Albert-Ludwigs-Universität Freiburg i. Br.

Institut für Hydrologie

# **Alexander Kleinhans**

# Anwendung des Wasserhaushaltsmodells WaSiM-ETH im Dreisam-Einzugsgebiet

# **Referent: Prof. Dr. Ch. Leibundgut**

Koreferent: Prof. Dr. S. Demuth

Diplomarbeit unter Leitung von Prof. Dr. Ch. Leibundgut Freiburg i. Br., August 2000 Albert-Ludwigs-Universität Freiburg i. Br.

Institut für Hydrologie

# **Alexander Kleinhans**

# Anwendung des Wasserhaushaltsmodells WaSiM-ETH im Dreisam-Einzugsgebiet

Diplomarbeit unter Leitung von Prof. Dr. Ch. Leibundgut Freiburg i. Br., August 2000

# Inhaltsverzeichnis

| Ver | zeichnis | s der Abbildungen                   | IX   |
|-----|----------|-------------------------------------|------|
| Ver | zeichnis | s der Abbildungen im Anhang         | X    |
| Ver | zeichnis | s der Tabellen                      | XI   |
| Ver | zeichnis | s der Tabellen im Anhang            | XII  |
| Ver | zeichnis | s der Abkürzungen und Symbole       | XIII |
| Zus | amment   | fassung                             | XIX  |
| Sun | nmary    |                                     | XXI  |
| 1   | Einle    | eitung                              | 1    |
|     | 1.1      | Überblick                           | 1    |
|     | 1.2      | Problemstellung und Zielsetzung     | 2    |
|     | 1.3      | Methodisches Vorgehen               | 3    |
| 2   | Das      | Untersuchungsgebiet                 | 5    |
|     | 2.1      | Einführung                          | 5    |
|     | 2.2      | Naturräumliche Lage und Topographie | 6    |
|     | 2.3      | Morphologische Gliederung           | 7    |
|     | 2.4      | Hydroklimatische Verhältnisse       | 7    |
|     |          | 2.4.1 Lufttemperatur                | 7    |
|     |          | 2.4.2 Sonnenscheindauer             | 8    |
|     |          | 2.4.3 Luftfeuchtigkeit              | 8    |
|     |          | 2.4.4 Niederschlag                  | 8    |
|     | 2.5      | Hydrogeologie                       | 9    |
|     | 2.6      | Pedologie                           | 10   |
|     | 2.7      | Landnutzung                         | 13   |
|     | 2.8      | Hydrologie                          | 14   |

| 3 | Das 1 | Niedersc | hlag-Abfluss-Modell WaSiM-ETH                                 |      |
|---|-------|----------|---|------|
|   | 3.1   | Einfüh   | irung   |      |
|   | 3.2   | Teilmo   | odule des Wasserhaushalts-Simulations-Modells WaSiM-ETH       |      |
|   |       | 3.2.1    | Niederschlagskorrektur  |      |
|   |       | 3.2.2    | Interpolation der Eingangsdaten                               |      |
|   |       |          | 3.2.2.1 Höhenabhängige Regression                             |      |
|   |       |          | 3.2.2.2 Abstandsgewichtende Interpolation                     |      |
|   |       | 3.2.3    | Topographisch bedingte Strahlungs- und Temperaturkorrektur    |      |
|   |       |          | 3.2.3.1 Strahlungskorrektur                                   |      |
|   |       |          | 3.2.3.2 Temperaturmodifikation                                |      |
|   |       | 3.2.4    | Verdunstungsmodul   |      |
|   |       |          | 3.2.4.1 Potentielle Verdunstung nach Penman-Monteith          |      |
|   |       |          | 3.2.4.2 Reale Evapotranspiration                              |      |
|   |       | 3.2.5    | Schneemodul   |      |
|   |       |          | 3.2.5.1 Schneeakkumulation                                    |      |
|   |       |          | 3.2.5.2 Schneeschmelze  |      |
|   |       | 3.2.6    | Interzeptionsmodul  |      |
|   |       | 3.2.7    | Infiltrationsmodul  |      |
|   |       | 3.2.8    | Bodenmodul unter Verwendung der Richardsgleichung             |      |
|   |       |          | 3.2.8.1 Allgemeines   |      |
|   |       |          | 3.2.8.2 Parametrisierung                                      |      |
|   |       |          | 3.2.8.3 Berechnung des Interflow                              |      |
|   |       |          | 3.2.8.4 Berechnung des Basisabfluss                           |      |
|   |       | 3.2.9    | Grundwassermodul  |      |
|   |       | 3.2.10   | Abflussrouting  |      |
|   |       | 3.2.11   | Verfahren zur Beurteilung der Simulationsqualität             |      |
|   | 3.3   | Fazit    |   |      |
| 4 | Anw   | endung v | on WaSiM-ETH im Dreisam-Einzugsgebiet und Teileinzugsgebieter | n 37 |
|   | 4.1   | Einfüh   | irung   |      |
|   | 4.2   | Bescha   | affung und Aufbereitung der Modelleingangsgrößen              |      |
|   |       | 4.2.1    | Meteorologische Eingangsgrößen                                |      |
|   |       |          | 4.2.1.1 Temperatur  |      |
|   |       |          | 4.2.1.2 Relative Luftfeuchtigkeit                             |      |
|   |       |          | 4.2.1.3 Globalstrahlung                                       |      |
|   |       |          | 4.2.1.4 Sonnenscheindauer                                     |      |
|   |       |          | 4.2.1.5 Windgeschwindigkeit                                   |      |
|   |       |          | 4.2.1.6 Niederschlag  |      |
|   |       | 4.2.2    | Hydrologische Eingangsgrößen                                  |      |

|     | 4.2.3  | Raumbezogene Eingangsgrößen   | 41 |
|-----|--------|---|----|
|     |        | 4.2.3.1 Digitales Höhenmodell   | 41 |
|     |        | 4.2.3.2 Landnutzung   | 41 |
|     |        | 4.2.3.3 Bodenarten  | 41 |
|     | 4.2.4  | Fazit   | 43 |
|     |        | 4.2.4.1 Meteorologische Daten   | 43 |
|     |        | 4.2.4.2 Räumliche Daten   | 43 |
| 4.3 | Prepro | ocessing - Bestimmung der abgeleiteten Datensätze                     | 44 |
|     | 4.3.1  | Ermittlung von Höhengradienten  | 44 |
|     | 4.3.2  | Ermittlung von hydrologischen Strukturen                              | 45 |
|     | 4.3.3  | Fazit   | 47 |
| 4.4 | Proces | ssing – Modellanwendung   | 48 |
|     | 4.4.1  | Modellierungszeitraum   | 48 |
|     | 4.4.2  | Vorgehensweise  | 48 |
|     |        | 4.4.2.1 Allgemeines   | 48 |
|     |        | 4.4.2.2 Kalibrierung  | 49 |
|     |        | 4.4.2.3 Validierung   | 50 |
|     | 4.4.3  | Ergebnisse der Kalibrierung und Validierung                           | 51 |
|     |        | 4.4.3.1 Ermittelte Parametersätze                                     | 51 |
|     |        | 4.4.3.2 Güte der Modellanwendung                                      | 53 |
|     | 4.4.4  | Multiple-response-validation  | 61 |
|     |        | 4.4.4.1 Schneedeckenaufbau und Schneeschmelzprozess                   | 61 |
|     |        | 4.4.4.2 Validierung der Verdunstung anhand ausgewählter Verdunstungs- |    |
|     |        | situationen   | 63 |
|     |        | 4.4.4.3 Sättigungsflächen im Untersuchungsgebiet                      | 64 |
|     |        | 4.4.4 Möglichkeiten der räumlichen Übertragung und Validierung –      |    |
|     |        | Beispiel: Rotbach   | 66 |
|     | 4.4.5  | Fazit   | 67 |
| 4.5 | Postpr | rocessing - weitere Darstellung und Analyse der Simulationsergebnisse | 69 |
|     | 4.5.1  | Wasserhaushaltsbilanzen   | 69 |
|     |        | 4.5.1.1 Niederschlag  | 70 |
|     |        | 4.5.1.2 Abfluss   | 71 |
|     |        | 4.5.1.3 Verdunstung   | 72 |
|     | 4.5.2  | Abflusskomponenten  | 76 |
|     | 4.5.3  | Vergleich mit anderen Modellanwendungen im Untersuchungsgebiet        | 81 |
|     | 4.5.4  | Gesamtbetrachtung der Abflüsse der Teileinzugsgebiete im Dreisam-     |    |
|     |        | Einzugsgebiet   | 83 |
|     | 4.5.5  | Fazit   | 85 |
|     |        |   |    |

| 5    | Mode                 | ellanalyse und Bewertung                    |    |  |  |
|------|----------------------|---|----|--|--|
|      | 5.1                  | Übersicht                                   |    |  |  |
|      | 5.2                  | Räumliche Interpolationen der Eingangsdaten |    |  |  |
|      | 5.3                  | Niederschlagskorrektur                      |    |  |  |
|      | 5.4                  | Der Verdunstungskomplex                     |    |  |  |
|      | 5.5                  | Das Schneemodul                             |    |  |  |
|      | 5.6                  | Das Infiltrationsmodul                      |    |  |  |
|      | 5.7                  | Der Boden- und Abflussbildungskomplex       |    |  |  |
|      | 5.8                  | Abflusskonzentration und Abflussrouting     |    |  |  |
|      | 5.9                  | Modellhandhabung und operationeller Einsatz |    |  |  |
|      | 5.10                 | Fazit                                       |    |  |  |
| 6    | Schlu                | issfolgerung und Ausblick                   | 97 |  |  |
| Lite | Literaturverzeichnis |   |    |  |  |
| Anh  | ang A                |   |    |  |  |
| Anh  | Anhang B             |   |    |  |  |

# Verzeichnis der Abbildungen

| Abb. 1.1:  | Vorgehensweise bei der Anwendung von WaSiM-ETH4                              |
|------------|--|
| Abb. 2.1:  | Messstationen und (Pegel- oder Mündungs-) Einzugsgebietsgrenzen des          |
|            | Dreisam-Einzugsgebietes5   |
| Abb. 2.2:  | Das Dreisam-Einzugsgebiet in dreidimensionaler Darstellung (HOLOCHER, 1997)6 |
| Abb. 2.3:  | Mittlere monatliche Niederschlagssummen an verschiedenen Stationen im        |
|            | Untersuchungsgebiet für die Periode 1931-1960                                |
|            | (Datengrundlage: TRENKLE, 1988)  |
| Abb. 2.4:  | Bodenübersichtskarte 1:200000 des Untersuchungsgebietes                      |
|            | (GEOLOGISCHES LANDESAMT BADEN-WÜRTTEMBERG, 1992-1995)12                      |
| Abb. 2.5:  | Prozentuale Aufteilung der Landnutzung pro Teileinzugsgebiet                 |
|            | (Datengrundlage: LANDSAT Aufnahme 1993)13                                    |
| Abb. 2.6:  | Landnutzung im Untersuchungsgebiet (LANDSAT Aufnahme 1993)14                 |
| Abb. 2.7:  | Abflussregime der im Dreisam-Einzugsgebiet unterhaltenen Pegel               |
|            | (Datengrundlage: unterschiedlich lange Datenreihen, siehe Tab. 2.1)16        |
| Abb. 3.1:  | Modellstruktur WaSiM-ETH (verändert nach JASPER & SCHULLA, 1999)18           |
| Abb. 4.1:  | Niederschlagsdisaggregierung im Untersuchungsgebiet                          |
| Abb. 4.2:  | Ermittlung und Parametrisierung der modifzierten BÜK 200 anhand              |
|            | der Bodenartentabelle (beispielhafter Auszug)42                              |
| Abb. 4.3:  | Ausgewählte stündliche Ergebnisse der Höhenregression der Temperatur [°C]45  |
| Abb. 4.4:  | Topographische Analyse mit TANALYS (verändert, SCHULLA, 1997)46              |
| Abb. 4.5:  | Beurteilung der Güte einer Simulation anhand unterschiedlicher Kriterien49   |
| Abb. 4.6:  | Niederschlags-Abfluss-Simulation für das Dreisam-Einzugsgebiet in der        |
|            | Kalibrierperiode (01.08.95 - 31.07.96)                                       |
| Abb. 4.7:  | Niederschlags-Abfluss-Simulation für das Brugga-Einzugsgebiet in der         |
|            | Kalibrierperiode (01.08.95 - 31.07.96)                                       |
| Abb. 4.8:  | Niederschlags-Abfluss-Simulation für das Dreisam-Einzugsgebiet in der        |
|            | Validierperiode (exemplarisch 01.08.97 - 31.07.98)59                         |
| Abb: 4.9:  | Niederschlags-Abfluss-Simulation für das Brugga-Einzugsgebiet in der         |
|            | Validierperiode (exemplarisch 01.08.97 - 31.07.98)60                         |
| Abb. 4.10: | Qualitativer Vergleich der Schneehöhe an der Station Feldberg mit den        |
|            | mittleren Wasseräquivalenten verschiedener Höhenzonen61                      |
| Abb. 4.11: | Simuliertes mittleres Wasseräquivalent der Schneedecke im März 199662        |
| Abb. 4.12: | Beispielhafte Darstellung des Tagesganges der simulierten ETA für das        |
|            | Talbach-Einzugsgebiet anhand von zwei Strahlungstagen                        |
| Abb. 4.13: | Tagesgang der zeitlich hochaufgelösten Verdunstung $E_{kor}$ am              |
|            | ARINUS-Standort Schluchsee an zwei Strahlungstagen (FRITSCH, 1998)64         |

| Abb. 4.14: | Prozentuale Sättigungszeit der Flächen im Hydrologischen Jahr 1996             |
|------------|--|
|            | und kartierte Sättigungsflächen im Brugga-Einzugsgebiet (GÜNTNER, 1997)65      |
| Abb. 4.15: | Niederschlags-Abfluss-Simulation auf Tageswertbasis für das                    |
|            | Rotbach-Einzugsgebiet als Beispiel für eine räumliche Übertragung              |
| Abb. 4.16: | Räumlich detaillierte Niederschlagsverteilung für das HJ 199670                |
| Abb. 4.17: | Niederschlag der einzelnen Zonen in den einzelnen Hydrologischen Jahren71      |
| Abb. 4.18: | Flächendetaillierter Gesamtabfluss im Dreisam-Einzugsgebiet                    |
|            | (01.11.95-31.07.96)  |
| Abb. 4.19: | Tageswerte der Verdunstungsgrößen im Dreisam-Einzugsgebiet                     |
|            | (01.11.95-31.10.96)  |
| Abb. 4.20: | Räumlich detaillierte Verdunstungsgrößen des Dreisam-Einzugsgebietes           |
|            | (01.11.95-31.10.96)  |
| Abb. 4.21: | Flächendetaillierte Betrachtung der Abflusskomponenten (01.11.95-31.10.96) 80  |
| Abb. 4.22: | Abflussregime aus der Modellanwendungsperiode errechnet (01.08.95-31.07.99) 84 |
| Abb. 4.23: | Prozentuale Anteile des Teileinzugsgebietabflusses am Gesamtabfluss            |
|            | im Vergleich zur Teileinzugsgebietsfläche                                      |
| Abb. 5.1:  | Ergebnis der Niederschlagskorrektur bei zonaler Betrachungsweise               |

# Verzeichnis der Abbildungen im Anhang

| Abb. A.1: | Niederschlags-Abfluss-Simulation für das Talbach-Einzugsgebiet in der         |       |
|-----------|---|-------|
|           | Kalibrierperiode (01.08.95-01.08.96)  | . 107 |
| Abb. A.2: | Niederschlags-Abfluss-Simulation für das Zastler-Einzugsgebiet in der         |       |
|           | Kalibrierperiode (01.08.95-31.07.96)  | . 108 |
| Abb. A.3: | Niederschlags-Abfluss-Simulation für das Zastler-Einzugsgebiet in der         |       |
|           | Validierperiode (01.08.96-31.07.97)   | . 109 |
| Abb. A.4: | Niederschlags-Abfluss-Simulation für das Dreisam-Einzugsgebiet in der         |       |
|           | Validierperiode (exemplarisch 01.08.98-31.07.99)                              | . 109 |
| Abb. A.5: | Niederschlags-Abfluss-Simulation des Winterhochwassers 1999 im                |       |
|           | Brugga-Einzugsgebiet (Periode 11.02.99-25.03.99)                              | .111  |
| Abb. A.6: | Ergebnisse der Ganglinienseparation mit Silikat für das Winterhochwasser 1999 |       |
|           | im Brugga-Einzugsgebiet (DFG-Projekt Le 698/8-3, 1999)                        | . 112 |

# Verzeichnis der Tabellen

| Gewässerkundliche Hauptzahlen der Pegel im Dreisam-Einzugsgebiet          |   |
|---|---|
| (Datengrundlage: LFU, 2000)   | 15  |
| Stündliche Abflusszeitreihen im Untersuchungsgebiet                       | 40  |
| Tägliche Abflusszeitreihen im Untersuchungsgebiet                         | 40  |
| Mittelwerte der Bestimmtheitsmaße der Höhenabhängigkeit der einzelnen     |   |
| meteorologischen Parameter (Datengrundlage: 01.08.96-31.07.99)            | 44  |
| Eingabeparameter des Hilfsprogrammes TANALYS für das 200 m Raster         | 46  |
| Niederschlagskorrektur  | 51  |
| Räumliche Interpolation der Eingangsdaten                                 | 51  |
| Temperaturmodifikation  | 51  |
| Parametrisierung der Landnutzungstabelle                                  | 52  |
| Parametrisierung des Schneemoduls   | 52  |
| Parametrisierung des Interzeptionsmoduls                                  | 52  |
| Parametrisierung des Infiltrationsmoduls                                  | 52  |
| Parametrisierung des Bodenmoduls  | 52  |
| Parametrisierung der Bodenartentabelle                                    | 53  |
| Parametrisierung des Abflussroutings                                      | 53  |
| Gütemaße der Modellanwendung von WaSiM-ETH für die Einzugsgebiete         |   |
| und das Gesamtgebiet im Kalibrierungszeitraum (01.08.1995-31.07.1996)     | 54  |
| Gütemaße der Modellanwendung von WaSiM-ETH für die Einzugsgebiete         |   |
| und das Gesamtgebiet im Validierungszeitraum (01.08.1996-01.08.1999)      | 55  |
| Wasserbilanzen für die Hydrologischen Jahre 1996 – 1999                   | 69  |
| Vergleich der Abflusskomponenten der Modellierung mit den Ergebnissen von |   |
| Ganglinienseparationen (UHLENBROOK, 1999)                                 | 76  |
| Vergleich der Abflussbildungskonzepte                                     | 78  |
| Vergleich der Gütemaße verschiedener Modellsimulationen im                |   |
| Brugga-Einzugsgebiet (verändert, UHLENBROOK, 1999 und KIESE, 1999)        | 81  |
| Wasserhaushaltsbilanzen im Brugga-Einzugsgebiet für das                   |   |
| Hydrologische Jahr 1996 im Vergleich                                      | 82  |
|   | Gewässerkundliche Hauptzahlen der Pegel im Dreisam-Einzugsgebiet<br>(Datengrundlage: LFU, 2000) |

# Verzeichnis der Tabellen im Anhang

| Tab. B.1: | Physiographische Kennwerte des Dreisam-Einzugsgebietes und der               |      |
|-----------|--|------|
|           | Teileinzugsgebiete   | .113 |
| Tab. B.2: | Messumfang der meteorologischen Stationen der einzelnen Stationsbetreiber im |      |
|           | Untersuchungsgebiet  | .114 |
| Tab. B.3: | Parametrisierung der Landnutzungstabelle                                     | .115 |
| Tab. B.4: | Parametrisierung des Bodenmoduls   | .116 |
| Tab. B.5: | Parametrisierung der Bodenartentabelle (Abkürzungen siehe Tab. 4.13)         | .117 |
| Tab. B.6: | Parametrisierung des Abflussroutings   |      |
|           | (Variablenerklärung siehe Tab. 4.14 und Tab. B.4)                            | .118 |

# Verzeichnis der Abkürzungen und Symbole

| $\hat{oldsymbol{eta}}$   | Sonnenhöhe über Horizont   | rad oder $^{\circ}$ |
|--|--|---------------------|
| $\hat{arOmega}$  | Gefälleazimutwinkel (Expositionsrichtung), von Norden im                   | rad oder °          |
| $\hat{Q}_D$  | Im (Teil-)Einzugsgebiet gebildeter Direktabfluss in einem<br>Zeitintervall | mm                  |
| α  | Albedo (Anteil der kurzwelligen Strahlung, der reflektiert wird)           | -                   |
| α  | Van Genuchten Parameter  | $m^{-1}$            |
| δ  | Deklination der Sonne (Winkel zwischen, Sonnenstrahlen und                 |                     |
| 0  | Äquatorebene)  | rad oder $^{\circ}$ |
| Ø  | geographische Breite   | rad oder $^{\circ}$ |
| 'n   | maximaler relativer Wassergehalt vor dem Erreichen teil-                   |                     |
| ,  | anaerober Bedingungen  | -                   |
| λ  | latente Verdunstungswärme  | KJ∙Kg <sup>-1</sup> |
| ρ  | Dichte der Luft bei Normzustand  |                     |
|  | (0 °C, 1013.25 hPa: 1.29 Kg·m <sup>-3</sup> )                              | Kg·m <sup>-3</sup>  |
| $\sigma$   | Boltzmann-Konstante 5.67·10 <sup>-8</sup> Wm <sup>-2</sup> K <sup>-4</sup> | $Wm^{-2}K^{-4}$     |
| Δ  | Steigung der Sättigungsdampfdruck-Kurve                                    | hPa∙K <sup>-1</sup> |
| Ψ  | Saugspannung   | mm, hPa             |
| $\Delta t$   | Zeitschrittweite   | h                   |
| ${I\!$ | Potential des Bodenwassers in der Bodenoberfläche                          | mm                  |
| $\Theta_0$   | Anfangs-Bodenwassergehalt bei Infiltration (0 1)                           | -                   |
| $\psi_0$   | Saugspannung an Bodenoberfläche  | mm                  |
| $\Phi_l$   | Potential des Bodenwassers in der Tiefe der Feuchtefront                   | mm                  |
| $\psi_{f}$   | Saugspannung an der Feuchtefront   | mm                  |
| $\mathcal{E}_i$  | Abweichung zwischen gemessenen und simulierten Daten                       |                     |
|  | $(\mathbf{y}_i - \mathbf{x}_i)$  | -                   |
| $\gamma_p$   | Psychrometerkonstante  | hPa∙K <sup>-1</sup> |
| $\Theta_s$   | Winkel zwischen der Normalen einer Fläche und den Sonnen-<br>strahlen      | rad oder °          |
| $arOmega_s$  | Azimuthwinkel (Winkel zwischen Projektion der Sonnenstrahlen               |                     |
|  | und Norden)  | rad oder $^{\circ}$ |
| $\Theta_{sat}$   | Bodenwassergehalt bei vorgegebener Grenzspannung                           | -                   |
| $\Theta_{\psi G}$  | Bodenwassergehalt bei Sättigung (0 1)                                      | -                   |
| $\boldsymbol{\varTheta}_{wp}$  | Bodenwassergehalt beim bermanenten Welkebpunkt                             | -                   |
| $\beta_t$  | Gefällewinkel der betrachteten Ebene                                       | rad oder $^{\circ}$ |
| $A_e$  | Einzugsgebietsfläche   | $m^2$               |
| $a_l$  | Korrekturfaktor für flüssigen Niederschlag {in $P_{korr} = P(a_l+b_lu)$ }  | -                   |
| $a_r$  | Parameter für höhenabhängige lineare Regression (konstanter Anteil)        | -                   |
| A  | Berechnungsgröße zur Bestimmung des Oberflächenwiderstan-<br>des           | -                   |
| ARINUS   | Auswirkungen von Restabilisierungsmaßnahmen und Immissio-                  |                     |
|  | nen auf den N- und S-Haushalt der Öko- und Hydrosphäre von                 |                     |
|  | Schwarzwaldstandorten.   | -                   |
| $a_s$  | Korrekturfaktor für festen Niederschlag {in $P_{korr} = P(a_s+b_su)$ }     | -                   |
| $B_h$  | Breite des Hauptbettes eines Gerinnes                                      | m                   |
| $b_l$  | Korrekturfaktor für flüssigen Niederschlag {in $P_{korr} = P(a_l+b_lu)$ }  | -                   |

| b <sub>r</sub>             | Parameter für höhenabhängige lin. Regression (Anstieg der Re-          |                                     |
|----------------------------|--|-------------------------------------|
| ,                          | gressionsgeraden)  | -                                   |
| BR                         | Breitnau   |                                     |
| $b_s$                      | Korrekturfaktor für festen Niederschlag {in $P_{korr} = P(a_s+b_su)$ } | -                                   |
| BU                         | Buchenbach   | -                                   |
| BÜK 200                    | Bodenkundliche Übersichtskarte 1:200000                                | -                                   |
| $B_{\nu}$                  | Vorlandbreite eines Gerinnes   | m                                   |
| $C_1$                      | temperaturabhängiger Schmelzfaktor                                     | $mm \cdot (^{\circ}C \cdot d)^{-1}$ |
| <i>C</i> <sub>2</sub>      | windabhängiger Schmelzfaktor   | $mm(^{\circ}Cms^{-1}d)^{-1}$        |
| $c_k$                      | Begrenzung des K <sub>s</sub> -Verhältnisses zwischen zwei Schichten   | -                                   |
| $C_l$                      | Größe des Wasserspeichers als Anteil am Schneewasseräquiva-            |                                     |
|                            | lent   | -                                   |
| $c_p$                      | spezifische Wärmekapazität der Luft bei konstantem Druck               |                                     |
|                            | $c_p = 1.005 \text{ KJ} \cdot (\text{Kg} \cdot \text{K})^{-1}$         | $KJ \cdot (Kg \cdot K)^{-1}$        |
| $cr_0$                     | empirischer Faktor zur Berücksichtigung der diffusen kurzwelli-        |                                     |
|                            | gen Strahlung  | -                                   |
| C <sub>rfr</sub>           | Koeffizient für das Rückgefrieren                                      | -                                   |
| $C_t$                      | Skalierungsparameter für topographische Temperaturmodifikati-          |                                     |
|                            | on   | -                                   |
| $d, d(u,u_j)$              | Entfernung (des Ortes u vom Ort u <sub>j</sub> )                       | m                                   |
| $d_1 \dots d_3$            | charakteristische Knickpunkte der Vegetationsentwicklung in            |                                     |
| 550                        | Julianischen Tagen   | -                                   |
| DFG                        | Deutsche Forschungsgemeinschaft  | -                                   |
| DGM                        | Digitales Höhenmodell  | -                                   |
| $d_h$                      | Verschiebungshöhe als Bestandeseigenschaft zur Bestimmung              |                                     |
| 1                          | von $\mathbf{r}_a$   | m                                   |
| $d_{max}$                  | maximale Entremung einer Station von der Interpolationsstelle,         |                                     |
| 1                          | um diese Station zur Interpolation nach IDw zu berucksichtigen         | m                                   |
| ar                         | Skanerungsparameter zur Beruckstentigung der Entwasserung-             |                                     |
| סשים                       | Doutscher Wetterdionst   | -                                   |
|                            | aktueller Wasserdampfdruck   | -<br>hDa                            |
| e<br>F                     | Fluss latenter Wärme (Verdunstungsrate)                                | mm                                  |
| E                          | Fhnet  | -                                   |
| FI                         | Interzentionsverdunstung   | mm                                  |
| Etron                      | Verdunstung  | mm                                  |
| $\mathcal{L}_{\text{KOI}}$ | Sättigungsdampfdruck der Luft bei der herrschenden Temperatur          |                                     |
| 03                         | T  | hPa                                 |
| ETP                        | potentielle Evapotranspiration (potentielle Verdunstung)               | mm                                  |
| ETR                        | reale Evapotranspiration (reale Verdunstung)                           | mm                                  |
| EZG                        | Einzugsgebiet  | km²                                 |
| F                          | kumulierte Infiltration  | mm                                  |
| fd                         | mittlerer Strahlungskorrekturfaktor für einen ganzen Tag               | -                                   |
| $f_f$                      | Infiltrationsintensität  | $\text{mm}\cdot\text{h}^{-1}$       |
| FLD                        | Feldberg   | -                                   |
| FR                         | Freiburg   | -                                   |
| $F_s$                      | kumulierte Infiltrationsmenge bis zur Sättigungszeit (Infiltrati-      |                                     |
|                            | onsmodul)  | mm                                  |
| FVA                        | Forstliche Versuchsanstalt   | -                                   |
| G                          | Bodenwärmefluss  | $Wh \cdot m^{-2}$                   |
| GD                         | Gesamtdifferenz  | mm                                  |

| GIS                   | Geographisches Informationssystem  | -                                  |
|-----------------------|--|------------------------------------|
| HBV                   | ein Niederschlags-Abfluss-Modell   | -                                  |
| $h_{geo0}$            | Geländeoberkante   | m                                  |
| $h_{GW}$              | Grundwasserspiegel   | m                                  |
| HI                    | Hinterzarten   | -                                  |
| HJ                    | Hydrologisches Jahr  | -                                  |
| $h_M$                 | Höhe (geographische Höhe über dem Meer)  | m                                  |
| HO(F)                 | Hofsgrund  | -                                  |
| HQ                    | Höchster Hochwasserabfluss   | m³/s                               |
| $h_s$                 | Stundenwinkel  | rad oder $^{\circ}$                |
| $h_{SI}$              | maximale Füllhöhe des Interzeptionsspeichers   | mm                                 |
| h <sub>sr</sub>       | Sonnenaufgangszeit (dezimal)   | h                                  |
| $h_{ss}$              | Sonnenuntergangszeit (dezimal)   | h                                  |
| i                     | Laufindex  | -                                  |
| Ι                     | Gefälle  | $\mathbf{m} \cdot \mathbf{m}^{-1}$ |
| <i>i</i> <sup>A</sup> | Anzahl der Gitterelemente eines gesamten Einzugsgebietes   | -                                  |
| IDW                   | Inverse Distance Weighting Interpolation   | _                                  |
| IHF                   | Institut für Hydrologie Freiburg   | _                                  |
| IPG                   | Institut für Physische Geographie  | -                                  |
| i                     | Laufindex  | _                                  |
| J<br>ID               | Iulianischer Tag (1 Ianuar = 1)  | _                                  |
| sD<br>k               | $y_{\text{on Kormon Konstanta}} \left( -\frac{0}{2} \right)$   | m e <sup>-1</sup>                  |
| К<br>1-               | Volt Kalinali-Kollstalle ( $\approx 0.4$ )<br>Decreasional constants der Leitfähigkeiteshnehme mit der Tiefe | 111-8                              |
| K rec                 | Rezessionskonstante der Lettrangkensabilanne nint der Tiele  | -                                  |
| KB                    | Speicherruckgangskonstante des Einzeinnearspeichers Basisab-   |                                    |
| 1 1                   |  | m                                  |
| $K_D, K_H$            | Speicherruckgangskonstanten für Direktabiluss bzw. Zwischen-   | 1.                                 |
| 1                     | abilities ( $_{\rm H}$ = nypodermisch)   | n<br>1                             |
| $k_h$                 | Einzellinearspeicherkonstante des Hauptbettes  | h                                  |
| K <sub>korr</sub>     | Korrekturfaktor für vertikale hydraulische Leitfähigkeit   | -                                  |
| $K_s$                 | gesättigte vertikale hydraulische Leitfähigkeit des Bodens   | mm/h                               |
| $k_s$                 | gesättigte vertikale hydraulische Leitfähigkeit des Bodens   | m/s                                |
| $k_v$                 | Einzellinearspeicherkonstante des Vorlandes  | h                                  |
| L                     | Länge des Gewässerabschnittes  | m                                  |
| LAI                   | Blattflächenindex  | -                                  |
| LFU                   | Landesanstalt für Umweltschutz Baden-Württemberg   | -                                  |
| $log. R_{e\!f\!f}$    | logarithmische Modelleffizienz   | -                                  |
| $l_s$                 | Sättigungstiefe  | mm                                 |
| Μ                     | Schmelzrate  | $\text{mm}\cdot(\Delta t)^{-1}$    |
| т                     | Van Genuchten Parameter  | -                                  |
| m ü. NN               | Meter über Normal Null   | m                                  |
| $M_{\rm E}$           | Schmelze durch latente Wärme   | $\text{mm} \cdot (\Delta t)^{-1}$  |
| MHQ                   | Mittlerer Hochwasserabfluss  | m³/s                               |
| M <sub>neg</sub>      | negative Schmelze (rückgefrierendes Wasser)  | $\text{mm} \cdot (\Delta t)^{-1}$  |
| MNg                   | Mittlere Niedrigwasserspende   | $l/(s*km^2)$                       |
| M <sub>P</sub>        | Schmelze durch Eintrag von Energie durch den Niederschlag  | $mm \cdot (\Lambda t)^{-1}$        |
| MO                    | Mittlerer Abfluss  | $m^{3/s}$                          |
| Ma                    | Mittlere Abflussspende   | $l/(s*km^2)$                       |
| M <sub>P</sub>        | Strahlungsschmelze   | $mm \cdot (\Lambda t)^{-1}$        |
| Mc                    | Schmelze infolge fühlbarer Wärme   | $mm_{(\Lambda +)}^{-1}$            |
| M <sub>a</sub>        | Manning Strickler Beiwert für die Pauhigkeit des henetzten   | $\min(\Delta t)$                   |
| <b>Ivi</b> Str        | Imfondos   | 1/3 -1                             |
|                       | Unitaliges   | ın ∙s                              |

| 11                          | Van Genuchten Parameter  | _  |
|-----------------------------|--|--|
| n<br>n                      | auffüllbare Porosität $(0, 1)$                                   | -  |
| NMO                         | Mittlerer Niedrigwasserahfluss                                   | m <sup>3</sup> /s  |
| NPSM                        | Nonpoint Source Model  | -  |
| NO                          | niedrigster Niedrigwasserabfluss                                 | m³/s   |
| OL                          | Oberlieger   | -  |
| D                           | Potenz für die Wichtung der Entfernung im IDW-                   |  |
| 1                           | Interpolationsverfahren  | -  |
| Р                           | gemessener Niederschlag  | mm   |
| $p_0$                       | Luftdruck auf Meereshöhe (≈ 1013 mbar)                           | hPa  |
| PI                          | Niederschlagsintensität  | $\text{mm} \cdot (\Delta t)^{-1}$                          |
| P <sub>korr</sub>           | korrigierter Niederschlag  | mm   |
| $p_l$                       | aktueller Luftdruck  | hPa  |
| PRMS                        | Precipitation Runoff Modelling System                            | -  |
| $p_{schnee}$                | Anteil Schnee am Niederschlag (0 1)                              | -  |
| q                           | spezifischer Fluss   | m/s  |
| $\mathbf{Q}_0$              | Skalierungsfaktor Basisabfluss                                   | -  |
| Q <sub>B</sub>              | Basisabfluss   | mm   |
| <b>QD</b> <sub>Schnee</sub> | Anteil der Schneeschmelze, der direkt abfliesst, ohne in den Bo- |  |
|                             | den zu gelangen (Einfluss von Bodenfrost und schneeinnerem       |  |
|                             | Abfluss 0 1)   | -  |
| $q_{\it ifl}$               | Interflow  | mm   |
| $q_{\it ifl,max}$           | Maximaler möglicher Interflow                                    | mm   |
| $q_{in}$                    | Zuflüsse in die betrachtete Bodenschicht                         | m/s  |
| $q_{out}$                   | Abflüsse aus der betrachteten Bodenschicht                       | m/s  |
| $q_{v}$                     | vertikale Versickerungsrate                                      | mm·s⁻¹   |
| $R^2$                       | Bestimmtheitsmaß   | -  |
| $r_a$                       | aerodynamischer Widerstand der verdunstenden Oberfläche für      | -1   |
| D                           | turbulenten Wasserdampftransport                                 | s⋅m  |
| R <sub>eff</sub>            | Modelleffizienz nach NASH-SUTCLIFFE (1970)                       | -  |
| REGR                        | Hilfsprogramm WaSiM-ETH  | -  |
| RG                          | Globalstrahlung  | Wh·m <sup>2</sup>  |
| RG <sub>korr</sub>          | (um Einfluss der Topograhie) korrigierte Strahlung               | W·m <sup>-2</sup>  |
| R <sub>h</sub>              | hydraulischer Radius   | m  |
| R <sub>K</sub>              | kurzwellige Strahlungsbilanz                                     | Wh·m <sup>-2</sup>   |
| R <sub>L</sub>              | langwellige Strahlungsbilanz                                     | Wh⋅m <sup>-2</sup>   |
| RMF                         | strahlungsabh. Schmelzkoeffizient, jahreszeitenabhängig für      |  |
|                             | Kombinationsverfahren nach ANDERSON (1973) oder BRAUN            | (a.g. 1)-1   |
|                             | (1985)   | $\operatorname{mm}(^{\circ}\mathrm{C}\cdot\mathrm{d})^{+}$ |
| $R_N$                       | Nettostrahlung   | $Wh \cdot m^{-2}$  |
| $r_s$                       | Oberflächenwiderstand der verdunstenden Fläche gegen den         |  |
|                             | Übergang von Wasserdampf in die Atmosphäre (Big-leaf-            |  |
|                             | Ansatz)  | s⋅m <sup>-1</sup>  |
| r <sub>sc</sub>             | Blattoberflächenwiderstand der Pflanze gegen den Übergang von    | $s \cdot m^{-1}$   |
|                             | Wasserdampf in die Atmosphäre (bei voller Wasserversorgung)      |  |
| r <sub>ss</sub>             | Oberflächenwiderstand des Bodens gegen den Übergang von          |  |
|                             | Wasserdampf in die Atmosphäre (bei optimaler Wasserverfüg-       | 1  |
|                             | barkeit)   | s⋅m <sup>-1</sup>  |
| SCHAU                       | Schauinsland   | -  |
| SI                          | Interzeptionsspeicherinhalt                                      | mm   |

0

| SI <sub>max</sub>     | maximale Interzeptionsspeicherkapazität                             | mm                                 |  |  |
|-----------------------|---|------------------------------------|--|--|
| $S_l$                 | Flüssigspeicher der Schneedecke                                     |                                    |  |  |
| $S_s$                 | Speicher der Schneedecke für Schnee ( $S_s+S_1 = Wasseräquiva-$     |                                    |  |  |
|                       | lent)   | mm                                 |  |  |
| SSD                   | Sonnenscheindauer   | -                                  |  |  |
| SSD( <sub>rel</sub> ) | relative Sonnenscheindauer (0 1)                                    | -                                  |  |  |
| ST                    | DWD-Station St. Wilhelm   | -                                  |  |  |
| ST.PE                 | St. Peter   | -                                  |  |  |
| (ST.)MAE              | St. Märgen  | -                                  |  |  |
| STW                   | IHF-Station St. Wilhelm   | -                                  |  |  |
| t                     | Zeit  | h oder s                           |  |  |
| Т                     | Lufttemperatur  | °C                                 |  |  |
| Т                     | Transmissivität   | m²/s                               |  |  |
| T kor                 | um topographische Lage korrigierte Temperatur                       | °C                                 |  |  |
| $T_{0,m}$             | Grenztemperatur für das Einsetzen der Schneeschmelze                | °C                                 |  |  |
| TAC                   | Tracer-aided-catchment model  | -                                  |  |  |
| TANALYS               | Hilfsprogramm WaSiM-ETH   | -                                  |  |  |
| TG                    | Teileinzugsgebiet   | -                                  |  |  |
| $T_h$                 | Abflusstiefe im Hauptbett eines Gerinnes                            | m                                  |  |  |
| $t_i$                 | Tagnummer im julianischen Jahr (1. Januar: $t_i = 1$ )              | -                                  |  |  |
| $T_m$                 | mittlere, auf trockene Luft korrigierte Temperatur der Luftsäule    | °C                                 |  |  |
| T <sub>mess</sub>     | gemessene Temperatur  | °C                                 |  |  |
| TOPMODEL              | ein Niederschlags-Abfluss-Modell                                    | -                                  |  |  |
| $T_{R/S}$             | Grenztemperatur Regen/Schnee (50 % Schnee, 50% Regen)               | °C                                 |  |  |
| $t_{\rm s}$           | Sättigungszeit (Infiltrationsmodell)                                | h                                  |  |  |
| t <sub>taa</sub>      | Dauer des hellen Tages  | h                                  |  |  |
| T <sub>tran</sub>     | Übergangsbereich (+T) um T in welchem Schnee zu Re-                 |                                    |  |  |
| - trans               | gen übergeht  | К                                  |  |  |
|                       | Ort (heatshand ave y und y Koordinate yerryandet hei IDW in         |                                    |  |  |
| И                     | of t {bestenend aus x- und y-Koordinate, verwendet ber iD w in      |                                    |  |  |
|                       | 2(u)}   | -                                  |  |  |
| UBA                   | Umweltbundesamt   | -                                  |  |  |
| $u_w$                 | Windgeschwindigkeit   | $\mathbf{m} \cdot \mathbf{s}^{-1}$ |  |  |
| ν                     | Vegetationsbedeckungsgrad (Interzeptionsmodul) (0 1)                | -                                  |  |  |
| $v_2$                 | Windgeschwindigkeit in 2 m Höhe                                     | $\mathbf{m} \cdot \mathbf{s}^{-1}$ |  |  |
| VE                    | Volumen-Fehler  | mm                                 |  |  |
| $v_l$                 | Fliessgeschwindigkeit in einem Gerinne (Abfluss-Routing)            | $m \cdot s^{-1}$                   |  |  |
| Vmess                 | Windgeschwindigkeit in Messhöhe                                     | $m \cdot s^{-1}$                   |  |  |
| $V_{\nu}$             | Fliessgeschwindigkeit im Vorland eines Gerinnes                     | $\mathbf{m} \cdot \mathbf{s}^{-1}$ |  |  |
| V                     | Windgeschwindigkeit in der Höhe z                                   | $m s^{-1}$                         |  |  |
| W 142.                | relatives Gewicht eines Internolationswertes (an der Stelle i)      | -                                  |  |  |
| WAOIS                 | Wasser-Qualitäts-Informations-System                                | _                                  |  |  |
| WaSiM_FTH             | Wasserbaushalts-Simulations-Modell Fidgenössische Techni-           |                                    |  |  |
|                       | sche Hochschule   | _                                  |  |  |
| Y.                    | Antail rainfiltriarandan Wassars am Infiltrationsübarschuss         | -                                  |  |  |
| Λ <sub>f</sub><br>r   | Anten remnurerenden wassers am minuauonsubersenuss<br>Rachtswart    | -                                  |  |  |
| $\lambda_r$           | Hochwart  | -                                  |  |  |
| yr<br>Z               | internaliarter Wart (Invarsa Distance Weighting Internalation       | -                                  |  |  |
| ۷.                    |   |                                    |  |  |
| 7                     | ID W /<br>Zanitwinkal (Winkal zwischen Sonnanstrahlen und der Saul- | -                                  |  |  |
|                       | rechten)  | rad oder                           |  |  |
|                       | 10011011/   |                                    |  |  |

mm

m

 $Z_{t,0}$ 

 $Z_W$ 

Wurzeltiefe

# Zusammenfassung

Im Rahmen des DFG-Projektes "Tracerhydrologisch gestützte Ausweisung und Modellierung von Abflusskomponenten im mesoskaligen Bereich" erfolgte in den letzten Jahren die Anwendung von konzeptionellen Modellen im mesoskaligen Brugga-Einzugsgebiet (40 km<sup>2</sup>). In einem nächsten Schritt wird nun mit WaSiM-ETH ein weitgehend physikalisch basiertes Modell in zeitlich und räumlich hochaufgelöster Form angewendet. Das Untersuchungsgebiet soll das gesamte im Südschwarzwald gelegene Dreisam-Einzugsgebiet (258 km<sup>2</sup>) und seine Teileinzugsgebiete (inklusive dem Brugga-Einzugsgebiet) umfassen.

