

Leitfaden zur Schutzfunktionsbewertung der Grundwasserüberdeckung

H. WILDER, T. SCHÖBEL
(Stand 8. Dezember 2008)

Inhaltsverzeichnis	Seite	
1	Veranlassung, Ziele	2
2	Rechtliche und normative Grundlagen, Begriffsdefinitionen	4
3	Schutzfunktionsbewertung der Grundwasserüberdeckung	5
3.1	Vorgänge in der ungesättigten Zone	6
3.2	Schutzfunktionsbewertungen: Methodik, Auswertemodule	7
3.2.1	Datengrundlagen	8
3.2.2	Bewertung des Sickertraums bis 2 m Tiefe auf Basis bodenkundlicher Grundlagen	10
3.2.2.1	Ablauf der Sickerwassersimulation	10
3.2.2.2	Auswertemodul 1: Karte der mittleren jährlichen Sickerwasserrate (Abb. 8 und 15 Anhang)	15
3.2.2.3	Auswertemodul 2: Karte der Austauschhäufigkeit des Bodenwassers im effektiven Wurzelraum (Abb. 9 und 16 Anhang)	16
3.2.2.4	Auswertemodul 3a: Karte der Verweilzeiten des Sickerwassers im effektiven Wurzelraum (Abb. 10 u. 17 Anhang)	17
3.2.2.5	Auswertemodul 4: Bewertung der Schutzfunktion der Grundwasserüberdeckung bis 2 m Tiefe nach HÖLTING et al. 1995, modifiziert (Abb. 1 – 5, 11 u. 18 Anhang)	17
3.2.3	Bewertung der gesamten Grundwasserüberdeckung (Auswertemodule 3b und 5)	18
3.2.3.1	Auswertemodul 3b: Karte der Verweilzeiten des Sickerwassers in der gesamten Grundwasserüberdeckung	19
3.2.3.2	Auswertemodul 5: Bewertung der Schutzfunktion der Grundwasserüberdeckung (gesamt) nach HÖLTING et al. 1995, modifiziert (Abb. 13 u. 20 Anhang)	19
4	Bisherige Praxiserfahrungen und Anwendungsempfehlungen	21
4.1	Lockergesteinsgrundwasserleiter (Planungsschema)	22
4.2	Festgesteinsgrundwasserleiter (Planungsschema)	23
4.3	Schutzfunktionsbewertung in Trinkwassereinzugsgebieten	24
4.4	Anwendungen bei sonstigen Fragestellungen	25
5	Zusammenfassung	26
6	Literatur	28
	Anhang: Abbildung 1 – 20	

Leitfaden zur Schutzfunktionsbewertung der Grundwasserüberdeckung

H. WILDER, T. SCHÖBEL

1 Veranlassung, Ziele

Trinkwasser ist unser wichtigstes Lebensmittel und wird in Nordrhein-Westfalen überwiegend aus Grundwasser gewonnen. Grundwasser ist zur Gewinnung von Trinkwasser vorzuziehen, da es in der Regel von Natur aus frei von gesundheitsgefährdenden Stoffen ist und dann grundsätzlich nicht noch weiter aufbereitet werden muss. Dass Grundwasser von Natur aus appetitlich und rein ist, liegt im Wesentlichen an der Schutz- und Reinigungswirkung des Untergrundes. Dieses natürliche Barriersystem des Sickerraums sowie des Grundwasserleiters kann je nach pedologischem/geologischem und hydrogeologischem Aufbau des Untergrundes sehr unterschiedlich sein (unterschiedliche geogene Schutzwirkung).

Im Sickerraum sowie im Grundwasserleiter werden aber nicht nur Schadstoffe abgebaut, adsorbiert und transformiert; der hydrochemische Charakter des sich neu bildenden Grundwassers wird maßgebend von den chemischen Eigenschaften der Gesteine der Sickerzone und des Grundwasserleiters durch chemisch-physikalische Wechselwirkungen geprägt. Besonders intensiv sind diese Vorgänge in den Zonen mit hoher biologischer Aktivität, z. B. in der oberflächennahen Wurzelzone mit erhöhten Stoffumsetzungsraten.

Diese Wechselwirkungen sind oft komplexer Natur und noch nicht bis in alle Einzelheiten erforscht.

Zumindest was die Sickerzone betrifft, wurde in den 90er Jahren des vorigen Jahrhunderts ein Wissensstand bezüglich der Schutzfunktionsparameter erreicht, der die Entwicklung von Verfahren zur Bewertung der Schutzfunktion der grundwasserüberdeckenden Schichten erlaubte. Die gleichzeitige Entwicklung numerischer Bodenwasser- bzw. Sickerwassermodelle schaffte eine weitere entscheidende Voraussetzung, um die verschiedenen Beeinflussungsfaktoren für den Sickerwasser- und Stofftransport miteinander kombinieren zu können. Mit Hilfe moderner GIS-Systeme wurde es damit möglich, flächenhaft die Stoffrückhalteigenschaften der grundwasserüberdeckenden Schichten klassifiziert darzustellen (auch großmaßstäbig, hier: 1 : 5 000).

Der Geologische Dienst NRW – Landesbetrieb (vormals Geologisches Landesamt NRW) hat die seit ca. 1995 vorliegenden neuen Methoden verschiedenen großmaßstäbigen Tests in Wasserschutzgebieten unterzogen. Zu nennen sind hier die Pilotprojekte Wasserschutzgebiet „Weißer Bogen“ im Süden von Köln (1996/1997) sowie Wasserschutzgebiet „Brakel-Nethetal“, bei dem zum ersten Mal die verschiedenen Bewertungsverfahren in einem im Bergland gelegenen Trinkwassereinzugsgebiet getestet wurden. Dieses Pilotprojekt wurde mit dem damaligen Staatlichen Umweltamt Bielefeld, dem Wasserwerk der Stadt Brakel, der damaligen Landwirtschaftskammer Westfalen-Lippe, Kreisstelle Höxter sowie mit dem Gutachter des Wasserwerkes abgestimmt. Die hier erzielten Ergebnisse sowie die Erfahrungen aus weiteren bereits durchgeführten Bewertungsverfahren in Wasserschutzgebieten

Nordrhein-Westfalens wurden im Umweltministerium im April 2005 vorgestellt und diskutiert. Als wesentliches Ergebnis ist festzuhalten, dass die inzwischen bewährten Auswertemodule zur Bewertung der Schutzfunktion der grundwasserüberdeckenden Schichten besonders gut in Lockergesteinseinzugsgebieten im Flachland eingesetzt werden können. Auch im Mittelgebirge können plausible Ergebnisse erzielt werden, wenn belastbare Daten zur Grundwasserneubildung im Einzugsgebiet der Wassergewinnungsanlage vorliegen.

Im Anhang sind einige Kartenbeispiele zu den Grundlegendaten, Zwischenauswerteschritten und nachfolgend beschriebenen Auswertemodulen im Pilotprojekt Wasserschutzgebiet (WSG) Brakel-Nethetal und dem Trinkwassereinzugsgebiet Fellerhöfe/Kreis Viersen der Wasserwerke Willich GmbH angefügt (Abb. 6 bis 20).

Ziel ist es, einen Leitfaden zur Bewertung der Schutzfunktion der Grundwasserüberdeckung zu erarbeiten, der als Arbeitshilfe bei großmaßstäbigen Betrachtungen und Verfahren, wie z. B. bei Grundwasserkörpern, in Trinkwassereinzugsgebieten, bei Wasserschutzgebietsverfahren oder in festgesetzten Wasserschutzgebieten eingesetzt werden kann. Durch die Ermittlung der Schutzfunktion der grundwasserüberdeckenden Schichten können diejenigen Flächen identifiziert werden, die ein erhöhtes Stoffeintragsrisiko in das Grundwasser bedingen. Somit liegt eine Planungsgrundlage für den angewandten Grundwasserschutz vor, die für verschiedene Fragestellungen herangezogen werden kann, wie z. B. in der landwirtschaftlichen Kooperation, in der Bauleitplanung, bei Havarien mit grundwassergefährdenden Stoffen u. s. w. Speziell in Wasserschutzgebieten mit parzellenscharfen Schutzzongrenzen muss auf hochauflösende Datengrundlagen im Maßstab 1 : 5 000 zurückgegriffen werden. Die Erfahrung zeigt, dass die Nutzung klein- und mittelmaßstäbiger Kartengrundlagen (z. B. die Bodenkarte von NRW im Maßstab 1 : 50 000) hierfür **nicht** ausreicht. Neben einer Darstellung der benötigten Datengrundlagen werden die einzelnen aufeinander aufbauenden Auswertemodule beschrieben, Anwendungsbereiche aufgezeigt sowie mit Praxisbeispielen belegt. Ferner werden Überlegungen zur generellen Vorgehensweise mit Bezug auf die Grundwasserbelastungssituation, die speziellen bodenkundlichen und hydrogeologischen Verhältnisse, die vorliegende Datenlage sowie die Gefährdungspotenziale bestehender Nutzungen in dem zu untersuchenden Wasserschutzgebiet/Grundwasserkörper dargestellt.

2 Rechtliche und normative Grundlagen, Begriffsdefinitionen

Eine erste rechtliche Berücksichtigung der Grundwasserüberdeckung findet sich im Bundes-Bodenschutzgesetz von 1998. Unter § 2 „Begriffsbestimmungen“ wird „Boden“ wie folgt definiert:

„Boden im Sinne dieses Gesetzes ist die obere Schicht der Erdkruste, soweit sie Träger der in Absatz 2 genannten Bodenfunktionen ist, einschließlich der flüssigen Bestandteile (Bodenlösung) und der gasförmigen Bestandteile (Bodenluft), ohne Grundwasser und Gewässerbetten.“

Unter Absatz (2/1.c) wird genannt:

„Der Boden erfüllt im Sinne dieses Gesetzes natürliche Funktionen als Abbau-, Ausgleichs- und Aufbaumedium für stoffliche Einwirkungen auf Grund der Filter-, Puffer- und Stoffumwandlungseigenschaften, insbesondere auch zum Schutz des Grundwassers.“

DIN 4049 – 3 definiert den Begriff „Grundwasserüberdeckung“ als den „Gesteinskörper oberhalb einer Grundwasseroberfläche“, dieses entspricht sinngemäß dem Begriff „Boden“ nach o. a. Definition plus dem tieferen Sickerraum bis zur Grundwasseroberfläche.

DIN ISO 15175 (Mai 2005) – Bodenbeschaffenheit – Ermittlung von Kennwerten des Bodens hinsichtlich des Wirkungspfad Boden-Grundwasser (ISO 15175, 2004): Die aktuelle Norm gibt bezüglich Bodenverunreinigungen einen Überblick über die im Boden ablaufenden Prozesse bis zur Grundwasseroberfläche. Der Schwerpunkt liegt in der Anwendung pedologischer Grundlagendaten und quantitativer Verfahren insbesondere für den Oberboden bzw. den Wurzelraum. Die stoffbezogenen quantitativen Einstufungen setzen die Kenntnis von spezifischen Bodenbelastungen voraus, die durch umfangreiche Beprobungen des Bodens erst ermittelt werden müssen.

Das DVGW-Arbeitsblatt W 101 Richtlinie für Trinkwasserschutzgebiete; I. Teil: Schutzgebiete für Grundwasser (2006, Kap. 4.1, 4.4.1 und 4.5.2) sieht Regelungsfälle für die Bemessung der Schutzzonen in Wasserschutzgebieten vor, die von der Beschaffenheit, Mächtigkeit und Verbreitung der Grundwasserüberdeckung abhängen.

