

2. Angewendete Modelle

Das folgende Kapitel gibt einen kurzen Überblick über die hauptsächlich im Rahmen dieser Forschungsvorhabens verwendeten hydrologischen Modelle. Detaillierte Modellbeschreibungen können der zitierten Literatur entnommen werden.

2.1 ARC/EGMO

ARC/EGMO, ursprünglich entstanden aus dem Modell EGMO (Becker, 1975) ist ein deterministisches semi-gegliedertes hydrologisches Modellsystem, welches unterschiedliche Module zur Beschreibung der hydrologischen Prozesse bereitstellt (Pfützner et al., 2000). Es ist speziell für Anwendungen in meso- und makroskaligen Einzugsgebieten prädestiniert und verfügt über eine Schnittstelle zum Geographischen Informationssystem ARC/INFO zur semi-automatischen Parameterbereitstellung. Für die meisten Anwendungen erfolgt eine Untergliederung des Untersuchungsraumes in Teilgebiete und Hydrotope, entsprechend den physischen Gebietseigenschaften: Topographie, Landbedeckung, Böden, Grundwasserflurabstand. Die Hydrotope bilden die Referenzeinheiten zur Modellierung der vertikalen Prozesse und des Oberflächenabflusses (RO). Für die Beschreibung der lateralen Abflussvorgänge werden die Hydrotope zu drei Typen von „contributing areas“ re-aggregiert, die im wesentlichen Grundwasserabfluss (RB), Interflow (RI) und Nassflächenabfluss (RN) generieren (**Abb. 2.1**). Das Modell ARC/EGMO operiert in der Regel auf Tageszeitschrittbasis und benötigt als meteorologischen Input entsprechende Zeitreihen von Niederschlag, Lufttemperatur, Luftfeuchte und Strahlung oder Sonnenscheindauer.

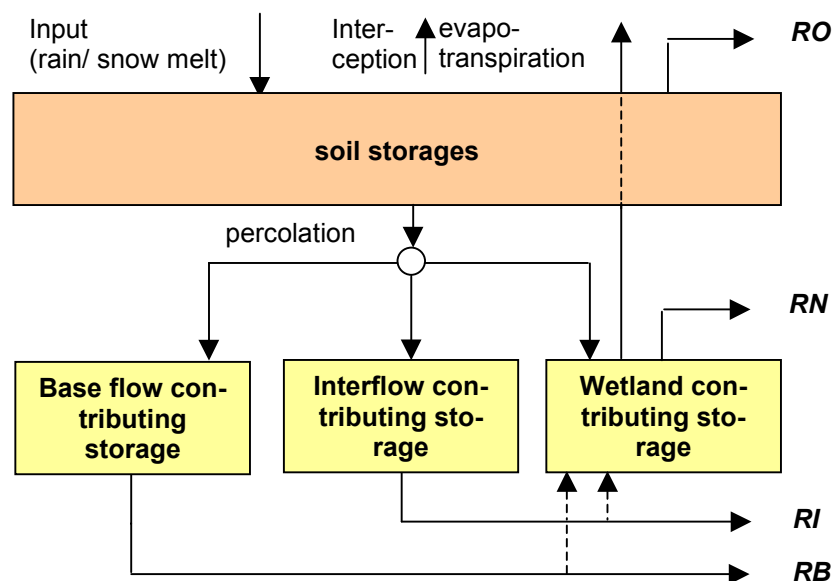


Abb. 2.1: Vereinfachtes Schema der Wasserbilanz von ARC/EGMO

Für jedes Hydrotop innerhalb der Teileinzugsgebiete wird die vertikale Wasserbilanz berechnet unter Berücksichtigung von: potentieller Verdunstung (Turc/Ivanov; DVWK, 1996), realer Verdunstung (bodenfeuchteabhängige Reduktionsfunktion), Interzeption (Speicher mit Überlauf), Schneedynamik (Tagesgradverfahren), Infiltration und Oberflächenabfluss RO (basierend auf Holtan, 1961) sowie Bodenfeuchtedynamik und Perkolation (Kapazitätsansatz). Die berechnete Perkolation wird anschließend entsprechend den Entstehungsflächen („contributing areas“) auf einen von drei Grundwasserspeichern zur Generierung der Abflusskomponenten RB, RI und RN verteilt. „River routing“ zwischen den Teileinzugsgebieten im Flussnetz wird entweder mittels einer linearen Speicherkaskade oder mit einer geomorphologischen Einheitsganglinie (Unit Hydrograph) beschrieben.

