

Heft 118 Hydrological Consequences of
Land Use / Land Cover and
Climatic Changes in Mesoscale
Catchments

von

Dr.-Ing.

Luis E. Samaniego Eguiguren

Hydrological Consequences of Land Use / Land Cover and Climatic Changes in Mesoscale Catchments

Von der Fakultät Bau- und Umweltingenieurwissenschaften der Universität Stuttgart zur
Erlangung der Würde eines Doktor-Ingenieurs (Dr.-Ing.) genehmigte Abhandlung

von

Luis Eduardo Samaniego Eguiguren

aus Loja, Ecuador

Hauptberichter: Prof. Dr. rer. nat. Dr.-Ing. András Bárdossy

Mitberichter: Prof. Dr. sc. pol. Peter Treuner

Tag der mündlichen Prüfung: 13. Februar 2003

Die Deutsche Bibliothek – CIP-Einheitsaufnahme

Samaniego Eguiguren, Luis Eduardo:

Hydrological Consequences of Land Use / Land Cover and Climatic Changes
in Mesoscale Catchments / von Luis Samaniego.

Institut für Wasserbau der Universität Stuttgart .

- Stuttgart: Inst. für Wasserbau, 2003

(Mitteilungen / Institut für Wasserbau, Universität Stuttgart; H. 118)

Zugl.: Stuttgart, Univ. Diss., 2003

ISBN 3-9337 61-21-2

NE: Institut für Wasserbau <Stuttgart >: Mitteilungen

Gegen Vervielfältigung und Übersetzung bestehen keine Einwände, es wird lediglich um
Quellenangabe gebeten.

Herausgegeben: 2003 vom Eigenverlag des Instituts für Wasserbau

Druck: Sprint Druck, Stuttgart

Preface

This volume contains the thesis of Luis Samaniego. It is the result of an informal cooperation between the Institute of Regional Development Planning and the Institute of Hydraulic Engineering of the University of Stuttgart. The topic of the work – the quantification of the effects of land use and land cover changes on the hydrological cycle for regional planning made an interdisciplinary treatment indispensable. A pure hydrological treatment of the problem often remains a scientific exercise. On the other hand, decision-making without knowing their quantitative effects can lead to unnecessary risks and sub-optimal solutions. Therefore, a decision oriented hydrological treatment of the problem is required.

The purpose of this work is to develop a general methodology to assess the water balance related consequences of land use and land cover changes using regional characteristics. The model should enable the user to quantify the effect of any planned land use change on selected characteristics of the discharge series, such as mean values or extremes.

The scientific method of this work is to build models which quantify the effects of past and ongoing land use changes from observations and to use these for future extrapolation. There are sufficient cases for such studies as the landscape has already been strongly influenced by human activities in large parts of the world. Settlements and highways have been built and large areas are occupied by agriculture. Even forests are often cultivated and not left in a natural state. These non-natural conditions have already substantially influenced the local water cycle. For example, the increase of settlement areas leads to an increase of sealed surfaces and often causes more surface runoff. Agricultural plants are often seasonal, and have a strong influence on evapotranspiration. The sum of all possible effects is a changed water balance. The consequences can be more frequent floods and/or water shortages too. In several parts of the world, land use is changing rapidly and negative consequences were only recognized after irreversible changes occurred. The Neckar catchment was used to develop and to test the methodology. The results are very encouraging, and the methodology seems to be transferable to other regions as well.

Stuttgart, April 20, 2003

András Bárdossy

Table of Contents

List of Figures	v
List of Tables	ix
List of Symbols	xi
Acronyms and Abbreviations	xix
Acknowledgement	xxi
Zusammenfassung	xxii
Chapter 1	
Introduction	1
1.1 Description of the problem	1
1.2 The complexity of modelling the water system at the mesoscale level	5
1.3 Empirical quantifications	8
1.4 Research question and objectives	9
Chapter 2	
Foundations of the Study	10
2.1 Introduction	10
2.2 General description of the Study Area	11
2.3 Conceptualisation of the runoff process at the mesoscale level	13
2.4 Spatial units	15
2.5 Physiographical factors	16
2.5.1 Basin's area [km ²]	17
2.5.2 Mean slope [°]	17
2.5.3 Median of the slope [°]	18
2.5.4 Trimmed mean of the slope [°]	19
2.5.5 Mean stream slope [°]	19
2.5.6 Mean slope of the areas located at the floodplains and riparian land of the stream network [°]	20
2.5.7 Drainage density [1/km]	21
2.5.8 Shape factor [-]	22
2.5.9 Fraction of north- and south facing slopes [-]	22
2.5.10 Mean basin elevation and difference between maximum and minimum altitudes [m]	23
2.5.11 Fraction of saturated areas [-]	24

2.5.12	Mean field capacity [mm]	26
2.5.13	Fraction of karstic formations [-]	26
2.6	Land-use and land-cover	27
2.6.1	The land cover time series	30
2.6.2	Fraction of a given land cover [%]	32
2.7	Climatic or meteorological factors	33
2.7.1	Precipitation	33
2.7.2	Temperature	40
2.7.3	Circulation Patterns [-]	43
2.8	The system's output: runoff	46
2.8.1	Specific runoff [mm]	47
2.8.2	Characteristics of high flows	48
2.8.3	Characteristics of low flows	51
Chapter 3		
Parametric modelling of the runoff process		54
3.1	Basic principles	54
3.2	Defining the formal system	55
3.3	Modelling the long-term mean of the annual specific discharge	57
3.3.1	Introduction	57
3.3.2	Modified forward selection	60
3.3.3	Modified backward elimination	61
3.3.4	Building all combinations	62
3.3.5	Selection of the best models using Mallows' C_{pk} statistic	63
3.3.6	Model validation	64
3.3.7	Significance test	65
3.3.8	Analysis of results	69
Chapter 4		
Modelling characteristics of the runoff process with time-dependent data		75
4.1	Annual specific discharge	75
4.1.1	Description of time-dependent variables	75
4.1.2	Assessing the dimensionality of the system	76
4.1.3	Finding a robust model	80
4.1.4	Selecting a robust model for winter	83
4.1.5	Selecting a robust model for summer	88
4.1.6	Visualizing the effects of land cover change on annual runoff	92
4.2	Specific peak discharge	94
4.2.1	Description of some time-dependent variables employed	94
4.2.2	Selecting a robust model for winter	95
4.2.3	Selecting a robust model for summer	100

4.3	Specific volume of the annual peak event	105
4.4	Specific volume and total duration of high flows	109
4.5	Frequency of high flows	112
Chapter 5		
Modelling characteristics of low-flows with time-dependent data		119
5.1	Introduction.....	119
5.2	Description of time-dependent variables	120
5.3	Total drought duration	122
Chapter 6		
An integrated approach to assess the impacts of climatic and land use/cover changes on the hydrological cycle at the mesoscale level		126
6.1	Introduction.....	126
6.2	Model structure	127
6.2.1	A simple land use/cover change model.....	127
6.2.2	Stochastic simulation	130
6.3	Model implementation.....	132
6.3.1	Special Study Area.....	132
6.3.2	Calibration and validation of the LUCC model	133
6.4	Development scenarios for the Special Study Area.....	135
6.4.1	Socio-economic scenarios.....	135
6.4.2	Macroclimatic scenarios	138
6.4.3	Assembling the development scenarios	140
6.5	Simulation results.....	143
Chapter 7		
Sensitivity analysis		148
7.1	Introduction.....	148
7.2	Sensitivity of parameters to catchment size.....	148
7.3	Model sensitivity to a given parameter	150
7.4	Convergence of the Monte Carlo simulations.....	152
Chapter 8		
Discussion and conclusions		154
8.1	Discussion	154
8.2	Conclusions.....	158
References		159
Appendix		171

List of Figures

Abbildung 1	Lage des Einzugsgebietes des Oberen Neckars in Baden-Württemberg.....	xxvi
Abbildung 2	Links: Besonderes Testgebiet (Einzugsgebiet der Körsch) in der Nähe von Stuttgart. Rechts: Ergebnisse einer Simulation des LUCC-Modells für das Szenario S1 im Jahr 2025.....	xxix
Figure 1.1	Interactions between anthropogenic activities and the natural system.	3
Figure 1.2	Mechanism of land use/cover changes induced by underlying human driving forces along the time axis.....	4
Figure 2.1	Map showing the location of the Upper Neckar Catchment within the State of Baden-Württemberg, Germany.	11
Figure 2.2	Relative growth ratio of population, car ownership, employment, and share of urban space (i.e. residential areas, commerce, manufacturing, and transportation) expressed in percentage. The base year for all indicators is 1974 (SLA).	12
Figure 2.3	Land cover changes observed in the Upper Neckar Basin from 1960 to 1993. (Sources: for 1960: topographic maps of the area at scale 1:25000 from LVA; for 1975, 1984 and 1993: LANDSAT TM scenes).	13
Figure 2.4	Schematic representation of the evolution of the system within a spatial unit i along the time axis t	15
Figure 2.5	Subcatchments and stream network delineated from a corrected DEM (30x30 m LfU).	16
Figure 2.6	Comparison between the area of a given watershed estimated from a corrected DEM and its official drainage area (from LfU).	17
Figure 2.7	Slope map in [°] for the Study Area derived from a DEM (LfU).	18
Figure 2.8	Drainage network of the Study Area derived from a DEM (30x30 m LfU) and a threshold value of 300 cells.	20
Figure 2.9	Sample of land cover and land use changes along floodplains and riparian zones along the main streams of river Körsch.	21
Figure 2.10	Aspects map in [°] for the Study Area derived from a DEM (30x30 m LfU).	23
Figure 2.11	Topography of the Study Area represented by a DEM (LfU).	24
Figure 2.12	Topographic index derived according to the method proposed by Beven and Kirkby (1979) for the subcatchment No. 36 located in the Study Area.	25
Figure 2.13	Main soil types and their associated field capacity in [mm] in the Study Area.	26
Figure 2.14	Main geological formations of the Study Area. The karstic formation corresponds to Limestone-Jura (LfU).....	27