Des Weiteren werden im DVGW-Arbeitsblatt W 101, T. I im dortigen Kapitel 6: „Gefährdungen für das Grundwasser“ die entscheidenden Kriterien zur Ermittlung und Bewertung der Schutzfunktion der Grundwasserüberdeckung auflistet (vgl. Kap. 3.2.3).

Die EU-WRRL sieht für jeden Grundwasserkörper eine allgemeine Charakterisierung der Grundwasserüberdeckung vor. Bei den Grundwasserkörpern, für die die Zielerreichung als unwahrscheinlich bewertet wurde, muss eine stoffliche Bewertung der Deckschichten (Schutzfunktion) durchgeführt werden (EU-WRRL, Anh. II, 2.1 u. 2.2; § 36 b WHG; § 2 d LWG NRW).

Bezüglich der Niederschlagswasserbeseitigung gemäß § 51a des Landeswassergesetzes regelt der Runderlass des Ministeriums für Umwelt, Raumordnung und Landwirtschaft vom 18.05.1998 die Versickerung von Niederschlagswässern. Unter Punkt 17 wird das Versickerungsverfahren unter Einbeziehung des Schutzpotenzials des Bodens geregelt; weitere Ausführungen werden zu diesem Punkt nicht getroffen.

3 Schutzfunktionsbewertung der Grundwasserüberdeckung

Die Bewertung der Schutzfunktion der grundwasserüberdeckenden Schichten in Wasserschutzgebieten zielt nicht auf die Bemessung von Wasserschutzzonen ab, sondern vor allem auf die Identifizierung derjenigen Flächen, die geogen bedingt vergleichsweise ungünstige Rückhalteeigenschaften gegenüber Stoffeinträgen haben.

Die Stoffrückhalte- und -transformationseigenschaften der ungesättigten Zone werden von einer Vielzahl von Parametern beeinflusst, die in Abhängigkeit von den regional stark variierenden pedologischen, geologischen und biologischen Gegebenheit sehr unterschiedlich sein können. Auch wenn dieses Wirkungsgefüge noch nicht abschließend erforscht ist, wird im nachfolgenden Kapitel ein schematischer Überblick über den derzeitigen Wissensstand gegeben.

3.1 Vorgänge in der ungesättigten Zone

Die Entwicklung der Beschaffenheit des Grundwassers hängt entscheidend von dem Aufbau des pedologischen und geologischen Untergrundes ab, der vom Ort der Versickerung des Niederschlagswassers bis zum Förderbrunnen durchströmt wird.

Die Wasserbewegung im Boden ist in Abb. 1 schematisch dargestellt.

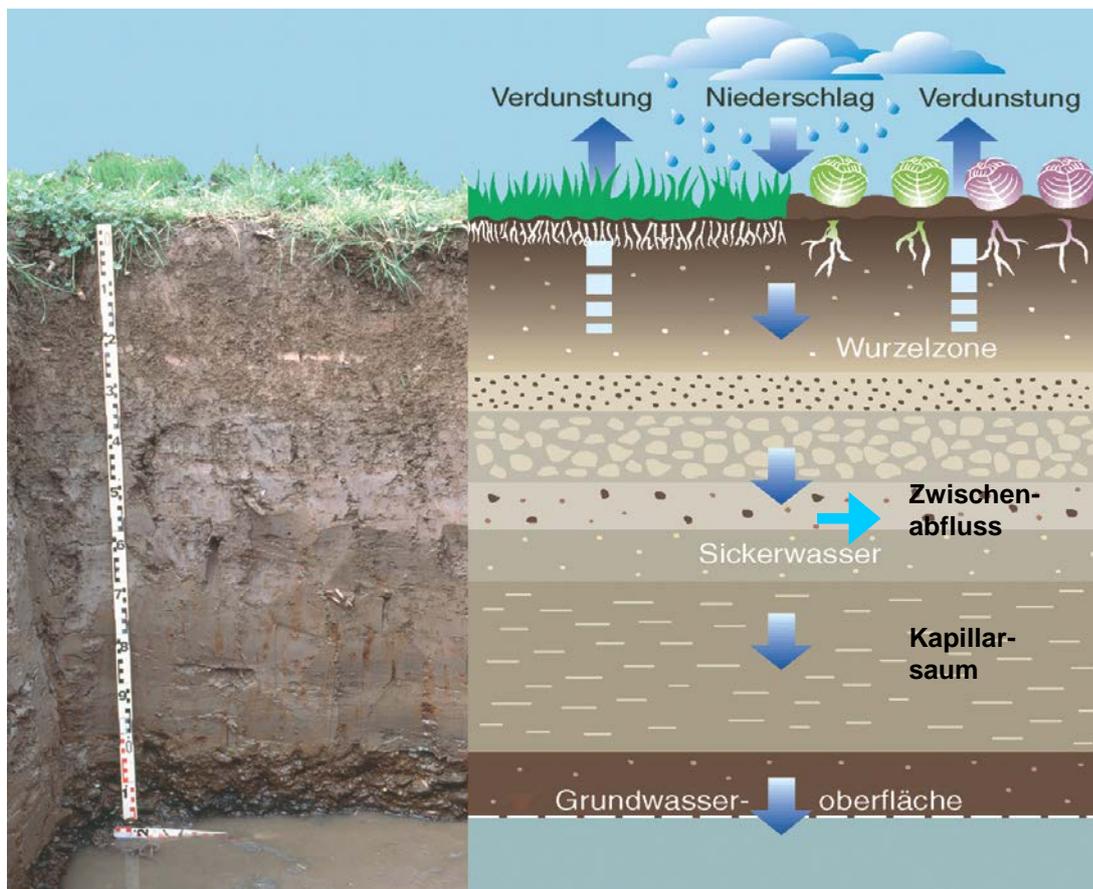


Abb. 1: Übersicht über die Wasserbewegung im Boden

Zu erkennen ist der Sickerraum, der von den grundwasserüberdeckenden Schichten aufgebaut wird. Die grundwasserschützende Wirkung bezüglich der Stoffeinträge ist in der Wurzelzone besonders ausgeprägt. Durch die hohe biologische Aktivität in dieser Bodenzone werden gelöste Stoffe aufgenommen, adsorbiert und transformiert. Auch im tieferen Sickerraum finden Wechselwirkungen zwischen Sickerwasser und Gesteinsmatrix statt, die sehr vielfältig sein können. Der Chemismus des sich neu bildenden Grundwassers wird durch diese Wechselwirkungen nicht zuletzt auch in der tieferen Sickerzone deutlich beeinflusst, wobei die Verweilzeit des Sickerwassers in der gesamten Bodenzone für die Schutzfunktionswirkung als ein Hauptparameter anzusehen ist.

Während die Sickerwasserbewegung überwiegend vertikal verläuft, ist die Grundwasserströmung im Grundwasserleiter eher horizontal ausgerichtet. Die Gesteinsmatrix des Grundwasserleiters ist als weitere natürliche Barriere anzusehen, bei der es bei entsprechend langer Verweilzeit des Grundwassers zu weiteren Fixierungen und Umwandlung von Stoffeinträgen in neutrale Abbauprodukte kommen kann. Durch das Konzept der gestaffelten Trinkwasserschutz-zonen wird diesem Prinzip weitestgehend entsprochen.

Insgesamt hängt die Schutzfunktion der grundwasserüberdeckenden Schichten als **erste natürliche Barriere** gegen den Eintrag unerwünschter Stoffe in das Grundwasser entscheidend vom regionalen pedologischen und geologischen Aufbau ab. Die DVGW-Richtlinie W 101 verzeichnet zahlreiche unterschiedliche Regelungsfälle, bei denen der vertikale und laterale Aufbau der grundwasserüberdeckenden Schichten für die Schutz-zonenausweisung von Bedeutung ist, ohne dass im Einzelnen eine Bewertung der Schutzfunktion durchgeführt wird.

3.2 Schutzfunktionsbewertungen: Methodik, Auswertemodule

Der Geologische Dienst NRW wendet das Konzept zur Ermittlung der Schutzfunktion der Grundwasserüberdeckung (HÖLTING et al., 1995) als Standardverfahren im Rahmen der Hydrogeologischen Kartierung im Maßstab 1 : 50 000 sowie bei den aktuellen Projekten der Integrierten Kartierung an. Das im Geologischen Dienst NRW angewandte Verfahren nach HÖLTING et al. wurde leicht modifiziert in der Hydrogeologischen Kartieranleitung (1997) dokumentiert.

Mit Hinblick auf großmaßstäbige Untersuchungen, z. B. in Trinkwasserschutzgebieten, reichen diese Darstellungen im Maßstab 1 : 50 000 **nicht** aus. Grundsätzlich sind für Schutzfunktionsbewertungen der Grundwasserüberdeckung hoch auflösende Datengrundlagen mindestens im Maßstab 1 : 5 000 erforderlich. Ferner müssen die Bewertungsmethoden für die geforderte Maßstabsebene auch geeignet sein, bzw. sie müssen entsprechend angepasst werden. Der Geologische Dienst NRW hat die nachfolgend beschriebenen Bewertungsmethoden in verschiedenen Feldtests geprüft. Entsprechend den im Land Nordrhein-Westfalen vorhandenen sehr unterschiedlichen pedogenen, geologischen und hydrogeologischen Randbedingungen sowie bezogen auf unterschiedliche Nutzungsstrukturen in den Trinkwassereinzugsgebieten werden im nachfolgenden Kapitel unterschiedliche Bewertungs- bzw. Auswertemodule vorgestellt.

Sie ermöglichen die Identifikation und Bewertung derjenigen Flächen im Einzugsgebiet, für die auf Grund der lithologischen Verhältnisse sowie wegen der Grundwasserflurabstandsverhältnisse ein erhöhtes Risiko von Stoffeinträgen besteht. Dieses trifft insbesondere für wasserlösliche Stoffe und Salze zu, die mit dem Sickerwasser transportiert werden.

3.2.1 Datengrundlagen

Wichtigste Grundlage zur Ermittlung der Schutzfunktion der Grundwasserüberdeckung ist die Bodenkarte zur landwirtschaftlichen und forstlichen Standorterkundung im Maßstab 1 : 5 000, die hoch auflösende Informationen bis 2 m Tiefe liefert. Eine ganze Reihe bodenkundlicher Parameter werden standardmäßig ausgewertet und als Karte und GIS-Projekt zur Verfügung gestellt, wenn die Kartierverfahren digital aufbereitet sind. Von Belang für die Schutzfunktionsbewertung sind vor allen Dingen die Bodenartenschichtung, der Gehalt an organischer Substanz (C org) sowie Informationen zum Bodenwasserhaushalt und zum Grundwasser. Verknüpft werden diese Bodendaten bzw. -parameter mit Klima-, Gelände- modell- und Nutzungsdaten (vgl. Abb. 2). Die verwendeten Abkürzungen bedeuten:

DGM	=	Digitales Geländemodell
ATKIS	=	Amtliches Topographisch-Kartographisches Informationssystem
DABO	=	Digitale Bohrungsdatenbank des GD NRW
HK 50	=	Hydrogeologische Karte von Nordrhein-Westfalen 1 : 50 000
HYK 25	=	Hydrologische Karte von Nordrhein-Westfalen 1 : 25 000
GK 25 / GK 50	=	Geologische Karte von Nordrhein-Westfalen 1 : 25 000, 1 : 50 000
IK 25	=	Ingenieurgeologische Karte von Nordrhein-Westfalen 1 : 25 000
S1-Wert	=	Bewertungspunktzahl im ersten Meter unter Geländeoberfläche
S2-Wert	=	Bewertungspunktzahl von 1 m Tiefe bis zur Grundwasseroberfläche
S2B-Wert	=	Teilmenge des S2-Wertes von 1 m bis 2 m Tiefe (Datengrundlage: Bodenkarte 1 : 5 000)
SG	=	Gesamtpunktzahl der Bewertung für den gesamten Sickerraum

