

LANDNUTZUNGSÄNDERUNGEN UND WASSERBILANZ – MODELLIERUNG DES WASSERHAUSHALTES MIT DEM MODELL AKWA-M

Gabriele Müller und Albrecht Münch

Zusammenfassung

Die Landnutzung sowie ihre zeitliche und räumliche Variabilität besitzt für den Wasserhaushalt eine große Bedeutung. Mit dem Wasserhaushaltsmodell AKWA-M lässt sich der Einfluss der Landnutzung sowie deren Änderung beschreiben. Durch ein breites Spektrum von Anwendungsfällen und langjährige Erfahrungen konnte das Modell zu einem geeigneten Instrument zur Erfassung des Wasserdargebots entwickelt werden. Anhand des Einzugsgebietes Lange Bramke/Harz werden die Veränderungen der Wasserhaushaltskomponenten für einen aufwachsenden Fichtenbestand simuliert.

1. Wasserbilanz und Landnutzungsänderungen

Die Kenntnis der natürlichen Verteilung des Wassers nach Ort, Zeit, Menge und Beschaffenheit ist für ein weites Aufgabenspektrum erforderlich: Es reicht von der Wasserbereitstellung und -bewirtschaftung über den Wasserbau und Hochwasserschutz bis hin zu ökologischen Fragen. Der räumliche Bezug der Aufgaben umfasst sowohl lokale und regionale als auch globale Dimensionen. Nicht zuletzt gilt es, die Auswirkungen von Klima- und Landnutzungsänderungen auf den Wasserhaushalt zu quantifizieren.

Angesichts der zunehmenden Brisanz des Wasserproblems auf der Erde und im Hinblick auf die Auswirkungen möglicher Änderungen von Landnutzung und Klima genügen oft mittlere Wasserbilanzen nicht mehr. Vielmehr werden aktuelle Aussagen zur Dynamik der Wasserhaushaltsprozesse sowie zu deren einzelnen Komponenten gefordert, die sowohl den zeitlichen Horizont (z.B. einzelne Jahre oder Monate) als auch die räumliche Detailliertheit (z.B. geologische und pedologische Besonderheiten, die Landnutzung und deren Veränderung) umfassen. Den vielfältigen Forderungen lässt sich nur durch den Einsatz geeigneter Wasserhaushaltsmodelle gerecht werden. Dieses Hilfsmittel erlaubt nicht nur die Wirkungen der wichtigsten Einflussfaktoren auf den Wasserhaushalt zu erfassen, sondern über Szenariorechnungen Prognosen zur förderlichen oder beeinträchtigenden Entwicklung des Wasserhaushaltes zu geben und damit Entscheidungen vorzubereiten.

In diesem Beitrag wird das Wasserhaushaltsmodell AKWA-M vorgestellt und auf Erfahrungen einer breiten Anwendung eingegangen. Es wurde auf der Basis langjähriger Wasserhaushaltsforschung an der TU Dresden in den 80er und 90er Jahren als Modell AKWA (*Aktueller Wasserhaushalt*) entwickelt (Golf und Luckner, 1991; Golf et al., 1993). Eine sowohl inhaltliche wie auch technische Weiterentwicklung zur Variante AKWA-M erfuhr das Modell durch Münch (1994; 1998). Im Ergebnis liegt ein konzeptionelles Wasserhaushaltsmodell vor, das die teilflächenspezifische Berechnung mittlerer und aktueller Wasserbilanzen unter

besonderer Berücksichtigung der Landnutzung ermöglicht. Das Modell besitzt eine modulare Struktur, arbeitet mit Routinemessdaten und ist nutzerfreundlich, einfach handhabbar, praktikabel und robust.

2. Modell AKWA-M

2.1 Überblick

AKWA-M dient der kontinuierlichen Berechnung, Bilanzierung und Darstellung der wichtigsten Verdunstungs- und Abflusskomponenten sowie Speicherinhalte. Sein Hauptanwendungsbereich liegt in Einzugsgebieten des Mittelgebirges und dessen Vorländern mit einer Größe von ca. 1 bis 300 km². Grundsätzlich bietet das Modell jedoch auch für die Anwendung im Hochgebirge und im Lockergesteinsbereich geeignete Voraussetzungen (Müller und Münch, 1997; Dittrich et al., 1999; Dittrich et al., 2000).

Die *meteorologischen Eingangsdaten* können als Tageswerte, aber auch in Pentaden- und Dekadenschritten oder Monatswerten vorliegen. *Berechnungsschrittweite* ist ein Tag. Liegen die Eingangsdaten in anderer zeitlicher Diskretisierung vor, erfolgt programmintern eine Aufteilung in Tageswerte über Wichtungsfaktoren, die einen regionaltypischen Witterungsverlauf widerspiegeln. Die *Ergebnisse* – Verdunstungskomponenten, Zu- und Ausflüsse aus den Speichern sowie Speicherinhalte - sind als Tages-, Pentaden-, Dekaden-, Monats-, Halbjahres- und Jahreswerte zu vereinbaren. Durch die Berechnungsschrittweite „Tag“ lassen sich neben monatlichen oder jährlichen Wasserbilanzen auch innermonatliche Wasserhaushaltsgrößen in ausreichender Genauigkeit bereitstellen.