Figure 2.15	Land use time series in percentage for the Upper Neckar Basin from 1981 to 1997. These results were obtained by aggregating land use data for 213 Municipalities located within the catchment.	28
Figure 2.16	Comparison between the area of all municipalities within the Study Area for three different land cover types estimated from a classified LANDSAT TM image.	29
Figure 2.17	Time series of the land cover of the Study Area from 1960 to 1993. (LVA, LANDSAT).	31
Figure 2.18	Correlograms of daily (left panel) and annual (right panel) precipitation for two basins with different sizes in the Study Area.	34
Figure 2.19	Meteorological stations located in the State of Baden-Württemberg and its neighbouring States used in this study (Source LfU and DWD).....	34
Figure 2.20	Experimental variogram for the annual average precipitation for the State of Baden-Württemberg.	36
Figure 2.21	Spatial distribution of annual precipitation with in the Study Area for the years 1963, 1973, 1983 and 1993.	38
Figure 2.22	Sample of the spatial distribution of the mean temperature in January in the Study Area for the years 1961, 1971, 1981 and 1990 (Source data DWD).	41
Figure 2.23	Comparison of the daily development of the API and ATI for catchment No. 3 during the water year 1980.	42
Figure 2.24	Time series showing the absolute frequency of occurrence of CPs classified as “dry periods” within the Study Area during summer.	45
Figure 2.25	Autocorrelation functions of daily (left panel) and annual (right panel) discharge for three basins within the Study Area.	47
Figure 2.26	Schematic representation of a hydrograph depicting a peak flow occurring in winter.	49
Figure 2.27	Schematic hydrograph depicting the occurrence of low flow spells.	52
Figure 3.1	Identification of the best model using the C_{p^*} plot.....	64
Figure 3.2	Histograms depicting the empiric PDF of all physiographic explanatory variables considered in this study.	69
Figure 3.3	Histograms depicting the empiric PDF of the land cover and meteorological variables.	70
Figure 3.4	C_{p^*} vs. p^* plot showing the best 5 models.	71
Figure 3.5	Scatterplot showing the relationship Q_{obs} vs. Q_{cal} using the model (No. 1035).....	74
Figure 4.1	Histograms depicting the empiric PDF of the land cover types for all spatial units ($\mathcal{L}_i \subseteq \Omega_i$) from 1961 to 1993 (Number of observations for each histogram = 184).	76
Figure 4.2	Histograms depicting the empiric PDF of climatic factors and specific discharge for all spatial units from 1961 to 1993.	77
Figure 4.3	Curve showing the relative variance retained by the k first eigenvectors of the matrix $[\mathbf{R}]$ for winter	79

Figure 4.4	Curve depicting the non-linear relationship between the Mallows' C_p^* statistic and the AIC.....	84
Figure 4.5	At the left panel, a scatterplot shows the relationship between observed and calculated values using model No. 3733 for winter.....	87
Figure 4.6	The left panel shows a plot of the standardized residuals for winter obtained with model No. 3733 versus time.....	88
Figure 4.7	The left panel shows a scatterplot of the observed values versus calculated ones for summer obtained with model No. 3965.....	92
Figure 4.8	Comparison of time series of land cover, precipitation and specific discharge in winter and summer for Basin No. 13.....	93
Figure 4.9	Histograms depicting the empiric PDFs for both maximum API and ATI indices for winter (left panel) and summer (right panel).....	95
Figure 4.10	Scatterplot of residuals shows a clear heteroscedasticity of the errors with respect to variable x_{28} and the estimated values \hat{Q}_4 using model No. 1308.	98
Figure 4.11	The left panel shows a scatterplot of residuals obtained for model No. 1308 using the estimator described by (4-20) and (4-21).....	99
Figure 4.12	Scatterplots of residuals of model No. 3954 before (left panel) and after (right panel) the heteroscedasticity of the errors with respect to variable x_{29} has been removed.....	102
Figure 4.13	PDF showing the likelihood of a given place to endure a land cover change based on its slope and elevation.....	104
Figure 4.14	This scatterplot shows the relationship between calculated and observed specific peak flows using the potential model No. 3954.	105
Figure 4.15	Histogram depicting the PDF of the cumulative specific discharge of annual peak event (Q_6)	106
Figure 4.16	Comparison of time series showing the variability of the explained variable (Q_6) and two climatic factors (x_{26}) and (x_{27}).	107
Figure 4.17	Histograms depicting the empiric PDFs for both total duration of high flows in winter (left panel) and summer (right panel).....	110
Figure 4.18	Empirical and fitted CDFs for both frequency of high flow events in winter (left panel) and summer (right panel).....	113
Figure 4.19	Plot showing the variation of the dispersion of the explained variable Q_{12} (observed and calculated by model No. 3052) as a function of the predictor x_{40}	118
Figure 5.1	Annual water balance of the Study Area. Each value is computed over the period 1961 to 1993.	120
Figure 5.2	Time series showing the trends (by means of a 5-year running average) and the actual values for variables Q_{13} , Q_{14} , and Q_{15}	121
Figure 5.3	Q-Q plot showing the fit of a Weibull (a, b) distribution to both the observed and the calculated total drought duration.....	125
Figure 6.1	Model structure showing the main objectives, required inputs, and outputs for each module.	128

Figure 6.2	Special Study Area for the land use and cover change simulation model.....	132
Figure 6.3	Land use/cover forecast based on Scenario S1 conditions for Special Study Area as a whole (total area 126.3 km ²)....	136
Figure 6.4	Land use/cover forecast based on Scenario S2 conditions for the Special Study Area as a whole.	137
Figure 6.5	Reconstruction of the Northern Hemisphere average temperature anomaly for the past millennium according to Mann et al. 1999(2)....	138
Figure 6.6	Relationship between the atmospheric CO ₂ concentrations and the temperature anomalies in the Northern Hemisphere up to 1998....	139
Figure 6.7	Historical records for total winter discharge (Q_2) in the Special Study Area from 1961 to 1993....	144
Figure 6.8	Deviations in percent of the mean of the simulated variables with respect to the respective historical mean....	145
Figure 6.9	Time series of land cover in the Special Study Area from 1960 to 1993....	146
Figure 6.10	Sample from the land use/cover simulations showing the evolution of impervious cover in the Special Study Area based on socio-economic scenario S1....	147
Figure 6.11	Probability that the land use/cover of a given location will be transformed to impervious cover up to the year 2025 based on the socio-economic scenario S1. (The sample size for each cell is 2500).	147
Figure 7.1	Parameter sensitivity to catchment size for the multi-linear potential model (No. 3733) selected for the annual specific discharge in winter Q_2	149
Figure 7.2	Relationship between $\partial \hat{Q}_{ii}^t / E[\hat{Q}_{ii}^t]$ and $\partial \beta_j / \hat{\beta}_j$ for model No. 3965....	151
Figure 7.3	Sensitivity of the p -value with respect to the number of replicate simulations.....	152
Figure 7.4	Histogram of $R = 5000$ Monte Carlo replicates of the estimator Φ for the model No. 3733....	153

List of Tables

Tabelle 1	Durchschnittliche relative Veränderung jeder simulierten Variablen pro Dekade (in %) (Bezugsjahr 1994).....	xxx
Table 2.1	Correspondence of land use and land cover categories at the Municipal level.	29
Table 2.2	Classification of circulation patterns (CPs) for winter and summer seasons according to the wetness index W for the Study Area.	44
Table 3.1	Definition and notation of input and output variables used to describe the 33-year mean annual discharge for the Study Area.	58
Table 3.2	Total number of possible combinations of J input variables.	62
Table 3.3	Relative importance of variables used to model the long-term mean specific discharge according to BE and FE approaches.	70
Table 3.4	Design-matrix showing the composition of some of the best models depicted in Figure 3.4....	72
Table 3.5	Results of the permutation test for models No. 1035 and No. 1039 using $R=500$. The tabulated Figures are the Monte Carlo p-values as fractions.	73
Table 4.1	Correlation matrix [R] for the winter season....	78
Table 4.2	Sample of the best models for winter....	85
Table 4.3	Results of the permutation test for models No. 3729, No. 7827, No. 3733 and No. 3734 using $R=500$	85
Table 4.4	Quality measures for the most robust models with $\varphi = 2$	86
Table 4.5	Optimized parameters (with $\varphi = 2$) for models No. 3733 and No. 3734.	87
Table 4.6	Sample of the best models for summer....	90
Table 4.7	Results of the permutation test for models No. 3965 and No. 3967 using $R=500$	90
Table 4.8	Quality measures for the most robust models with $\varphi = 2$	91
Table 4.9	Optimized parameters (with $\varphi = 2$) for model No. 3965.....	91
Table 4.10	Sample of the best models for specific peak discharge in winter....	96
Table 4.11	Results of the permutation test for models Nos. 1401, 4091, and 1308 using $R=500$	97
Table 4.12	Quality measures for the most robust models $\varphi = 2$	97
Table 4.13	Optimized parameters (with $\varphi = 2$) for model No. 1308....	98
Table 4.14	Optimized parameters (with $\varphi = \varphi_w = 2$) for models No. 1308 and No. 1310 after removing heteroscedasticity.....	100
Table 4.15	Results of the permutation test for models No. 1308 and No. 1310 using $R=500$	100