Datengrundlagen und großmaßstäbige Auswertekarten für den Grundwasserschutz

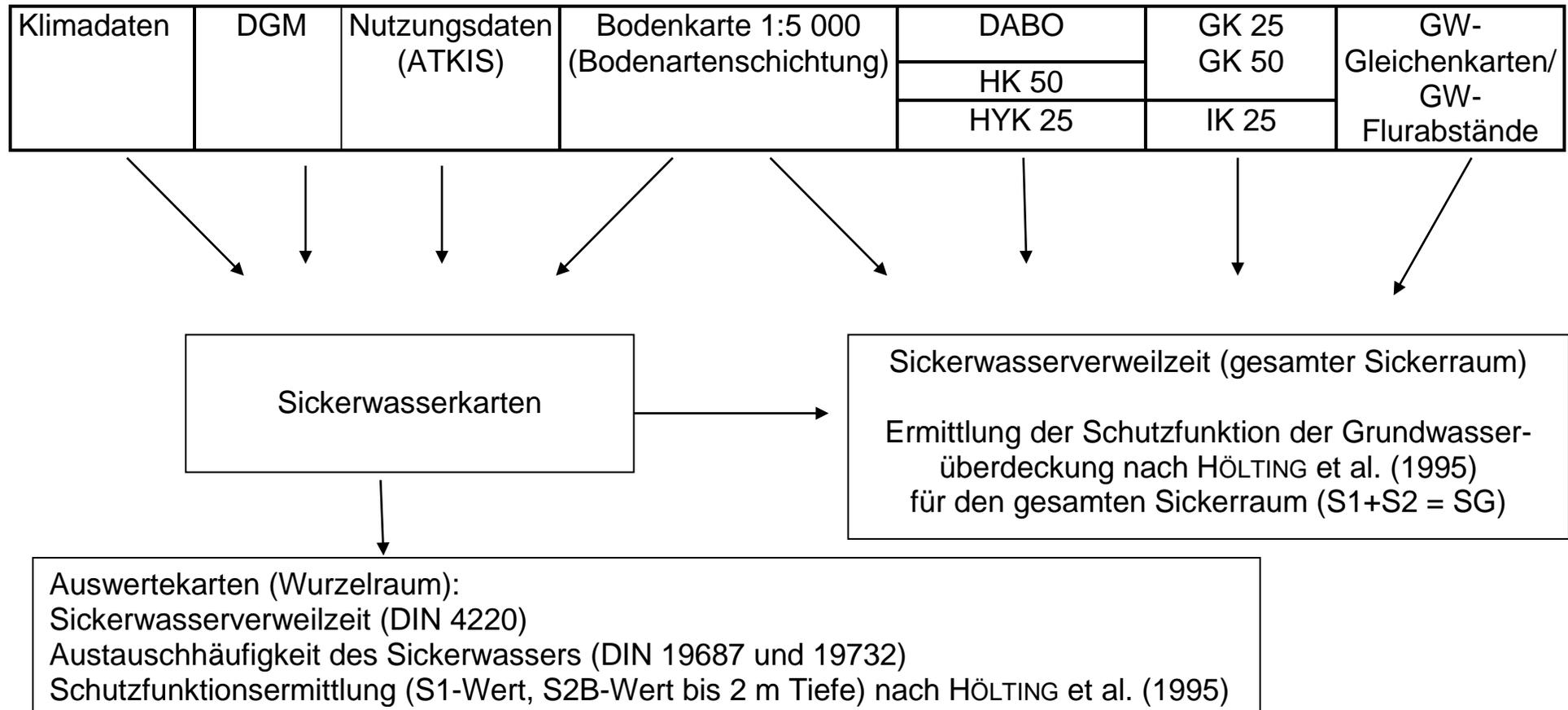


Abb. 2: Datengrundlagen und großmaßstäbige Auswertekarten für den Grundwasserschutz

Mit diesen Eingangsdaten lässt sich der Bodenwasserhaushalt standortspezifisch numerisch simulieren. Das Ergebnis sind verschiedene Auswertekarten, die als Auswertemodule Informationen zur Sickerwasserverlagerung und somit zum Stofftransport wasserlöslicher bzw. mit dem Sickerwasser transportierter Stoffe geben.

Die Auswertemodule weisen eine zunehmende Komplexität – auch im Arbeitsaufwand – auf, werden dadurch aber differenzierter und aussagekräftiger. Sie bauen aufeinander auf, so dass die Module, die fehlende oder schwerer beschaffbare Daten erfordern, später nach Bedarf ergänzt werden können. Beispiel sind die Daten, die den tieferen Untergrund (tiefer 2m) beschreiben. Diese können nicht mehr der Bodenkarte entnommen werden, sondern müssen u. a. aus vorhandenen oder noch anzufertigenden Bohrbeschreibungen entnommen werden (für Auswertemodul 3b und 5, s. Kap. 3.2.3).

3.2.2 Bewertung des Sickerraums bis 2 m Tiefe auf Basis bodenkundlicher Grundlagen

3.2.2.1 Ablauf der Sickerwassersimulation

Die möglichst genaue Abschätzung standortgerechter Sickerwasserraten ist ein einflussreiches Kriterium für die Durchführung des Bewertungsverfahrens, da sie nicht nur als Einzelkriterium (Auswertemodul 1) betrachtet werden, sondern auch als Eingangsparameter für die weiteren Auswertemodule 2 bis 5 dienen. Die vorliegenden Auswertungen sind das Ergebnis einer Sickerwassersimulation mit dem Programmpaket KLIMA/GLADIS des Geologischen Dienstes Nordrhein-Westfalen für den Zeitraum von 1971 bis 2000. Das Verfahren ist im Anhang der DIN 19 687 beschrieben und wurde um die Berücksichtigung der Realnutzung (Einfluss auf Interzeption, potenzielle Verdunstung und effektive Durchwurzelungstiefe (W_e)) ergänzt. Es setzt direkt auf die Grafik und die ausgewerteten Sachinformationen der Bodenkarte auf. Simuliert wird mit einem Speicher-Kaskaden-Modell, das für die Einzelflächen der Bodenkarte Sickerwasserzeitreihen auf Tagesbasis über meist 30 Jahre berechnet. Aus den Tageswertzeitreihen jeder Einzelfläche wird ein langjähriger Mittelwert errechnet. Dazu gehen der Niederschlag und der Kapillaraufstieg aus dem Grundwasser als positive sowie die Interzeption, die nutzungsspezifische potenzielle Verdunstung nach HAUDE (1954) und die Sickerwasserspende als negative Bilanzgrößen in das Modell als Tageswerte ein. Bei Geländeneigungen größer 3 Grad erfolgt eine abgestufte Berücksichtigung des oberflächennahen Direktabflusses als negative Bilanzgröße in Abhängigkeit von der Geländeneigung, der Bodenart, der Bodenwasserhältnisse und der Nutzung (nach DÖRHÖFER & JOSOPAIT, 1980 modif.). Tabelle 1 zeigt die Datengrundlagen der Einflussfaktoren Boden, Relief, Realnutzung und Klima.

Tabelle 1: Datengrundlagen und Parameter der Einflussfaktoren für die Simulation von Sickerwasserzeitreihen mit dem Programmpaket KLIMA/GLADIS

Einflussfaktor	Datengrundlage	Parameter
Boden	Bodenkarte von Nordrhein-Westfalen 1 : 5 000 (BK5L, F und weitere)	Schichtanzahl, Schichtmächtigkeit, Abstand zum scheinbaren Grundwasser, effektive Durchwurzelungstiefe, nutzbare Feldkapazität, Feldkapazität, Luftkapazität, gesättigte Wasserleitfähigkeit und Hauptbodenart je erfasste Schicht
Relief	Digitales Gelände-Modell (DGM 50), ggfls. DGM 5 modif.	Höhe ü. NN, max. Neigung jedes Rasterpunktes (50 x 50 m)
Realnutzung	Amtl. Topogr.-Kartographisches Informationssystem (ATKIS)	generalisiert „Acker“, „Grünland“ und „Mischwald“ optional „Laubwald“ und „Nadelwald“
Klima	Ca. 45 Klimastationen in NRW und angrenzend Ca. 500 Niederschlagsmessstellen in NRW und angrenzend	Tageswert-Zeitreihen des Niederschlags und der Parameter zur Berechnung der Verdunstung nach HAUDE

Die Realnutzung, hier dem Amtlich Topographisch-Kartographischem Informationssystem (ATKIS) entnommen, bestimmt die effektive Durchwurzelungstiefe und die Interzeption (Tab. 2). Unter Interzeption ist der Niederschlagsanteil zu verstehen, der von der Vegetation zurückgehalten wird und direkt verdunstet. Sie verringert den gemessenen Niederschlag zum effektiven Niederschlag. Die Verdunstung wird mit nutzungsspezifischen HAUDE-Monatsfaktoren berechnet. Für die Berücksichtigung anthropogener Standortfaktoren wie Versiegelung, Beregnung oder Dränung, die zudem meist kleinflächig variieren, liegen keine flächendeckenden Informationen vor. Sie können zurzeit nicht simuliert werden und müssen deshalb in Kenntnis der örtlichen Gegebenheiten nach guter fachlicher Praxis geschätzt werden. Zu beachten ist, dass für parzellenscharfe Aussagen generell großmaßstäbige Bodenkarten herangezogen werden müssen.

Für das eingesetzte Programm-Paket KLIMA/GLADIS werden standardmäßig die Höhenwerte aus dem DGM 50 des Landesvermessungsamtes verwendet, um daraus mittlere Neigungswerte zu berechnen. Bei einer Neigung größer 3 Grad werden Direktabflussanteile am korrigierten Niederschlag abgeleitet.

Für den Einsatz im Maßstab 1 : 5 000 ist je nach örtlichen morphologischen Gegebenheiten (nicht bei schwacher Reliefenergie im Flachlandbereich notwendig) vorgesehen,

ein modifiziertes (intelligent ausgedünntes) DGM 5 zu verwenden, dessen Rasterweite von ursprünglich 10 m auf 25 oder 50 m vergrößert wird. Dieses Verfahren wird im GD NRW in der Integrierten Kartierung eingesetzt und verbessert die Abbildungsgenauigkeit gegenüber dem DGM 50 bei akzeptablem Datenhandling.

Tabelle 2: Ansätze für die nutzungsspezifische Interzeption in Prozent des Tagesniederschlags nach DVWK (1996), PECK & MAYER (1996) und GEHRMANN (1998) und effektive Durchwurzelungstiefe in Dezimetern bei mittlerer Lagerungsdichte nach AG Boden (1994) und DVWK (1996)

Realnutzung	Interzeption in %	effektive Durchwurzelungstiefe in dm *)
Grünland (Wiese, Weide)	10	4 bis 9
Acker	10	5 bis 11
Laubwald	15	15
Mischwald	20	15
Nadelwald	30	15

*) Durchwurzelungstiefen für Acker und Grünland variieren nach AG Boden (1994) in Abhängigkeit von der Bodenart; die Durchwurzelungstiefen für Wald variieren nach DVWK (1996) und LEHNHARDT & BRECHTEL (1980) mit dem Bestandesalter, das jedoch meist unbekannt ist. Grundwasser und Festgestein können die effektive Durchwurzelungstiefe begrenzen.

Kurzbeschreibung des Simulationsmodells KLIMA/GLADIS des GD NRW

Die folgende Abbildung 3 zeigt einen groben Überblick über den Verlauf der durchgeführten Sickerwassersimulation.