Zur Validierung des Modells dienen *Kontrolldaten*, die sowohl kontinuierlich (i.d.R. Durchflüsse) und/oder in Form von Terminwerten (z.B. Bodenfeuchten oder Quellschüttungen) vorliegen können. Zum Vergleich berechneter und gemessener Werte und zur Einschätzung der Simulationsgüte werden statistische *Gütekriterien* ermittelt.

Für die Berechnung des Wasserhaushaltes mit AKWA-M wird der fallende Niederschlag auf vertikal angeordnete Speicher, die unterschiedlich schnell durch Verdunstung ausgeschöpft werden bzw. auslaufen, aufgeteilt (Abb. 1). Maß für die mögliche Verdunstungsmenge je Zeitintervall ist die zu ermittelnde potentielle Verdunstung. Das im Gebiet herrschende Feuchteangebot entscheidet über die vollständige oder nur teilweise Umsetzung der verfügbaren Energie in die reale Verdunstung: Nacheinander kommt es zur Ausschöpfung der Energie durch die Komponenten Interzeption, Streu- und Schneverdunstung, Transpiration, Bodenverdunstung.

Das auf unterschiedlichen Wegen zum Vorfluter gelangende Wasser wird auf Direkt- und Basisabflussspeicher mit charakteristischem Auslaufverhalten verteilt. Die Summe dieser Abflusskomponenten bildet den Gesamtabfluss.

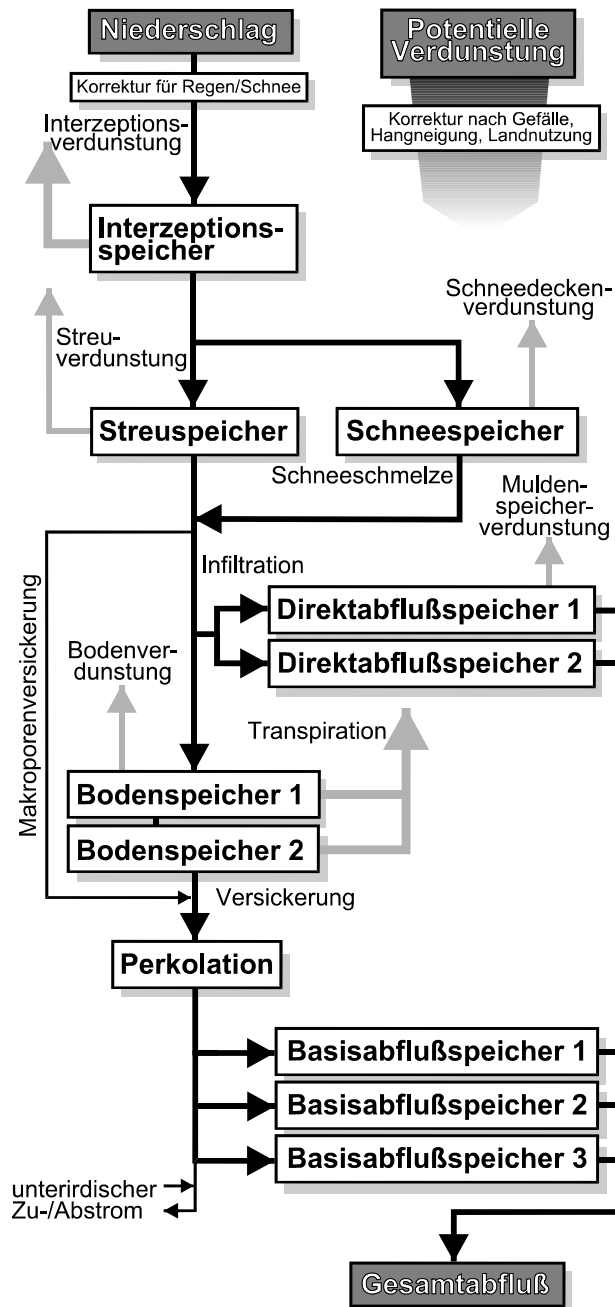


Abb. 1: Struktur von AKWA-M.

Das Modell ist als Blockmodell oder flächendifferenziert einsetzbar. Die lineare, flächengewichtete Superposition der Ergebnisse einzelner Teilflächen oder -gebiete ergibt das Ergebnis für das gesamte Gebiet. Die Gestalt der Teilflächen (z.B. Flächen gleicher hydrologischer Reaktion (Hydrotöpfe)) ist variabel, d.h. es bestehen keine Restriktionen hinsichtlich ihrer Form. Ein Lagebezug zwischen den Teilflächen wird nicht explizit berücksichtigt.