Schwerpunkt der Arbeit liegt auf der Bewertung des Modells und seiner Module anhand der Ergebnisse der Modellanwendung. Vor allem das Bodenmodul auf Grundlage der Richardsgleichung soll einer genauen Beurteilung unterzogen werden. Zu diesem Zweck war es notwendig das Modell über einen für eine Gesamtbeurteilung aussagekräftigen Zeitraum zu betreiben.

Die Anwendung eines weitgehend physikalisch basierten Modells in stündlichem Zeitschritt und einer Rasterweite von 200 m erfordert eine sehr gute Datengrundlage und eine umfangreiche Datenaufbereitung. Zur Aggregierung und Disaggregierung der meteorologischen Eingangsdaten müssen geeignete Verfahren angewendet werden. Insgesamt erfolgte eine Aufbereitung der meteorologischen Daten für eine Modellanwendung im Zeitraum vom 01.01.95 bis 31.07.99. Dieser Datensatz stellt eine wertvolle Arbeitsgrundlage für weitere Modellanwendungen im Untersuchungsgebiet dar. Die Aufbereitung der räumlichen Daten erfolgte mittels eines GIS und mit Hilfsprogrammen von WaSiM-ETH.

WaSiM-ETH stellt keine automatischen Verfahren zur Parameteroptimierung zur Verfügung. Deshalb muss die Modellkalibrierung auf Grundlage eines manuellen "trial-and-error-Verfahrens" erfolgen. Die Anwendung von WaSiM-ETH führte zu guten Ergebnissen in der Kalibrierungs- und Validierungsperiode. Neben einer guten Simulation der Abflussganglinien der Teileinzugsgebiete und des Gesamtuntersuchungsgebietes in der Anwendungsperiode konnte im Rahmen einer umfangreichen "multiple-response-validation" auch die Güte der Simulation der einzelnen Teilmodule beurteilt werden.

Durch die umfangreichen Möglichkeiten der Ergebnisausgabe kann mit WaSiM-ETH neben einer rein einzugsgebietsbezogenen Untersuchung der einzelnen Wasserbilanzglieder auch eine räumlich detaillierte Betrachtungsweise erfolgen. Hier zeigte sich die enorme räumliche Variabilität der Wasserbilanzglieder im Untersuchungsgebiet. Der einzugsgebietsbezogene Vergleich der simulierten Abflusskomponenten mit den Ergebnissen aus tracerhydrologischen Untersuchungen lieferte Ergebnisse, die in gleichen Größenordnungen lagen. Eine Unterteilung in die einzelnen Komponenten erfolgte jedoch aufgrund von unterschiedlichen Konzepten, so dass ein direkter Vergleich schwierig ist. Die räumlich detaillierte Betrachtung der Herkunft der Abflusskomponenten ist mit enormen Unsicherheiten behaftet.

Die Modellbewertung ergab, dass WaSiM-ETH mit weitgehend physikalisch basierten Algorithmen arbeitet. Jedoch ist auch bei WaSiM-ETH die Berücksichtigung von vereinfachenden Annahmen notwendig. So werden durch die Verwendung der eindimensionalen Richardsgleichung nur die vertikalen Flüsse physikalisch basiert ermittelt. Der laterale Fluss im Untergrund unterliegt der Kalibrierung. Eine Modellkalibrierung ist deshalb auch zwingend notwendig.

Gerade im Vergleich mit anderen Modellanwendungen zeigt WaSiM-ETH jedoch sehr gute Ergebnisse. Ist die Datengrundlage für einen Modellbetrieb in der physikalisch basiertesten Modellversion vorhanden, kann WaSIM-ETH auch räumlich und zeitlich hochaufgelöste Ergebnisse in Einzugsgebieten der oberen Mesoskale liefern.

Das Modell sollte weiter im Untersuchungsgebiet zur Anwendung kommen, da es auch als Datengrundlage für weitere Untersuchungen dienen kann. In einem nächsten Schritt sollte das zweidimensionale Grundwassermodul in die Modellanwendung integriert werden. Dadurch lassen sich auch laterale Flüsse der gesättigten Zone physikalisch basiert modellieren. Stofftransportbetrachtungen und Szenarioberechnungen können in einem nächsten Schritt folgen.

#### Stichworte

Wasserhaushaltsmodellierung WaSiM-ETH Dreisam Niederschlags-Abfluss-Modellierung Richardsgleichung multiple response validation

# Summary

As a part of the research project "Tracer based determination and modelling of runoff components in mesoscale catchments" several conceptual models were tested in the mesoscale basin of the Brugga basin (40 km<sup>2</sup>).

In a next step the almost physically-based **Wa**terbalance-**Si**mulation-**M**odel WaSiM-ETH has been applied to the basin of the river Dreisam (258 km<sup>2</sup>) with all its subcatchments. Within the basin four gauging stations are installed. One of them is the Brugga subcatchment gauging station.

Primary concern is an assessment of the WaSiM-ETH modules by the results of the model application. In particular the soil module using the Richards-equation for describing the water flow within the unsaturated soil has to be valuated.

The application of an almost physically based model in high spatial and temporal resolution (200 m grid, one hour) requires extensive data collection and data processing to provide the model input data. In order to disaggregate daily measures of meteorological input data to hourly data suitable methods have to be found or developed. The results of the data collection and processing for the period 95/01/01 - 99/07/31 form a valuable basis for future work in the study area. The .processing of spatial data requires detailed GIS applications or the use of additional WaSiM-ETH software.

Calibration follows a manual trial-and-error method since the structure of WaSiM-ETH does not include automatic procedures for optimizing the parameter set. According to statistical model efficiencies, good hourly runoff simulations are achieved at all gauging sites during the calibration and validation period. However the comparison of predicted and observed hydrographs cannot be considered as a sufficient test of models that purport to simulate the internal responses of a catchment. Therefore a validation of single modules of WaSiM-ETH was attempted by using additional information (multiple response validation):

- Simulations of the snow routine were compared with snow height measures at the station Feldberg (1480 m a.s.l) of the German Weather Services.
- Simulated evapotranspiration was compared with calculated evapotranspiration by the eddy correlation method.
- The location of saturated areas in the Brugga basin received by field mapping was compared with the simulation of saturated areas.

WaSiM-ETH provides output data in a high spatial resolution. Therefore it is possible to calculate the water balance on a catchment scale as well as on a grid scale. The results show the enormous spatial heterogeneities in the system responses.

The comparison of calculated runoff components with the runoff components determined by using environmental tracers showed fair correspondence. The results have to be critically valuated, because of the use of different concepts of the separation of runoff components. The results of the determination of runoff components on the grid scale showed an enormous uncertainty.

The valuation of the model showed the use of extensive physically based algorithms. Nevertheless WaSiM-ETH has to deal with several simplifications. The modelling is done only one-dimensional in the vertical direction. Lateral fluxes have to be calibrated.

The results of WaSiM-ETH were at least as good as the results received by using conceptional models. WaSiM-ETH makes high demands on the meteorological and spatial input data for using the model in the physically based Version. If the data doesn't meet the standard it is possible to use the model in a conceptional version.

Still, further studies will be required, especially with regard to the coupling of WaSiM-ETH with the two-dimensional groundwater module which improves the physically based modelling of the lateral fluxes of the saturated soil. Furthermore the calculation of landuse or climate scenarios is possible.

#### Keywords

water balance modelling WaSiM-ETH Dreisam rainfall-runoff-modelling Richards-equation multiple response validation

## 1 Einleitung

### 1.1 Überblick

Die Modellierung des Wasserhaushaltes im Einzugsgebiet ist eine der zentralen Aufgaben der Hydrologie. Sie ist die Voraussetzung zur Lösung wasserwirtschaftlicher Probleme (UHLEN-BROOK, 1999). Bei der Behandlung der verschiedensten wasserwirtschaftlichen Fragestellungen sind die Anforderungen an die hydrologischen Modelle enorm gestiegen. Wurden hydrologische Modelle früher vorwiegend zur Lösung von Problemen der Mengenbewirtschaftung oder des Hochwasserschutzes verwendet, so sind heute auch Fragen der Gewässergüte und des Gewässerschutzes mit in den Vordergrund gerückt. Hydrologische Modelle sollen in der Lage sein sowohl die derzeitigen als auch die unter veränderten Bedingungen zu erwartenden Wasser- und Stoffströme räumlich hoch aufgelöst zu prognostizieren (KLEEBERG, 1998). Allen diesen Fragestellungen ist jedoch gemein, dass sie ohne Verwendung eines Wasserhaushaltsmodells als Kernstück eines integrierten Modellierungsystems nicht gelöst werden können.

Dem Bedarf der Wasserwirtschaft an raum- und flächenbezogenen Entscheidungshilfen kam die rasante Entwicklung immer leistungsfähigerer Rechensysteme entgegen. Waren in den sechziger Jahren die vorhandenen Rechenkapazitäten bereits mit einfachen Konzeptmodellen erschöpft, so ist es heute möglich, bei der hydrologischen Modellentwicklung prozessorientiertere Algorithmen (wie z.B. die Richardsgleichung) und sowohl zeitlich als auch räumlich hochaufgelöste hydrologische Eingangsgrößen bei der Modellierung des Wasserhaushaltes zu verwenden.

Diese sogenannten physikalisch basierten Modelle müssen jedoch, da sie als Grundlage für weitere Modellanwendungen dienen, einer besonders strengen Bewertung unterliegen. Im Gegensatz zu statistischen und empirischen Modellen genügt es nicht, eine möglichst gute Anpassung der simulierten an die gemessene Ganglinie zu erreichen, vielmehr muss das System als Ganzes durch das Wasserhaushaltsmodell erfasst werden. Zur erfolgreichen und richtigen Modellierung von Geo- und Hydrosystemen ist deshalb ein gründliches Prozessverständnis unerlässlich, obwohl dieses oft genug vernachlässigt wird (LEIBUNDGUT, 2000).

Zur umfassenden Bewertung hydrologischer Modellkonzepte eignen sich deshalb vor allem die von wissenschaftlichen Instituten betriebenen Forschungseinzugsgebiete. Diese Einzugsgebiete verfügen meist über eine gesicherte Datengrundlage zur Modellanwendung. Zur Validierung und Bewertung der Ergebnisse können die Erkenntnisse aus der hydrologischen Prozessforschung eingesetzt werden. Für das Dreisam-Einzugsgebiet trifft dies in besonderem Maße zu, da hier aufgrund der Untersuchungen im Rahmen des DFG-Projektes "Tracerhydrologisch gestützte Ausweisung und Modellierung von Abflusskompenenten im mesoskaligen Bereich" Erkenntnisse aus experimentellen Abflussbildungsuntersuchungen zur Modellvalidierung herangezogen werden können.

#### **1.2** Problemstellung und Zielsetzung

Mit dem Wasserhaushalts-Simulations-Modell WaSiM-ETH wurde an der Eidgenössischen Technischen Universität Zürich ein Modell entwickelt, das dem neuesten Stand der flächendetaillierten Prozessmodellierung entspricht. Es ist ein weitgehend physikalisch basiertes Modell, das in seiner Ursprungsversion bereits mit Erfolg zur Lösung verschiedener Aufgaben angewendet wurde. Die neueste Modellversion bietet viele Möglichkeiten, beispielsweise die Koppelung des Wasserhaushaltsmodells mit einem Grundwassermodell oder mit einem Stofftransportmodul zur Simulation des Transports von konservativen Stoffen; auch können Landnutzungs- und Klimaänderungen simuliert werden (SCHULLA & JASPER, 1999). Jedoch steht eine umfassende Modellvalidierung mit Hilfe von verschiedenen Datensätzen noch aus.

Im Brugga- und Dreisam-Einzugsgebiet wurden bisher weitgehend konzeptionelle Einzugsgebietsmodelle angewendet (TOPMODEL: GÜNTNER (1997); HBV: HOLOCHER (1997); TAC: UHLENBROOK (1999); PRMS: MEHLHORN (1998); NPSM: KIESE (1999)). Diese Modelle stellen geringere Anforderungen an die Datenlage. Jedoch sind die in diesen Modellen angewendeten Abflussbildungsansätze häufig sehr stark vereinfacht und wesentlich simpler als es die mit experimentellen Methoden gewonnenen Erkenntnisse erlauben würden (DFG-PROJEKT LE 698/8-3, 1999). Mit zunehmender Dauer des DFG-Projektes hat sich die Datenlage im Untersuchungsgebiet soweit verbessert, dass nun physikalisch basiertere Modelle angewendet werden können. Mit WaSiM-ETH wurde ein Modell zur Verfügung gestellt, das diesen Anspruch erfüllt.

Ziel der Arbeit soll es sein, WaSiM-ETH im Dreisam-Einzugsgebiet und seinen Teileinzugsgebieten räumlich hochaufgelöst auf Stundenbasis anzuwenden. Hierbei soll - soweit es die Datenbasis erlaubt - die "physikalisch basierteste" Modellversion angewendet werden. Der Modellierungszeitraum soll sich über einen möglichst langen Zeitraum erstrecken, weshalb es notwendig wird, die Modellierungsgrundlage durch die Beschaffung zusätzlicher Daten (z.B. Meteorologische Zeitreihen und Raumdaten) zu verbessern. Neben der Modellanwendung muss eine umfassende kritische Modellbewertung erfolgen. Diese beinhaltet den Vergleich der Modellierungsergebnisse mit den experimentellen Resultaten aus Abflussbildungsuntersuchungen, und den Modellvergleich mit konzeptionellen Modellen.

#### **1.3** Methodisches Vorgehen

Die Vorgehensweise (Abb. 1.1) folgt im Wesentlichen der einer klassischen Niederschlags-Abfluss-Simulation. Sie gliedert sich in fünf Arbeitsschritte:

- Aufgrund des Komplexitäts- und Schwierigkeitsgrades der abzubildenden Prozesse erfordert eine Modellanwendung eine umfassende Einarbeitung. Für eine Beurteilung der verwendeten Prozesse hinsichtlich ihrer physikalischen Basiertheit ist eine umfangreiche theoretische Modellkenntnis erforderlich. Dies macht eine spätere Beurteilung der Modellierungsergebnisse und den Vergleich mit anderen Arbeiten erst möglich. WaSiM-ETH stellt keine graphische Benutzeroberfläche zur Verfügung. Deshalb ist eine genaue Kenntnis der zu parametrisierenden Steuerdatei und der durch die Steuerdatei beschriebene Modellstruktur in den verschiedenen Modellversionen erforderlich.
- Im Rahmen der Datenbeschaffung und -aufbereitung muss eine f
  ür die Modellanwendung ausreichende Datenbasis geschaffen werden. Da Datens
  ätze in der gew
  ünschten zeitlichen und r
  äumlichen Aufl
  ösung nicht zur Verf
  ügung stehen, m
  üssen Methoden der zeitlichen und r
  äumlichen Aggregation und Disaggregation verwendet werden. Die Auswahl des Verfahrens ergibt sich aus der Datengrundlage und den im Modellgebiet vorliegenden Rahmenbedingungen.
- Vor dem eigentlichen Processing muss im Preprocessing eine weitere Datenaufbereitung erfolgen. Methoden der räumlichen Interpolation der meteorologischen Eingangsdaten müssen auf ihre Anwendbarkeit im Untersuchungsgebiet geprüft werden. Hierbei kann auf die Erfahrungen aus früheren Modellierungen im Einzugsgebiet zurückgegriffen werden. Unter Nutzung von Zusatzprogrammen aus dem WaSiM-ETH Programmpaket oder Geographischen Informationssystemen können fehlende räumliche Datensätze erzeugt werden. Die Parametrisierung der Steuerdatei ist eine Voraussetzung zur Modellanwendung. Für eine Vielzahl der benötigten Modellparameter liegen keine Messungen im Einzugsgebiet vor. Deshalb muss in diesem Fall auf Literaturdaten zurückgegriffen werden.
- Das Processing gliedert sich in eine Kalibrierungs- und eine Validierungsperiode. Der in der Kalbrierungsperiode ermittelte optimale Datensatz wird anhand der Validierungsperiode mit unabhängigen Daten verifiziert. Neben den klassischen statistischen Gütemaßen, wie der Modelleffizienz, müssen weitere Parameter zur Beurteilung der Güte der Wasserhaushaltssimulation herangezogen werden, z.B. die Betrachtung der Wasserbilanz samt ihrer Bilanzglieder.

 Auf dem Postprocessing liegt der Schwerpunkt der Arbeit. Die Modellergebnisse sollen aufbereitet und im Vergleich mit experimentellen Ergebnissen einer kritischen Bewertung unterzogen werden. In einer abschließenden Betrachtung erfolgt eine Gesamtbewertung des Modells mit seinen Modulen und es werden weitere mögliche Modellanwendungen aufgezeigt.



Abb. 1.1: Vorgehensweise bei der Anwendung von WaSiM-ETH

# 2 Das Untersuchungsgebiet

### 2.1 Einführung

Die Niederschlag-Abfluss-Modellierung soll für das Dreisam-Einzugsgebiet (Abb. 2.1) mitsamt seinen größeren Teileinzugsgebieten erfolgen. Im Folgenden wird die physiographische Ausstattung des Gesamtgebietes und der ausgewiesenen Teilgebiete beschrieben. Besonderes Augenmerk wird auf Teileinzugsgebiete mit Pegel am Gebietsauslass gerichtet und auf deren Vergleichbarkeit mit Teileinzugsgebieten ohne Pegel. Zwischengebiete im Zartener Becken werden nicht betrachtet.



Abb. 2.1: Messstationen und (Pegel- oder Mündungs-) Einzugsgebietsgrenzen des Dreisam-Einzugsgebietes

### 2.2 Naturräumliche Lage und Topographie

Das Dreisam-Einzugsgebiet befindet sich am Westrand des südlichen Schwarzwaldes. Bis zum Gebietsauslass am Pegel Ebnet umfasst das Untersuchungsgebiet eine Fläche von ca. 258 km<sup>2</sup> und kann somit dem oberen erweiterten Mesoskalenbereich zugeordnet werden (BECKER, 1992). Das Untersuchungsgebiet wird im Westen des Zartener Beckens durch den Gebietsauslass am Pegel Ebnet (316 m ü. NN) begrenzt. Die höchsten Erhebungen befinden sich im Südwesten, zwischen Schauinsland (1284 m ü. NN) und Feldberg (1493 m ü. NN). Der Osten wird von einem Hochplateau mit einer Höhe von ca. 800 m bis ca. 1100 m ü. NN eingenommen, wohingegen die nördlichen Höhenzüge mit Roßkopf (737 m ü. NN) und Vorderem Hochwald (ca. 1000 m ü. NN) niedriger sind (Abb. 2.2).

Charakteristisch für das Untersuchungsgebiet ist die ausgeprägte Reliefierung. Die maximale Höhendifferenz beträgt ca. 1100 m bei einer mittleren Höhe von 777 m. Das Relief besitzt ein mittleres Gefälle von 15,8° (Tab. B.1). Die Ermittlung der physiographischen Parameter und der Teileinzugsgebietsgrenzen erfolgte unter Verwendung eines Digitalen Geländemodells (DGM) mit der Rastergröße 50 m \* 50 m.



Abb. 2.2: Das Dreisam-Einzugsgebiet in dreidimensionaler Darstellung (HOLOCHER, 1997)

### 2.3 Morphologische Gliederung

Nach HÄDRICH & STAHR (1992) besteht das Einzugsgebiet aus drei morphologisch eigenständigen Teilkomplexen:

Die flache Wanne des Zartener Beckens ist mit 30-50 m mächtigen pleistozänen und holozänen Sedimenten verfüllt. Morphologisch lässt sich das Becken in zwei Terrassenstufen und in die Auen der zahlreichen zentipedal zufließenden Bäche gliedern.

Die stark reliefierten Gebiete mit tief eingeschnittenen Tälern wie das Höllental, das Zastlertal oder das St. Wilhelmer Tal weisen einen vielfältigen kaltzeitlichen Formenschatz auf, der von Tal zu Tal unterschiedlich gut erhalten ist. Ein sehr gut erhaltenes Trogtal stellt das St. Wilhelmer Tal dar, dessen - im Vergleich zum Bruggatal - breiter Talboden mehrfach durch Moränenwälle untergliedert ist.

Die Hochflächen und Hochmulden umfassen das Gebiet von St. Peter und St. Märgen, das nach Süden bis zur Weißtannenhöhe bei Breitnau ansteigt. Diese Teile gehören morphodynamisch gesehen zum danubischen Relieftyp des Schwarzwaldes.

### 2.4 Hydroklimatische Verhältnisse

Das Untersuchungsgebiet liegt im Bereich der zyklonalen Westwinddrift. Aufgrund der wechselseitigen Beeinflussung des Untersuchungsgebietes durch maritime und kontinentale Luftmassen wird das makroskalige Klima dem subatlantischen Übergangstyp zugeordnet. Orographische Formenvielfalt, Relief, Höhenlage und Landnutzung modifizieren jedoch in erheblichem Maße das Klimageschehen in der Mesoskale des Untersuchungsgebietes (PARLOW & ROSNER, 1992).

#### 2.4.1 Lufttemperatur

Die Temperaturverteilung im Untersuchungsgebiet ist durch die großen Höhenunterschiede gegeprägt. Die Jahresmitteltemperaturen liegen nach FVA (1994) zwischen 10,3° C (Station Freiburg-Herdern, Periode 1951-1980, 269 m ü. NN) und 2,5° C in den Hochlagen (Station Feldberg, Periode 1951-1980, 1486 m ü. NN). Der Temperaturgradient beträgt durchschnittlich 0,6°C/100 m, variiert aber im Jahresverlauf stark (Sommer: 0,7° C/100 m, Winter 0,4°C/100 m). Charakteristisch für das Untersuchungsgebiet ist die Ausbildung von Temperaturinversionen in den Herbst- und Wintermonaten bei stabilen Hochdruckwetterlagen. Die Inversionsgrenze liegt in der Regel zwischen 600 und 800 m ü. NN. Es kann dann zu positiven vertikalen Temperaturgradienten kommen (TRENKLE, 1988).

#### 2.4.2 Sonnenscheindauer

Freiburg zählt zu den sonnenreichsten Städten Deutschlands mit durchschnittlich 1802 Stunden pro Jahr (Station Freiburg, Periode 1901-1950, 269 m ü. NN). Dagegen wird die Sonnenscheindauer in den tiefeingeschnittenen Tälern des Schwarzwaldes durch die starke Horizonteinengung auf 1400 Stunden im Jahr beschränkt. Die mittelhohen Lagen verzeichnen noch etwa 1500 Stunden und auch auf den Kammlagen des Feldbergs scheint die Sonne noch durchschnittlich 1550-1600 Stunden jährlich. Hierbei spielen die Inversionswetterlagen im Herbst und Winter eine bedeutende Rolle, bei denen sich die Höhenlagen über der Inversionsgrenze befinden und damit in erhöhten Strahlungsgenuss kommen (TRENKLE,1988).

#### 2.4.3 Luftfeuchtigkeit

Das langjährige Mittel der Luftfeuchtigkeit der Station Freiburg beträgt 74 % (Periode 1901-1950, 269 m ü. NN), das der Station Feldberg 82 % (Periode 1901-1950, 1486 m ü. NN). Obwohl ein enger Zusammenhang zwischen Lufttemperatur und Luftfeuchtigkeit besteht, wird die Luftfeuchtigkeit stark durch orographische Eigentümlichkeiten im Untersuchungsgebiet beeinflusst (TRENKLE, 1988).

#### 2.4.4 Niederschlag

Die Verteilung der Jahresniederschläge im Untersuchungsgebiet wird ebenfalls in starkem Maße von der Topographie bestimmt. Prinzipiell nimmt bei längeren Untersuchungszeiträumen die durchschnittliche Niederschlagsmenge mit der Höhe zu. Diese Niederschlagszunahme ist jedoch nicht einheitlich, sie kann durch andere topographische Effekte (z. B. Luv-Lee-Effekt) überprägt sein. Aus Abbildung 2.3 ist ersichtlich, dass die Niederschlagsstationen im Südwesten die größten Niederschlagsmengen erhalten. Dies ist einerseits auf die dominierenden südwestlichen Windrichtungen zurückzuführen, andererseits kommt es dort aufgrund der Lage am äußeren Westrand des Südschwarzwaldes und der Höhe des Gebietes zu ausgeprägten Luveffekten mit Stauniederschlägen (TRENKLE, 1988).



Abb. 2.3: Mittlere monatliche Niederschlagssummen an verschiedenen Stationen im Untersuchungsgebiet für die Periode 1931-1960 (Datengrundlage: TRENKLE, 1988)

#### 2.5 Hydrogeologie

Hydrogeologisch lässt sich das Untersuchungsgebiet in die zwei Einheiten Grundgebirgsschwarzwald und Zartener Becken gliedern:

Dem Grundgebirgsschwarzwald werden rund 90 % des Einzugsgebietes zugeordnet. Aufgrund des geringen Poren- und Kluftvolumens ist das Speichervermögen gering, so dass es im Grundgebirge zu keinen größeren Grundwasseransammlungen kommt. Der natürliche Wassertransport im Kristallin ist weitgehend an das Vorhandensein von geologischen Diskontinuitäten gebunden. Der Wassertransport durch die Gesteinsmatrix ist vernachlässigbar. So ergibt sich nach STOBER (1995) die große Variabilität der im Schwarzwald vorgefundenen Transmissivitäten (T) von gut durchlässig (T: 10<sup>-4</sup> m<sup>2</sup>/s) bis schwach durchlässig (T: 10<sup>-7</sup> m<sup>2</sup>/s). Im Untersuchungsgebiet haben Erzgänge und die mit ihrem Abbau verbundenen Stollenanlagen, die zu einer Art künstlichen Kluftnetzes führten, sowie stärker tektonisch beanspruchte Bereiche einen entscheidenden Einfluss auf die hydraulische Durchlässigkeit. Das sich in diesem Kluftgrundwasserleiter befindliche Wasser ist hauptsächlich für die Bildung von Basisabfluss verantwortlich (UHLENBROOK, 1999).

Über dem Felsuntergrund aus Gneisen, Anatexiten und Graniten befinden sich als hydrologische Speicher wirkende Verwitterungsdecken, Moränenbildungen und Hangschuttdecken mit Mächtigkeiten von bis zu 10 m. Eine eingehendere Charakterisierung der Deckfolgen findet sich bei STAHR (1979). Diese Deckschichten stellen die Hauptumsatzräume für das eingetragene Niederschlagswasser dar; sie sind von großer Wichtigkeit für die Bildung von langsamen und schnellen Abflusskomponenten. Die Durchlässigkeiten der Hangschuttaquifere können aufgrund der unterschiedlichen Korngrößenzusammensetzung sehr variabel sein (SAUTER, 1967).

Die zweite hydrogeologische Einheit ist das Zartener Becken. In den dort befindlichen jüngeren, gut durchlässigen, würmzeitlichen Gneis-Schottern bildete sich ein mächtiger Grundwasserkörper aus. Nach Westen nimmt der Grundwasserflurabstand, bedingt durch die Verengung des Talquerschnitts und die aufsteigende Gneisoberfläche des Grundgebirges ab (HERDEG, 1993 und FEW/GLA, 1990). Die mittleren Grundwasserflurabstände betragen im Norden 10 bis 20 m, im Südteil des Beckens 3 bis 10 m. Das Grundwasser beeinflusst somit den oberflächennahen Bodenwasserhaushalt aufgrund der großen Flurabstände im gesamten Gebiet kaum (ALBERS, 1998). Die durch das Zartener Becken fließenden Vorfluter infiltrieren wegen der hohen Durchlässigkeiten stark in das Grundwasser und tragen so zur Grundwasserneubildung bei. Der unterirdische Abstrom aus dem Untersuchungsgebiet beträgt durchschnittlich ca. 0,52 m<sup>3</sup>/s. (FRIEG, 1987 ermittelte 0,58 m<sup>3</sup>/s). Durch das Wasserwerk Ebnet werden zusätzlich durchschnittlich 0,39 m<sup>3</sup>/s aus dem Untersuchungsgebiet abgeleitet (BOLD, 2000).

#### 2.6 Pedologie

Für das ganze Untersuchungsgebiet gilt, dass die Bodenentwicklung nicht die anstehenden Gesteine erfasst, sondern lediglich die hangenden periglazialen und glazialen Schuttsedimente. Diese Sedimente überdecken die Hänge und Hochflächen mit Mächtigkeiten von 0,5 bis 10 m. Anstehendes Gestein tritt nur in besonders steilen, südexponierten Hängen und an Karwänden zutage.

Nach HÄDRICH & STAHR (1992) und HÄDRICH ET AL. (1979) lässt sich das Untersuchungsgebiet in vier pedologische Haupteinheiten gliedern:

 Im Zartener Becken mit seinen beiden Terrassenstufen und den Auen der zentripedal zufließenden Bäche sind auf der oberen Terrasse zweischichtige Braunerden-Parabraunerden (Lehm über Kies) verbreitet. Nach Osten wird die Lössbeeinflussung geringer und die Tonverlagerung schwächer. Auf der unteren Terrasse fehlt die lehmige Deckschicht, man findet hier Braunerden. In den Auen bildeten sich auf den sandig-kiesigen Sedimenten Aueböden, Gleye und Oxigleye.

- Auf den Hängen und Hochflächen der montanen Stufe in Höhen von 500 bis 800 m ist eine lockere, ca. ein Meter mächtige steinig-lehmige Schuttdecke (Hauptfolge) über einer dichten, sandig-steinigen Basisfolge weit verbreitet. Die bodenbildenden Prozesse der Verbraunung, Verlehmung und mäßigen Versauerung führten zur Bildung typischer Braunerden. In stärker vernässten Hangnischen bildeten sich Hanggleye aus. In den Tälern dieser Höhenstufe überwiegen Böden, die durch hoch anstehendes Grundwasser geprägt sind, hauptsächlich Hanggleye und Anmoore. Alle Böden sind in ihrem Wasserhaushalt als frisch bis feucht einzustufen.
- Auf Kuppen und Hochflächen der montanen Stufe im ehemaligen Periglazialbereich (Höhenlage: 800 bis 1100 m) finden sich unter naturnaher Waldvegetation und landwirtschaftlichen Nutzflächen Mull-Braunerden. In Senken und auf größeren Verebnungsflächen herrschen Stauwasserböden mit ausgeprägter Nassphase vor. Hier bilden sich Stagnogleye, die in größeren Vernässungsflächen z.T. durch Torf-Stagnogleye, Waldmoore und Hochmoore abgelöst werden.
- Im ehemaligen Glazialgebiet der hochmontanen Zone zwischen 1100 und 1500 m stellt die Moder-Braunerde an Hängen die am weitesten verbreitete Bodeneinheit dar. Daneben entwickelte sich im Hochschwarzwald die sogenannten Humus-Braunerde mit einem mindestens 40 cm mächtigen humosen Ah-Horizont. In Erosionslagen findet man ein Kleinmosaik verschiedenster Bodentypen, wobei hier die Syroseme vorherrschen. Auf basenarmen Endmoränen-, Terrassen-, und Sanderablagerungen sind vollentwickelte typische Podsole anzutreffen. Der Anteil der hydromorphen Böden ist in dieser Zone viel größer als in den oben genannten Zonen, sie überwiegen vor allem auf Grundmoränenablagerungen. Typisch sind Gleye mit allen Übergangsstufen zum Moor und Hochmoor.

Abbildung 2.4 zeigt die Einteilung der Bodenarten auf Grundlage der Bodenkundlichen Übersichtskarte im Maßstab 1:200000 (BÜK 200) (GEOLOGISCHES LANDESAMT, 1992-1995). Kleinräumige Aussagen sind mit dieser Kartengrundlage nicht möglich. Besonders die umfangreichen Vernässungszonen, die einen bedeutenden Einfluss auf die Abflussbildung haben, werden nicht wiedergegeben.



Abb. 2.4: Bodenübersichtskarte 1:200000 des Untersuchungsgebietes (GEOLOGISCHES LANDESAMT BADEN-WÜRTTEMBERG, 1992-1995)

#### 2.7 Landnutzung

Insgesamt nehmen Waldflächen im Dreisam-Einzugsgebiet mit rund 60 % den größten Flächenanteil ein. Landwirtschaftlich werden insgesamt 27 % (23 % in Form von Grünlandnutzung z.T. mit Streuobstbau, 4 % Ackerbau) genutzt. Die urbane Fläche beträgt ca. 3%. Der Rest ist Brachland. Die prozentuale Landnutzung in den Teileinzugsgebieten unterscheidet sich stark vom Gesamtgebiet (Abb. 2.5). Der Anteil der urbanen Flächen im Gesamtgebiet ist gegenüber den Teileinzugsgebieten erhöht. Siedlungen befinden sich vor allem im landwirtschaftlich intensiv genutzten, fast waldfreien Zartener Becken. Dort nimmt Dauergrünland den größten Flächenanteil ein (Abb. 2.6). Der Wald- und Brachflächenanteil wird in den höher gelegenen Gebieten größer, wohingegen der Anteil der landwirtschaftlichen Nutzflächen abnimmt. Der Gesamtwaldanteil ist in den südlich und südöstlich gelegenen Einzugsgebieten (Brugga, Kapplerbach, Talbach und Zastler) gegenüber dem gesamten Einzugsgebiet erhöht, dabei herrscht Nadelwald in allen Einzugsgebieten vor. Die Grünlandnutzung nimmt in den nördlichen Teileinzugsgebieten (Eschbach, Ibentalbach, Wagensteigbach und Rotbach) eine größere Fläche ein, vor allem an Hochlagen mit geringerer Hangneigung.



Abb. 2.5: Prozentuale Aufteilung der Landnutzung pro Teileinzugsgebiet (Datengrundlage: LANDSAT Aufnahme 1993)



Abb. 2.6: Landnutzung im Untersuchungsgebiet (LANDSAT Aufnahme 1993)

## 2.8 Hydrologie

Zur Untersuchung des Abflussverhaltens des Gesamtuntersuchungsgebietes stehen fünf Pegel zur Verfügung. Das Abflussverhalten der Teileinzugsgebiete ist aufgrund ihrer Gemeinsamkeiten recht ähnlich.

Die Abflussregime der mit Pegeln versehenen Vorfluter sind Abbildung 2.7 zu entnehmen. Die niedrigsten Abflüsse werden in allen bemessenen Einzugsgebieten aufgrund der erhöhten Verdunstung in den Sommermonaten August und September erreicht. Das Maximum der Abflussmengen liegt bei allen Vorflutern - mit Ausnahme des Rotbachs - im April mit einem zweiten kleineren Maximum im Dezember. Diese Abflussregime sind dem nivo-pluvialen Typ zuzuordnen, wohingegen der Rotbach mit Hauptmaximum im Dezember und Nebenmaximum im April ein pluvio-nivales Regime besitzt.

|                        | Dreisam   | Brugga          | Talbach         | Zastlerbach      | Rotbach          |
|------------------------|-----------|-----------------|-----------------|------------------|------------------|
| Zeitreihe              | 1941-1996 | 1934-1994       | 1955-1994       | 1955-1994        | 1979-1992        |
| Rechtswert             | 3417777   | 3421752         | 3425798         | 3420332          | 3424327          |
| Hochwert               | 5317172   | 5311667         | 5311991         | 5307526          | 5309981          |
| HQ [m³/s]              | 155,3     | 33,0 (23.11.44) | 11,6 (22.12.91) | 24,37 (15.02.90) | 45,00 (22.12.91) |
| MHQ [m³/s]             | 60,99     | 15,74           | 6,60            | 6,86             | 22,19            |
| MQ [m <sup>3</sup> /s] | 5,87      | 1,54            | 0,66            | 0,63             | 1,12             |
| MNQ [m³/s]             | 0,45      | 0,36            | 0,13            | 0,13             | 0,15             |
| NQ [m³/s]              | 0,025     | 0,19 (15.10.59) | 0,07 (02.09.55) | 0,06 (05.09.59)  | 0,09 (10.09.91)  |
| MHq [l/(s*km²)]        | 250       | 442             | 390             | 385              | 551              |
| Mq [l/(s*km²)]         | 21,9      | 39,1            | 41,3            | 35               | 27               |
| MNq [l/(s*km²)]        | 2,07      | 9,03            | 7,92            | 7,3              | 2,2              |

Tab. 2.1:Gewässerkundliche Hauptzahlen der Pegel im Dreisam-Einzugsgebiet<br/>(Datengrundlage: LFU, 2000)

Das Frühjahrsmaximum des Abflusses in den Einzugsgebieten wird durch die Schneeschmelze im Schwarzwald bestimmt. Das zweite kann auf die regelmäßig auftretenden Warmlufteinbrüche Ende Dezember zurückgeführt werden, während denen die Schneedecke abtaut und Niederschlag bis in höhere Lagen als Regen fällt. Das zeitliche Auftreten der Schneeschmelze im Frühjahr ist u.a. stark von der mittleren Einzugsgebietshöhe, der Reliefierung und der Exposition abhängig. Die Regime des Talbaches und und vorallem desZastlerbaches verhalten sich gegenüber dem der Brugga unausgeglichener. Die Pardé-Koeffizienten steigen und sinken im Vergleich zur Brugga verzögert. Dies lässt auf eine ausgeprägtere Schneespeicherung im Winter und eine länger anhaltende Schneeschmelze im Frühjahr schließen. Dies wird auch durch die physiographischen Kennwerte der Untersuchungsgebiete (Tab. B.1) gestützt.

Die Niedrigwasserperiode im August und September ist auf niedrige Niederschlagsmengen bei gleichzeitig hoher potentieller Verdunstung zurückzuführen. Dreisam und Rotbach zeigen für diese Monate geringere Pardé-Koeffizienten als die sonstigen Teileinzugsgebiete. Das Minimum wird bereits im August erreicht. Bei der Dreisam könnte dies an den hohen Infiltrationsraten des Gewässernetzes im Bereich des Zartener Beckens liegen, die sich im Sommer prozentual stärker auswirken. Brugga, Talbach und Zastler erreichen das Minimum im September, jedoch bei höherem Pardé-Koeffizienten.