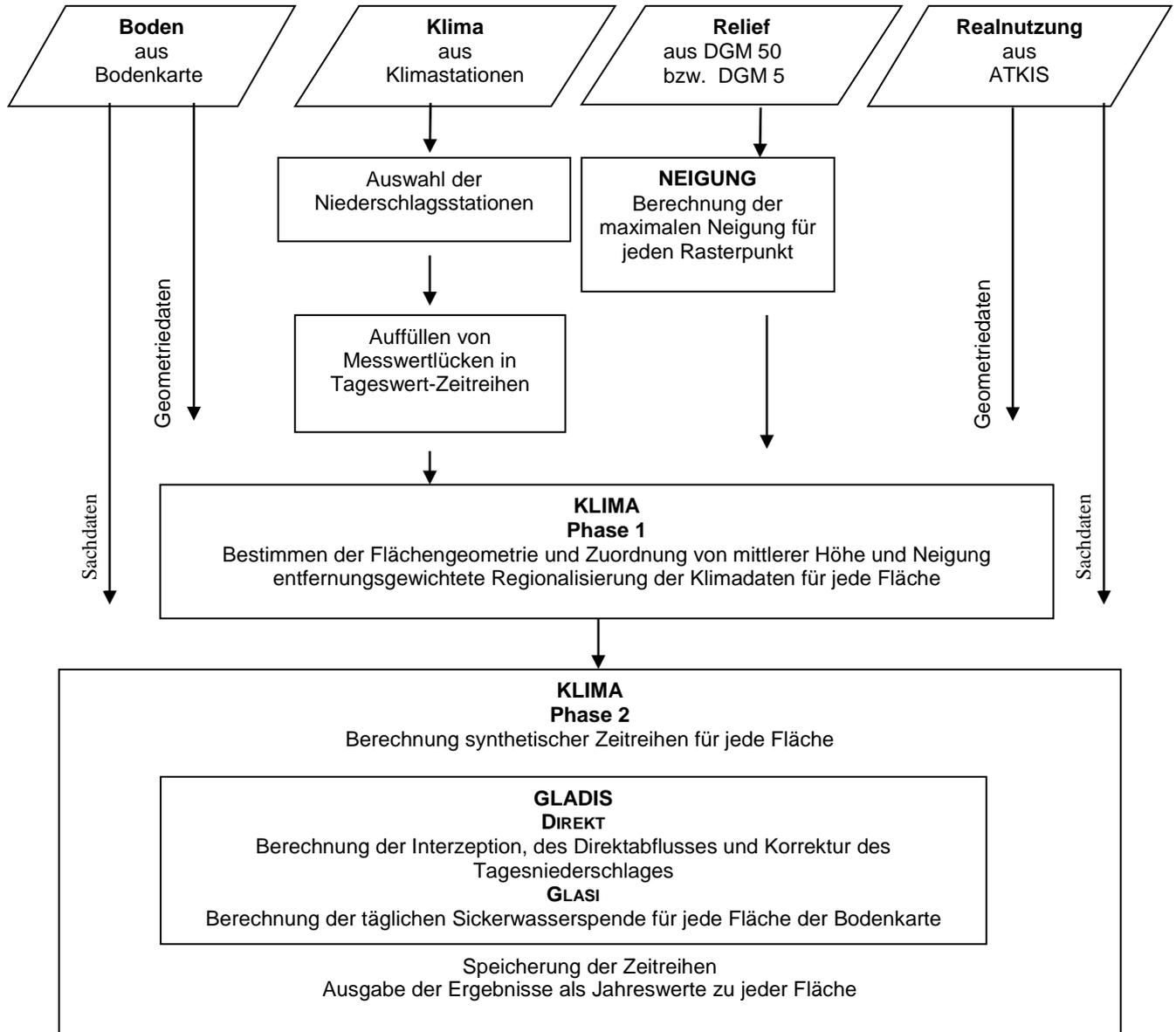


Abbildung 3: Übersicht über den Datenfluss und die eingesetzten Programme zur Simulation des Bodenwasserhaushaltes

Die Berechnung umfasst folgende Schritte:

1. Verschneiden der Landnutzungsinformation aus ATKIS mit der Bodeninformation aus der Bodenkarte 1 : 5 000.
2. Entfernungsgewichtete Interpolation der Klimaparameter auf die nutzungsspezifischen Einzelflächen der Bodenkarte mit dem Programm KLIMA (Phase 1)
3. Verschneiden des Digitalen Gelände-Modells mit den nutzungsspezifischen Einzelflächen der Bodenkarte mit dem Programm KLIMA (Phase 1)
4. Simulation des Bodenwasserhaushaltes für jede nutzungsspezifische Einzelfläche der Bodenkarte mit den Programmen KLIMA (Phase 2) und GLADIS.

Das Programm KLIMA (Programm zur Regionalisierung klimatologischer Parameter) regionalisiert die Punktdaten der Klimaparameter durch das Quadrantenverfahren: Für jede Einzelfläche wird aus jedem Quadranten die nächstliegende Station ausgesucht. Aus den Zeitreihen dieser Stationen werden höhen- und entfernungs gewichtet mittlere Tageswertzeitreihen für Niederschlag und potenzielle Verdunstung berechnet.

Je Einzelflächen werden die zugehörigen klimatologischen Zeitreihen zur Simulation des Bodenwasserhaushaltes an das Programm GLADIS übergeben. Das Programm GLADIS (GLA- Direktabfluss und Sickerwasser) wurde im GD NRW (vormals Geologischen Landesamt GLA NRW) konzipiert und erstellt. GLADIS ist bodenphysikalisch begründet und an Lysimeterdaten geeicht. Es besteht aus zwei Programmmodulen DIREKT und GLASI (GLA-Sicker).

Das Programmmodul DIREKT ermittelt nach der nutzungsspezifischen Niederschlagskorrektur um den Interzeptionsanteil (s. Tab. 2) den Direktabfluss, der den Oberflächenabfluss und aktuellen Zwischenabfluss umfasst, nach dem Ansatz von DÖRHÖFER & JOSOPAIT (1980) und HAAS (1987). Der tägliche Direktabfluss wird auf Basis des jährlichen Direktabflusses aus dem Anteil des Tagesniederschlags am Jahresniederschlag berechnet. Der gemessene Tagesniederschlag wird um den täglichen Direktabfluss vermindert und zur Simulation des Bodenwasserhaushaltes im effektiven Wurzelraum an das Programmmodul GLASI weitergegeben.

In GLASI erfolgt eine Korrektur der potenziellen Verdunstung auf den effektiven Wert nach RENGER et al. (1974) sowie der gesättigten Wasserleitfähigkeit auf den ungesättigten Wert nach SCHEFFER & SCHACHTSCHABEL (1984).

3.2.2.2 Auswertemodul 1: Karte der mittleren jährlichen Sickerwasserrate (Abb. 8 und 15 Anhang)

Methodik

In der Karte der mittleren jährlichen Sickerwasserrate aus dem Boden im Bezugszeitraum 1971 bis 2000 wird die klassifizierte, von den Einflussfaktoren Boden, Klima, Relief und Realnutzung abhängige jährliche Sickerwasserrate aus dem effektiven Wurzelraum des Bodens auf der Grundlage der Bodenkarte von Nordrhein-Westfalen 1 : 5 000 dargestellt. Die Simulation berücksichtigt nur den Untergrund innerhalb der effektiven Durchwurzelungstiefe (s. Tab. 2). Die Durchwurzelungstiefe kann je nach Nutzung variieren. Die Karte der Sickerwasserrate liefert innerhalb der Verbreitung der Lockergesteine zuverlässige Annäherungswerte der Grundwasserneubildung.

Über anstehendem Festgestein kann die Sickerwasserrate nur abgeschätzt werden, weil die Höhe der Grundwasserneubildung von der Wasseraufnahmefähigkeit des Festgesteins abhängt (schlecht quantifizierbarer Zwischenabfluss oder Interflow). Laterale Wasserbewegungen und Informationen über den tieferen Untergrund unterhalb von 2 m bleiben unberücksichtigt.

Nach der Simulation liegt für jede Fläche der Bodenkarte eine Zeitreihe der Sickerwasserrate je Tag, Monat oder Jahr für den Berechnungszeitraum in einer Datei vor. Das Modell ist für Aussagen über lange Zeiträume konzipiert und beschreibt – aufgrund der Datenlage – keine kurzfristigen oder lokalen Ereignisse. Deshalb werden die Sickerwasserraten üblicherweise über 30 Jahre gemittelt, klassifiziert und in der flächenhaften Auflösung der Bodenkarte farbig dargestellt. Für großmaßstäbige Bodenkarten und Lysimeterstandorte mit eindeutig zugewiesenen Klimastationen sind auch zeitlich oder räumlich feinere Aussagen möglich. Außerdem kann optional die Korrektur des Tagesniederschlags um den Direktabfluss unterdrückt werden.

Die Darstellungen in den Abb. 8 und 15 (Anhang) zeigen die Sickerwasserraten in Schritten zu ca. 31,6 mm pro Jahr, was einer Abflussspende von jeweils 1 l/ (s • km²) entspricht. Als „nicht bewertete Flächen“ erscheinen auf den Karten die Gewässer und überbauten Bereiche ohne bodenkundliche Informationen, die sich für die Simulation des Bodenwasserhaushaltes nicht parametrisieren lassen. Bei den Grenzlinien innerhalb der einzelnen farbigen Flächen handelt es sich um die Originalgrenzlinien der Bodenflächen aus der Bodenkarte 1 : 5 000.

In der Tendenz steigt die prinzipielle Austragsgefährdung von Schadstoffen aus der durchwurzelten Zone mit steigenden Sickerwasserraten. Allerdings sind keine Aussagen über die verlagerte Schadstoffmenge möglich, da dazu auch deren Konzentration bekannt sein muss (siehe Kap. 3.2.2.3).

3.2.2.3 Auswertemodul 2: Karte der Austauschhäufigkeit des Bodenwassers im effektiven Wurzelraum (Abb. 9 und 16 Anhang)

Methodik

In der Karte der mittleren jährlichen Austauschhäufigkeit pflanzenverfügbar gespeicherten Bodenwassers im effektiven Wurzelraum im Bezugszeitraum 1971 bis 2000 (modif. nach DIN 19 687, 15 175 und 19 732, Anlage 2) wird der klassifizierte Quotient aus der jährlichen Sickerwasserrate und der nutzbaren Feldkapazität des effektiven Wurzelraums (n_{FKWe} , vgl. Tab. 2) dargestellt. Die Darstellung in den Abb. 9 und 16 im Anhang erfolgt in einer größer werdenden Staffelung der Quotienten. Die Austauschhäufigkeit des pflanzenverfügbar gespeicherten Bodenwassers durch versickerndes Niederschlagswasser steigt mit der Höhe der Niederschläge und mit abnehmendem Speichervermögen des Bodens für pflanzenverfügbares Wasser (nutzbare Feldkapazität). Entgegen der DIN 19 685 wird hier die nutzbare Feldkapazität anstelle der Feldkapazität verwendet, weil Bodenwasser im von Pflanzen beanspruchten Wurzelraum fast ausschließlich aus den Grob- und Mittelporen verdrängt wird, von denen die engeren Grobporen und die Mittelporen die nutzbare Feldkapazität definieren, und kaum aus den Feinporen, deren „Totwasseranteil“ die nutzbare Feldkapazität zur Feldkapazität ergänzt. Hinsichtlich der zeitlichen oder räumlichen Auflösung gilt dasselbe wie für die Karte der Sickerwasserraten.