2.2 SWIM

Das Modellierungssystem SWIM (Soil and Water Integrated Model) (Krysanova et al., 1998a) (Abb. 2.2) umfasst im Kern ein kontinuierliches, räumlich verteiltes Modell, das Hydrologie, Vegetationsdynamik (Landwirtschaft und natürliche Vegetation), Nährstoffkreisläufe (Stickstoff N und Phosphor P) und Sedimenttransport auf Flusseinzugsgebietsebene integriert. Es gibt eine Schnittstelle zum geographischen Informationssystem GRASS, mit dem Modellparameter aus Bodendaten, Landnutzung und Höhenmodell gewonnen werden können. SWIM wurde auf der Grundlage der Modelle SWAT (Arnold et al., 1993) und MATSALU (Krysanova et al., 1989) entwickelt. Das Modell kann für die integrierte Modellierung in mesoskaligen Einzugsgebieten mit Flächen bis zu 10.000 km² verwendet werden, oder auch (nach entsprechender Validierung in repräsentativen Teilgebieten) in größeren Regionen.

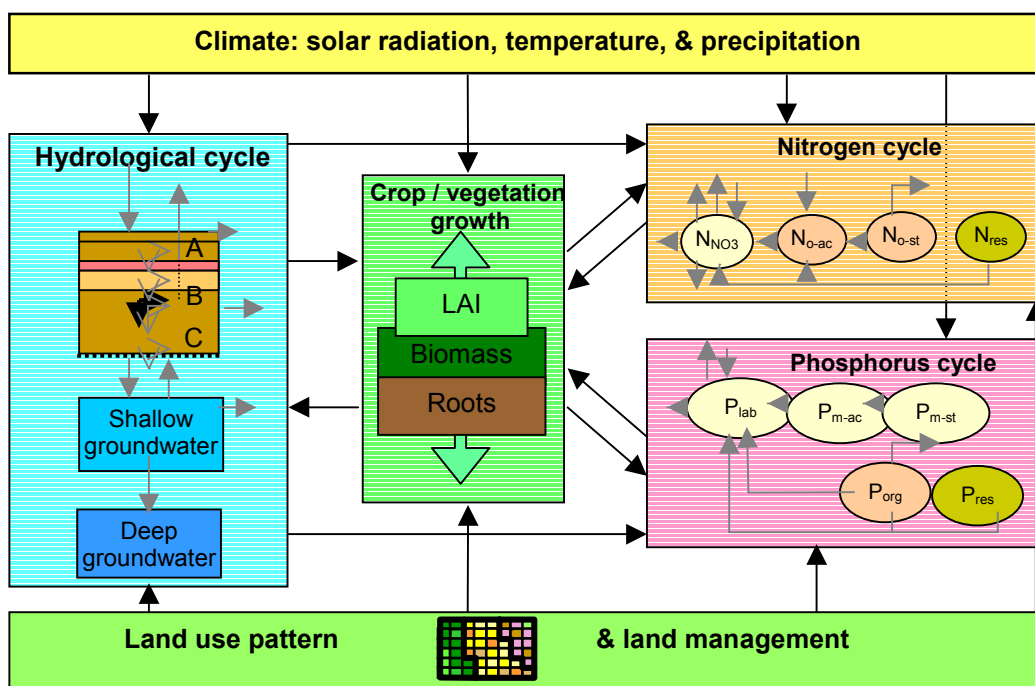


Abb. 2.2: Vereinfachtes Schema der Prozesse im Modell SWIM

Ähnlich wie ARC/EGMO verwendet auch SWIM ein dreistufiges Schema zur räumlichen Disaggregation nach dem Muster "Einzugsgebiet - Teileinzugsgebiet - Hydrotop" oder "Region - Klimazone - Hydrotop". Das hydrologische Teilsystem besteht aus vier Kontrollvolumina: Bodenoberfläche, Wurzelzone sowie einem flachen und einem tiefen Grundwasserleiter. Die Wurzelzone kann vertikal in bis zu 10 Schichten unterteilt werden. In der Wasserbilanz werden folgende Prozesse berücksichtigt: potentielle Verdunstung (Priestley-Taylor, 1972; Ritchie, 1972), Schneeschmelze (Tagesgradverfahren), Oberflächenabflussbildung (modifiziertes SCS-Verfahren), Infiltration, Bodenwasserdynamik, Bildung von Interflow und Versickerung („storage-routing“, Arnold et al., 1990; Sloan et al., 1983), reale Verdunstung (feuchteabhängige Reduktionsfunktion), Kapillaraufstieg und Grundwasserabfluss (Arnold et al., 1993). Die Wellenabflachung in den Flüssen wird auf Basis des Muskingum-Modells (Maidment, 1993) simuliert.