Abb. 2.7:Abflussregime der im Dreisam-Einzugsgebiet unterhaltenen Pegel<br/>(Datengrundlage: unterschiedlich lange Datenreihen, siehe Tab. 2.1)
# 3 Das Niederschlag-Abfluss-Modell WaSiM-ETH

# 3.1 Einleitung

Das Wasserhaushalts-Simulations-Modell WaSiM-ETH wurde in seiner Ursprungsversion an der Eidgenössischen Technischen Hochschule Zürich von SCHULLA (1997) entwickelt. Weiterentwicklungen erfolgten durch SCHULLA & JASPER (1999). Es ist ein komplexes Modell zur Simulation des Wasserhaushaltes, das für den Einsatz in verschiedenen hydrologischen Skalenbereichen konzipiert worden ist. Das Modell arbeitet rasterorientiert mit überwiegend physikalisch basierten Algorithmen und vermag die Wasserströme eines Flussgebietes in hoher räumlicher (theoretisch beliebiger Rastergröße) und zeitlicher Auflösung (maximal eine Minute) zu beschreiben (JASPER ET AL., 1999). Damit ist das Modell prinzipiell in der Lage sowohl das Abflusskontinuum als auch Hochwasserereignisse zu simulieren.

Kennzeichnend für WaSiM-ETH ist sein streng modularer Aufbau. Programmiert ist das Modell in der objektorientierten Programmiersprache C<sup>++</sup>, wodurch Modellerweiterungen relativ leicht möglich werden. Insgesamt entspricht WaSiM-ETH dem neuesten Stand des Wissens zur flächendetaillierten Prozessmodellierung (KLEEBERG, 1998). Das Modell wurde in seiner Ursprungsversion erfolgreich in diversen Einzugsgebieten getestet, z.B. im Einzugsgebiet der Thur mit einer Rasterweite von 500 m und einer zeitlichen Auflösung von einer Stunde. Eine weitere Anwendung erfolgte am Wernersbach mit einer Rasterweite von 50 m und zeitlicher Auflösung von ebenfalls einer Stunde (SCHULLA, 1997). WaSiM-ETH (Ursprungsversion) bildet das Kernstück des GIS-gestützten, modularen Modellsystems ASGi, das in der Bayerischen Wasserwirtschaftsverwaltung Verwendung findet (KLEEBERG, 1998).

Abbildung 3.1 zeigt das Blockschema des streng modular aufgebauten Wasserhaushaltsmodells WaSiM-ETH in seiner neuesten Version. Im Untersuchungsgebiet wird diese, gegenüber der Originalversion von SCHULLA (1997) erweiterte Modellversion verwendet, da diese Version den Fluss des Wassers in der ungesättigten Bodenzone auf Grundlage der eindimensionalen Richardsgleichung beschreibt und somit eine, den physikalischen Gegebenheiten wesentlich besser angepasste Modellierung ermöglicht. Daneben verfügt das Modell über ein einfaches Grundwasserströmungs- und Transportmodul für geschichtete Grundwasserleiter, das bei der jetzigen Modellanwendung jedoch nicht zur Anwendung kam.

Abgesehen von kleinen Abänderungen bezieht sich dieses Kapitel ausschließlich auf die Arbeit von SCHULLA & JASPER (1999).



Abb. 3.1: Modellstruktur WaSiM-ETH (verändert nach SCHULLA & JASPER, 1999)

# 3.2 Teilmodule des Wasserhaushaltsmodells WaSiM-ETH

Für die Beurteilung eines physikalisch basierten Modells ist es notwendig, die zugrunde liegenden Algorithmen zu beschreiben, wobei sich dies auf die im Untersuchungsgebiet verwendeten Module beschränkt.

## 3.2.1 Niederschlagskorrektur

Niederschlagsmessungen sind mit systematischen Fehlern behaftet. Der Gesamtfehler ergibt sich aus der Deformation des Windfeldes, Benetzungsverdunstung und Vorratsverdunstung. Der systematische Fehler variiert stark zwischen festem und flüssigem Niederschlag (DYCK & PESCHKE, 1995). Deshalb erfolgt im Modell die Korrektur des Niederschlages getrennt für Regen und Schnee mit verschiedenen Geradengleichungen. Es wird dabei jeweils die Windgeschwindigkeit herangezogen, um neben einem festen noch einen variablen, linearen Korrekturterm zu berechnen. Regen und Schnee werden anhand der Grenztemperatur unterschieden.

| $P_{korr} = I$    | $P \cdot (a_l + b_l \cdot u_w)$                  | $T \ge T_{grenz}$ |           |  |       |
|-------------------|--|-------------------|-----------|--|-------|
| $P_{korr} = I$    | $P \cdot (a_s + b_s \cdot u_w)$                  | $T < T_{grenz}$   |           |  | (3.1) |
| Р                 | gemessener Nied                                  | erschlag [mm]     |           |  |       |
| P <sub>korr</sub> | korrigierter Nied                                | erschlag [mm]     |           |  |       |
| Tgrenz            | Übergangstempe                                   | ratur Schnee/Re   | egen [°C] |  |       |
| $u_w$             | Windgeschwindi                                   | gkeit [m/s]       |           |  |       |
| $a_l, b_l$        | Korrekturfaktoren für flüssigen Niederschlag [-] |                   |           |  |       |
| $a_s, b_s$        | Korrekturfaktoren für festen Niederschlag [-]    |                   |           |  |       |

## 3.2.2 Interpolation der Eingangsdaten

Meteorologische Daten liegen in der Regel als Stationswerte vor. Diese Daten müssen auf die einzelnen Zellen des Modellgitters interpoliert werden. WaSiM-ETH stellt hierzu zwei Methoden zur räumlichen Interpolation zur Verfügung, die einzeln oder über einen Gewichtungsparameter kombiniert verwendet werden können.

### 3.2.2.1 Höhenabhängige Regression

Bei dieser Interpolationsmethode wird der Interpolationswert anhand der Höhenabhängigkeit einer Größe bestimmt. Das Verfahren bietet sich damit für alle Größen an, die eine ausgeprägte Höhenabhängigkeit aufweisen. Im Preprocessing muss für jede, über die höhenabhängige Regression zu interpolierende Grösse eine Datensatz mit den abschnittsweisen Höhengradienten für maximal drei Höhenabschnitte berechnet werden. Die Bestimmung der Inversionsgrenzen als Grenze zwischen den Geradengleichungen erfolgt durch die Suche von Schnittpunkten zwischen verschiedenen Regressionsgeraden innerhalb eines, für eine Messgrösse spezifisch festgelegten Höhenbereichs. Wird kein Schnittpunkt gefunden, so wird eine zweifache Inversion angenommen und eine einfache lineare Verbindung zwischen der oberen und unteren Regressionsgeraden aufgestellt. Die Interpolation auf eine bestimmte Stelle im Modellgrid erfolgt nach:

$$T(h_M) = a_{r,i} + b_{r,i} \cdot h_M$$
(3.2)

 $h_M$ Höhe [m]TMessgrösse (z.B. Lufttemperatur)iIndex für die untere bzw. obere Regressionsgerade $a_{r,i}, b_{r,i}$ Parameter der jeweiligen Regressionsgeraden

#### 3.2.2.2 Abstandsgewichtende Interpolation

Bei der abstandgewichtenden Interpolation wird die inverse Distanzengewichtung genutzt, die sogenannte Inverse Distance Weighting Interpolation (IDW). Die Methode der Thiessen-Polygone kann als Spezialfall der IDW-Methode ebenfalls zur Bestimmung des Interpolationsergebnisses herangezogen werden.

Der Interpolationswert ergibt sich aus der Summe aller beitragenden gewichteten Stützstellenwerte:

$$\hat{z}(u) = \sum_{j} \left( w_{j} \cdot z(u_{j}) \right)$$

$$mit \quad w_{j} = \frac{1}{d(u, u_{j})^{p}} \cdot \frac{1}{C} \quad \text{und} \quad C = \sum_{j} \frac{1}{d(u, u_{j})^{p}} \quad \text{folgt}: \quad \sum_{j} w_{j} = 1.0$$
(3.3)

| $\hat{z}(u)$ | interpolierter Wert am Punkt <i>u</i>                            |
|--------------|--|
| $W_j$        | Wichtung des Messwertes an der Stützstelle (Station) j           |
| $z(u_j)$     | Messwert an der Stützstelle <i>j</i>                             |
| $d(u,u_j)$   | Entfernung der Interpolationsstelle von der Stützstelle <i>j</i> |
| p            | Gewichtung des Entfernungsreziprokes                             |

Im WaSiM-ETH können zusätzlich sowohl die Gewichtung p als auch eine maximale Entfernung  $d_{max}$ , bis zu welcher Stützstellen zur Berechnung des Ergebnisses an der Interpolationsstelle herangezogen werden, sowie zwei Parameter zur Festlegung einer Anisotropie in der räumlichen Gewichtung festgelegt werden.

### 3.2.3 Topographisch bedingte Strahlungs- und Temperaturkorrektur

In gebirgigem Gelände ist für eine flächendifferenzierte Berechnung der Wasserhaushaltsgrößen der Einfluss der Topographie und der dadurch bedingten Abschattung auf die meteorologischen Größen zu beachten. Im Modell WaSiM-ETH wird der Einfluss der Topographie auf Globalstrahlung und Lufttemperatur gemäß Schema nach OKE (1987, zit. in SCHULLA & JASPER, 1999) berücksichtigt.

### 3.2.3.1 Strahlungskorrektur

Die Korrektur der bereits auf die Gitterpunkte interpolierten Globalstrahlung RG erfolgt nach der Beziehung:

$$RG_{kor} = RG \cdot \left( 1 + (1 - cr_0) \cdot SSD \cdot \left[ \frac{\cos \hat{\Theta}}{\cos Z} - 1 \right] \right)$$
(3.4)

| $RG_{kor}$              | effektive (korrigierte) Globalstrahlung [Wh·m <sup>-2</sup> ]               |
|-------------------------|---|
| RG                      | unkorrigierte Globalstrahlung [Wh·m <sup>-2</sup> ]                         |
| $cr_0$                  | empirischer Faktor zur Berücksichtigung der diffusen kurzwelligen Strahlung |
| SSD                     | relative Sonnenscheindauer  |
| Ζ                       | Zenitwinkel (Winkel zwischen den Sonnenstrahlen und der Senkrechten)        |
| $\hat{\pmb{\varTheta}}$ | Abweichungswinkel zwischen der Normalen zum Hang und den Sonnenstrahlen     |

Der Winkel zwischen der Sonneneinstrahlungsrichtung und der Normalen zu einer Rasterfläche (der Abweichungswinkel  $\hat{\Theta}$ ) und damit der Korrekturfaktor für die direkte Strahlung ergibt sich aus:

$$\cos\hat{\Theta} = \cos\beta_t \cdot \cos Z + \sin\beta_t \cdot \sin Z \cdot \cos(\Omega_s - \hat{\Omega})$$
(3.5)

 $\Omega_s$  Azimutwinkel (Winkel zwischen Projektion der Sonnenstrahlen und Norden)

Die Beziehungen zur Berechnung des Zenit- und des Azimutwinkels lauten:

$$\cos Z = \sin\phi\sin\delta + \cos\phi\cos\delta\cos h_s = \sin\beta_t$$
(3.6)

 $\cos\Omega_s = (\sin\delta\cos\phi - \cos\delta\sin\phi\cos h) / \sin Z$ (3.7)

$$\delta = -23.4 \cdot \cos[360(t_J + 10) / 365]$$
(3.8)

 $h_s = 15(12 - t)$ 

(3.9)

- $\delta$  Deklination der Sonne (Winkel zwischen den Sonnenstrahlen und der Äquatorebene)
- φ geographische Breite
- $h_s$  Stundenwinkel (Winkel, um den die Erde sich drehen muss, um den betrachteten Meridian direkt unter die Sonne zu drehen)
- βt Gefällewinkel des betrachteten Hanges
- $\hat{\Omega}$  Gefälleazimutwinkel (Expositionsrichtung, von Norden im Uhrzeigersinn)
- Ω<sub>s</sub> Azimutwinkel (Winkel zwischen Projektion der Sonnenstrahlen und Norden)
- $t_J$  Tagnummer im Julianischen Kalender (1. Januar = 1, 31. Dezember = 365)
- *t* wahre örtliche Sonnenzeit

Im Verdunstungsmodul und bei der Abschattungsberechnung werden folgende Beziehungen zur Berechnung der Auf- und Untergangszeiten der Sonne genutzt:

$$\cos h_s = \frac{\sin\phi\sin\delta}{\cos\phi\cos\delta} \quad \to \quad h_{sr} = \frac{12}{\pi} \cdot \arccos(\cos h_s) = \frac{12}{\pi} \cdot h_s \quad \text{und} \quad h_{ss} = 24 - h_{sr}$$
(3.10)

*h*<sub>sr</sub> Sonnenaufgangszeit [h]

*h*<sub>ss</sub> Sonnenuntergangszeit [h]

### 3.2.3.2 Temperaturmodifikation

Nach demselben Verfahren erfolgt die Korrektur der Temperatur. Dazu wird neben der Sonnenscheindauer SSD noch ein empirisch zu bestimmender Skalierungsparameter  $c_t$  benötigt:

$$T_{korr} = T_{mess} + c_t \cdot SSD \cdot \ln \frac{\cos \hat{\Theta}}{\cos Z} \qquad \text{für} \qquad 0.2 \le \cos \hat{\Theta} \cdot (\cos Z)^{-1} \le 5.0$$
  

$$T_{korr} = T_{mess} + c_t \cdot SSD \cdot 1.609 \qquad \text{für} \qquad \cos \hat{\Theta} \cdot (\cos Z)^{-1} > 5.0$$
  

$$T_{korr} = T_{mess} - c_t \cdot SSD \cdot 1.609 \qquad \text{für} \qquad \cos \hat{\Theta} \cdot (\cos Z)^{-1} < 0.2$$
  
(3.11)

Die Gewichtung mit der Sonnenscheindauer berücksichtigt, dass der Strahlungskorrekturfaktor (wie in Formel 3.4) zunächst für wolkenfreien Himmel bestimmt wird. Unterschiede zwischen verschieden exponierten Flächen verschwinden aber mit zunehmender Bewölkung bzw. abnehmender relativer Sonnenscheindauer. Bei völlig bewölktem Himmel wird wegen SSD = 0 keine Temperaturmodifikation mehr durchgeführt.

### 3.2.4 Verdunstungsmodul

#### **3.2.4.1** Potentielle Evapotranspiration nach Penman-Monteith

Zur Bestimmung der potentiellen Evapotranspiration kann bei stündlicher zeitlicher Auflösung die Beziehung nach Penman-Monteith (MONTEITH, 1975; BRUTSAERT, 1982; zit. in SCHULLA & JASPER, 1999) benutzt werden:

$$E = \frac{3.6 \cdot \frac{\Delta}{\gamma_p} \cdot (R_N - G) + \frac{\rho \cdot c_p}{\gamma \cdot r_a} (e_s - e) \cdot t_i}{\frac{\Delta}{\gamma_p} + 1 + r_s / r_a} * \frac{1}{\lambda}$$
(3.12)

- *E* Fluss latenter Wärme,  $[mm \cdot m^{-2}]$
- $\lambda$  latente Verdunstungswärme

Δ

- $\lambda = (2500,8 2,372 \cdot T), [KJ \cdot Kg^{-1}], T$ : Temperatur [°C]
- Steigung der Sättigungsdampfdruckkurve, [hPa·K<sup>-1</sup>]
- $R_N$  Nettostrahlung, umgerechnet von Wh·m<sup>-2</sup> in KJ·m<sup>-2</sup> durch Faktor 3,6 [Wh·m<sup>-2</sup>]
- *G* Bodenwärmefluss (pauschal 0,1 bis  $0,2 \cdot R_N$ ) [Wh·m<sup>-2</sup>]
- ρ Dichte der Luft =  $p/(R_L \cdot T)$  (bei 0 °C und 1013,25 hPa:  $\rho = 1,29$  [Kg·m<sup>-3</sup>])
- $c_p$  spezifische Wärmekapazität der Luft bei konstantem Druck  $c_p = 1,005 \quad [KJ \cdot (Kg \cdot K)^{-1}]$
- *e*<sub>s</sub> Sättigungswasserdampfdruck bei aktueller Lufttemperatur [hPa]
- *e* aktueller Wasserdampfdruck [hPa]
- *t<sub>i</sub>* Anzahl Sekunden im Berechnungsintervall
- $\gamma_p$  Psychrometerkonstante [hPa·K<sup>-1</sup>]
- $r_s$  Oberflächenwiderstand [s·m<sup>-1</sup>]
- $r_a$  aerodynamischer Widerstand [s·m<sup>-1</sup>]

Die Evapotranspiration wird aus dem Strahlungsterm  $R_N$  und dem zweiten Term gebildet, der die Einflüsse der Vegetation, der aerodynamischen Rauhigkeit und der Luftfeuchtigkeit erfasst. Im Modell wird die potentielle Evapotranspiration unter Verwendung von landnutzungsabhängigen monatlichen minimalen Bulk-Oberflächenwiderständen  $r_s$  berechnet. Formel 3.12 enthält einige Parameter, die nicht direkt messbar sind und deshalb aus anderen Beziehungen abgeleitet werden müssen:

Die Steigung der Sättigungsdampfdruckkurve  $\Delta$ , angegeben in hPa·K<sup>-1</sup>, wird z.B. als Ableitung der Magnus-Formel gefunden:

$$\Delta = \frac{\partial e_s}{\partial T} = \frac{25029}{(237.3 + T)^2} \cdot e^{\frac{17.27 \cdot T}{237.3 + T}}$$
(3.13)

T Temperatur [°C]

Die Psychrometerkonstante  $\gamma_p$  [hPa·K<sup>-1</sup>] ist eine Funktion von Luftdruck und Temperatur:

$$\gamma_p = f(p,T) = \frac{c_p \cdot p}{0.622 \cdot \lambda}$$
(3.14)

*p* Luftdruck aus barometrischer Höhenformel [hPa]

Der Luftdruck p in (3.15) muss - da im Untersuchungsgebiet keine Zeitreihen verfügbar waren nach der barometrischen Höhenformel berechnet werden, wobei es sich dann nur um den mittleren Luftdruck in der Höhe h<sub>M</sub> handelt:

$$p \approx 1013 \cdot e^{-\frac{h_{\rm M}}{7991 + 29.33 T_{\rm V}}}$$
(3.15)

*p* Luftdruck [hPa]

 $h_M$  mittlere Höhe über Meer [m]

 $T_v$  mittlere, virtuelle Temperatur der Luftsäule [°C]

Die Nettostrahlung ( $R_N$ ) setzt sich aus kurzwelliger ( $R_K$ ) und langwelliger Strahlungsbilanz ( $R_L$ ) zusammen. Kurzwellige Sonnen- und Himmelsstrahlung werden zur Globalstrahlung  $R_G$  zusammengefasst und die Reflexstrahlung  $R_{reflex}$  mit Hilfe der Albedo  $\alpha$  dargestellt:

$$R_{N} = \underbrace{\left(R_{Sonne} + R_{Himmel} - R_{Reflex}\right)}_{R_{K}} - \underbrace{\left(R_{aus} - R_{gegen}\right)}_{R_{L}}$$
(3.16)

$$R_N = (1 - \alpha)RG_{kor} - R_L \tag{3.17}$$

 $R_{\rm N}$  Nettostrahlung [Wh·m<sup>-2</sup>]  $\alpha \cdot R_{\rm G}$  kurzwellige reflektierte Strahlung  $R_{reflex}$  [Wh·m<sup>-2</sup>]  $\alpha$  Albedo [-]  $RG_{kor}$  relative (korrigierte) Globalstrahlung [Wh·m<sup>-2</sup>]

Die aerodynamischen Widerstände  $r_a$  [s m<sup>-1</sup>] berechnen sich zu:

$$r_a = \frac{4.72 \cdot \left(\ln \frac{z}{z_0}\right)^2}{1 + 0.54u}$$
(3.18)

- z Höhe über Grund, in welcher die Windgeschwindigkeit gemessen wird [m]
- *z*<sub>0</sub> aerodynamische Rauhigkeitslänge pro Landnutzungsform [m]
- *u* Windgeschwindigkeit  $[m \cdot s^{-1}]$

Für effektive Bewuchshöhen  $z_0 > 2$  m gilt:

$$r_a = 25/(1+0.54u) \tag{3.19}$$

Die Oberflächenwiderstände *r*<sub>s</sub> werden für den Tag berechnet nach:

$$\frac{1}{r_s} = \frac{(1-A)}{r_{sc}} + \frac{A}{r_{ss}}$$
(3.20)

- $r_s$  minimaler Oberflächenwiderstand [s·m<sup>-1</sup>]
- $r_{sc}$  minimaler Oberflächenwiderstand der Pflanze bei voller Wasserversorgung und dichtem Bewuchs [s·m<sup>-1</sup>]
- $r_{ss}$  Oberflächenwiderstand für unbewachsenen Boden ( $\approx 150 \text{ s} \cdot \text{m}^{-1}$ ) [s·m<sup>-1</sup>]
- $A = f^{LAI}$ , LAI Blattflächenindex,  $f \approx 0.6 \dots 0.7$
- 1-A verdunstungswirksame Vegetationsbedeckung

Nachts gilt folgende Beziehung:

$$\frac{1}{r_s} = \frac{LAI}{2500} + \frac{1}{r_{ss}}$$
(3.21)

Die aerodynamische Rauhigkeitslänge, der Blattflächenindex, die Durchwurzelungstiefe zur Berechnung der Feuchteausschöpfung aus dem Boden sowie der Vegetationsbedeckungsgrad haben einen vegetationsartspezifischen Jahresgang. Dieser wird durch eine lineare Interpolation zwischen den zu jeweils vier festgelegten Zeiten geltenden Werten berechnet.

#### **3.2.4.2 Reale Evapotranspiration**

Die physikalisch besser interpretierbare Modellierung der Bodenwasserbewegung und der Bodenfeuchte durch Verwendung der Richardsgleichung lässt es zu, die reale Verdunstung (ETR) anhand der Saugspannung des Bodens gegenüber der potentiellen Verdunstung zu reduzieren. Neben einer Reduktion aufgrund zu geringer Bodenfeuchte ( $\Theta(\psi) < \Theta_{\psi g}$ ) wird auch der reduzierende Einfluss von zu hoher Bodenfeuchte durch anaerobe Verhältnisse ( $\eta \cdot \Theta_{sat} < \Theta(\psi)$  $< \Theta_{sat}$ ) berücksichtigt:

$$ETR_{i} = 0 \qquad \Theta(\psi) < \Theta_{wp}$$

$$ETR_{i} = ETP_{i} \cdot (\Theta(\psi)_{i} - \Theta_{wp}) / (\Theta_{\psi_{g}} - \Theta_{wp}) \qquad \Theta_{wp} \le \Theta(\psi) \le \Theta_{\psi_{g}}$$

$$ETR_{i} = ETP_{i} \qquad \Theta_{\psi_{g}} \le \eta \cdot \Theta_{sat}$$

$$ETR_{i} = ETP_{i} \cdot (\Theta_{sat} - \Theta(\psi)_{i}) / (\Theta_{sat} - \eta \cdot \Theta_{sat}) \qquad \eta \cdot \Theta_{sat} < \Theta(\psi) < \Theta_{sat}$$
(3.22)

- $\begin{array}{ll} i & \text{Schichtnummer} \\ ETR & \text{reale Verdunstung [mm]} \\ ETP & \text{potentielle Verdunstung [mm]} \\ \psi & \text{aktuelle Saugspannung [hPa]} \\ \Theta(\psi) \text{aktueller Bodenwassergehalt bei Saugspannung } \psi [-] \\ \eta & \text{maximaler relativer Wassergehalt vor dem Erreichen teil-anaerober Bedingungen} \\ \Theta_{sat} & \text{Sättigungswassergehalt des Bodens [-]} \\ \Theta_{\psi g} & \text{Bodenwassergehalt bei vorgegebener Grenz-Saugspannung } \psi_g [-] \end{array}$
- $\Theta_{wp}$  Wassergehalt des Bodens bei Erreichen des permanenten Welkepunktes [-]

Als Parameter werden in dieser Beziehung für jede Pflanzenart die maximal von der Pflanze überwindbare Saugspannung, die noch zur vollen Deckung des Wasserbedarfs ausreicht, sowie der maximale relative Bodenwassergehalt vor Einsetzen anaerober Bedingungen angegeben.

### 3.2.5 Schneemodul

#### 3.2.5.1 Schneeakkumulation

Ob Niederschlag als Regen oder als Schnee fällt, wird für jede Gridzelle anhand der interpolierten Lufttemperatur während des Niederschlagsereignisses bestimmt. Liegt die Lufttemperatur in einem Übergangsbereich, so wird ein Teil des Niederschlages als Schnee, der Rest als Regen im Modell berücksichtigt. Dieser Anteil  $p_{Schnee}$  berechnet sich wie folgt:

$$p_{Schnee} = \frac{T_{R/S} + T_{trans} - T}{2 \cdot T_{trans}} \qquad \text{für } (T_{R/S} - T_{trans}) < T < (T_{R/S} + T_{trans})$$
(3.23)  

$$p_{Schnee} \qquad \text{Schneeanteil am Niederschlag } (0..1)$$

$$T \qquad \text{Lufttemperatur } [^{\circ}C]$$

$$T_{R/S} \qquad \text{Temperatur, bei der 50 \% des Niederschlages als Schnee fallen } [^{\circ}C]$$

$$T_{trans} \qquad \text{Hälfte des Temperatur-Übergangsbereiches von Schnee zu Regen } [K]$$

#### 3.2.5.2 Schneeschmelze

WaSiM-ETH stellt neben klassischen Methoden wie dem Temperatur-(Wind)-Index-Verfahren, weiterentwickelte Methoden wie das Kombinierte Verfahren nach ANDERSON (1973; zit. in SCHULLA & JASPER 1999) und das erweiterte Kombinationsverfahren nach BRAUN (1985; zit. in SCHULLA & JASPER, 1999) zur Verfügung. Bei diesen Verfahren wird das Wasseräquivalent der Schneedecke in einen Festspeicher und einen Flüssigspeicher unterteilt. Ein Koeffizient  $c_l$  gibt die Größe des Flüssigspeichers als Anteil am Gesamtspeicher an ( $c_l \approx 10\%$  des Wasseräquivalentes). Erst wenn der Flüssigspeicher gefüllt worden ist, wird von der Schneedecke Wasser abgegeben. Da sich im Flüssigwasserspeicher zum Beginn eines Zeitintervalls bereits Wasser befinden kann, muss bei Temperaturen unter der Grenztemperatur  $T_{0,m}$  ein Wiedergefrieren  $M_{neg}$  berechnet werden:

$$M_{neg} = c_{rfr} \cdot RMF \cdot (T - T_{0,m}) \cdot \frac{\Delta t}{24}$$
(3.24)

 $\begin{array}{ll} M_{neg} & , \text{negative Schmelze''} (wiedergefrierendes Wasser) [mm] \\ c_{rfr} & \text{Koeffizient für das Wiedergefrieren [-]} \\ RMF & \text{Jahreszeitenabhängiger Strahlungs-Schmelzkoeffizient [mm \cdot (°C \cdot d)^{-1}]} \\ T & \text{Lufttemperatur [°C]} \\ T_{0,m} & \text{Grenztemperatur für das Einsetzen der Schneeschmelze [°C]} \\ \Delta t & \text{Zeitintervall [h]} \end{array}$ 

Anschließend erfolgt eine Bilanzierung der beiden Speicher für den flüssigen Anteil ( $S_l$ ) und für den festen Anteil ( $S_s$ ) am gesamten Schneewasseräquivalent. Die vom Flüssigspeicher  $S_l$  rückgefrierende Menge Wasser wird zum Festspeicher addiert und vom Flüssigspeicher abgezogen. Ist die Menge potentiell rückgefrierenden Wassers (Formel 3.24) größer als der Inhalt des Flüssigspeichers, dann gefriert nur die im Flüssigspeicher gespeicherte Menge Wasser wieder.

Bei Lufttemperaturen über der Schmelz-Grenztemperatur  $T_{0,m}$  wird Schmelze berechnet. Zunächst wird anhand der gefallenen Niederschlagsmenge entschieden, ob ein Zeitintervall mit Niederschlag vorliegt ( $P \ge 2 \text{ mm} \cdot \text{d}^{-1}$ ). Für solche Zeitintervalle setzt sich die Schmelze aus der Strahlungsschmelze, der Schmelze infolge fühlbarer Wärme, der Schmelze durch latente Wärme sowie der Schmelze durch Energieeintrag infolge Niederschlag zusammen:

$$M = (M_{R} + M_{S} + M_{E} + M_{P}) \cdot \frac{\Delta t}{24}$$
(3.25)

M Schmelze [mm]

- $M_R$  Strahlungsschmelze [mm]
- *M<sub>s</sub>* Schmelze infolge fühlbarer Wärme [mm]
- *M<sub>E</sub>* Schmelze durch latente Wärme [mm]
- *M<sub>P</sub>* Schmelze durch Eintrag von Energie durch den Niederschlag [mm]
- $\Delta t$  Zeitintervall [h]

Die einzelnen Schmelzanteile in Gleichung (3.25) werden wie folgt berechnet:

$$M_{R} = 1.2 \cdot T$$

$$M_{S} = (c_{1} + c_{2} \cdot u) \cdot (T - T_{0,m})$$

$$M_{E} = (c_{1} + c_{2} \cdot u) \cdot (E - 6.11) / \gamma$$

$$M_{P} = 0.0125 \cdot P \cdot T$$
(3.26)

T Lufttemperatur [°C]

 $T_{0,m}$  Grenztemperatur für Einsetzen des Schneeschmelze [°C]

 $c_1$  temperaturabhängiger Schmelzfaktor [mm·(°C·d)<sup>-1</sup>]

- $c_2$  windabhängiger Schmelzfaktor [mm·(°C·m/s·d)<sup>-1</sup>]
- *u* Windgeschwindigkeit  $[m \cdot s^{-1}]$
- $\gamma$  Psychrometerkonstante, nach Formel 3.14 [hPa·K<sup>-1</sup>]
- *E* Sättigungswasserdampfdruck bei Lufttemperatur *T* [hPa]
- P Niederschlag [mm]

Ist das Zeitintervall niederschlagsfrei, wird die Schmelze nach dem Temperatur-Index-Verfahren berechnet:

$$M = RMF \cdot (T - T_{0,m}) \cdot \frac{\Delta t}{24}$$
(3.27)

M Schmelze [mm]

*RMF* Strahlungsschmelzfaktor  $[mm \cdot (^{\circ}C \cdot d)^{-1}]$ 

- T Lufttemperatur [°C]
- $T_{0,m}$  Grenztemperatur für das Einsetzen der Schneeschmelze [°C]
- $\Delta t$  Zeitintervall [h]

#### 3.2.6 Interzeptionsmodul

Es wird ein einfacher Überlaufspeicher genutzt, dessen Kapazität vom Blattflächenindex, vom Vegetationsbedeckungsgrad und von einem freien Parameter - der maximalen Schichtdicke des Wassers auf der Vegetation - bestimmt ist:

$$SI_{\max} = v \cdot LAI \cdot h_{SI} + (1 - v) \cdot h_{SI}$$
(3.28)

 $SI_{max}$ maximale Interzeptionsspeicherkapazität [mm]vVegetationsbedeckungsgrad (vegetationsspezifischer Jahresgang)  $[m^2/m^2]$ LAIBlattflächenindex (vegetationsspezifischer Jahresgang)  $[m^2/m^2]$  $h_{SI}$ maximale Schichtdicke des Wassers auf der benetzten Oberfläche [mm]

Der Interzeptionsspeicher ist im Modell nach dem Schneespeicher angeordnet. Das bedeutet, dass die Schneeschmelze über den Interzeptionsspeicher geleitet wird. So kann eine Speicherung von Schmelzwasser in Bodenmulden und in der Mulchschicht berücksichtigt werden. Die Leerung des Interzeptionsspeichers erfolgt durch Verdunstung mit der potentiell möglichen Verdunstungsrate. Ist der Interzeptionsspeicher gefüllt, so tropft weiteres Niederschlags- bzw. Schmelzwasser auf die Bodenoberfläche durch. Es bildet den Zufluss zum Infiltrationsmodul.

### 3.2.7 Infiltrationsmodul

Das Infiltrationsmodul beruht auf dem Vorgehen von PESCHKE (1977, 1987; zit in SCHULLA & JASPER, 1999), das auf den Vorstellungen von GREEN & AMPT (1911; zit in SCHULLA & JASPER, 1999) aufbaut. Es wird ein homogener, ungeschichteter Boden angenommen, bei dem der Matrixfluss gegenüber dem Makroporenfluss dominiert, die Feuchtefront wird als sprungförmige Front approximiert. Das Verfahren hat zwei Stufen:

In der ersten Stufe wird die Sättigungszeit berechnet bis zu welcher der gesamte Niederschlag infiltriert (falls es unter den gegebenen bodenphysikalischen Bedingungen und der gegebenen Niederschlagsintensität zu Sättigung kommen kann).

In der zweiten Phase wird die kumulative Infiltration während der Sättigungsphase bis zum Ende des Zeitintervalls berechnet. Die nicht infiltrierte Niederschlagsmenge ist Oberflächenabfluss. Die Sättigungszeit  $t_s$  wird nach einem erfolgreichen Test auf  $PI > K_s$  (andernfalls kann es keine Sättigung geben und alles Wasser infiltriert) berechnet nach

$$t_{S} = \frac{l_{S} \cdot n_{a}}{PI} = \frac{\frac{\psi_{f}}{PI / K_{S} - 1}}{PI}$$
(3.29)

*t<sub>s</sub>* Sättigungszeit ab Beginn des Zeitintervalls [h]

*ls* Sättigungstiefe [mm]

 $n_a$  auffüllbare Porosität ( $n_a = \Theta_s - \Theta$ ) [-]

 $\psi_f$  Saugspannung an der Feuchtefront ( $\approx 1000 n_a$ ) [hPa]

PI Niederschlagsintensität [mm/h]

*K<sub>s</sub>* gesättigte hydraulische Leitfähigkeit [mm/h]

Für die bis dahin infiltrierte Wassermenge  $F_S$  gilt:

$$F_S = l_S \cdot n_a = t_S \cdot PI \tag{3.30}$$

Die kumulierte Infiltration F nach Erreichen der Sättigung bis zum Intervallende t wird nach PESCHKE (DYCK & PESCHKE, 1995) berechnet zu:

$$F = \frac{A}{2} + \left[\frac{A^2}{4} + AB + F_s^2\right]^{1/2}$$

$$A = K_s (t - t_s)$$

$$B = F_s + 2 \cdot n_a \cdot \psi_f$$

$$Q_D = PI \cdot \Delta t - F - F_s$$
(3.31)

Der Oberflächenabfluss  $Q_D$  entspricht somit der nicht infiltrierenden Niederschlagsmenge.

### 3.2.8 Bodenmodul unter Verwendung der Richardsgleichung

#### 3.2.8.1 Allgemeines

Diese WaSiM-ETH Version wendet für die Modellierung der Wasserflüsse in der ungesättigten Bodenzone die Richardsgleichung in einer, für jede Gridzelle schichtweise diskretisierten Bodensäule in eindimensional vertikaler Form an. Aus der Kontinuitätsgleichung für die eindimensional vertikale Bewegung des Wassers in der ungesättigten Zone

$$\frac{\partial \Theta}{\partial t} = \frac{\partial q}{\partial z} = \frac{\partial}{\partial z} \left( -k(\Theta) \frac{\partial \Psi(\Theta)}{\partial z} \right)$$
(3.32)

 $\Theta$  Wassergehalt [m<sup>3</sup>/m<sup>3</sup>]

t Zeit [s]

*k* hydraulische Leitfähigkeit [m/s]

- $\Psi$  hydraulische Höhe als Summe aus Saugspannung  $\psi$  und geodätischer Höhe h [m]
- q spezifischer Fluss [m/s]
- z Vertikalkoordinate [m]

wird die diskretisierte Richardsgleichung gewonnen:

$$\frac{\Delta\Theta}{\Delta t} = \frac{\Delta q}{\Delta z} = q_{in} - q_{out}$$
(3.33)

 $q_{in}$  Zuflüsse in die betrachtete Bodenschicht [m/s]

*q<sub>out</sub>* Abflüsse aus der Bodenschicht (einschließlich Interflow, Drainage) [m/s]

#### 3.2.8.2 Parametrisierung

Die Abhängigkeit der hydraulischen Höhen  $h_h(\Theta)$  sowie der ungesättigten hydraulischen Leitfähigkeiten  $k(\Theta)$  vom aktuellen Wassergehalt  $\Theta$  erfolgt nach dem Verfahren von VAN GE-NUCHTEN (1976; zit. in SCHULLA & JASPER ,1999). Dabei gilt:

$$\psi(\Theta) = \frac{1}{\alpha} \left[ \left( \frac{\Theta - \Theta_r}{\Theta_s - \Theta_r} \right)^{-1/m} - 1 \right]^{1/n}$$
(3.34)

und

$$\frac{k(\Theta)}{k_s} = \left[\frac{\Theta - \Theta_r}{\Theta_s - \Theta_r}\right]^{1/2} \cdot \left[1 - \left\{1 - \left(\frac{\Theta - \Theta_r}{\Theta_s - \Theta_r}\right)^{1/m}\right\}^m\right]^2$$
(3.35)

 $\psi$  Saugspannung [hPa]

 $\alpha$  empirischer Parameter [m<sup>-1</sup>]

- *m* empirischer Parameter [-]
- *n* empirischer Parameter [-]
- $\Theta$  aktueller Wassergehalt [-]
- $\Theta_r$  residualer Wassergehalt bei  $k(\Theta) = 0$  [-]
- $\Theta_s$  Sättigungswassergehalt [-]
- *k*<sub>s</sub> gesättigte hydraulische Leitfähigkeit [m/s]

Unter Nutzung der Beziehung (3.34) kann die Berechnung des Wassergehaltes in Abhängigkeit von der aktuellen Saugspannung erfolgen:

$$\Theta = \Theta_r + (\Theta_s - \Theta_r) \left(\frac{1}{1 + (\psi\alpha)^n}\right)^m$$
(3.36)

Neben den Parametern *n* und  $\alpha$  muss für jede Bodenart noch ein Parameter  $k_{rec}$  angegeben werden, der die Abnahme der Leitfähigkeiten mit der Tiefe beschreibt:

$$k_{s,z} = k_s \cdot k_{rec}^{2}$$
(3.37)  

$$k_{s,z} \qquad \text{gesättigte hydraulische Leitfähigkeit in der Tiefe z [m/s]}$$

$$k_s \qquad \text{gesättigte hydraulische Leitfähigkeit an der Bodenoberfläche [m/s]}$$

$$k_{rec} \qquad \text{Rezessionskonstante [-]}$$

 $k_{rec}$  Rezessionsko z Tiefe [m]

#### 3.2.8.2 Berechnung des Interflow

Interflow wird in der ungesättigten Zone nur gebildet, wenn für die Saugspannung in der betrachteten Bodenschicht gilt:  $\psi_m < 3.45$  m. Interflow wird in zwei Schritten ermittelt.

a) maximal möglicher Interflow  $q_{ifl,max}$ 

$$q_{ifl,\max} = (\Theta(\psi) - \Theta_{\psi=3.45}) \cdot \Delta z \cdot \Delta t$$
(3.38)

 $\Theta(\psi)$ Wassergehalt bei aktueller Saugspannung  $\psi$  [-] $\Theta_{\psi=3.45}$ Wassergehalt bei Saugspannung  $\psi$  = 3.45 m [-] $\Delta z$ Schichtdicke [m] $\Delta t$ Zeitschritt [s]

b) Interflow  $q_{ifl}$ , wie er sich aus Leitfähigkeit, Flussdichte und Gradient ergäbe:

$$q_{ifl} = k_s(\Theta_m) \cdot \Delta z \cdot d_r \cdot \tan \beta$$
(3.39)

 $k_s$  gesättigte hydraulische Leitfähigkeit [m/s]

- $\Theta_m$  Wassergehalt in der betrachteten Schicht *m* [-]
- $d_r$  Skalierungsparameter zur Berücksichtigung der Entwässerungsdichte sowie der Anisotropie von  $k_{s,horizontal}$  gegenüber  $k_{s,vertikal}$
- $\beta$  lokales Gefälle (wenn  $\beta > 45^\circ$ , dann wird  $\beta$  auf  $45^\circ$  begrenzt)

c) Als Ergebnis wird der kleinere der unter a) und b) berechneten Werte ermittelt.