Die Austauschhäufigkeit ist nach DIN 19 732 ein Maß für die Wahrscheinlichkeit des Austrags wasserlöslicher und nicht mit dem Boden wechselwirkender Stoffe aus dem effektiven Wurzelraum der Böden. Sie eignet sich zur Abschätzung des Risikos von Gefährdungen des Grundwassers und der Vorfluter durch den Stoffaustrag, beispielsweise von Nitrat aus landwirtschaftlichen Nutzflächen. Grundsätzlich bedeutet eine geringe Austauschhäufigkeit, die meist mit einer hohen nutzbaren Feldkapazität verbunden ist, ein hohes Rückhaltevermögen des Bodens für gelöste Stoffe. Solche Böden sind meist sehr fruchtbar und leistungsfähig und daher intensiv genutzt. Weil die Nutzungsintensität der Böden aber unbekannt ist, kann die Austauschhäufigkeit lediglich das Austragsrisiko für wassergefährdende Stoffe darstellen und keine definitive Bewertung der Gewässerbelastung bieten.

Für eine derartige Bewertung fehlen:

- Sachdaten und Berechnungsverfahren für stoffspezifische Umsetzungs- und Verlagerungsprozesse
- flächenbezogene Stoffbilanzen als Ergebnis natürlicher und anthropogener Stoffzufuhren und -abfuhren
- Grenzwerte für tolerierbare Stoffmengen und Stofffrachten.

Eine geringe Austauschhäufigkeit darf nicht generell als geringe Gefahr der Grundwasserbelastung – z. B. durch Nitrat – interpretiert werden. Auf Standorten mit geringer Sickerwasserspende und geringer Austauschhäufigkeit werden die aus der Wurzelzone ausgewaschenen Stoffe nur wenig verdünnt. Dadurch ergeben sich hohe Stoffkonzentrationen im Sickerwasser und damit im Grundwasser.

3.2.2.4 Auswertemodul 3a: Karte der Verweilzeiten des Sickerwassers im effektiven Wurzelraum (Abb. 10 und 17 Anhang)

Methodik

Die Verweilzeiten des Sickerwassers im effektiven Wurzelraum ergeben sich aus dem Zusammenhang von Sickerwasserrate, nutzbarer Feldkapazität, effektiver Wurzelraum und Zeit und stellen eine der Austauschhäufigkeit verwandte Betrachtungsweise dar (s. DIN ISO 15 175 und DIN 19 685). In der vorliegenden Auswertung werden die Verweilzeiten in Anzahl von Quartalen im effektiven Wurzelraum angegeben. Eine lange Sickerwasserverweilzeit im Wurzelraum bedeutet eine hohe Schutzfunktion für das Grundwasser, da auf Grund der hohen biologischen Aktivität hier die größten Stoffumsetzungsraten erreicht werden.

3.2.2.5 Auswertemodul 4: Bewertung der Schutzfunktion der Grundwasserüberdeckung bis 2 m Tiefe nach HÖLTING et al. 1995, modifiziert (Abb. 1 – 5, 11, 18 Anhang)

Während die Auswertemodule 1 – 3 im Wesentlichen die Schutzfunktionsparameter Sickerwasserrate und nutzbare Feldkapazität zum Inhalt haben und flächenhaft darstellen, werden bei dem Verfahren nach HÖLTING et al. (1995) mehrere Schutzfunktionsparameter kombiniert bewertet. Mit Hilfe der Bodenkarte 1 : 5 000 wird der ergebnisbildende Wert S1 komplett erfasst. Dieses entspricht einer Bewertung des Wurzelraums bis ca. 1 m Tiefe (abhängig von der Flächennutzung, vgl. Anhang, Abb. 1, 2, 11 und 18). Da die BK 5 hoch auflösende Daten zur Bodenartenschichtung und zum Bodenwasserhaushalt bis 2 m Tiefe beinhaltet, kann der übrige Sickerraum (S2B, vgl. Anhang, Abb. 1, 3 und 4) von 1 – 2 m Tiefe ebenfalls bewertet werden. Grundlagen und Methodik des Bewertungsverfahrens nach HÖLTING et al. (1995) werden im Kapitel 3.2.3.2 näher erläutert.

Wie in Kap. 3.2.1 schon dargestellt, sind für den Fall, dass eine über 2 Meter mächtige Grundwasserüberdeckung zu betrachten ist, zusätzliche Informationen aus Bohrungen, Schnitten usw. abzuleiten.

3.2.3 Bewertung der gesamten Grundwasserüberdeckung (Auswertemodule 3b und 5)

Das DVGW-Arbeitsblatt W 101, T. 1 (2006) geht grundsätzlich von einer Gesamtbetrachtung der vollständigen Grundwasserüberdeckung bis zur Grundwasseroberfläche aus.

Im Kapitel 6 „Gefährdungen für das Grundwasser“ werden im DVGW-Arbeitsblatt die bei der Ermittlung und Bewertung der Schutzfunktion der Grundwasserüberdeckung zu berücksichtigenden Kriterien genannt:

DVGW-Kriterien:

- Boden:
 - Bodenart
 - Sickerwasserrate
 - Austauschhäufigkeit des Bodenwassers
 - Vertikale Durchlässigkeit
 - Gehalt an organischem Kohlenstoff
 - Puffer- und Retentionsvermögen
 - Ausbildung präferenzierter Fließwege
 - Grundwasserstand
- Ungesättigte Zone:
 - Petrografische Ausbildung
 - Vertikale Durchlässigkeit
 - Mächtigkeit
 - Sickerwasserrate/Grundwasserneubildung
 - Puffer- und Retentionsvermögen
 - Ausbildung präferenzierter Fließwege

Bezüglich der Bewertung des Bodens wird die Sickerwasserrate mit Hilfe des Auswertemoduls 1 dargestellt, die Austauschhäufigkeit des Bodenwassers mit Modul 2. Die vertikale Durchlässigkeit korreliert direkt mit der Verweilzeit des Bodenwassers im effektiven Wurzelraum (= Auswertemodul 3a) und im tieferen Sickerraum (= Auswertemodul 3b, s. u.).

Der Gehalt an organischem Kohlenstoff sowie das Puffer- und Retentionsvermögen finden u. a. über die Kationenaustauschkapazität Eingang in die Bewertung, ebenso wie die Ausbildung präferenzierter Fließwege, die zu einer schnelleren Stoffverlagerung mit dem Sickerwasser in die Tiefe führen können.

3.2.3.1 Auswertemodul 3b: Karte der Verweilzeiten des Sickerwassers in der gesamten Grundwasserüberdeckung

Dieses Auswertemodul unterscheidet sich von Modul 3a dadurch, dass die Berechnung der Sickerwasserverweilzeit für den gesamten Sickerraum oberhalb der Grundwasser-oberfläche erfolgt (s. DIN ISO 15 175 und DIN 19 685).

3.2.3.2 Auswertemodul 5: Bewertung der Schutzfunktion der Grundwasserüberdeckung (gesamt) nach HÖLTING et al. 1995, modifiziert (Abb. 13 und 20 Anhang)

Bezüglich der Bewertung der Ungesättigten Zone wird eine Anwendung des Verfahrens nach HÖLTING et al. (1995, modifiziert) empfohlen, da die in der DVGW-Richtlinie W 101 genannten Parameter bei einer Gesamtbewertung nach dieser Methode vollständig erfasst werden. Als Input für den Parameter Grundwasserneubildung bzw. Sickerwasserrate werden die flächenbezogenen Ergebnisse der Sickerwassersimulation mit KLIMA/GLADIS (Modul 1) herangezogen.

Bei dem Bewertungsverfahren nach HÖLTING et al. (1995) handelt es sich um ein Punktebewertungsverfahren (Methodenübersicht in MAGIERA, 2000), bei dem die verschiedenen Schutzfunktionsparameter der Grundwasserüberdeckung mit Punktzahlen als quasi gemeinsamen Nenner parametrisiert und zusammengefasst werden. Den verschiedenen Klassen der Gesamtschutzfunktion werden unterschiedliche Größenordnungen der Verweildauer des Sickerwassers in der Grundwasserüberdeckung zugeordnet. Sie beträgt zum Beispiel bei einer „sehr geringen Gesamtschutzfunktion“ wenige Tage bis etwa 1 Jahr, im Karst häufig noch weniger. Bis zu mehr als 25 Jahre kann die Sickerwasserverweildauer bei einer „sehr hohen Gesamtschutzfunktion“ betragen.

Erste Einsätze des Verfahrens nach HÖLTING et al. (1995) ergaben, dass bei einer großmaßstäbigen Anwendung eine weitere Unterteilung der Klassen erforderlich sein kann, die auch den spezifischen Gegebenheiten eines Untersuchungsraumes individuell angepasst werden kann. Dieses betrifft insbesondere die Schutzfunktionsklasse ≤ 500 Punkte mit der Gesamtschutzfunktion „sehr gering“. Bei verschiedenen Verfahren hat sich eine weitere Unterteilung in Subklassen von 1 bis 199 Punkten sowie 200 bis 499 Punkten bewährt (Abb. 5 Anhang).

Die erforderlichen Datengrundlagen für das Verfahren nach HÖLTING et al. (1995) sind in Abb. 1 bis 5 im Anhang dargestellt. Die Verknüpfung der Eingangsparameter findet sich im Fließdiagramm (Abb. 1 im Anhang). Bezüglich einer ausführlichen Methodendokumentation wird auf die Originalveröffentlichung sowie auf die Hydrogeologische Kartieranleitung (1997) verwiesen.

Nach den Erfahrungen mit bisher durchgeführten Projekten ist festzustellen, dass das Verfahren nach HÖLTING et al. (1995) auch großmaßstäbig (z. B. im Maßstab 1 : 5 000) mit Erfolg in Wasserschutzgebieten routinemäßig anwendbar ist, um das Stoffrückhaltepotenzial der Grundwasserüberdeckung insbesondere für wasserlösliche Stoffe beurteilen zu können.

Da die wichtigsten Schutzfunktionsparameter bei diesem Bewertungsverfahren berücksichtigt werden, lassen sich geogen bedingte Risikoflächen für mögliche Stoffeinträge identifizieren.

Bei Bedarf können anschließend für verschiedene Schadstoffe oder Schadstoffgruppen auf deren spezielles Verhalten im Untergrund abgestimmte Untersuchungen und Bewertungsverfahren zielgerichteter geplant und eingesetzt werden, da diese meist erheblich aufwändiger durchzuführen sind.

Nachteil des Bewertungsverfahrens ist, dass einige Parameter nicht oder nicht ausreichend in die Bewertung mit einfließen, wie z. B.

- biologische Aktivität:
der Grad der biologischen Aktivität ist entscheidend speziell für den Abbau organischer Bodenbelastungen sowie für den Abbau von Pestiziden und organischen Düngern.
Einfache Abschätzungen, z. B. über den Gehalt an organischem Humusgehalt, können zu Fehleinschätzungen führen.
- Carbonatgehalt in der ungesättigten Zone:
puffert den pH-Wert des Bodenwassers, hohe Carbonatgehalte führen zur Fixierung der Schwermetallgehalte.
- pH-Wert, Redoxpotenzial:
diese Milieuindikatoren für den Bodenwasserhaushalt sind ebenfalls für Lösungs-, Puffer- und Fällungsvorgänge verantwortlich; hohe Variabilität in den Böden und aufwändige Bestimmung lassen keine großflächige Bewertung zu.

Zu bedenken ist ferner, dass einige Schutzparameter unter ständiger Immissionsbelastung irreversibel reduziert werden können, wie z. B. carbonathaltige Schichten, deren Pufferwirkung unter dem dauernden Einfluss saurer Bodenlösungen aufgezehrt werden kann. Dieses gilt auch bezüglich der Nitratreduzierungs-eigenschaften spezieller Bodenschichten, deren Redoxpotenzial durch Oxidation über die Reduktion des Nitratstickstoffs schleichend verändert wird. Ein Beispiel hierfür ist die bindige kalkhaltige Grundmoräne z. B. im Münsterländer Kreidebecken, die dort als Teil der Grundwasserüberdeckung für den Grundwasserschutz bedeutend ist.