Ein vereinfachter EPIC-Ansatz (Williams et al., 1984) wird zur Simulation von Agrarfrüchten (wie z.B. Weizen, Mais, Kartoffeln) und zusammengefassten Pflanzengruppen (wie z.B. Weide, Laubwald, Nadelwald) verwendet. Eine angeschlossene Pflanzendatenbank enthält Parameter wie Wurzeltiefe, LAI, Wachstumsaison, etc. für „Fruchtarten“. Die Wechselwirkungen zwischen Vegetation, Hydrologie und Nährstoffversorgung im Wachstumsmodell werden mittels Stressfunktionen für Wasser, Energie, Stickstoff und Phosphor berücksichtigt. Die Module zur Beschreibung von Stickstoff- und Phosphorkreisläufen beinhalten folgende Pools (Vgl. Abb. 2.2): Nitratstickstoff (N_m), aktiver und

stabiler organischer Stickstoff (N_{oa} , N_{os}), organischer Stickstoff in den Pflanzenrückständen (N_{res}), labiler Phosphor (P_{lab}), aktiver und stabiler mineralischer Phosphor (P_{mas} , P_{mst}), organischer Phosphor (P_{org}) und Phosphor in den Pflanzenrückständen (P_{res}). Folgende Prozesse und Flüsse werden berücksichtigt: organische und mineralische Düngung, atmosphärische Deposition, Mineralisierung, Denitrifikation, Pflanzenaufnahme, Verluste mit dem Grundwasser, dem Interflow, dem Oberflächenabfluss und Erosion. Sedimentfrachten können auf Basis der modifizierten Bodenabtragsgleichung berechnet werden (MUSLE, Williams and Berndt, 1977). Eine ausführliche Modelldokumentation kann dem SWIM-Manual entnommen werden (Krysanova et al., 2000).

2.3 HBV

Das HBV Modell existiert in verschiedenen Versionen (z.B. Bergström and Forsman, 1973; Bergström, 1992; Lindström et al., 1977). Bei den durchgeführten Untersuchungen wurde die Version HBV-D verwendet (Krysanova et al., 1999a), welche mit kleinen Modifikationen zur besseren räumlichen Repräsentanz physischer Gebietscharakteristika aus dem ‚Nordic HBV‘ entwickelt wurde. Das HBV-D ist ein konzeptionelles semi-gegliedertes Modell, welches tägliche Zeitreihen von Niederschlag und Temperatur sowie mittlere monatliche Werte der potentiellen Verdunstung als Eingangsdaten verwendet. Das betrachtete Einzugsgebiet wird in Teilgebiete und in Höhenzonen untergliedert. Die weitere Untergliederung jeder Höhenzone in die jeweiligen zwei vorherrschenden Landnutzungen liefert die primären Simulationseinheiten für die Wasserbilanz.