### 3.2.8.3 Berechnung des Basisabfluss

Der Basisabfluss wird normalerweise als Exfiltration aus dem Grundwasser in die Oberflächengewässer berechnet. Er entsteht in diesem Fall nur an wenigen Stellen des Modellgebietes. Wird das Modell für die ungesättigte Zone ohne die Ankoppelung an das Grundwassermodul betrieben, so muss die Berechnung des Basisabflusses auf konzeptionellem Weg erfolgen, da kein lateraler Austausch zwischen den Zellen erfolgen kann. In solchen Fällen wird ein Ansatz analog zum TOPMODEL verwendet:

$$Q_B = Q_0 \cdot K_s \cdot e^{\left(h_{GW} - h_{geo,0}\right)/k_B}$$
(3.40)

| $Q_B$       | Basisabfluss [m/s]                                 |
|-------------|--|
| $Q_0$       | Skalierungsfaktor für Basisabfluss [-]             |
| $K_s$       | gesättigte hydraulische Leitfähigkeit [m/s]        |
| $h_{GW}$    | Grundwasserspiegel [m ü. NN]                       |
| $h_{geo,0}$ | Geländeoberfläche (Oberkante 1. Schicht) [m ü. NN] |
| $k_B$       | Auslaufkonstante für Basisabfluss [m]              |

Basisabfluss entsteht also nicht nur in Gridzellen, über welche ein Gewässer fließt, sondern in jeder Zelle. Die Parameter sind empirisch festzulegen, eine Kalibrierung muss erfolgen.

# 3.2.9 Grundwassermodul

Das bisher beschriebene Modul arbeitet lediglich eindimensional vertikal. Benachbarte Zellen innerhalb der ungesättigten Zone kommunizieren in dieser Modellannahme nicht miteinander. Da die dreidimensionale Modellierung der ungesättigten Zone einen enormen Rechen- und Programmieraufwand bedeuten würde, wurde bei WaSiM-ETH eine periodischen Koppelung mit einem Grundwassermodul – als Modellerweiterung – ermöglicht. In dieser Erweiterung wird die Grundwasserströmung unabhängig von der ungesättigten Zone modelliert. Auf eine weitere Beschreibung wird hier jedoch verzichtet, da sich bei der Verwendung des Moduls eine Vielzahl von Problemen ergab, so dass auf die Verwendung des Moduls schließlich – auch aus Zeitgründen- verzichtet werden musste. Das Zuschalten des Grundwassermoduls führte jeweils zu einer Modellbeendigung ohne weitere Fehlerhinweise. Fehler in der Parametrisierung konnten keine entdeckt werden, auf numerische Instabilitäten, die sich bei der Modellanwendung ergeben können, wird im Benutzerhandbuch hingewiesen. Hier wären deshalb weitere Arbeiten notwendig.

### 3.2.10 Abflussrouting

Das im WaSiM-ETH genutzte Routingverfahren beruht auf der Theorie der kinematischen Welle, d.h. auf der hydraulischen Berechnung der Fließgeschwindigkeiten ausgehend von messoder kalibrierbaren Gerinnedaten. Das Verfahren wird in drei Schritte unterteilt:

- Zeitliche Translation des Abflusses im Gerinne für einzelne Teilstrecken

Wird der Fließvorgang im Gerinne als intervallweise stationär betrachtet, hängt die Fließgeschwindigkeit, außer von den zeitlich unveränderlichen Gerinneeigenschaften, lediglich vom Durchfluss im Gerinne und damit vom Wasserstand ab. Zur Ermittlung der abflussabhängigen Translationszeit pro Gerinneabschnitt müssen die abflussabhängigen Fließgeschwindigkeiten ermittelt werden. Dies erfolgt auf der Grundlage der Fließformel nach Manning-Strickler:

$$v_l = M_{str} \cdot R_h^{2/3} \cdot I^{1/2}$$
(3.41)

- $v_l$  Fließgeschwindigkeit [m·s<sup>-1</sup>]
- *M* Rauhigkeitsbeiwert des benetzten Umfanges  $[m^{1/3} \cdot s^{-1}]$
- *R<sub>h</sub>* hydraulischer Radius [m]
- I Gefälle  $[m \cdot m^{-1}]$

Anhand der ermittelten Fließgeschwindigkeiten kann nun für jeden Abfluss eine charakteristische Translationszeit interpoliert werden.

- Berechnung der Wellenabflachung bzw. der Retention

Nach der Translationsberechnung wird für jeden Gerinneabschnitt eine Gerinneretention berechnet. Hierzu werden Einzellinearspeicheransätze mit unterschiedlichen Speicherkonstanten angewendet.

- Überlagerung der gerouteten Abflüsse aus unterschiedlichen Quellgebieten mit dem im Zwischengebiet gebildeten Abfluss zum Gesamtabfluss

#### 3.2.11 Verfahren zur Beurteilung der Simulationsqualität

Zur Beurteilung der Simulationsqualität sollen neben dem rein visuellen Vergleich zwischen der gemessenen und simulierten Ganglinie auch statistische Gütemaße herangezogen werden. WaSiM-ETH stellt verschiedene Gütekriterien zur Verfügung, die alle auf dem mittleren quadratischen Fehler beruhen. Hierzu ist auch die Modelleffizienz  $R_{eff}$  nach NASH & SUTCLIFFE (1970) zu zählen. Es wird definiert als:

$$R_{eff} = 1 - \frac{\sum_{i} \varepsilon_{i}^{2}}{\sum_{i} (x_{i} - \overline{x})^{2}} = 1 - \frac{\sum_{i} (y_{i} - x_{i})^{2}}{\sum_{i} x_{i}^{2} - \frac{1}{n} \left(\sum_{i} x_{i}\right)^{2}}$$
(3.42)

 $y_i$  simulierter Wert [mm]

 $x_i, \overline{x}$  gemessener Wert[mm], mittlerer gemessener Wert [mm]

 $\varepsilon_i$  Abweichung gemessen - modelliert ( $y_i$  -  $x_i$ ) zum Zeitpunkt *i* 

*n* Anzahl der Zeitintervalle, für die  $R_{eff}$  berechnet wird

Der Wertebereich dieses dimensionslosen Parameters reicht von - $\infty$  bis + 1, wobei letzteres eine perfekte Anpassung darstellt. WaSiM-ETH berechnet alle Gütemaße mit einer zeitlichen Versetzung der beiden zu vergleichenden Ganglinien von ± 10 Zeitintervallen. Die Verschiebung gibt weiteren Aufschluss über die Qualität des Routings. Die Modelleffizienz  $R_{eff}$  setzt streng genommen normal verteilte Stichproben X und Y voraus. Liegt der Schwerpunkt der Modellierung in der möglichst guten Simulation der Niedrigwasser oder des Abflusskontinuums, so kann das Gütemaß nur zur Einschätzung der Güte genutzt werden, wenn die simulierten und die gemessenen Abflüsse vorher näherungsweise in eine Normalverteilung transformiert werden. Als einfachste Form der Transformation kann die Bildung der Logarithmen angesehen werden. So werden im WaSiM-ETH neben den "linearen" auch die "logarithmischen" Modelleffizienzen berechnet. Damit kann eine Einschätzung der Anpassungsgüte für Hoch- und Niedrigwasser gleichermaßen gut erfolgen.

Zusätzlich zu den in WaSiM-ETH berechneten Gütemaßen erfolgt die Berechnung des Abfluss-Volumen-Fehlers *VE*:

$$VE = \sum_{i} x_i - y_i \tag{3.43}$$

*y<sub>i</sub>* simulierter Wert [mm]

*x<sub>i</sub>* gemessener Wert [mm]

Der Abfluss-Volumen-Fehler vergleicht die kumulierten Abweichungen der gemessenen und der simulierten Ganglinie in einer Periode. Im Optimum ist VE = 0. Über längere Modellie-

rungszeiträume lässt sich so feststellen, ob Anpassungen prinzipielle Über- oder Unterschätzungen aufweisen. Jedoch können sich die Abweichungen auch in ihrer Summe gegenseitig aufheben. Deshalb erfolgt im Untersuchungsgebiet die Ermittlung der Gesamtdifferenz *GD*:

$$GD = \sum_{i} \left| x_{i} - y_{i} \right|$$
(3.44)

Dieses Gütemaß hat den Vorteil, dass sich positive und negative Abweichungen im Jahresverlauf nicht gegenseitig aufheben. Eine optimale Anpassung besitzt ebenfalls den Wert null. Die Gesamtdifferenz stellt jedoch bei Modellierung mit stündlichem Zeitschritt ein sehr strenges Kriterium dar, so dass hier trotz guter statistischer Güte hohe Abweichungen errechnet werden können.

# 3.3 Fazit

WaSiM-ETH ist ein weitgehend physikalisch basiertes Wasserhaushaltsmodell. Besonders die Modellierung des Wassertransports in der ungesättigten Bodenzone auf Grundlage der Richardsgleichung ermöglicht eine den physikalischen Gegebenheiten besser angepasste Modellierung. Jedoch setzen diese "physikalisch basierteren" Algorithmen eine sehr gute Datengrundlage voraus. Ist diese vorhanden, sollte WaSiM-ETH den bisher im Untersuchungsgebiet angewendeten konzeptionellen Modellen überlegen sein. Durch den hohen Grad der räumlichen Detailliertheit werden raumbezogene Aussagen im Untersuchungsgebiet möglich. Es sind jedoch lange Rechenzeiten zu erwarten. Die Anforderungen an die für eine Modellierung benötigte Rechnerleistung sind enorm. Trotzdem sollte man sich darüber im Klaren sein, dass trotz der Verwendung der eindimensionalen Richardsgleichung bei der Modellierung mit einer Vielzahl von Vereinfachungen gearbeitet werden muss. Eine kritische Bewertung der einzelnen Module muss deshalb im Rahmen der Anwendung erfolgen (Kapitel 4 und 5). Da die Entwicklung des Modells kontinuierlich weiter geht, können auch neue Erkenntnisse in zukünftige Modellversionen einfließen.

# 4 Anwendung von WaSiM-ETH im Dreisam-Einzugsgebiet

# 4.1 Einführung

Ein zentraler Punkt der vorliegenden Arbeit ist die Anwendung von WaSiM-ETH im Dreisam-Einzugsgebiet und den Teileinzugsgebieten sowie die Bewertung des Modells anhand der vorliegenden Erkenntnisse aus tracerhydrologischen Untersuchungen. Die Anwendung sollte - nach Beschaffung zusätzlicher Eingangsdaten - über einen möglichst langen Zeitraum erfolgen. Nach Prüfung aller zeitbezogenen Daten wurde ein Modellierungszeitraum vom 01.08.95 bis 31.08.99 ausgewählt. Diese Periode eignet sich aufgrund der Datenqualität zur Modellanwendung in stündlicher Auflösung.

Die Modellanwendung von WaSiM-ETH untergliedert sich in vier Schritte:

- Beschaffung und Aufbereitung der Modelleingangsgrößen
- Preprocessing Bestimmung der abgeleiteten Datensätze
- Processing Modellanwendung
- Postprocessing Darstellung und Analyse weiterer Simulationsergebnisse

# 4.2 Beschaffung und Aufbereitung der Modelleingangsgrößen

## 4.2.1 Meteorologische Eingangsgrößen

Für die Wasserhaushaltsmodellierung wird eine Reihe von meteorologischen Eingangsdaten benötigt. Hierbei handelt es sich um den Niederschlag, die Lufttemperatur, die relative Luftfeuchtigkeit, die Windgeschwindigkeit, die relative Sonnenscheindauer und die Globalstrahlung. Datensätze dieser Eingangsgrößen stehen in unterschiedlicher zeitlicher Auflösung zur Verfügung bzw. wurden im Rahmen der Diplomarbeit von den unterschiedlichen Stationsbetreibern als Rohdaten zur Verfügung gestellt. Abbildung 2.1 gibt einen Überblick über die geographische Lage der Stationen. Es handelt sich um fünf automatische Klimastationen unterschiedlicher Betreiber sowie um fünf konventionelle Klimastationen des Deutschen Wetterdienstes (DWD). Zusätzlich wurden tägliche Niederschlagssummen von fünf Tagessammlern des DWD verwendet. Im Anhang Tabelle B.2 befindet sich eine Beschreibung des Messumfanges der einzelnen Stationen. Alle meteorologischen Datensätze müssen in ein WaSiM-ETH-Format überführt werden. Hierbei handelt es sich um eine Textdatei, die den sequentiellen Zugriff ermöglicht. Sie ist in Spalten organisiert: in den ersten fünf Zeilen erfolgen Angaben zu den Messstationen (Dateiname, Höhe, Rechtswert, Hochwert, Stationsname).

## **4.2.1.1** Temperatur [°C]

Im Untersuchungsgebiet stehen zehn Stationen zur Temperaturmessung zur Verfügung. Sieben Stationen haben eine zeitliche Auflösung von mindestens einer Stunde. Die Klimastationen des DWD erfassen jeweils um 7:30, 14:30 und 21:30 Uhr einen Momentanwert. Berücksichtigt man Datenlücken, stehen im gesamten Untersuchungszeitraum durchschnittlich 5,78 Messwerte pro Zeitschritt zur Verfügung. Bei Messwerten, die in einer höheren Auflösung zur Verfügung standen, wurde das stündliche arithmetische Mittel gebildet.

# 4.2.1.2 Relative Luftfeuchtigkeit [%]

Anzahl und Art der Messstationen entsprechen der der Temperaturmessung. Berücksichtigt man Lücken, stehen hier für den gesamten Modellierungszeitraum im arithmetischen Mittel 5,65 Messwerte pro Zeitschritt zur Verfügung.

## 4.2.1.3 Globalstrahlung [Wh/m<sup>2</sup>]

Die Globalstrahlung wird an vier Stationen gemessen. Die Station Conventwald erfasst die photosynthetisch aktive Strahlung und konnte deshalb nicht verwendet werden. Die Datenreihen weisen lange Lücken auf, so dass sich eine mittlere Anzahl von 2,65 Messwerten pro Zeitschritt ergibt. Dies liegt vor allem in den langen Ausfällen im Winterhalbjahr, die sich aufgrund eingeschneiter, verschmutzter oder beschlagener Messeinrichtungen ergeben. Die Daten mussten deshalb umfangreichen Plausibilitätstests unterzogen werden. Hierzu erfolgte ein Vergleich der Globalstrahlung mit der gemessenen Sonnenscheindauer. Bei hoher Sonnenscheindauer im Zeitschritt sollte auch eine hohe Globalstrahlung ermittelt werden. Es zeigte sich, dass die Güte der ermittelten Messwerte gerade bei der Globalstrahlung entscheidend von einer regelmäßigen Wartung der Geräte abhängig ist.

## 4.2.1.4 Sonnenscheindauer [-]

Die Sonnenscheindauer wird an vier Stationen des DWD ermittelt. Die Zeitreihen weisen keine Lücken auf. Es erfolgte lediglich eine Umwandlung der Messwerte von Minutenwerten in relative Einheiten (60 Minuten = 1; 30 Minuten = 0,5).

## 4.2.1.5 Windgeschwindigkeit [m/s]

Die Windgeschwindigkeit wurde an sieben Stationen gemessen. An zwei Stationen wird die Windstärke in Beaufort ermittelt. Diese wurde mit Hilfe einer Umrechnungstabelle (DEUTSCHER WETTERDIENST, 1999) in Windgeschwindigkeiten umgerechnet.

### 4.2.1.6 Niederschlag [mm]

Dem Niederschlag - als wichtigste meteorologische Inputgröße für die Wasserhaushaltsmodellierung - muss besondere Aufmerksamkeit gewidmet werden. Für den Untersuchungszeitraum liegen von fünf Klimastationen kontinuierliche Datenreihen in der benötigten zeitlichen Auflösung von mindestens einer Stunde vor. Drei Stationen liefern Acht-Stunden-Summen, außerdem stehen fünf Tagessammler zur Verfügung. WaSiM-ETH Eingangsdaten benötigen einen einheitlichen Zeitschritt von einer Stunde. Deshalb ist eine zeitliche Aggregierung oder Disaggregierung der Summenwerte erforderlich.

Verfahren zur Disaggregierung von Niederschlägen werden von RENSCHLER ET AL. (1999) für die regionale Skale beschrieben, konnten aber im Dreisam-Einzugsgebiet nicht zur Anwendung kommen, da keine langjährigen stündlichen Niederschlagszeitreihen im Einzugsgebiet zur Verfügung standen.



Abb. 4.1: Niederschlagsdisaggregierung im Untersuchungsgebiet

Für das Dreisam-Einzugsgebiet musste deshalb ein einfacheres Verfahren gewählt werden. Aufgrund der Gebietsgröße und der Verteilung der Stationen im Untersuchungsgebiet wurde unterstellt, dass sich die prozentualen Niederschlagsverteilungen von nahe gelegenen Stationen gleichen, wohingegen sich die absolute Menge gefallenen Niederschlags von Station zu Station unterscheidet. Auf dieser Grundlage konnte eine zeitliche Disaggregierung der Tageswerte und der Acht-Stunden-Summen erfolgen. Bei zyklonalen Niederschlagsereignissen dürfte dieses Verfahren befriedigende Ergebnisse liefern. Es ist bei konvektiven Niederschlägen aufgrund der hohen räumlichen Variabilität mit größeren Abweichungen zu rechnen. Durch dieses Verfahren wird es jedoch möglich, die vorhandene Gebietsinformation über die räumliche Verteilung des Niederschlags, die z.T. nur in täglicher Auflösung vorhanden ist, besser in die Modellierung zu integrieren.

# 4.2.2 Hydrologische Eingangsgrößen

Für die Modellanwendung standen Zeitreihen in stündlicher Auflösung für folgende Zeiträume zur Verfügung:

| Gewässer    | Pegel       | vorhandene Zeitreihe |
|-------------|-------------|----------------------|
| Dreisam     | Ebnet       | 01.07.95 - 19.05.99  |
| Brugga      | Oberried    | 01.07.95 - 12.05.99  |
| Zastlerbach | Zastler     | 01.07.95 - 12.05.99  |
| Talbach     | St. Wilhelm | 01.07.95 - 12.05.99  |

 Tab. 4.1:
 Stündliche Abflusszeitreihen im Untersuchungsgebiet

Da die von der LfU bereitgestellte stündliche Zeitreihe des Rotbachs systematisch fehlerhaft war und in der Bearbeitungszeit kein Ersatz beschafft werden konnte, wurde eine vorhandene, plausible Zeitreihe mit täglicher Auflösung verwendet.

### Tab. 4.2: Tägliche Abflusszeitreihen im Untersuchungsgebiet

| Gewässer | Pegel       | vorhandene Zeitreihe |
|----------|-------------|----------------------|
| Rotbach  | Falkensteig | 01.08.84 - 31.07.96  |

Die geographische Lage der Pegel kann Tabelle 2.1 entnommen werden. Die Abflussdaten in Kubikmeter wurden für die Modellanwendung in mm/h umgewandelt. Da das Grundwassermodul aufgrund von Systemproblemen nicht zur Anwendung kam, konnten der unterirdische Abstrom und die linienhafte Infiltration ins Grundwasser nicht modelliert werden. Durch das WAQUIS-Projekt sind jedoch sehr genaue Kenntnisse über den unterirdischen Abstrom aus dem Zartener Becken und die Grundwasserförderung des Wasserwerkes Ebnet vorhanden. Zur Erfassung dieser Verlustgrößen wurde deshalb der Abfluss am Pegel Ebnet linear um 0,91 m<sup>3</sup>/s (BOLD, 2000) erhöht.

## 4.2.3 Raumbezogene Eingangsgrößen

### 4.2.3.1 Digitales Höhenmodell

Als Grundlage für die räumliche Modellierung dient ein Digitales Geländemodell (DGM) mit der Rasterweite 50 m des Landesvermessungsamtes Baden-Württemberg. Die Höhenangaben sind nicht um die Bewuchshöhe reduziert, so dass mit einer generellen Überschätzung der ermittelten Höhen zu rechnen ist. Es erfolgte eine Anpassung der Rasterweite auf 200 m. Dazu wurde ein Verfahren verwendet, das eine bilineare Funktion durch die umliegenden Punkte legt (ARC/INFO resample bilinear).

### 4.2.3.2 Landnutzung

Als Eingangsdatensatz der flächendetaillierten Landnutzung stand ein Grid mit einer Rasterweite von 30 m - auf der Grundlage einer Landsat-Aufnahme von 1993 - zur Verfügung. Die Landnutzung wurde hierin in 16 Landnutzungsklassen unterteilt. Abbildung 2.6 zeigt eine auf vier Klassen aggregierte Landnutzung. Die einzelnen Landnutzungsklassen können Abbildung 2.5 entnommen werden. Die Anpassung der Rasterweite auf 50 m bzw. 200 m erfolgte nach einem "Nachbarschaftsverfahren" (ARC/INFO resample nearest), das für Landnutzungsklassen empfohlen wird (ESRI, 1997). Die Parametrisierung der einzelnen Landnutzungsklassen erfolgte ausgehend vom MORECS-Schema (THOMPSON ET AL.,1981) und anderen Literaturangaben (Tab. 4.8).

### 4.2.3.3 Bodenarten

Die Bodenübersichtskarte 1:200000 (BÜK 200) (GEOLOGISCHES LANDESAMT, 1992-1995) diente als Grundlage zur Parametrisierung des Bodenmoduls. Die BÜK 200 weist für das Untersuchungsgebiet nur 13 verschiedene Bodenarten aus und kann somit die kleinräumige Variabilität der Bodenarten nicht wiedergeben. Großmaßstäbliche bodenkundliche Kartenwerke stehen für das Untersuchungsgebiet flächendeckend jedoch nicht zur Verfügung.

Um zumindest die von verschiedenen Autoren genannten Gesetzmäßigkeiten zwischen Deckschichtenbeschaffenheit und Gebietsmorphologie ins Modell einfließen zu lassen (FEZER, 1957; GEOLOGISCHES LANDESAMT BADEN-WÜRTTEMBERG & LANDESVERMESSUNGSAMT BADEN-WÜRTTEMBERG, 1981), wurde ein reproduzierbares Verfahren zur Ermittlung von Unterklassen

| BÜK 200  |   |   | Hangneigungsklassen      |  |
|--|---|---|--------------------------|--|
|  |   |   |                          |  |
| Auengley bis Brauner Auerboden aus Auensand und -lehm über Kies<br>Brauner Auenboden und Auengley-Brauner Auenboden aus Auensand<br>Braunerde aus lehmig schluffigen Deckschichten über Kies<br>Braunerde aus sandig-tehmigen Fleßerden und Schuttidecken<br>Braunerde und podsolige Braunerde aus grussje-lehmigen Fließerden ü<br>Braunerde, Regoosol und Ranker aus Hangschutt und Kristallingestein<br>Braunerde, stellerweise humos, aus sandig-tehmigen Srießerden ü<br>Braunerde, stellerweise humos, aus sandig-tehmigen Schuttdecken<br>Braunerde, stellerweise podsolg oder humos, aus sandig-tehmigen Schuttdecken<br>Braunerde, stellerweise podsolg, aus sandig-tehmigen Schuttdecken<br>Braunerde, stellerweise podsolg, aus sandig-tehmigen Schuttdecken<br>Humose Braunerde bis Podsol aus steinig-sandigen Moränen material s<br>Neder- und Hochmoor<br>Ortslagen, i. allg. größer als 8 km2, mit überbauten und stark veränder | und -lehm über Kies<br>ber Schutt und Gestein<br>Schuttdecken sowie ste<br>shuttdecken<br>sowie Moor<br>ten Böden | szersalz<br>Ilenweise aus Geschiebelehm | <10°<br>10° -30°<br>>30° |  |
|  |   |   |                          |  |
| Parameter  |   | Einheit                                 | Parametrisierung         |  |
| Bodenart   |   |   | Moor, flach              |  |
| Nummer   |   |   | 2105                     |  |
| Ges. hydraul. Leitfähigkeit  | K <sub>s</sub>  | m/s                                     | 8.25E-7                  |  |
| Sättigungswassergehalt   | $\Theta_{sat}$  | -                                       | 0.70                     |  |
| Residualer Wassergehalt  | $\Theta_{wp}$   | -                                       | 0.1                      |  |
| Van Genuchten Parameter  | α   | m <sup>-1</sup>                         | 2                        |  |
| Van Genuchten Parameter  | n   | -                                       | 2.23                     |  |
| Anzahl der Schichten   | l <sub>v</sub>  | -                                       | 22                       |  |
| Begrenzung des K <sub>s</sub> - Verhältnisses  | c <sub>k</sub>  | -                                       | 70                       |  |
| Dicke der Bodenschichten   | d <sub>z</sub>  | m                                       | 0.22                     |  |
| Leittähigkeitsabnahme  | k <sub>rec</sub>  | -                                       | 0.32                     |  |

Abb. 4.2: Ermittlung und Parametrisierung der modifzierten BÜK 200 anhand der Bodenartentabelle (beispielhafter Auszug)

aus den unterschiedlichen BÜK 200 Bodenarten angewendet. Abbildung 4.2 zeigt dieses Verfahren. Beruhend auf dem DGM erfolgte eine Untergliederung des Untersuchungsgebietes in drei Hangneigungsklassen mit Hangneigungen von  $>10^{\circ}$ ,  $10^{\circ}$ - $30^{\circ}$  und  $>30^{\circ}$ . Diese wurden mit der BÜK 200 verschnitten. Hieraus ergab sich eine modifizierte BÜK 200 mit 32 Bodenarten, die hinsichtlich der Bodenmächtigkeit und Bodenart eine feinere Parametrisierung ermöglicht.

Die BÜK 200 gibt jedoch keine absoluten Werte für die benötigten Bodenkennwerte an. Deshalb wurde zur Parametrisierung des Untersuchungsgebietes neben der BÜK 200 auch eine Vielzahl von Literaturdaten verwendet (Tabelle 4.12; 4.13 und Anhang).

# 4.2.4 Fazit

### 4.2.4.1 Meteorologische Daten

Die Datengrundlage ist hinsichtlich der meteorologischen Eingangsdaten als zufriedenstellend zu bezeichnen. Für kurze Modellierungszeitschritte ist jedoch die Messnetzdichte der stündlichen Klimastationen gering. Gerade bei der Niederschlagsmessung erhöht dies die Unsicherheit der Eingangsdaten, da konvektive Niederschlagsereignisse nicht generell richtig erfasst werden und die Bedeutung der Niederschlagsintensität auf das Abflussgeschehen bei kurzen Modellierungszeitschritten deutlich zunimmt.

Bei der Globalstrahlung ist neben der zu geringen Messnetzdichte zu bemängeln, dass die Klimastationen unterschiedliche Strahlungsparameter (Globalstrahlung, Nettostrahlung u.a.) erfassen, hier wäre eine Vereinheitlichung dienlich.

Der Aufwand im Bereich der Datenaufbereitung ließe sich durch einheitliche Datenformate der einzelnen Stationsbetreiber erheblich reduzieren.

### 4.2.4.2 Räumliche Daten

Für den Betrieb des Bodenmoduls auf der Grundlage der Richardsgleichung müssen großmaßstäbliche Kartenwerke zur Verfügung stehen. Als Mindestanforderung an bodenbezogene Geodaten wird für Modellierungen in der Mesoskale die Bodenübersichtskarte (1:50000) genannt. Empfohlen wird aber die Bodenübersichtskarte (1:25000) oder die Bodenschätzung (1:5000) (DIEKKRÜGER, 1999). Diese Vorgaben konnten im Untersuchungsgebiet nicht erfüllt werden, so dass sich Unsicherheiten bezüglich der Parametrisierung des Bodenmoduls ergeben und eine Kalibrierung einzelner physikalisch basierter Parameter notwendig wird. Die Landnutzung geht in Form einer Landsat-Satellitenaufnahme von 1993 in die Modellanwendung ein. Aufgrund des hohen Anteils an "längerfristig unveränderlichen" Landnutzungen im Untersuchungsgebiet, ist die Annahme der Gültigkeit dieser Landnutzungsverteilung über den gesamten Modellierungszeitraum gegeben. Die Parametrisierung der Landnutzungen über das MORECS-Schema (THOMPSON ET AL., 1981) stellt heute ein weit verbreitetes Verfahren dar und kommt auch bei anderen Wasserhaushaltsmodellen zur Anwendung (BREMICKER, 1998).

# 4.3 Preprocessing - Bestimmung der abgeleiteten Datensätze

### 4.3.1 Ermittlung von Höhengradienten

Auf der Grundlage der in das WaSiM-ETH-Format überführten meteorologischen Zeitreihen konnte die Auswahl des anzuwendenden räumlichen Interpolationsverfahrens erfolgen. Höhenabhängigkeit wurde für die Lufttemperatur, die Luftfeuchtigkeit und in geringem Maße für die Windgeschwindigkeit festgestellt (Tab. 4.3).

Tab. 4.3:Mittelwerte der Bestimmtheitsmaße der Höhenabhängigkeit der einzelnen meteorologischen<br/>Parameter (Datengrundlage: 01.08.96-31.07.99)

| Parameter                 | R <sup>2</sup> | Parameter         | R <sup>2</sup> |
|---------------------------|----------------|-------------------|----------------|
| Temperatur                | 0,77           | Globalstrahlung   | < 0,2          |
| Relative Luftfeuchtigkeit | 0,49           | Sonnenscheindauer | < 0,2          |
| Windgeschwindigkeit       | 0,39           | Niederschlag      | < 0,2          |

Für diese Parameter erfolgte die Anwendung des WaSiM-ETH Hilfsprogramms REGR zur Ermittlung der abschnittsweisen Höhengradienten (siehe Kapitel 3.2.2). Dadurch wird das Höhenprofil in bis zu drei Abschnitte eingeteilt, die voneinander durch eine untere und obere Inversionsgrenze getrennt sind. Generell werden zwei Teilregressionen berechnet, eine über und eine unter der unteren Inversionsgrenze. Zusäzlich bietet WaSiM-ETH die Möglichkeit der Gewichtung beider Verfahren. Diese Methode wurde für die relative Luftfeuchtigkeit und die Windgeschwindigkeit angewendet. Hierbei wurde das vorgeschlagene Verfahren von SCHULLA & JASPER (1999) übernommen, die Gewichtung anhand des mittleren Besitmmtheitsmaßes der Höhenregression vorzunehmen. Die räumliche Interpolation der Windgeschwindigkeit wurde daher zu 60 % nach dem IDW-Verfahren durchgeführt. Bei der relativen Luftfeuchtigkeit geht das IDW-Verfahren mit 50 % in die Berechnung ein.

Die untere Inversionsgrenze kann frei gewählt werden und wurde in Anlehnung an TRENKLE (1988) mit 600 m angenommen. Das Modell sollte somit in der Lage sein, das Auftreten von

Inversionswetterlagen darzustellen. Abbildung 4.3 gibt exemplarisch den zonalen Temperaturverlauf für fünf Stunden sowohl mit verschieden ausgeprägten als auch ohne Inversionswetterlagen wieder. Insgesamt treten Inversionen in den Wintermonaten relativ häufig auf, so dass eine richtige Erfassung von Inversionen bedeutenden Einfluss auf die Modellierung der Schneeaufbau und -abbauprozesse hat.

Niederschlag, Sonnenscheindauer und Globalstrahlung zeigten keine Höhenabhängigkeit, so dass bei der Modellanwendung das IDW-Verfahren für diese Parameter zur Anwendung kommt.



Abb. 4.3: Ausgewählte stündliche Ergebnisse der Höhenregression der Temperatur [°C]

## 4.3.2 Ermittlung von hydrologischen Strukturen

Auf der Grundlage des DGM werden weitere räumliche WaSiM-ETH Eingangsdaten abgeleitet. Diese Datensätze können entweder über ein Geographisches Informationssystem ermittelt oder über das WaSiM-ETH Hilfsprogramm TANALYS erzeugt werden. TANALYS führt eine umfangreiche topographische Analyse des Digitalen Geländemodells durch (Abbildung 4.4), bei der alle hydrologisch relevanten Strukturen und Beziehungen extrahiert werden.



Abb. 4.4: Topographische Analyse mit TANALYS (verändert, SCHULLA, 1997)

Die verwendeten Algorithmen finden sich in SCHULLA (1997). TANALYS benötigt zusätzliche Eingabedaten zur Berechnung des Gewässernetzes und seiner Struktur, die wie für das verwendete 200 m Raster wie folgt parametrisiert wurden (Tab. 4.4):

| Tab. 4.4: | Eingabeparameter des Hilfsprogrammes TANALYS für das 200 m Raster |
|-----------|---|
|-----------|---|

| Parameter   | Parametrisierung |  |
|---|------------------|--|
| Schwellenwert der Fließakkumulation für die Fließgewässerentstehung | 15 Zellen        |  |
| Rauhigkeitsbeiwert nach Manning-Strickler                           | 20 []            |  |
| Mittlere Hochwasserabflussspende                                    | 250 [(l*s)/km]   |  |

Bei der Bestimmung des Schwellenwertes zur Fliessgewässerakkumulation erfolgte ein visueller Vergleich zwischen der Karte des Gewässernetzes (1:50000) mit dem beim jeweiligen Schwellenwertes errechneten Gewässernetz. Der bestimmte Grenzwert generiert ein Gewässernetz, das die generelle Struktur, aber auch die Quellregionen gut wiedergibt. Der Rauhigkeitsbeiwert von 20 m <sup>1/3</sup>\*s<sup>-1</sup> stellt einen Mittelwert für das Gewässernetz des Untersuchungsgebietes dar. Aus LFU (2000) wurde die mittlere Hochwasserabflussspende der Dreisam entnommen.

TANALYS erbrachte in den stark reliefierten Gebieten gute Ergebnisse. Bei der Teileinzugsgebietsgenerierung und der Ermittlung des Gewässernetzes auf der Grundlage des steilsten Gefälles zeigte sich jedoch, dass die errechneten Ergebnisse in den relativ flachen Zonen des Zartener Beckens und den Hochflächen und Hochmulden des danubischen Schwarzwaldes von der Gewässerkarte 1:50000 abwichen. Hier mussten Korrekturen vorgenommen werden. Eine gute Übereinstimmung ergab sich beim Vergleich der generierten Fließzeiten mit den für die Brugga experimentell ermittelten Fliesszeiten (LINDENLAUB, 1998). Der Vergleich von vorhandenen Querprofilen wie sie im Zartener Becken von BOLD (2000) verwendet wurden zeigte, dass simulierte und gemessene Gewässerbreiten und –tiefen in denselben Größenordnungen liegen. Außerhalb des Zartener Beckens konnten keine Querprofile ermittelt werden. Die Verwendung eines Doppelrechteckprofils stellt natürlich eine starke Vereinfachung zu den in der Natur vorhandenen Gerinneprofilen dar.

## 4.3.3 Fazit

Im Preprocessing erfolgt die Ermittlung der abschnittsweisen Höhengradienten als Eingangsdatensatz zur räumlichen Interpolation über die Höhenregression. In einem weiteren Schritt wird eine Analyse von hydrologischen Strukturen vorgenommen. Sie dient der Ermittlung von räumlichen Datensätzen, die für eine weitere Modellanwendung benötigt werden, im Einzugsgebiet jedoch nicht flächendeckend zur Verfügung stehen. Im Allgemeinen wird durch diese Verfahren eine Modellanwendung in der Mesoskale erst ermöglicht.

# 4.4 Processing - Modellanwendung

## 4.4.1 Modellierungszeitraum

Zur Modellanwendung erfolgt eine Aufteilung der vorhanden Zeitreihen in eine Initialisierungsphase, Kalibrierungsphase und eine Validierungsphase. Die Periode 01.08.95 - 31.07.96 wird zur Kalibrierung verwendet. Anschließend erfolgt die Validierung bis 31.07.99. Der Kalibrierung wird eine einjährige Initialisierungsphase vorangeschaltet, die ab 01.01.95 aus gemessenen Daten besteht, welche jedoch nur anhand weniger Messstationen ermittelt wurden. Die Initialisierungsphase dient der Ermittlung der Speicherfüllungen des Bodenmodells.

Beim "split sample test", wie er von REFSGAARD & STROM (1996) empfohlen wird, soll der Kalibrierungs- und Validierungszeitraum gleich lang sein. Dies kann bei der Modellanwendung nicht verwirklicht werden, da sich bei einem zweijährigen Kalibrierungszeitraum die Rechenzeit verdoppelt. Der Modellierungsbeginn soll aufgrund der hohen Bedeutung der Schneedecke auf das Abflussgeschehen im Untersuchungsgebiet in jedem Fall in der schneefreien Periode liegen. Da sich die Datengrundlage im Untersuchungsgebiet ab dem 01.08.95 deutlich verbessert, stehen damit bei einem Kalibrierungsbeginn am 01.08.95 für eine Modellbeurteilung vier Jahre mit einer enormen Variabilität der meteorologischen und hydrologischen Eingangsdaten zur Verfügung. Abbildung 4.17 zeigt diese Variabilität anhand des Niederschlags der einzelnen Hydrologischen Jahre.

## 4.4.2 Vorgehensweise

### 4.4.2.1 Allgemeines

Vor der Kalibrierung muss eine lauffähige Steuerdatei erstellt werden. Hierbei kann der modulare Aufbau des Modells ausgenutzt werden, um aufeinander aufbauende Module schrittweise in die Modellanwendung einzufügen. Dieses Verfahren leistet bei Fehleranalysen in der Steuerdatei wertvolle Dienste.

Bei der Modellkalibrierung wird ein "trial-and-error-Verfahren" angewendet. Anhand der Ergebnisse der Modellsimulation wird der Parametersatz bewertet. Wie die Modellanwendung zeigt, genügt es jedoch nicht, die Simulation nur durch den visuellen Vergleich zwischen gemessener und simulierter Ganglinie und der statistischen Gütemaße (Kapitel 3.2.11) zu beurteilen. Das liegt daran, dass es möglich ist "gute" Anpassungen der simulierten an die gemessenen Abflussganglinien zu erzielen, obwohl die Glieder der Wasserhaushaltsbilanz unrealistische Werte annehmen. Bereits BEVEN (1989) sah den alleinigen Vergleich der simulierten mit der gemessenen Ganglinie als nicht ausreichend an. Deshalb wird das Bewertungsverfahren um die in Abbildung 4.5 beschriebenen Kriterien erweitert, wobei jedoch die statistischen Gütemaße das Hauptkriterium zur Beurteilung der Simulationsgüte darstellen. Die Kalibrierung wird jedoch beschränkt durch die langen Rechenzeiten, die eine Modellanwendung benötigt. Bei einer Rasterweite von 50 m ergab sich eine Rechenzeit von 24 Stunden/Modelljahr, weshalb sich die Ergebnisse in den folgenden Kapiteln auf Simulationen mit einer Rasterweite von 200 m beschränken werden. Dies reduziert die Rechenzeit auf zwei Stunden/Modelljahr und erhöht die Anzahl der maximal möglichen Simulationsläufe zur Ermittlung eines optimierten Parametersatzes für das Dreisam-Einzugsgebiet und seiner Teileinzugsgebiete.



Abb. 4.5: Beurteilung der Güte einer Simulation anhand unterschiedlicher Kriterien

## 4.4.2.2 Kalibrierung

WaSiM-ETH stellt keine automatisierten Kalibrierungshilfen zur Verfügung. Die anwenderfreundliche Abschätzung der Parameterunsicherheit und -sensitivität über integrierte Monte-Carlo-Simulationen oder Batch-Dateien ist modellintern nicht möglich. Deshalb erfolgt eine Kalibrierung nach einem "trial-and-error-Verfahren" ausgehend von Parametersätzen der Modellierung des Thur-Gebietes (SCHULLA & JASPER, 1999). Hierbei ist eine Übertragung der skalenabhängigen Parameter (z.B. Drainagedichte) aufgrund der unterschiedlich gewählten Rasterweiten und der Verwendung unterschiedlicher Modellversionen nicht möglich.

WaSiM-ETH unterscheidet drei Arten von Modellparametern:

- Reine Kalibrierparameter, die nicht gemessen werden können.
- Literaturwerte, mit physikalischem Hintergrund, die theoretisch messbar sind, jedoch Messwerte in Untersuchungsgebieten i.A. nicht vorliegen.
- Physiographische Kennwerte, die über ein GIS aus vorhandenen Raumdaten abgeleitet werden können, anhand von Literaturdaten parametrisiert werden oder gemessen worden sind.

Das Modell benötigt eine Vielzahl dieser Literaturwerte, wohingegen die Anzahl der freien Modellparameter, die zur Kalibrierung zur Verfügung stehen, relativ gering ist. Die Tabellen 4.5 – 4.14 geben einen Überblick über diese Parameter. Vierzehn Kalibrierparameter werden auf Gesamteinzugsgebietsebene vergeben, bei sechs erfolgt die Parametrisierung auf Teileinzugsgebietsebene und vier werden bodenartenbezogen parametrisiert. Viele Parameter zeigten sich jedoch nicht sensitiv oder sind in engen physikalisch basierten Grenzen zu halten. Für die Parametrisierung des Untersuchungsgebietes haben die Literaturwerte eine wichtige Bedeutung. Die Landnutzungstabelle und viele Parameter der Bodenartentabelle sollen nicht kalibriert werden. Die Parametrisierung ist hier auf Literaturdaten beschränkt. Im Rahmen der Abweichungen einzelner Werte in verschiedenen Publikationen kann jedoch eine "Feinkalibrierung" vorgenommen werden.