4 Bisherige Praxiserfahrungen und Anwendungsempfehlungen

Die im Kapitel 3 dokumentierten bodenkundlichen Auswertemodule 1 – 3 sowie das Schutzfunktionsbewertungsverfahren nach HÖLTING et al. (1995) wurden vom Geologischen Dienst NRW seit dem Pilotverfahren WSG „Weißer Bogen“ in acht weiteren Wasserschutzgebieten erprobt. Schon beim ersten Verfahren kamen weitgehend digitale Technik und Verarbeitung in einem Geo-Informationssystemen (GIS) zum Einsatz. Durch eine enge Kooperation mit den Auftraggebern und Nutzern sowie mit fallweise eingebundenen Ingenieurbüros konnten wertvolle Erfahrungen gesammelt werden.

Es zeigte sich, dass sich die beschriebenen Auswertemodule bewährt haben und somit für viele spezifische Aufgabenstellungen in Abhängigkeit von den bodenkundlichen, hydrogeologischen sowie den Nutzungs- und Grundwasserbelastungen ein passendes Auswertemodul bzw. eine Kombination von Auswertemodulen zur Verfügung steht.

Bedeutend ist die Erfahrung, dass mit Hinblick auf die geforderte hohe Darstellungsgenauigkeit eine entsprechende makroskalige Datengrundlage erforderlich ist. Diesbezüglich ist die digitale Bodenkarte im Maßstab 1 : 5 000 als wichtigste Datenbasis unverzichtbar. Ableitungen aus der Bodenkarte 1 : 50 000 besitzen nur Übersichtscharakter. Zur Planung von Schutzfunktionsbewertungen in Wasserschutzgebieten sollten zwischen den Beteiligten frühzeitig Gespräche aufgenommen werden, um die verschiedenen Randbedingungen, Datengrundlagen und Zielsetzungen zu diskutieren.

Entsprechende Vorschläge für Projektplanungen und -abläufe werden nachfolgend dargestellt.

4.1 Lockergesteinsgrundwasserleiter (Planungsschema)

Die folgende Abbildung 4 zeigt den Planungsablauf bei Schutzfunktionsbewertungen der Grundwasserüberdeckung über Lockergesteinsgrundwasserleitern.

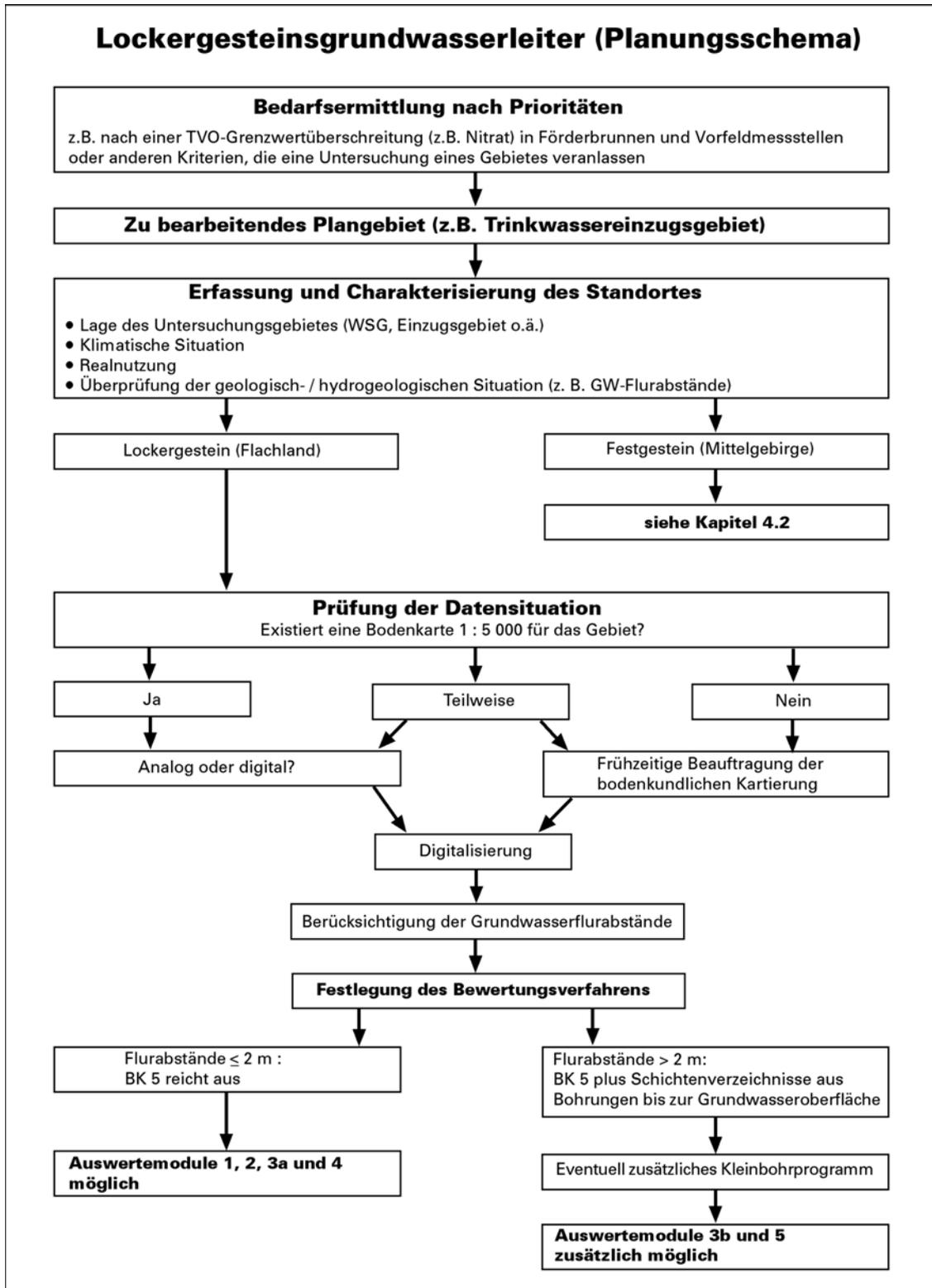


Abbildung 4: Planungsschema für Schutzfunktionsbewertungen der Grundwasserüberdeckung über Lockergesteinsgrundwasserleiter

Plausibilitätsprüfungen:

Z. B. Abgleich der Risikoflächen mit Daten aus Vorfeldmessstellen, danach Optimierung des Vorfeldmessstellennetzes, eventuell Markierungsversuch in der ungesättigten Zone zur Validierung der berechneten Sickerwasserverweilzeiten.

Umsetzung in die Praxis:

Z. B. Abgleich der Risikoflächen mit angepassten Nutzungen und Düngungen im Rahmen der landwirtschaftlichen Kooperation.

4.2 Festgesteinsgrundwasserleiter (Planungsschema)

Viele mesozoische und paläozoische Festgesteine sind in Nordrhein-Westfalen großflächig verbreitet, haben aber wegen ihres geringen Speichervolumens nur eine untergeordnete Bedeutung als Grundwasserleiter für die Trinkwassergewinnung. Ergiebiger und damit bedeutender sind Karstgrundwasservorkommen, wie z. B. im Massenkalk des Devons oder im Kohlenkalk des Karbons. Zur Trinkwassergewinnung im Rheinischen Schiefergebirge wird überwiegend Talsperrenwasser herangezogen. Dieses Oberflächenwasser generiert sich z. T. ebenfalls aus Grundwasserzuflüssen; hierzu liegen im Regelfall jedoch keine Daten vor, so dass eine Bewertung der Grundwasserüberdeckung im Einzugsgebiet von Trinkwassertalsperren zurzeit nicht näher betrachtet wird.

Das Ablaufschema für Schutzfunktionsbewertungen der Grundwasserüberdeckung von Festgesteinsgrundwasserleitern ist grundsätzlich identisch mit dem für Lockergesteinsgrundwasserleiter. Während für die Ermittlung der Grundwasserneubildung im Flachland sich das Bodenwassermodell GLADIS des GD NRW bewährt hat, sind im Mittelgebirge zusätzliche Faktoren zu berücksichtigen, wie z. B. verstärkte Oberflächen- und Zwischenabflüsse (Interflow) sowie ein Abgleich mit einzugsgebietsbezogenen Abflussdaten von Vorflutern. Als Alternative geeignet erscheint hier die Darstellung der Grundwasserneubildungshöhen nach der Berechnungsmethode GROWA (KUNKEL u. WENDLAND, 2002 und BOGENA et al., 2003) bei der Abflussdaten berücksichtigt wurden. Ob und wie weit sonstige Methoden zur Ermittlung der Grundwasserneubildung im Mittelgebirge geeignet sind (z. B. „HYPA“, WIMMER 2002), bedarf noch weiterer vergleichender Untersuchungen. Als Praxisbeispiel für eine Schutzfunktionsbewertung im Mittelgebirge / Festgestein wurde das Wasserschutzgebiet Brakel – Nethetal gewählt (siehe Abbildungen 6 – 13 im Anhang).

4.3 Schutzfunktionsbewertung in Trinkwassereinzugsgebieten

Das Schutzbedürfnis von Grundwasser in Trinkwassereinzugsgebieten besitzt einen hohen rechtlichen Rang, der sich z. B. in der Festsetzung von Wasserschutzgebieten äußert. Neben der Schutzwürdigkeit des Grundwasservorkommens ist auch dessen Schutzfähigkeit zu beurteilen; hierzu gehört die Ermittlung der Schutzfunktion der Grundwasserüberdeckung. Gemäß DVGW-Arbeitsblatt W 101 T. 1 ist u. a. der Aufbau der Grundwasserüberdeckung und die natürliche Schutzfunktion des Untergrundes bei der Bemessung der Schutzzonen zu berücksichtigen. Die Ergebnisse können Einfluss auf die Gestaltung des Vorfeldmonitorings nehmen (DVGW-Richtlinie W 108). Doch auch bei vielen bereits festgesetzten Wasserschutzgebieten (WSG) im Bereich von Lockergesteinsgrundwasserleitern besteht auf Grund der flächenhaften Immissionen und der Belastungssituation des Grundwassers, z. B. durch erhöhte Düngung Handlungsbedarf. Dieses wird z. B. durch den Grundwasserbericht Nordrhein-Westfalen (LUA NRW, 2000) räumlich differenziert belegt.

Zur Beurteilung des geogenen Risiko- bzw. Schutzpotenzials der Grundwasserüberdeckung haben sich die vorgestellten Verfahren als neutrale Grundlagen bewährt, die erfahrungsgemäß von allen Beteiligten in WSG akzeptiert werden. Wichtigste Grundlage sind die Bodenkarten 1 : 5 000 (BK 5), die in vielen bestehenden Wasserschutzgebieten bereits vorhanden sind, z. T. auch in digitaler Form.

Für die über 750 000 ha WSG-Fläche (in über 800 WSG) in NRW liegen diese Bodenkarten für ca. 245 000 ha vollständig digital und für ca. 65 000 ha teilweise in digitaler Form vor (Stand Juni 2005, wird aktuell ergänzt und überarbeitet). Für einen weiteren bereits kartierten Bereich werden die analogen Datengrundlagen digitalisiert. Der GD NRW gibt darüber Auskunft, für welches WSG bereits auswertefähige Daten zur Verfügung stehen.

