

## 5 GIS-Methoden zur Gefährdungsabschätzung

Die Wasserqualität der Brunnen ist vom Landschaftshaushalt in ihren Einzugsgebieten abhängig. Nur eine möglichst ganzheitliche Betrachtungsweise des Wirkungsgefüges aus Klima, naturräumlicher Ausstattung, Vegetation und Flächenbewirtschaftung führt zu einem ausreichenden Verständnis natürlicher Funktionen und Wechselbeziehungen und bildet die Grundlage für die Interpretation und Bewertung der zeitlichen und räumlichen Ausprägungen der Brunnenwasserbeschaffenheit (vgl. Abb. 2-8).

Eine realitätsnahe Abbildung dieser Prozesse in Modellen ist dabei häufig sehr schwierig. REFSGARD (1981) beschreibt ein Einzugsgebiet als „ein extrem kompliziertes Natursystem, von dem wir nicht annehmen können, es exakt in allen Details beschreiben zu können“.

Durch im Rahmen der Konfiguration der Sektion Hydrogeologie zur Verfügung stehenden GIS-Methoden und –Werkzeuge (Abschn. 2, Abschn. 5.1) und die gezielte Entwicklung zusätzlicher GIS-Instrumentarien soll eine Methodik angewendet werden, die eine detaillierte und effektive Analyse der Wechselbeziehungen natürlicher und anthropogener Standortfaktoren einschließlich des Landschaftswasserhaushalts ermöglicht (Abschn. 5.1.2, 5.2 ff) und über den Untersuchungszeitraum hinaus als Grundlage für eine gesicherte Bewertung und Gefährdungsabschätzung der Brunnenwasserqualität dient (Abschn. 8). Eine vollständige und komplexe Erfassung von Teilprozessen des Landschaftshaushalts und der (Stick-)Stoffdynamik in den Brunneneinzugsgebieten ist dabei nicht möglich. Diese Lücke müssen eigens dafür entwickelte deterministische Modelle wie u.a. „MINERVA“ (BEBLIK, KERSEBAUM & RICHTER, 1997), „EXPERTN“ (BALDIOLI et.al., 1997) oder „CANDY“ (FRANKO, OELSCHLÄGEL & SCHENK, 1997) füllen.

### 5.1 Analysen zum Naturraum

Basis für die Abbildung der Dynamik des Landschaftshaushalts im Untersuchungsraum ist die Erfassung des Reliefs in einem Digitalen Höhenmodell (DHM) und folgend in einem Digitalen Geländemodell (DGM).

In der Literatur sind die Begriffe DHM und DGM sehr unterschiedlichen Datenmodellen zugeordnet. Dabei wird unter einem DHM im Allgemeinen eine digitale Vorhaltung von Höhenwerten über NN in einem Landschaftsausschnitt verstanden (EBENER, 1992; REINHARDT, 1991; WAIBEL, 1990). Unter einem DGM ist u.a. nach REINHARDT (1991) ausschließlich die Erfassung der Datenmenge gefasst, die eine flächenhafte Beschreibung des Geländes gestattet.

Im weiteren Sinne kann durch ein DGM auch ein Programmpaket zur Berechnung der Geländeoberfläche bzw. zur Ableitung von Folgeprodukten umschrieben werden (WIESER, 1992). JÜPNER (1991), KAMMERER (1987) und STANGER (1982) verstehen ein DGM als Vereinigung eines „digitalen Höhenmodells“ mit einem „digitalen Situationsmodell“, wobei STEPHANI

(1975) unter einem DHM die Menge der digital gespeicherten Höhenwerte, die als Funktion der Lage der Punkte die Höhenstruktur des Objektes hinreichend repräsentieren und unter einem DSM die Menge der Informationen, die jedem Grundrisselement zugeordnet sind, fasst.

Unter dem Begriff DGM wird im Rahmen dieser Arbeit ein Datenmodell im Sinne der zuletzt aufgeführten Definition verstanden, welches das Oberflächenrelief durch Interpolationsverfahren aus den digitalisierten Höhendaten einschließlich der zugeordneten morphologischen Strukturen (u.a. Höhenlinie, Böschung, Bruchkante, Damm, Uferlinie) beschreibt und zur Ableitung von Reliefparametern (Abschn. 5.1.2) dient.

### 5.1.1 Generierung des Digitalen Geländemodells

Zur digitalen Erfassung von Höhendaten einschließlich zugeordneter Reliefstrukturen können unterschiedliche Verfahren angewendet werden:

- tachymetrische durch direkte Höheneinmessungen im Gelände u.a. mittels GLOBAL POSITION SYSTEM (GPS)
- photogrammetrische durch die Auswertung von Stereomodellen z.B. mit dem ORTHOMAX-TOOL von IMAGINE 8.3 (ERDAS, 1998)
- Digitalisierung von Höheninformationen aus Thematischen Karten z.B. der TK10

Die genannten Arten der Datenerfassung weisen in Abhängigkeit vom Generierungsmaßstab qualitative Unterschiede auf, die u.a. bei FRIEDRICH (1996), WERNER (1995) und LIPPOLD (1995) diskutiert werden. Die Erzeugung des DHM auf photogrammetrischer Basis war auf Grund mangelnder Stereoluftbilder nicht möglich. Tachymetrische Verfahren konnten wegen des zu hohen Zeit- und Kostenaufwandes nicht angewendet werden. Zudem stand für den Untersuchungsraum im Rahmen des Amtlichen Topographisch-Kartographischen Informationssystems (ATKIS) des Landesvermessungsamtes Sachsen kein DHM zur Verfügung. Selbst bei Vorhandensein wären die Kosten für diese Daten zu hoch und die Genauigkeit des in Sachsen im Aufbau befindlichen DHM/M745 zu gering gewesen (Höhengenauigkeit im Gebirge  $\pm 15$  m, Netzpunktabstand 25 m, fehlende Feinmorphologie).

Abb. 5-1 zeigt für einen kleinen Ausschnitt den Weg zur Erstellung des DGM Saidenbachtalsperre von der Digitalisierung der Höheninformationen aus 6 Blattschnitten der TK10 (vgl. Abschn. 2.2) bis zur Ableitung von DGM-Folgeprodukten (Abschn. 5.1.2). Das berechnete DGM entspricht einer Fläche von 196,2 km<sup>2</sup>. Auf Grund der starken Reliefertheit des Untersuchungsraums, ausgedrückt durch relativ große Höhenunterschiede und einen hohen Anteil feinmorphologischer Strukturen insbesondere im Bereich der Stauhaltungen (Abb. 5-2), war der Zeitaufwand bis zur Fertigstellung des DGM relativ hoch (etwa 4 Monate). Jedes der 7369 Linien-, 588 Punkt- und 339 Polygonelemente des DHM wurde mit Höhenzuweisung (DHM) und zugehöriger morphologischer Struktur (DSM) digitalisiert. ESRI stellt zehn Varianten zur Verfügung, um die verschiedenen morphologischen Ausprägungen der Kartenele-

mente bei der Interpolation der Geländeoberfläche in ein 2,5- dimensionales Geländemodell zu berücksichtigen (u.a. ESRI, 1998; THÜRKOW, 1994). Dabei erfolgt zunächst eine lineare Interpolation der Rohdaten zu einer Dreiecksvermaschung (TIN /TRIANGULATED IRREGULAR NETWORK), bestehend aus unregelmäßigen Dreiecken. ARCINFO (1998) und ARCVIEW (1998) realisieren die Generierung dieses Datenmodells nach dem DELAUNY-Kriterium (vgl. ESRI, 1998 bzw. Onlinedokumentationen zur GIS-Software). Ein gedachter Kreis um ein Dreieck herum sollte danach keinen weiteren Stützpunkt enthalten, um möglichst gleichwinklige Dreiecke zu erzeugen. In Kartenbereichen großer Höhenlinienabstände kann dieses Kriterium nicht eingehalten werden und bei der Interpolation entstehen spitzwinklige Dreiecke. Um Fehlinterpolationen zu reduzieren, erfolgte in solchen Rohdatenbereichen eine zusätzliche Einbindung von Höhenpunkten und Höhenlinien nach eigenem Ermessen.

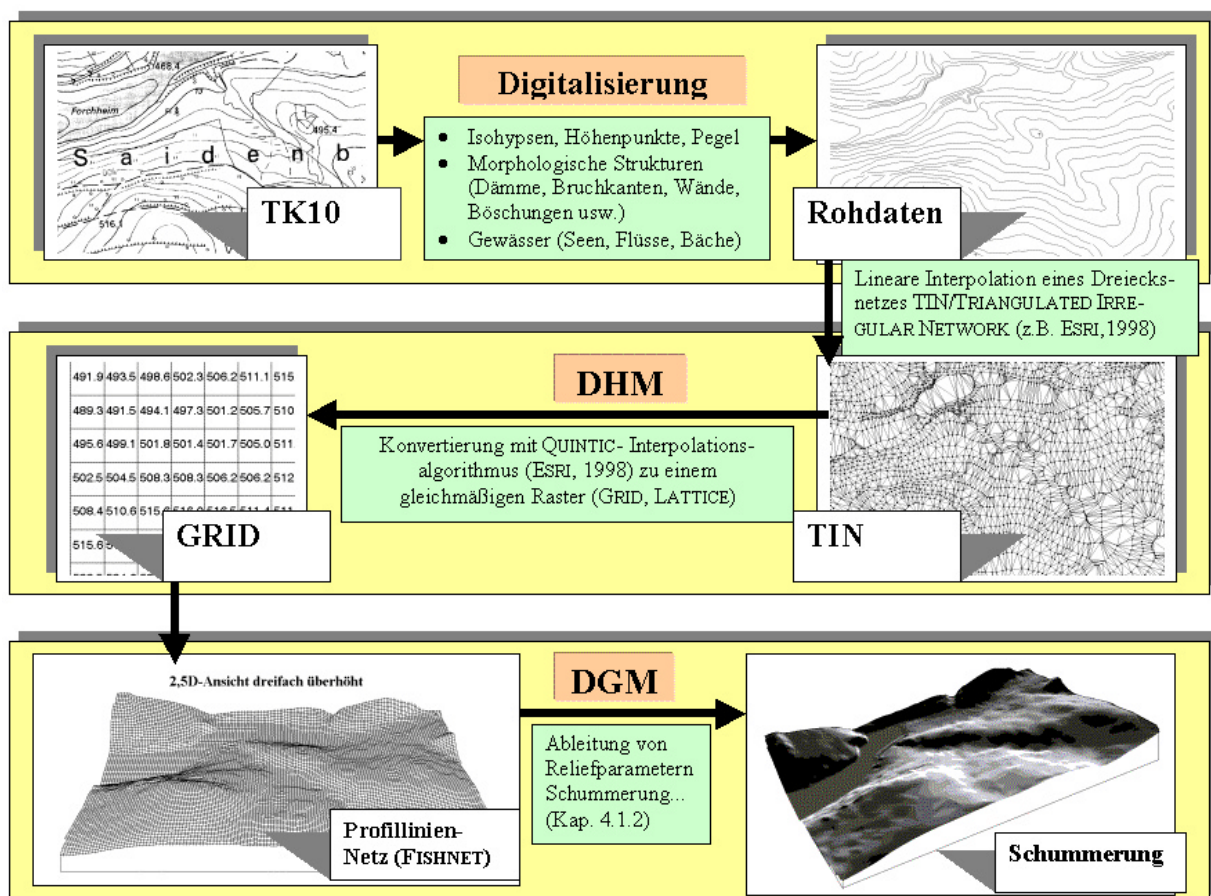


Abb. 5-1: Weg zum DGM

Eine zweite Möglichkeit der Datenspeicherung ist das GRID. Für die Erzeugung dieses Datenmodells wurde der biliniare Quintic- Interpolationsalgorithmus (u.a. ESRI, 1998) verwendet. Das generierte Raster ist standardmäßig ein FLOATING-POINT-GRID. Für das DGM des Untersuchungsraums wurde eine Kantenlänge der Rasterzellen von 5\*5 Metern gewählt (DGM5). Die Speicherung der Höhe erfolgt mit Dezimalstellen in der Mitte jeder Rasterzelle. Optional ist auch die Ausgabe eines speicherplatzsparenden Rasters (INTEGER-GRID) möglich. In diesem Fall repräsentiert jede Rasterzelle eine gerundete Höhe ohne Angabe hinter dem Komma.

Eine weitere Möglichkeit der Datenstruktur ist in der Kopplung von TIN und GRID in einem HYBRID gegeben (u.a. WIESER, 1992). Verbreitet angewendete Darstellungen von DGM sind diagonal verlaufende Profillinien in einem Maschennetz, aber auch die Darstellung über Grauwerte in Abhängigkeit von Beleuchtungsrichtung und -höhe in sogenannten Schummernungsmodellen (Abb. 5-1).

Aus Vorlagen digitalisierte Höheninformationen sind, wie photogrammetrische Verfahren auch, teilweise kritisch zu betrachten. Die Höheninformationen aus der Digitalisiervorlage (TK10) des DGM stellen ein Modell dar, dessen Qualität mit Ausnahme vereinzelter Überprüfungen übernommen wurde. Allerdings ergaben durch GPS- Einmessungen der Referenzbrunnen gewonnene 30 Höhenkontrollpunkte beim OVERLAYING mit den Geländehöhen aus dem DGM eine zufriedenstellende Standardabweichung des DGM von 1,33 Metern.

Beim Digitalisieren selbst ist ein hohes Fehlerpotential gegeben (Abschn. 2.2). Dies trifft sowohl auf räumliche Abweichungen bei der Editierung der Elemente wie auch auf die spezifische Zuweisung der Geländehöhen zu. Besonders problematisch ist die Erfassung der Höhen und Ausprägungen einiger morphologischer Strukturen im Modell, die in der Regel bei der Interpolation „streng“ berücksichtigt werden sollen (u.a. ESRI, 1998; LIPPOLD, 1995; THÜRKOW, 1994), um ein realitätsnahes Abbild des Reliefs zu erzeugen. Dazu zählen u.a. Flach- und Steilböschungen, Kanten, Hohlformen, Wälle, (Wand-) Stufen und (Stau-) Dämme. Für diese Elemente ist eine aufwendige Digitalisierung der jeweiligen Ober- und Unterkanten notwendig. Bei einer Digitalisiervorlage im Maßstab von 1:10.000 (1mm auf der Karte  $\equiv$  10 Meter im Gelände) ist das ein erhebliches Problem. Teilweise muss die Oberkante sogar noch einmal dupliziert werden, um die morphologische Struktur einigermaßen abzubilden (z.B. Staumauer, Wall). Wünschenswert wären deshalb Möglichkeiten zur halbautomatischen und maßstabsunabhängigen Einbindung solcher Elemente über einen „Katalog“ ähnlich einer Formatvorlage, der die Auswahl und Zuweisung spezifischer Strukturen ermöglicht. Ferner stellt die verwendete Software keine standardisierten Funktionen zur Verfügung, mittels implementierter Interpolationsalgorithmen eine automatisierte Höhenzuweisung an diesen Elementen aus Höhendaten „benachbarter“ Rohdaten vorzunehmen. Auch hier ist der Arbeitsaufwand enorm. Um die Höhendifferenzen innerhalb dieser Strukturen zu erfassen, wurden entweder die Linienelemente (ARCS) in penibler Kleinarbeit geteilt (SPLIT-Funktion; Abb. 5-2) oder eigens entwickelte Methoden angewendet, die eine Interpolation der jeweiligen Höhe der morphologischen Strukturen aus „Behelfshöhenpunkten“ ermöglichen. In jedem Fall folgen Strukturen- und Höhenzuweisungen dieser Elemente dem Interpretationsspielraum des Bearbeiters. Nicht selten sind zwangsläufig fehlerhafte Erfassungen der Geländestrukturen und -höhen im Modell die Folge, die sich u.a. in realitätsfernen Stufenbildungen und Ausbildungen von Senken und Hohlformen äußern.

