwasserneubildung, wird derzeit angegangen.

Den KLIWA-Partnern ist dabei bewusst, dass die bislang gewonnenen Erkenntnisse noch erhebliche Unsicherheiten beinhalten. Mit den Fortschritten der weltweiten Klimaforschung und der Verbesserung der Modellierungsinstrumente werden sich die bisherigen Erkenntnisse zwangsläufig auch fortentwickeln müssen. Mit der Aufstellung von Wasserhaushaltsmodellen für die einzelnen Flussgebiete können weitere Untersuchungen verhältnismäßig einfach weitergeführt werden. Die Wasserwirtschaft hat aber bereits in der Vergangenheit bewiesen, dass sie sich an veränderte Verhältnisse anpassen kann. Letztlich bleibt der Klimawandel eine große Herausforderung.

Literatur

[1] IPCC (2001): *Climate change 2001, Summary for Policymakers,* Intergovernmental Panel on Climate Change, Cambridge University Press, Cambridge

[2] Katzenberger, B.: *Bisherige Erkenntnisse aus KLIWA-Handlungsempfehlungen*, KLIWA-Berichte, Heft 4, München

[3] KLIWA (2002): *Langzeitverhalten der Hochwasserabflüsse in Baden-Württemberg und Bayern*, KLIWA-Berichte, Heft 2, Karlsruhe

[4] KLIWA (2005): *Langzeitverhalten der Lufttemperatur in Baden-Württemberg und Bayern,* KLIWA-Berichte, Heft 5, München

[5] KLIWA (2005): *Langzeitverhalten der Schneedecke in Baden-Württemberg und Bayern* KLIWA-Berichte, Heft 6, München

[6] Ministerium für Umwelt und Verkehr Baden-Württemberg (2005): *Klimawandel in Baden-Württemberg,* Pressemitteilung vom 4. März 2005

[7] Bremicker, M. (2000): *Das Wasserhaushaltsmodell LARSIM – Modellgrundlagen und Anwendungsbeispiele*, Freiburger Schriften zur Hydrologie, Band 11, Institut für Hydrologie der Universität Freiburg

[8] Landesanstalt für Umweltschutz Baden-Württemberg (2005): Leitfaden *„Festlegung des Bemessungshochwassers für Anlagen des technischen Hochwasserschutzes“*, Karlsruhe

[9] Straub, H.: *Langzeitverhalten von hydrologischen Größen*, KLIWA-Berichte, Heft 4, München

Autoren

Dipl.-Ing. Wolfgang Hennegriff, Dipl.-Ing. Vassilis Kolokotronis
Landesanstalt für Umwelt, Messungen und Naturschutz Baden-Württemberg
Griesbachstraße 1, 76185 Karlsruhe
E-Mail: Wolfgang.Hennegriff@lubw.bwl.de

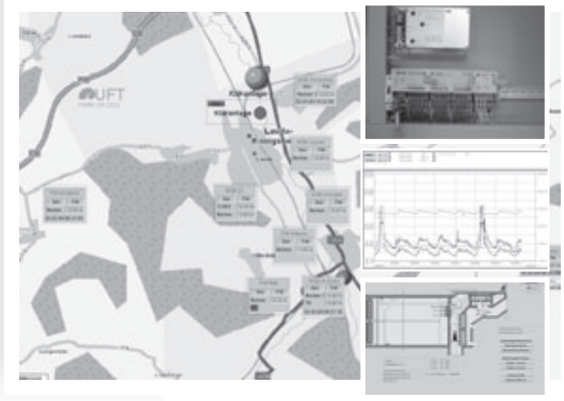
Dipl.-Ing. Hans Weber
Bayerisches Landesamt für Umwelt
Lazarettstraße 67, 80636 München

Dipl.-Met. Hella Bartels
Deutscher Wetterdienst
Kaiserleistraße 44, 63067 Offenbach

UFT

Fernwirkanlage FW
Überwachung und Steuerung

Überwachung und Fernsteuerung mehrerer Regenwasserbehandlungsanlagen von einer Zentrale aus über Stand-, Wählleitung, GSM-Netz, GPRS oder Funk.
Zertifizierter Schraml Aqasys Solution Provider.



UFT
Umwelt- und Fluid-Technik
Dr. H. Brombach GmbH

Steinstraße 7
97980 Bad Mergentheim
Telefon: +49 7931 9710-0
Telefax: +49 7931 9710-40
Internet: www.uft-brombach.de

Tagung

DWA

Anthropogene Spurenstoffe im Wasser
Pharmaka und endokrin wirksame Substanzen

Ergebnisse des Konzeptpapiers der DWA
und der Wasserchemischen Gesellschaft

Termin: 29. und 30. November 2006

Ort: Berlin
Best Western Hotel Steglitz International

Anmeldung und weitere Informationen: www.spurenstoffe.de

Technische Universität Berlin
Institut für Technischen Umweltschutz

FSP WIB
bfg
KOMPETENZZENTRUM Wasser Berlin
ECT

768-779.indd 779 19.07.2006 16:42:31 Uhr