4.4 Anwendungen bei sonstigen Fragestellungen

Die Anwendungsmöglichkeiten der Bodenkarte 1 : 5 000 sowie der Auswertemodule 1 bis 5 sind in der Tabelle 3 zusammengefasst:

Auswertemodule		1	2 und 3	4 und 5
	Bodenkarte 1 : 5 000	Sickerwasserkarte	Austauschhäufigkeit pflanzenverfügbaren Bodenwassers/ Sickerwasser- verweilzeit	Wertzahlen der Schutzfunktion (HÖLTING et al., 1995)
genehmigungspflichtige Tatbestände	(X)	(X)		X
Havarien		(X)	X	X
Bauleitplanung	(X)		(X)	X
GW-Monitoring		(X)		X
landwirtschaftliche Nutzung, (Kooperation) u. Düngung	X	(X)	X	(X)
Versickerung § 51 a LWG	(X)	X	(X)	(X)
GW-Bilanzierung		X		
Stofftransportmodelle		X	(X)	(X)

Tabelle 3: Themenkarten zum Grundwasserschutz und ihre Anwendungsmöglichkeiten;
X = geeignet; (X) = fallweise bzw. eingeschränkt geeignet

Als Haupteinsatzgebiet der Themenkarten zum Grundwasserschutz sind die landwirtschaftlichen Kooperationen in Wasserschutzgebieten anzusehen. Während ursprünglich die Bodenkarten zur landwirtschaftlichen Standorterkundung lediglich für Beweissicherungs- und Entschädigungsfragen seitens der Landwirtschaftskammern angefordert und eingesetzt wurden, ist deren Anwendungsspektrum nunmehr durch die vorhandenen Standard-Auswertekarten und zusätzlich verfügbaren Auswertemodule bedeutend erweitert worden. Durch die digitale Bearbeitung ist die Verwendung in GIS-Systemen möglich. Durch die Verschneidung mit weiteren Themenebenen wie z. B. einer risikobewerteten Realnutzungskarte lassen sich Gesamtrisiken für das Grundwasser ermitteln. So lassen sich z. B. hypothetische Nutzungsänderungen mit Hinblick auf veränderte Sickerwasserraten und damit verbundenen Stoffeintragsrisiken beurteilen (Risikobewertung WSG Rumeln, Stadtwerke Duisburg, 2004).

Während die Bodenkarte 1 : 5 000 sowie die Auswertemodule 2 und 3 geeignete Grundlagen für eine grundwasserverträgliche landwirtschaftliche Nutzung und Düngung darstellen, sind über die Festsetzungsdauer von Wasserschutzgebieten auch zahlreiche andere Fragen und Themen mit Bezug auf die Wasserschutzgebietsverordnung zu entscheiden (vgl. Tab. 3).

Zusammenfassend ist festzustellen, dass das Verfahren nach HÖLTING et al. (1995) geeignet ist, bei den meisten Problemstellungen herangezogen zu werden, da es den gesamten Sickerraum bewertet und die meisten Schutzfunktionsparameter berücksichtigt. Ein besonderer Vorteil ist dabei die übersichtliche Ergebnisdarstellung in Form von Wertzahlenklassen sowie der inzwischen hohe Bekanntheitsgrad dieses Verfahrens.

5 Zusammenfassung

Beschaffenheit und Verbreitung grundwasserüberdeckender Schichten sind von herausragender Bedeutung für einen nachhaltigen Boden- und Grundwasserschutz. Entsprechend den Anforderungen aktueller gesetzlicher Grundlagen und technischer Regelwerke wurde ein Leitfaden entwickelt, der auf Grundlage von Erfahrungen aus Pilotprojekten Module zur Bewertung der Schutzfunktion der Grundwasserüberdeckung vorstellt. Diese reichen von der Auswertung großmaßstäbiger Bodenkarten (BK 5) bis 2 m Tiefe bis zur Bewertung des gesamten Sickerraums mit Hilfe aufwändigerer Bewertungssysteme.

Folgende Auswertemodule werden betrachtet:

1. Karte der mittleren jährlichen Sickerwasserrate
2. Karte der Austauschhäufigkeit des Bodenwasser im effektiven Wurzelraum (angelehnt an DIN 19 687 und 19 732)
- 3a. Karte der Verweilzeiten des Sickerwassers im effektiven Wurzelraum
- 3b. Karte der Verweilzeiten des Sickerwassers in der gesamten Grundwasserüberdeckung
4. Bewertung der Schutzfunktion der Grundwasserüberdeckung bis 2 m Tiefe nach HÖLTING et al. 1995, modifiziert
5. Bewertung der Schutzfunktion der Grundwasserüberdeckung (gesamt) nach HÖLTING et al. 1995, modifiziert

Während die Auswertemodule 1, 2, 3a und 4 im Wesentlichen auf der Bodenkarte im Maßstab 1 : 5 000 (BK 5) bis 2 m Tiefe aufbauen, lässt sich der gesamte Sickerraum tiefer als 2 m mit dem Modul 3b sowie dem Modul 5 bewerten, was allerdings eine entsprechende Kenntnis des Boden- und Deckschichtenaufbaus des gesamten Sickerraums voraussetzt.

Mit Hilfe eines Planungsschemas (Kap. 4.1) lässt sich das anzuwendende Auswertemodul festlegen. Hierbei sind zahlreiche Faktoren und Randbedingungen zu beachten, um zu einer sachgerechten Lösung zu gelangen.

Der Leitfaden zur Bewertung der Schutzfunktion der Grundwasserüberdeckung soll als Arbeitshilfe bei großmaßstäbigen Betrachtungen und Verfahren dienen, wie z. B. bei belasteten Grundwasserkörpern und bestehenden sowie bei noch festzusetzenden Wasserschutzgebieten. Anwendungsfelder der Schutzfunktionsbewertungen sind der Einsatz in landwirtschaftlichen Kooperationen sowie z. B. bei Planungen in Wasserschutzgebieten, Havarien mit wassergefährdenden Stoffen sowie bei der Beurteilung von sonstigen Genehmigungs- und Verbotstatbeständen in Wasserschutzgebietsverordnungen.

6 Literatur

- Ad-hoc-Arbeitsgruppe Hydrogeologie (1997): Hydrogeologische Kartieranleitung. – Geol. Jb. **G2**: 3 – 157, 15 Abb., 6 Tab., 10 Anl.; Hannover.
- Arbeitsgruppe Bodenkunde (1982): Bodenkundliche Kartieranleitung, 3. Aufl. - 331 S., 19 Abb., 98 Tab., 1 Beil; Hannover (B.-Anst. Geowiss. u. Rohstoffe).
- Arbeitsgruppe Boden (1994): Bodenkundliche Kartieranleitung, 4. Aufl., 392 S., 33 Abb., 91 Tab., Hannover (B.-Anst. Geowiss. u. Rohstoffe).
- BOGENA, H.; KUNKEL, R.; SCHÖBEL, T.; SCHREY, H. P.; WENDLAND, F. (2003): Die Grundwasserneubildung in Nordrhein-Westfalen. Eine flächendifferenzierte Betrachtung des Landschaftswasserhaushalts. – Schr. FZ Jülich, R. Umwelt, **37**: 148 S.; Jülich.
- Deutsches Institut für Normung e. V. (1994): DIN 4049 – 3. Hydrologie, Teil 3: Begriffe zur quantitativen Hydrologie, – Berlin, (Beuth).
- Deutsches Institut für Normung e. V. (1997): DIN 19 685. Klimatologische Standortuntersuchung im landwirtschaftlichen Wasserbau, Ermittlung der meteorologischen Größen. – Berlin, (Beuth).
- Deutsches Institut für Normung e. V. (1997): DIN 19 732. Bestimmung des standörtlichen Verlagerungspotentials von nicht sorbierbaren Stoffen, - Berlin (Beuth).
- Deutsches Institut für Normung e. V. (1998): DIN 4220. Kennzeichnung, Klassifikation und Ableitung von Bodenkennwerten (normative und nominale Skalierungen), - Berlin (Beuth).
- Deutsches Institut für Normung e. V. (1998): DIN 19 687. Berechnung der Sickerwasser-rate aus dem Boden, – Berlin (Beuth).
- Deutsches Institut für Normung e. V. (2005): DIN ISO 15 175. Bodenbeschaffenheit – Ermittlung von Kennwerten des Bodens hinsichtlich des Wirkungspfads Boden – Grundwasser. – Berlin (Beuth).
- DÖRHÖFER, G.; JOSOPAIT, V. (1980): Eine Methode zur flächendifferenzierten Ermittlung der Grundwasserneubildungsrate. – Geol. Jb., **C 27**: 45 – 65; Hannover.
- DVGW (2003): Messnetze zur Überwachung der Grundwasserbeschaffenheit in Wassergewinnungsgebieten. – DVGW-Regelwerk, Arbeitsblatt W 108; Bonn.
- DVGW (2006): Richtlinien für Trinkwasserschutzgebiete; Teil 1: Schutzgebiete für Grundwasser. – DVGW-Regelwerk, Arbeitsblatt W 101; Bonn.
- DVWK (1996): Ermittlung der Verdunstung von Land- und Wasserflächen. - DVWK-Merkblätter zur Wasserwirtschaft, **238**; Bonn. (Wirtschafts- u. Verl.-Ges. Gas u. Wasser).
- ELHAUS, D.; RICHTER, F.; STAUDE, H.; STEFFENS, W.; WILDER, H.; WOLF, M. (1997): Wasserschutzgebiet „Weißer Bogen“ der GEW in Köln, Bewertung der Schutzfunktion der Grundwasserüberdeckung nach dem modifizierten Verfahren des ad-hoc-Arbeitskreises „Hydrogeologie“ der Geologischen Landesämter. – 45 S., Tl. 1 – 3, 6 Anl.; Krefeld (Arch. Geol. Dienst NRW). – [Unveröff.]
- GEHRMANN, J. (1998): BZE - Landesweite Bodenzustandserhebung in Nordrhein-Westfalen. Ergebnisse einer waldökologischen Stichprobeninventur. – Schriftenr. L.-Anst. Ökologie, Bodenordnung u. Forsten / L.-Amt Agrarordnung; Recklinghausen. – [In Vorbereit.]
- HAAS, D. (1987): Ermittlung der flächendifferenzierten Grundwasserneubildungsrate; erläutert an einem Beispiel aus dem ostwestfälischen Bergland. – Lipp. Mitt. aus Geschichte u. Landesk., **56**: 199 – 213, 6 Abb., 2 Tab.; Detmold.