AKWA-M besitzt einen *modularen Aufbau*, wodurch eine flexible Anpassung an die Gegebenheiten der Anwendungsgebiete und an unterschiedliche Datensituationen gewährleistet wird. So kann für die Nachbildung eines Prozesses aus verschiedenen Berechnungsansätzen ausgewählt und die Abfolge der vertikal angeordneten Speicher

z.T. variabel gehandhabt werden. Ebenso sind Erweiterungen hinsichtlich der Vertikalgliederung und zusätzlicher Berechnungsansätze bzw. deren Austausch möglich. Ausführliche Beschreibungen zu den Berechnungsansätzen sind in Münch (1994; 1998) enthalten.

2.2 Berücksichtigung von Landnutzungsänderungen

AKWA-M berücksichtigt unterschiedliche Landnutzungstypen (Abb. 2). Das geschieht über vegetationsspezifische Parameter und deren Jahresgang bzw. über die Angabe von versiegelten und Wasserflächenanteilen. Waldflächen erhalten eine zusätzliche Abstufung entsprechend des Baumalters und des Grades der anthropogenen Beeinflussung. Änderungen der Landnutzung lassen sich durch eine Dynamik der entsprechenden Parameter über den Simulationszeitraum direkt in die Berechnung einbeziehen. So kann das reale Geschehen, insbesondere bei sukzessiven Änderungen, vorteilhaft verarbeitet werden.

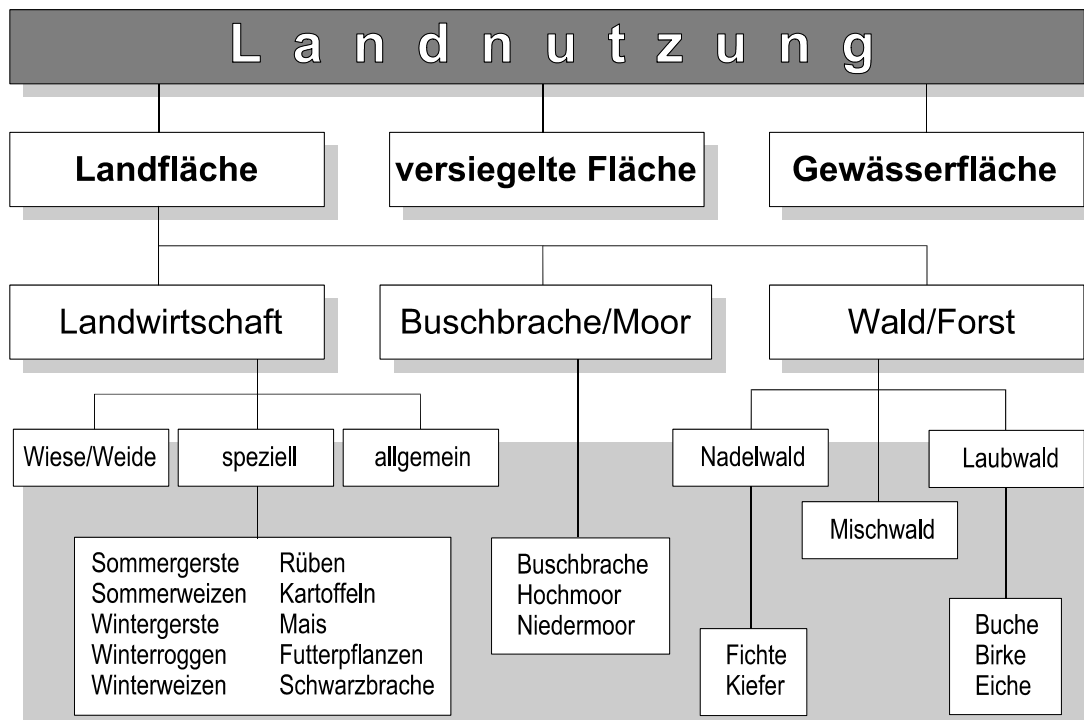


Abb. 2: Landnutzungen, die in AKWA-M berücksichtigt werden.

Abb. 3 zeigt die mittlere Wasserhaushaltsbilanz für einen Standort, dessen Landnutzung (Vegetation, Versiegelungsgrad) bei sonst gleichbleibenden Faktoren variiert wurde. Es wird deutlich, welche Bedeutung die Landnutzung für den Wasserhaushalt besitzt.