Table 4.16	Sample of the best models for specific peak discharge in summer....	101
Table 4.17	Results of the permutation test for models No. 3954 and No. 3441 using $R=500$	102
Table 4.18	Quality measures for selected robust models with $\varphi = 2$ and $\varphi_w = 2.5$	103
Table 4.19	Optimized parameters (with $\varphi = 2$ and $\varphi_w = 2.5$) for model No. 3954 after removing heteroscedasticity.....	103
Table 4.20	Sample of the best models for cumulative specific discharge of a yearly peak....	108
Table 4.21	Results of the permutation test for model No. 3662 using $R=500$	108
Table 4.22	Quality measures for the selected robust model with $\varphi = 2$ and $\varphi_w = 1.0$	108
Table 4.23	Optimized parameters (with $\varphi = 2$ and $\varphi_w = 1.0$) for model No. 3662 after removing heteroscedasticity.	109
Table 4.24	Correlation matrix [R] among explained variables Q_7, Q_8, Q_9 , and, Q_{10} . The sample size is equal to 976.....	109
Table 4.25	Sample of the best models for total duration of high flows in winter and summer....	111
Table 4.26	Quality measures for the selected robust models with $\varphi = 2$	112
Table 4.27	Results of the permutation test for models No. 3074 and No. 3076 for winter and summer respectively....	112
Table 4.28	Optimized parameters (with $\varphi = 2$) for models No. 3074 and No. 3076 for winter and summer respectively.....	112
Table 4.29	The best models obtained for the frequency of high flows in winter and summer....	116
Table 4.30	Parameter estimates and results of the permutation test....	116
Table 4.31	Additional quality measures for the selected robust models.	117
Table 5.1	Correlation matrix [R] among explained variables Q_{13}, Q_{14}, Q_{15} , and, Q_{16} and some climatic explanatory variables in summer. The sample size is equal to 860.....	120
Table 5.2	Robust models for total drought duration in summer....	123
Table 5.3	Parameter estimates and results of the permutation test....	124
Table 5.4	Additional quality measures for the selected robust model.....	124
Table 6.1	Land use/cover categories.	133
Table 6.2	Potential predictors of land use/cover change.	133
Table 6.3	Fitted model coefficients for each transition probability.	134
Table 6.4	Composition of the development scenarios.	141
Table 6.5	Average percent change per decade for each simulated variable taken 1994 as reference year....	143
Table 6.6	Probability that the long-term mean for a given variable will be exceeded under certain scenario conditions.....	144

List of Symbols

Symbol	Description
α	Level of significance
α_k	Exceedance probability
A	Set of abstract states (i.e. which occur in both space and time) of a natural system
β_j	Model parameter associated with the variable j
$\hat{\beta}_k(q, q')$	Estimated coefficient for the transition probability from q to q' corresponding to the k predictor
$\boldsymbol{\beta} = [\beta_l]$	Vector composed of all model parameters to be estimated
$\hat{\boldsymbol{\beta}}, \hat{\boldsymbol{\beta}}_r, \hat{\boldsymbol{\beta}}_r^*, \hat{\boldsymbol{\beta}}_a$	Vectors composed of the estimated values of $\boldsymbol{\beta}$
$\hat{\gamma}^t(h)$	Sample variogram for daily (or annual) precipitation in time t
$\Gamma()$	Gamma function
δ	Threshold value employed for the definition of the floodplains
Δx	Change of the variable x
Δ_0, Δ_1	Constants denoting the duration of a peak event
ε	Tolerance value in [m]
ε_i^t	Independent additive error of the spatial unit i during the period t
$\bar{\varepsilon}$	Mean of ε_i^t
ζ	Temperature weighting multiplier for the previous day period
η_{il}^t	Predictor in a generalized model
ϑ, ϑ_r^*	Test statistic based on a given sample (The * denotes that the test statistic was obtained from a simulated data set)
$\theta, \theta_y, \theta_i^t$	Jackknife statistic
Θ	Test statistic
ι	Number of observations less than a given percentile value
κ	Recession constant [-]
$\kappa, \hat{\kappa}$	Dispersion parameters
$\Lambda_i^{t(k)}$	Duration of the low flow spell k occurring in basin i during the year t
λ_l^t	Interpolation weight for the raingauge station l in time t
μ	Mean value of the universe of a given variable. In the Poisson distribution it denotes the average occurrence rate
$\hat{\mu}, \hat{\mu}_{il}^t$	Maximum likelihood estimators
$\mu()$	Membership function
μ_1, μ_2	Lagrange multipliers
ν	Threshold parameter employed for assessing the dimensionality of a system

N	Natural system
$\xi_i^{t(k)}$	Low flow spell k occurring in the basin i during the year t
$\Xi_i^{t(k)}$	Intensity of the drought k occurring in the basin i during the year t [mm/day]
π	Constant Pi
ϖ	Random number drawn from the uniform distribution [0.1)
$\pi_{qq'}$	Transition probability from land use/cover q to q'
Π	Transition probability matrix
ρ	Integer equal to the rounded value of the product σN_i
P	Range of potentially observed values of a natural system
σ	Proportion of observations excluded from each tail of a PDF
ς	Threshold value equal to $0.75N_i$
τ	Threshold value used for the definition of the permanent stream network
T	Number of days either in summer or in winter season during the period from 1.11.1960 to 31.10.1993
$\hat{U}_k^{t(d)}$	Linear estimator of the daily temperature of the cell k in time $t(d)$
$\bar{U}_i^{t(d)}$	Mean temperature of the basin i in time $t(d)$
Υ	Lattice containing the flow accumulation surface of a given catchment
φ	Parameter denoting the influence of the outliers in the estimation of $\hat{\beta}$
φ_w	Parameter used for removing the heteroscedasticity of the error term in a model
$\Phi, \Phi_j, \hat{\Phi}, \Phi_r^*, \Phi_a$	Estimators or objective functions
χ^2	Chi square distribution
Ψ	Lattice containing the aspect of a topographic surface
Ψ_k	Aspect of the cell k
Ψ_k^*	Reclassified aspect of the cell k
ω_j	j^{th} eigenvalue
Ω	Basin or spatial unit
Ω_i	Spatial unit i
a	Shape parameter of the Weibull distribution
a_k	Area of the cell k
AIC	Akaike Information Criterion
A_i	Area of the spatial unit i
$\#(\mathcal{A})$	Number of permutations in which the clause \mathcal{A} is true
$ \mathcal{A} $	Cardinality of the set \mathcal{A}
$\langle \mathcal{A} \rangle$	Operator denoting the integral of the variable \mathcal{A} over both the spatial and the temporal domains
b	Scale parameter of the Weibull distribution
\mathcal{B}_i	Floodplains and riparian zones of the basin i
c	Time index denoting the precipitation occurred c days before the event $t(d)$
c_{ij}^t	Absolute sensitivity coefficient
c_1, c_2	Constants for the EDK
C	Total number of days considered for the calculation of the API

C_{p^*}, C_{j^*}	Mallows' statistic
C_t	Lattice representing land cover in time t
c_k	Size of the cell k
C_k	Observed field capacity of the cell k [mm]
Cf	Climatic category according to Köppen's notation (1918)
$CP(d)$	Circulation Pattern of the day d
CO_2	Carbon dioxide
CH_4	Methane
$d, (d)$	Indices for days
d_e	Number of days in a given year
d_w	Number of days in winter in a given year
d_0, d_1	Indices denoting the beginning and the end of a season in a water year
d_p	Day of occurrence of the peak event
$\mathcal{D}, \mathcal{D}_a$	Original set of observations
$\mathcal{D}^*, \mathcal{D}_r^*$	Simulated data set
$\widehat{\mathcal{D}}$	Set composed of all observations in \mathcal{D} with the exception of those of the basin i in time t
D	Deviance of a generalized model
$D_i^{t(d)}$	Water deficit occurring in the basin i during the day d in the water year t [$m^3 s^{-1}$]
\mathbf{e}_j	j^{th} eigenvector
e	Base of the natural logarithms
e_{ij}^t	Relative sensitivity of the model output with respect to $\hat{\beta}_j$
\mathcal{E}_i^t	Set composed of observations for the basin i in time t
$E[x]$	Expectation of the random variable x
$E_i^{t(k)}$	Total specific deficit of a drought k occurring at the basin i during the year t [mm]
E_1	Bias (BIAS)
E_2	Mean square error (MSE)
E_3	Square root of mean square error (RMSE)
E_4	Root mean square error (RRMSE)
E_5	Mean absolute error (MAE)
E_6	Relative mean absolute error (RMAE)
E_7	Pearson product-moment coefficient of linear correlation (r)
$\exp()$	Exponential function
$f(\bullet)$	Non-linear function
$F()$	Distribution function
$F^{-1}()$	Inverse of the distribution function $F()$
$\hat{F}()$	Empirical distribution function
$F_{(0.95)}$	Value equal to the 95 th percentile of a given random variable
\mathcal{F}	Neighborhood system
\mathcal{F}_{ij}	Neighbors of the cell (i, j)

g	Total number of input variables denoting morphological characteristics of a basin
$g(\bullet)$	Convex and continuously differentiable function. Link function in a generalized model
\mathbf{G}_i^t	Vector composed of variables that describe the morphological characteristics of the spatial unit i in time t
h	Distance between two raingauge stations [m]
\vec{h}	Vector denoting the separation between two raingauge stations [m]
H_0, H_0^j	Null hypothesis
H_A, H_A^j	Alternative hypothesis
\mathcal{H}_i^t	Total number of high flow events in the spatial unit i during the period t
H_2O	Water
I_k	Topographic index of the cell k
i	Index for a spatial unit (i.e. a basin or a subcatchment) or a cell of a lattice.
(i, j)	Pair denoting the location of a cell in a lattice
j, j', k	Indices for a variable or a land use/cover category
j	Index for a CP-type or a cell of a lattice.
j_G, j_U	Indices for variables in a model
J	Total number of input variables in a model or total number of land use/cover categories
J^*	Total number of model parameters
k	Index for a cell in a lattice. Lag between observations in a time series. Index for the low flow spells. Index for the eigenvectors
k	Number of occurrences of an event
$\vec{k}_l, \vec{k}_{l'}$	Position vectors of raingauge stations l and l' in [m] respectively
K	Constant for the logistic model. Number of exogenous variables regarded as driving forces behind a LUCC
K_i^t	Number of low flow spells occurring in basin i during the year t
l	Index for a model parameter or an explanatory variable, or a land cover category. Index for a raingauge station
\mathcal{L}	Total number of raingauge stations
$\ln()$	Natural logarithm function
$\mathcal{L}(\cdot)$	Log-likelihood function
ℓ_{oj}^i	Length of the stream segment j belonging to the order o of the stream network i
L	Number of variables in a simpler model, at least equal to 3
L_1, L_2	Estimator types
L_i	Length of the basin i
\mathcal{L}_i	Adequate portion of the basin i
m	Total number of input variables denoting meteorological or climatic characteristics
M	Formal system (could be a model)
$M_{j,j}$	Maintenance of the land use/cover category j during a period of time