Wesentlichen Prozesse, die mit dem Modell HBV-D berücksichtigt werden, sind: Schneedynamik (Tag-Gradverfahren), Bodenfeuchtedynamik, Ablussbildung und „River-Routing“. Die potentielle Verdunstung wird extern über mittlere Monatswerte bereitgestellt, entsprechend der geodätischen Höhe korrigiert und zu Tageswerten disaggregiert. Die reale Verdunstung wird in Abhängigkeit von der Wasser-Verfügbarkeit im Boden als reduzierter Wert der potentiellen Verdunstung erhalten. Der Wasserüberschuss im Boden (Bodenabflussbildung) wird mittels einer exponentiellen Beziehung aus der relativen Bodenfeuchte ermittelt. Eine sogenannte „Runoff-Response-Funktion“, bestehend aus zwei in Reihe geschalteten Speichern transformiert diesen Überschuss in die drei Abflusskomponenten: Oberflächenabfluss, Interflow und Basisabfluss (siehe Abb. 2.3). Für das „River-Routing“ kann entweder das Muskingum Verfahren oder eine einfache zeitliche Verschiebung verwendet werden.

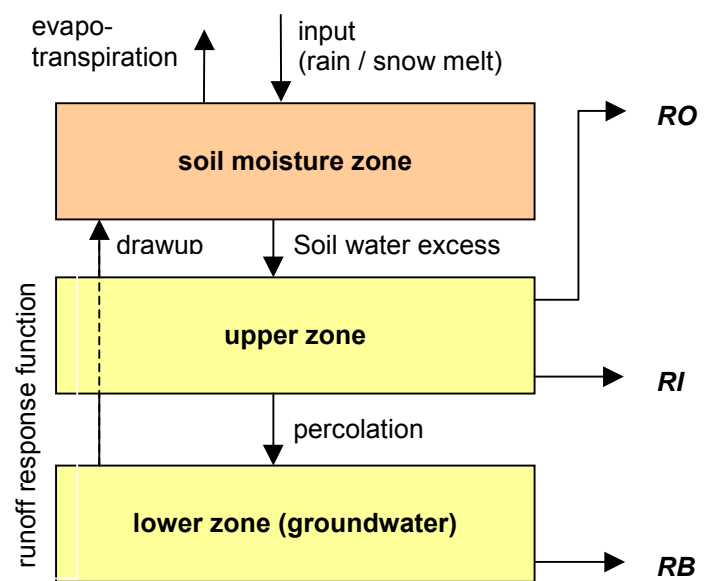


Abb. 2.3: Schema für die vertikale Wasserbilanz von HBV

2.4 MONERIS

Zur Ermittlung der Nährstoffeinträge über die verschiedenen punktuellen und diffusen Eintragspfade in die Teileinzugsgebiete des deutschen Elbeeinzugsgebiets wurde das Modell MONERIS (MOdelling Nutrient Emissions in River Systems) angewendet. An dieser Stelle wird nur auf das Grundprinzip von MONERIS eingegangen. Eine kurze Beschreibung der verwendeten Ansätze ist im Kapiteln 8 zu finden. Für eine ausführliche Diskussion der Grundlagen des Modells wird auf Behrendt et al. (1999) verwiesen.

Die Grundlagen für das Modell bilden einerseits Abfluss- und Gütedaten der zu untersuchenden Flussgebiete sowie ein Geographisches Informationssystem (GIS), in das sowohl digitale Karten als auch umfangreiche statistische Informationen integriert wurden. Während die punktuellen Einträge aus kommunalen Kläranlagen und von industriellen Einleitern direkt in die Flüsse gelangen, ergeben sich die diffusen Einträge von Nährstoffen in die Oberflächengewässer aus der Summe verschiedener Eintragspfade, die über die einzelnen Komponenten des Abflusses realisiert werden. Die Unterscheidung in Einträge über diese einzelnen Komponenten ist notwendig, da sich ihre Stoffkonzentrationen und die dem Eintrag zugrunde liegenden Prozesse zumeist stark voneinander unterscheiden. Demzufolge sind mindestens sieben verschiedene Pfade zu berücksichtigen (Abb. 2.4):