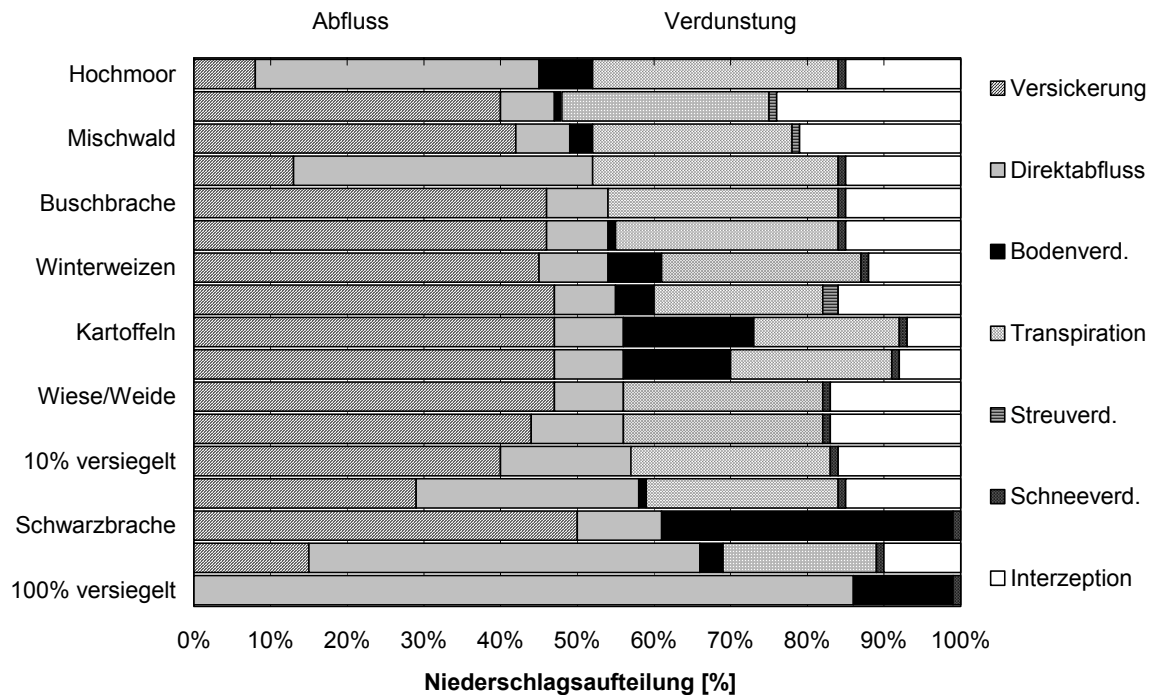


Abb. 3: Einfluss unterschiedlicher Landnutzungen auf Verdunstung und Abfluss sowie deren Komponenten.

3. Wasserhaushalt eines aufwachsenden Fichtenbestandes im Gebiet der Langen Bramke (Harz)

Das Einzugsgebiet der Langen Bramke (0,76 km²) wurde 1948 fast vollständig kahlgeschlagen und in den Folgejahren mit Fichtenmonokultur bestockt, ausgenommen einem teilweise stark vernässten Bereich der Talaue. Mitte der 50er Jahre war der Bestand zu einer Dickung herangewachsen, ab den 70er Jahren erfolgte der Übergang zum Stangenholz. Durch gleichzeitige Einrichtung von Messanlagen ist heute ein wertvolles Datenmaterial über eine Beobachtungsdauer von mehreren Jahrzehnten nutzbar (Liebscher, 1988).

Der Wasserhaushalt des aufwachsenden Fichtenbestandes wurde mit dem Modell AKWA-M über den Zeitraum von November 1948 bis Dezember 1986 berechnet. Das Gebiet wurde in einen Südosthang, einen Nordhang und den grundwasserbeeinflussten Talauenbereich untergliedert. Um das Aufwachsen des Bestandes in die Simulation einfließen zu lassen, bekam der Modellparameter „Wuchsklasse“, der die für Interzeption bzw. Transpiration verantwortlichen Größen Interzeptionsspeicher, Blattflächenindex und Wurzeltiefe beeinflusst, Werte zugewiesen, welche den ermittelten Bestockungsgraden entsprachen. Während der Simulation über den Gesamtzeitraum variierte die Wuchsklasse entsprechend des aufwachsenden Bestandes.

Die Modelleichung anhand gemessener Durchflüsse und der Ergebnisse aus der Ganglinien-analyse (Schwarze et al., 1991) erfolgte in den zwei Perioden, für welche relativ sichere Aussagen zum Entwicklungsstand des Waldes vorlagen (1949-53 und

1980-83). Mit dem kalibrierten Parametersatz wurde eine kontinuierliche Simulation über den Gesamtzeitraum durchgeführt.

Den Einfluss des aufwachsenden Bestandes auf den Wasserhaushalt dokumentieren sowohl der Abfluss als auch die Verdunstung. Der *Abfluss* aus dem Einzugsgebiet nahm von ca. 60 % des Niederschlages im Simulationszeitraum auf ca. 54 % ab. Im Mittel berechnete das Modell einen Abfluss $Q = 703 \text{ mm/a}$, der beobachtete Abfluss betrug $Q_{\text{BEO}} = 693 \text{ mm/a}$. Der Korrelationskoeffizient der simulierten und beobachteten Jahresabflüsse ergab sich zu 0,95. Abb. 4 zeigt die aktuellen Jahresabflüsse. Deutlich erkennbar und vom Modell gut wiedergegeben ist die hohe Dynamik in den einzelnen Jahren.