\mathbf{M}_i^t	Vector composed of variables that describe the climatic conditions for the spatial unit i during the period t
$\max()$	Maximum function
$\min()$	Minimum function
n	Total number of spatial units within the Study Area
n, n_{obs}, n_0, n_{0a}	Number of observations in a random sample
n_c	Number of neighbours of a given cell in a lattice
N	Number of cells in a side of a lattice
$N(0, s^2)$	Normal distribution with zero mean and variance s^2
N_i	Number of cells within the spatial unit i
N_h	Number of raingauge stations separated by the distance $h + \varepsilon$ [m]
\mathcal{N}_i	The stream network of the spatial unit i
$N_{\mathcal{N}_i}$	The number of cells contained within the spatial unit i that belong to the stream network \mathcal{N}_i
NO_x	Nitrogen oxides
o	Index for the order of a stream network
p^*	Number of parameters in a given model
p -value	Significance probability
Poisson()	Poisson distribution
p_{mc}	Monte Carlo p -value
$\hat{p}_k^t, \hat{p}_k^{t(d)}$	Linear estimator of the daily precipitation of the cell k in time t or $t(d)$
$\bar{p}_i^{t(d)}, \bar{p}_\Omega^d$	Mean daily precipitation of the basin i or Ω in water year t and day d
$p_{\Omega_j}^d$	Precipitation occurred in the Study Area Ω in day d under circulation pattern conditions of the type j [mm]
$p_{h_l}^t$	Observed daily precipitation at the raingauge station l in time t in [mm]
$p(x_{(i)})$	Empirical cumulative probability estimate for the i^{th} smallest data value
$p_{ij}^t(q, q')$	Transition probability from land use/cover q to q' in cell (i, j) in time t
P_i^t	Precipitation in the catchment i at the end of the water year t
P_k	Random function occurring at the cell k
$\text{Pr}()$	Probability
P_{75}	75 th percentile
P	Total summer or winter precipitation in [mm] occurred at the Study Area during the period from 1.11.1960 to 31.10.1993
q, q'	Indices for the land use/cover states
$q_i^{t(d)}$	Mean daily discharge recorded at the outlet of the basin i in day d of the water year t
Q_{obs}	Observed value of the variable Q
Q_{cal}	Calculated value of the variable Q
\bar{Q}	Mean of the observed values
\hat{Q}	Mean of the estimated values
Q_i^t	Output variable measured in the spatial unit i during the period t

$\hat{Q}_i^t, \tilde{Q}_i^t$	Estimated value of Q_i^t
Q_3	Upper quartile
Q_1	Annual specific discharge [mm]
Q_2	Total discharge in winter [mm]
Q_3	Total discharge in summer [mm]
Q_4	Specific peak in winter [mm]
Q_5	Specific peak in summer [mm]
Q_6	Specific volume of the annual peak [mm]
Q_7	Specific volume of high flows in winter [mm]
Q_8	Specific volume of high flows in summer [mm]
Q_9	Total duration of high flows in winter [day]
Q_{10}	Total duration of high flows in summer [day]
Q_{11}	Frequency of high flows in winter [year^{-1}]
Q_{12}	Frequency of high flows in summer [year^{-1}]
Q_{13}	Maximum drought duration [day] (evaluated in summer)
Q_{14}	Total drought duration [day] (evaluated in summer)
Q_{15}	Maximum drought intensity [mm/year] (evaluated in summer)
Q_{16}	Cumulative specific deficit [mm] (evaluated in summer)
r	Index for a simulation or a realization
r	Pearson correlation coefficient
\mathbf{r}_k	Position vector of the cell k in geographic coordinates
r_p	Constant denoting the range of the theoretical variogram for daily precipitation [m]
r_v	Constant denoting the range of the theoretical variogram for daily temperature [m]
$r(k)$	Value of the autocorrelation function with the lag k
R	Number of permutations, simulations, or realizations
$[\mathbf{R}]$	Correlation matrix
\mathbb{R}^n	n dimensional euclidean space
R_p^2, R_j^2, \bar{R}^2	Coefficient of determination
s_e	Estimated sample standard deviation of random errors
s_k	Slope in the cell k [$^\circ$]
s_q	Land use/cover state q
$\vec{\mathbf{S}}_k$	Vector parallel to the topographic surface at the cell k
\mathbf{S}	Finite set composed of mutually exclusive land use/cover types
ΔS	Change of the underground storage
$t, t(), t(d)$	Time indices [e.g. year, day, or year (day)]
$\tan^{-1}()$	Arctangent function
$t0, t1$	Indices for years if the validation phase of the LUCC model
T	Total number of observations in a time series
$T_{j,k}$	Transformation of land use/cover category j to k
u	Total number of input variables denoting land use/cover states
U	Land use/cover category

\mathbf{U}^t	Lattice denoting the land use/cover in time t
\mathbf{U}_i^t	Vector composed of variables that describe the land use/cover states in the spatial unit i in time t
$v(k)$	Proportion of the total variance retained by the first k eigenvectors
$\text{var}()$	Variance of a random variable
$V(\bullet)$	Variance function
\mathbf{V}^t	Lattice denoting the land use/cover in time t
V_k^t	Land use/cover of the cell k in time t
\mathcal{V}	Evapotranspiration
x	Observable or derived information from a natural system. A random variable in a model
\mathbf{x}	Vector of input variables
X	Generic random variable
x^*	Random permutation of x
\bar{x}	Mean of the variable x
x_{ij}^t	State of the variable j in the spatial unit Ω_i in time t
x_1	Area of the basin [km^2]
x_2	Mean slope [$^\circ$]
x_3	Median of the slope [$^\circ$]
x_4	Trimmed mean of the slope $F_{(15)} - F_{(85)}$ [$^\circ$]
x_5	Trimmed mean of the slope $F_{(30)} - F_{(70)}$ [$^\circ$]
x_6	Mean stream slope [$^\circ$]
x_7	Mean slope in floodplains [$^\circ$]
x_8	Drainage density [km^{-1}]
x_9	Shape factor [-]
x_{10}	Fraction of north-facing slopes [-]
x_{11}	Fraction of south-facing slopes [-]
x_{12}	Mean basin elevation [m]
x_{13}	Difference between the maximum and the minimum elevations in a basin [m]
x_{14}	Fraction of saturated areas [-]
x_{15}	Mean field capacity [mm]
x_{16}	Fraction of karstic formations [-]
x_{17}	Fraction of forest cover [-]
x_{18}	Fraction of impervious cover [-]
x_{19}	Fraction of permeable cover [-]
x_{20}	Annual precipitation [mm]
x_{21}	Cumulative winter precipitation [mm]
x_{22}	Cumulative summer precipitation [mm]
x_{23}	Mean annual precipitation [mm]
x_{24}	Mean winter precipitation [mm]
x_{25}	Mean summer precipitation [mm]

x_{26}	Antecedent precipitation index [mm]
x_{27}	Maximum annual API [mm]
x_{28}	Maximum API in winter [mm]
x_{29}	Maximum API in summer [mm]
x_{30}	Mean temperature in January [°C]
x_{31}	Mean temperature in July [°C]
x_{32}	Maximum temperature in January [°C]
x_{33}	Maximum temperature in July [°C]
x_{34}	Antecedent temperature index [K]
x_{35}	Maximum annual ATI [K]
x_{36}	Maximum ATI in winter [K]
x_{37}	Maximum ATI in summer [K]
x_{38}	Total number of “dry periods” with decreasing API in summer [day]
x_{39}	Total number of “dry periods” in summer [day]
x_{40}	Total number of “wet periods” in summer [day]
x_{41}	Total number of “wet periods” occurring simultaneously with an API greater than a given threshold in winter [day]
$x_k(i, j)$	Potential predictor k of LUCC
$\{x_i\}$	Set of observables or derivative information
x, y	Cartesian directions of the reference system of a DEM [m]
$y_{qq'}$	Binary indicator variable for a LUCC transition
y	Number of groups of observations with equal number of elements
$\{x_{(1)}, x_{(2)}, \dots, x_{(n)}\}$	Set composed of n observations of the variable x sorted in ascending order
w_i^t	Weighting factor for the observation of the basin i in time t
w_0, w_P, w_{ij}^t	Calibration, scaling, and control parameters for LUCC model
W_j	Seasonal wetness index corresponding to the CP type j
Weibull()	Weibull distribution
z_k, Z_k	Topographic elevation of the cell k [m]
Z_c	Threshold value used for removing outliers
Z	Lattice containing the elevation of a spatial unit (i.e. DEM) [m.a.s.l.]