- Punktquellen
- atmosphärische Deposition
- Erosion
- Abschwemmung
- Grundwasser
- Dränagen
- versiegelte urbane Flächen

Auf den diffusen Eintragswegen unterliegen die Stoffe mannigfaltigen Transformations-, Verlust- und Rückhalteprozessen. Um die Nährstoffeinträge in ihrer Abhängigkeit von der Ursache quantifizieren und damit auch vorhersagen zu können, sind Kenntnisse der Transformations- und Rückhalteprozesse erforderlich. Diese können aufgrund des derzeitigen Wissensstandes, der zur Verfügung stehenden Datenbasis und der Größe der zu untersuchenden Gebiete nicht durch detaillierte dynamische Prozessmodelle gewonnen werden.

Mit MONERIS wurde versucht, vorhandene Ansätze zur großräumigen Modellierung der einzelnen Eintragspfade zu ergänzen, zu modifizieren und gegebenenfalls neue konzeptionelle Modelle abzuleiten. Besonderer Wert wurde bei der Modellentwicklung darauf gelegt, die verschiedenen Teilmodelle an unabhängigen Einzeldatensätzen, wie z. B. beim Grundwassermodell an den Grundwasserkonzentrationen, und nicht an den in den Flüssen gemessenen Nährstofffrachten zu validieren.