Die Entwicklung der *Verdunstung* lässt sich wie folgt beschreiben: Während des Aufwachsens des Bestandes stiegen die Gesamtverdunstung von anfänglich ca. 400 mm/a auf 550 bis 600 mm/a, die Interzeptionsverdunstung bzw. die Transpiration von etwa 50 bzw. 60 mm/a auf 280 bis 320 bzw. 250 bis 300 mm/a. Die infolge geringerer Interzeption bzw. Transpiration in den Anfangsjahren vorhandene „überschüssige“ Wassermenge kam jedoch nicht voll zum Abfluss, sondern verdunstete direkt aus dem Boden und durch die sich schnell ansiedelnde Bodenvegetation. Zunächst wurden dafür ca. 280 mm/a berechnet, bis Mitte der 60er Jahre ging dieser Betrag bis auf Null zurück. Die in den ersten Berechnungsjahren zu hoch simulierten Jahresabflüsse zeigen, dass diese Verdunstungsmenge durchaus noch größer sein kann.

Die Aufteilung des Niederschlages auf einzelne Verdunstungs- und Abflusskomponenten zeigt Abb. 5. Angegeben sind die 5-Jahresmittel. Deutlich ist die Zunahme der Verdunstung, speziell der Interzeption und der Transpiration auf Kosten der Boden- und Streuverdunstung und eines Teils des Abflusses (etwa 7 bis 10 % des Niederschlages). Den höchsten Anteil an der Verdunstung erreicht sehr schnell die Transpiration (rund ein Viertel des Niederschlages). Bei getrennter Betrachtung der Teilflächen liegt die Transpiration für die Teilfläche mit südöstlicher Exposition ab 1970 meist über 300 mm/a, während die nordexponierte Teilfläche diese Werte nur selten erreicht.

Zwei Szenariorechnungen geben darüber Auskunft, wie sich der Wasserhaushalt entwickelt hätte, wenn der Altbestand belassen bzw. das abgeholzte Gebiet nicht aufgeforstet, sondern als Wiesenfläche genutzt worden wäre. Durch den Kahlschlag flossen in den ersten zehn Jahren zwischen 80 und 180 mm/a mehr ab. Nach 1965 entspricht das Verdunstungsverhalten des aufwachsenden Bestandes bereits dem eines Altbestandes. Im Gegensatz dazu erzeugt eine unaufgeforstete Wiesenfläche im Mittel ca. 80 mm/a mehr Abfluss als der Fichtenbestand (Abb. 6).

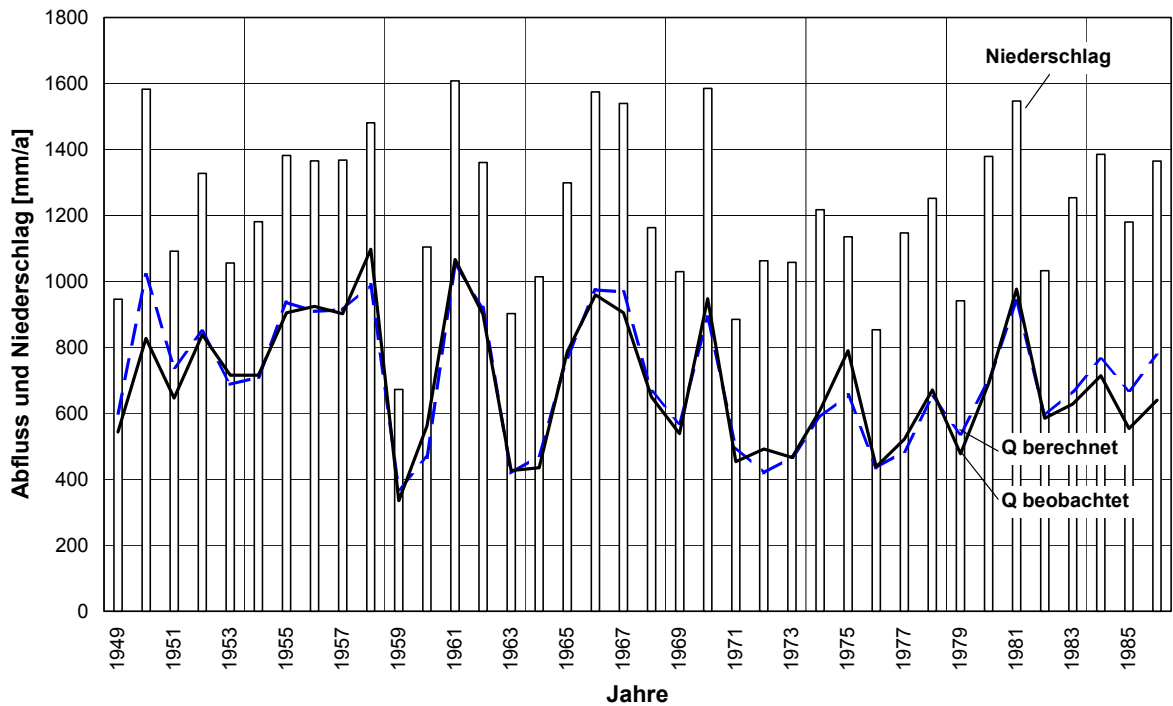


Abb. 4: Aktuelle Jahresabflüsse für das Gebiet der Langen Bramke, Simulationszeitraum 11/1948 - 12/1986.