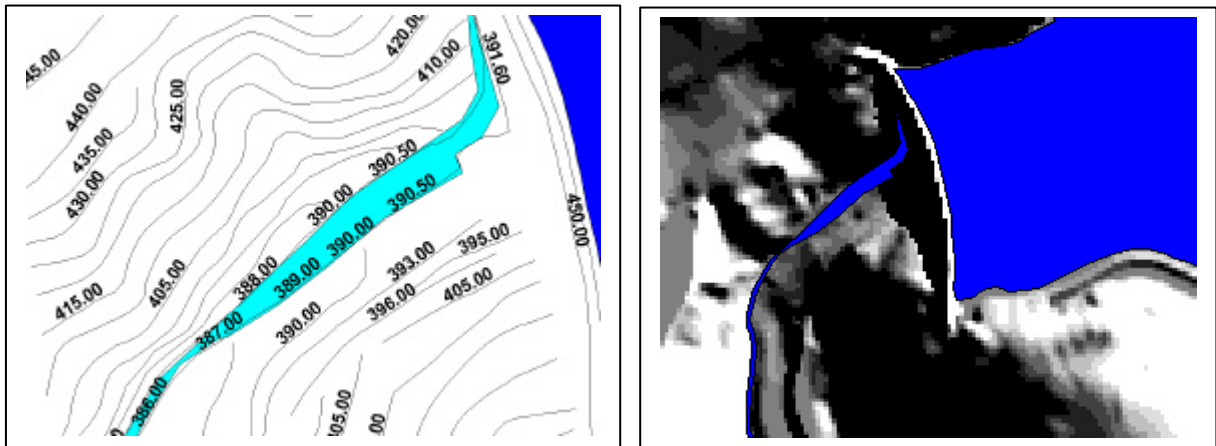


Abb. 5-2: Aufwändige und generalisierte Höhenerfassung morphologischer Strukturen am Beispiel des Stau-  
mauerfußes der Saidenbachtalsperre

Umfangreiche Fehleranalysen- und Korrekturen des DGM waren notwendig, bevor das Modell als Grundlage für weitere Reliefparameterableitungen diente. Für das Erkennen von Fehlern bieten sich eine Vielzahl von GIS-Operationen. Einige Möglichkeiten sind nachfolgend aufgeführt.

Aus dem berechneten DGM lassen sich mittels CONTOUR- Funktionen Isohypsenkarten berechnen, die bei gleichzeitiger Sichtung der Original- Isolinien der georeferenzierten TK10 im Hintergrund abweichende Höhen und Strukturen erkennbar machen. Sehr wirkungsvoll ist eine Fehleranalyse durch das Generieren von Beleuchtungsmodellen (analytischen Schumierungen), da durch eine unverzerrte Grundrissdarstellung des Reliefs große Fehler bei der Datenbelegung und der Interpolation des DGM sofort sichtbar werden. Eine weitere Möglichkeit der Fehlerbestimmung besteht in der Extraktion von Fließgerinnen. Werden lokal zu definierende Schwellenwerte in der räumlichen (horizontalen) Abweichung von interpoliertem und digitalisiertem Gewässernetz unverbauter Wasserläufe überschritten, ist das DGM an dieser Stelle fehlerhaft und muss überarbeitet werden. Abflusslose Senken (Hohlformen) sind durch SINK und FILL- Funktionen lokalisiert und aufgefüllt worden. Sie sind für die naturräumlichen Gegebenheiten im Untersuchungsraum untypisch (Abschn. 3.6). Das gefilterte DGM ist Basis für alle weiteren Berechnungen.

Die Speicherung der Höhendaten in Rastern ist sehr effizient. Eine Vielzahl von Geländeparametern lässt sich schnell und mit geringem Aufwand berechnen. Rastermodelle sind jedoch auch mit einigen Nachteilen behaftet, die für fehlerreduzierte Geländeinterpretationen berücksichtigt werden müssen. Wird das DGM beispielsweise durch RESAMPLE- Funktionen in große Maschenweiten überführt (z.B. 100\*100 Meter), ist mit schwerwiegenden Informationsverlusten zu rechnen, da eine Vielzahl reliefbeschreibender Elemente „förmlich durch das Gitter (LATTICE)“ fallen. Die Vektorisierung von rasterbasierten DGM-Ableitungen führt oftmals wegen der Kleinräumigkeit homogener Reliefparameter zur Ausprägung von unzähligen Polygonen, deren Darstellung am Schirm mit hohen Wartezeiten verbunden sein kann.

Vor- und Nachteile der hybriden GIS eigenen Raster- und Vektormethoden werden umfangreich bei BURROUGH (1986) diskutiert. Eine effiziente Methodik zur Generierung von DHM und DGM sowie DGM- Ableitungen einschließlich umfangreicher Erklärungen zu implementierten Interpolationsalgorithmen finden sich u.a. bei BORK & ROHDENBURG (1985), ESRI (1998), FRIEDRICH (1996), FRITSCH (1991), KÖTHE & LEHMEIER (1991) und WIESER (1992).

### **5.1.2 DGM-abgeleitete Reliefparameter**

In der vorliegenden Arbeit werden DGM-abgeleitete Reliefattribute vordergründig als Grundlage für die Modellierungen und Interpretationen des Landschaftswasserhaushalts in den Brunnen benötigt (Abschn. 5.2). Aus der Hangneigung ergeben sich durch Verschneidungen mit den Bodeneigenschaften und der Vegetation Abflusskoeffizienten zur Modellierung der Direkt- und Scheitelabflüsse (Abschn. 5.2.2.3; Abschn. 5.2.2.4). Ferner führt jeder Reliefparameter für sich und in Kombination zur Beurteilung der naturräumlichen Verhältnisse im Untersuchungsraum. Fließrichtung und Fließakkumulation sind die Grundlage für die Berechnung der Teileinzugsgebiete beliebiger Bezugsobjekte (z.B. Brunnenlagen, Oberflächengewässer).

Tabelle 5-1 zeigt eine Auswahl von aus dem DGM für den Untersuchungsraum abgeleiteten Reliefparametern. Die statischen Regelfunktionen (KUGLER, 1964; KUGLER, 1974), also sich unmittelbar aus der Geländeoberfläche ergebende Parameter des Reliefs im Landschaftshaushalt, wie u.a. Neigung, Exposition, Wölbung und Fließrichtung, lassen sich mit der verwendeten Software standardmäßig direkt aus dem DGM erzeugen. Grundlage für die Berechnungen sind in der Regel Nachbarschaftsanalysen der unmittelbaren Umgebung einer Rasterzelle (3\*3 Zellen) des DGM. Einschlägige Literaturverweise sind im vorhergehenden Kapitel aufgeführt.

Andere Parameter, wie beispielsweise die Hanglänge, müssen über eigens zu erstellende Programme modelliert werden, die mit den Berechnungsalgorithmen für den jeweiligen Parameter ausgestattet sind (z.B. HICKEY, SMITH & JANKOWSKI, 1994). Dies gilt gleichermaßen für sich aus der Geländeoberfläche ergebende dynamische Regelfunktionen zur Determinierung von Erosions- (WERNER, MICHAEL & SCHMIDT, 1993; WERNER, 1995) und Niederschlags-Abfluss-Prozessen (Abschn. 5.2) sowie zur Beeinflussung des Geländeklimas (WESSOLEK, KÖNIG & RENGER, 1992).

Die erzeugten geomorphometrischen Parameter zum Untersuchungsraum können mit Hilfe des GIS über beliebige Schwellenwerte klassifiziert und umgehend in Karten dargestellt werden (Karte UIS-5 bis Karte UIS-8).

Tab. 5.1: Ableitung von ausgewählten Reliefparametern aus einem DGM mittels ARCINFO und ARCVIEW im UIS Saidenbachtalsperre

Relief-Parameter / GIS-Funktion	Reliefparameter / Beschreibung	direkte DGM-Ableitung	ARCINFO 7.1		ARCVIEW 3.2 & SPATIAL ANALYST 1.1	
			Standard Funktion	Funktion mittels AML-Programm	GUI-Standard	GUI-Erweiterung (AVENUE)
SLOPE	Neigung	√	√		√	
SLOPELENGTH	Hanglänge			√		√
RANGE	Höhenschichtung	√	√		√	
HILLSHADE	Schattenmodell (Schummerung)	√	√		√	
ASPECT	Neigungsrichtung (Exposition)	√	√		√	
HILLSHADED RANGE	geschummerte Höhengschichtung	√		√	√	
CURVATURE	Wölbung, Krümmung	√	√			√
FLOWDIR	Fließrichtung	√	√			√
FLOWACC	Fließakkumulation	√	√			√
FLOWLENGTH	Fließwege	√	√			√
SINKS	Abflusslose Senken	√	√			√
WATERSHED	Einzugsgebiete	√	√	√		√
STREAMNET	Abflussnetz; Gerinnenetz	√	√			√
STREAMORDER	Numerische Ordnung des Abflussnetzes	√	√			√

In das GRAPHICAL USER INTERFACE (GUI) vom Desktop-GIS ARCVIEW 3.2 sind in Verbindung mit dem SPATIAL ANALYST 1.1 standardmäßig Steuerelemente zur Erzeugung der DGM-Folgeprodukte Hangneigung, Höhengschichtung, Exposition und Schummerung integriert. Andere Funktionalitäten zur Reliefanalyse (Tab. 5-1) stehen im Rahmen dieser Software zwar als AVENUE-REQUESTS (Programmanweisungen mit den integrierten Berechnungsalgorithmen) bereit, werden aber erst durch die Einbindung in das GUI über kleine AVENUE-Programme zugänglich. Besteht die Notwendigkeit der Ableitung in der Software nicht enthaltener Reliefparameter, muss deren Erzeugung selbst erfolgen.

Für die Gesamtheit der aus dem DGM abzuleitenden hydrologischen und morphologischen Reliefparameter wurde das Standard-GUI im UIS durch die Benutzerapplikation „DGMHDG“ (THÜRKOW, 2000a) erweitert (Abb. 5-3). Sie steht als ARCVIEW-EXTENSION für eine Mehrfachnutzung im Rahmen sämtlicher GIS-basierter Projektbearbeitungen an der Sektion Hydrogeologie und darüber hinaus zur Verfügung. Einzige Voraussetzung ist das Vorhandensein eines DGM. Die effektive Berechnung und Speicherung, Darstellung und Überlagerung sowie geostatistische Auswertung (Abb. 5-3) der reliefbasierten Komponenten zum Landschafts-



haushalt trägt zu einer schnellen und detaillierten Beurteilung der Brunneneinzugsgebiete hinsichtlich ihrer naturräumlichen Ausstattung bei (Abschn. 7.1).

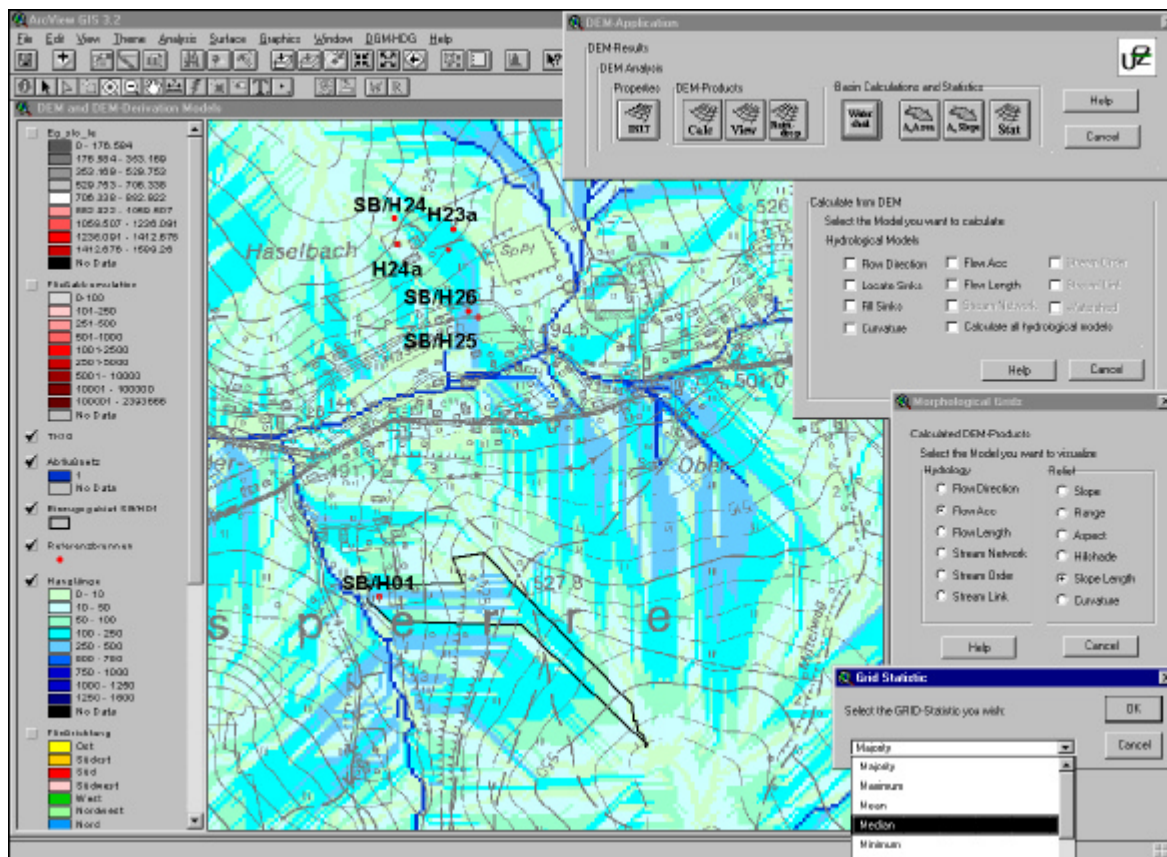


Abb. 5-3: AVENUE-Applikation „DGMHDG“ (THÜRKOW, 2000a) für eine effektive digitale Relieffanalyse im Untersuchungsraum

### 5.1.2.1 Einzugsgebiete

Die Berechnung der Einzugsgebiete der Trinkwasserbrunnen und Vorfluter ist, wie bereits angedeutet, die Basis für Analysen zu den im Landschaftshaushalt wirkenden Faktoren. Die Einzugsgebietsgröße entspricht dabei der Fläche, von der ein Bezugspunkt bei angenommener Wasserundurchlässigkeit der Geländeoberfläche Oberflächenabfluss erhält (KÖTHE & LEHMEIER, 1991).

Die Berechnungen aus dem DGM ergeben eine Ausdehnung des Einzugsgebietes der Saidenbachtalsperre von 60,69 km<sup>2</sup>. Die größten Teileinzugsgebiete sind die des Haselbachs mit 44,3 %, des Saidenbachs mit 36,8% und des Lippersdorfer Bachs mit 7,6 % Flächenanteil am gesamten Untersuchungsraum (Abb. 5-4).

Grundlage für die Ermittlung der Brunneneinzugsgebiete ist die in Abschn. 4 validierte Hypothese, dass die unterirdischen Einzugsgebiete **in erster Näherung** mit den oberflächlichen Einzugsgebieten übereinstimmen. Im Median ergeben sich bei 130 bekannten Brunnenlagen (einige Brunnenbetreiber wissen nicht den genauen Standort ihres Brunnens) sehr kleine Brunneneinzugsgebiete von etwa 1,2 ha Größe.



Die im UIS gespeicherten Daten lassen sich durch typische GIS-Funktionalitäten (Abschn. 2.2) bei beliebiger Kombination leicht einzugsgebietsbezogen auswerten.

Abbildung 5-4 zeigt wirkungsvoll eine GIS-basierte Sichtbarkeitsanalyse zur Ausprägung der Teileinzugsbereiche der Vorfluter. Die Ansicht des dreifach überhöhten Geländemodells aus westlicher Richtung ist zusätzlich mit den Hausbrunnenlagen verschnitten.