Acronyms and Abbreviations

AIC	Akaike Information Criterion
API	Antecedent Precipitation Index
ATI	Antecedent Temperature Index
BBR	Bundesamt für Bauwesen und Raumordnung
BE	Backward Elimination
BOD	Biochemical Oxygen Demand
CDF	Cumulative Distribution Function
CI	Confidence Interval
CP	Circulation Patterns
DEM	Digital Elevation Model
DWD	Deutscher Wetterdienst
EDF	Empirical Distribution Function
EDK	External Drift Kriging
EIA	Environmental Impact Assessment
FS	Forward Selection
GCM	General Circulation Model
GDP	Gross Domestic Product
GLM	Generalized Linear Model
GRG	Generalized Reduced Gradient
HBV	Hydrologiska Byråns Vattenbalansavdelning (water balance section of the hydrological bureau of the Swedish Meteorological and Hydrological Institute)
HILLFLOW-3D	Name of a rainfall-runoff model
IER	Institut für Energiewirtschaft und Rationelle Energieanwendung, Universität Stuttgart
ILPÖ	Institut für Landschaftsplanung und Ökologie, Universität Stuttgart
IMSL	Mathematics and Statistics Libraries
IPCC	Intergovernmental Panel on Climate Change
IPF	Institut für Photogrammetrie und Fernerkundung, Universität Karlsruhe
IREUS	Institut für Raumordnung und Entwicklungsplanung, Universität Stuttgart
INS	Institut für Navigation, Universität Stuttgart
IWS	Institut für Wasserbau, Universität Stuttgart
LUC	Land Use/Cover
LUCC	Land Use/Cover Change
LVA	Landesvermessungsamt Baden-Württemberg

LfU	Landesanstalt für Umweltschutz Baden-Württemberg
m.a.s.l.	Meters above sea level
MAE	Mean Absolute Error
MDS	Model Development and Simulation
MLE	Maximum Likelihood Estimate
MLP	Multi-Linear Potential model
MSE	Mean Square Error
MRF	Markov Random Field
PDF	Probability Density Function
PET	Potential Evapotranspiration
POT	Potential model
Pr	Probability
PRMS	Precipitation-Runoff Modeling System
RMAE	Relative Mean Absolute Error
RMSE	(Square) Root of Mean Square Error
RRMSE	Relative Root Mean Square Error
Q-Q	Quantile-quantile
SCS	U.S. Soil Conservation Service, Agency of the USDA
SHE	Systeme Hydrologique European
SLA	Statistisches Landesamt Baden-Württemberg
TOPMODEL	Name of a rainfall-runoff model
TOPOG	Name of a rainfall-runoff model
UN	United Nations
USDA	U.S. Department of Agriculture
USGS	U.S. Geological Survey
USLE	Universal Soil Loss Equation
UTM	Universal Transverse Mercator
WCED	World Commission on Environment and Development

Acknowledgement

It is a great pleasure for me to express my sincere gratitude to all those who contributed to the preparation of this dissertation. To begin with, I would like to thank both Professor Dr. András Bárdossy and Prof. Dr. Peter Treuner for their continuous encouragement, time, and advice during all phases of this study. Indeed, without their generous support it would have been impossible to reach this stage.

In particular, I would like to thank Professor Bárdossy for his outstanding guidance during those moments when technical difficulties arose and the path was lost. Thanks to his profound understanding of the subject and his programming skills, his suggestions and comments always led me to find a proper solution. I would like to also thank Professor Treuner for giving me the challenging opportunity to work in his Institute as a teaching and research assistant and for letting me work on integrating two disparate scientific disciplines. This opportunity, and Professor Treuner's broad vision of the planning field, allowed me to embrace the subject of this dissertation with confidence.

I am grateful to all members of the Institute of Regional Development Planning who have always provided assistance and critical remarks, which, in turn, have helped me to improve several parts of this dissertation.

I am also deeply indebted to Mr. Pablo Beltran for all the time he generously devoted to the proofreading of my manuscript and for all his useful comments. Any remaining mistakes are the sole responsibility of the author.

Finally, let me express my very special thanks to my family, who have provided unconditional moral support and comprehension since I started this dissertation. This work is dedicated to them: My wife María Eugenia and my children Eduardo and Sofía.

Zusammenfassung

Einleitung

Die vorliegende Arbeit beschäftigt sich sowohl mit den hydrologischen Wirkungen der Veränderung der Landnutzung und Bodenbedeckung und den klimatischen Änderungen in Wassereinzugsgebieten mittlerer Größe als auch mit der Berücksichtigung dieser Wirkungen in einer Flächennutzungsplanung, die der Nachhaltigkeit verpflichtet ist.

Die Untersuchungen stützen sich auf folgende allgemein anerkannte Thesen:

1. Die Bodenbedeckung und die Flächennutzung in einem Raum ändert sich im Lauf der Zeit entweder auf Grund von anthropogenen Einflüssen oder auf Grund von natürlichen Phänomenen wie beispielsweise dem Klima. (McNeil et al, 1994).
2. Die Umwandlungsgeschwindigkeit von einem Flächennutzungstyp in einen anderen hängt von einer Reihe von raumspezifischen Einflussfaktoren ab, die sich in folgende vier Hauptkategorien einteilen lassen: Politische Faktoren, wirtschaftliche Faktoren, demografische Faktoren und Umweltfaktoren (Turner und Mayer, 1994).
3. Eine Veränderung der Flächennutzung kann kurz- oder langfristig eine Änderung des Wasserkreislaufs nach sich ziehen. Diese Änderung beeinflusst die Aufteilung des Niederschlags in Oberflächenabfluss, Infiltration, Interzeption und Verdunstung der Bodenfeuchte (Savenije 1995).
4. Das Ausmaß der Wirkungen hängt von der Lage im Raum und seine Abbildung von dem räumlichen Maßstab ab, in dem eine Untersuchung durchgeführt wird (Calder, 1993).
5. Es besteht ein dringender Bedarf an anwendungsorientierter Forschung, die den Planern hilft, die Komplexität des Wasserhaushalts zu verstehen und zu berücksichtigen (BBR 2000).

Unter Berücksichtigung der tatsächlichen Komplexität des Wasserhaushalts, der oben genannten Thesen und des Stands der Forschung im Bereich der hydrologischen Modellierung und benachbarter Disziplinen versucht die vorliegende Arbeit eine Frage zu beantworten, die hohe Bedeutung für die Ansätze der räumlichen Planung hat. Diese Frage lautet:

Wie und in welchem Ausmaß beeinflusst eine Veränderung der Bodenbedeckung und der Flächennutzung unter bestimmten geografischen Gegebenheiten die spezifischen Merkmale des Wasserkreislaufs?

Die Beantwortung dieser Frage kann in zwei unterschiedlichen Vorgehensweisen versucht werden.

Zum einen kann ein vorhandenes Niederschlags-Abfluss-Modell, wie beispielsweise HBV (Bergstrom und Forsmann 1973), PRMS (Leavesley et al, 1983), SHE (Abbot et al, 1986) oder HILLFLOW-3D

(Bronstert, 1995), mit Hilfe von Beobachtungen der Vergangenheit kalibriert und validiert werden, um dann für eine Abschätzung der Wirkungen zukünftiger Szenarien der Veränderungen der Flächennutzung herangezogen zu werden.

Dieser Ansatz, der auf den ersten Blick sehr differenziert und angepasst zu sein scheint, kann die Aufgabe aber aus mehreren Gründen nicht in befriedigender Weise erfüllen.

- Erstens besteht häufig ein Mangel an hinreichend verlässlichen Daten über die räumliche Verteilung aller Variablen auf einer mittleren räumlichen Maßstabsebene, die mehr als ein paar Hektar, aber weniger als 5000 km² umfasst (Vertessy et al, 1993).
- Zweitens liegt eine unbekannte Heterogenität der Parameter auf der mittleren Maßstabsebene (Abbott et al, 1986 Reefsgard 1997; Nandakumar und Mein, 1997) vor.
- Drittens ist diesem Ansatz ein Risiko der Überparametrisierung während der Kalibrierung des Modells inhärent (Bergström, 1995).
- Viertens umfasst die Komplexität des Systems auch eine Abhängigkeit von der Zeit und von Zufälligkeiten der betrachteten Prozesse, die von den aufgeführten Modellen nicht erfasst werden.

In dieser Arbeit wird deshalb ein zweiter Ansatz verfolgt.

Er besteht darin, dass auf der Grundlage von Daten aus der Vergangenheit empirische Ursachen-Wirkungs-Zusammenhänge abgeleitet werden, die mit Hilfe von nicht-linearen Optimierungs-Algorithmen angepasst werden. Anschließend wird die Robustheit dieser Modelle mit Hilfe von Kreuz-Validierungs-Techniken bewertet, und abschließend wird die Unabhängigkeit zwischen jeder erklärten Variablen und gegebenen erklärenden Variablen mit Hilfe von nicht-parametrischen Tests überprüft.

Um den beschriebenen Ansatz umsetzen zu können, wurde folgende Konzeption des Wasserhaushalts zu Grunde gelegt:

Bestimmte Abflussmerkmale eines Einzugsgebietes und eines Zeitraums werden durch eine Menge von erklärenden Variablen bestimmt. Diese erklärenden Variablen gehören zu den drei Kategorien physiografische Faktoren, Flächenbedeckungstypen und klimatische oder meteorologische Faktoren.

Folgende Arbeitsschritte der Untersuchung lassen sich zusammenfassen:

1. Die Entwicklung einer allgemeinen Methodik, die darauf ausgerichtet ist, die Wirkungen auf den Wasserabfluss, die auf exogene makroklimatische Veränderungen zurückzuführen sind, von jenen Wirkungen zu trennen, die von menschlichen Aktivitäten verursacht werden.
2. Die Auswahl und Validierung von Modellen, die diese Wirkungen auf der Grundlage von Merkmalen des hydrologischen Kreislaufs auf einer mittleren räumlichen Maßstabsebene quantifizieren.

3. Die Überprüfung der gefundenen Modelle im Hinblick auf deren Eignung, die Wirkungen von klimatischen Veränderungen und von Änderungen der Flächenbedeckung bzw. –nutzung auf den Wasserkreislauf auf einer mittleren räumlichen Ebene zu bewerten.

Methodik

Mit der in dieser Arbeit verwendeten Methode soll festgestellt werden, welcher Satz von Variablen auf einem statistisch signifikanten Niveau den höchsten Beitrag für die Erklärung der Veränderungen des beobachteten Systems liefert. Dabei sollte einerseits in Abhängigkeit von der Dimensionalität des Systems die Zahl der verwendeten Variablen möglichst klein sein und andererseits jede Kategorie der erklärenden Faktoren mindestens mit einer Variablen vertreten sein. Die Anpassungsgüte jedes der geprüften (a priori plausiblen) Modelle wurde mit Hilfe von Mallows C_p Statistik, des Akaike-Informationskriteriums und einer Jackknife–Statistik geschätzt.