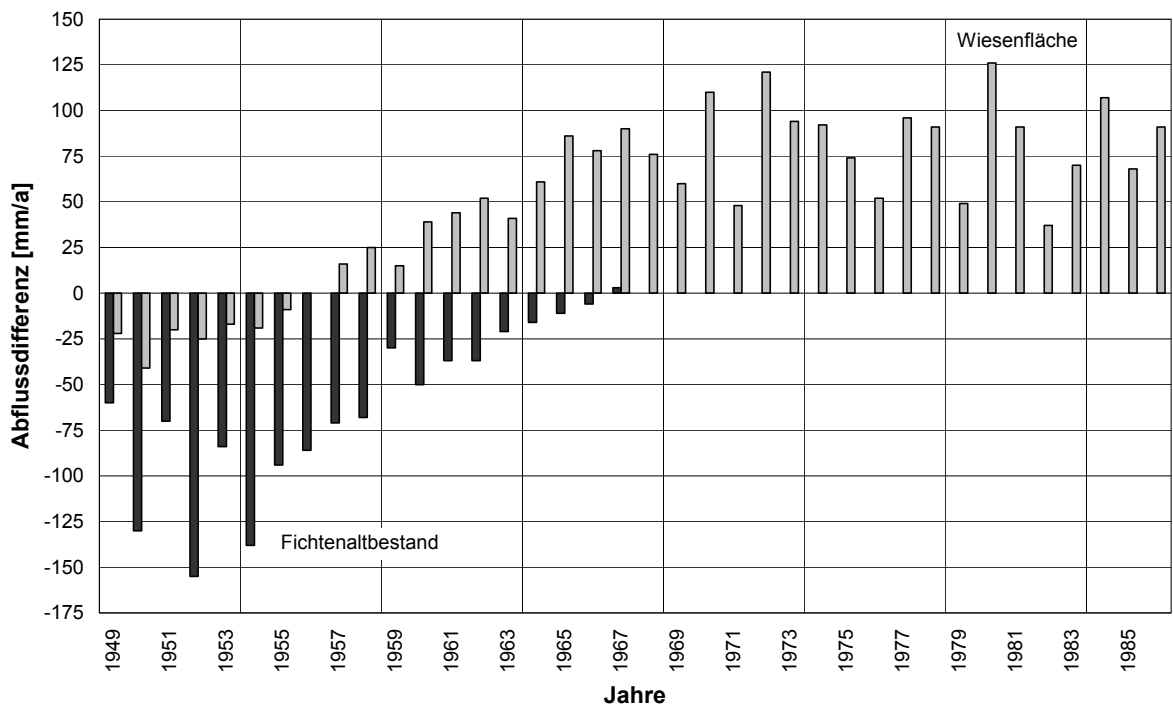


Abb. 5: Aufteilung des Niederschlages auf Verdunstungs- und Abflusskomponenten der Langen Bramke, berechnet mit AKWA-M als 5-Jahresmittel.