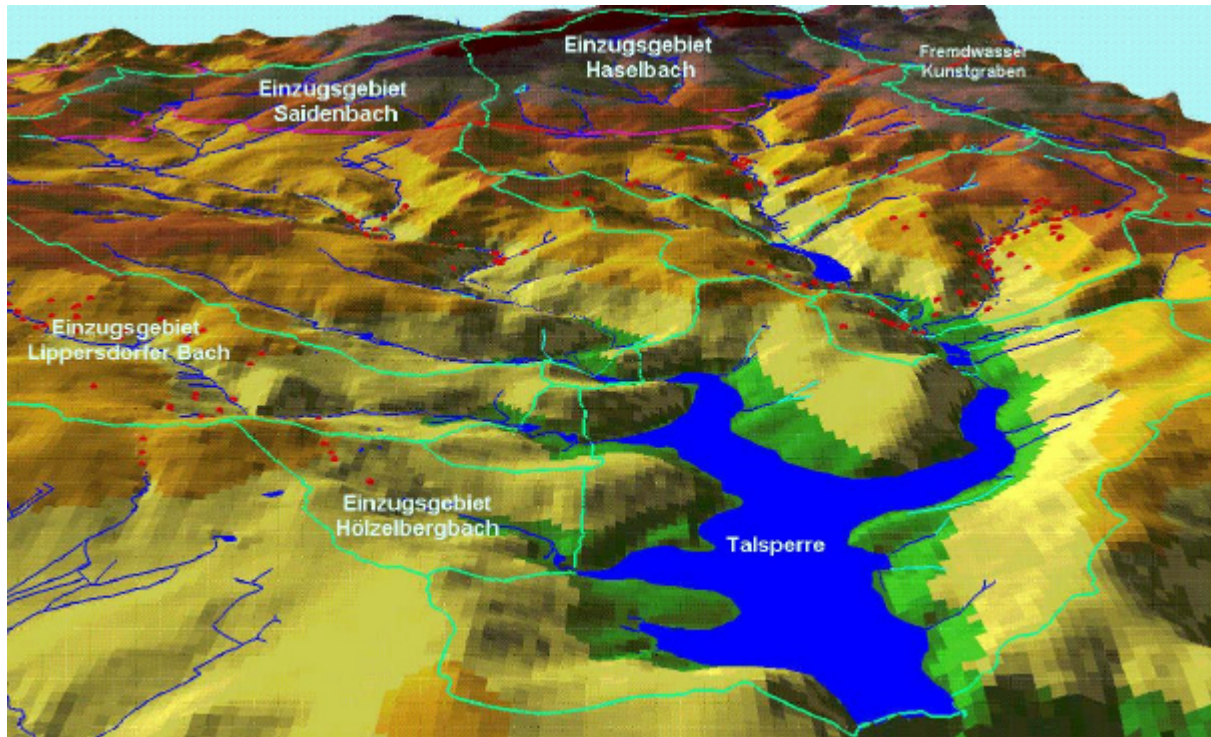


Abb. 5-4: 2,5 D-Visualisierung von DGM, Vorflutereinzugsgebieten, Gewässernetz und Brunnenstandorten

### 5.1.2.2 Höhengichtung und Schummerung

Höhenschichtungs- und Schummerungsinformationen werden im UIS in erster Linie für Visualisierungen des Untersuchungsraums verwendet. Die Verschneidung dieser Informationsebenen zu einem geschummerten Höhengichtungsmodell führt zu einer unverzerrten Grundrissdarstellung des Reliefs mit sehr guten Ansichtseffekten (Abb. 5-4). Die Schummerung repräsentiert dabei den Grauwert, der sich aus der Lichtmenge ableitet, die eine Rasterzelle in Abhängigkeit von Neigung, Exposition und Lage der Lichtquelle (Beleuchtungshöhe und Beleuchtungsrichtung) erreicht. Die Überlagerung mit anderen Zusatzinformationen wie u.a. Teileinzugsgebieten, Gewässernetz, Brunnenstandorten oder Fließrichtungspfeilen des Direktabflusses ermöglichen Entscheidungshilfen bei der Planung und Durchführung von Feldarbeiten (Abschn. 4). Die Festlegung der Referenzbrunnen (Abschn. 7) wurde ebenso durch diese Themenlayer unterstützt wie die Auswahl der Profile zu den geophysikalischen Untersuchungen (Abschn. 4.1).

Die verwendete Software bietet weitere Möglichkeiten zur Darstellung der Geländeoberflächenausprägung. Beispiele sind das Erstellen von beliebigen Profilen (Abb. 5-5) und von multimedialen Rundflügen (u.a. UIS-Flug-1).

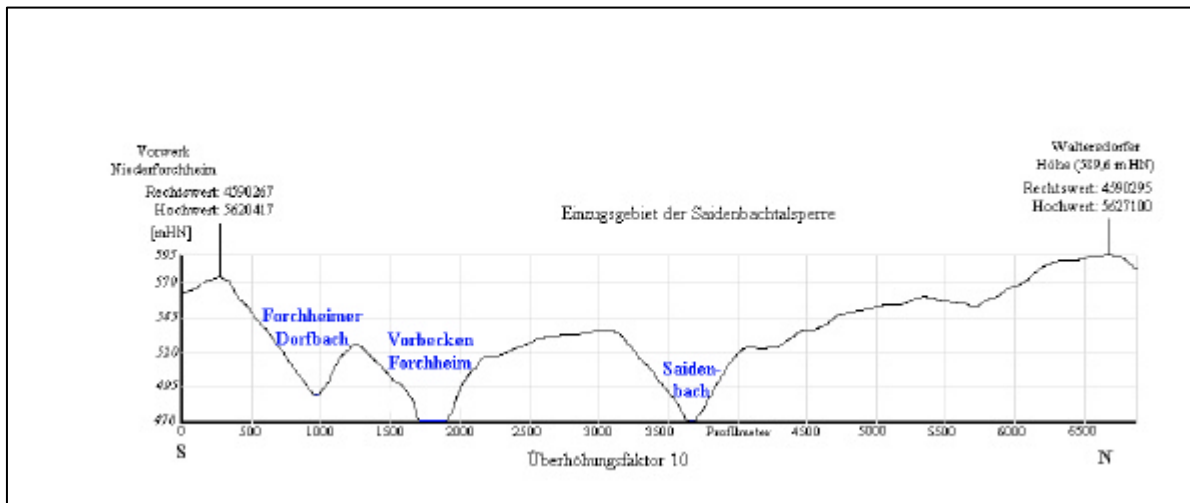


Abb. 5-5: Süd-Nord-Querschnitt durch das Einzugsgebiet der Saldenbachtalsperre auf Grundlage des DGM

Der Wasserspiegel der Saldenbachtalsperre liegt in Zeiten des Einstaummaximums bei 438,9 Metern HN (Quelle: TK10). Die Höhe des Wasserspiegels der Talsperre ist gleichbedeutend mit der tiefsten Lokalität im Westen des Untersuchungsgebietes. Die höchsten Erhebungen befinden sich mit Saldenberg (700,7 Meter HN) und Voigtsdorfer Höhe (707 Metern HN) am Ostrand des Untersuchungsraums (vgl. Karte UIS-5).

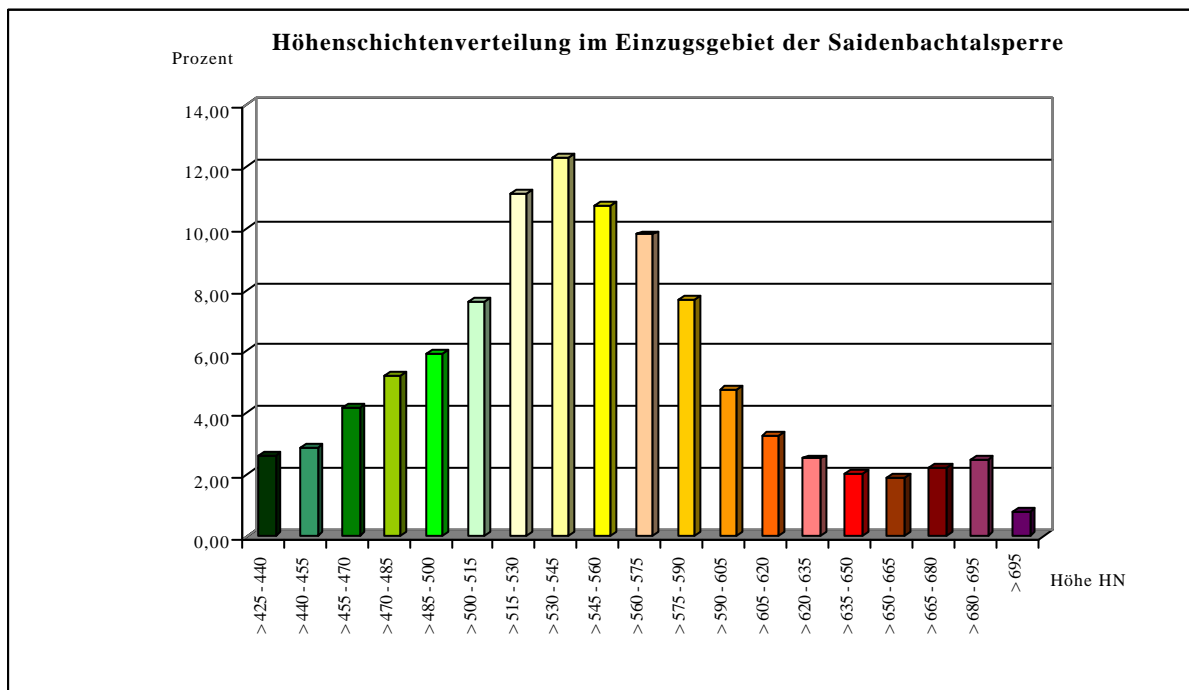


Abb. 5-6: Höhenschichtenverteilung im Einzugsgebiet der Saldenbachtalsperre abgeleitet aus dem DGM

Etwa 50 % des Einzugsgebietes sind Höhenlagen zwischen 500 und 575 Metern HN zuzuordnen (Abb. 5-6). Die landwirtschaftlich genutzten Flächen des Einzugsgebietes der Saidenbachtalsperre sind somit dem Grenzbereich der Agrarstrukturgebiete 4 (Erzgebirgsvorland) und 5 (Erzgebirgskamm) zuzuordnen (BUFE et.al., 1996).

### 5.1.2.3 Hangneigung

Die Neigung spiegelt den Winkel von der Horizontalebene zum Bezugspunkt (Rasterpunkt) wider (vgl. STANGER, 1982). Eine Angabe ist sowohl in Grad (0-90) als auch in Prozent üblich.

Abbildung 5-7 zeigt die prozentualen Anteile der aus dem DGM klassifizierten Hangneigungen nach KA4 (AG BODEN, 1994) für den Untersuchungsraum mit zugehörigen Nutzungsanteilen ausgewählter Nutzungsarten.

Mehr als 50 % des Untersuchungsgebietes sind zwischen 3 und 7 Grad geneigt. Das arithmetische Mittel der Hangneigungen liegt bei 5,37 Grad (vgl. Karte UIS-6), die Standardabweichung beträgt [ $s = 3,31$  Grad]. Mit 62 % ist die Mehrzahl der 1993 intensiv ackerbaulich genutzten Flächen unter 5 Grad geneigt. 13 % der Waldflächen weisen Neigungen von mehr als 10 Grad auf, während nur 6 % der landwirtschaftlich genutzten Flächen (5% Grünland, 1% Ackerland) dieser Klassifizierung zuzuordnen sind. Neigungssabhängige Nutzungs- und Bewirtschaftungsweisen vermindern folgernd deutlich das Erosionsrisiko der Hangstandorte.

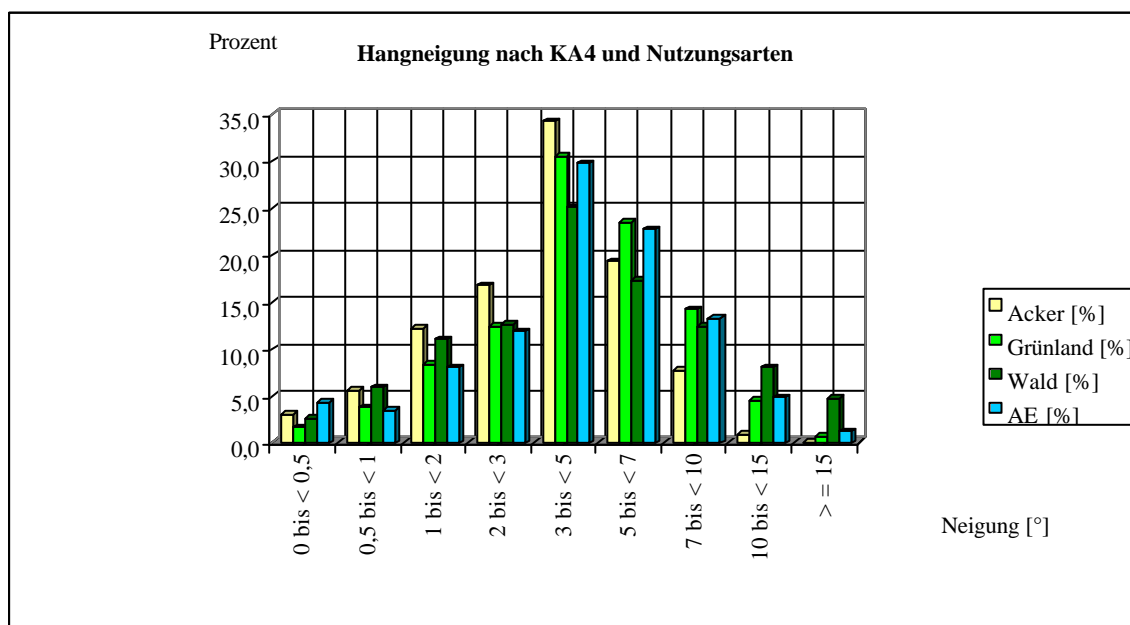


Abb. 5-7: Prozentuale Verteilung der Hangneigungsklassen nach KA4 und ausgewählten Nutzungsarten (1993) im Einzugsgebiet der Saidenbachtalsperre

### 5.1.2.4 Hanglänge

Die Hanglänge gibt im UIS die Entfernung an, die ein Partikel bei angenommener Wasserdurchlässigkeit der Geländeoberfläche in Abhängigkeit von der Neigung und Fließrichtung zwischen der nächsten Wasserscheide und dem Bezugspunkt (Rasterpunkt) zurücklegt. Die Berechnung ist in ARC/INFO (1998), ARC/INFO (2000) und ARCVIEW (1998) nicht Standard (Tab. 5-1) und erfolgt über in das UIS eingebundene AML-Programme nach HICKEY, SMITH & JANKOWSKI (1994).

Das arithmetische Mittel der Hanglänge beträgt im Untersuchungsraum 107,6 Meter. Die Standardabweichung liegt bei  $[s = 123 \text{ Meter}]$ . Das Hanglängenmaximum ist im Nordabfall des Saidenbergs in Richtung Obersaida mit 1590 Metern gegeben ( Karte UIS-8).

### 5.1.2.5 Exposition

Die Exposition (Karte UIS-7) stellt die Lagebeziehung eines Abschnittes der Reliefoberfläche zur Himmelsrichtung dar (0 – 360 Grad). Sie ergibt sich aus der Richtung des Neigungsvektors mit maximalem Neigungswinkel zur Horizontalebene (vgl. STANGER , 1982). Durch die Exponiertheit eines Geländeabschnittes werden u.a. klimatische Faktoren (Temperatur, Strahlungsbilanz), Möglichkeiten der anthropogenen Nutzung, Bodenwasserhaushalt und Vegetation beeinflusst (Abschn.8.1). Expositionsbedingte diffuse Schadstoffeinträge spielen im Mittleren- und Westerzgebirge eine wesentliche Rolle (vgl. u.a. LORZ, 1999, BOZAU, 1995; Abschn. 6.4.1).

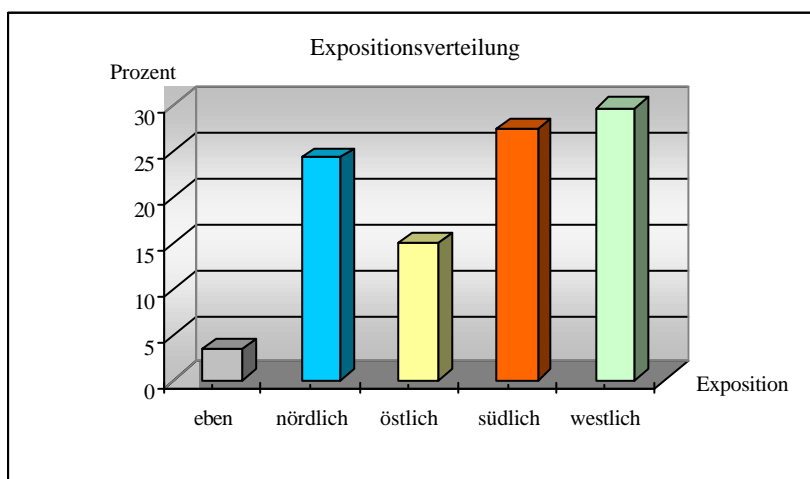


Abb. 5-8: Expositionsverteilung der Geländeoberfläche des Einzugsgebietes Saidenbachtalsperre

Die Geostatistik zur Expositionsverteilung der Geländeoberfläche des Einzugsgebietes ergibt eine annähernd gleichmäßige Verteilung von nördlichen, westlichen und südlichen Hanglagen (Abb. 5-8). Der Anteil östlich exponierter Flächen dagegen ist beträchtlich geringer und auf den Anstieg des Untersuchungsgebietes von West nach Ost zurückzuführen

(Karte UIS-5). Die mit 3,5 % beteiligten ebenen Flächen beruhen größtenteils auf den Wasserflächen der Stauhaltungen, da diese im DGM mit der Wasserspiegellhöhe versehen wurden. Die Reliefausprägung der Stauseeböden wurde ebenso vernachlässigt wie sich im hydrologischen Jahr ändernde Wasserspiegellhöhen.