Die Kalibrierung des Gesamtuntersuchungsgebietes erfolgte ausgehend von den bemessenen Teileinzugsgebieten Brugga, Zastler und Talbach. Anhand der Ergebnisse dieser Teileinzugsgebietskalibrierung erfolgte die Anpassung der ungemessenen Gebiete und somit eine Anpassung des Gesamtuntersuchungsgebietes.

### 4.4.2.3 Validierung

Bei der Modellvalidierung soll eine objektive Überprüfung der Modellergebnisse anhand unabhängiger, nicht zur Kalibrierung verwendeter Messdaten erfolgen. Hierfür steht die Zeitreihe vom 01.08.96 bis 31.07.99 zur Verfügung. Nachdem die Modellergebnisse hinsichtlich ihrer Anpassung der simulierten an die gemessene Ganglinie bewertet sind, können im Sinne einer multiple-response-validation (UHLENBROOK, 1999) einzelne Teilmodule bewertet werden. Hierfür stehen verschiedene Datensätze im Rahmen eines Naturdatenvergleichs zur Verfügung.

Daneben kann - zusätzlich zur zeitlichen Validierung – auch eine räumliche Validierung der ungemessenen Gebiete anhand des Rotbach-Einzusgebietes vorgenommen werden. Aufgrund der Kürze der Zeitreihe und der nur täglichen zeitlichen Auflösung der Abflusszeitreihe des Rotbaches, konnte keine Kalibrierung erfolgten. Es erfolgt deshalb nur eine Validierung mit einem Kalibrierparametersatz, der auf den Ergebnissen des Brugga-Einzugsgebietes beruht.

# 4.4.3 Ergebnisse der Kalibrierung und Validierung

### 4.4.3.1 Ermittelte Parametersätze

Das Ziel der Kalibrierung besteht in der Ermittlung eines Parametersatzes, der das Wasserhaushaltsmodell WaSiM-ETH optimal an die bemessenen Untersuchungsgebiete Brugga, Talbach, Zastler und an das Gesamtuntersuchungsgebiet Dreisam anpasst. Dieses Ziel konnte für die Kalibrierungsperiode erreicht werden.

Neben einer sehr guten Anpassung der simulierten an die gemessenen Ganglinien wurden plausible Werte der Glieder der Wasserbilanzgleichung ermittelt. Die Tabellen 4.5 bis 4.14 geben diesen optimalen Parametersatz wieder. Die physikalisch basierten Parameter konnten innerhalb der durch Messungen bzw. durch Literaturangaben bestimmten Größenordnungen beibehalten werden. Die modifizierte Bodenkarte auf Grundlage der BÜK 200 (Kapitel 4.2.3.3) konnte jedoch aus Zeitgründen nicht mit allen Unterklassen in die Kalibrierung eingehen. Deshalb ist dieser optimierte Datensatz gerade im Hinblick auf eine räumlich detaillierte Betrachtung der Herkunft des Gesamtabflusses und seiner Abflusskomponenten noch verbesserungsfähig. Eine detaillierte Bewertung der einzelnen Parameter wird in der Modellbewertung erfolgen. Im Rahmen der Kalibrierung wurden einige Parameterkombinationen ermittelt, die eine gute Übereinstimmung der simulierten an die gemessene Ganglinie erbrachten. Probleme ergaben sich bei diesen Parametersätzen jedoch in der Plausibilität der Wasserbilanzglieder, so dass diese Parameterkombinationen verworfen wurden.

| Parameter        | Beschreibung             | Einheit      | Bestimmungsmöglichkeit     | Wert  | Sensitivität |
|------------------|--------------------------|--------------|----------------------------|-------|--------------|
| a <sub>l</sub>   | Korrekturfaktoren Regen  | -            | Kalibrierung               | 1,01  | mittel       |
| b <sub>1</sub>   |                          | $(m/s)^{-1}$ | Kalibrierung <sup>1)</sup> | 0,021 | hoch         |
| a <sub>s</sub>   | Korrekturfaktoren Schnee | -            | Kalibrierung               | 1,01  | mittel       |
| b <sub>s</sub>   |                          | $(m/s)^{-1}$ | Kalibrierung <sup>1)</sup> | 0,034 | hoch         |
| T <sub>R/S</sub> | Übergangstemperatur      | °C           | Kalibrierung <sup>2)</sup> | 0,0   | mittel       |
|                  | Regen/Schnee             |              |                            |       |              |

| Tab. 4.5: | Niederschlagskorrektur |
|-----------|------------------------|
|-----------|------------------------|

1) Werte wurden unter Berücksichtigung der Wasserbilanz kalibriert, Ergebnisvergleich mit RICHTER (1995)

2) Größenbereich physikalisch begrenzt

 Tab. 4.6:
 Räumliche Interpolation der Eingangsdaten

| Parameter        | Beschreibung                       | Einheit | Bestimmungsmöglichkeit               | Wert | Sensitivität |
|------------------|------------------------------------|---------|--------------------------------------|------|--------------|
| d <sub>max</sub> | max. Entfernung beim               | km      | Stationsdichteabhängig <sup>1)</sup> | 20   | gering       |
|                  | IDW-Verfahren                      |         |                                      |      |              |
| р                | Gewichtung des Entfernungsrezipro- | -       | SCHULLA & JASPER (1999)              | 2    | gering       |
| _                | kes                                |         |                                      |      |              |

1) Wegen der geringen Stationsdichte bei der Messung der Sonnenscheindauer und der Globalstrahlung musste das ganze Einzugsgebiet berücksichtigt werden; beim Niederschlag wurde die maximale Stationsentfernung auf 8 km beschränkt.

#### Tab. 4.7: Temperaturmodifikation

| Parameter      | Beschreibung      | Einheit | Bestimmungsmöglichkeit                | Wert | Sensitivität |
|----------------|-------------------|---------|---------------------------------------|------|--------------|
| c <sub>T</sub> | Skalierungsfaktor | K       | SCHULLA & JASPER (1999) <sup>1)</sup> | 5,0  | gering       |

1) Sollte im Untersuchungsgebiet anhand von Temperaturmessungen an verschieden geneigten Hängen bestimmt werden.

| Parameter                               | Beschreibung                                  | Einheit           | Bestimmungsmöglichkeit   | Wert   | Sensitivität |
|---|---|-------------------|--------------------------|--------|--------------|
| r sc                                    | minimaler Oberflächenwiderstand <sup>2)</sup> | s⋅m <sup>-1</sup> | Literaturwerte aus:      |        | mittel       |
| LAI                                     | Blattflächenindex                             | -                 |                          |        | gering       |
| v                                       | Vegetationsbedeckungsgrad                     | -                 | SCHULLA & JASPER (1999), |        | gering       |
| z <sub>0</sub>                          | Bewuchshöhe:                                  | m                 | BREMICKER (1998),        |        | gering       |
| α                                       | Albedo  | -                 | HÄCKEL (1999),           | siehe  | gering       |
| Zw                                      | Wurzeltiefe                                   | m                 | Menzel (1997)            | Anhang | gering       |
| d <sub>1,400</sub> - d <sub>4,400</sub> | phänologische Entwicklung                     | Jul. Day          | THOMPSON ET AL.(1981)    | B.3    | gering       |
| ρ                                       | Wurzeldichte-Verteilung im Boden              | -                 | JACOBS ET AL. (1989)     |        | gering       |
| $\Psi_{\sigma}$                         | Saugspannungshöhe, ab welcher ETR             | m                 |                          |        | gering       |
| · 5                                     | gegenüber ETP reduziert wird                  |                   |                          |        |              |

#### Tab. 4.8: Parametrisierung der Landnutzungstabelle <sup>1)</sup>

Für jede Vegetationsart ergibt sich ein Wert in der Landnutzungstabelle. Die Werte sollen nach SCHULLA (1997) nicht kalibriert werden.
 stark abweichende Literaturwerte für einzelne Landnutzungsarten (Acker, Wiese). Es erfolgte deshalb im Rahmen der Schwankungen der

 stark abweichende Literaturwerte f
ür einzelne Landnutzungsarten Literaturwerte eine Feinkalibrierung.

#### Tab. 4.9: Parametrisierung des Schneemoduls

| Parameter          | Beschreibung                      | Einheit   | Bestimmungsmöglichkeit       | Wert | Sensitivität |
|--------------------|-----------------------------------|---|------------------------------|------|--------------|
| T <sub>R/S</sub>   | Übergangstemperatur Re-           | °C  | Kalibrierung <sup>1)</sup>   | 0,2  | mittel       |
|                    | gen/Schnee                        |   |                              |      |              |
| T <sub>trans</sub> | Übergangszone Schnee/Regen        | Κ   | Kalibrierung                 | 0,6  | gering       |
| $T_0$              | Grenztemperatur Schmelze          | °C  | Kalibrierung <sup>1)</sup>   | -0,9 | mittel       |
| RMF                | Strahlungs-Schmelz-Koeffizient    | mm·°C <sup>-1</sup> ·d <sup>-1</sup>                          | Kalibrierung <sup>1)2)</sup> | 1,5  | hoch         |
| c1                 | temperaturabhängier Schmelzfaktor | $mm \cdot {}^{\circ}C^{-1} \cdot d^{-1}$                      | Kalibrierung <sup>1)</sup>   | 0,4  | gering       |
| c2                 | windabhängiger Schmelzfaktor      | $\text{mm} \cdot {}^{\circ}\text{C}^{-1} \cdot \text{d}^{-1}$ | Kalibrierung <sup>1)</sup>   | 0,3  | gering       |
| c <sub>rfr</sub>   | Koeffizent Wiedergefrieren        | -   | SCHULLA & JASPER (1999)      | 0,1  | gering       |

1) Größenbereich physikalisch basiert, genaue Bestimmung durch Kalibrierung

2) Orientierungshilfe UHLENBROOK (1999)

#### Tab. 4.10: Parametrisierung des Interzeptionsmoduls

| Parameter       | Beschreibung          | Einheit | Bestimmungsmöglichkeit     | Wert | Sensitivität |
|-----------------|-----------------------|---------|----------------------------|------|--------------|
| h <sub>SH</sub> | maximale Schichtdicke | mm      | Kalibrierung <sup>1)</sup> | 0,36 | mittel       |

1) Größenbereich physikalisch basiert, genaue Bestimmung durch Kalibrierung. Kaum Einfluss auf Gesamtverdunstung

#### Tab. 4.11: Parametrisierung des Infiltrationsmoduls

|                | Beschreibung                    | Einheit | Bestimmungsmöglichkeit | Wert | Sensitivität |
|----------------|---------------------------------|---------|------------------------|------|--------------|
| x <sub>f</sub> | Anteil reinfiltrierendes Wasser | -       | Kalibrierung           | 0,4  | hoch         |

#### Tab. 4.12:Parametrisierung des Bodenmoduls 1)

| Parameter                   | Beschreibung                    | Einheit | Bestimmungsmöglichkeit     | Wert   | Sensitivität |
|-----------------------------|---------------------------------|---------|----------------------------|--------|--------------|
| k <sub>D</sub>              | Speicherkonstante Direktabfluss | h       | Kalibrierung               |        | gering       |
| k <sub>H</sub>              | Speicherkonstante Interflow     | h       | Kalibrierung               |        | gering       |
| $Q_0$                       | Skalierungsfaktor Basisabfluss  | mm/h    | Kalibierung                | siehe  | mittel       |
| k <sub>B</sub>              | Auslaufkonstante Basisabfluss   | m       | Kalibrierung               | Anhang | mittel       |
| d <sub>r</sub>              | Drainagedichte für Interflow    | -       | Kalibrierung               | B.4    | hoch         |
| <b>QD</b> <sub>Schnee</sub> | Anteil Direktabfluss aus der    | -       | Kalibrierung <sup>2)</sup> |        | hoch         |
|                             | Schneeschmelze                  |         |                            |        |              |

1) Parametrisierung erfolgt für alle Teileinzugsgebiete einzeln

2) Berücksichtigt die behinderte Infiltration auf gefrorenem Boden
| Parameter  | Beschreibung   | Einheit                                | Bestimmungsmöglichkeit   | Wert            | Sensitivität   |
|--|--|--|--|-----------------|--|
| $ \frac{\Psi}{K_s} \\ \Theta_{sat} \\ \Theta_{wp} \\ \alpha \\ n $ | Saugspannung an Feuchtefront<br>ges. Hydraul. Leitfähigkeit<br>Sättigungswassergehalt<br>residualer Wassergehalt<br>van Genuchten Parameter<br>van Genuchten Parameter | mm<br>m/s<br>-<br>m <sup>-1</sup><br>- | Literaturwerte aus:<br>BOHNE ET AL. (1993)<br>SCHEFFER &<br>SCHACHTSCHABEL (1998)<br>ARMBRUSTER (1998)<br>WILPERT ET AL. (1996)<br>SCHULLA & JASPER (1999) | siehe<br>Anhang | gering<br>mittel<br>gering<br>mittel<br>mittel<br>mittel |
| $\begin{array}{c} k_{rec} \\ l_v \\ d_z \\ c_k \end{array}$        | K <sub>s</sub> -Abnahme<br>Anzahl der Schichten<br>Dicke der Bodenschichten<br>Begrenzung im K <sub>s</sub> -Wert-Verhältnis<br>zwischen zwei Bodenschichten           | -<br>m<br>-                            | FEGER (1993)<br>Kalibrierung<br>Kalibrierung 2)<br>Kalibrierung 2)<br>Kalibrierung   | B.5             | hoch<br>gering<br>gering<br>gering                       |

#### Tab. 4.13: Parametrisierung der Bodenartentabelle<sup>1)</sup>

 Für jede Bodenart ergibt sich ein Wert in der Bodenartentabelle. Eine Feinkalibrierung konnte nicht mehr erfolgen, deshalb wurden modifizierte Bodenarten, die aus der selben BÜK-Bodenart gebildet wurden mit gleichen Werten parametrisiert.

2) Gesamtmächtigkeit aus der Literatur zum Untersuchungsgebiet (STAHR, 1979)

| Parameter                       | Beschreibung                       | Einheit                            | Bestimmungsmöglichkeit | Wert   | Sensitivität |
|---------------------------------|------------------------------------|------------------------------------|------------------------|--------|--------------|
| B <sub>h</sub> , B <sub>v</sub> | Gerinne- und Vorlandbreiten        | m                                  | Topographische Analyse |        | gering       |
| $T_{h}$                         | Gerinnetiefen                      | m                                  |                        |        | gering       |
| Ι                               | Gefälle                            | $\mathbf{m} \cdot \mathbf{m}^{-1}$ |                        | Siehe  | gering       |
| L                               | Flusslängen                        | m                                  |                        | Anhang | gering       |
| A <sub>E</sub>                  | Einzugsgebietsgröße                | km <sup>2</sup>                    |                        | B.6    | gering       |
| $M_h, M_v$                      | Manningbeiwerte für Gerinne und    | $m^{1/3} \cdot s^{-1}$             | Literatur              |        | gering       |
|                                 | Vorland                            |                                    |                        |        |              |
| $\mathbf{k}_{\mathbf{h}}$       | Linearspeicherkonstante des Haupt- | h                                  | Kalibrierung           |        | gering       |
|                                 | bettes                             |                                    |                        |        |              |

Tab. 4.14:Parametrisierung des Abflussroutings <sup>1) 2)</sup>

1) Bestimmung erfolgt getrennt für alle ausgewiesenen Routingstrecken

2) Es erfolgt keine Kalibrierung, Werte werden aus der Topographischen Analyse oder einem GIS ermittelt

Die in den Tabelle 4.5-4.14 dargestellten qualitativen Sensitivitäten wurden aus den gewonnenen Erfahrungen bei der Modellkalibrierung ermittelt. Eine detaillierte Sensitivitätsanalyse findet sich in SCHULLA (1997) und SCHULLA & JASPER (1999). Im Rahmen dieser räumlich und zeitlich hochaufgelösten Modellanwendung war durch den enormen Aufwand der Kalibrierung und die langen Rechenzeiten für die Modellanwendung die quantitative Durchführung einer Sensitivitätenermittlung nicht möglich.

#### 4.4.3.2 Güte der Modellanwendung

Die Güte der Modellkalibrierung ist im Kalibrierungszeitraum für alle bemessenen Einzugsgebiete als sehr gut zu bezeichnen (Tab. 4.15). Auffällig ist das Phänomen, dass die Modelleffizienzen mit der Einzugsgebietsgröße zunehmen. Dieses Abhängigkeit der Effizienzen von der Einzugsgebietsgröße wurde auch schon von BREMICKER (1998) bei der Anwendung von LAR-SIM und von UHLENBROOK (2000) bei der TAC-Anwendung in Teileinzugsgebieten des Untersuchungsgebietes festgestellt. Der Volumenfehler ist in der Kalibrierungsperiode sehr gering, lediglich der Talbach wird um 89 mm gegenüber dem gemessenen Abfluss überschätzt. Die Gesamtdifferenzen erscheinen relativ hoch, jedoch ist zu beachten, dass die Gesamtdifferenz bei stündlicher zeitlicher Auflösung ein sehr strenges Kriterium zur Beurteilung der Gesamtgüte darstellt.

| Gütemaße             |                       | Dreisam | Brugga | Talbach | Zastler |
|----------------------|-----------------------|---------|--------|---------|---------|
| Modelleffizienz      | R <sub>eff</sub>      | 0,897   | 0,818  | 0,782   | 0,723   |
| Log. Modelleffizienz | Log. R <sub>eff</sub> | 0,848   | 0,805  | 0,756   | 0,661   |
| Volumenfehler        | VE                    | 18 mm   | 2 mm   | -89 mm  | -36 mm  |
| Gesamtdifferenz      | GD                    | 158 mm  | 269 mm | 260 mm  | 300 mm  |

Tab. 4.15:Gütemaße der Modellanwendung von WaSiM-ETH für die Einzugsgebiete und das<br/>Gesamtgebiet im Kalibrierungszeitraum (01.08.1995-31.07.1996)

Im Validierungszeitraum ergibt sich ein differenzierteres Bild der ermittelten Gütemaße (Tab. 4.16). Wie in der Kalibrier- ist auch in der Validierperiode eine Abhängigkeit der Gütemaße von der Einzugsgebietsgröße festzustellen. Insgesamt ergibt sich eine leichte Verschlechterung der Gütemaße in der Validierperiode. Die Perioden 08.97 - 07.99 werden generell gut nachgebildet. Die Periode 08.96 - 07.97 zeigt jedoch eine deutlich schlechtere Anpassung. Während das Gesamteinzugsgebiet zufriedenstellend simuliert wird, sind Brugga und Zastler nur ungenügend nachgebildet. Jedoch konnten in den von der LFU gelieferten Abflusszeitreihen der Brugga Unplausibilitäten festgestellt werden (zwei unterschiedliche Zeitreihen für dieselbe Zeitperiode). Deshalb sollte der Datensatz erst nach nochmaliger Prüfung verwendet werden.

In der Kalibrierperiode übersteigt die lineare Effizienz die logarithmische, d.h Hoch- und Mittelwasserabflüsse werden besser simuliert als Niedrigwasserabflüsse. In der Validierperiode kehrt sich dies um. Dies könnte darin begründet sein, dass bei der Kalibrierung eine genaue Anpassung der simulierten an die gemessenen Scheitel erfolgte. In der Validierung genügt jedoch bereits eine geringe Scheitelverschiebung, die sich aufgrund unsicherer Niederschlagsintensitäten oder -verteilungen ergeben kann, um eine deutliche Abweichung der simulierten von den gemessenen Scheitelabflüssen zu erzielen. Aufgrund der hohen Werte wirkt sich diese Abweichung stark auf die lineare Effizienz aus. Die logarithmische Effizienz dagegen ist nicht so stark von der detaillierten Niederschlagserfassung abhängig.

Es kommt zu keinen systematischen zeitlichen Verschiebungen der simulierten von der gemessenen Ganglinie. Dies zeigt auch die zeitliche Verschiebung beider Ganglinien miteinander. Das Maximum der Gütemaße wird in der Gesamtperiode ohne zeitliche Verschiebung erreicht. Jedoch kam es in einzelnen Validierperioden zu Über- und Unterschreitungen von einer Stunde.

| Gütemaße                  |                       | Dreisam         | Brugga         | Talbach  | Zastler |  |  |  |
|---------------------------|-----------------------|-----------------|----------------|----------|---------|--|--|--|
| Periode 01.08.96-31.07.97 |                       |                 |                |          |         |  |  |  |
| Modelleffizienz           | R <sub>eff</sub>      | 0,767           | 0,380          | 0,614    | 0,390   |  |  |  |
| Log. Modelleffizienz      | Log. R <sub>eff</sub> | 0,827           | 0,66           | 0,720    | 0,596   |  |  |  |
| Volumenfehler             | VE                    | -16 mm          | - 278 mm       | -185 mm  | -209 mm |  |  |  |
| Gesamtdifferenz           | GD                    | 182 mm          | 349 mm         | 310 mm   | 344 mm  |  |  |  |
|                           | I                     | Periode 01.08.9 | 7-31.07.98     |          |         |  |  |  |
| Modelleffizienz           | R <sub>eff</sub>      | 0,817           | 0,823          | 0,698    | 0,760   |  |  |  |
| Log. Modelleffizienz      | Log. R <sub>eff</sub> | 0,888           | 0,835          | 0,782    | 0,821   |  |  |  |
| Volumenfehler             | VE                    | 78 mm           | -41 mm         | 77 mm    | -3 mm   |  |  |  |
| Gesamtdifferenz           | GD                    | 181 mm          | 250 mm         | 335 mm   | 211 mm  |  |  |  |
| P                         | Periode 01.0          | 8.98-31.07.99 ( | Abflüsse bis 2 | 3.05.99) |         |  |  |  |
| Modelleffizienz           | R <sub>eff</sub>      | 0,849           | 0,783          | 0,75     | 0,753   |  |  |  |
| Log. Modelleffizienz      | Log. R <sub>eff</sub> | 0,865           | 0,765          | 0,783    | 0,762   |  |  |  |
| Volumenfehler             | VE                    | 38 mm           | -23 mm         | 123 mm   | -141 mm |  |  |  |
| Gesamtdifferenz           | GD                    | 227 mm          | 437 mm         | 400 mm   | 291 mm  |  |  |  |
| Periode 01.08.95-31.07.99 |                       |                 |                |          |         |  |  |  |
| Modelleffizienz           | R <sub>eff</sub>      | 0,854           | 0,768          | 0,761    | 0,701   |  |  |  |
| Log. Modelleffizienz      | Log. R <sub>eff</sub> | 0,871           | 0,788          | 0,795    | 0,729   |  |  |  |

Tab. 4.16:Gütemaße der Modellanwendung von WaSiM-ETH für die Einzugsgebiete und das<br/>Gesamtgebiet im Validierungszeitraum (01.08.1996-01.08.1999)

Die Abbildungen 4.6 bis 4.9 zeigen exemplarisch den Vergleich zwischen gemessenen und simulierten Abflüssen im Dreisam- und Brugga-Einzugsgebiet für die Perioden 01.08.95-31.07.96 und 01.08.97-31.07.98. Ganglinien der weiteren Perioden und Teileinzugsgebiete finden sich im Anhang A.1-A.5.

Die Kalibrierung erbrachte für alle Einzugsgebiete eine gute graphische Anpassung der simulierten an die gemessene Abflussganglinie. In allen Einzugsgebieten erfolgte während der Kalibrierperiode eine Unterschätzung der Abflussscheitel, d.h. Spitzenabflüsse, die nur während weniger Stunden auftreten, werden nicht erfasst. Das Zulassen von höherem Direktabfluss ergab bei der Kalibrierung jedoch keine besseren Ergebnisse, da es aufgrund der Unsicherheit in der Messung der Niederschlagsintensitäten zu Peakverschiebungen kam. Auffällig ist im Brugga-Einzugsgebiet die sehr schnelle Niederschlags-Abfluss-Reaktion. Es tritt nur eine sehr kurze Zeitverschiebung zwischen maximaler Niederschlagsintensität und Abflussspitze auf. FREY (1999) ermittelte in einer Intensivmessperiode vom 15.07.98-16.10.98 Antwortzeiten von zwei bis fünf Stunden zwischen dem Zeitpunkt der höchsten Niederschlagsintensität und dem Erreichen des Abflussmaximums. Nach kleineren, kurz aufeinander folgenden Ereignissen, wie sie im Zeitraum 08.95-10.95 und 11.97-12.97 auftraten, ist ein zu langsamer Rückgang des Gesamtabflusses festzustellen. Bei diesen Ereignissen ist zu vermuten, dass sie durch bedeutende Anteile aus Oberflächenabfluss aus den Sättigungsflächen und den versiegelten Flächen gebildet werden. Das Modell simuliert jedoch Interflow, der in seiner Reaktion gegenüber Direktabfluss verlangsamt ist und länger andauert.

Schneeschmelzereignisse werden gut erfasst. Auffällig ist jedoch der zu schnelle Rückgang der simulierten Abflüsse nach dem Abschmelzen der Schneedecke. Diese Regelmäßigkeit ist bei Zastler und Talbach stärker ausgeprägt als bei Brugga und Dreisam (siehe Abb. A.1-A.5). Dies könnte auf ein zu schnelles Abschmelzen der simulierten Schneedecke in den Tälern mit größerem Anteil an nördlich, nordöstlich und östlich exponierten Flächen (Tab. B.1) hindeuten, wo oft noch im Juni Schneereste vorzufinden sind.



Abb. 4.6: Niederschlags-Abfluss-Simulation für das Dreisam-Einzugsgebiet in der Kalibrierperiode (01.08.95 - 31.07.96)



(01.08.95 - 31.07.96)



Abb. 4.8: Niederschlags-Abfluss-Simulation für das Dreisam-Einzugsgebiet in der Validierperiode (exemplarisch 01.08.97 - 31.07.98)



60

#### 4.4.4 Multiple-response-validation

Nachdem eine Validierung über den Abfluss für das gesamte Untersuchungsgebiet und die bemessenen Teileinzugsgebiete erfolgt ist, und hier gute Ergebnisse erzielt wurden, gilt die generelle Anwendbarkeit des Modells als belegt. Das Vorhandensein von weiteren Datensätzen mit gutem räumlichen Bezug zum Untersuchungsgebiet ermöglicht eine weitere Validierung im Sinne einer multiple-response-validation (UHLENBROOK, 1999).

#### 4.4.4.1 Schneedeckenaufbau und Schneeschmelzprozess

Zum Messprogramm der meteorologischen Station Feldberg gehört die tägliche Messung der Schneehöhen. Diese Messungen eignen sich zur qualitativen Bewertung der Simulationsergebnisse des Schneemoduls. Da im Rahmen des Messprogramms keine Schneedichtenbestimmung vorgenommen wird, können quantitative Vergleiche der in der Schneedecke gespeicherten Wasseräquivalente nicht angestellt werden.



Abb. 4.10: Qualitativer Vergleich der Schneehöhe an der Station Feldberg mit den mittleren Wasseräquivalenten verschiedener Höhenzonen

In Abbildung 4.10 erfolgt die Gegenüberstellung der an der DWD-Station gemessenen Schneehöhen mit den in verschiedenen Höhenzonen simulierten Wasseräquivalenten. Die allgemeine Dynamik wird sehr gut erfasst. Der Beginn und das Ende der Schneeperiode mit Schneeniederschlag wird gut wiedergegeben. Die höchsten Schneedecken werden jedoch nicht in den höchsten Lagen simuliert, sondern orientieren sich an der allgemeinen Niederschlagsverteilung mit maximalen Niederschlagshöhen in Höhenzonen zwischen 1200 - 1400 m. Bei der Modellierung des Schneedeckenauf- und -abbaus kommt der Ermittlung der Gebietstemperaturen eine entscheidende Bedeutung zu. Das stark reliefierte Untersuchungsgebiet zeichnet sich durch eine große Varianz der Schneehöhen bzw. der Wasseräquivalente aus. Abbildung 4.11 zeigt den Mittelwert des Wasseräquivalentes der Schneedecke im März 1996. Die simulierten Wasseräquivalente variieren zwischen 0 – 100 mm. Das Zartener Becken und die südexponierten Hanglagen sind bereits weitgehend schneefrei. Hohe Wasseräquivalente sind noch in der Schauinslandregion und in den gesamten südlichen Hochlagen gespeichert. Insgesamt ergibt sich eine plausible räumliche Verteilung, bei der jedoch feinräumige Strukturen, wie die verzögerte Schneeschmelze in nord- und nordostexponierten Lagen nur bedingt herausmodelliert werden. Zur Erfassung dieser kleinräumigen Strukturen könnte jedoch ein 200 m Raster bereits zu grob sein, da die abschattende Wirkung der Mikrotopographie durch diese Rastergröße nicht wiedergegeben werden kann.



Abb. 4.11: Simuliertes mittleres Wasseräquivalent der Schneedecke im März 1996

#### 4.4.4.2 Validierung der Verdunstung anhand ausgewählter Verdunstungssituationen

Bei der Verdunstung handelt es sich um einen äußerst komplexen und zeitlich sehr variablen Prozess. Bei keiner anderen Wasserhaushaltsgröße bestimmt das Wechselspiel der atmosphärischen, pedologischen und biologischen Randbedingungen den Betrag und den zeitlichen Gang in so extremer Weise. Ändert sich nur einer der Einflusskomplexe, reagiert die Verdunstung darauf ohne größere Zeitverzögerung. Auf Änderungen der atmosphärischen Bedingungen spricht die Verdunstung praktisch zeitgleich an. Eine zeitliche Validierung der Verdunstung kann deshalb nur durch entsprechend zeitlich hochaufgelöste Messungen erfolgen. Im Rahmen des ARINUS-Projektes erfolgte am Standort Schluchsee im Bereich des Feldberggebietes in den Vegetationsperioden 1994 - 1996 die Messung der Strahlungsbilanz und die Berechnung der Verdunstungsgrößen u.a. auf Basis des Bowen-Ratio-Verfahrens und der Eddy-Korrelations-Methode (FRITSCH, 1998). Aufgrund der relativen Nähe der Untersuchungsgebiete erfolgt ein Vergleich der Ergebnisse der zeitlich hochaufgelösten Verdunstungsbestimmung für den Schluchseestandort mit den Teileinzugsgebieten des Dreisam-Einzugsgebietes für bestimmte Verdunstungssituationen. Zum Vergleich sind zwei Tagesgänge an Strahlungstagen im Juli und Oktober dargestellt (Abbildungen 4.12 und 4.13). Simuliert wurden 5,1 mm/d gegenüber gemessenen 3,2 mm/d am 22.07.96 und 0,5 mm/d gegenüber 0,6 mm/d am 12.10.96. Der tageszeitliche Verlauf wird an beiden Tagen, die Größenordnungen nur am zweiten Tag gut erfasst. Ein direkter Vergleich der Punktmessungen mit der simulierten Teileinzugsgebietsverdunstung ist jedoch nur beschränkt möglich. Am 22.07.96 wird eine fast doppelt so hohe Verdunstung simuliert. Die Differenz ergibt sich vor allem am Ende des Tages, da der Messstandort wohl einer früheren Abschattung unterliegt (Ende des messbaren Sonnenscheins um 20:30 Uhr, Station Feldberg).



Abb. 4.12: Beispielhafte Darstellung des Tagesganges der simulierten ETA für das Talbach-Einzugsgebiet anhand von zwei Strahlungstagen



Abb. 4.13: Tagesgang der zeitlich hochaufgelösten Verdunstung E<sub>kor</sub> am ARINUS-Standort Schluchsee an zwei Strahlungstagen (FRITSCH, 1998)

#### 4.4.4.3 Sättigungsflächen im Untersuchungsgebiet

Die Kartierung von Sättigungsflächen im Brugga-Einzugsgebiet von GÜNTNER (1997) zeigte, dass die Ausdehnung von Sättigungsflächen durch steile Topographie und ihre punktförmige Entstehung an quelligen Lagen zumeist invariabel angelegt sind. Es wurden Ausdehnungen an potentiellen Sättigungsflächen von 6,2 % im Brugga-Einzugsgebiet, 6,6 % im Talbach-Einzugsgebiet und 14 % im Buselbach-Einzugsgebiet kartiert. Vermehrt treten Sättigungsflächen auf:

- entlang der Hauptvorfluter
- in Muldenlagen (Karböden etc.)
- an extrem wasserreichen Standorten (Moore)
- an Quellaustritten (Kluftquellen, Hangschuttquellen).

Die Ergebnisse der Modellierung mit WaSiM-ETH geben diese räumliche Verteilung kaum wieder. Zwar werden Sättigungsflächen entlang der Hauptvorfluter ermittelt, aber Sättigungsflächen an Senken und extrem wasserreichen Standorten werden jedoch kaum und Quellaustritte gar nicht nachgewiesen. Alle ermittelten Sättigungsflächen waren weniger als 13 % des Jahres wassergesättigt, wobei jedoch innerhalb des Brugga-Einzugsgebietes - übereinstimmend mit der Kartierung - das Buselbach-Einzugsgebiet den größten Anteil an gesättigten Zonen besitzt. Ins-

gesamt muss die Modellierung von Sättigungsflächen als ungenügend bezeichnen werden. Die Gründe für die Diskrepanz zwischen modellierten und gemessenen Sättigungsflächen müssen entweder in der Parametrisierung des Modells oder in der Modellkonzeption selbst zu finden sein. Kleinräumige Strukturen, wie sie im Brugga-Einzugsgebiet kartiert wurden, können z.T. auch aufgrund des hierfür bereits zu groben Modellierungsrasters von 200 m nicht wiedergegeben werden.

Das Modell (ohne Betrieb des Grundwassermoduls) kann Sättigungsflächen, deren Entstehung auf der Topographie oder Pedologie des Untersuchungsgebietes beruht, nachbilden. Sättigungsflächen, die dagegen aufgrund bestimmter geologischer Ausprägungen entstehen, wie z.B. Kluftquellen, etc. können nicht dargestellt werden. Grundlage für die Ausweisung von pedologisch und topographisch bedingten Sättigungsflächen ist die korrekte Erfassung und Parametrisierung der kleinräumigen Variabilität. Da die Feinkalibrierung des Bodenmoduls auf Grundlage der modifizierten BÜK 200 nicht mehr erfolgte, sind im Bodenmodul noch Verbesserungen der Parametrisierung möglich. Die Parametrisierung des maximalen Bodenwassergehaltes erfolgte ausgehend vom Gesamtporenvolumen - anhand von Literaturdaten (SCHEFFER & SCHACHT-SCHABEL, 1998, WILPERT ET AL., 1996, u.a.). Es zeigte sich jedoch, dass diese Werte, bei Betrachtung ganzer Bodensäulen insgesamt zu hoch erscheinen, da der Skelettgehalt mit der Tiefe deutlich zunimmt. Hier können also noch Feinkalibrierungen vorgenommen werden.



Abb. 4.14: Prozentuale Sättigungszeit der Flächen im Hydrologischen Jahr 1996 und kartierte Sättigungsflächen im Brugga-Einzugsgebiet (GÜNTNER, 1997)

#### 4.4.4.4 Möglichkeiten der räumlichen Übertragung und Validierung – Beispiel: Rotbach

Zielsetzung der Diplomarbeit ist - neben der Modellierung des gesamten Dreisam-Einzugsgebietes - die separate Modellierung aller Teileinzugsgebiete. Eine Validierung der Modellergebnisse ist nur für Einzugsgebiete mit Pegel am Gebietsauslass möglich. Insgesamt werden daher nur ca. 60 km<sup>2</sup> des ca. 258 km<sup>2</sup> großen Einzugsgebietes in Form von Teileinzugsgebieten separat kalibriert. Bei ca. 200 km<sup>2</sup> muss deshalb eine Anpassung der Kalibrierparameter ohne besondere Validierungsmöglichkeit im Teileinzugsgebiet erfolgen. Für den Rotbach steht jedoch zusätzlich eine einjährige Abflusszeitreihe in täglicher Auflösung zur Verfügung. Mit diesem Zeitintervall konnte modellintern keine Kalibrierung des Rotbachs erfolgen. Es war dadurch aber für den Rotbach eine Möglichkeit gegeben, die Übertragbarkeit der auf die Teileinzugsgebiete bezogenen Kalibrierparameter (Tab. 4.12) auf unbemessene Teileinzugsgebiete zu überprüfen. Abbildung 4.15 zeigt die graphische Anpassung der simulierten an die gemessene Ganglinie des Rotbaches, wie sie sich bei der Parametrisierung der einzugsgebietsbezogenen Parameter mit den Werten der Brugga ergab.



Abb. 4.15: Niederschlags-Abfluss-Simulation auf Tageswertbasis für das Rotbach-Einzugsgebiet als Beispiel für eine räumliche Übertragung

Die räumliche Übertragung der einzugsgebietsbezogenen Parameter ergibt für die vorhandene Datenreihe gute Ergebnisse. Die generelle Dynamik wird gut erfasst. Niedrigwasserabflüsse werden jedoch überschätzt, wohingegen die Scheitelabflüsse für den Rotbach unterschätzt werden. Eine generelle Übertragbarkeit der Kalibrierparameter auf die unbemessenen Einzugsgebiete scheint demnach möglich. Auf der Grundlage der Modellergebnisse können die simulierten Abflüsse der unbemessenen Teileinzugsgebiete (Eschbach, Ibentalbach, Kapplerbach und Wagensteigbach) einer näheren Betrachtung unterzogen werden können. Das Modell ermöglicht nun Aussagen über die Bedeutung einzelner Teileinzugsgebiete auf den Gesamtabfluss am Pegel Ebnet und kann im Hinblick auf die betriebenen Grundwassermodelle im Zartener Becken einen verbesserten Eingangsdatensatz der oberirdischen Zuflüsse zum Zartener Becken bereitstellen.

#### 4.4.5 Fazit

Die Modellanwendung des Wasserhaushaltsmodells WaSiM-ETH erfolgte für das Dreisam-Einzugsgebiet und seiner Teileinzugsgebiete getrennt in eine Kalibrierperiode (01.08.95-31.07.96) und eine Validierperiode (01.08.96-31.07.99). Zur Beurteilung der Güte der Modellergebnisse wurden neben den statistischen Gütemaßen, wie die lineare und logarithmische Modelleffizienz (NASH & SUTCLIFFE, 1970), auch der visuelle Vergleich zwischen gemessener und simulierter Ganglinie, Wasserbilanzbetrachtungen und Abflusskomponentenbetrachtungen herangezogen.

Es konnte ein Parametersatz ermittelt werden, der für das Dreisam-Einzugsgebiet und seine bemessenen Teileinzugsgebiete (Brugga, Talbach, Zastler, Rotbach) gute Modellergebnisse liefert. Es zeigte sich jedoch, dass die Qualität und die Variabilität der Eingangsdaten für die einzelnen Teileinzugsgebiete einen enormen Einfluss auf die Simulationsergebnisse ausübt. Aufgrund der kurzen Reaktionszeiten des Untersuchungsgebietes hat die exakte Erfassung der Niederschlagsintensitäten und -mengen einen überragenden Einfluss auf die Güte der Simulation. Der Mangel an hochaufgelösten Bodendaten beschränkt die Aussagekraft der räumlich detaillierten Simulationsergebnisse. Es ist zu erwarten, dass sich durch Verwendung von Bodenkarten im Maßstab 1:25000 (im Untersuchungsgebiet nicht verfügbar) eine weitere Ergebnisverbesserung erzielen ließe.

Die Optimierung der Parametersätze erfolgte nach einem manuellen "trial-and-error Verfahren". Die langen Rechenzeiten durch die Verwendung der Richardsgleichung beschränkte die Anzahl der möglichen Simulationen, so dass im Rahmen der Kalibrierung bei höherem Zeitaufwand noch Feinkalibrierungen möglich wären. Von den Kalibrierparametern haben sich nur wenige als hoch sensitiv erwiesen, jedoch besteht eine starke Interaktion zwischen einzelnen Parametern, was die Kalibrierung erschwerte (Kapitel 5). Aufgrund der starken Schwankungen bei den Literaturwerten ergaben sich Unsicherheiten bei deren Parametrisierung. Die Eindeutigkeit des Parametersatzes ist nicht gegeben, da verschiedene Parametrisierungen zu ähnlich guten Ergebnissen führten.

Das Modell kann trotz der kurzen Kalibrierungszeit sowohl die langfristige Variabilität mit dem Auftreten von Trocken- und Feuchtjahren als auch die kurzfristige Variabilität bei unterschiedlichen Witterungsbedingungen und Jahreszeiten darstellen. Für die Validierungsperiode 01.07.96-31.07.97 sollte eine nochmalige Prüfung der Eingangsdaten erfolgen. Eine generelle Schwäche des Modells bei der Simulation von Feuchtjahren wird nicht angenommen, da die Feuchtperiode 01.07.98-31.07.99 deutlich besser modelliert wird.