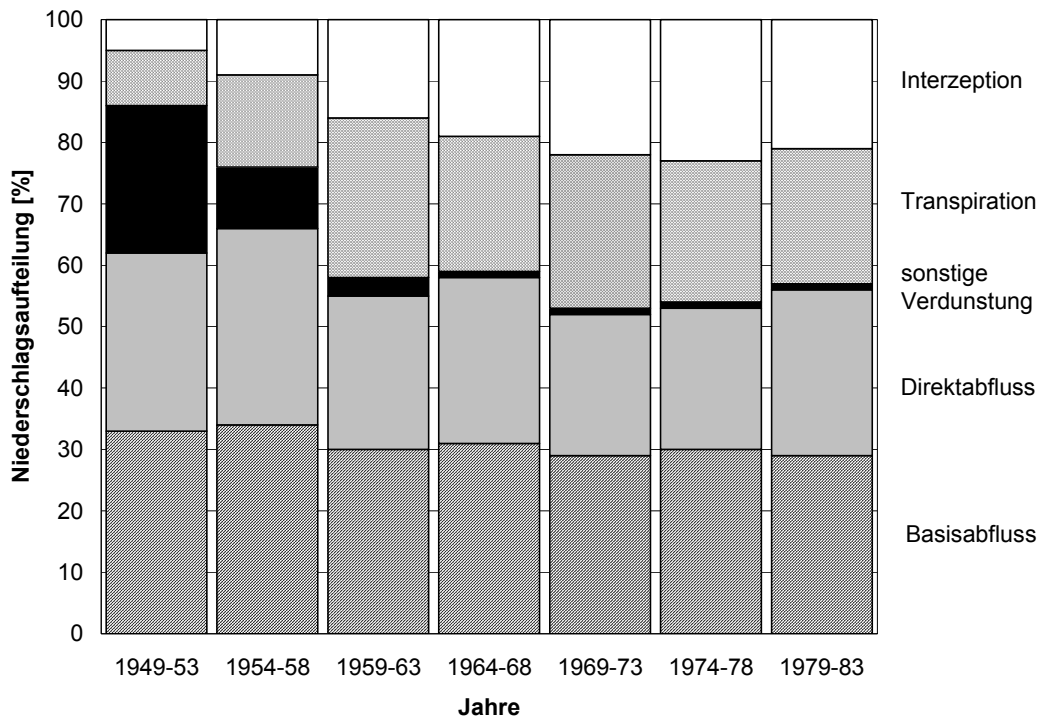


Abb. 6: Jahresabflussdifferenz der Szenarien „Fichtenaltbestand“ und „Wiesenfläche“ gegenüber den simulierten Werten für den aufwachsenden Fichtenbestand der Langen Bramke.

4. Erfahrungen mit AKWA-M

Nicht nur dieses Beispiel der Langen Bramke hat gezeigt, dass es mit einem Modell wie AKWA-M möglich ist, Auswirkungen von Landnutzungsänderungen auf den Wasserhaushalt berechnen zu können. Seit seiner Entwicklung hat AKWA-M eine breite Anwendung gefunden (Münch 1994; Müller und Münch 1997). Die Palette der bearbeiteten Aufgaben umfasst sowohl Forschungsthemen wie auch praktische Fragestellungen (siehe Tab. 1): Sie reicht vom Prozessstudium zum Wasserhaushalt über die gemeinsame Betrachtung von Wasser- und Stoffhaushalt bis zur Wasserdargebotsermittlung für unbeobachtete und anthropogen beeinflusste Gebiete. Die Mehrzahl der bisherigen Anwendungen war im Festgesteinsbereich der Mittelgebirge und seiner Vorländer angesiedelt. Die Speicheransätze, auf denen das Modell größtenteils beruht, sind dafür gut geeignet.

Die Erfahrungen bestätigen darüber hinaus die Anwendbarkeit von AKWA-M auch für Fragestellungen im Lockergesteinsbereich. Um den hier vorliegenden natürlichen Gegebenheiten Rechnung zu tragen, müssen zusätzlich die Wechselwirkungen mit den Grundwasserleitern beachtet und bilanziert werden. Die teilflächenspezifisch berechnete Grundwasserneubildung kann als Input für instationäre Grundwasserleitermodelle übernommen werden. In Verbindung mit Grundwasserleiter- und Seenmodellen sowie teilgebietsbezogener Betrachtung und Bilanzierung eignet sich AKWA-M auch für die Bearbeitung von Gebieten mit intensiven Wechselwirkungen zwischen Grundwasser und Oberflächengewässern (Seen, Talsperren).

Tab. 1: Beispiele für Anwendungsbereiche des Modells AKWA-M.

Problemkreis/Anwendungsbereich	Beispiel
Modellgestützte Untersuchungen zu Wasserhaushaltsprozessen und ihren Einflussfaktoren	hydrologisches Versuchsgebiet Wernersbach/ Tharandter Wald der TU Dresden
Hydrologische Erstbeurteilung und hydrologisch-wasserwirtschaftliche Analyse für unbeobachtete bzw. stark anthropogen beeinflusste Gebiete	Naturschutzgebiete „Oberlausitzer Heide- und Teichlandschaft“, „Niederspree“, „Presseler Heidewald- und Moorgebiet“; Kaitzbach-Einzugsgebiet im Randgebiet der Stadt Dresden,
Schlagbezogene Modellierung des Wasserhaushaltes im landwirtschaftlich genutzten Wassereinzugsgebiet einer Trinkwassertalsperre	Talsperre Saidenbach/Erzgebirge
Wasserhaushaltsuntersuchungen im ausschließlich forstlich genutzten Einzugsgebiet einer Trinkwassertalsperre	Talsperre Neunzehnhain/Erzgebirge
Erfassung von Landnutzungsänderungen und ihres möglichen Einflusses auf den Wasserhaushalt	Einzugsgebiete im Erzgebirge, Harz und Hessischen Bergland; Regenwasserver-sickerungsanlagen in Dresden
Erfassung des Wasserdargebots, Abschätzung der Grundwasserneubildung und der Zehr-wirkung von Seen in Gebieten des Lockergesteinsbereiches	Wentowgewässer, Werbellinseegebiet (Brandenburg)
Ermittlung von Wasserhaushaltskomponenten als Grundlage für die Anwendung von Stoffauswaschungsmodellen	Einzugsgebiete im Erzgebirge und im Lößhügelland bei Meißen (Sachsen)

Sowohl im Tiefland wie auch generell bei größeren Einzugsgebieten sind Translationsprozesse nicht mehr zu vernachlässigen. Die Kopplung mit einem Flusslaufmodell ist darum sinnvoll. Eine Alternative dazu besteht in einer teilgebietsbezogenen Anwendung von AKWA-M in einem Flussgebiet mit anschließendem Zusammenschalten der Ergebnisse entsprechend ihrer Translationszeit.