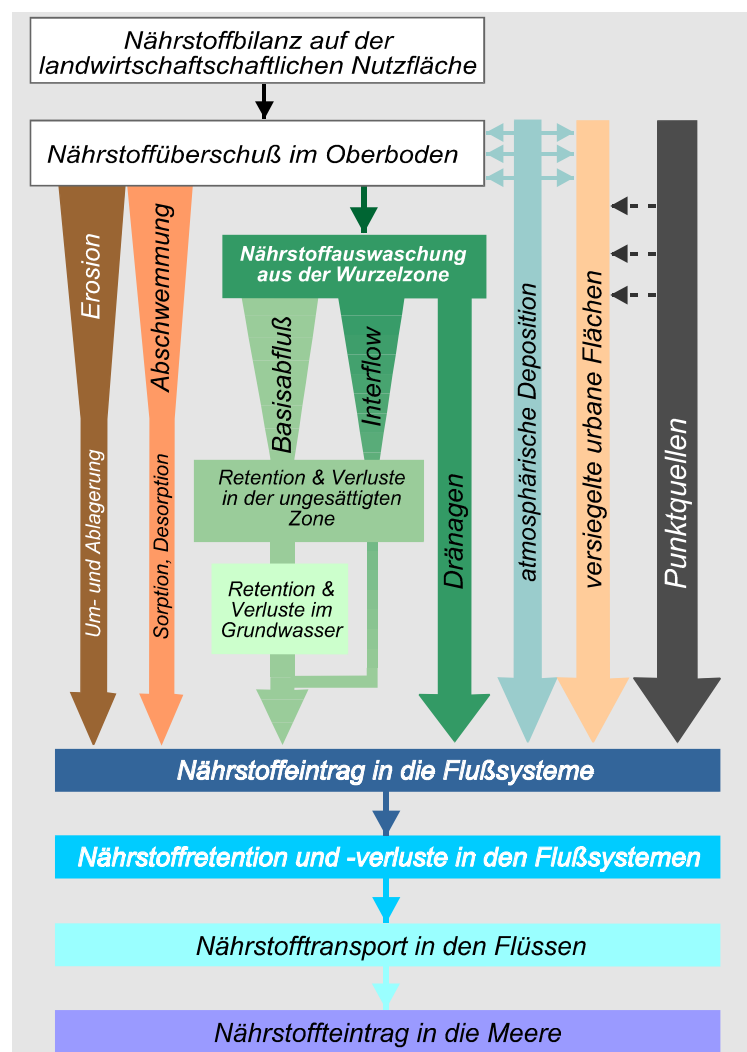


Abb. 2.4: Pfade und Prozesse von MONERIS

2.5 VWB

Ziel für die Entwicklung des Modells VWB („Vertical Water Balance“) war die Bereitstellung eines transparenten, robusten und effizienten hydrologischen Moduls (geringer Datenbedarf und minimale Rechenzeit) zur einfachen Implementation in Metamodelle oder Decision Support Systeme (siehe auch Kap. 10) für makroskalige Untersuchungen. VWB ist als ein konzeptionelles Modell zur Simulation des vertikalen Wasserhaushaltes auf Punkt- und Rasterbasis realisiert worden mit dem Primärziel einer ausreichend genauen Nachbildung von Monatszeitreihen der Versickerung und der Verdunstung unter Berücksichtigung detaillierter Landnutzungsbedingungen (z.B. Fruchtfolgen). Die Ergebnisse werden hauptsächlich als treibende Variablen für die weitere Berechnung ökologischer Indikatoren wie Stickstoff, Phosphor, Ernteerträge etc. und andererseits für eine schnelle Abschätzung der verfügbaren Wasserressourcen in großen Gebieten verwendet.

Als meteorologische Eingangsdaten werden tägliche Zeitreihen von Niederschlag, Temperatur und Globalstrahlung verwendet. An physikalischen Parametern werden Werte der gesättigten hydraulischen Leitfähigkeit, des Welkepunktes, der Feldkapazität, der Porosität und der effektiven Wurzeltiefe sowie der Blattflächenindex (Monatswerte) und die Albedo benötigt.

Die **Abb. 2.5** zeigt ein einfaches Schema des Modells, welches lediglich aus einem Schnee- und einem Bodenspeicher besteht. Die Ermittlung der potentiellen Grassreferenzverdunstung erfolgt nach Makink (zitiert bei DVWK, 1996) mit einer anschließenden Korrektur für abweichende Albedo andere Oberflächen (Dyck und Peschke, 1995, S.201). Die Schneeschmelze wird auf Basis des Tagesgradverfahrens und die Infiltration in Abhängigkeit von der Füllung des Bodenspeichers berechnet. Die Versickerung erfolgt nur oberhalb der Feldkapazität und wird in Anlehnung an das Einzellinenspeicherkonzept simuliert, wobei variable Speicherkonstanten, berechnet aus einer feuchteabhängigen hydraulischen Leitfähigkeit verwendet werden. Reale Evaporation und Transpiration werden mit feuchteabhängigen Reduktionsfunktionen aus der potentiellen Verdunstung ermittelt (Dyck und Peschke, 1995, S. 207). Oberflächenabfluss kann bei Infiltrations- und Sättigungsüberschuss gebildet werden, hat aber bei diesem Ansatz nur untergeordnete Bedeutung.

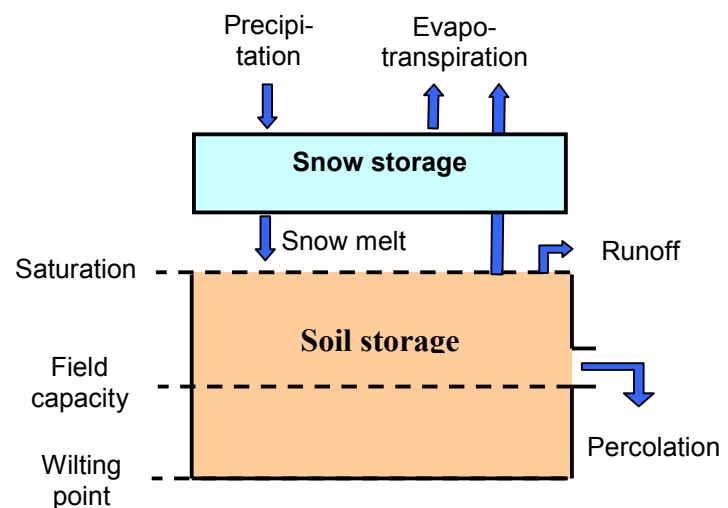


Abb. 2.5: Schema für die vertikale Wasserbilanz von VWB