### **5.1.2.6 Vertikal- und Horizontalwölbung**

Die Wölbung oder Krümmung beschreibt den Wölbungsradius eines Bezugspunktes (Rasterpunkt). Dabei erfolgt eine Unterscheidung von Vertikal- und Horizontalwölbung. Die Vertikalwölbung entspricht der Änderung der Neigungsstärke in Hangfallrichtung. Die Horizontalwölbung entspricht der Änderung der Exposition in Hangstreichrichtung (KÖTHER & LEHMEIER, 1991). Jeweils erfolgt eine Differenzierung der Wölbungsradien in konkav und konvex. Horizontal- und Vertikalwölbung lassen sich mit der verwendeten Software auch in separaten Rasterfiles speichern.

Die Wölbung der Geländeoberfläche ist für die laterale Wasserbewegung auf und in dem Boden von Bedeutung. Durch die Berechnung aus dem DGM werden Konvergenzbereiche mit konvergierendem und Divergenzbereiche mit divergierendem Oberflächenabfluss bei angenommener Wasserundurchlässigkeit der Erdoberfläche modelliert.

Konvergenzbereiche sind im Vergleich zu Divergenzbereichen potentiell feuchtere Standorte. In ihnen wird häufig erodiertes feinkörniges Bodenmaterial akkumuliert (Abschn. 3.5). In Senkenbereichen der Geländeoberfläche ist die Ausbildung von grundwasser- bzw. staunässebeeinflussten Böden demzufolge sehr wahrscheinlich. Die Hinterlegung der GPS-eingemessenen Referenzbrunnenlagen mit dem DGM- abgeleiteten Wölbungsraster ergab, dass sich bei 30 eingemessenen Brunnen 82 Prozent in konkaven Hangbereichen befinden. Das unmittelbare Umfeld der Referenzbrunnen ist bei etwa 60 Prozent durch Staunässe geprägt.

### **5.1.2.7 Potentielle Erosionsdisposition**

Erosionsprozesse beeinflussen die Brunnenwasserqualität nur indirekt (Abschn. 3.5). Dennoch geben im UIS abgeleitete Untersuchungsergebnisse zur Erosionsdisposition wichtige Aufschlüsse zur Bewertung des Landschaftshaushalts.

Die Anfälligkeit eines Bodens gegenüber der Erosion durch Wasser ergibt sich aus der Funktion der Erosivität der Niederschläge und der Erodierbarkeit des Standortes (AG Boden, 1994). Die Abschätzung des potentiellen jährlichen Bodenabtrags begrenzt sich im UIS auf die Anwendung der Universellen Bodenabtragungsgleichung (Universal Soil Loss Equation, USLE) von WISCHMEIER & SMITH (1978) unter Verwendung von aus der KA3 (AG BODEN, 1982) und der KA4 (AG BODEN, 1994) abgeleiteten Eingangsparametern. Das Relief wird in dieser Gleichung durch den LS- Faktor berücksichtigt. GRIFFIN, BEASLEY, FLETCHER & FOSTER (1988) sowie MOORE & WILSON (1992) bezeichnen die Generierung dieses Faktors als das größte Problem bei der GIS-basierten Anwendung der USLE. Der LS-Faktor ist ein Index aus der erosiven Hanglänge (Abschn. 5.1.2.4) und der Hangneigung (Abschn. 5.1.2.3) und wird im UIS über AML-Programme nach HICKEY, SMITH & JANKOWSKI (1994) berechnet. Für drei Viertel der 1993 ackerbaulich genutzten Flächen liegt der LS-Faktor unter dem arithmetischen Mittelwert von 1,32 (Abb. 5-9). 1993 entfiel demnach nur ein geringer Teil der

landwirtschaftlich genutzten Flächen auf Standorte, die von Seiten des Reliefs eine hohe potentielle Erosionsgefährdung aufweisen. Potentiell hohe Bodenabträge durch große Hanglängen bei relativ starker Neigung um 7 Grad sind u.a. an den Nord- und Westhängen des Saldenbergs zu erwarten (Karte UIS-9).

Zur Modellierung detaillierter und pflanzenspezifischer Bodenabtragsraten bedarf es der Verwendung komplexer, physikalisch basierter Modelle, wie sie im Untersuchungsraum umfangreich angewendet und kalibriert wurden (WERNER, MICHAEL & SCHMIDT, 1993; WERNER, 1995). Die Integration dieses deterministischen Modells in das UIS ist unproblematisch, wie beispielhafte Berechnungen durch einen betreuten Diplomanden zeigten. Das Prä- und Postprocessing kann vollständig im UIS erfolgen (Abschn. 2.2).

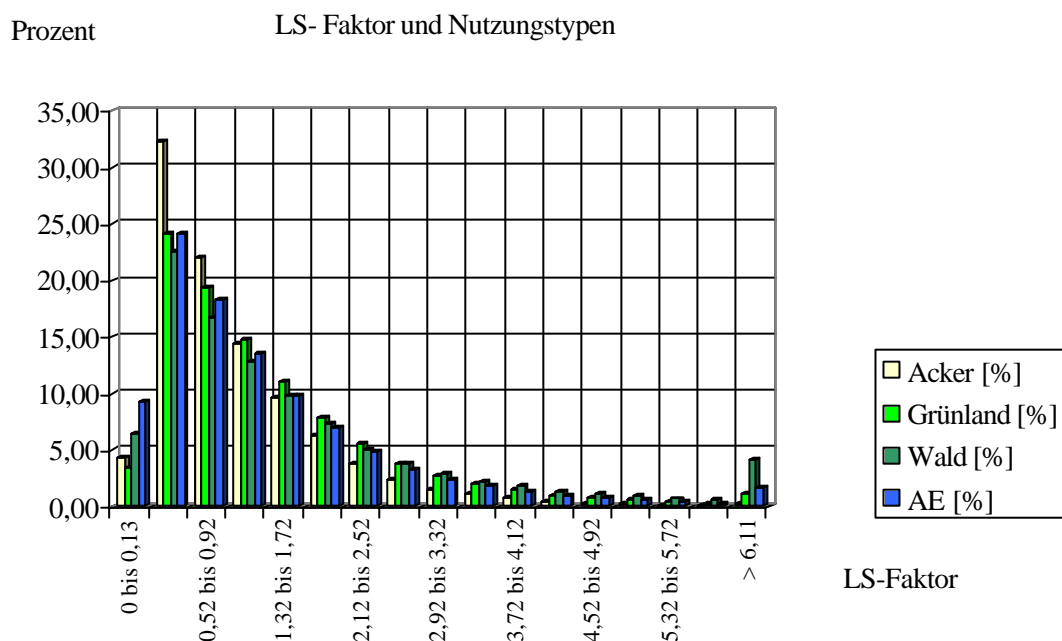


Abb. 5-9: Prozentuale Verteilung des LS-Faktors und ausgewählter Nutzungsarten (1993) im Einzugsgebiet der Saldenbachtalsperre



## 5.2 Analysen zum Landschaftswasser- und Stoffhaushalt

### 5.2.1 Methodik und Programmablauf

Von besonderem Interesse für die Gefährdungsabschätzung der Belastungssituation in den Flachbrunnen ist auf Grund der hydrogeologischen Situation der Wasserhaushalt in der ungesättigten Zone (Abschn. 4.3.1) und die Quantifizierung diffuser Stoffein- und austräge aus intensiver landwirtschaftlicher Nutzung. Um zu einer effektiven Interpretation und Bewertung dieser Prozesse zu gelangen, wurde die AVENUE-basierte GIS-Applikation „WRAP – WATERSHED RISK ANALYSIS“ (THÜRKOW, 2000b) unter ARCVIEW entwickelt. Basis ist die in Abschn. 2.1 umfangreich erläuterte Soft- und Hardwarekonfiguration des UIS Saidenbachtalsperre (Abb. 2-8).

Folgende Anforderungen stellten sich vor der Programmierung an diese GIS-Applikation:

- Anwenderfreundliche und effiziente Analyse wesentlicher Komponenten des Landschaftswasser- und Stoffhaushalts als Grundlage zur Gefährdungsabschätzung des oberflächennahen Grundwassers sowie zur Bewertung der Belastungssituation in den Hausbrunnen
  - Generierung von Schnittstellen zu den RDBMS-gespeicherten Informationen zur Nutzung und Bewirtschaftung sowie Witterung und Brunnenwasserbeschaffenheit als Voraussetzung für die Analyse und Bilanzierung von schlag- und teilschlagbezogenen Stoffeinträgen und Stoffausträgen (Abschn. 2.1)
  - Funktionen zur Geostatistik für eine schnelle Erstbewertung der Standortfaktoren innerhalb des Programms
  - Mesoskalige Bilanzierung des Landschaftswasserhaushalts auf Basis amtlich verfügbarer bzw. im UIS ohnehin erhobener Geodaten (Tab. 2-2) bzw. aus diesen ableitbaren Modelleingangsparametern (u.a. AG BODEN, 1994; DVWK, 1996; DOMMERMUTH & TRAMPF, 1991; GROßMANN, 1996; MANIAK, 1997; RENGER et.al., 1974)
- Generierung von Schnittstellen zu externen Tabellenkalkulationsprogrammen über dBase-Exportdateien als Basis für eine komplexe statistische Auswertung der Untersuchungsergebnisse
- Evaluierung der Teilmodelle zu den N-A-Prozessen durch für den Untersuchungsraum vorhandene Abflussaufzeichnungen
- Möglichkeiten der Mehrfachnutzung der gesamten Applikation und von Teilmodulen an der Sektion Hydrogeologie, durch Ämter und Behörden im Untersuchungsraum und darüber hinaus

Die **zeitgleiche Analyse** wesentlicher Komponenten **des Landschaftswasser- und Stoffhaushalts** wird durch die Implementierung nachfolgend aufgeführter Bewertungsmethoden und –werkzeuge unterstützt. Die Modellierung **erfolgt einzugsgebietsbezogen** (Abb. 5-10):

1. Detaillierte Erfassung und Bewertung des Naturraums:
  - Berechnung und Sichtung von Reliefparametern aus dem DGM (vgl. Abschn. 5.1.2).
  - Sichtung der räumlichen Boden- und Nutzungsinformationen aus dem UIS sowie Verschneidung mit den zugehörigen Boden- und Nutzungskennwerten aus Datenbibliotheken (Modell-Eingangsparameter-Datenfiles)
  - Statistische Auswertung der geladenen Datenebenen in Tabellen, Diagrammen und Informationstafeln (MESSAGE BOX)
2. Detaillierte Erfassung der Witterung
  - Benutzerdefiniertes Laden der Klimazeitreihen je nach Datenverfügbarkeit bis in stündliche Auflösung
3. Modellierung der Hauptphasen der Niederschlags-Abfluss-Prozesse (N-A-Prozesse)
  - Berechnung der potentiellen und aktuellen Evapotranspiration
  - Berechnung des Direktabflusses
  - Berechnungen zum Retentions- und Translationsverhalten
  - Berechnung des Bodenwasserhaushaltes einschließlich Versickerung
4. Schlagbezogene Analyse der Bewirtschaftung, Stoffeinträge und Stoffausträge sowie zusätzlicher Kennwerte der Stickstoffauswaschung aus intensiver landwirtschaftlicher Nutzung im Brunnenanstrom durch dynamische Anbindung von Informationen der Sächsischen Schlagkarte gemäß SächsSchAVO (1994)
  - Fruchtart, Bodenbearbeitung, organische und mineralische Düngung (Nährstoffeintrag von Kalium, Phosphor, Kalzium und Magnesium), Ernte (Nährstoffentzug durch Kulturpflanzen)
  - Restmengen mineralisierten Stickstoffs ( $N_{\min}$ ) zu Vegetationsende und Vegetationsbeginn in verschiedenen Bodentiefen
  - Stickstoffflächenbilanzen durch Berechnungen aus Stickstoffzufuhr minus Stickstoffentzug
5. Analyse hydrochemischer Daten zur Brunnenwasserqualität durch Anbindung der Milieuparameter und enthaltener Hauptkationen und -anionen aus der Beprobungskampagne (Abschn. 6.3)
  - Quantifizierung der Stoffausträge mit dem Brunnenwasser
  - Quantifizierung von Stickstoffauswaschung und Nitratgehalt des Sickerwassers durch Verschneidung mit den Untersuchungsergebnisse aus der N-A-Modellierung

6. Ausgabe gewonnener Informationen in Exportdateien wie dBase-Tabellen, Diagrammen, SHAPEFILES und Thematischen Karten (LAYOUTS)
7. Konfliktanalyse, Gefährdungsabschätzung und Bewertung der Belastungssituation
  - Direkte Bewertung der Untersuchungsergebnisse
  - Weitere Bewertung der Untersuchungsergebnisse mittels externer Softwareprogramme (z.B. Tabellenkalkulation - EXCEL)
  - gezielter Einsatz deterministischer Modelle zur Beschreibung und Klärung von Prozessen der Stoffdynamik mit der UIS-Konfiguration als Grundlage (im Rahmen dieser Arbeit aus Zeitgründen nicht erfolgt)

Abb. 5-10 veranschaulicht die beschriebene Methodik und den Programmablauf innerhalb der GIS-Applikation „WRAP“.

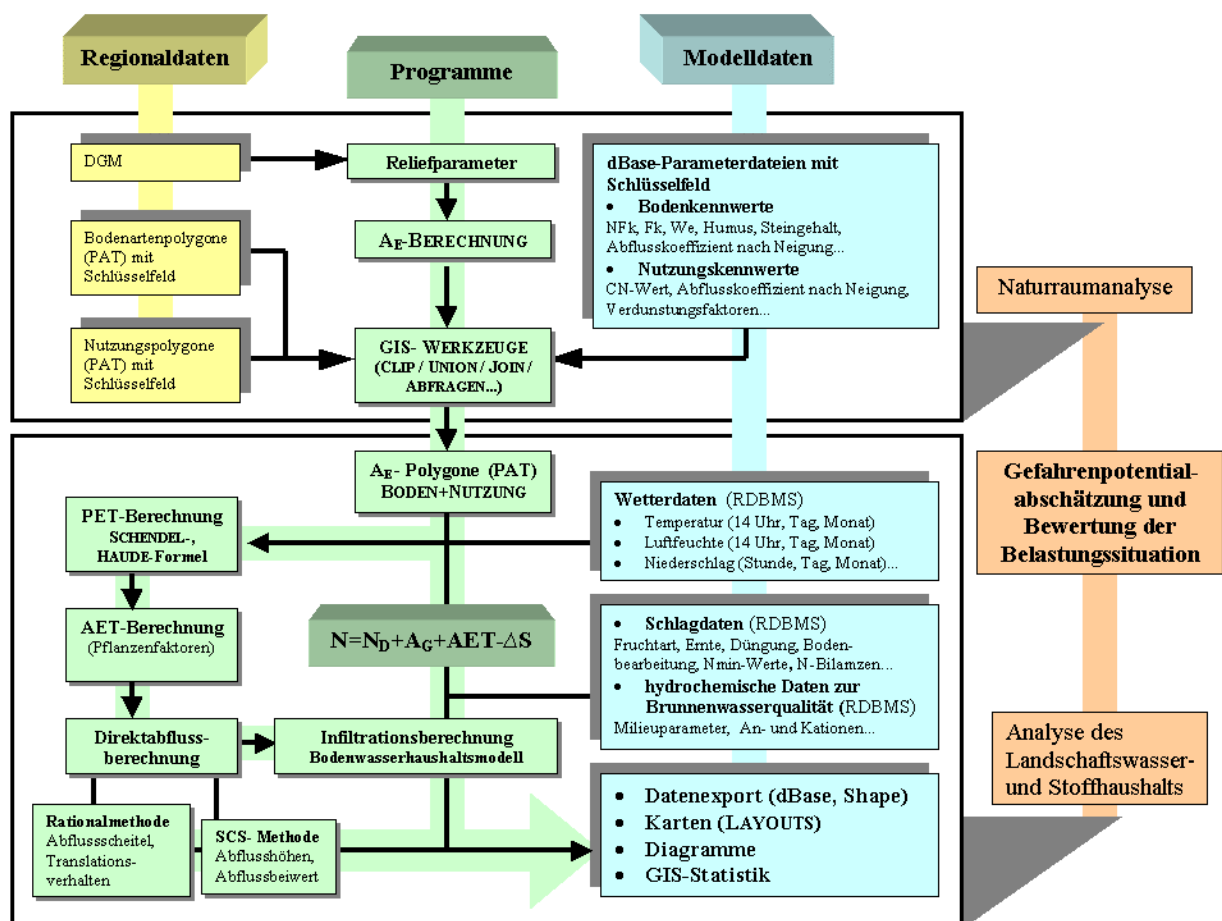


Abb. 5-10: Datenebenen und Programmablauf von „WRAP“ zur einzugsgebietsbezogenen Bilanzierung des Landschaftswasserhaushalts und Bewertung des Stoffeintrags und Stoffaustrags (Abkürzungen nach DIN 4049-1 (1992) – vgl. Abb. 5-12)

Voraussetzung für die Programminitialisierung ist das DGM (Abschn. 5.1), auf dessen Grundlage zunächst die **morphologischen Daten** für einen Untersuchungsraum berechnet, visualisiert und geostatistisch ausgewertet werden (Abschn. 5.1.2). Der Bezugspunkt zur Berech-

nung eines Einzugsgebietes kann vom Anwender beliebig definiert werden (z.B. Hausbrunnen, Vorfluter, Stausee).