Mit dieser Vorgehensweise war es möglich, die im Laufe der Zeit auftretenden Schwankungen eines Merkmals des Abflusses eines Wassereinzugsgebietes in zwei unabhängige Komponenten zu zerlegen. Die eine Komponente wird nur durch klimatische Schwankungen erklärt, während die zweite Komponente ausschließlich durch Veränderungen der Bodenbedeckung erklärt wird. Es muss auch betont werden, dass die Modelle innerhalb des Untersuchungsraumes für verschiedene Wassereinzugsgebiete mit unterschiedlichen physiografischen Merkmalen angepasst wurden. Die beschriebene Vorgehensweise erlaubt es, in einer effizienten Weise das erstgenannte Ziel zu erreichen.

Diese Vorgehensweise hat zwei Vorteile. Das Risiko der Überparametrisierung und des möglichen Auftretens von Multikollinearitäten bei den erklärenden Variablen konnte deutlich verringert werden; eine unmittelbare Folge dessen ist eine signifikante Verringerung der Konfidenzintervalle aller Modellparameter.

Die Einführung von statistisch signifikanten Variablen in ein Modell ist von entscheidender Bedeutung für die Auswahl von "guten" und "einfachen" Modellen aus der Vielzahl von Möglichkeiten, die sich aus dem gegebenen Satz von erklärenden Variablen ableiten lassen. Der Hauptgrund dafür ist, dass eine nicht-signifikante Variable die Gesamtvarianz zwar erhöht, sie aber überhaupt nicht erklärt. Mit anderen Worten, die nicht-signifikanten Variablen erhöhen das „Rauschen“ im System und vermindern den Erklärungsgehalt anderer signifikanter Variablen. In dieser Hinsicht zeigte sich, dass der verwendete Permutations-Test im Vergleich mit konventionellen parametrischen statistischen Tests ein unerlässliches analytisches Werkzeug ist.

In den Fällen, in denen die gemeinsame multivariate Verteilungsfunktion der erklärenden Variablen unbekannt ist, hätten die herkömmlichen parametrischen Tests zu irreführenden Ergebnissen hinsichtlich der Auswahl von signifikanten Variablen für die Modelle geführt. Solche Ergebnisse wären entstanden, weil alle parametrischen Tests sich auf Annahmen bezüglich der Verteilungsfunktion der Variablen und der Teststatistiken gründen.

In der vorliegenden Arbeit wird die Verteilung der Teststatistik, die zur Prüfung der Nullhypothese (Unabhängigkeit der erklärten und erklärenden Variablen) verwendet wird, durch Simulation erstellt, indem aus dem ursprünglichen Datensatz ein künstlicher Datensatz durch Permutation generiert wird.

Die Verwendung des Jackknife-Verfahrens für die Kreuz-Validierung des besten Modells erleichtert die Aufgabe der Auswahl des "besten" Modells für ein gegebenes Abflussmerkmal erheblich. Zusätzlich war es für diese Arbeit von besonderer Bedeutung, weil es eine gleichzeitige Schätzung des Niveaus der Vorhersagbarkeit ermöglicht. Weiterhin sind dadurch die Modelle gegenüber eventuellen Ausreißern robust. Ein weiterer Vorteil dieses Verfahrens ist, dass es unabhängig vom Schätzer eingesetzt werden kann.

Die vorgestellte Methode wurde im Einzugsgebiet des Neckars oberhalb des Pegels Plochingen angewendet (Abb. 1). Das Einzugsgebiet umfasst eine Fläche von rund 4000 km². Die Daten für das Untersuchungsgebiet stammen aus mehreren Quellen.

- Die physiografischen Variablen wurden aus einem digitalen Höhenmodell mit einer Auflösung von 30×30 m, aus einer digitalisierten Bodenkarte im Maßstab 1 : 200 000 und aus einer digitalisierten Geologischen Karte im Maßstab 1 : 600 000 abgeleitet.
- Die Bodenbedeckung wurde hauptsächlich aus zwei Quellen ermittelt. Zum einen wurden Topographische Karten im Maßstab 1 : 25 000 aus dem Jahr 1961 verwendet. Zum anderen lagen drei LANDSAT-Aufnahmen für die Jahre 1975, 1984 und 1993 vor. Die Auflösung dieser Aufnahmen beträgt 30×30 m und erlaubt die Ableitung von drei Flächenbedeckungs-Klassen: Wald, versiegelte Flächen und durchlässige Bodenbedeckung.
- Die beiden klimatologischen Variablen "tägliches Niederschlag" und "Temperatur" lagen für 288 Wetterstationen in Baden-Württemberg für den Zeitraum 1.11.1961 bis 31.10.1993 vor. Diese Informationen wurden mit Hilfe einer geostatistischen Methode (External Drift Kriging) für ein Raster mit einer Maschenweite von 300×300 m interpoliert.
- Die Zeitreihen des täglichen Abflusses standen für den oben genannten Zeitraum für 46 Pegel im Untersuchungsraum zur Verfügung.

Auf der Grundlage der aufgeführten Informationen wurden für jedes der 46 Wassereinzugsgebiete im Untersuchungsraum und jedes Halbjahr des Zeitraumes 1961 bis 1993 eine Anzahl von Indikatoren abgeleitet. Beispielsweise wurden für die Beschreibung der physiografischen Merkmale die folgenden Indikatoren verwendet: Gesamtfläche, durchschnittliche Hangneigung, Median der Hangneigung, getrimmter Median der Hangneigung, durchschnittliches Gefälle der Fließgewässer, durchschnittliche Hangneigung der Überschwemmungsgebiete, Gewässerdichte, Form des Wassereinzugsgebietes, Anteil der nach Norden und Süden exponierten Hänge, durchschnittliche Höhe des Wassereinzugsgebietes, Reliefenergie, Anteil der Flächen mit gesättigten Böden, durchschnittliche Feldkapazität und Anteil der Karstflächen.

Die Veränderung der Bodenbedeckung wurde mit Hilfe von Zeitreihen abgebildet, die die jeweiligen Anteile der Waldflächen, der versiegelten Flächen und der nicht-versiegelten Flächen an der Gesamtfläche der Wassereinzugsgebiete und der Überschwemmungsgebiete abbilden.

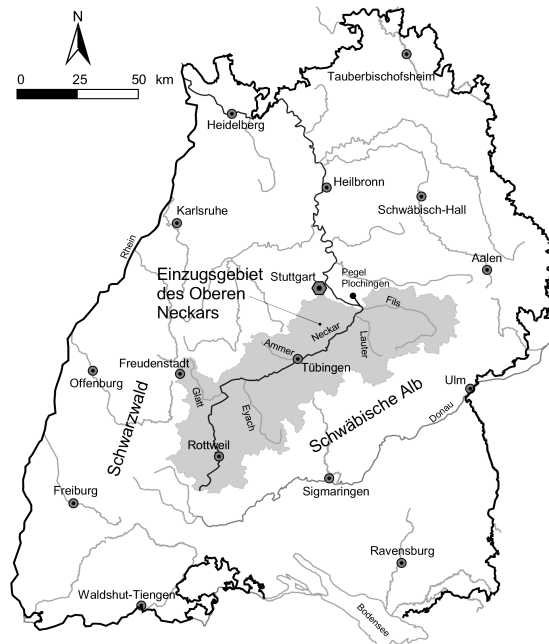


Abbildung 1 Lage des Einzugsgebietes des Oberen Neckars in Baden-Württemberg

Das Klima wurde mit Hilfe von Zeitreihen folgender Indikatoren jeweils für das hydrologische Sommer- und Winterhalbjahr beschrieben: Kumulierte Niederschlagshöhe, durchschnittliche Niederschlagshöhe, Vor-Regen-Index, mittlere Temperatur im Januar und im Juli, mittlere Halbjahrestemperatur, Maximum und Minimum der Temperatur im Januar und im Juli, Vor-Temperatur-Index sowie ein auf Großwetterlagen basierter Feuchtigkeitsindex.

Die erklärten Variablen beruhen auf Zeitreihen für Abflussmerkmale im Sommer und im Winter, nämlich: Gesamter Abfluss, spezifischer Scheitelabfluss, Abflussmenge der Hochwässer, Gesamtdauer der Hochwässer, Häufigkeit der Hochwässer, Gesamtdauer der Trockenheit, Intensität der Trockenheit, kumulatives Defizit.

Der Umfang der untersuchten Stichproben umfasst ungefähr 1000 Beobachtungen. Die Größe der Wassereinzugsgebiete reicht von 4 km^2 bis 4000 km^2 . Die kalibrierten Modelle für einige Abflussmerkmale im Winter und im Sommer zeigten, dass die Variablen zur Bodenbedeckung statistisch signifikante Erklärungskomponenten des Wasserkreislaufs in mittelgroßen Einzugsgebieten sind. Ihr Erklärungsbeitrag ist für das Winterhalbjahr jedoch höher als für das Sommerhalbjahr.

Integrierte Bewertung der hydrologischen Wirkungen der Veränderung der Bodenbedeckung und des Klimas in einem mittelgroßen Wassereinzugsgebiet

Die Integration zweier Bereiche des Wassersystems, nämlich des Abflussverhaltens eines Einzugsgebietes und der Bodennutzung zu einem entsprechenden Zeitpunkt, konnte in dieser Arbeit auf Grund der Einfachheit der verwendeten hydrologischen Modelle und der Eigenschaften des Land Use/Cover Change Modells (LUCC) weitgehend erreicht werden. Außerdem wurde eine Abschätzung der Größenordnung der Wirkungen der Änderung der Bodenbedeckung auf den Wasserkreislauf in einem mittelgroßen Wassereinzugsbereich mit Hilfe einer sequentiellen Monte-Carlo-Simulation, die im besonderen Testgebiet (Einzugsbereich der Körsch) vier relevante Entwicklungsszenarien (C1S1,

C1S2, C2S1, und C2S2) zur wahrscheinlichen Entwicklung von makro-klimatischen und sozio-ökonomischen Zuständen lieferte, durchgeführt.