Hiermit konnte gezeigt werden, dass das Modell bei Betrachtung ganzer Einzugsgebiete in der Lage ist, gute Ergebnisse der Abflusssimulation zu berechnen. Zur Beurteilung des Wasserhaushaltes und für räumlich detailliertere Betrachtungsweisen müssen jedoch weitere Plausibilitätsprüfungen vorgenommen werden. Hierzu werden die Ergebnisse der einzelnen Teilmodule herangezogen und - soweit möglich - mit gemessenen Werten verglichen. Nur so kann ermittelt werden, ob sich Simulationsfehler bei der Modellanwendung überlagern und damit gegenseitig ausgleichen.

Im Rahmen einer "multiple-response-validation" erfolgte ein umfangreicher Vergleich der simulierten Ergebnisse mit Naturdaten und gemessenen Zeitreihen:

- Der Vergleich der Schneehöhenmessungen im Feldberg mit simulierten Wasseräquivalententen zeigte eine gute Übereinstimmung von Schneeauf- und Schneeabbau. Flächendetailliert ergab sich eine plausible Schneehöhenverteilung im Untersuchungsgebiet.
- Ein Vergleich der Gebietsverdunstung im Untersuchungsgebiet mit Verdunstungsmessungen auf Grundlage des Eddy-Korrelation-Verfahrens am Schluchsee ergab im zeitlich hochaufgelösten Vergleich eine hohe Übereinstimmung der Verdunstungswerte im Tagesverlauf.
- Sättigungsflächen wurden von WaSiM-ETH nicht befriedigend modelliert. Eine Verbesserung wäre eventuell erreichbar durch die Behebung von Schwächen in der Parametrisierung des Bodenmoduls. Geologisch bedingte Sätttigungsflächen (Quellaustritte etc.) können durch das Bodenmodul nicht modelliert werden.
- Die räumliche Übertragung von einzugsgebietsbezogenen Kalibrierparametern erbrachten am Beispiel des Rotbaches gute Ergebnisse, so dass eine Übertragung auf Teileinzugsgebiete ohne Pegel möglich scheint. Im Hinblick auf die im WAQIS-Projekt betriebenen Grundwassermodelle im Zartener Becken kann WaSiM-ETH somit einen verbesserten Eingangsdatensatz der oberirdischen Zuflüsse zum Zartener Becken bereitstellen.

Durch "multiple-response-validation" konnten die modellierten Ergebnisse weitgehend durch den Naturdatenvergleich bestätigt werden. Dies ermöglicht im Postprocessing die Durchführung von weiteren Modellanwendungen.

# 4.5 Postprocessing – weitere Darstellung und Analyse der Simulationsergebnisse

### 4.5.1 Wasserhaushaltsbilanzen

Als Ergebnis der Modellanwendung lassen sich nun die Wasserbilanzen der Hydrologischen Jahre 1996-1999 ermitteln. Die Wasserhaushaltsbilanzen ermöglichen weitere Abschätzungen zur Beurteilung der Modellgüte. Für das Hydrologische Jahr 1996 wird eine Speicherreduzierung und für die Hydrologischen Jahre 1997 und 1998 - bei Berücksichtigung von gemessenen Abflüssen - eine Speichererhöhung ermittelt. Für das Hydrologische Jahr 1997 sind aufgrund der noch zu bereinigenden Probleme in den Ausgangsdaten und der daraus resultierenden schlechten Simulationsgüte keine Aussagen zu Speicheränderungen möglich. Insgesamt ergibt sich jedoch ein plausibles Bild der Glieder der Wasserhaushaltsgleichung (Tab. 4.17).

|                |         | P<br>[mm] | Q_sim.<br>[mm] | Q_gem.<br>[mm] <sup>1)</sup> | ETR<br>[mm] | EI<br>[mm] | ETP<br>[mm] | Differenz<br>[mm] |
|----------------|---------|-----------|----------------|------------------------------|-------------|------------|-------------|-------------------|
|                | Dreisam | 1271      | 676            | 696                          | 449         | 186        | 730         | -39               |
| Hyc            | Brugga  | 1470      | 991            | 987                          | 334         | 178        | 557         | -33               |
| drol.<br>1996  | Rotbach | 1256      | 709            | -                            | 393         | 177        | 612         | -23               |
| Jahr           | Talbach | 1421      | 990            | 900                          | 298         | 168        | 504         | -35               |
|                | Zastler | 1379      | 971            | 966                          | 293         | 171        | 497         | -56               |
|                | Dreisam | 1601      | 866            | 873                          | 536         | 222        | 934         | -24               |
| Hyd            | Brugga  | 1966      | 1405           | -                            | 424         | 197        | 697         | -60               |
| lrol.<br>1997  | Rotbach | 1641      | 944            | -                            | 512         | 212        | 800         | -26               |
| Jahr<br>7      | Talbach | 1914      | 1420           | 1266                         | 381         | 182        | 622         | -68               |
|                | Zastler | 1849      | 1340           | 1149                         | 381         | 188        | 628         | -60               |
|                | Dreisam | 1557      | 786            | 835                          | 415         | 206        | 729         | 150               |
| Hyd            | Brugga  | 1833      | 1161           | 1054                         | 362         | 195        | 623         | 115               |
| lrol.<br>1998  | Rotbach | 1560      | 836            | -                            | 375         | 193        | 616         | 156               |
| Jahr           | Talbach | 1686      | 1071           | 1024                         | 323         | 179        | 555         | 112               |
|                | Zastler | 1752      | 1158           | 1089                         | 290         | 178        | 507         | 126               |
| Н              | Dreisam | 1505      | 1077           | 957 <sup>2)</sup>            | 280         | 139        | 454         | 10                |
| ydro<br>(bis   | Brugga  | 1804      | 1479           | 1224 <sup>2)</sup>           | 239         | 121        | 385         | -35               |
| l. Jał<br>31.0 | Rotbach | 1487      | 1127           | -                            | 240         | 117        | 375         | 2                 |
| ır 19<br>7.99  | Talbach | 1720      | 1433           | 1213 <sup>2)</sup>           | 205         | 109        | 334         | -28               |
| ) (66          | Zastler | 1582      | 1335           | 946 <sup>2)</sup>            | 183         | 111        | 311         | -48               |

Tab. 4.17: Wasserbilanzen für die Hydrologischen Jahre 1996 - 1999

1) Die gemessenen Abflusszeitreihen enthalten Datenausfälle, so dass es zu einer Unterschätzung der Messergebnisse kommen kann.

2) Abflusszeitreihen enden früher (siehe Tabelle 4.1)

Am Beispiel des Hydrologischen Jahres 1996 werden die Glieder der Wasserbilanz räumlich detailliert dargestellt. Dies ermöglicht Aussagen, ob die auf Einzugsgebietsebene ermittelten Gebietsmittelwerte auch auf einer plausiblen flächendetaillierten Grundlage beruhen oder ob Fehler in der Fläche durch Mittelwertbildung unterdrückt wurden.

#### 4.5.1.1 Niederschlag

Die Niederschläge in den betrachteten Jahren variieren stark. Das Brugga-Einzugsgebiet erhält jedoch immer die höchsten Niederschläge. Zastler und Talbach weichen in stärkerem Maße davon ab. Durch die Errichtung der Klimastation Zastler konnte ab 07.97 die Datenlage verbessert werden und es ergibt sich eine feiner aufgelöste Niederschlagsverteilung.



Abb. 4.16: Räumlich detaillierte Niederschlagsverteilung für das HJ 1996

Die für das Hydrologische Jahr 1996 ermittelte Niederschlagsverteilung gibt das mittlere Niederschlagsgeschehen gut wieder. Die Zunahme des Niederschlages mit der Höhe wird erfasst. Das Spektrum der gefallenen Niederschläge reicht von 1000 mm im Zartener Becken über 1600 mm auf dem Feldberg bis 1900 mm in der Schauinslandregion. Generell ist die Niederschlagsmenge orographisch bedingt im Süden höher als im Norden. Über längere Zeiträume (größer ein Monat) lässt sich - bei ausreichender Stationsdichte - auch durch das IDW-Verfahren eine gewisse Höhenabhängigkeit simulieren. Einzelne Stationen, wie die Klimastation St. Wilhelmer Tal (STW), ragen inselartig aus der Niederschlagsverteilung heraus; hier wurden aufgrund der Tallage der Station geringere Niederschlagsmengen erfasst als in den Höhenlagen. Der Vergleich der einzelnen Modellperioden zeigt, dass sich die räumliche Verteilung des Niederschlags in den Perioden nicht grundsätzlich unterscheidet, obwohl die Niederschlagssummen im Modellierungszeitraum einer enormen Variabilität unterliegen. In allen Perioden fällt eine fast lineare Zunahme des Niederschlags mit der Höhe im Höhenbereich zwischen 300 m und 900 m ü. NN auf. Ab 900 m ü. NN wird die Höhenabhängigkeit des Niederschlags zunehmend von anderen Faktoren (wie Reliefierung, Lage etc.) überprägt, so dass die Niederschlagsverteilung hier uneinheitlicher wird.



Abb. 4.17: Niederschlag der einzelnen Zonen in den einzelnen Hydrologischen Jahren

#### 4.5.1.2 Abfluss

Bei Betrachtung der simulierten Abflüsse (Tab. 4.17) ermittelt man eine permanente Überschätzung der simulierten Werte des Talbaches, dasselbe gilt in abgeschwächter Form auch für den Zastlerbach. Die Dreisam neigt zur leichten Unterschätzung der Abflüsse.

Die Abflussbeiwerte variieren stark in den einzelnen Hydrologischen Jahren und zwischen den (Teil-)einzugsgebieten. Der Abflussbeiwert wird jedoch nicht ausschließlich durch die Summe des gefallenen Niederschlags beeinflusst. So hat nicht das niederschlagsärmste Hydrologische Jahr 1996 mit Abflussbeiwerten von 0,53 (Dreisam) bis 0,70 (Zastler) die geringsten Beiwerte,

sondern das Hydrologische Jahr 1998 mit Abflussbeiwerten von 0,50 (Dreisam) bis 0,60 (Zastler). Auch die extrem hohen Beiwerte von 0,71 (Dreisam) bis 0,84 (Zastler) für das unvollständige HJ 1999 zeigen, dass die jahreszeitliche Verteilung der Niederschlagsmengen großen Einfluss besitzt. So wirken sich hohe Winterniederschläge erhöhend auf den Abflussbeiwert aus, wohingegen hohe Sommerniederschläge zu einem größeren Teil im Untersuchungsgebiet verbleiben und durch die Verdunstung aufgezehrt werden. In den untersuchten (Teil-)einzugsgebieten zeigte sich i.A. folgende Abfolge der Größenordnung der Abflussbeiwerte: Dreisam < Rotbach < Brugga < Talbach < Zastler.



Abb. 4.18: Flächendetaillierter Gesamtabfluss im Dreisam-Einzugsgebiet (01.11.95-31.07.96)

Die flächendetaillierte Betrachtungsweise (Abb. 4.18) zeigt die räumliche Variabilität des Jahresabflusses im Untersuchungsgebiet. Das Zartener Becken hebt sich durch besonders geringe Abflüsse ab. Dagegen bringt der Südosten bedingt durch den größten Niederschlagsinput die maximalen Werte hervor.

#### 4.5.1.3 Verdunstung

Die Verdunstungsgrößen geben in der einzugsgebietsbezogenen Betrachtung der Wasserhaushaltsbilanz ein realistisches Bild wieder (Tab. 4.17). Dies trifft insbesondere für die bemessenen Teileinzugsgebiete zu. Die modellierten Werte der ETP im Dreisam-Einzugsgebiet von 934 mm im Hydrologischen Jahr 1997 machen jedoch eine genauere Betrachtung notwendig, da dieser Wert doch etwas hoch erscheint.

Abbildung 4.19 zeigt den Jahresgang der Tageswerte der wichtigsten Verdunstungsgrößen für das HJ 1996 im Gesamteinzugsgebiet. Der Jahreszyklus mit geringen ETP im Winter und hohen

ETP im Sommer wird deutlich überprägt durch den Witterungsverlauf, dies kann man sehr deutlich an der geringen ETP im Juli 1996 erkennen. Da es jedoch zu keinen bedeutenden Reduktionen der ETR gegenüber der ETP kommt, scheint Wasser selbst in den oberflächennahen Bodenschichten fast das ganze Jahr pflanzenverfügbar zu sein. Dies entspricht auch den Ergebnissen von WILPERT ET AL. (1996) in der Ökosystemforschungsstudie Conventwald. Die Werte der ETP scheinen an Strahlungstagen jedoch überschätzt zu werden. GERMANN (1976) gab als realistische Obergrenze der standortbezogenen Verdunstung eine Höhe von 8 mm/d an. Dieser Wert wird im Sommer an mehreren Tagen sogar im Gebietsdurchschnitt überschritten.



Abb. 4.19: Tageswerte der Verdunstungsgrößen im Dreisam-Einzugsgebiet (01.11.95-31.10.96)

Gerade bei den Verdunstungsgrößen ist aufgrund der extremen Heterogenität des Einzugsgebietes hinsichtlich der Morphologie und der hydrometeorologischen Rahmenbedingungen eine räumliche Betrachtungsweise zwingend notwendig.



Abb. 4.20: Räumlich detaillierte Verdunstungsgrößen des Dreisam-Einzugsgebietes (01.11.95-31.10.96)

Die flächendetaillierte Darstellung der Verdunstungsgrößen gibt nur bedingt ein realistisches Bild wieder (Abbildung 4.20). Jedoch stehen die Ergebnisse nicht im Widerspruch zu anderen Arbeiten. Auffällig ist die hohe ETP und ETR im Zartener Becken. Das Zartener Becken verfügt jedoch über ein hohes Energieangebot aufgrund der hohen Sonnenscheindauer und Globalstrahlung bei nur geringer Horizonteinengung und ebener Lage. Werte von über 1000 mm/a erscheinen jedoch unrealistisch. Dieses Problem konnte auch bereits bei anderen Arbeiten festgestellt werden, so ermittelte ALBERS (1998) flächendetailliert für Juli 1990 im Zartener Becken eine potentielle Verdunstung von 120 – 250 mm. Besonders die Landnutzungen Acker und intensives Grünland zeichnen sich durch eine hohe Verdunstung aus. Da aber die Parametrisierung im Rahmen der Literaturwerte belassen werden sollte, wurden diese erhöhten Werte nicht durch eine extreme Kalibrierung reduziert. Die Interzeptionsverdunstung ist in besonderem Maße von der Landnutzung abhängig. Versiegelte Flächen heben sich deutlich mit geringen Werten aus Abbildung 4.20 ab. Die höchste Interzeptionsverdunstung wird in Waldflächen ermittelt.

Im Tälerschwarzwald nimmt das Energieangebot, bedingt durch die starke Horizonteinengung und die Exposition der Hänge deutlich ab. Auf Hochflächen und südexponierten Flächen steigt die Verdunstung dagegen wieder an. Die Faktoren hierfür sind dieselben wie im Zartener Bekken, ausserdem macht sich der Einfluss von Inversionswetterlagen mit erhöhter Verdunstung – vor allem im Oktober - bemerkbar. In der Ökosystemfallstudie Conventwald (WILPERT ET AL., 1996) wurden für die hydrologischen Jahre 1992-1994 ETR von 706 mm - 860 mm als Restglied aus der Wasserbilanz bestimmt. Der Vergleich mit der flächendetaillierten Ausgabe ergibt keine extremen Abweichungen.

Im ARINUS-Projekt wurden im Versuchsgebiet Schluchsee (1150-1250 m ü. NN) für die Hydrologischen Jahre 1988-1994 eine mittlere ETR von 539 mm und eine mittlere ETP von 581 mm ermittelt (ZIMMERMANN, 1995). In beiden Untersuchungen nahm die Interzeptionsverdunstung einen bedeutenden Anteil an der Gesamtverdunstung ein. Die Interzeption umfasst in unserer Modellvorstellung neben der Kroneninterzeption den Rückhalt in Mulden und in der Mulchschicht. Der Interzeptionsspeicher stellt einen wichtigen Speicher zur Befriedigung der ETP dar. Ist dieser Speicher teilweise geleert, findet ETR auch der Bodenzone statt. Wobei aufgrund der hohen Leitfähigkeiten des Untergrundes und des hohen Anteils an Grobporen die oberste Bodenschicht austrocknet und die Evaporation gegenüber der potentiellen Verdunstung reduziert wird. Die Tanspiration durch die Pflanzen wird aus der durchwurzelten Bodenschicht befriedigt, so dass es hier kaum zu Reduktionen kommt.

### 4.5.2 Abflusskomponenten

Tracerhydrologische Untersuchungen können unter Umständen im Rahmen einer multipleresponse-validation nach Kapitel 4.4.4 bei der Modellanwendung Verwendung finden. Die Vergleichbarkeit von Ergebnissen aus tracerhydrologischen Untersuchungen mit den Ergebnissen einer Wasserhaushaltssimulation ist jedoch stark abhängig von der verwendeten Modellkonzeption. Deshalb muss in dieser Modellanwendung neben einem Ergebnisvergleich die generelle Vergleichbarkeit der beiden Ansätze geprüft werden.

Für die Teileinzugsgebiete der Brugga und des Zastlerbaches liegen tracerhydrologische Untersuchungen zur Zusammensetzung des Gesamtabflusses aus einzelnen Abflusskomponenten vor. UHLENBROOK (1999) konnte mit den Umweltisotopen <sup>18</sup>O und <sup>3</sup>H die Verweilzeiten des Wassers in den verschiedenen Herkunftsräumen abschätzen und die Anteile der Abflusskomponenten über einen Zeitraum von drei Jahren quantifizieren.

Es wurden drei Hauptfließsysteme nachgewiesen, denen die entsprechenden Abflusskomponenten Direktabfluss, oberflächennahes Hangwasser und tiefes Grundwasser zugeordnet werden. Der Vergleich mit den Ergebnissen der Modellierung für den gleichen Zeitraum zeigt deutliche Abweichungen (Tab. 4.18). Direktabfluss wird in ähnlichen Größenordnungen ermittelt. Im Vergleich zu den experimentellen Ergebnissen wird jedoch zu wenig Basisabfluss simuliert. Der Abfluss wir ganzjährig von Interflow dominiert. In den stärker reliefierten Einzugsgebieten verstärkt sich der Anteil des Interflows. Die laterale Flusskomponente wächst hier gegenüber der vertikalen an.

| Abfluss-                                    | Ganglinien- | Abfluss-      | Modellierung 8/95 - 6/98 |        |        |        |
|---|-------------|---------------|--------------------------|--------|--------|--------|
| komponentenseparationkomponenten8/95 - 6/98 |             | komponenten   | BR                       | DR     | ТВ     | ZS     |
| Direktabfluss                               | 11,1 %      | Direktabfluss | 13,6 %                   | 9,5 %  | 7,6 %  | 8,7 %  |
| oberflächennahes<br>Hangwasser              | 69,4 %      | Interflow     | 75,1 %                   | 76,2 % | 80,6 % | 81,3 % |
| tiefes<br>Grundwasser                       | 19,5 %      | Basisabfluss  | 11,3 %                   | 14,3 % | 11,2 % | 10,0 % |

Tab. 4.18:Vergleich der Abflusskomponenten der Modellierung mit den Ergebnissen von Ganglinien-<br/>separationen (UHLENBROOK, 1999)

Die Dynamik der Abflusskomponenten der Modellierung stimmt mit den Ergebnissen der experimentellen Untersuchungen (FREY, 1999; HANGEN, 1997; HOEG, 1998; UHLENBROOK,1999) überein. Der Direktabfluss nimmt bei extremen Abflüssen im Winter fast 50 % des Gesamtabflusses ein (Abb. A.5 und A.6). Bei kleineren Ereignissen tritt er nur zur Zeit des maximalen Abflusses auf. Der Interflow wirkt in der Simulation hochwasserbildend, da aber ein Versiegen im Modellierungszeitraum nicht erfolgte, muss der Interflow neben verzögerten auch langsame Abflusskomponenten beinhalten.

Unter Berücksichtigung der ermittelten Unterschiede der simulierten und experimentell ermittelten Abflusskomponenten stellt sich die Frage, ob der Vergleich dieser verschiedenen Ansätze überhaupt zu Ergebnissen führen kann. Deshalb werden in Tabelle 4.18 die drei Hauptfließsysteme, wie sie sich aus UHLENBROOK (1999) ergeben, mit dem angewendeten Modellkonzept verglichen. Es wird deutlich, dass ein Vergleich nur bedingt möglich ist. Die Bildung von Direktabfluss ist bei WaSiM-ETH an geringe Infiltrationsgeschwindigkeiten bzw. an die Sättigung des Bodens geknüpft. Sättigungs- und versiegelte Flächen liefern bei exakter Parametrisierung Direktabfluss. Geologisch bedingte Sättigungsflächen können jedoch nicht erfasst werden (Kapitel 4.4.4). Blockhalden werden hingegen aufgrund ihres hohen Infiltrationsvermögens Interflow bilden.

Modellierter Interflow wird nach Formeln 3.38 und 3.39 in den ungesättigten Schichten gebildet. Je nach Bodenwassergehalt, ungesättigter Leitfähigkeit, Hangneigung und parametrisierter Gesamtschichtmächtigkeit kommt es zur Ausbildung einer mächtigen ungesättigen Zone, in der lateral transportiertes Wasser als Interflow zum Abfluss kommt. Der vertikale Wasserfluss trägt nach Erreichen der gesättigten Zone zur Grundwasserneubildung bei. Interflow wird vor allem in Steillagen gebildet. Hier überwiegt der Einfluss der lateralen gegenüber der vertikalen Flusskomponente. Auf ebenen Flächen überwiegt die vertikale Komponente. Es bilden sich Grundwasserleiter aus, die je nach Schichtmächtigkeit und Niederschlagsinput einen hohen (Hinterzartener Moor) oder tiefen (Zartener Becken) Grundwasserspiegel aufweisen. Im Modell steuert der Grundwasserspiegel die ausfließende Menge des Basisabflusses. Der Modellvorstellung liegt die Annahme zu grunde, dass bei hohem Grundwasserspiegel exfiltrierende Verhältnisse ins Gewässer vorliegen. Da das Grundwassermodul in dieser Modellanwendung noch nicht verwendet werden konnte, erfolgt die Bildung von Basisabfluss für jede Zelle über ein Einzellinearspeicherkonzept, das unter Verwendung des Grundwasserspiegels als steuernde Größe kalibriert werden muss.

Ohne Verwendung des Grundwassermoduls arbeitet das Modell also lediglich vertikal eindimensional, d.h. jede Zelle wird für sich betrachtet und es findet kein Wasserfluss von einer Zelle zur nächsten statt. Die Verhältnisse in der Realität gestalten sich jedoch dreidimensional, d.h. ein hoher Anteil des lateralen Wasserflusses der ungesättigten Zone wird auf dem unterirdischen Weg ins Gewässer (hinweg über Zellenränder) die gesättigten Zone erreichen und aus der gesättigten Zone ins Oberflächengewässer fließen. Bei Betrieb des Grundwassermoduls kann die Strömung des Grundwassers in zweidimensionaler Form modelliert werden. Es ist somit möglich, zumindest den lateralen Fluss der gesättigten Zone zu modellieren, d.h die Grundwasserbewegung aufgrund von Potentialdifferenzen wird über Zellengrenzen hinweg modelliert. Bei exfiltrierenden Verhältnissen fließt Grundwasser ins Oberflächengewässer, bei infiltrierenden Verhältnissen verhält es sich umgekehrt. Basisabfluss entsteht nur noch beim Übergang ins Gewässer und wäre somit auf wenige Zellen mit Gerinne beschränkt. An der zellenweisen Betrachtung des Interflows gäbe es jedoch keine Änderungen.

Im Gegensatz zu den experimentellen Ergebnissen erfolgt also bei WaSiM-ETH keine herkunftsbezogene Abtrennung der Abflusskomponenten. Wasser der gesättigten Zonen kann gleichermaßen aus den Deckschichten oder dem Festgestein entstammen. Der Einfluss des Kluftgrundwasserleiters wird bei der eindimensionalen Betrachtungsweise der gesättigten/ungesättigten Zonen nicht getrennt berücksichtigt.

Im Modell erfolgt aufgrund der zellenweisen Betrachtungsweise der Abflusskomponenten eine Überschätzung des Interflows gegenüber dem Basisabfluss, da der laterale Fluss zeitverzögert direkt ins Oberflächengewässer abgeleitet wird. Eine Reduktion der lateralen zugunsten der vertikalen Komponente über die Kalibrierung der Drainagedichte erbrachte zwar eine deutliche Verschiebung der Abflusskomponenten, jedoch wurde nur mit dem hier verwendeten Parametersatz sehr gute statistische Gütemaße bei gleichzeitiger Plausibilität der Wasserbilanzglieder erreicht.

| Konzeptmodell nach UHLENBROOK (1999)           | Abflusskomponenten WaSiM-ETH                  |
|--|---|
| Direktabfluss:                                 | Direktabfluss:                                |
| Sättigungsflächen, versiegelte Flächen, Block- | Sättigungsflächen, versiegelte Flächen,       |
| halden   | Schneeschmelze                                |
| Oberflächennahes Hangwasser:                   | Interflow:                                    |
| Hanggrundwasserleiter der (peri-)glazialen     | Zellenweiser Ausfluss aus der ungesättigten   |
| Deckschichten                                  | Zone  |
| Tiefes Grundwasser:                            | Basisabfluss:                                 |
| Kristalliner Kluftgrundwasserleiter und        | Zellenweiser Ausfluss aus der gesättigten Zo- |
| Hochlagenbereichen                             | ne in Abhängigkeit vom Grundwasserspiegel     |

 Tab. 4.19:
 Vergleich der Abflussbildungskonzepte

Bei einer räumlich detaillierten Betrachtungsweise am Beispiel der Kalibrierperiode (Abb. 4.21) wird erneut der enorme Einfluss der exakten Parametrisierung deutlich:

Auffällig ist der hohe Direktabfluss in Stadtlagen. Die BÜK 200 berücksichtigt nur Ortslagen größer 8 km<sup>2</sup>. Deshalb wird nur Freiburg als Ortslage in der BÜK 200 erfasst. Eine Verschneidung mit der Landnutzung zur Berücksichtigung aller Ortslagen hätte noch Ergebnisverbesserungen ermöglicht. Aufgrund des geringen Versiegelungsgrades der Ortslagen im Untersuchungsgebiet (< 50 %) erscheint die von Schulla & Jasper (1999) empfohlene Parametrisierung für die "Bodenart: Ortslage" zu viel Direktabfluss zu bilden.

Die Sättigungsflächen haben zumeist Anschluss ans Gewässernetz. Bedingt durch den moränigen Untergrund weist das Buselbach-Teileinzusgebiet hohe Direktabflüsse aufgrund von Sättigungsflächen auf. Wegen der hohen Aufsättigung des Bodens und der Kalibrierbarkeit des Direktabflussanteils am Schmelzwasser wird Direktabfluss im jahreszeitlichen Verlauf vor allem zur Schneeschmelze gebildet. Direktabfluss auf versiegelten Flächen tritt dagegen ganzjährig auf.

Interflow dominiert den Gesamtabfluss auch in der Fläche. Die niederschlagsreichen Steillagen zeichnen sich deutlich ab. Bei hochanstehendem Grundwasser tritt der Einfluss des Interflows gegenüber dem Basisabfluss zurück. Hier heben sich vor allem die Hochebenen im Osten des Untersuchungsgebietes ab (Abb. 4.21). Ebene Flächen können nach Formel 3.39 keinen Interflow bilden.

Die flächenhafte Betrachtung der Herkunft der einzelnen Abflusskomponenten ist mit enormen Unsicherheiten behaftet. Probleme, die auf der Modellkonzeption beruhen, werden in der Modellbewertung (Kapitel 5) erörtert.



Abb. 4.21: Flächendetaillierte Betrachtung der Abflusskomponenten (01.11.95-31.10.96)

### 4.5.3 Vergleich mit anderen Modellanwendungen im Untersuchungsgebiet

Das Dreisam-Einzugsgebiet - schwerpunktmässig das Brugga-Einzugsgebiet - sind Testgebiete des Institutes für Hydrologie der Universität Freiburg. Besonders im Brugga-Einzugsgebiet liegen Ergebnisse aus der Anwendung konzeptioneller Modelle vor. Jedoch unterliegt der reine Vergleich von Gütemaßen einigen Einschränkungen:

- Es sollten nur Vergleiche in gleichen Modellierungszeiträumen vorgenommen werden. Minimum für die Vergleichbarkeit ist ein einjähriger Modellierungszeitraum. Nur so ist sichergestellt, dass alle für das System bedeutsamen Prozesse (insbesondere der Schneedeckenaufund -abbau) im Modell enthalten sind.
- Es muss deutlich erkennbar sein, ob der Vergleichszeitraum der Validierung oder noch der Kalibrierung diente. Hohe Gütemaße in der Validierperiode sind höher zu bewerten als hohe Bestimmtheitsmaße in der Kalibrierperiode.
- Der Zeitschritt der Modellierung sollte bei Modellvergleichen Beachtung finden, da bei täglichen Zeitschritten durch die ausgleichende Wirkung der Mittelwertbildung i.a. höhere Bestimmtheitsmaße errechnet werden.
- Bei zukünftigen Modellvergleichen wird die Frage des Gesamtmodellgebietes von Bedeutung sein, d.h. ob eine Modellierung nur für das Teilgebiet (Brugga) erfolgte, oder mit dem Parametersatz ein größeres Gebiet (Dreisam) betrachtet wurde.

Unter Berücksichtigung dieser Einschränkungen kann nun ein Modellvergleich der Bestimmtheitsmaße erfolgen (Tabelle 4.20).

| Modell              | NPSM                      | TOPMODEL                  | TAC <sup>2)</sup>         | HBV                       | WaSiM-ETH                   |
|---------------------|---------------------------|---------------------------|---------------------------|---------------------------|-----------------------------|
| zeitliche Auflösung | stündlich                 | stündlich                 | täglich                   | täglich                   | stündlich                   |
| $R_{e\!f\!f}$       | 0,84                      | 0,85                      | 0,77                      | 0,75                      | 0,768 <sup>1)</sup>         |
| $log. R_{e\!f\!f}$  | 0,82                      | 0,84                      | 0,84                      | 0,77                      | 0,788 <sup>1)</sup>         |
| Simulationszeitraum | 20.07.95<br>-<br>29.10.96 | 20.07.95<br>-<br>27.01.96 | 15.07.95<br>-<br>01.04.97 | 15.07.95<br>-<br>01.04.97 | 01.08.95<br>-<br>31.07.99   |
| Art der Anwendung   | Kalibrierung              | Kalibrierung              | Kalibrierung              | Kalibrierung              | Kalibrierung<br>Validierung |

Tab. 4.20Vergleich der Gütemaße verschiedener Modellsimulationen im Brugga-Einzugsgebiet<br/>(verändert, UHLENBROOK, 1999 und KIESE, 1999)

 Das Bestimmtheitsmaß ist inklusive des Hydrologischen Jahres 1997. Hier erfolgte ein Vergleich mit unrealistischen Abflüssen, siehe Tabelle 4.15 und 4.16. Ohne Berücksichtigung dieser Periode ergibt sich R<sub>eff</sub> und log. R<sub>eff</sub> von >0.8.

 Die Validierungsperiode 02.04.97-07.10.98 ergab ein R<sub>eff</sub> von 0,73 und ein log. R<sub>eff</sub> von 0,83 (UHLENBROOK, 1999) Alle Modellierungen sind bezüglich ihrer statistischen Güte im jeweiligen Modellierungszeitraum als nahezu gleichwertig einzustufen. TOPMODEL zeichnet sich durch eine sehr kurze Modellierungsperiode aus, in der kein Schneedeckenabbau modelliert wurde. Für alle konzeptionellen Modelle, die hier mit WaSiM-ETH verglichen werden, sind nur Kalibrierungsperioden verwendet worden. Es zeigte sich in der WaSiM-ETH Anwendung, dass die Periode 08.95 – 07.96 generell gute Anpassungen liefert, wohingegen die Periode 08.96-07.97 nur sehr unbefriedigend angepasst wird. Berücksichtigt man dies, sind die etwas geringeren Modelleffizienzen von TAC und HBV gegenüber NPSM und TOPMODEL erklärbar. Ein aussagekräftiger Vergleich ist jedoch aufgrund der sehr unterschiedlichen Randbedingungen nicht möglich. Allenfalls für das TAC Modell lässt sich unter Berücksichtigung der Validierperiode feststellen, dass hier ähnlich gute Ergebnisse erzielt werden können wie mit WaSIM-ETH.

Als Modellvergleich bietet sich neben dem Vergleich der Gütemaße die Betrachtung von Wasserbilanzen für gleiche Zeiträume an. Viele Modellanwendungen umfassen das Hydrologische Jahr 1996, hierzu sind also Aussagen möglich.

| Modell:                      | NPSM          | TOPMODEL        | TAC                | WaSiM-ETH |
|------------------------------|---------------|-----------------|--------------------|-----------|
|                              | (KIESE, 1999) | (GÜNTNER, 1997) | (Uhlenbrook, 2000) |           |
| Niederschlag                 | 1575 mm       | 1575 mm         | 1839 mm            | 1470 mm   |
| sim. akt. Evapotranspiration | 504 mm        | 591 mm          | 479 mm             | 512 mm    |
| sim. Abfluss                 | 1015 mm       | 977 mm          | 1125 mm            | 991 mm    |
| gem. Abfluss                 | 1002 mm       | 1002 mm         | 1006 mm            | 987 mm    |
| Volumendifferenz             | 55 mm         | 7 mm            | 119 mm             | -33 mm    |
| pot. Evapotranspiration      | 624 mm        | 677             | 531 mm             | 557 mm    |
| ETA/ETP                      | 81 %          | 87 %            | 90 %               | 91 %      |

Tab. 4.21Wasserhaushaltsbilanzen im Brugga-Einzugsgebiet für das Hydrologische Jahr 1996 im<br/>Vergleich

Die einzelnen Modellanwendungen weisen deutliche Unterschiede in den Wasserbilanzkomponenten auf, die einerseits auf unterschiedliche Verfahren der Eingangsdatenaufbereitung, andererseits aber auch auf die verwendete Modellkonzeption zurückzuführen sind. Die von WaSiM-ETH verwendeten Verfahren wurden bereits erläutert.

Der ermittelte Gebietsniederschlag weist die bedeutendsten Abweichungen unter den Wasserbilanzgliedern der einzelnen Modellanwendungen auf. Hier müssen Unterschiede in der Datengrundlage der einzelnen Modellanwendungen und im verwendeten Interpolationsverfahren berücksichtigt werden. Die TOPMODEL und NPSM-Anwendung verwenden nur die Stationen Schauinsland (1218 m ü. NN) und St.Wilhelm (765 m ü. NN) für eine Niederschlagsinterpolation auf der Grundlage des Thiessen-Polygon-Verfahrens. Tiefere Lagen werden daher nicht repräsentiert. Eine Niederschlagskorrektur findet nicht statt. Bei der TAC-Anwendung konnte die Datengrundlage durch Verwendung von Niederschlagsdaten des institutseigenen Messnetzes verbessert werden. Es findet eine Niederschlagskorrektur der Stationswerte auf der Grundlage der regionalen Empfehlungen des DWD statt. Die räumliche Interpolation erfolgt über einen nicht-linearen Niederschlagshöhengradienten. Die deutlich gegenüber den anderen Modellierungen erhöhten Ergebnisse könnten in der räumlichen Verteilung der institutseigenen, temporär betriebenen Messstationen zu finden sein.

Die ETP liegen bei allen Modellanwendungen - trotz unterschiedlicher Verfahren (NPSM: Kombinationsverfahren nach Penman; TOPMODEL: Penman nach Wendling modifiziert, TAC: Berechnung der mittleren täglichen ETP nach Turc-Wendling) - in realistischen Größenordnungen. Die ETP-Reduktion zur Berechnung der ETA erfolgt in allen Modellen in Abhängigkeit von der Bodenfeuchtigkeit.

Das Abflussvolumen ist bei allen Modellen sehr gut simuliert. Eine Verringerung des Speichervolumens wurde jedoch nur von WaSiM-ETH simuliert, obwohl das hydrologische Jahr 1996 im Jahresvergleich mit langjährigen Zeitreihen des DWD geringe Niederschlagsmengen aufwies.

Es lässt sich also feststellen, dass beim Modellvergleich anhand der einzelnen Wasserhaushaltsgrößen die bedeutendsten Differenzen nicht im eigentlichen Wasserhaushaltsmodell auftreten, sondern in den bei NPSM, TOPMODEL und TAC extern bestimmten Gebietsniederschlägen und Verdunstungsgrößen. Der Einfluss der Bodenzone auf die ETA ist im Brugga-Einzugsgebiet wegen der ganzjährigen Wasserverfügbarkeit gering. WaSiM-ETH hebt sich hier aufgrund seiner Modellkonzeption stark von den genannten konzeptionellen Modellen ab. Alle Wasserhaushaltsgrößen werden modellintern ermittelt, einzelne Eingangsgrößen interagieren miteinander.

## 4.5.4 Gesamtbetrachtung der Abflüsse der Teileinzugsgebiete im Dreisam-Einzugsgebiet

Basierend auf den zufriedenstellenden Ergebnissen der räumlichen Übertragung von Kalibrierparametern vom Brugga- auf das Rotbach-Einzugsgebiet kann nun eine Betrachtung des Abflussgeschehens in unbemessenen Teileinzugsgebieten erfolgen. Auf eine Beurteilung einzelner Abflussganglinien in Stunden- oder Tageswerten wird hierbei verzichtet. Jedoch werden auf der Grundlage der monatlichen Abflüsse im Modellierungszeitraum der Einfluss einzelner Teileinzugsgebiete auf den Gesamtabfluss beleuchtet. In diesem Zusammenhang wurden auch Abflussregime der Teileinzugsgebiete über den Modellierungszeitraum erstellt (Abb. 4.22) und mit den langjährigen Regimen (Abb. 2.7) verglichen. Es zeigte sich, dass zur Ermittlung eines aussagekräftigen Regimes eine Modellanwendung von vier Jahren nicht ausreichend ist, da sich ein gegenüber der langjährigen Betrachtung stark verändertes Regime errechnet hat.

Aufgrund des Auftretens der sogenannten Weihnachtshochwässern in der Modellierungperiode, werden im Modellierungszeitraum die höchsten Pardé-Koeffizienten im Dezember ermittelt. Sekundäre Maxima der schneeschmelzebedingten Pardé-Koeffizienten werden für Zastler, Talbach und Kapplerbach im Mai, für Brugga, Rotbach, Wagensteigbach und Dreisam bereits im April errechnet. Im August zeigen alle Einzugsgebiete sommerliche Minima, wobei für den Eschbach die geringsten Werte im Untersuchungsgebiet ermittelt wurden. Ein Trockenfallen des Eschbaches kann jedoch ohne den Betrieb des Grundwassermoduls nicht simuliert werden, da linienhafte Infiltration ins Grundwasser - wie sie gerade in den Gewässern im nördlichen Teil des Zartener Beckens auftritt - nicht simuliert werden kann. Insgesamt zeigen die Regime jedoch ein sehr unausgeglichenes Bild, das stark durch Abflussverläufe der einzelnen Jahre überprägt wird.



Abb. 4.22: Abflussregime aus der Modellanwendungsperiode errechnet (01.08.95-31.07.99)

Die räumliche Heterogenität des Untersuchungsgebietes wird auch ersichtlich aus dem unterschiedlichen Einfluss des Abflusses der Teileinzugsgebiete auf den Gesamtabfluss im Untersuchungsgebiet. Die starke Variabilität der Niederschlagsverteilung und der Verdunstungsgrößen zeigt Auswirkungen auf die Zusammensetzung des Gesamtabflusses. Aus Abbildung 4.23 wird der enorme Einfluss des Brugga-Einzugsgebietes auf das Dreisam-Einzugsgebiet ersichtlich. Das Teileinzugsgebiet, das nur ca. 16 % der Gesamtfläche einnimmt, trägt mit durchschnittlich mehr als 20 % zum Gesamtabfluss bei. Dies gilt auch in geringerem Maße für den Zastlerbach und den Rotbach. Aufgrund des geringeren Niederschlages und der höheren Verdunstung in den mehr südexponierten Einzugsgebieten Eschbach und Ibentalbach nimmt hier der prozentuale Anteil am Abfluss gegenüber dem Flächenanteil ab. Der Einfluss des Zartener Beckens auf den Gesamtabfluss ist dagegen äußerst gering. Niederschlag im Zartener Becken wird kaum abflusswirksam, sondern trägt zur Grundwasserneubildung bei, bzw. verdunstet. Dies unterstreicht die herausragende Bedeutung einzelner Teileinzugsgebiete auf den Wasserhaushalt des Gesamtuntersuchungsgebietes. Im Umkehrschluss lässt sich jedoch auch feststellen, dass in diesen Einzugsgebieten Maßnahmen, die zur Veränderung der Wasserbilanz der Teileinzugsgebiete führen (z.B. Landnutzungsänderungen) enormen Einfluss auf das Gesamtuntersuchungsgebiet haben.