Im nächsten Schritt werden die digitalisierten Themen **Nutzung** und **Bodenarten** (Tab. 2-2) einschließlich der dazugehörigen POLYGON-ATTRIBUT-TABELLEN (PAT) initialisiert und mit dem berechneten Einzugsgebiet ausgeschnitten (CLIP-Funktion). Über „Schlüsselfelder“ erfolgt die Anbindung der spezifischen **Nutzungs- und Bodenartenkennwerte** an die jeder homogenen Teilfläche zugeordneten PAT aus den Modellparameterdateien (dBase) über JOIN- Funktionen. Nachfolgend werden die Eingangsdaten von Boden und Nutzung zu einem **Basisthema** für die Modellierung des Wasserhaushalts verschnitten (UNION-Funktion) und überflüssige Felder aus der PAT gelöscht. Danach erfolgt das Ausladen nutzerdefinierter Zeitreihen von **Klimadaten** optional aus den Datenbanken „HYGEO“ oder „AMETADAT“ (Abschn. 2.1) und die Berechnung der **potentiellen Evapotranspiration** für jede Teilfläche des Basisthemas.

Über die angebundene Nutzungs- und Bodenkennwerte jeder Teilfläche des Einzugsgebietes im PAT erfolgen anschließend die täglich oder monatlich aufgelösten Berechnungen zur **aktuellen Evapotranspiration**, zum **Direktabfluss (effektiven Niederschlag)** und zur **Infiltration** aus der Bodenzone. Dabei werden die anbaukulturspezifischen Kennwerte eines oder mehrerer im Einzugsgebiet befindlicher Ackerschläge für jeden Zeitschnitt des Bilanzierungszeitraums aus den RDBMS ausgelesen und dynamisch bei den Berechnungen berücksichtigt. Anschließend erfolgt die flächengewichtete Zusammenfassung der berechneten Wasserhaushaltskomponenten zu einzugsgebietsbezogenen Mittelwerten im Tages- oder Monatsraster in einem dBase-Exportdatei.

Zusätzlich können **oberirdische Abflüsse** für beliebige Niederschlagsintensitäten in Form von **Scheitelabflussmengen** berechnet werden. Darüber hinaus sind Berechnungen zum **Translationsverhalten** in dem definierten Einzugsgebiet möglich.

Abschließend werden dem Anwender Möglichkeiten gegeben, schlagbezogene **statistische Daten der Bodennutzung** und **hydrochemische Daten zur Brunnenwasserqualität** der im Einzugsgebiet befindlichen Brunnen für den Bilanzierungszeitraum aus den RDBMS auszulesen, in Informationstafeln sichtbar zu machen und über Abfragen mit den Exportdateien (SHAPE, dBase) des Programms zu verschneiden.

Weiterhin bestehen innerhalb des Standard-GUI von ARCVIEW ohnehin Möglichkeiten der Darstellung der Untersuchungsergebnisse in LAYOUTS und thematischen Karten sowie in Diagrammen.

In Abb. 5-11 sind beispielhaft Auszüge der Benutzeroberfläche von „WRAP“ aufgezeigt. Jedem Button des Hauptmenüs ist ein Untermenü zugeordnet, welches die Ausführung der jeweiligen Teilmodule und Teilmodelle ermöglicht. Eine umfangreiche Darstellung und Erläuterung der Programmabläufe erfolgt in der noch nicht fertiggestellten Dokumentation zu „WRAP“, die in Kürze auch als AVENUE-Extension zur Verfügung stehen soll.

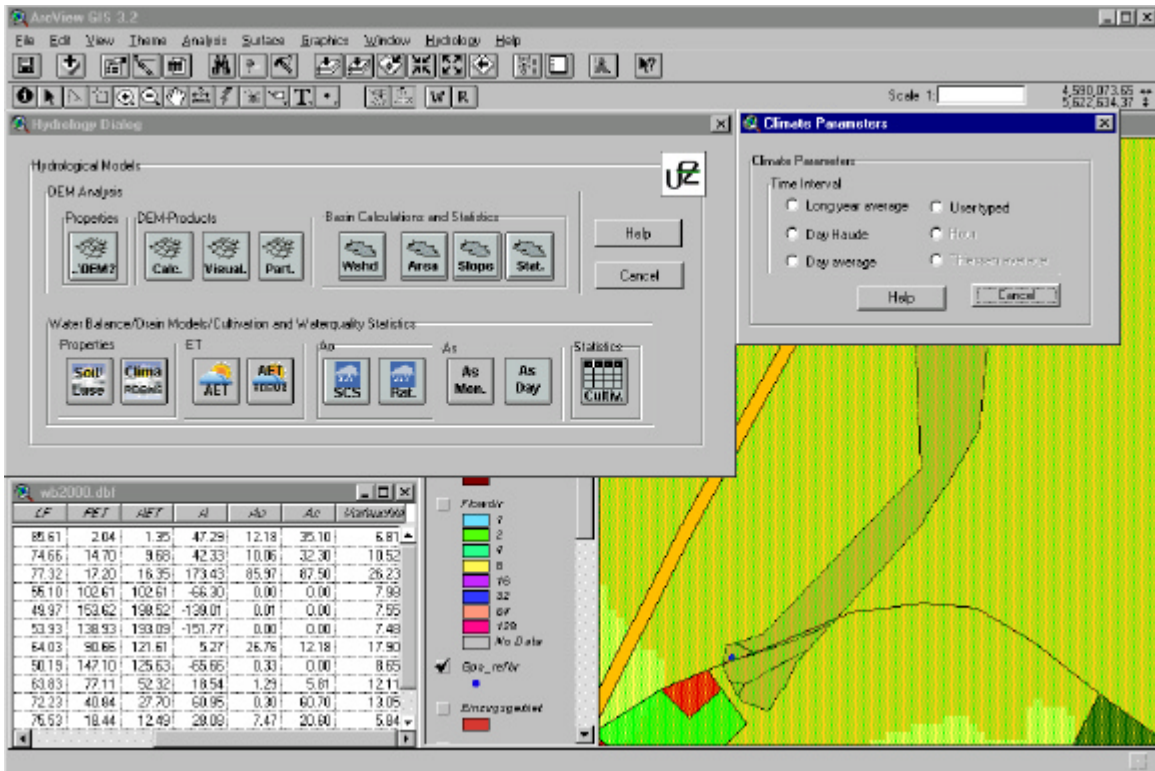


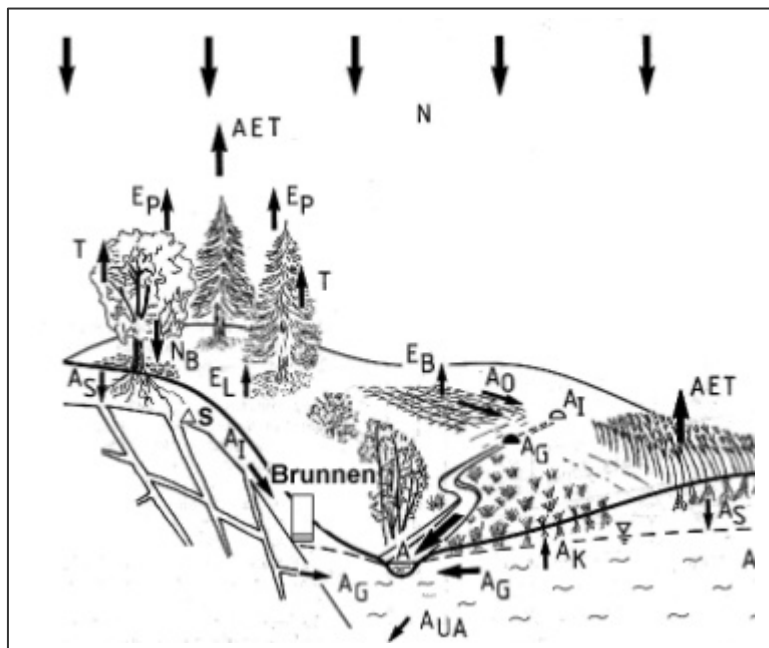
Abb. 5-11: Hauptmenü der GIS-Applikation „WRAP“ einschließlich des Untermenüs zur Selektion der Klimadaten und einem Beispiel für ein dBase-Exportdatenfile nach Abschluss der N-A-Berechnungen

## 5.2.2 Niederschlags-Abfluss-Bilanzierung

Eine primäre Grundlage für die detaillierte Erfassung und Bewertung der Belastungssituation sind die in „WRAP“ integrierten Teilmodelle zur einzugsgebietsbezogenen Modellierung des Landschaftswasserhaushalts. Deshalb soll auf die verwendete Methodik und Untersuchungsergebnisse in den folgenden Kapiteln detaillierter eingegangen.

Im Niederschlags-Abfluss (N-A)-Modell erfolgen Berechnungen für die Komponenten der Wasserhaushaltsgleichung **Niederschlag (N)**, **potentielle** und **aktuelle Evapotranspiration (PET und AET)**, **Direktabfluss (N<sub>D</sub>)**, **Versickerung (A<sub>S</sub>)** sowie zum **Retentionsvermögen** und **Translationsverhalten** eines Einzugsgebietes (Abb. 5-10).

Abb. 5-12 zeigt das Modell eines Einzugsgebietes mit zugehörigen Erklärungen der zahlreich verwendeten Abkürzungen nach DIN 4049-1 (1992).



#### Erläuterungen der Abkürzungen nach DIN 4049-1 (1992):

AET	Aktuelle Verdunstung
N	Niederschlag
Ep	Pflanzeninterzeptions-evapotranspiration
T	Transpiration
N <sub>B</sub>	Bestandsniederschlag
E <sub>L</sub>	Streuinterzeptions-evapotranspiration
E <sub>B</sub>	Bodenevapotranspiration
A <sub>O</sub>	Oberflächenabfluss
A <sub>I</sub>	Zwischenabfluss (Interflow)
A <sub>G</sub>	Grundwasserabfluss
A <sub>S</sub>	Infiltration
A <sub>K</sub>	Kapillarer Wasseraufstieg
A <sub>UA</sub>	Unterirdischer Abstrom
A <sub>UZ</sub>	Unterirdischer Zustrom
A	Gesamtabfluss
ΔS	Speicherungs- und Wassergehaltsänderungen der ungesättigten Bodenzone

Abb. 5-12: Modell eines Einzugsgebietes  
(Quelle: WOHLRAB et.al., 1992 leicht verändert)

### 5.2.2.1 Modelleingangsdaten Niederschlag, Temperatur und Luftfeuchte

Zunächst musste für das Einzugsgebiet eine gebietsspezifische Diskreditierung von Niederschlag, Temperatur und Luftfeuchte erfolgen. Mehrjährige, geschlossene Zeitreihen für diese Daten lagen für den Untersuchungsraum jedoch lediglich für die Klimastation Reifland (Talsperrenverwaltung Reifland, Zeitreihe 1975-2000) vor. Daten weiterer 11 Messstationen im erweiterten Untersuchungsgebiet beschränkten sich auf Sommerhalbjahresmessungen der Niederschläge in stündlicher Auflösung für die Jahre 1983 bis 1992<sup>5/1</sup>, auf dessen Grundlage trotz der unvollständigen Datenbasis eine Differenzierung der Niederschlagsverteilung versucht wurde.

Dazu erfolgte eine Regionalisierung der Punktmessdaten mittels THIESSEN-Polygonmethode. Andere Regionalisierungsansätze erwiesen sich in diesem Fall als ungeeignet (Abschn. 2.2). Im Rahmen der THIESSEN-Polygonmethode ist der mittlere Niederschlag das gewichtete arithmetische Mittel aller Messungen  $P_i$  ( $i = 1, n$ ).

$$P_i = \left( \frac{1}{A_T} \right) * 3 A_i P_i \quad \text{(Gleichung 5-1)}$$

$A_i$  = Fläche eines Thießen-Polygons um die Station  $i$   
 $A_T$  = Gesamtfläche des Gebietes =  $3 A_i$

<sup>5/1</sup> Quelle: TU Dresden, Institut für Hydrologie und Meteorologie (vgl. Abschn. 2.2, Tab. 2-2)



Auf Grund der benannten Datenbasisdefizite wurden die Werte des Winterhalbjahres durch die Messwerte der Station Reifland ergänzt. Räumliche Unterschiede in der Niederschlagsverteilung als mögliche Eingangsdatenebene für die Wasserbilanzierungen sind demnach nur Näherungen an die tatsächlichen Gegebenheiten resultierend aus den Sommerhalbjahresmessungen.

Grundlage für die Berechnung gemittelter Komponenten der Wasserhaushaltsgleichung sollte ein möglichst langer Zeitraum sein. In den Jahren 1983 bis 1992 fiel wesentlich weniger Niederschlag, als im langjährigen Mittel. Deshalb wurden die Monatsmittelwerte und die durchschnittlichen Jahreswerte mit der mehrjährigen Messreihe der Station Reifland (1975-1999) korrigiert. Die sich aus den THIESENPOLYGONEN ergebende maximale Abweichung der Jahresniederschläge innerhalb des Untersuchungsraums beträgt etwa 60 mm. Da im mehrjährigen Mittel etwa 85% der Grundwasserneubildung im Winterhalbjahr erfolgen und sich die Unterschiede in der Niederschlagsverteilung lediglich auf die Sommerhalbjahre einer für die Brunnenuntersuchungen wenig repräsentativen Zeitreihe beziehen, wurden die Wasserbilanzierungen der Referenzbrunnen (1996-2000) letztendlich mit den umfassend zur Verfügung stehenden Klimadaten der Stationen Reifland und Forchheim gerechnet. Regionalisierte Niederschlagswerte aus der THIESENPOLYGONMETHODE fanden z.B. bei Wasserbilanzierung für den gesamten Untersuchungsraum Berücksichtigung (Abschn. 5.2.2.6, Tab. 5-11).

Generell erfolgte eine Messfehlerkorrektur aller Niederschlagswerte mit dem Faktor 1,09 (vgl. DVWK, 1996), da Niederschlagsmessungen häufig Messfehlern unterlegen sind. Diese entstehen vornehmlich durch Veränderung des Windfeldes, Benetzungsverluste an den Trichterwänden, Verdunstung aus den Sammelgefäßen und bei sehr geringen Niederschlagsintensitäten unterhalb der Ansprechschwelle des Messgerätes (MANIAK, 1997).