Die verwendeten Szenarien lassen sich wie folgt skizzieren:

Das **Szenario S1** trägt den Titel "Status-quo-Szenario". Die zukünftige Entwicklung im besonderen Testgebiet wird als Fortsetzung der in der Vergangenheit beobachteten Trends betrachtet. Das Szenario geht von der Annahme aus, dass aufgrund eines stetigen Wachstums des Pro-Kopf-Einkommens im Zusammenspiel mit einem gut ausgebauten Straßennetz und einer moderaten Besteuerung von fossilen Brennstoffen die enge Korrelation zwischen dem Besitz eines PKWs und der Nachfrage nach Wohnbauland erhalten bleibt.

Die Wohnungsmieten werden im Raum Stuttgart aufgrund seiner hohen Zentralität steigen.

Die Folgen dieser Annahme sind, dass trotz einer weitgehenden Konstanz der Einwohnerzahl die Nachfrage nach größeren Wohnungen und freistehenden Häusern in Siedlungen mit einer guten Straßenverbindung stark zunehmen wird. Neue Wohngebiete und großflächige Einzelhandelseinrichtungen mit großen Parkplätzen werden am Rande von Stuttgart entstehen, während in der Stadtmitte Dienstleistungseinrichtungen zunehmend Flächen in Anspruch nehmen werden. Das Szenario beschreibt eine starke Zersiedlung der Landschaft im besonderen Testgebiet.

Unter diesen Annahmen wurden mit Hilfe einer Markov-Kette, deren Übergangswahrscheinlichkeiten mit Hilfe von Informationen aus der Vergangenheit kalibriert wurden, die Flächen der drei Kategorien für das Jahr 2025 geschätzt; demnach hätte Wald eine Fläche von 1280 ha, die undurchlässige Fläche würden 5950 ha und die durchlässigen 5390 ha umfassen.

Das **Szenario S2** trägt den Titel "lokale Nachhaltigkeit". Es unterscheidet sich in einigen Punkten vom ersten Szenario. Erstens werden aus der Einsicht heraus, dass eine ungebremste Zersiedelung der Landschaft zu einer Zunahme von Umweltrisiken führen kann, Regelungen der Flächennutzung verschärft und Grundsteuern erhöht. Die Nachfrage nach Wohnflächen je Einwohner wird dadurch deutlich vermindert.

Zweitens wird die Mineralölsteuer erhöht. Die Steuererhöhung verteuert das Pendeln. Gleichzeitig wird das Angebot der öffentlichen Verkehrsmittel erhöht. Folglich wird die Nachfrage nach zusätzlichen Verkehrsflächen stark abnehmen.

Als Folge der genannten Einschränkungen wird die jährliche Wachstumsrate der undurchlässigen Flächen von 1,3% im Status-quo-Szenario auf 0,4% im S2-Szenario sinken.

Drittens wird die im Zeitraum 1975 bis 1993 im besonderen Testgebiet beobachtete Abnahme der Waldflächen durch Ausgleichsmaßnahmen gebremst.

Am Ende des Simulationszeitraumes wird der Wald im Durchschnitt eine Fläche von 2160 ha bedecken. Undurchlässige Flächen bedecken im Durchschnitt 4390 ha und 6075 ha sind durchlässige Flächen.

Das **Szenario C1** ist ein pessimistisches Klimaszenario und beschreibt den ungünstigsten Fall. Es orientiert sich an Szenarien zur weltweiten Entwicklung der Umweltsituation und des Klimas und geht von einer Wirtschaftsweise aus, die die natürlichen Ressourcen wenig schont.

In Deutschland wird sich wahrscheinlich die Niederschlagsmenge im Winter erhöhen und im Sommer aufgrund einer verstärkten Evapotranspiration abnehmen. Zusätzlich werden die Häufigkeit und die Intensität von außergewöhnlichen Niederschlagsereignissen im Sommer zunehmen. Die Häufigkeit und die Intensität von Hochwasser wird sehr wahrscheinlich zunehmen. Gleichzeitig ist es sehr wahrscheinlich, dass die Perioden der Trockenheit aufgrund der verstärkten Verdunstung zunehmen werden. Die durchschnittliche Temperatur wird im Sommer und im Winter wahrscheinlich ansteigen. Die Häufigkeit des Auftretens von Extremwerten der Temperatur wird sich ebenfalls ändern: Die Zahl der Frosttage im Winter wird abnehmen und die Zahl der heißen und trockenen Tage im Sommer wird zunehmen. Insgesamt wird der Wetterverlauf in Zukunft sprunghafter und intensiver.

Das **Szenario C2** ist ein optimistisches Klimaszenario. Als Ergebnis einer weltweiten Substitution von nicht erneuerbaren Energiequellen durch erneuerbare Energiequellen wird die Konzentration von CO₂ und anderen Treibhausgasen langsamer zunehmen als im Szenario C1. In Deutschland werden die klimatischen Änderungen weniger stark ausgeprägt sein als im Szenario C1. Sowohl die Zehnjahresrate der Zunahme der Niederschläge als auch der Temperatur wird ungefähr ein Drittel der entsprechenden Raten des Szenarios C1 betragen. Beispielsweise wird die Zunahme der durchschnittlichen Temperatur bis zum Jahr 2020 im 95%-Konfidenzintervall der natürlichen Schwankungen liegen. Die Zunahme des durchschnittlichen Niederschlages im Winterhalbjahr wird aber sicherlich die natürlichen Schwankungen des letzten Jahrhunderts übersteigen.

Grundsätzlich geht das LUCC-Modell davon aus, dass die Übergangswahrscheinlichkeit von einem Bodennutzungstyp zu einem anderen von der geographischen Lage und externen Einflussfaktoren abhängt, die räumlich differenziert sind, aber sich im Untersuchungszeitraum nicht ändern. Diese Einschränkung wurde in der vorliegenden Untersuchung vor allem auf Grund der zeitlichen Restriktionen vorgenommen.

Als potentielle Bestimmungsgrößen der Veränderung der Bodennutzung werden in dieser Untersuchung aufgrund der vorgenommenen Überprüfungen die Entfernung zu Autobahnen, die Entfernung zu Siedlungen mit einem Haltepunkt des schienengebundenen Personenverkehrs, die Entfernung zu Fließgewässern, die Hangneigung und die Ausrichtung nach Süden betrachtet. Trotz der Einfachheit des Modells zeigte sich in der Validierungsphase, dass in dem gewählten besonderen Testgebiet in der Nähe von Stuttgart (Einzugsgebiet der Körsch) (Abb. 2) eine Vorhersagegenauigkeit von 85 % erreicht werden konnte.

Abschließend wurde eine stochastische Simulation angewendet, um zu bestimmen, wie stark eine Veränderung der Bodennutzung das hydrologische System in einem bestimmten Wassereinzugsgebiet beeinflusst. Die Wirkungen auf das hydrologische System wurden mit Hilfe von empirischen Modellen für einige Abflussmerkmale kalibriert. Die verwendeten Variablen zur Bodenbedeckung stammen für jeden gegebenen Zeitpunkt aus dem LUCC-Modell, die Variablen zur Morphologie sind im Simulationszeitraum konstant, und die klimatischen Variablen wurden als Stichprobe aus den

gemeinsamen multivariaten Verteilungen gezogen. Hierzu musste eine sequentielle Simulation durchgeführt werden, um die Abhängigkeiten der meteorologischen Größen zu berücksichtigen.