Abb. 4.23: Prozentuale Anteile des Teileinzugsgebietabflusses am Gesamtabfluss im Vergleich zur Teileinzugsgebietsfläche

#### 4.5.5 Fazit

Im Rahmen der Modellanwendung ermöglicht WaSiM-ETH die Berechnung und Ausgabe einer Vielzahl von Teilergebnissen in beliebiger zeitlicher, räumlich detaillierter oder zonaler Form. Im Postprocessing erfolgt die Ausgabe, weitere Aufbereitung und Bewertung dieser unterschiedlichsten Ergebnisse. Die Ergebnisse dieser Auswertungen unterstreichen die Leistungsfähigkeit des Modells.

Es wurden die Wasserhaushaltsbilanzen der bemessenen Teileinzugsgebiete und des Gesamtuntersuchungsgebietes für vier Hydrologische Jahre ermittelt. Neben der einzugsgebietsbezogenen Beurteilung konnte eine räumliche detaillierte Darstellung und Bewertung dieser Wasserhaushaltsbilanzen am Beispiel des Hydrologischen Jahres 1996 erfolgen. Es wurden insgesamt plausible Werte ermittelt, jedoch zeigte sich eine standortabhängige Überschätzung der Verdunstungsgrößen in südexponierten Lagen.

Ein Vergleich der Modellergebnisse mit tracerhydrologischen Untersuchungen ist nur beschränkt möglich, da WaSiM-ETH keine mit diesen Experimenten vergleichbare herkunftsbezogene Abtrennung der Abflusskomponenten vornimmt. Im Bodenmodul erfolgt eine Unterteilung in Abfluss aus der ungesättigten Zone und aus der gesättigten Zone. Deckschichten und Grundgebirge werden nicht separat betrachtet. Limitiert wird dieser Ansatz durch die eindimensionale, zellenweise Betrachtung der Abflusskomponenten. Eine Beurteilung der räumlich detaillierten Ausgabe der Abflusskomponenten wurde vorgenommen. Durch eine verbesserte Parametrisierung des Bodenmoduls im Rahmen einer Feinkalibrierung ließen sich noch weitere Ergebnisverbesserungen erreichen. Der zukünftigen Anwendung eines zweidimensionalen Grundwassermoduls kommt - falls der Anspruch eines möglichst physikalisch basierten Modells verwirklicht werden soll - eine besondere Bedeutung zu.

Im Vergleich mit Anwendungen konzeptioneller Modelle im Untersuchungsgebiet zeigte sich, dass WaSiM-ETH diesen konzeptionellen Modellen überlegen ist. Es konnten sehr gute statistische Gütemaße berechnet werden. Die Bedeutung einer differenzierten Betrachtung der statistischen Gütemaße der verschiedenen Modellergebnisse wurde erläutert, vor allem der Anwendungszeitraum der Modellierung und die zugrundeliegende Datenlage ist für die Bewertbarkeit des Modells von entscheidender Bedeutung.

Für die Wasserhaushaltsbilanzglieder wurden im Vergleich mit verschiedenen Modellanwendungen für das Hydrologische Jahr 1996 im Brugga-Einzugsgebiet plausible Werte ermittelt. Enorme Differenzen ergaben sich beim ermittelten Gebietsniederschlag. Hier zeigte sich der bedeutende Einfluss der - bei konzeptionellen Modellen modellextern ermittelten - Bilanzglieder Niederschlag und Verdunstung auf die Qualität der Wasserhaushaltbilanz und die Güte der Modellierung.

Bei WaSiM-ETH ergaben sich zwar Unsicherheiten in der räumlich detaillierten Ausgabe der Wasserbilanzglieder. Bei den verwendeten konzeptionellen Modellen sind diese Aussagen - schon durch das Modellkonzept bedingt - gar nicht möglich, so dass hier keine kritische Bewertung erfolgen kann.

Erstmals wurden in einer Modellierung im Dreisam-Einzugsgebiet einzugsgebietsbezogene und flächendetaillierte Aussagen und Ergebnisse für alle Teileinzugsgebiete des Untersuchungsgebietes ermittelt. Der besondere Einfluss des Brugga-Einzugsgebietes auf den Wasserhaushalt des Gesamtuntersuchungsgebietes konnte durch die Modellierung nachgewiesen werden.

## 5 Modellanalyse und Modellbewertung

## 5.1 Übersicht

Bei der Modellierung hydrologischer Prozesse bestehen nach NEMEC (1993) enge Wechselwirkungen zwischen

- der Zielsetzung der Modellierung und der gewünschten Genauigkeit der Modellergebnisse
- dem ausgewählten Typ des hydrologischen Modells
- der zeitlichen und räumlichen Auflösung

Je höher die Genauigkeitsanforderungen an die Modellergebnisse sind, desto detaillierter müssen die hydrologischen Abläufe im Modell vertikal und horizontal nachgebildet werden (GURTZ ET AL., 1997). Gemäß den Zielsetzungen dieser Arbeit sollte eine räumlich und zeitlich hochaufgelöste Modellierung erfolgen, die den Anspruch einer - unter Berücksichtigung der Datengrundlage - größtmöglichen Genauigkeit der Modellergebnisse erfüllt. Das Modell (WaSiM-ETH) war in der Zielsetzung vorgegeben.

Nach der Modellanwendung muss eine kritische Bewertung des Modells und seiner Anwendbarkeit unter den im Untersuchungsgebiet vorliegenden Rahmenbedingungen (Skale, Datengrundlage etc.) erfolgen, besonderes Augenmerk gilt der Nachbildung hydrologischer Prozesse. Aufgrund des modularen Aufbaus können neben einer Gesamtbewertung auch die einzelnen Module beurteilt werden.

## 5.2 Räumliche Interpolation der Eingangsdaten

Beim IDW-Verfahren ist eine Station repräsentativ für die nähere Umgebung, mit zunehmender Entfernung nimmt der Einfluss der Station ab. Diese Interpolation kann für räumlich wenig variable Größen wie die Sonnenscheindauer und die Globalstrahlung befriedigende Werte liefern, jedoch für räumlich sehr variable Größen wie z.B. dem Niederschlag ist mit großen Abweichungen zu rechnen. So zeigte der Vergleich zwischen zwei temporär betriebenen Messstationen (Gefällmatte, Kloster) mit dem auf diese Rasterpunkte interpolierten Niederschlag nur geringe Übereinstimmungen. Zwar wurde der Beginn und das Ende der Ereignisse erfasst, die Niederschlagsmengen und Intensitäten wichen jedoch stark voneinander ab. Zyklonale Niederschlagsereignisse wurden generell besser erfasst als konvektive Niederschlagsreeignisse. Die Qualität der Ergebnisse hängt also bei der räumlichen Interpolation – unabhängig vom Interpolationsverfahren - entscheidend von der Messnetzdichte im Untersuchungsgebiet ab.

### 5.3 Niederschlagskorrektur

Die Niederschlagskorrektur erfolgt anhand einer Grenztemperatur Regen/Schnee und der Windgeschwindigkeit und ist somit von der Qualität der räumlichen Interpolation der Temperatur und der Windgeschwindigkeiten abhängig. Ein Vergleich der zonalen prozentualen Korrekturfaktoren zeigt jedoch, dass diese nicht bedeutend von den von RICHTER (1995) vorgeschlagenen Korrekturfaktoren abweichen. Die Stationen werden dort in mäßig geschützte Stationen (< 700 m) mit einem durchschnittlichen jährlichen Korrekturfaktor von 9,1 % und freie Stationen der Gipfelregionen (>700 m) mit einem durchschnittlichen jährlichen Korrekturfaktor von 20,2 % unterteilt. Auch ein jahreszeitlicher Vergleich bestätigt diese Übereinstimmung. Das Modul liefert also Ergebnisse, die den regionalen Empfehlungen des DWD gleichwertig sind (Abb. 5.1), wobei jedoch die Hauptfaktoren, die für die Höhe der Niederschlagskorrektur ausschlaggebend sind (die Deformation des Windfeldes und die starke Abweichung der Korrekturfaktoren bei Schnee oder Regen) direkt im Modul berücksichtigt werden können.



Abb. 5.1: Ergebnis der Niederschlagskorrektur bei zonaler Betrachungsweise
## 5.4 Der Verdunstungskomplex

Die Berechnung der potentiellen Verdunstung erfolgt nach Penman-Monteith. Dieses Verfahren gilt als physikalisch basiert. Die Parameterbereitstellung gestaltet sich jedoch bei diesem Verfahren als problematisch. Das Verdunstungsmodul von WaSiM-ETH orientiert sich hierfür am MORECS-Modell (THOMPSON ET AL., 1981). In Tabelle 4.8 sind die benötigten Parameter und im Anhang Tab. B.3 die verwendeten Werte für die einzelnen Landnutzungen dargestellt. Das Modul verfügt über keinen echten Kalibrierparameter. Alle Eingangsparameter sind - zumindest theoretisch - messbar. In der Praxis waren jedoch Messdaten im Untersuchungsgebiet zu keinem der Parameter verfügbar, so dass hier bei der Parametrisierung insgesamt auf Literaturdaten zurückgegriffen werden musste. Vor allem reagierte der schwer zu bestimmende Oberflächenwiderstand r<sub>sc</sub> sensitiv auf die errechnete Verdunstung. Jedoch variieren gerade bei den Oberflächenwiderständen für einzelne Landnutzungen die verfügbaren Literaturangaben (SCHULLA & JASPER, 1999; JACOBS ET AL., 1989 etc.) enorm, so dass hier eine Kalibrierung erfolgte. Im Rahmen der "multiple-response-validation" wurden gute Übereinstimmungen der simulierten mit der gemessenen Verdunstung für ausgesuchte Strahlungstage erreicht (Kapitel 4.4.4). Dasselbe gilt auch für die WaSiM-ETH Anwendung im Rietholzbach. Hier standen Lysimetermessungen als Vergleichsdaten zur Verfügung (SCHULLA, 1997). Das Verdunstungsmodell weist also keine konzeptionellen Schwächen auf, unterliegt jedoch einer komplexen Parametrisierung, bei der sich aufgrund der Unsicherheit in der Parametrisierung unplausible Werte ergeben können (z.B. hohe ETP der Landnutzung Acker im Untersuchungsgebiet).

Die aktuelle Verdunstung wird anhand der Saugspannung des Bodens gegenüber der potentiellen Verdunstung reduziert. Diese Reduktion errechnet sich nach Formel 3.22. Es findet hier eine Koppelung des Verdunstungsmoduls mit dem Bodenmodul auf der Grundlage der Richardsgleichung statt. Die Parametrisierung des Bodenmoduls und der van Genuchten-Gleichung besitzt daher einen Einfluss auf die reale Verdunstung. Ob jedoch die Berücksichtigung des verdunstungsreduzierenden Einflusses von anaeroben Bodenverhältnissen in die Modellierung eingehen sollte, bleibt dahingestellt.

Getrennt von der realen Verdunstung wird die Interzeptionsverdunstung ermittelt. Der Interzeptionsspeicher wird über die gesamte Fläche gleichmäßig durch die potentielle Verdunstung geleert. Im Modell hat die Höhe des Intezeptionsspeichers kaum Einfluss auf die Gesamtverdunstung, d.h. bei starker Reduktion der Interzeptionsverdunstung (durch Kalibrierung der maximalen Schichtdicke h<sub>SH</sub>) erhöht sich die aktuelle Verdunstung. Das Interzeptionsmodell stellt ein sehr einfaches Modellkonzept dar. Unter natürlichen Bedingungen bildet das interzipierte Wasser keinen Film, sondern Tropfen. Eine Verdunstung findet dort nicht mit potentieller Intensität statt. In GURTZ ET AL. (1997) finden sich Vorschläge für eine physikalisch basiertere Modellierung des Interzeptionsspeichers. Das hier verwendete Modul ist als konzeptionell einzustufen.

### 5.5 Das Schneemodul

Mit der Verwendung des Kombinierten Verfahrens nach ANDERSON (1973) kommt eine Methode zur Anwendung, die in der Lage ist, eine Vielzahl der Prozesse zu berücksichtigen, die Einfluss auf die Schneeschmelze nehmen (Kapitel 3.2.5.2). Der Vergleich mit gemessenen Schneehöhen erbrachte gute Ergebnisse (Kapitel 4.4.4.1). Ob jedoch das Verfahren gegenüber dem klassischen Temperatur-Index-Verfahren eine Ergebnisverbesserung erzielt, hätte nur durch den direkten Vergleich beider Verfahren festgestellt werden können. Dies hätte eine weitere Gesamtkalibrierung des Modells erfordert, hierzu fehlte im Rahmen dieser Arbeit die Rechnerzeit. Im Schneemodell werden physikalisch basierte Parameter verwendet, diese müssen jedoch im Rahmen plausibler Grenzen kalibriert werden. Die Werte des ermittelten Parametersatzes für das Gesamtuntersuchungsgebiet (Tab. 4.9) unterscheiden sich nicht deutlich von den Ergebnissen von UHLENBROOK (1999). Der zu schnelle Rückgang des Abflusses am Ende der Schneeschmelzperiode in Talbach und Zastler zeigt jedoch, dass die Parametrisierung noch verbessert werden kann. Dies kann jedoch auch im Rahmen einer verbesserten Strahlungs- und Temperaturkorrektur oder bei der Korrektur des festen Niederschlags erfolgen und zeigt wiederum die starken Interaktionen in WaSiM-ETH.

## **5.6 Das Infiltrationsmodul**

Zur Modellierung der Infiltration wurde die Vorgehensweise nach PESCHKE (1977) gewählt, der einen homogenen ungeschichten Boden annimmt, in dem der Matrixfluss gegenüber dem Makroporenfluss dominiert. Dies stellt für das Untersuchungsgebiet eine bedeutende Verallgemeinerung dar. Der Aufbau der Hangschuttdecken im Untersuchungsgebiet mit seiner vertikalschematischen Untergliederung in die einzelnen Folgen der Deckschichten (REHFUESS, 1990) zeichnet sich jedoch durch eine extreme Variabilität der bodenphysikalischen Kennwerte aus. In Makroporen ist ein schneller Wassertransport im Boden möglich. Im Untersuchungsgebiet konnte in Böden mit Makroporen Fließgeschwindigkeiten im cm/s Bereich festgestellt werden (MEHLHORN, 1998). Es ist davon auszugehen, dass Ereigniswasser über die Makroporen stark zur Hochwasserbildung beiträgt (UHLENBROOK, 1999). Aufgrund der Nichtberücksichtigung von Makroporen im Modell erfolgt deshalb bei der Parametrisierung die Berücksichtigung einer mittleren gesättigten hydraulischen Leitfähigkeit, um plausible Infiltrationsmengen zu erhalten.

# 5.7 Der Boden- und Abflussbildungskomplex

Das Bodenmodul ist das zentrale Modul jedes Niederschlags-Abfluss-Modells (Kapitel 3.2.8). Mit der Verwendung der eindimensionalen Richardsgleichung wurde ein sehr komplexes Verfahren gewählt, das den vertikalen Wassertransport in der ungesättigten Zone physikalisch basiert darstellt. Aufgrund der Eindimensionalität des verwendeten Algorithmus kann kein zellenübergreifender Fluss von Bodenwasser erfolgen. Lateraler Transport in der gesättigten Zone kann daher nur die Verwendung eines mindestens zweidimensionalen Grundwassermodells leisten. Lateraler Transport in der ungesättigten Zone ist nur unter der Verwendung der dreidimensionalen Richardsgleichung möglich. Dies zu modellieren würde jedoch enormen Programmieraufwand und große Rechenkapazitäten erfordern. Ob sich dadurch eine Ergebnisverbesserung im Hinblick auf die Abflusssimulation - erzielen ließe, ist jedoch aufgrund des Mehrbedarfs an Bodendaten und dem sich ergebenden Parametrisierungsproblem fraglich. Deshalb wurde auf die Verwendung der dreidimensionalen Richardsgleichung bei der Modellentwicklung von Wa-SiM-ETH verzichtet (SCHULLA & JASPER, 1999).

Da nur der vertikale Wasserfluss physikalisch basiert modelliert wird, müssen vereinfachende Annahmen getroffen werden, um den lateralen Transport des Wasserflusses der einzelnen Abflusskomponenten zu berücksichtigen.

Interflow wird nach Formel 3.38 und 3.39 gebildet. Neben physikalisch basierten Parametern geht hier der Kalibrierparameter der Drainagedichte  $d_r$  ein. Die Drainagedichte berücksichtigt als Sammelparameter die eigentliche Flussdichte und die Anisotrophie zwischen lateraler und vertikaler Leitfähigkeit. Der Parameter wirkt linear auf die berechnete Menge des Interflows. Die Modellkonzeption beruht auf der Annahme, dass alle Zellen Anschluss an das Gewässernetz haben. Bei der Verwendung von kleineren Gridzellen erfolgt eine Skalierung des Interflows über die Drainagedichte. Dieser Kalibrierparameter hat sich in der Modellanwendung - auch aufgrund der Interaktion mit dem Basis- und Direktabfluss - als hoch sensitiv gezeigt. Zwar ist die Verwendung eines Kalibrierparameters bei dieser Modellkonzeption zwingend notwendig, problematisch ist jedoch der Bezug des Parameters auf das (Teil-)Einzugsgebiet, obwohl lateraler Transport in hohem Maße durch die Bodenart bestimmt wird.

Die Parametrisierung der Wasserspannung-Wassergehalts-Beziehung erfolgt für jede Bodenart auf Grundlage der Van Genuchten Gleichung (Formel 3.34) für den gesamten Bodenmonolithen. In Laborexperimenten erfolgten die Bestimmung der Van Genuchten Parameter jedoch für einzelne Bodenhorizonte (BOHNE ET AL., 1993). Dadurch wird es notwendig eine mittlere Parametrisierung vorzunehmen. WaSiM-ETH stellt zwar die Möglichkeit zur Verfügung, die Wasserspannung-Wassergehalts-Beziehung individuell, tiefenorientiert in Tabellenform zu parametrisieren. Jedoch werden Messreihen in Untersuchungsgebieten der Mesoskale selten zur Verfügung stehen, so dass in den meisten Modellanwendungen der Mesoskale auf die Van Genuchten Gleichung zurückgegriffen werden muß.

Bodenwassergehalte (residual und maximal) werden für den gesamten Bodenmonolithen parametrisiert. Dieses Bodenwasser wird mit zunehmender Tiefe immobiler, da die gesättigte hydraulische Leitfähigkeit nach Formel 3.37 abnimmt (gesteuert durch eine kalibrierbare Rezessionskonstante  $k_{rec}$ ). Die Verhältnisse im Boden gestalten sich jedoch vielfältiger, wobei eine Parametrisierung mangels Daten großräumig kaum möglich ist.

Basiabfluss wird - ohne Betrieb des Grundwassermoduls - über ein Einzellinearspeicherkonzept in Abhängigkeit vom berechneten Grundwasserspiegel ermittelt, d.h. Basisabfluss unterliegt der Kalibrierung, wobei die Parametrisierung stark mit der Drainagedichte interagiert. Insgesamt lässt sich daher feststellen, dass die Anteile der Abflusskomponenten kalibrierbar sind.

Mit dieser Modellkonzeption können Vorstellungen der Abflussbildung, die im Rahmen von Felduntersuchungen und tracerhydrologischen Arbeiten ermittelt wurden, nicht verifiziert werden. Die vereinfachende Annahme der Einteilung des Untersuchungsgebietes in rund 8000 Bodenmonolithe (bei Verwendung des 200 m Rasters), die ihre Abflusskomponenten direkt in das nächste Gewässer überführen, gibt die realen Verhältnisse im Untersuchungsgebiet nur beschränkt wieder. Der Fluss zum Gewässer wird also nicht physikalisch basiert modelliert sondern unterliegt - wie bei konzeptionellen Modellen - einer Kalibrierung. Aufgrund dieser nur eindimensional physikalisch basierten Betrachtungsweise ist es mit diesem Modell ohne Verwendung des Grundwassermoduls nicht möglich Prozesse, wie Groundwater Ridging und Piston Flow zu modellieren.

Im Zartener Becken ist der Prozess der linienhaften Infiltration aus Oberflächengewässern ins Grundwasser von enormer Bedeutung für die Simulation der Niedrigwasser- und Mittelwasserabflüsse. Die Berücksichtigung der linienhaften Infiltration ist jedoch nur bei Betrieb des Grundwassermoduls möglich. Deshalb kommt es im Zartener Becken zur Überschätzung der simulierten Abflüsse.

Trotzdem muss festgestellt werden, dass bei der Modellierung in Untersuchungsgebieten der oberen Mesoskale WaSiM-ETH das physikalisch basierteste Bodenmodul verwendet. Unter Beachtung der vereinfachenden Annahmen weist das Modul nur geringe konzeptionelle Schwächen auf.

# 5.8 Abflusskonzentration und Abflussrouting

Grundlage für die Berechnung der Abflusskonzentration und des Abflussroutings ist die Fließzeitentabelle, die auf Grundlage der Formel 3.41 für die verschiedenen Abflüsse berechnet wird. Jedoch können die Parameter zur Berechnung der Fließgeschwindigkeit, insbesondere der hydraulischen Rauhigkeit, das abschnittsweise Gefälle und die Gerinnebreiten für die Flussabschnitte meist nur geschätzt werden. Gerinneprofile außerhalb des Zartener Beckens sind nicht vorhanden. Bisher liegen im Untersuchungsgebiet nur wenige Fließzeitenermittlungen für einzelne Gewässerabschnitte bei verschiedenen Abflüssen vor. Eine Überprüfung der Modellierungsergebnisse konnte deshalb nur anhand LINDENLAUB (1998) erfolgen. Da es jedoch an den Pegeln im Untersuchungsgebiet zu keinen systematischen Verschiebungen der Gütemaße kam, kann davon ausgegangen werden, dass das Modell im Bereich der Abflusskonzentration und des Abflussroutings befriedigende Ergebnisse liefert. Für eine umfassende Bewertung des Moduls wären jedoch Fliesszeitenbestimmungen bei verschiedenen Abflüssen notwendig.

# 5.9 Modellhandhabung und operationeller Einsatz

Die Erstanwendung verlangt vom Nutzer ohne Modelliererfahrung eine zeitintensive Einarbeitung. KLEEBERG (1998) betont im Hinblick auf eine Modellanwendung, dass wegen des Komplexitäts- und Schwierigkeitsgrades der abzubildenden Prozesse das Modellsystem nicht von einem "naiven" Nutzer bedient werden kann. Daneben muss aufgrund der Modellierung mit stündlichem Zeitschritt eine umfassende Datenaufbereitung erfolgen. Bei der Datenaufbereitung über mehrere Jahre sollte versucht werden, diese so weit wie möglich zu automatisieren. Eine manuelle Datenaufbereitung stößt hier schnell an die Grenzen des Möglichen.

WaSiM-ETH stellt keine graphische Benutzeroberfläche zur Verfügung. Die Parametrisierung des Modells erfolgt modular über eine fünfzehnseitige Steuerdatei. Die Flexibilität des Modells hinsichtlich seiner Anwendung erschwert die Parametrisierung ungemein, da alle möglichen Modellvarianten mit derselben Steuerdatei parametrisiert werden und die Struktur der Steuerdatei unbedingt erhalten bleiben muss, da es sonst zu Fehlern in der Modellanwendung kommt. Ohne eine lauffähige Steuerdatei aus einer anderen Modellanwendung ist das Modell kaum zu parametrisieren.

Das Modell stellt keine internen Kalibrierungshilfen zur Verfügung. Dies schränkt die Zahl der zu testenden Datensätze deutlich ein. Durch die Verwendung der Richardsgleichung im Bodenmodul erhöht sich die Rechenzeit ungemein. Eine Rasterweite von 200 m stellt die obere Grenze der räumlichen Auflösung dar, die in einem Untersuchungsgebiet von über 250 km<sup>2</sup> noch kalibrierbar ist. Bei einer Rasterweite von > 500 m geht jedoch bereits sehr viel Information über die Physiographie des Untersuchungsgebietes verloren, so dass aufgrund der Zielsetzung der Arbeit die langen Rechenzeiten zur Kalibrierung in kauf geommenn werden mussten.

Das Modell ermöglicht die Ausgabe einer Vielzahl von Ergebnissen in beliebiger zeitlicher und räumlich detaillierter oder zonaler Form. Um den Speicherplatzbedarf des Modells gering zu halten, erfolgen die Ergebnisausgaben in binärer Form. Grids müssen daher, bevor sie im GIS visualisiert werden können, mehrfach umformatiert werden. Hier wäre eine direkte Koppelung an ein GIS wünschenswert. Zeitreihenergebnisse müssen in ein Tabellenkalkulationsprogramm importiert werden. Zeitsparende modellinterne Verfahren der Visualisierung bietet WaSiM-ETH nicht an.

Positiv ist, dass das Modell in fast allen Einzugsgebieten angewendet werden kann. Aufgrund seiner enormen Flexibilität hinsichtlich des Datenanspruchs kann das Modell auch bei unbefriedigender Datenlage eingesetzt werden. Jedoch muß in diesem Fall auf weniger physikalisch basierte Algorithmen zurückgegriffen werden, die das Modell optional zur Verfügung stellt (z.B. Bodenmodul nach TOPMODEL Ansatz). Der minimale Datenbedarf zum Betrieb von WaSiM-ETH als konzeptionelles Modell besteht in einem Digitalen Höhenmodell, Temperaturzeitreihe und Niederschlagszeitreihe.

Modellerweiterungen und Verbesserungen wurden jedoch ungenügend dokumentiert, so dass es hier zu Problemen bei der Erstellung der Steuerdatei und bei der Modellanwendung kam.

## 5.10 Fazit

Mit WaSiM-ETH kam im Dreisam-Einzugsgebiet ein Modell zur Anwendung, das weitgehend physikalisch basierte Algorithmen verwendet. Es wurden im Untersuchungsgebiet und in den Teileinzugsgebieten gute Ergebnisse erzielt. Eine Kalibrierung des Modells ist jedoch trotzdem notwendig, da auch in WaSiM-ETH vereinfachende Annahmen im Vergleich zu den natürlichen Verhältnissen getroffen wurden. Die Verwendung der eindimensionalen Richardsgleichung modelliert die vertikalen Wasserflüsse im Boden physikalisch basiert, laterale Wasserflüsse unterliegen jedoch weitgehend einer Kalibrierung, da ein zellenübergreifender Wasserflüss nicht möglich ist. Jedoch erscheint die dreidimensionale Modellierung der gesättigten und ungesättigten Wasserflüsse in einem Untersuchungsgebiet der oberen Mesoskale aufgrund des enormen Programmieraufwandes und der zu erwartenden Modelllaufzeit nicht erfolgsversprechend - auch ohne Berücksichtigung des Problems der Datenbeschaffung für ein solches Modell. Die Koppelung des zweidimensionalen Grundwassermoduls mit WaSiM-ETH könnte jedoch Ergebnisverbesserungen im Bereich einer physikalisch basierteren Betrachtung der Abflussbildung ergeben, bei einer noch vertretbaren Verlängerung der Rechenzeit. Das Modell ist äußerst flexibel in seiner Anwendung. Eine Anwendung in einer konzeptionellen Minimalversion kann auch bei unbefriedigender Eingangsdatenlage erfolgen. Jedoch setzt die Anwendung eine enorme Einarbeitungszeit voraus. Wurde das Modell auf ein Einzugsgebiet kalibriert, bietet es jedoch eine Vielzahl von Möglichkeiten der Ergebnisausgabe, so dass neben einer Ergebnisbewertung auf Einzugsgebietsebene auch eine flächendetaillierte Betrachtungsweise möglich ist. Hier ist WaSiM-ETH den meisten konzeptionellen Modellen überlegen.

Aufgrund der hohen physikalischen Basiertheit von WaSiM-ETH ermöglicht eine Modellanwendung nach erfolgreicher Kalibrierung und Validierung die Durchführung von Szenarien unterschiedlichster Art. Grundsätzlich sind Landnutzungsänderungs- und Klimaszenarien denkbar. Im Rahmen dieser Diplomarbeit konnte dieser Aspekt von WaSiM-ETH aus Zeitgründen nicht bearbeitet werden. Dies ist jedoch jedem Fall wünschenswert. Die Ergebnisse sollten jedoch einer äusserst kritischen Bewertung unterzogen werden.

# 6 Schlussfolgerung und Ausblick

Die Anwendung des weitgehend physikalisch basierten Wasserhaushalts- und Simulationsmodells WaSiM-ETH führte im Dreisam-Einzugsgebiet und den Teileinzugsgebieten zu guten Simulationsergebnissen. Besonders bei teileinzugsgebietsbezogener Betrachtungsweise wurden im Untersuchungsgebiet gute Ergebnisse erzielt.

Die ermittelten Wasserbilanzen des Dreisameinzugsgebietes und der Teileinzugsgebiete weisen für die Hydrologischen Jahre 1996-1999 plausible Größenordnungen für alle Bilanzglieder auf. Dies zeigt sich auch in den ermittelten Reaktionen der Speicherfüllungen mit Speicherreduktionen in trockeneren Jahren und Speichererhöhungen in feuchteren Jahren. Es wurden gute Übereinstimmungen der simulierten mit den gemessenen Abflussganglinien erzielt. Scheitelabflüsse wurden jedoch systematisch unterschätzt. Gemessene Abflüsse der Brugga im Jahr 1997 müssen einer Überprüfung unterzogen werden.

Die flächendetaillierte Betrachtung der Wasserbilanzgrößen im Untersuchungsgebiet ergibt ein differenzierteres Bild. Die Niederschlagsverteilung wird aufgrund der relativ hohen Stationsdichte mit dem IDW-Verfahren befriedigend wiedergegeben. Die Verdunstungsgrößen weisen eine enorme (klein)räumige Variabilität auf. Eine zellenweise Verdunstung von über 1100 mm/a erscheint jedoch nicht plausibel. Die Gründe hierfür sind in der komplexen Parametrisierung des Modells zu finden.

Die "multiple-response-validation" hat sich als taugliches Hilfsmittel für eine weitergehende Modellbewertung erwiesen.

Das Modell verfügt über eine relativ geringe Anzahl von hochsensitiven Kalibrierparametern. Die Gesamtzahl der Kalibrierparameter (Tab. 4.5 - 4.14) ist abhängig von der Anzahl der ausgewiesenen Teileinzugsgebiete und der Anzahl der Bodenarten. Die Trennung des Abflusses in die einzelnen Abflusskomponenten wird stark durch den Kalibrierparameter der Drainagedichte gesteuert. Zusätzlich wird für die Modellanwendung eine sehr große Anzahl von Literaturdaten herangezogen. Es zeigt sich, dass diese Literaturdaten - gerade bei schwer zu messenden Parametern wie dem minimalen atmosphärischen Widerstand für einzelne Landnutzungen - stark voneinander abweichen, so dass in diesem Rahmen auch eine Feinkalibrierung möglich ist.

Ein direkter Vergleich der simulierten Abflusskomponenten mit den Ergebnissen aus tracerhydrologischen Untersuchungen ist nur bedingt möglich. WaSiM-ETH unterscheidet Abflusskomponenten nach der Herkunft aus der gesättigten oder ungesättigten Zone. Mit tracerhydrologischen Untersuchungen erfolgt dagegen eine herkunftsbezogene Separation in oberflächennahes Hangwasser, das den Deckschichten entstammt, und tiefes Grundwasser aus dem Grundgebirge.

WaSiM-ETH stellte sich als nicht sehr benutzerfreundlich heraus. Es werden modellintern keine automatisierten Kalibrierhilfen zur Verfügung gestellt. Deshalb kam ein einfaches "trial-anderror-Verfahren" zur Verwendung. Dies reduzierte die Anzahl der möglichen Simulationsläufe. Eine Sensitivitätsanalyse konnte deshalb nur qualitativ im Rahmen der Modellkalibrierung erfolgen.

Die Modellanwendung ergab, dass die gewählte zeitliche und räumliche Auflösung die Grenze des zur Zeit mit herkömmlichen Rechnersystemen Anwendbaren darstellt. Der Bedarf an Rechenzeit stellt hier den limitierenden Faktor dar. Jedoch ist auch im Hinblick auf die Genauigkeit der Eingangsdaten eine höhere räumliche Auflösung für Modellanwendungen in der oberen Mesoskale nicht sinnvoll. Besonders der Mangel an hochaufgelösten Bodenkarten wirkt limitierend auf die Modellanwendung. Die in der Datenaufbereitung gewählten Verfahren zu Aggregierung und Dissaggregierung der Eingangsdaten haben sich im Untersuchungsgebiet als anwendbar erwiesen.

Durch die umfangreiche Datenbeschaffung und Datenaufbereitung von mehreren Hydrologischen Jahren wurde für das Untersuchungsgebiet ein Datensatz geschaffen, der als Grundlage für weitere Modellanwendungen dienen kann. Die Aufbereitung der vielfältigen Rohdaten und Überführung in ein einheitliches ASCII-Format bedeutet eine enorme Arbeitserleichterung für zukünftige Modellanwendungen.

Auf die enorme Bedeutung des Grundwassermoduls für eine verbesserte prozessorientere Modellierung im Untersuchungsgebiet wurde hingewiesen. Nur so können laterale Prozesse physikalisch basierter modelliert werden. Der Prozess der linienhaften Infiltration durch das Gewässernetz im Zartener Becken ist nur bei Betrieb des Grundwassermoduls zu simulieren. Hierzu sind jedoch noch die aufgetretenen Probleme im Betrieb des Moduls und der fehlenden flächendeckenden Eingangsdaten zu lösen.

Eine weitere Aufbereitung der Daten zur Fortführung des Modells erscheint sinnvoll, vor allem auch im Hinblick auf weitere experimentelle Untersuchungen in den nördlichen Einzugsgebieten (u.a. Eschbach), die mit WaSiM-ETH Ergebnissen ergänzt bzw. verglichen werden könnten. Eine verfeinerte Kalibrierung des Bodenmoduls auf der Grundlage der modifizierten BÜK 200 kann zur weiteren Ergebnisverbesserung beitragen. Die Möglichkeiten der Ergebnisausgabe konnten im Rahmen dieser Diplomarbeit nicht alle ausgeschöpft werden. Auch die Berechnung von Landnutzungsänderungs- und Klimaszenarien sollten in weiteren Modellanwendungen durchgeführt und einer kritischen Bewertung unterzogen werden.

## Literaturverzeichnis

- ALBERS, H. (1998): Berechnung der Grundwasserneubildung aus Niederschlag für die Wasserwerke Ebnet und Hausen. Diplomarbeit (unveröffentlicht). Universität Freiburg. Institut für Hydrologie.
- ANDERSON, E.A. (1973): National Weather Service river forecast system snow accumulation and ablation model. National Oceanographic and Atmospheric Administration (NOAA), Tech. Mem., NWS-HYDRO-17, U.S. Department of Commerce, Silver Spring, 217 S.
- ARMBRUSTER, M. (1998): Zeitliche Dynamik der Wasser- und Elementflüsse in Waldökosystemen. Dissertation. Freiburger bodenkundliche Abhandlungen Heft 38, 301 S.
- BECKER, A. (1992): Methodische Aspekte der Regionalisierung. Mitteilung Nr. XI der Senatskommission f
  ür Wasserforschung, Regionalisierung in der Hydrologie, Deutsche Forschungsgemeinschaft, S. 16-32.
- BEVEN, K. J. (1989): Changing ideas in hydrology the case of physically-based models. Journal of Hydrology. 105, S.157-172.
- BOHNE, K., HORN, R., BAUMGARTL, T. (1993): Bereitstellung von van Genuchten Parametern zur Charakterisierung der hydraulischen Bodeneigenschaften. Z. Pflanzenernähr. Bodenk. 156, S. 229-233.
- BOLD, S. (2000): Instationäre Grundwassermodellierung des Zartener Beckens. Diplomarbeit (unveröffentlicht). Universität Freiburg. Institut für Hydrologie.
- BRAUN, L. N. (1985): Simulation of snowmelt-runoff in lowland and lower alpine regions of Switzerland. Zürcher Geographische Schriften, ETH Zürich, 21, 166 S.
- BREMICKER, M. (1998): Aufbau eines Wasserhaushaltsmodells für das Weser- und Ostsee-Einzugsgebiet als Baustein eines Atmosphären-Hydrologie-Modells. Dissertation. Universität Freiburg. Institut für Hydrologie.
- BRUTSAERT, W. (1982): Evaporation into the atmosphere. Kluwer Academic Publishers, Dordrecht.

- DEUTSCHER WETTERDIENST (1999): Umrechnung von Windstärke in Windgeschwindigkeit. http://www.dwd.de.
- DFG-PROJEKT (1999): Tracerhydrologisch gestützte Bestimmung und Modellierung von Abflußkomponenten im mesoskaligen Bereich. Bericht 94, Le 698/8-3 (unveröffentlicht). Universität Freiburg. Institut für Hydrologie.
- DIEKKRÜGER, B. (1999): Skalenwechsel über Parameter Bodenwasser. Forschungsbericht: Hydrologie und Regionalisierung, Ergebnisse eines Schwerpunktprogramms (1992-1998), Deutsche Forschungsgemeinschaft. S. 54-68.
- DYCK, S. & PESCHKE, G. (1995): Grundlagen der Hydrologie. Verlag für Bauwesen, Berlin. 536 S.
- ESRI, (1997): Understanding GIS The ARC/INFO Method. Geoinformation International, Cambridge, United Kingdom.
- FEGER, K.-H. (1993): Bedeutung von ökosysteminternen Umsätzen und Nutzungseingriffen für den Stoffhaushalt von Waldlandschaften. Dissertation, Freiburger bodenkundliche Abhandlungen, Heft 31, 237 S.
- FEW/GLA (1990): Stand der Arbeiten im Einzugsbereich des Wasserwerks Ebnet der Freiburger Energie- und Wasserversorgung-AG. -unveröffentlichter Zwischenbericht-, Freiburg, 142 S.
- FEZER, F. (1957): Eiszeitliche Erscheinungen im nördlichen Schwarzwald, II. periglaziale Erscheinungen. Forschungen zur deutschen Landeskunde, Bd. 87, S. 57-86, Bundesanstalt für Landeskunde, Remagen (Rhein).
- FREY, M. (1999): Tracerhydrologische Untersuchungen im Brugga-Einzugsgebiet: Gase, Silikate uns stabile Isotope. Diplomarbeit (unveröffentlicht). Universität Freiburg. Institut f
  ür Hydrologie.
- FRIEG, B. (1987): Hydrogeologie und Grundwasserhydraulik des Einzugsgebietes des Wasserwerks Freiburg-Ebnet. -Inaugurial-Dissertation zur Erlangung der Doktorwürde der Naturwissenschaftlich-Mathematischen Gesamtfakultät der Ruprecht-Karls-Universität, Heidelberg, 143 S.

- FRITSCH, J. (1998): Energiebilanz und Verdunstung eines bewaldeten Hanges im Hochschwarzwald. Dissertation. Berichte des Meteorologischen Institutes der Universität Freiburg Nr. 1. 148 S.
- FVA (1994): Erläuterungen zu den Standortkarten des Forstbezirks Kirchzarten. Forstliche Versuchsanstalt Freiburg, Abteilung Botanik und Standortskunde.
- GEOLOGISCHES LANDESAMT BADEN-WÜRTTEMBERG & LANDESVERMESSUNGSAMT BADEN-WÜRTTEMBERG (1981): Erläuterungen zur Geologischen Karte Freiburg i.Br. und Umgebung 1.50000, Stuttgart.
- GEOLOGISCHES LANDESAMT BADEN-WÜRTTEMBERG (1992-1995): Digitale Bodenübersichtskarte 1:200.000, Freiburg i. Br.
- GERMANN, P. (1976): Wasserhaushalt und Elektrolytverlagerung in einem mit Wald und einem mit Wiese bestockten Boden in ebener Lage. Mit. schweiz. Anst. forstl. Versuchswesen. 52, S. 163-309.
- GREEN, W. H. & AMPT, G. A. (1911): Studies on on Soil Physics: I. The flow of air and water through soils, Journal of Agricultural Sciences, 4, S.1-24.
- GÜNTNER, A. (1997): Anwendung des Niederschlags-Abfluß-Modells TOPMODEL im Brugga-Einzugsgebiet. Diplomarbeit (unveröffentlicht). Universität Freiburg. Institut für Hydrologie.
- GURTZ, J., BALTENWEILER, A., LANG, H. ,MENZEL, L., SCHULLA, J. (1997): Auswirkungen von klimatischen Variationen auf Wasserhaushalt und Abfluss im Flussgebiet des Rheins. Schlußbericht NFP 31, VDF Hochschulverlag ETH Zürich. 147 S.
- HÄCKEL, H. (1999): Meteorologie. UTB, Stuttgart, 448 S.
- HÄDRICH, F. & STAHR, K. (1992): Die Böden in der Umgebung von Freiburg i. Br., in: Schwarzwald und Oberrheintiefland - Eine Einführung in das Exkursionsgebiet um Freiburg im Breisgau. Freiburger Geographische Hefte, Heft 36, S. 129-195.
- HÄDRICH, F., MOLL, W., STAHR, K. (1979): Bodenkarte des Landkreises Breisgau-Hochschwarzwald und des Stadtkreises Freiburg i. Br., Breisgau-Hochschwarzwald, Schillinger Verlag, Freiburg.