### 5.2.2.2 Verdunstungsmodell

Als **potentielle Evapotranspiration** (Referenzevapotranspiration) PET wird diejenige Wasserdampfmenge in [mm/Δt] bezeichnet, die von einer ganz oder teilweise mit Vegetation bedeckten Fläche bei ungehindertem Wassernachschub maximal in die Atmosphäre transferierbar ist (MANIAK, 1997). Die im Modell je nach verfügbarer Datenbasis angewendeten Methoden zur Berechnung der PET nach HAUDE und nach SCHENDEL sind einfach anzuwenden und lassen die Größenordnungen der Verdunstung ermitteln (HÖLTING, 1992).

$$PET_{Schendel} = \left( \frac{T}{LF} \right) * 480 \quad [\text{mm}] \quad (\text{Gleichung 5-2})$$

T: Monatsmittel der Temperatur

LF: Monatsmittel der Luftfeuchte

$$PET_{Haude} = f_H * P_{14} \left( 1 - \frac{F_{14}}{100} \right) \quad [\text{mm/d}]$$

(Gleichung 5-3a)

$$P_{14} = 4,58 * 10^{\frac{7,45*t}{235+t}} \quad [\text{mbar}]$$

(Gleichung 5-3b)

- f<sub>H</sub>: Monatskoeffizient
- P<sub>14</sub>: Sättigungsdampfdruck der Luft um 14 h
- F<sub>14</sub>: relative Luftfeuchte um 14 h
- t: Lufttemperatur um 14 Uhr

Bei Verwendung des HAUDE-Verfahrens wird auf die empirisch für Böden mit hohem Grundwasserstand gewonnenen HAUDE-Faktoren f<sub>H</sub> nach DIN 19685 (1979) zurückgegriffen. Für Aussagen über die Verdunstung einzelner Tage sind beide Verfahren zu ungenau. Bei Monatssummen sowie langjährigen Mitteln und für einen regionalen Überblick über den Wasserhaushalt größerer Gebiete hat sich in Deutschland insbesondere das HAUDE-Verfahren bewährt (DOMMERMUTH & TRAMPF, 19991). Die berechneten Werte der PET nach der SCHENDEL-Formel aus den arithmetischen Monatsmitteln von Temperatur und Luftfeuchte der Station Reifland (1975-1999) führen für das Untersuchungsgebiet zu vergleichsweise guten Ergebnissen (Tab. 5-2 und Tab. 5-11).

Für Reifland ergibt sich eine mittlere potentielle Jahresverdunstung von 535 mm. Vergleichsweise findet sich in der Literatur (DVWK, 1996) für den im Nordwesten des Einzugsgebietes gelegenen Lippersdorfer Bach ein Wert von 530 mm/a. Für das Einzugsgebiet des Hölzelbergbachs wurden im mehrjährigen Mittel 566 mm/a Evapotranspiration ermittelt (REICHEL, 1998). Auf detailliertere Ansätze zur Berechnung der Evapotranspiration wurde auch wegen der erzielten guten Ergebnisse verzichtet. Eine zusätzliche Integration weiterer Verdunstungsmodelle in „WRAP“ ist jederzeit möglich.

Die **reale (aktuelle) Evapotranspiration** AET ist die tatsächliche Verdunstung in [mm/Δt]. Sie wird auf der Grundlage der PET (Referenzevapotranspiration über Grünland) ermittelt. Für die verschiedenen Nutzungsformen und Ackerkulturen wurden aus der Literatur spezifische, zeitlich gebundene Umrechnungsfaktoren (u.a. DVWK, 1996; DOMMERMUTH & TRAMPF, 1991; GROßMANN, 1996) zur Ermittlung realer Evapotranspirationsraten aus der Referenzevapotranspiration entnommen (Tab. 5-3) und in der Modellparameterdatei für Nutzungskennwerte gespeichert (Abschn. 5.2.1).

Winterkulturen und Nadelwald weisen die höchsten Evapotranspirationsraten auf, Mais und Laubwald die niedrigsten (Tab. 5-4). Folglich sind nach klimatischer Wasserbilanz für Mais und Laubwald potentiell hohe Versickerungsraten zu erwarten.

Tabelle 5-2: Niederschlag und potentielle Evapotranspiration nach Monaten und Jahren des Untersuchungszeitraums und im mehrjährigen Mittel<sup>5/2</sup>

Zeit	N(h <sub>N</sub> ) [mm]						PET nach SCHENDEL [mm]						Ø T [°C]	Ø LF [%]
	1996	1997	1998	1999	2000*	ZR**	1996	1997	1998	1999	2000*	ZR**	ZR**	ZR***
Jan	3	17	54	64	49	70	0	5	0	4	0	4	-1,2	83
Feb	41	86	46	128	52	53	0	8	6	0	11	2	-1,9	81
Mae	42	92	129	61	190	67	0	20	9	19	14	12	1,7	81
Apr	40	72	68	46	36	72	27	19	46	41	63	33	5,3	76
Mai	99	68	36	100	59	72	40	70	71	89	101	70	10,8	74
Jun	56	55	104	115	41	98	65	90	95	90	113	82	13,3	76
Jul	161	152	139	217	127	114	74	84	87	120	79	97	15,7	76
Aug	140	54	94	83	60	97	81	104	91	111	118	98	15,5	75
Sep	114	23	127	49	71	76	52	66	62	107	73	70	11,9	81
Okt	68	94	117	55	89	53	54	25	41	48	55	47	7,9	80
Nov	46	21	111	59	41	73	36	7	0	9	26	16	2,6	83
Dez	56	79	72	76	21	78	6	0	0	1	8	5	0,1	82
Σ / Ø	865	815	1096	1054	836	923	435	499	510	639	663	535	6,8	79

Tab. 5-3: Umrechnungsfaktoren ausgewählter Nutzungsarten<sup>5/3</sup> zur Berechnung der aktuellen Evapotranspiration

Zeit	Ø Winter- kultur	Ø Som- merkultur	Mais	Ø Laub- wald	Ø Nadel- wald	Ø Grün- flächen	Ø Bebau- ung	Ø Misch- wald
Jan	0,89	0,67	0,67	0,05	0,4	0,53	0,61	0,23
Feb	0,89	0,67	0,67	0,01	0,2	0,51	0,55	0,11
Mae	0,9	0,73	0,64	0,19	0,67	0,60	0,72	0,43
Apr	0,94	0,75	0,46	0,34	1,2	0,67	0,89	0,77
Mai	1,22	1,07	0,62	0,79	1,33	0,90	1,03	1,06
Jun	1,36	1,28	0,92	1,01	1,23	1,01	1,06	1,12
Jul	1,29	1,32	1	1,22	1,18	1,11	1,10	1,20
Aug	0,81	0,99	1,03	1,05	1,01	1,03	1,02	1,03
Sep	0,78	0,81	1,03	0,73	0,86	0,87	0,90	0,80
Ok	0,87	0,67	1	0,46	0,6	0,73	0,77	0,53
Nov	0,89	0,67	0,67	0,05	0,35	0,53	0,60	0,20
Dez	0,89	0,67	0,67	0	0,25	0,50	0,56	0,13
Jahresmittel	0,98	0,86	0,78	0,49	0,77	0,75	0,82	0,63

<sup>5/2</sup> Quellen der Klimadaten (vgl. Abschn. 2.2, Tab. 2-2):

\* Sächsische Landesanstalt für Landwirtschaft, Versuchsstation Forchheim

\*\* Landestalsperrenverwaltung Reifland (Zeitreihe 1975-1999)

\*\*\* Landestalsperrenverwaltung Reifland (Zeitreihe 1988-1999)

<sup>5/3</sup> Quellen der Umrechnungsfaktoren:

DVWK (1996); DOMMERMUTH & TRAMPF (1991); SPONAGEL (1980);  
Gewichtungsfaktoren bei Mischnutzungen nach GROSSMANN (1996) und  
eigenen Methoden

Die durchschnittliche AET für das gesamte Einzugsgebiet liegt unter Verwendung der Klimadaten der Station Reifland (1975-1999) und des Nutzungszeitschnitts 1993 mit gemittelten Evapotranspirationsfaktoren der ackerbaulich genutzten Flächen bei 534 mm. Dieser Wert ist nicht sehr aussagekräftig, weil Verdunstungsfaktoren verschiedener Anbaukulturen weit streuen und real zu größeren Unterschieden zwischen potentieller und realer Evapotranspiration führen ( Tab. 5-4).

Tab. 5-4: Aktuelle Evapotranspiration für ausgewählte Nutzungsarten im Einzugsgebiet der Saidenbachtalsperre bezogen auf die Referenzevapotranspiration von Reifland (Zeitreihe 1975-1999)

Zeit	Ø Winterkultur	Ø Sommerkultur	Mais	Ø Laubwald	Ø Nadelwald	Ø Grünfläche	Ø Bebauung	Ø Mischwald	Grünland =ET <sub>pot</sub>
Jan	3,4	2,6	2,6	0,2	1,5	2,0	2,4	0,9	3,9
Feb	1,0	0,8	0,8	0,0	0,2	0,6	0,6	0,1	1,2
Mae	10,1	8,2	7,2	2,1	7,5	6,7	8,0	4,8	11,2
Apr	31,2	24,9	15,3	11,3	39,8	22,2	29,4	25,5	33,2
Mai	86,4	75,8	43,9	56,0	94,2	63,4	73,0	75,1	70,8
Jun	110,3	103,8	74,6	81,9	99,8	81,5	86,0	90,9	81,1
Jul	127,0	129,9	98,4	120,1	116,1	109,3	108,3	118,1	98,4
Aug	79,1	96,7	100,6	102,6	98,7	100,2	99,2	100,6	97,7
Sep	54,4	56,5	71,8	50,9	59,9	60,3	62,6	55,4	69,7
Okt	42,4	32,7	48,8	22,4	29,3	35,6	37,3	25,9	48,8
Nov	14,9	11,2	11,2	0,8	5,9	8,8	10,1	3,4	16,8
Dez	4,9	3,7	3,7	0,0	1,4	2,7	3,1	0,7	5,5
Σ AET	565	547	479	448	554	493	520	501	538

### 5.2.2.3 Direktabflussmodell

Die vorhandenen Abflussaufzeichnungen lassen keine spezifischen Aussagen über die zeitliche und räumliche Ausprägung des Abflussgeschehens in den Brunneneinzugsgebieten zu. Für die Betrachtung des N-A-Prozesses eines Einzugsgebietes sind Ermittlungen der Direktabflussmenge eines Niederschlagsereignisses und der Anfangsverluste notwendig, deren Berechnung mit Hilfe des häufig angewendeten Verfahrens des US SOIL CONSERVATION SERVICE (SCS) erfolgt.

Das SCS-Verfahrens wird den in Kapitel 5.2.1 definierten Modellanforderungen gerecht. Es wurde in den USA auf Basis zahlreich beobachteter Hochwasserereignisse und Messungen mit Infiltrometern für kleine Einzugsgebiete entwickelt. Der Modellansatz des Verfahrens ist empirisch. Die SCS-Gleichungen stellen Ergebnisse von Regressionsanalysen dar.

Auf Basis des SCS-Verfahrens wird der abflusswirksame Anteil des Niederschlags in Abhängigkeit von der Niederschlagshöhe sowie gebietspezifischer Parameter (Bodenbeschaffenheit, Vegetation, Landnutzung, Relief) ermittelt. Dabei wird die Infiltrationskapazität des Bodens durch seine mineralogisch- petrologischen Eigenschaften wie auch durch den Grad seiner Befeuchtung bestimmt (Tab. 5-5 und Tab. 5-6). Eine zeitliche und räumliche Bodencha-

rakterisierung erfolgt im Modell über dynamische Abfragen von Klima- und Bodenparametern aus den RDBMS. Aus den täglich aufgelösten Niederschlagsdaten wird der Vorfeuchteindex und daraus folgernd der Anfangsverlustfaktor für jeden Tag der Abflussbilanzierung berechnet (Tab. 5-5).

Tab. 5-5: Ermittlung der Bodenfeuchteklassen nach dem SCS-Verfahren

Bodenfeuchteklasse	Niederschlag der vorangegangenen 5 Tage [mm]	
	Vegetationsperiode	Vegetationslose Periode
I	<30	<15
II	30-50	15-30
III	>50	>30

Die Definition der SCS-Bodengruppe erfolgt über den spezifischen Wasserdurchlässigkeitsbeiwert (kf-Werte) einer Teilfläche, der aus der Bodenparametertabelle zugewiesen wurde (Tab. 5-6). Der überwiegende Teil der Böden des Untersuchungsraums geht nach diesem Verfahren als Bodengruppe C in die Berechnungen ein.

Tab. 5-6: Beschreibung und Anteile der SCS-Bodengruppen im Einzugsgebiet der Saidenbachtalsperre

Bodengruppe	Kf-Wert [cm/d]	Beschreibung	Prozent $A_E$
A	>18	Böden mit großem Versickerungsvermögen (z.B. tiefgründige Sande und Kiese)	17,5
B	≤18 bis >9	Böden mit mittlerem Versickerungsvermögen, tief- bis mäßig tiefgründige Böden mit mäßig feiner bis mäßig grober Textur (z.B. Sandböden, Löss)	2,5
C	≤9 bis >3	Böden mit geringem Versickerungsvermögen, Böden mit feiner bis mäßig feiner Textur oder mit wasserstauer Schicht, (z.B. flachgründige Sandböden, sandiger Lehm)	79,5
D	≤3	Böden mit sehr geringem Versickerungsvermögen, Tonböden, sehr flache Böden über nahezu undurchlässigem Material, Böden mit dauernd sehr hohem Grundwasserspiegel	0,5

Die beschriebenen Einflussgrößen werden durch verschiedene GIS-Operationen im Programm für ein Einzugsgebiet zu homogenen Teilflächen zusammengefasst, für die sich summarisch ein einziger, flächengewichteter Abflusskennwert (CURVE NUMBER oder auch CN-Wert) ergibt. Der CN-Wert ist ein Maß für das maximale Speichervermögen  $\Delta S$  eines Gebietes in Abhängigkeit von Boden, Nutzung, Neigung und Vorregen. Wird S sehr groß, geht CN gegen Null. Ist S = Null, fließt der gesamte Niederschlag ab.

In der Literatur finden sich eine Fülle von empirisch gewonnenen CN-Werten verschiedener Nutzungstypen für die SCS-Bodengruppen und Bodenfeuchteklasse II (z.B. MANIAK, 1997;

USDA, 1986). Ihre Gesamtheit ist in der Modellparameterdatei für die Nutzungskennwerte gespeichert. Waren für einige Fruchtarten keine CN-Werte zu recherchieren, werden Mittelwerte der übergeordneten Fruchtartengruppe zugewiesen.

$$S = 25,4 * \left[ \left( \frac{1000}{CN} \right) - 10 \right] \quad (\text{Gleichung 5-4})$$

S: potentieller maximaler Rückhalt in [mm] (maximaler Bodenspeicher)  
 CN: Kurvennummer (Curve Number)  
 25,4: Umwandlungsfaktor von Zoll in mm

Der potentielle maximale Rückhalt S (maximaler Bodenspeicher) ist Voraussetzung zur Berechnung der Summe der anfänglichen Abstraktionen (Anfangsverluste)  $I_a$ . Unter den natürlichen Gegebenheiten in den USA wurde ein empirischer Wert von  $I_a = 0,2S$  als günstige Eingangsgröße in die Formel zur Berechnung des Direktabflusses gefunden. Der so ermittelte Anfangsverlust ist jedoch für mitteleuropäische Verhältnisse oft zu hoch (MANIAK, 1997). Deshalb wurden zur Berechnung der abflusswirksamen Anteile der Niederschläge verschiedene Anfangsverlustszenarien gerechnet. Anfangsverluste von 10% des maximalen Speichervermögens des Bodens führen, validiert mit vorhandenen Abflussaufzeichnungen zu den besten Ergebnissen (Tab. 5-11).

Grundlage für die Berechnungen des Direktabflusses ist folgende Gleichung:

$$N_D = \frac{\left[ \left( \frac{N}{25,4} \right) - \left( I_a * \left( \frac{10}{CN} \right) \right) + \left( \frac{I_a}{CN} \right) \right]^2}{\left( \left( \frac{N}{25,4} \right) + \left[ \frac{(1000 - (I_a * 10))}{CN} \right] - \left[ 10 - \left( \frac{I_a}{10} \right) \right] \right)} * 25,4$$

$N_D$ : Direktabfluss in [mm] (Gleichung 5-5)  
 N: Niederschlag in [mm]

Die Gleichung ist nur für einen positiven Ausdruck im Zähler gültig. Bei negativem Vorzeichen findet kein Direktabfluss statt ( $N_D = 0$ ). Als Abflussbeiwert  $\psi_0$  eines Einzugsgebietes ergibt sich folgernd für einen Anfangsverlust von beispielsweise 10%:

$$\Psi_0 = \left[ N - \left( \frac{100}{CN} - 1 \right) * 25,4 \right]^2 \div N \left[ N + 4 \left( \frac{100}{CN} - 1 \right) * 25,4 \right] \quad (\text{Gleichung 5-6})$$



Aus den in der Literatur aufgeführten CN-Werten für Bodennutzungen und Bodenarten der Bodenfeuchteklasse II lassen sich mit folgenden Gleichungen leicht CN-Werte für die Bodenfeuchteindizes I und III berechnen:

$$CN_I = \frac{CN_{II}}{2,334 - 0,01334CN_{II}}$$

(Gleichung 5-7a)

$$CN_{III} = \frac{CN_{II}}{0,4036 + 0,0059CN_{II}}$$

(Gleichung 5-7b)

Da in den Brunneneinzugsgebieten zumeist unterschiedliche Bodengruppen und Nutzungsarten nebeneinander ausgeprägt sind, werden die CN-Werte der extrahierten homogenen Teilflächen zu einem **flächengewichteten** CN-Wert zusammengefasst. Tabelle 5-7 zeigt ein generalisiertes Beispiel für den Nutzungszeitschnitt 1998 bei einheitlich unterstellter Bodengruppe C und Bodenfeuchteklasse II.