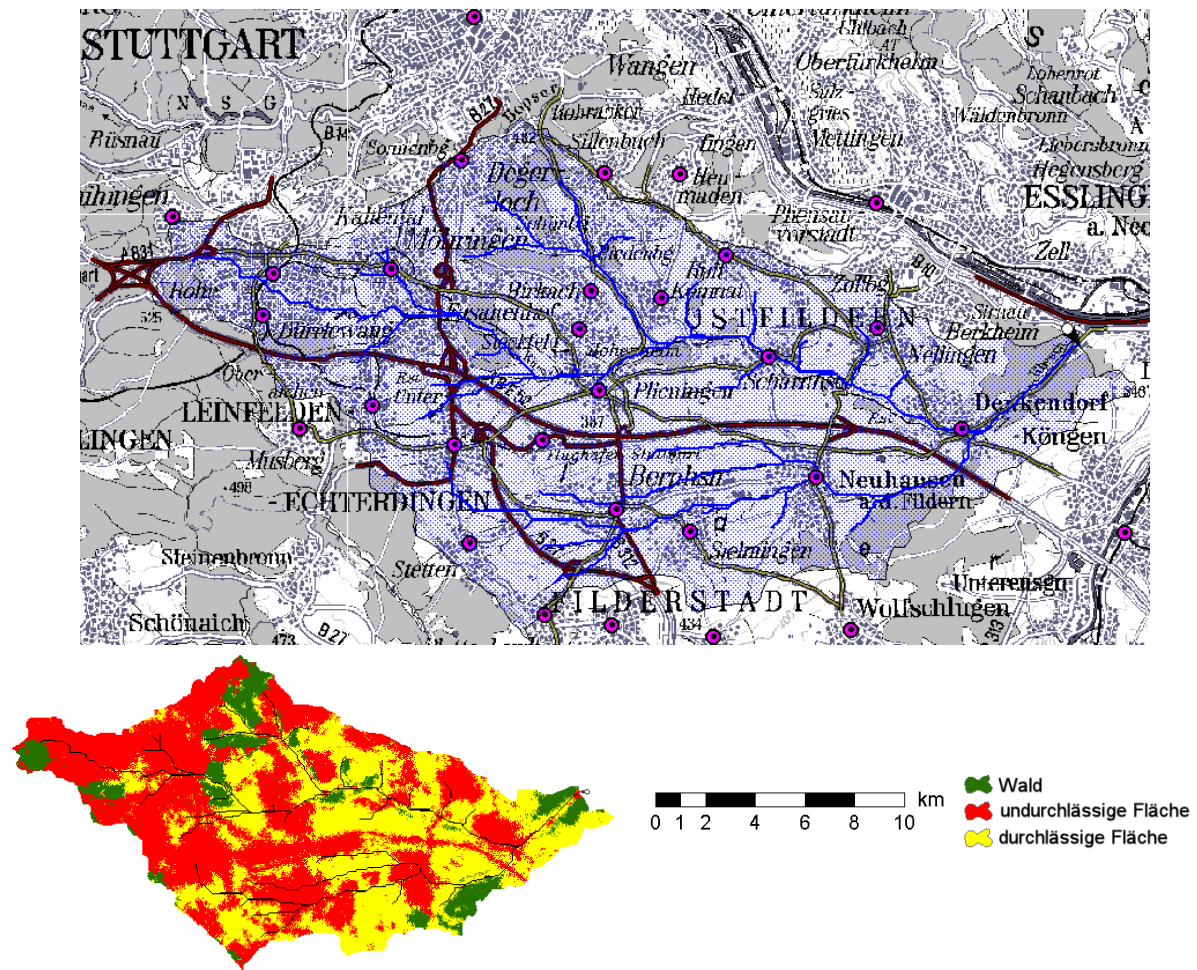


Abbildung 2 Oben: Besonderes Testgebiet (Einzugsgebiet der Körsch) in der Nähe von Stuttgart. Unten: Ergebnisse einer Simulation des LUCC-Modells für das Szenario S1 im Jahr 2025.

Ergebnisse

In Tabelle 1 ist deutlich erkennbar, dass das hydrologische System des betrachteten Einzugsgebietes die größten Störungen bei der Szenarienkombination C1S1 erleidet. Die geringsten Störungen treten bei der Szenarienkombination C2S2 auf.

Der Gesamtabfluss im Winterhalbjahr (Q_2) wird im ungünstigsten Fall um ungefähr 6,9% pro Dekade ansteigen. Dieser Fall (Szenario C1S1) geht von einer starken Zersiedlung der Landschaft und einer stetigen Zunahme der durchschnittlichen Lufttemperatur durch die globale Erwärmung aus.

Der Gesamtabfluss im Sommerhalbjahr (Q_3) wird im allgemeinen aufgrund der höheren Temperaturen und der zunehmenden Evapotranspiration abnehmen. Lediglich im Szenario C2S1 kann es zu einer Zunahme des Abflusses im Sommerhalbjahr kommen.

Die spezifischen Scheitelabflüsse im Winterhalbjahr (Q_4) neigen in allen Szenarien zu einer Zunahme. Die größte Abweichung von dem in der Vergangenheit beobachteten Mittelwert tritt im Szenario S1C1 auf. Änderungen der Bodenbedeckung spielen für die spezifischen Scheitelabflüsse eine

entscheidende Rolle. Die relative Differenz dieser Variablen zwischen den sozio-ökonomischen Szenarien S1 und S2 beträgt ohne Berücksichtigung der klimatischen Einflüsse ungefähr 3% pro Dekade.

Die spezifischen Scheitelabflüsse im Sommerhalbjahr (Q_5) nehmen mit Ausnahme von Szenario C2S1 in allen Szenarien ab. Im Szenario C2S1 werden die Sommer nicht wesentlich wärmer sein als in der Referenzperiode. Die Zunahme der versiegelten Flächen wird aber eine Zunahme der Scheitelabflüsse pro Dekade bewirken.

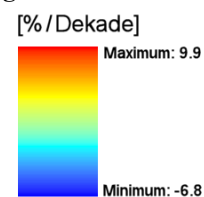
Die Abflussmenge der Hochwässer (Q_6) ist das Merkmal, das am stärksten durch die simulierten Änderungen der Bodenbedeckung im besonderen Testgebiet beeinflusst wird. Unter gleichen klimatischen Verhältnissen schwankt diese Variable zwischen den beiden sozio-ökonomischen Szenarien um 5,8% pro Dekade bei mäßigen Niederschlägen und um 6,7% bei hohen Niederschlägen.

Die Gesamtdauer der Hochwässer im Winterhalbjahr (Q_9) ist bei gleichen klimatischen Bedingungen im Szenario S2 im Durchschnitt höher als im Szenario S1.

Tabelle 1 Durchschnittliche relative Veränderung jeder simulierten Variablen pro Dekade (in %) (Bezugsjahr 1994)

Variable	Symbol	Entwicklungsszenario				Entwicklungsszenario			
		C1S1	C1S2	C2S1	C2S2	C1S1	C1S2	C2S1	C2S2
Gesamtabfluss im Winter	Q_2	6.9	5.4	3.7	2.4				
Gesamtabfluss im Sommer	Q_3	-2.6	-6.8	0.4	-4.1				
Spezifischer Scheitelabfluss im Winter	Q_4	8.8	5.4	5.4	2.5				
Spezifisches Scheitelabfluss im Sommer	Q_5	-3.7	-1.6	0.1	-0.6				
Abflussmenge der Hochwässer	Q_6	9.9	3.2	8.0	2.2				
Gesamtdauer der Hochwässer im Winter	Q_9	5.6	6.2	2.3	2.7				
Gesamtdauer der Hochwässer im Sommer	Q_{10}	-1.9	-4.5	1.8	-1.1				
Häufigkeit der Hochwässer im Winter	Q_{11}	7.1	3.5	4.4	1.3				
Häufigkeit der Hochwässer im Sommer	Q_{12}	-2.8	-2.6	-1.2	-1.8				
Gesamtdauer der Trockenheit im Sommer	Q_{14}	8.4	8.0	3.7	3.8				

Legende der Farbskala



Die Gesamtdauer der Hochwässer im Sommerhalbjahr (Q_{10}) neigt im allgemeinen dazu, abzunehmen. Der wesentliche Grund dafür ist die Zunahme der durchschnittlichen Lufttemperatur. Die Wachstumsrate ist im Szenario C2 niedriger, weil in diesem Szenario die Waldflächen größer sind als im Szenario C1 und dadurch die Evapotranspiration zunimmt. Der Oberflächenabfluss verringert sich entsprechend. Eine Ausnahme bildet das Szenario C2S1, bei dem der Oberflächenabfluss um 0,1% pro Dekade zunimmt.

Die Häufigkeit von Hochwässern nimmt im Winterhalbjahr (Q_{11}) zu und im Sommerhalbjahr (Q_{12}) ab. Das Szenario S1 weist unter gleichen klimatischen Bedingungen höhere Wachstumsraten der Hochwasserhäufigkeit auf.

Die Dauer der Trockenheit (Q_{14}) neigt dazu, im Klimaszenario C1 stärker zu wachsen als im Szenario C2. Veränderungen der Landnutzung haben zwar einen Einfluss auf diese Variable, er ist aber geringer als der Einfluss der klimatischen Veränderungen.

Folgerungen

In der vorliegenden Studie wurde versucht, die Auswirkungen von klimatischen Veränderungen und Veränderungen der Bodenbedeckung und der Landnutzung auf den Wasserkreislauf in einem Wassereinzugsgebiet mittlerer Größe zu erfassen. Im Hinblick auf diese Zielsetzung können aus den Ergebnissen einige Folgerungen gezogen werden.

1. Ein Hauptelement im analytischen Teil dieser Arbeit bestand in der Verwendung von zeitlich und räumlich differenzierten Daten aus dem Zeitraum 1961 bis 1993 für 46 Pegel im Einzugsgebiet des Oberen Neckars. Auf der Grundlage der Vielzahl von Einzelinformationen und mit Hilfe von fortschrittlichen Optimierungsmethoden und nichtparametrischen statistischen Verfahren war es möglich, Modelle zu entwickeln und zu validieren, die den Zustand des Systems zu jedem Zeitpunkt und für jede räumliche Einheit beschreiben können. Die gefundenen numerischen Zusammenhänge haben es auf einer mittleren räumlichen Maßstabsebene erlaubt, Wirkungen, die von klimatischen Veränderungen bestimmt werden, von Wirkungen, die auf Änderungen der Bodenbedeckung zurückzuführen sind, zu trennen. Die Quantifizierung der Größenordnung der Wirkungen einer gegebenen Änderung der Bodenbedeckung ist dann relativ einfach.
2. Die kalibrierten Modelle für einige Abflussmerkmale im Sommer und im Winter haben gezeigt, dass die Variablen zur Bodenbedeckung statistisch signifikante Komponenten des Wasserkreislaufs auf der gewählten räumlichen Ebene darstellen. Die Anpassung der Modelle ist für die Winterhalbjahre besser als für die Sommerhalbjahre.
3. Eine Verknüpfung dieser hydrologischen Modelle mit einem einfachen stochastischen Bodenbedeckungs- bzw. Landnutzungsmodell war durchführbar und lieferte aufschlussreiche Erkenntnisse. Obwohl das verwendete Bodenbedeckungs- bzw. Landnutzungsmodell ziemlich einfach gestaltet ist, zeigten die Ergebnisse, dass es sich dabei um ein viel versprechendes Planungswerkzeug handelt, welches eine Überprüfung der Wirkungen einiger Szenarien zur Änderung der Landnutzung und des Klimas auf den Wasserkreislauf erlaubt.
4. Weitere Forschungen sind notwendig, um die Bodenbedeckungs- bzw. Landnutzungsmodelle zu verbessern, insbesondere in Hinblick auf die Berücksichtigung anderer zeitabhängiger Einflussfaktoren.
5. Weitere Schritte sollten unternommen werden, um die Entwicklung und den Einsatz von integrierten Planungswerkzeugen als logische und systematische Hilfsmittel für Planungen, die die Komplexität natürlicher Systeme und deren Beziehungen zu menschlichen Aktivitäten betreffen, zu fördern. Wenn dies umgesetzt wird, wird damit ein Schritt in Richtung einer nachhaltigen Entwicklung getan.