- HANGEN, E. (1997): Tracerhydrologische Untersuchung zur Abflußbildung im Conventwald-Einzugsgebiet. Diplomarbeit (unveröffentlicht). Universität Freiburg. Institut für Hydrologie.
- HERDEG, U. (1993): Untersuchungen zu den Grundwasserfließsystemen im Bereich der Wasserwerke von Freiburg i. Br. auf der Grundlage isotopenhydrologischer und geologischer Daten. Dissertation (unveröffentlicht). Universität Freiburg.
- HOEG, S. (1998): Abflußkomponenten am Zastlerbach. Diplomarbeit (unveröffentlicht). Universität Freiburg. Institut für Hydrologie.
- HOLOCHER, J. (1997): Anwendung des Niederschlags-Abfluß-Modells HBV an der Dreisam und verschieden skalierten Teileinzugsgebieten. Diplomarbeit (unveröffentlicht). Universität Freiburg. Institut für Hydrologie.
- JACOBS, A.F.G. HALBERSMA, J., PRZYBYLA, C.(1989): Behavivour of the crop resistance of maize during a growing season. IAHS-Pub. No. 177, S. 165-173.
- JASPER, K., LANG, H., GURTZ J. (1999): Hydrologische Modellierung des Lago-Maggiore-Einzugsgebietes (Tessin) unter Verwendung von Daten eines Wettervorhersagemodells. In Modellierung des Wasser- und Stofftransports in großen Einzugsgebieten. Kassel. University Press. S. 111-119.
- KIESE, R. (1999): Anwendung des Wasserhaushalts- und Gewässergütemodells NPSM im Brugga-Einzugsgebiet. Diplomarbeit (unveröffentlicht). Universität Freiburg. Institut für Hydrologie.
- KLEEBERG, H.-B. (1998): Kontinuierlicher Abfluß und Stofftransport Integrierte Modellierung unter Nutzung von Geoinformationssystemen - ASGi, Band 1, Theoretische Grundlagen, Neubiberg, 103 S.
- LANDESANSTALT FÜR UMWELTSCHUTZ (2000): Pegelstatistik und hydrologische Hauptzahlen der Pegel Brugga, Dreisam, Rotbach, Talbach, Zastler (unveröffentlicht).
- LEIBUNDGUT, C. (2000): Einmaliger Siegeszug. Wasser & Boden, 52, S. 3.

- LINDENLAUB, M. (1998): Abflußkomponenten und Herkunftsräume im Einzugsgebiet der Brugga: Aspekte zeitlicher und räumlicher Skalierung. Dissertation. Universität Freiburg. Institut für Hydrologie. 121 S.
- MEHLHORN, J. (1998): Tracerhydrologische Ansätze in der Niederschlags-Abfluß-Modellierung. Dissertation. Freiburger Schriften zur Hydrologie, Band 8, Universität Freiburg. Institut für Hydrologie. 148 S.
- MENZEL, L. (1997): Modellierung der Evapotranspiration im System Boden-Pflanze-Atmosphäre. Dissertation, Zürcher Geographische Schriften, Heft 67, ETH Zürich, Zürich, Schweiz. 128 S.
- MONTEITH, J. L. (1975): Vegetation and the atmosphere, Vol. 1: Principles. Academic Press, London.
- NASH, J. E., SUTCLIFFE, J. V. (1970): River flow forecasting throug conceptual models. Part I-A. Discussion of principles. Journal of Hydrology, 10. S. 282-290.
- NEMEC, J. (1993): Comparison and selection of existing hydrological models for the simulation for dynamic water balance processes in basins of different sizes and on different scales. International Commission of Hydrology of the river Rhine basin, CHR/KHR-Report No. II-7.
- OKE, T.R. (1987): Boundary Layer Climates, 2nd ed., Routledge, London and New York. 435 S.
- PARLOW, E. & ROSNER, H.-J. (1992): Das Klima des Oberrheingrabens. Freiburger Geographische Hefte. Heft 36, S. 111-125.
- PESCHKE, G. (1977): Ein zweistufiges Modell der Infiltration von Regen in geschichtete Böden. Acta hydrophysica, 22 (1), S. 39 - 48.
- PESCHKE, G. (1987): Soil Moisture and Runoff Components from a Physically Founded Approach. Acta hydrophysica, 31 (3/4), S. 191-205.
- REFSGAARD, J.C. & STROM, B. (1996): Construction, calibration and validation of hydrological models. In: Abbott, M.B. & Refsgaard, J.C.(1996): Distributed Hydrological Modelling. Kuwer Academic, Dordrecht, Niederlande, S. 41-54.

- REHFUESS, K. E. (1990): Waldböden, Entwicklung, Eigenschaften und Nutzung. Paul Parey Verlag, Hamburg.
- RENSCHLER ET AL. (1999): Regional Simulation in hydrology estimation errors due to different data pre-processing methods. In Modellierung des Wasser- und Stofftransports in großen Einzugsgebieten. Kassel. University Press. S. 173-180.
- RICHTER, D. (1995): Ergebnisse methodischer Untersuchungen zur Korrektur des systematischen Meßfehlers des Hellmann-Niederschlagsmessers. Berichte des Deutschen Wetterdienstes, Offenbach am Main.
- SAUTER, K. (1967): Beiträge zur Hydrogeologie der näheren Umgebung von Freiburg i. Br. Mitt. bad Landesver Naturkunde u. Naturschutz, 9, 3, S. 611-637.
- SCHEFFER, F. & SCHACHTSCHABEL, P. (1998): Lehrbuch der Bodenkunde. Enke Verlag, Stuttgart. 494 S.
- SCHULLA, J. & JASPER K. (1999): Modellbeschreibung WaSiM-ETH (unveröffentlicht). Geographisches Institut ETH und Institut f
  ür Hydromechanik und Wasserwirtschaft ETH Z
  ürich. 151 S.
- SCHULLA, J. (1997): Hydrologische Modellierung von Flußeinzugsgebieten zur Abschätzung von Klimaänderungen. Dissertation, Zürcher Geographische Schriften, Heft 65, ETH Zürich, Zürich, Schweiz. 161 S.
- STAHR, K. (1979): Die Bedeutung periglazialer Deckschichten f
  ür Bodenbildung und Standortseigenschaften im S
  üdschwarzwald. Freiburger bodenkundliche Abhandlungen Heft 9, 273 S.
- STOBER, I. (1995): Die Wasserführung des kristallinen Grundgebirges. Ferdinand-Enke-Verlag Stuttgart, 191 S.
- THOMPSON, N., BARRIE, J.A. AND AYLES, M. (1981): "The Meteorological Office rainfall and evaporation calculation system": MORECS (July 1981), Hydrological Memorandum, No. 45, Meteorological Office.
- TRENKLE, H. (1988): Das Klima. Landkreis Breisgau Hochschwarzwald. Schillinger Verlag, Freiburg.

UHLENBROOK, S. (1999): Untersuchung und Modellierung der Abflußbildung in einem mesoskaligen Einzugsgebiet. Dissertation. Freiburger Schriften zur Hydrologie, Band 10, Universität Freiburg. Institut für Hydrologie.

UHLENBROOK, S. (2000): Persönliche Mitteilung.

- VAN GENUCHTEN, M.T. (1976): A Closed-Form Equation for Predicting the Hydraulic Conductivity of Unsaturated Soils. Soil Siences Society of American Journal, Vol. 44(5), S. 892-898.
- WILPERT, K.V., KOHLER, M. ZIRLEWAGEN, D. (1996): Die Differenzierung des Stoffhaushaltes von Waldökosystemen durch die waldbauliche Behandlung auf einem Gneisstandort des mittleren Schwarzwaldes. Abschlußbericht UFO-Projekt Nr. 55-90-15. Mitteilungen der Forstlichen Versuchs- und Forschungsanstalt Baden-Württemberg, Freiburg
- ZIMMERMANN, L. (1995): Der Bodenwasserhaushalt an einem Hochlagenstandort im Südschwarzwald. Dissertation. Freiburger bodenkundliche Abhandlungen, Heft 35, 206 S.

Anhang A



Abb. A.1: Niederschlags-Abfluss-Simulation für das Talbach-Einzugsgebiet in der Kalibrierperiode (01.08.95-01.08.96)



Abb. A.2: Niederschlags-Abfluss-Simulation für das Zastler-Einzugsgebiet in der Kalibrierperiode (01.08.95-31.07.96)



Abb. A.3: Niederschlags-Abfluss-Simulation für das Zastler-Einzugsgebiet in der Validierperiode (01.08.96-31.07.97)



Abb. A.4: Niederschlags-Abfluss-Simulation für das Dreisam-Einzugsgebiet in der Validierperiode (exemplarisch 01.08.98-31.07.99)



Abb. A.5: Niederschlags-Abfluss-Simulation des Winterhochwassers 1999 im Brugga-Einzugsgebiet (Periode 11.02.99-25.03.99)



Abb. A.6: Ergebnisse der Ganglinienseparation mit Silikat für das Winterhochwasser 1999 im Brugga-Einzugsgebiet (DFG-PROJEKT LE 698/8-3, 1999)

|                             | Dreisam               | Brugga                 | Zastler              | Talbach              | Eschbach              | Ibental-<br>bach       | Rotbach                | Wagensteig-<br>bach    | Kappler-<br>bach     |
|-----------------------------|-----------------------|------------------------|----------------------|----------------------|-----------------------|------------------------|------------------------|------------------------|----------------------|
| Einzugsgebietsfläche        | 256,4 km <sup>2</sup> | 40,212 km <sup>2</sup> | 17,892 km²           | 15,292 km²           | 36,477 km²            | 19,060 km <sup>2</sup> | 40,272 km <sup>2</sup> | 50,767 km <sup>2</sup> | 13,422 km²           |
| Einzugsgebietsumfang        | 93,3 m                | 37,9 m                 | 24,8 m               | 20,7 m               | 37,7 m                | 33,3 m                 | 43,8 m                 | 44,3 m                 | 23,3 m               |
| Mittlere Höhe               | 777,05 m              | 983,1 m                | 1049,4 m             | 1081,2 m             | 546,0 m               | 686,5 m                | 949,1 m                | 789,3 m                | 691,5 m              |
| Tiefster Punkt              | 316,2 m               | 440,9 m                | 567,0 m              | 638,2 m              | 317,3 m               | 419,4 m                | 495,2 m                | 418,8 m                | 337,3 m              |
| Höchster Punkt              | 1495,1 m              | 1492,8 m               | 1495,1 m             | 1492,8 m             | 946,2 m               | 1036,6 m               | 1279,2 m               | 1167 m                 | 1281,3 m             |
| Flächenanteile              |                       |                        |                      |                      |                       | •                      |                        |                        |                      |
| Hangneigungsklassen:        |                       |                        |                      |                      |                       |                        |                        |                        |                      |
| $0^{\circ}$ bis $5^{\circ}$ | 38,96 km²             | 1,93 km²               | 0,52 km²             | 0,52 km²             | 6,43 km²              | 2,41 km²               | 7,31 km²               | 4,87 km²               | 0,46 km²             |
| 5° bis 10°                  | 40,24 km <sup>2</sup> | 5,3 km <sup>2</sup>    | 1,72 km²             | 1,34 km²             | 4,08 km <sup>2</sup>  | 3,48 km²               | 10,96 km²              | 9,97 km²               | 0,87 km²             |
| 10° bis 20°                 | 89,20 km <sup>2</sup> | 15,23 km²              | 5,92 km²             | 5,19 km <sup>2</sup> | 15,22 km <sup>2</sup> | 9,10 km <sup>2</sup>   | 11,40 km²              | 17,47 km²              | 4,13 km <sup>2</sup> |
| 20° bis 30°                 | 72,28 km <sup>2</sup> | 12,59 km²              | 5,88 km²             | 5,15 km <sup>2</sup> | 10,42 km²             | 4,01 km <sup>2</sup>   | 6,6 km²                | 16,75 km <sup>2</sup>  | 6,91 km²             |
| 30° bis 40°                 | 16,04 km <sup>2</sup> | 4,84 km²               | 3,69 km²             | 2,88 km <sup>2</sup> | 0,34 km²              | 0,06 km <sup>2</sup>   | 3,60 km <sup>2</sup>   | 1,72 km²               | 1,06 km²             |
| > 40°                       | 0,86 km <sup>2</sup>  | 0,31 km²               | 0,18 km²             | 0,21 km²             | 0 km²                 | 0 km²                  | 0,37 km²               | 0 km²                  | 0 km²                |
| Flächenanteile              |                       |                        |                      |                      |                       | •                      |                        |                        |                      |
| Exposition:                 |                       |                        |                      |                      |                       |                        |                        |                        |                      |
| Nord exponiert              | 81,60 km²             | 13,18 km²              | 6,74 km²             | 5,41 km²             | 5,30 km <sup>2</sup>  | 3,50 km²               | 11,12 km <sup>2</sup>  | 18,98 km²              | 4,93 km²             |
| Ost exponiert               | 48,23 km <sup>2</sup> | 11,53 km²              | 4,10 km <sup>2</sup> | 2,45 km <sup>2</sup> | 6,23 km²              | 2,45 km²               | 9,52 km²               | 5,37 km <sup>2</sup>   | 3,75 km²             |
| Süd exponiert               | 58,29 km <sup>2</sup> | 7,21 km²               | 2,20 km <sup>2</sup> | 3,33 km²             | 14,19 km²             | 7,37 km <sup>2</sup>   | 11,78 km²              | 10,78 km²              | 1,30 km <sup>2</sup> |
| West exponiert              | 68,68 km²             | 8,29 km²               | 4,85 km <sup>2</sup> | 4,10 km <sup>2</sup> | 10,76 km <sup>2</sup> | 5,75 km <sup>2</sup>   | 7,86 km²               | 15,64 km²              | 3,45 km²             |

### Tab. B1: Physiographische Kennwerte des Dreisam-Einzugsgebietes und den Teileinzugsgebieten

| Stationsname        | Breitnau    | Buchenbach  | Conventwald | Ebnet      | Feldberg    | Freiburg    | Hinterzarten |
|---------------------|-------------|-------------|-------------|------------|-------------|-------------|--------------|
| Abkürzung           | BR          | BU          | KO          | EB         | FLD         | FR          | HI           |
| Betreiber           | DWD         | DWD         | FVA         | IPG        | DWD         | DWD         | DWD          |
| Messdauer           | 01.95-09.99 | 01.95-09.99 | 05.95-10.97 | 01.95-4.98 | 01.95-09.99 | 01.95-09.99 | 01.95-09.99  |
| Zeitliche Auflösung | täglich     | 3 x täglich | 30 min      | 30 min     | täglich     | täglich     | 3 x täglich  |
| Niederschlag        | Х           | X           | X           | Х          | X           | X           | X            |
| Temperatur          |             | Х           | X           | Х          | 60 min      | 60 min      | X            |
| Luftfeuchtigkeit    |             | X           | X           | Х          | 60 min      | 60 min      | X            |
| Windgeschwindigkeit |             |             | X           | Х          | 60 min      | 60 min      | 60 min       |
| Windstärke          |             | X           |             |            |             |             | X            |
| Globalstrahlung     |             |             | X           | Х          |             |             |              |
| Sonnenscheindauer   |             | 60 min      |             |            | 60 min      | 60 min      | 60 min       |

| Tab. B.2: | Messumfang der meteorologischen Stationen der einzelnen Stationsbetreiber im Untersuchungsgebiet |
|-----------|--|
|           |  |

| Stationsname        | Hofsgrund   | St.Wilhelm  | Zastler     | Schauinsland | St. Maergen | St.Wilhelm  | Zastler     |
|---------------------|-------------|-------------|-------------|--------------|-------------|-------------|-------------|
| Abkürzung           | HO(F)       | ST          | ZS          | SCHAU        | (ST.) MAE   | STW         | ZAST        |
| Betreiber           | DWD         | DWD         | DWD         | UBA          | DWD         | IHF         | IHF         |
| Messdauer           | 01.95-09.99 | 01.95-09.99 | 01.95-09.99 | 07.95-09.99  | 01.95-09.99 | 05.95-09.99 | 07.97-09.99 |
| Zeitliche Auflösung | täglich     | täglich     | täglich     | 30 min       | 3 x täglich | 10 min      | 10 min      |
| Niederschlag        | Х           | Х           | Х           | Х            | Х           | Х           | Х           |
| Temperatur          |             |             |             |              | Х           | Х           | Х           |
| Luftfeuchte         |             |             |             |              | Х           | Х           | Х           |
| Windgeschwindigkeit |             |             |             |              |             |             |             |
| Windstärke          |             |             |             |              | Х           |             |             |
| Globalstrahlung     |             |             |             |              |             | Х           | Х           |
| Sonnenscheindauer   |             |             |             |              |             |             |             |

|      |                             | Albedo | o Monatswerte der minimalen Oberflächenwiderstände 4 |     |     |     |     |     |     |     | 4 Knickpunkte als Julianische Tage |     |     |     | LAI an diesen 4 Tagen |     |     |     |   |   |   |   |
|------|-----------------------------|--------|--|-----|-----|-----|-----|-----|-----|-----|------------------------------------|-----|-----|-----|-----------------------|-----|-----|-----|---|---|---|---|
| Code | Landnutzungsart             |        | 1  | 2   | 3   | 4   | 5   | 6   | 7   | 8   | 9                                  | 10  | 11  | 12  | 1                     | 2   | 3   | 4   | 1 | 2 | 3 | 4 |
| 16   | Wasser                      | 0,05   | 20   | 20  | 20  | 20  | 20  | 20  | 20  | 20  | 20                                 | 20  | 20  | 20  | 110                   | 150 | 250 | 280 | 1 | 1 | 1 | 1 |
| 1    | Siedlund_dicht              | 0,15   | 500  | 500 | 500 | 500 | 500 | 500 | 500 | 500 | 500                                | 500 | 500 | 500 | 110                   | 150 | 250 | 280 | 1 | 1 | 1 | 1 |
| 2    | Siedlung_locker             | 0,2    | 300  | 300 | 300 | 300 | 300 | 300 | 300 | 300 | 300                                | 300 | 300 | 300 | 110                   | 150 | 250 | 280 | 1 | 1 | 1 | 1 |
| 3    | großflaechig_versieg        | 0,18   | 500  | 500 | 500 | 500 | 500 | 500 | 500 | 500 | 500                                | 500 | 500 | 500 | 110                   | 150 | 250 | 280 | 1 | 1 | 1 | 1 |
| 13   | Nadelwald                   | 0,12   | 70   | 70  | 60  | 60  | 50  | 50  | 50  | 50  | 55                                 | 65  | 70  | 70  | 110                   | 150 | 250 | 280 | 6 | 6 | 6 | 6 |
| 15   | sonstige_Waldflächen        | 0,16   | 80   | 80  | 70  | 65  | 55  | 55  | 55  | 55  | 55                                 | 75  | 80  | 80  | 110                   | 150 | 250 | 280 | 3 | 6 | 6 | 3 |
| 14   | Laubwald                    | 0,17   | 80   | 80  | 70  | 65  | 55  | 55  | 55  | 55  | 60                                 | 75  | 80  | 80  | 110                   | 150 | 250 | 280 | 2 | 8 | 8 | 2 |
| 4    | Ackerflächen                | 0,25   | 150  | 150 | 150 | 150 | 150 | 70  | 90  | 100 | 150                                | 150 | 150 | 150 | 110                   | 150 | 250 | 280 | 1 | 3 | 2 | 1 |
| 9    | intensives_Grünland         | 0,26   | 150  | 150 | 150 | 150 | 120 | 100 | 90  | 120 | 120                                | 120 | 150 | 150 | 110                   | 150 | 250 | 280 | 2 | 4 | 2 | 1 |
| 11   | extensives_Grünland         | 0,26   | 100  | 100 | 100 | 100 | 90  | 80  | 80  | 80  | 80                                 | 80  | 100 | 100 | 110                   | 150 | 250 | 280 | 1 | 4 | 2 | 1 |
| 8    | unversiegelte_unbew,Flächen | 0,2    | 200  | 200 | 200 | 200 | 200 | 200 | 200 | 200 | 200                                | 200 | 200 | 200 | 110                   | 150 | 250 | 280 | 1 | 2 | 2 | 1 |
| 10   | Feuchtflächen               | 0,25   | 90   | 90  | 75  | 65  | 50  | 55  | 55  | 55  | 60                                 | 70  | 90  | 90  | 110                   | 150 | 250 | 280 | 2 | 4 | 4 | 2 |
| 7    | Brache_bewachsen            | 0,2    | 80   | 80  | 70  | 70  | 50  | 50  | 50  | 55  | 55                                 | 70  | 80  | 80  | 110                   | 150 | 250 | 280 | 2 | 5 | 5 | 2 |
| 6    | intensiv_Obstbau            | 0,25   | 80   | 80  | 70  | 65  | 60  | 60  | 60  | 60  | 60                                 | 70  | 80  | 80  | 150                   | 250 | 280 | 280 | 1 | 4 | 4 | 1 |
| 5    | Weinbau                     | 0,25   | 80   | 80  | 70  | 65  | 60  | 60  | 60  | 60  | 60                                 | 60  | 80  | 80  | 110                   | 150 | 250 | 280 | 1 | 5 | 5 | 1 |

#### Tab. B.3:Parametrisierung der Landnutzungstabelle

| Code | Landnutzungsart             | Vegetationshöhe |     |     |     | Vegetations-<br>bedeckungsgrad |     |     |     | Wurzeltiefe an<br>diesen 4 Tagen |     |     |     | Wurzeldichte- | Sauspannung für ETP- |  |
|------|-----------------------------|-----------------|-----|-----|-----|--------------------------------|-----|-----|-----|----------------------------------|-----|-----|-----|---------------|----------------------|--|
|      |                             | 1               | 2   | 3   | 4   | 1                              | 2   | 3   | 4   | 1                                | 2   | 3   | 4   | verteilung    | Reduktion            |  |
| 16   | Wasser                      | 0,1             | 0,1 | 0,1 | 0,1 | 0,1                            | 0,1 | 0,1 | 0,1 | 0                                | 0   | 0   | 0   | 1             | 3,55                 |  |
| 1    | Siedlund_dicht              | 8               | 8   | 8   | 8   | 0,5                            | 0,5 | 0,5 | 0,5 | 0,2                              | 0,2 | 0,2 | 0,2 | 1             | 3,55                 |  |
| 2    | Siedlung_locker             | 5               | 5   | 5   | 5   | 0,5                            | 0,5 | 0,5 | 0,5 | 0,2                              | 0,2 | 0,2 | 0,2 | 1             | 3,55                 |  |
| 3    | großflaechig_versieg        | 1               | 1   | 1   | 1   | 0,5                            | 0,5 | 0,5 | 0,5 | 0,2                              | 0,2 | 0,2 | 0,2 | 1             | 3,55                 |  |
| 13   | Nadelwald                   | 10              | 10  | 10  | 10  | 0,9                            | 0,9 | 0,9 | 0,9 | 1,2                              | 1,2 | 1,2 | 1,2 | 1             | 8,55                 |  |
| 15   | sonstige_Waldflächen        | 3               | 10  | 10  | 3   | 0,7                            | 1   | 1   | 0,7 | 1,4                              | 1,4 | 1,4 | 1,4 | 1             | 6,55                 |  |
| 14   | Laubwald                    | 3               | 10  | 10  | 3   | 0,4                            | 0,7 | 0,7 | 0,4 | 1,3                              | 1,3 | 1,3 | 1,3 | 1             | 4,55                 |  |
| 4    | Ackerflächen                | 0,05            | 0,6 | 0,2 | 0,1 | 0,3                            | 0,8 | 0,7 | 0,3 | 0,1                              | 0,4 | 0,3 | 0,1 | 1             | 3,55                 |  |
| 9    | intensives_Grünland         | 0,15            | 0,8 | 0,5 | 0,2 | 0,9                            | 0,9 | 0,9 | 0,9 | 0,4                              | 0,4 | 0,4 | 0,4 | 1             | 3,55                 |  |
| 11   | extensives_Grünland         | 0,15            | 0,4 | 0,4 | 0,2 | 0,9                            | 0,9 | 0,9 | 0,9 | 0,4                              | 0,4 | 0,4 | 0,4 | 1             | 3,55                 |  |
| 8    | unversiegelte_unbew,Flächen | 1,5             | 2,5 | 2,5 | 1,5 | 0,2                            | 0,2 | 0,2 | 0,2 | 0,5                              | 0,5 | 0,5 | 0,5 | 1             | 3,55                 |  |
| 10   | Feuchtflächen               | 0,15            | 0,4 | 0,3 | 0,2 | 1                              | 1   | 1   | 1   | 0,4                              | 0,4 | 0,4 | 0,4 | 1             | 3,55                 |  |
| 7    | Brache_bewachsen            | 1,5             | 2,5 | 2,5 | 1,5 | 0,5                            | 0,5 | 0,5 | 0,5 | 0,5                              | 0,5 | 0,5 | 0,5 | 1             | 3,55                 |  |
| 6    | intensiv_Obstbau            | 4               | 3   | 3   | 0,4 | 0,8                            | 0,8 | 0,8 | 0,8 | 0,8                              | 0,8 | 0,8 | 0,8 | 1             | 3,55                 |  |
| 5    | Weinbau                     | 0,4             | 3   | 3   | 0,4 | 0,8                            | 0,8 | 0,8 | 0,8 | 0,8                              | 0,8 | 0,8 | 0,8 | 1             | 3,55                 |  |

### Tab. B.4:Parametrisierung des Bodenmodells

| Gewässer                                    | Zwischengebiet | Zwischengebiet | Zwischengebiet | Zastler Unterlauf | Rotbach Unterlauf |
|---|----------------|----------------|----------------|-------------------|-------------------|
| Code  | 2              | 4              | 1001           | 5                 | 6                 |
| Speicherkonstante Direktabfluss             | 19             | 19             | 19             | 19                | 19                |
| Speicherkonstante Interflow                 | 21.7           | 21.7           | 21.7           | 21.7              | 21.7              |
| Drainagedichte                              | 1.2            | 1.2            | 2.2            | 2.2               | 2.2               |
| Auslaufkonstante Basisabfluss               | 0.32           | 0.32           | 0.32           | 0.32              | 0.32              |
| Skalierungsfaktor Basisabfluss              | 0.21           | 0.21           | 0.21           | 0.21              | 0.21              |
| Anteil Direktabfluss aus der Schneeschmelze | 0.2            | 0.2            | 0.35           | 0.2               | 0.3               |

| Gewässer                                    | Eschbach Unterlauf | Brugga Unterlauf | Eschbach Oberlauf | Ibentalbach | Wagensteigbach |
|---|--------------------|------------------|-------------------|-------------|----------------|
| Code  | 1                  | 7                | 1006              | 1007        | 1008           |
| Speicherkonstante Direktabfluss             | 19                 | 19               | 19                | 19          | 19             |
| Speicherkonstante Interflow                 | 21.7               | 21.7             | 21.7              | 21.7        | 21.7           |
| Drainagedichte                              | 1.2                | 2.2              | 1.6               | 1.6         | 1.6            |
| Auslaufkonstante Basisabfluss               | 0.32               | 0.32             | 0.32              | 0.32        | 0.32           |
| Skalierungsfaktor Basisabfluss              | 0.21               | 0.21             | 0.51              | 0.51        | 0.51           |
| Anteil Direktabfluss aus der Schneeschmelze | 0.2                | 0.35             | 0.3               | 0.3         | 0.3            |

| Gewässer                                    | Brugga (Pegel) | Rotbach (Pegel) | Talbach (Pegel | Zastler (Pegel) |
|---|----------------|-----------------|----------------|-----------------|
| Code  | 1002           | 1003            | 1004           | 1005            |
| Speicherkonstante Direktabfluss             | 12             | 12              | 18             | 17              |
| Speicherkonstante Interflow                 | 33             | 33              | 33             | 37              |
| Drainagedichte                              | 1.84           | 1.84            | 1.5            | 1.86            |
| Auslaufkonstante Basisabfluss               | 0.32           | 0.32            | 0.29           | 0.29            |
| Skalierungsfaktor Basisbafluss              | 0.1            | 0.1             | 0.2            | 0.31            |
| Anteil Direktabfluss aus der Schneeschmelze | 0.25           | 0.25            | 0.23           | 0.25            |

| Tab. B.5: | Parametrisierung der Bodenartentabelle (Abkürzungen siehe Tab. 4.13) |
|-----------|--|
|           |  |

| Code | Bodenart                       | Ks       | Ψ   | $\Theta_{sat}$ | $\Theta_{\rm res}$ | α    | n    | $l_{v}$ | $d_z$  | Ck | k <sub>rec</sub> |
|------|--------------------------------|----------|-----|----------------|--------------------|------|------|---------|--------|----|------------------|
| 2128 | Auengley bis brauner Auenboden | 2,89E-06 | 352 | 0,5            | 0,0158             | 7,6  | 2,56 | 22      | 0,5    | 70 | 0,32             |
| 2228 | Auengley bis brauner Auenboden | 2,89E-06 | 352 | 0,5            | 0,0158             | 7,6  | 2,56 | 22      | 0,5    | 70 | 0,32             |
| 2328 | Auengley bis brauner Auenboden | 2,89E-06 | 352 | 0,5            | 0,0158             | 7,6  | 2,56 | 22      | 0,5    | 70 | 0,32             |
| 2127 | Auengley-Brauner Auenboden     | 1,23E-04 | 345 | 0,5            | 0,05               | 7,5  | 2,89 | 22      | 1,3333 | 70 | 0,32             |
| 2227 | Auengley-Brauner Auenboden     | 1,23E-04 | 345 | 0,5            | 0,05               | 7,5  | 2,89 | 22      | 1,3333 | 70 | 0,32             |
| 2327 | Auengley-Brauner Auenboden     | 1,23E-04 | 345 | 0,5            | 0,05               | 7,5  | 2,89 | 22      | 1,3333 | 70 | 0,32             |
| 2125 | Braunerde                      | 2,89E-06 | 352 | 0,5            | 0,05               | 4,б  | 2,16 | 22      | 1,3333 | 70 | 0,32             |
| 2225 | Braunerde                      | 2,89E-06 | 352 | 0,5            | 0,05               | 4,б  | 2,16 | 22      | 1,3333 | 70 | 0,32             |
| 2108 | Braunerde aus Fliesserden      | 1,00E-05 | 345 | 0,5            | 0,0104             | 8,34 | 1,16 | 22      | 0,4    | 70 | 0,32             |
| 2208 | Braunerde aus Fliesserden      | 2,23E-05 | 345 | 0,5            | 0,0145             | 4,5  | 2,19 | 22      | 0,27   | 70 | 0,32             |
| 2140 | Braunerde podsolige Braunerde  | 9,89E-05 | 352 | 0,5            | 0,015              | 2,4  | 3,58 | 22      | 0,3333 | 70 | 0,32             |
| 2112 | Braunerde Regosol Ranker       | 1,00E-08 | 545 | 0,5            | 0,015              | б,5  | 2,89 | 22      | 0,4    | 70 | 0,32             |
| 2212 | Braunerde Regosol Ranker       | 2,89E-05 | 352 | 0,5            | 0,012              | 4,б  | 2,56 | 22      | 0,27   | 70 | 0,32             |
| 2312 | Braunerde Regosol Ranker       | 3,89E-05 | 352 | 0,5            | 0,011              | 7,5  | 1,31 | 22      | 0,2222 | 70 | 0,32             |
| 2101 | humose Braunerde mit Geschiebe | 1,00E-05 | 345 | 0,5            | 0,0104             | 8,34 | 1,16 | 22      | 0,4    | 70 | 0,32             |
| 2201 | humose Braunerde mit Geschiebe | 2,23E-05 | 345 | 0,5            | 0,0145             | 4,5  | 2,19 | 22      | 0,27   | 70 | 0,32             |
| 2301 | humose Braunerde mit Geschiebe | 2,53E-05 | 345 | 0,5            | 0,0155             | 4,5  | 2,89 | 22      | 0,2222 | 70 | 0,32             |
| 2114 | humose Braunerde auf Schutt    | 1,00E-08 | 545 | 0,5            | 0,015              | б,5  | 2,89 | 22      | 0,4    | 70 | 0,32             |
| 2214 | humose Braunerde auf Schutt    | 2,89E-05 | 352 | 0,5            | 0,012              | 4,б  | 2,56 | 22      | 0,27   | 70 | 0,32             |
| 2314 | humose Braunerde auf Schutt    | 3,89E-05 | 352 | 0,5            | 0,011              | 7,5  | 1,31 | 22      | 0,2222 | 70 | 0,32             |
| 2115 | Braunerde podsolig oder humos  | 1,00E-08 | 545 | 0,5            | 0,015              | б,5  | 2,89 | 22      | 0,4    | 70 | 0,32             |
| 2215 | Braunerde podsolig oder humos  | 2,89E-05 | 352 | 0,5            | 0,012              | 4,б  | 2,56 | 22      | 0,27   | 70 | 0,32             |
| 2315 | Braunerde podsolig oder humos  | 3,89E-05 | 352 | 0,5            | 0,011              | 7,5  | 1,31 | 22      | 0,2222 | 70 | 0,32             |
| 2116 | Braunerde stell, podsolig      | 1,00E-05 | 345 | 0,5            | 0,0104             | 8,34 | 1,16 | 22      | 0,4    | 70 | 0,32             |
| 2216 | Braunerde stell, podsolig      | 2,23E-05 | 345 | 0,5            | 0,0145             | 4,5  | 2,19 | 22      | 0,27   | 70 | 0,32             |
| 2316 | Braunerde stell, podsolig      | 2,53E-05 | 345 | 0,5            | 0,0155             | 4,5  | 2,89 | 22      | 0,2222 | 70 | 0,32             |
| 2103 | H, Braunerde bis Podsol aus M, | 8,89E-05 | 650 | 0,5            | 0,018              | 5,5  | 1,51 | 22      | 0,3333 | 70 | 0,32             |
| 2203 | H, Braunerde bis Podsol aus M, | 8,89E-05 | 650 | 0,5            | 0,018              | 5,5  | 1,51 | 22      | 0,3333 | 70 | 0,32             |
| 2105 | Nieder und Hochmoor            | 8,25E-07 | 750 | 0,5            | 0,01               | 2    | 2,23 | 22      | 0,2222 | 70 | 0,32             |
| 2205 | Nieder und Hochmoor            | 8,25E-07 | 750 | 0,5            | 0,01               | 2    | 2,23 | 22      | 0,2222 | 70 | 0,32             |
| 2495 | Ortslage                       | 1,00E-09 | 50  | 0,5            | 0,014              | 4    | 1,8  | 22      | 0,3333 | 70 | 0,32             |
| 2595 | Ortslage                       | 1,00E-09 | 50  | 0,5            | 0,014              | 4    | 1,8  | 22      | 0,3333 | 70 | 0,32             |

TG 1 (A<sub>E</sub>=36.240, AErel=1.0) from OL 1006 ( $k_{\rm h}=0.1$ ,  $k_{\rm v}=0.4$ ,  $B_{\rm h}=5.3$ ,  $B_{\rm v}=21.1$ ,  $T_{\rm h}=0.59$ ,  $M_{\rm h}=25.0$ ,  $M_{\rm v}=10.0$ , I=0.0124, L=5579.9,  $A_{\rm F}=21.160$ ) TG 2 ( $A_{\rm F}$ =71.840, AErel=1.0) from OL 1007 ( $k_{h}=0.1$ ,  $k_{v}=0.4$ ,  $B_{h}=4.6$ ,  $B_{v}=18.5$ ,  $T_{h}=0.57$ ,  $M_{h}=25.0$ ,  $M_{v}=10.0$ , I=0.0152, L=2082.8,  $A_{F}=19.160$ ) and OL 1008 ( $k_{\rm h}=0.1$ ,  $k_{\rm v}=0.4$ ,  $B_{\rm h}=6.6$ ,  $B_{\rm v}=26.5$ ,  $T_{\rm h}=0.82$ ,  $M_{\rm h}=25.0$ ,  $M_{\rm v}=10.0$ , I=0.0152, L=2082.8, A\_{\rm F}=50.440) TG 6 (A<sub>E</sub>=49.680, AErel=1.0) from OL 1003 ( $k_{h}=0.1$ ,  $k_{v}=0.4$ ,  $B_{h}=5.0$ ,  $B_{v}=19.9$ ,  $T_{h}=0.76$ ,  $M_{h}=25.0$ ,  $M_{v}=10.0$ , I=0.0236, L=5311.2,  $A_{F}=40.840$ ) TG 5 (A<sub>E</sub>=154.920, AErel=1.0) from OL 2 ( $k_h=0.1$ ,  $k_v=0.4$ ,  $B_h=7.8$ ,  $B_v=31.3$ ,  $T_h=0.93$ ,  $M_h=25.0$ ,  $M_v=10.0$ , I=0.0142, L=4131.4,  $A_F=71.840$ ) and OL 6 ( $k_{b}=0.1$ ,  $k_{v}=0.4$ ,  $B_{b}=6.8$ ,  $B_{v}=27.3$ ,  $T_{b}=0.81$ ,  $M_{b}=25.0$ ,  $M_{v}=10.0$ , I=0.0142, L=4131.4,  $A_{F}=49.680$ ) and OL 1005 ( $k_{h}=0.1$ ,  $k_{v}=0.4$ ,  $B_{h}=3.6$ ,  $B_{v}=14.5$ ,  $T_{h}=0.57$ ,  $M_{h}=25.0$ ,  $M_{v}=10.0$ , I=0.0244, L=9242.6,  $A_{F}=18.240$ ) TG 1002 ( $A_{\rm F}$ =41.280, AErel=1.0) from OL 1004 ( $k_{\rm b}=0.1$ ,  $k_{\rm v}=0.4$ ,  $B_{\rm b}=2.7$ ,  $B_{\rm v}=10.9$ ,  $T_{\rm b}=0.54$ ,  $M_{\rm b}=25.0$ ,  $M_{\rm v}=10.0$ , I=0.0392, L=4979.9,  $A_{\rm F}=15.440$ ) TG 7 (A<sub>E</sub>=63.800, AErel=1.0) from OL 1009 ( $k_{h}=0.1$ ,  $k_{v}=0.4$ ,  $B_{h}=5.3$ ,  $B_{v}=21.3$ ,  $T_{h}=0.53$ ,  $M_{h}=25.0$ ,  $M_{v}=10.0$ , I=0.0068, L=482.8,  $A_{F}=13.560$ ) and OL 1002 ( $k_{\rm h}=0.1$ ,  $k_{\rm v}=0.4$ ,  $B_{\rm h}=5.7$ ,  $B_{\rm v}=23.0$ ,  $T_{\rm h}=0.76$ ,  $M_{\rm h}=25.0$ ,  $M_{\rm v}=10.0$ , I=0.0176, L=5794.1,  $A_{\rm F}=41.280$ ) TG 4 ( $A_{\rm F}$ =220.440, AErel=1.0) from OL 5 ( $k_h=0.1$ ,  $k_v=0.4$ ,  $B_h=12.8$ , Bv=51.3,  $T_h=1.28$ ,  $M_h=25.0$ ,  $M_v=10.0$ , I=0.0082, L=1448.5,  $A_F=154.920$ ) and OL 7 ( $k_h=0.1$ ,  $k_v=0.4$ ,  $B_h=9.2$ , Bv=36.7,  $T_h=0.92$ ,  $M_h=25.0$ ,  $M_v=10.0$ , I=0.0082, L=1448.5,  $A_F=63.800$ ) TG 1001 (A<sub>F</sub>=257.280, AErel=1.0) from OL 1 ( $k_h=0.1$ ,  $k_v=0.4$ ,  $B_h=11.0$ ,  $B_v=44.1$ ,  $T_h=1.10$ ,  $M_h=25.0$ ,  $M_v=10.0$ , I=0.0010, L=282.8,  $A_F=36.240$ ) and OL 4 ( $k_h=0.1$ ,  $k_y=0.4$ ,  $B_h=21.7$ ,  $B_y=86.7$ ,  $T_h=2.17$ ,  $M_h=25.0$ ,  $M_y=10.0$ , I=0.0010, L=282.8,  $A_E=220.440$ )

# Ehrenwörtliche Erklärung:

Hiermit erkläre ich, dass die Arbeit selbständig nur unter Verwendung der angegebenen Hilfsmittel angefertigt wurde.

Freiburg, den 25.08.2000