Tab. 5-7: Beispiel flächengewichteter CN- Werte für das gesamte Einzugsgebiet der Saidenbachtalsperre

Nutzung 1998; $\Delta CN = 54$	Fläche F [km <sup>2</sup> ]	Bodengruppe	Flächenanteil (Faktor)	CN	CN $\Delta F/F$
Bebauung/Wirtschaftshof	1,4	C	0,023	66	1,518
Straße	0,4	C	0,007	100	0,7
Wald stark aufgelockert	0,2	C	0,004	59	0,236
Grünflächen	0,9	C	0,015	54	0,81
Wasser	1,9	C	0,031	0	0
Acker	22,0	C	0,363	63	22,869
Grünland	20,6	C	0,339	51	17,289
Nadelwald	12,6	C	0,208	50	10,4
Laubwald	0,4	C	0,006	54	0,324
Mischwald	0,3	C	0,004	54	0,216

Auf Grundlage der ermittelten Direktabfluss,- Niederschlags,- und aktuellen Evapotranspirationsraten lassen sich mit Hilfe der Wasserhaushaltsgleichung unterirdische und Gesamtabflusshöhen bestimmen.

Das SCS- Verfahren ist stark nichtlinear. Neben der erheblichen Generalisierung von Boden und Vorfeuchte ist auch die CN-Zahl-Zuweisung zu den spezifischen Nutzungstypen kritisch und oftmals sehr stark von der Interpretation des Bearbeiters abhängig. Deshalb ist die Kalibrierung des Modells mit vorhandenen N-A-Aufzeichnungen Voraussetzung, um zu annehmbaren Ergebnissen bei der Gebietsdiskreditierung der Direktabflüsse zu gelangen (Tab. 5-11).

#### 5.2.2.4 Scheitelabfluss- und Translationsmodell

Die Berechnung von Direktabflüssen mittels SCS-Methode wird durch die Rationalmethode zur Abschätzung des oberirdischen Abflusses ergänzt, die gleichermaßen in den USA entwickelt wurde und breite Anwendung findet (USDA, 1986). Durch diese Methode werden im Modell Oberflächenabflussspenden (Scheitelabflüsse) für die jeweiligen Teileinzugsgebiete der Brunnen, Vorfluter oder Stauseen in Abhängigkeit von der Niederschlagsintensität berechnet. Zur Beschreibung des Translationsverhaltens eines Einzugsgebietes kommt dabei ein dimensionsloses Einheitsganglinienverfahren zur Anwendung. Die Einheitsganglinie (Unit Hydrograph) repräsentiert den Direktabfluss innerhalb eines vorgegebenen Zeitintervalls, der aus 1 mm abflusswirksamen Niederschlag resultiert. Sie wird aus morphometrischen Parametern des Einzugsgebietes abgeleitet.

$$T_c = \frac{58L}{A_E^{0,1} S^{0,2}} \quad (\text{Gleichung 5-8})$$

- $T_c$ : Fließzeit bis zum Gleichgewichtszustand (=Konzentrationszeit) [min]  
L: Maximaler Fließweg im Einzugsgebiet [km]  
 $A_E$ : Einzugsgebietsgröße [km<sup>2</sup>]  
S: Mittlere Hangneigung der Hauptabflussbahn [m/km]

Grundlage für die Berechnung der Scheitelabflüsse sind die Abflusskoeffizienten (C-Faktoren) als Funktion von Nutzung, Neigung und Boden einer Teilfläche des PAT, Angaben zur Niederschlagsintensität und zur Größe des Einzugsgebietes (Gleichung 5-9).

Des Weiteren ist aus der im Modell "vorgeswitcheten" Bestimmung des Direktabflusses mit dem SCS-Verfahren die Niederschlagsmenge bekannt, die benötigt wird, um überhaupt Abfluss zu erzeugen.

$$A_o^{PEAK} = 0,278 * C * N * A_E \quad (\text{Gleichung 5-9})$$

- $A_o^{PEAK}$ : Oberirdischer Scheitelabfluss [m<sup>3</sup>/s]  
N: Niederschlagsintensität [mm/h]  
C: Abflusskoeffizient als Funktion von Nutzungsart, Boden und Relief

Mit der beschriebenen Methodik lassen sich in den Brunneneinzugsgebieten effizient Abflussspenden und Fließzeiten des Direktabflusses in Abhängigkeit von der Niederschlagsintensität abschätzen, da nur geringe zeitliche Verzögerungen zwischen schnellem unterirdischen Abfluss und Oberflächenabfluss vorauszusetzen sind (Abschn. 7.2).

### 5.2.2.5 Bodenwasserhaushaltsmodell

In die Bilanzierungen zum unterirdischen Abfluss aus der klimatischen Wasserbilanz mittels SCS-Verfahren gehen die Speicherkapazitäten des Bodens und somit sein Retentionsvermögen nur generalisiert ein (Abschn. 5.2.2.3). Berechnete Mengen des unterirdischen Abflusses werden im N-A-Modell durch ein zusätzlich integriertes Bodenwasserhaushaltsmodell korrigiert. Das Bodenwasserhaushaltsmodell ermöglicht unter Verwendung längerer Zeitreihen die Ableitung mittlerer jährlicher Raten und Schwankungen (Häufigkeitsverteilungen) der Grundwasserneubildung. Grundlage des Verfahrens ist die klimatische Wasserbilanz (Niederschlag minus aktuelle Evapotranspiration) in Verbindung mit den bodenphysikalischen Kennwerten nutzbare Feldkapazität und kapillarer Aufstieg. Das Bodenwasserhaushaltsmodell wurde in seinen Grundzügen von THORNWAITE & MATHER (1955) erarbeitet und durch UHLIG (1959) in Deutschland eingeführt. RENGGER et. al. (1974) nahmen weitere Differenzierungen vor. Inzwischen ist es in Mitteleuropa ein verbreitetes Instrumentarium für die Abschätzung der Grundwasserneubildung (z.B. DVWK, 1996; ALBRECHT & GROßMANN, 1995; WOHLRAB et.al., 1992; HEGER, 1978; MEUSER, 1989; SCHRÖDER & HAMELS, 1987; SOKOLLEK & SÜSSMANN (1981); SOKOLLEK, 1983; SPONAGEL, 1980; WESSOLEK et.al., 1992 sowie GROßMANN, 1996) und wurde dabei des öfteren weiterentwickelt. Die GIS-Einbindung dieses Modellansatzes bot sich an, weil er den in Kapitel 5.2.1 definierten Anforderungen entspricht und die Gesamtkonfiguration des N-A-Modells sehr gut ergänzt. Der Direktabfluss wird in der vorliegenden Arbeit bei der Modellierung des Bodenwasserhaushalts detaillierter berücksichtigt, als in vielen anderen Anwendungsbeispielen recherchiert.

Bodenwasserhaushaltsmodelle auf der Basis von Tages- und Monatswerten sind von verschiedenen Autoren (PENNING et. al., 1989, SCHRÖDER UND HAMELS, 1987, WEGEHENKEL, 1995) mit komplexeren Modellen auf Grundlage von Tageswerten verglichen worden. Danach sind Ergebnisse, die aus Bodenwasserhaushaltsmodellen hervorgegangen sind, hinsichtlich des zeitlichen Verlaufs teilweise kritisch zu betrachten. Die berechneten Jahressummen entsprechen jedoch den Ergebnissen komplexer physikalischer Modelle (GROßMANN & LANGE, 1997).

Umfangreiche Erläuterungen zum verwendeten Bodenwasserhaushaltsmodell finden sich in eingangs dieses Kapitels benannter Literatur. Im Folgenden sollen ausgewählte Modellansätze und ihre Umsetzung im Untersuchungsraum vorgestellt werden.

Die Infiltration  $A_S$  wird durch die Bilanzierung des Wasserhaushaltes in der Biosphäre und der Pedosphäre berechnet:

$$A_S = N - (AET + A_{UA} - A_{UZ} + \Delta S) \quad (\text{Gleichung 5-10})$$

$A_S$ ,  $N$ ,  $AET$ ,  $A_{UA}$ ,  $A_{UZ}$ ,  $\Delta S$ : siehe Abb. 5-12

Als Randbedingung dient die Annahme, dass Sickerwasserabfluss (unterirdischer Abfluss) bei gleichem seitlichen Zu- und Abfluss nur dann stattfindet, wenn in einem betrachteten Zeitintervall Wasserüberschuss auftritt, d.h., wenn die aktuelle für Pflanzen zur Verfügung stehende Wassermenge den maximalen Wasservorrat im Wurzelraum überschreitet. Die Größen  $A_{UA}$  und  $A_{UZ}$  werden demzufolge im generierten N-A-Modell vernachlässigt. Der **maximal nutzbare Wasservorrat** MNW einer Teilfläche leitet sich aus dem pflanzenspezifischen effektiven Wurzelraum und der nutzbaren Feldkapazität des Bodens ab:

$$MNW = W_e * nFk \quad (\text{Gleichung 5-11})$$

MNW: Maximal nutzbarer Wasservorrat  
 $W_e$ : effektiver Wurzelraum  
 $nFk$ : nutzbare Feldkapazität

Die **nutzbare Feldkapazität**  $nFk$  repräsentiert den maximalen pflanzenverfügbaren Wasservorrat eines Bodens in [mm/dm]. Aus der KA4 (AG BODEN, 1994) wurden für jede Bodenart Schätzwerte zur nutzbaren Feldkapazität, ausgehend von einer mittleren Lagerungsdichte unter Acker- und Grünlandflächen und einer geringen Lagerungsdichte unter Wald, entnommen und in der Modellparameterdatei Boden gespeichert. Die Tiefe des effektiven Wurzelraumes  $W_e$  verschiedener Nutzungsarten hängt in erster Linie von der Bodenart und den Grundwasserflurabständen ab. Für Acker- und Grünlandflächen wurden die Werte aus der Sächsischen Schlagkarte (Abschn. 2.2) extrahiert, für Wald liegen Werte von LEHNHARDT UND BRECHTEL (1980) zugrunde (Tab. 5-8 und 5-9).

Tab. 5-8: Bodenarten, nutzbare Feldkapazitäten und maximal nutzbare Wasservorräte unter Waldflächen des Einzugsgebietes der Saidenbachtalsperre

Bodenart <sup>5/4</sup>	$nFk$ [mm/dm]	MNW Nadelwald [mm]	MNW Laubwald [mm]	MNW Mischwald [mm]
$W_e$ [dm]	1	9	11	10
Ls3,X3,Gr4	20	126	154	140
Ls3-Lu,X3,Gr3	21	129	158	144
Ls2,X1,Gr3	21	132	162	147
Ls3-Ut2,X3,Gr4	24	148	181	165
Ls3,X1,Gr3	20	126	154	140
Ls3-Uls,X3,Gr4	23	145	177	161
Ls2,X2,Gr3	21	132	162	147
Ls2-Uls,X3,Gr3	24	148	181	165
Ls3,X4,Gr4	20	126	154	140
Ls3,mX3,fX4,Gr4	20	126	154	140

<sup>5/4</sup> Quelle: FSK-Sächsische Landesanstalt für Forsten Graupa (vgl. Abschn. 2.2, Tab. 2-2)

Die Böden weisen im Untersuchungsraum durchschnittlich sehr hohe **Steingehalte** auf ( $\pm 35$  Vol.%). Gleichung 5-12 zeigt die Korrektur der nutzbaren Feldkapazität einer homogenen Teilfläche mit dem Steingehalt (AG BODEN, 1994):

$$nFk = \frac{100 - (\text{vol.} - \% \text{Steine})}{100} \quad (\text{Gleichung 5-12})$$

Die **Bodenfeuchte** ist Indikator für die Ableitung des pflanzenverfügbaren, **aktuell nutzbaren Wasservorrats** (ANW) und wird optional durch zwei Varianten berücksichtigt. Zum einen kann der aktuelle Wasservorrat aus der Datenbank über eine Modellparametertabelle Bodenfeuchte bestimmt werden (z.B. Bodenfeuchtemessungen von REICHELDT (1998)). Bei mangelnden Bodenfeuchteuntersuchungen wird andererseits angenommen, dass zur Mitte des Winterhalbjahres die Bodenfeuchte der Feldkapazität entspricht (z.B. RENGGER et.al., 1974). Ausgehend von diesem Zeitpunkt wird der mittlere aktuell nutzbare Wasservorrat (ANW) im effektiven Wurzelraum und somit die Bodenfeuchte für jeden Zeitschnitt direkt aus dem Modell extrahiert.

Tab. 5-9: Bodenarten und Mittelwerte des maximal nutzbaren Wasservorrats (MNW) unter landwirtschaftlichen Nutzflächen des Einzugsgebietes der Saldenbachtalsperre

Schlüssel	nFk [mm/dm]	Ø MNW landw. Nutz- flächen [mm]	Bodenart <sup>5/5</sup>
W <sub>e</sub> [dm]	1	3,5	
1.11	16	40	ls(Gr,X)1,6dm/X; ss(Gr,X)1,6dm/X
3.11	18	44	sl(Gr,X)2,6dm/X; lu(Gr,X)1,8dm/X; lu(Gr,X)2,6dm/X; ll-tl(Gr,X)
3.111	15	36	ll-tl(Gr,X)2,6dm/X; ll-tl(Gr,X)1,8dm/X
3.12	24	58	lu(Gr,X)1,6dm/X; sl(Gr,X)2,6dm/X; ll-tl(Gr,X)2,6dm/X
3.121	15	36	ll-tl(Gr,X)2,6dm/X; ll-tl(Gr,X)1,8dm/X
3.13	16	40	ls(Gr,X)2,6dm/X; lu-sl(Gr,X)2,6-8dm/X
3.131	16	40	ls(Gr,X)2,8dm/X; ls(Gr,X)2,6dm/X; ls(Gr,X)1,8dm
3.14	24	58	lu(Gr,X)2,6dm/X; sl(Gr,X)2,6dm/X; ls(Gr,X)2,6dm/X
3.141	16	40	ls(Gr,X)2,8dm/X; ls(Gr,X)2,6dm/X
3.2	16	38	ll(Gr,X)2,6dm/X; tl(Gr,X)2,6dm/X
3.21	15	36	ll-tl(Gr,X)1,8dm/X; ll-tl(Gr,X)2,6dm/X
4.1	16	40	ls;
4.2	17	42	ll; tu;

Wenn die Beziehung zwischen der Wassersaugspannung und der Wasserleitfähigkeit bekannt ist, wird in Teilbereichen mit flachanstehendem Grundwasser (<2m u. GOF) der **kapillare Aufstieg** aus dem Grundwasserleiter in den effektiven Wurzelraum berücksichtigt. Die Be-

<sup>5/5</sup> Quelle: MMK- Sächsisches Landesamt für Umwelt und Geologie (vgl. Abschn. 2.2, Tab. 2-2)

rechnung erfolgt nach der DARCY-Gleichung und den entsprechenden Bodenkennwerten aus der KA4 (AG BODEN, 1994):

$$v = -k \frac{d\Psi}{dz} - 1 \quad (\text{Gleichung 5-13})$$

V Filtergeschwindigkeit [ $\text{cm}^3/\text{cm}^2 \cdot \text{d}^{-1}$ ]  
 K Wasserleitfähigkeit [ $\text{cm}/\text{d}$ ]  
 $\Psi$  Wasserspannung [ $\text{cm WS}$ ] und  
 Z Höhe über dem Grundwasser [ $\text{cm}$ ]

Für die Zeiträume mit kapillarem Aufstieg erfolgt eine Aufaddierung zu den berechneten Wassermengen im effektiven Wurzelraum.

Darüber hinaus werden im Modell Korrekturen der Evapotranspirationsraten nach RENGER et.al. (1974) vorgenommen (Gleichung 5-14). Evaporation und Transpiration, zusammengefasst in der Evapotranspiration, sind von dem verfügbaren Wasservorrat im Boden abhängig. Liegt der **aktuell nutzbare Wasservorrat (ANW)** über 70 % der nutzbaren Feldkapazität, werden Verdunstungsprozesse nur unwesentlich beeinflusst. Mit sinkendem Wassergehalt im Boden unter 70 % der nutzbaren Feldkapazität erfolgt jedoch eine merkliche Reduktion der Intensität beider Prozesse.

$$< 70\% nFk : AET_{REAL} = AET_{PFLANZE} \left[ 0,2 + 2,0 \left( \frac{\% nFk}{100} \right) - 1,2 \left( \frac{\% nFk}{100} \right)^2 \right] \quad (\text{Gleichung 5-14})$$

Flächenversiegelung spielt in den Brunneneinzugsgebieten so gut wie keine Rolle. Auf die Anbindung von nutzungsspezifischen Versiegelungskoeffizienten wurde deshalb verzichtet.