Für eine Anwendung des Modells für Gebiete im Hochgebirge sind die Voraussetzungen gegeben. Entsprechend den extremeren Bedingungen, der Höhenverteilung des Gebietes, dem stärkeren Gefälle und der alpinen Vegetation sind örtliche Anpassungen vorzunehmen. Das betrifft die Gebietsgliederung in Teilflächen, die Wahl der Kennwerte und Parameter oder auch die Auswahl von geeigneteren Berechnungsansätzen für Schneeschmelze, Verdunstung und Abflussbildung.

Insgesamt bestätigen die bisherigen Erfahrungen das Modell AKWA-M als ein geeignetes Instrument zur Erfassung des Wasserhaushaltes und zur Bewertung der vergangenen, gegenwärtigen und zukünftigen Situation. Die enge Verbindung von Erfahrungsträgern der Modellierung einerseits und Entscheidungsgremien (Behörden, Firmen) andererseits führen zu effektiven Lösungen bei Modellanwendungen. Künftige Weiterentwicklungen sollten sich sowohl auf oben genannte inhaltliche Aspekte als auch auf die Software konzentrieren. Der Parameterzusammenstellung für die Landnutzung auf Grundlage neuester wissenschaftlicher Erkenntnisse und deren Integration in die AKWA-M-Struktur kommt dabei große Bedeutung zu.

5. Literatur

Dittrich, I. und A. Münch (1999) Künstliche Niederschlagsversickerung und die Änderung der Grundwasserneubildung. *Wasser und Boden*, 51/9, 11-15.

Dittrich, I., S. Kleber und A. Münch (1999) Pflege- und Entwicklungsplan Naturschutzgroßprojekt „Presseler Heidewald- und Moorgebiet“ – Abiotische Verhältnisse. Dr. Dittrich & Partner Hydro-Consult GmbH, Bannewitz.

Dittrich, I. und A. Münch (2000) Pflege- und Entwicklungsplan Naturschutzgroßprojekt „Teichgebiete Niederspree-Hammerstadt“ – Abiotische Grundlagen und Randbedingungen. Dr. Dittrich & Partner Hydro-Consult GmbH, Bannewitz.

Golf, W. und K. Luckner (1991) AKWA - ein Modell zur Berechnung aktueller Wasserhaushaltsbilanzen kleiner Einzugsgebiete im Erzgebirge. *Acta Hydrophysica* 32 (1), 5-20.

Golf, W., K. Luckner und A. Münch (1993) Berechnung der Waldverdunstung im Wasserhaushaltsmodell AKWA. *Meteorologische Zeitschrift* 2 (3), 99-107.

Liebscher, H.-J. (1988) Oberharzer Versuchsgebiete: Bericht über die Untersuchungen in den Jahren 1981 bis 1985. Mitt. der Bundesanstalt für Gewässerkunde Koblenz.

Münch, A. (1994) Wasserhaushaltsberechnungen für Mittelgebirgseinzugsgebiete unter Berücksichtigung einer sich ändernden Landnutzung. Diss., TU Dresden, Fak. f. Forst-, Geo- u. Hydrowissenschaften.

Müller, G. und A. Münch (1997) Wasserhaushaltsmodellierung in Einzugsgebieten des Fest- und Lockergesteins mit dem Modell AKWA-M. Tagungsband „Modellierung in der Hydrologie“, Dresden, 191-200.

Münch, A. (1998) Wasserhaushaltsmodell AKWA-M. Programmdokumentation Version 2.3. Dr. Dittrich & Partner Hydro-Consult GmbH, Bannewitz (unveröff.).

Schwarze, R., A. Herrmann, A. Münch, U. Grünwald und M. Schöniger (1991) Rechnergestützte Analyse von Abflusskomponenten und Verweilzeiten in kleinen Einzugsgebieten. *Acta Hydrophysica* 35, Heft 2, 143-184, Berlin.

Anschrift der Verfasser:

Dr. Gabriele Müller
Bundesministerium f. Land- u. Forstwirtschaft, Umwelt u. Wasserwirtschaft -
Hydrographisches Zentralbüro
Marxergasse 2
A - 1030 Wien
Tel. +43 1 / 711 00 - 6930
E-mail: Gabriele.Mueller@bmlfuw.gv.at

Dr. Albrecht Münch
Dr. Dittrich & Partner Hydro-Consult GmbH
Gerlinger Str. 4
D - 01728 Bannewitz
E-mail: Hydro-Consult@t-online.de