Für jeden Zeitschnitt erfolgt die Berechnung der Bodenwasserbilanz auf Grundlage folgender Gleichung in Anlehnung an GROßMANN (1996):

$$\text{Bodenwasserbilanz}(t) = ANW(t-1) + N(t) - AET_{REAL}(t) - A_O(t) + A_K(t) \quad (\text{Gleichung 5-15})$$

ANW:                      Aktuell nutzbarer Wasservorrat  
 MNW:                     Maximal nutzbarer Wasservorrat = nFk  
 N, AET, A<sub>O</sub>, A<sub>K</sub>:        siehe Abb. 5-12

ANW = 0 und A<sub>S</sub> = 0, wenn Bodenwasserbilanz(t) ≤ 0

ANW = Bodenwasserbilanz(t) und A<sub>S</sub> = 0, wenn 0 < Bodenwasserbilanz(t) ≤ MNW

ANW = MNW und A<sub>S</sub> = Bodenwasserbilanz(t) - MNW, wenn Bodenwasserbilanz(t) > MNW

Ist die berechnete Bodenwasserbilanz eines Zeitschnitts kleiner als der maximal nutzbare Wasservorrat, findet keine Versickerung und damit auch keine Grundwasserneubildung statt.

Überschreitet die Bodenwasserbilanz den maximal nutzbaren Wasservorrat eines Standortes, ist die Versickerung die Differenz aus Bodenwasserbilanz und maximal nutzbarem Wasservorrat.

#### 5.2.2.6 Validierung der Modelle

Für den Untersuchungsraum existieren in Teilbereichen gesicherte Erkenntnisse zum Wasserhaushalt, die im Rahmen von mehreren Forschungsprojekten (Abschn. 1) aber auch mittels täglicher Abflussmessungen an den Vorflutern vorliegen. Anhand dieser detaillierten Abflussaufzeichnungen wurden die einzelnen Komponenten im N-A-Modell zunächst evaluiert. Erst danach erfolgten Modellierungen in den Einzugsgebieten der Brunnen (Abschn. 7.2).

Die in die Saidenbachtalsperre mündenden Vorfluter Haselbach, Saidenbach, Lipperdorfer Bach und Hölzelbergbach repräsentieren den Gesamtabfluss im Untersuchungsgebiet. In Tabelle 5-10 aufgezeigte mittlere jährliche und halbjährliche Abflussmengen in [mm/m<sup>2</sup>] resultieren aus den Daten zu täglich gemessenen Gesamtabflüssen [m<sup>3</sup>/s] und den DGM-berechneten Einzugsgebietsgrößen. Die Zufuhr von „Fremdwasser“ aus benachbarten Einzugsgebieten über Kluftgrundwasserleiter war bei den Berechnungen zu vernachlässigen (Karte UIS-4; Abschn. 3.4). Der beträchtliche Anteil des über den Kunstgraben zugeführten Wassers fand ebenso keine Berücksichtigung. Abflusshöhen von Haselbach und Saidenbach beziehen sich ausschließlich auf das N-A-Regime in ihren natürlichen Einzugsgebieten. Die dargestellten Basisabflussanteile am Gesamtabfluss resultieren aus der Berechnung der monatlichen mittleren Niedrigwasserabflusspenden (MoMNq) der Vorfluter nach WUNDT (1958). Die MoMNq-Werte des Sommerhalbjahres (SoMoMNq) geben die kleinste unterirdische Abflusspende (Mindestgrundwasserabflusspende) an und sind nach diesem Verfahren als Basisabfluss anzusehen.

Die berechneten Gesamtabflüsse und Anteile des Basisabflusses sind bezogen auf langjährige Mittel kritisch, weil sie lediglich auf einer Zeitreihe von 4 Jahren basieren. Sie unterliegen Unterschieden in der räumlichen und zeitlichen Ausprägung. Im Mittel wurden aus den Rohdaten der Zeitreihe 1996 bis 1999 zwischen 373 mm (Saidenbach) und 438 mm (Hölzelbergbach) Gesamtabfluss berechnet. Während in den Einzugsgebieten von Saidenbach und Haselbach (~ 81 % des gesamten Talsperreneinzugsgebietes) nur  $\frac{1}{3}$  Basisabfluss zu verzeichnen ist, ist es in den Einzugsgebieten des Hölzelbergbachs und des Lipperdorfer Bachs etwa die Hälfte. Als untypisch ist die N-A-Verteilung des Jahres 1996 hervorzuheben. Der feuchte Sommer führte hier dazu, dass die Abflussverteilung wegen der erhöhten Direkt- und Grundwasserabflüsse im Sommerhalbjahr zwischen Vegetations- (VP) und vegetationsloser Periode (VIP) etwa ausgeglichen sind. Als Vegetationsperiode wurde dabei der Zeitraum April bis September gewählt. Die Monate Oktober bis März sind der vegetationslosen Zeit zugeordnet, weil in diesem Zeitraum nur noch mit einem begrenzten Pflanzenwachstum zu rechnen ist (Abschn. 6.1.1).

Tab. 5-10: Gesamtabflusssummen und Basis abflussanteile (1996-1999) der Vorfluter Haselbach, Saidenbach, Lippersdorfer Bach und Hölzelbergbach in die Saidenbachtalsperre<sup>5/6</sup>

Zeitraum	Niederschlag [mm/m <sup>2</sup> ]	Haselbach [mm/m <sup>2</sup> ]	Saidenbach [mm/m <sup>2</sup> ]	Lippersdorfer Bach [mm/m <sup>2</sup> ]	Hölzelbach [mm/m <sup>2</sup> ]
A <sub>E</sub> [km <sup>2</sup> ]	-	26,9	22,3	4,6	0,8
VP 96	609 (70%)	165 (53%)	163 (53%)	211 (53%)	213 (48%)
VIP 96	256 (30%)	144 (47%)	142 (47%)	186 (47%)	231 (52%)
? 1996	865 (100%)	309 (100%)	306 (100%)	397 (100%)	444 (100%)
VP 97	424 (52%)	141 (44%)	139 (44%)	180 (49%)	220 (46%)
VIP 97	390 (48%)	183 (56%)	180 (56%)	188 (51%)	257 (54%)
? 1997	815 (100%)	323 (100%)	320 (100%)	368 (100%)	477 (100%)
VP 98	568 (52%)	117 (27%)	116 (27%)	142 (32%)	190 (43%)
VIP 98	528 (48%)	319 (73%)	315 (73%)	303 (68%)	251 (57%)
? 1998	1096 (100%)	436 (100%)	430 (100%)	446 (100%)	442 (100%)
VP 99	610 (58%)	172 (39%)	170 (39%)	174 (40%)	177 (45%)
VIP 99	444 (42%)	271 (61%)	268 (61%)	262 (60%)	215 (55%)
? 1999	1054 (100%)	443 (100%)	438 (100%)	437 (100%)	391 (100%)
? Zeitreihe	957	378 (100%)	373 (100%)	412 (100%)	438 (100%)
Basisabfluss Zeitreihe	-	128 (34%)	126 (34%)	194 (47%)	235 (54%)

In Tabelle 5-11 werden die bilanzierten arithmetischen Mittelwerte von Kenngrößen der Wasserhaushaltsgleichung aus dem N-A-Modell mit den vorliegenden Abflussaufzeichnungen verglichen. Die Werte auf Basis der Abflussmessungen stellen nach den Einzugsgebietsgrößen der Vorfluter gewichtete arithmetische Mittel aus Tabelle 5-10 dar. Die mit „WRAP“ berechneten Kennwerte basieren auf der Verwendung der Klimadaten Reifland (Talsperrenverwaltung), Nutzungsdaten des Zeitschnittes 1993 (CIR-Luftbildkartierung) unter Verwendung von Durchschnittskennwerten für Ackerflächen und unkorrigierten Daten zu den Bodenarten aus der MMK und der FSK (Abschn. 2.2, Tab. 2-2). Es zeigt sich eine gute Übereinstimmung der Untersuchungsergebnisse.

Die mehrjährigen anteiligen Mittel der Abflusshöhen am Jahresniederschlag ergeben für die Zeitreihe 1975-1999 etwa 9% Direktabfluss und 33% unterirdischen Abfluss. Die Anteile von etwa  $\frac{2}{3}$  schnellem unterirdischen Abfluss und etwa  $\frac{1}{3}$  Basisabfluss am Grundwasserabfluss sind auf verschiedene Modellkalibrierungen zurückzuführen und in ihrem Sicherheitsniveau kritisch. Verglichen mit den vorhandenen Abflussaufzeichnungen stellen sie jedoch plausible Größenordnungen dar.

<sup>5/6</sup> Quelle der Rohdaten: Landestalsperrenverwaltung Sachsen, Talsperrenverwaltung der Saidenbachtalsperre in Reifland (vgl. Abschn. 2.2, Tab. 2-2); VP=Vegetationszeit (April bis September); VIP = vegetationslose Zeit (Januar bis März und Oktober bis Dezember)



Tab. 5-11: Vergleichende Betrachtung der N-A-Komponenten aus unterschiedlichen Untersuchungen

Komponente	SCHWARZE et.al. (1995); SCHWARZE et.al. (1996)		„WRAP“	Abflussmessung an Vorflutern Zeitreihe 1996-1999 [mm]
	Verweilzeit [a]	Zeitreihe 1968-1995 [mm]	Zeitreihe 1975-1999 [mm]	
Niederschlag (N)	-	940 (100%)	923 (100%)	957 (100%)
Evapotranspiration (PET)	-	566 (60,2%)	539 (58,4%)	557 (58,2%)
Direktabfluss ( $N_D$ )	0	76 (8,1%)	81 (8,8%)	-
unterirdischer Abfluss ( $A_{UA}$ )	7	298 (31,7%)	303 (32,8 %)	-
Zwischenabfluss ( $A_I$ )	1 - 4	172 (18,3%)	193 (20,9%)	-
Basisabfluss ( $A_G$ )	8 - 10	162 (17,2%)	110 (11,9%)	134 (14%)
Gesamtabfluss (A)	5	374 (39,8%)	384 (41,6%)	380 (39,7%)

Etwa 58 % des jährlichen Gesamtniederschlags unterliegen der Evapotranspiration. Der mittlere zeitliche Verlauf der einzelnen Wasserhaushaltskomponenten ergibt, dass etwa 82% der Versickerung und damit näherungsweise der Grundwasserneubildung der vegetationslosen Zeit zuzuordnen sind (Abb. 5-13). Die Verdunstung verläuft dagegen mit 87% in der Vegetationsperiode faktisch umgekehrt proportional. Jährlich sind 380 mm Wasserüberschuss zu verzeichnen, die zu > 90 % auf das Winterhalbjahr entfallen.

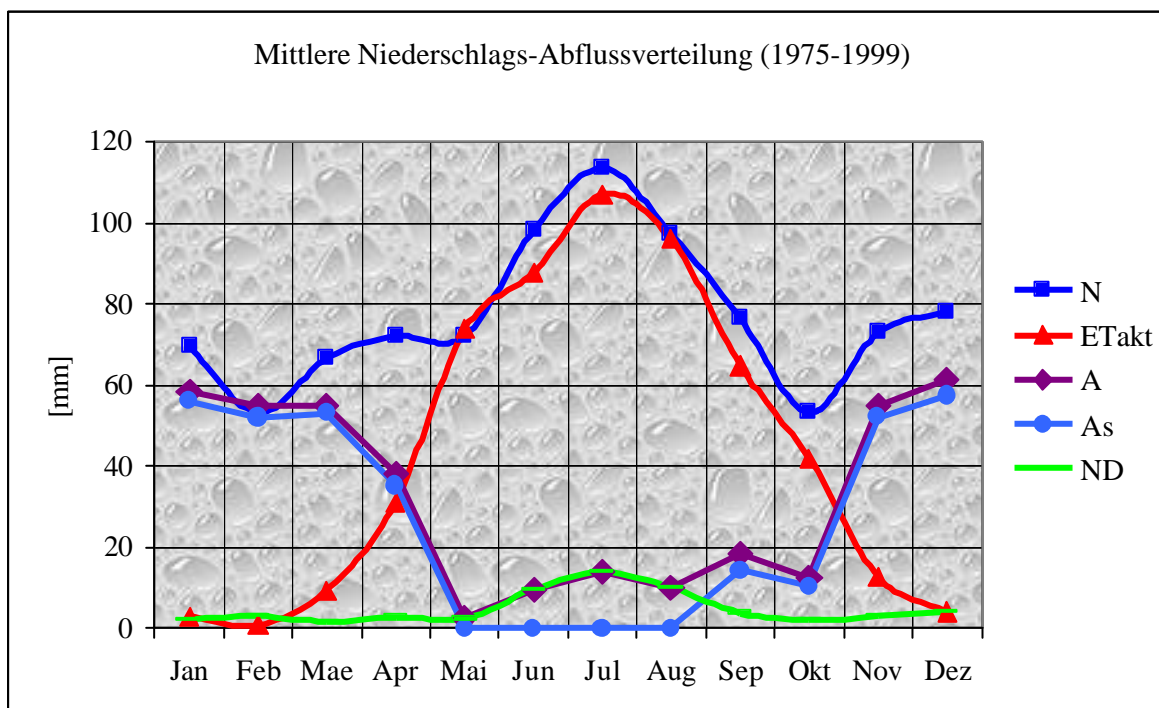


Abb. 5-13: Mittlerer zeitlicher Verlauf der Wasserhaushaltskomponenten für das Einzugsgebiet der Saidenbach-talsperre berechnet mit den N-A-Modellen in „WRAP“ (Zeitreihe 1975-1999)

Mit Ausnahme des Monats Mai ist jedoch für jeden Monat des Jahres mit positiven Wasserbilanzen zu rechnen, die im Sommerhalbjahr auf Grund von vermehrt auftretenden Starkniederschlägen häufiger als Direktabfluss abgeführt werden. Für den Monat August ist eine Lücke zwischen berechneten Verdunstungs- und Oberflächenabflussraten auszumachen, die u.a. auf die starke Generalisierung der Anfangsverluste im SCS-Verfahren zurückgeführt werden könnte.

### **5.3 Schlussfolgerung**

Die „WRAP“-basierten Berechnungen der einzugsgebietsbezogenen N-A-Prozesse führen in der jahreszeitlichen Betrachtung zu guten Übereinstimmungen mit vorhandenen Abflussaufzeichnungen im Untersuchungsraum. In den Kapiteln 7 und 8 erfolgen auf Grundlage dieser GIS-Applikation detaillierte Konfliktanalysen der Gefahrenpotentiale hinsichtlich der Belastungssituation in den Trinkwasserbrunnen.

Der Programmieraufwand zur Erstellung war hoch. Eine Mehrfachnutzung ist bei Vorhandensein des Desktop-GIS ARCVIEW und der RDBMS ACCESS bzw. ORACLE leicht möglich.

Die Einbindung weiterer Funktionalitäten konnte im zeitlichen Rahmen dieser Arbeit nicht erfolgen, so dass sich aus dem gegenwärtigen Bearbeitungsstand Defizite ergeben. Genannt seien fehlende Methoden zur detaillierteren Analyse der Einflüsse unterschiedlicher Reliefbedingungen auf biochemische Prozesse und Prozesse der Abflussbildung (z.B. nach WESSOLEK et.al., 1992 – Abschn. 8.1) und ein bisher nicht integriertes komplexes Schneemodell. Die Weiterentwicklung von „WRAP“ um diese Komponenten ist angestrebt.

Die detaillierte Modellierung des Retentions- und Translationsverhaltens in der ungesättigten und gesättigten Zone der Brunneneinzugsgebiete scheiterte an fehlenden Eingangsparametern. Diesbezügliche GIS-basierte Lösungsansätze mit Funktionalitäten im Rahmen der neuen Version von ARC/INFO (2000) (DARCYFLOW, PARTICLETRACK) wurden auf Grund des geringen Sicherheitsniveaus modellierter Aussagen verworfen bzw. führten mit der zur Verfügung stehenden Datenbasis zu falschen Ergebnissen.