- HAUDE, W. (1954): Zur praktischen Bestimmung der aktuellen und potentiellen Evapotranspiration.– Mitt. d. DWD, **8**; Bad Kissingen.
- HEITFELD, K.-H.; HEITFELD, M.; KLÜNKER, J.; WILDER, H. (2002): Ausweisung eines Trinkwasserschutzgebietes für Grundwasserförderbrunnen im Elberfelder Kalkzug. Ein besonderer Anspruch an die geologisch-hydrogeologische Erkundung. – Mitt. Ing.- u. Hydrogeol., **80**: 221 – 240; Aachen.
- HÖLTING, B.; HAERTLÉ, T.; HOHBERGER, K.-H.; NACHTIGALL, K. H.; VILLINGER, E.; WEINZIERL, W.; WROBEL, J.-P. (1995): Konzept zur Ermittlung der Schutzfunktion der Grundwasserüberdeckung. – Geol. Jb., **C63**: 5 – 24, 5 Tab.; Hannover.
- KRAHN, L.; WILDER, H.; ELHAUS, D.; SCHÖBEL, T. (2001): Risikobewertung der Deckschichten und Betrachtungen zum Stofftransport im Wasserschutzgebiet Brakel-Nethetal. – 33 S., Anh., 3 Anl.; Krefeld (Arch. Geol. Dienst NRW). – [Unveröff.]
- Landesumweltamt Nordrhein-Westfalen (2002): Grundwasserbericht 2000 Nordrhein-Westfalen. – 269 S.; Minist. für Umwelt u. Naturschutz, Landwirtschaft u. Verbraucherschutz des Landes Nordrh.-Westf.; Düsseldorf. (Hrsg.)
- LEHNHARDT, F.; BRECHTEL, H.-M. (1980): Durchwurzelungs- und Schöpftiefen von Waldbeständen verschiedener Baumarten und Altersklassen bei unterschiedlichen Standortverhältnissen. Teil I: Erfahrungen aus Geländearbeiten und Ergebnisse veröffentlichter Untersuchungen. – Allg. Forst- u. J.-Ztg., **151** (6/7): 120 – 127; Frankfurt a. M.
- MAGIERA, P. (2000): Methoden zur Abschätzung der Empfindlichkeit des Grundwassers. – Grundwasser, **3/2000**: 103 – 114; Berlin und Heidelberg (Springer):
- PECK, A.; MAYER, H. (1996): Einfluß von Bestandesparametern auf die Verdunstung von Wäldern. Forstw. Cbl. **115**: 1 - 9, Berlin (Blackwell).
- RENGER, M.; STREBEL, O.; GIESEL, W. (1974): Beurteilung bodenkundlicher, kulturtechnischer und hydrologischer Fragen mit Hilfe von klimatischer Wasserbilanz und bodenphysikalischen Kennwerten. – Z. f. Kulturtechnik u. Flurbereinigung, **15**: 353 – 366, Bremen.
- SCHEFFER, F. & SCHACHTSCHABEL, P. (1984): Lehrbuch der Bodenkunde. 11. Aufl. Stuttgart (Enke).
- SCHUSTER, H.; SCHÖBEL, T.; WINGARTZ, G.; SEEMANN, M. (2007): Risikobewertung der grundwasserüberdeckenden Schichten im Einzugsgebiet der Wassergewinnungsanlage Fellerhöfe der Wasserwerke Willich GmbH. – 25 S., Anh., 5 Anl.; Krefeld (Arch. Geol. Dienst NRW). – [Unveröff.]
- Verein Deutscher Ingenieure (1993): VDI-Richtlinie 3786 – Umweltmeteorologie, Wechselwirkung zwischen Atmosphäre und Oberflächen, Blatt 13. – Düsseldorf (Ver. Dt. Ingenieure).
- WILDER, H.; ELHAUS, D.; SCHÖBEL, T.; SEEMANN, M. (2004): Risikobewertung der grundwasserüberdeckenden Schichten im Wasserschutzgebiet Rumeln der Stadtwerke Duisburg AG. – 27 S., Anh., 4 Anl.; Krefeld (Arch. Geol. Dienst NRW). – [Unveröff.]
- WIMMER, G. (2002): Ermittlung des Grundwasserangebots in Karst- und Kluftaquiferen des Rheinischen Schiefergebirges mit Hilfe geografischer Informationssysteme in ausgewählten Einzugsgebieten im Raum Bergisch Gladbach und Kronenburg/Eifel. – Mitt. Ing.- und Hydrogeol., **82**: 314 S.; Aachen.

Anhang: Abbildung 1 – 20

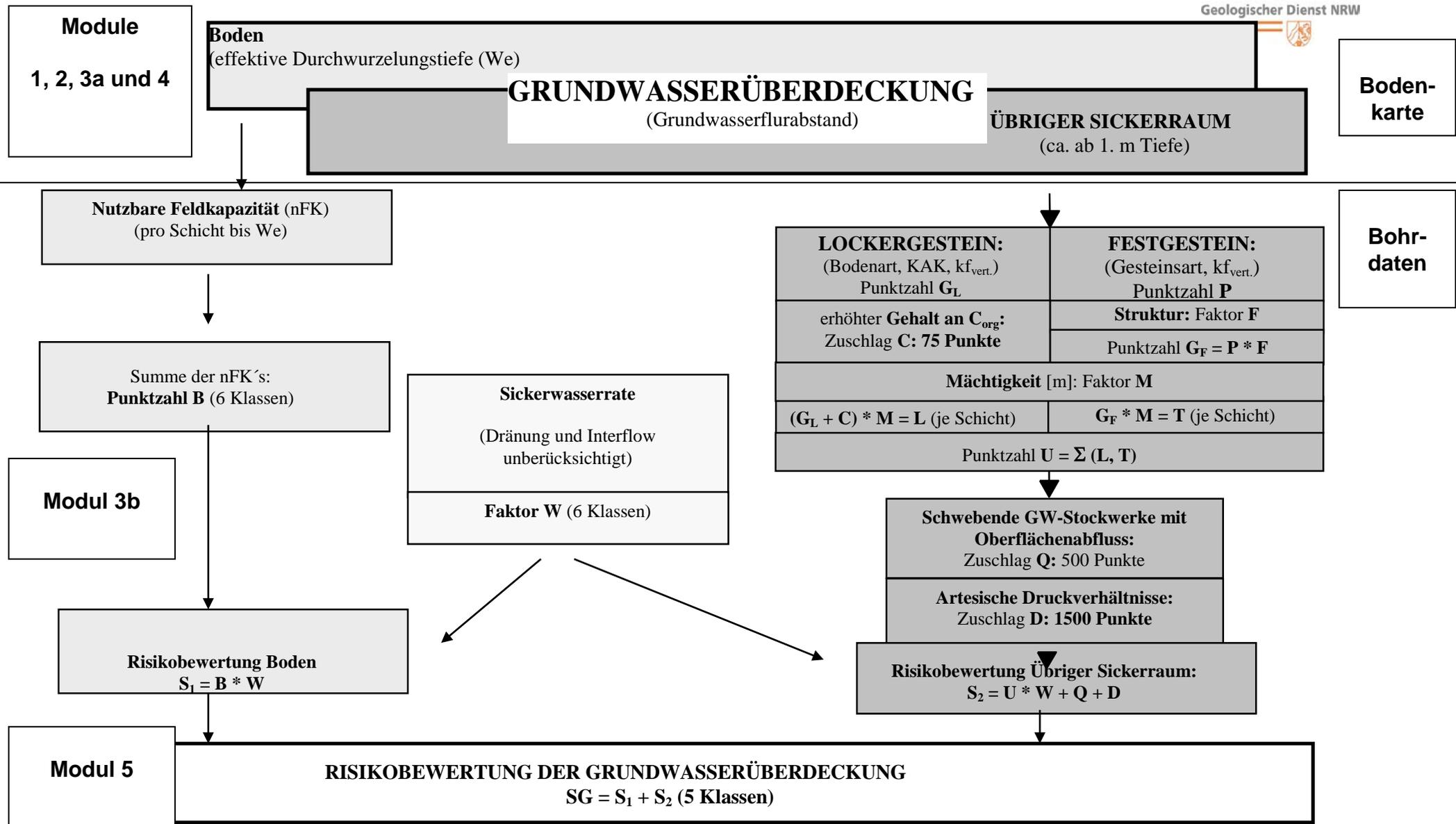


Abb. 1 (Anhang): Übersicht über das Bewertungsverfahren der Schutzfunktion der Grundwasserüberdeckung (HÖLTING et al., 1995)

Parameter-Bewertung: Bodenbereich

Σ nFKWe [mm]	Punktzahl B
> 250	750
> 200 - 250	500
> 140 - 200	250
> 90 - 140	125
> 50 - 90	50
\leq 50	10

Bewertung der Böden
nach der nFKWe

Sickerwasserrate [mm/a]	Faktor W
\leq 100	1.75
> 100 - 200	1.50
> 200 - 300	1.25
> 300 - 400	1.00
> 400 - 500	0.75
> 500	0.50

Bewertung
der Sickerwasserrate

Nutzungsart	Faktor N
Acker, Grünland, Brachland	1,00
Wald	0,80
offene Bebauung	0,85
geschlossene Bebauung	0,65
Wasserfläche	0,00

Korrekturfaktor
für Nutzung
(Standard, nicht GD NRW)

B*W = S1

Abb. 2 (Anhang): Übersicht über das Bewertungsverfahren der Schutzfunktion der Grundwasserüberdeckung (HÖLTING et al., 1995)
Hier: Errechnung des S1-Wertes (Anteil des Bodens)

Parameter-Bewertung: „Übriger Sickerraum“

Gesteinsbezeichnung nach DIN 4022, Tl. 1 (DABO) generalisiert	Kationen-Austauschkapazität KAK_{pot} nach Bild 10.2	Punktzahl G_{kvu} Durchlässigkeit, (vertikal, ungesättigt) pro m nach Bild 10.3	Gesamtpunktzahl G_L = $KAK_{pot} \cdot 10 + G_{kvu}$ pro m nach Bild 10.4	
T	Ton	41	90	500
Tu	Ton, schluffig	32	80	400
Ts	Ton, sandig	30	65	365
Tsu	Ton, sandig, schluffig	25	60	310
Ut	Schluff, tonig	20	70	270
Ust	Schluff, sandig, tonig	16	50	210
St	Sand, tonig	16	35	195
Sut	Sand, schluffig, tonig	15	45	195
U	Schluff	9	60	150
Us	Schluff, sandig	8	45	125
Su	Sand, schluffig	6	25	85
Su't	Sand, schwach schluffig, schwach tonig	5	15	65
S	Sand	2	5	25
Sg	Sand, kiesig Kies, sandig			10
G	Kies			5
Gx	Kies, steinig			
Xg	Steine, kiesig			
	vulkanische Lockergesteine			200
	Torf			400
	Mudde			300

Bewertung
der Lockergesteine
Punktzahl G_L

Abb. 3 (Anhang): Übersicht über das Bewertungsverfahren der Schutzfunktion der Grundwasserüberdeckung (HÖLTING et al., 1995)
Hier: Bewertung der Lockergesteins-Substrate im „Übrigen Sickerraum“

Parameter-Bewertung: „Übriger Sickerraum“

Gesteinsart	Punktzahl P
Tonstein, Tonschiefer, Mergelstein, Schluffstein	20
Sandstein, Quarzit, vulkanische Festgesteine, Plutonite, Metamorphite	15
poröser Sandstein, poröse Vulkanite (z. B. verfestigter Tuff)	10
Konglomerat, Brekzie, Kalkstein, Kalktuff, Dolomitstein, Gipsstein	5

Struktur	Faktor F
ungeklüftet	25.0
wenig geklüftet	4.0
mittel geklüftet, wenig verkarstet	1.0
mittel verkarstet	0.5
stark geklüftet, zerrüttet oder stark verkarstet	0.3
nicht bekannt	1.0

Bewertung
der Festgesteine
Punktzahl $GT = P * F$

Schwebende Grundwasserstockwerke: Enthält der Sickerraum schwebende Grundwasserstockwerke, die oberirdisch, zumeist über Quellen, entwässert werden, wird ein Zuschlag Q von 500 Punkten pro Stockwerk berücksichtigt.

Druckverhältnisse: Bei dauerhaft wirksamen artesischen Druckverhältnissen erfolgt ein Zuschlag D von 1500 Punkten.

Abb. 4 (Anhang): Übersicht über das Bewertungsverfahren der Schutzfunktion der Grundwasserüberdeckung (HÖLTING et al., 1995)
Hier: Bewertung der Festgesteine im „Übrigen Sickerraum“

Klassen der Risikobewertung der Grundwasserüberdeckung				
Gesamtpunktzahl SG			Klasse	
unter		200	sehr hoch	5.2
200	bis	499	sehr hoch	5.1
500	bis	699	hoch	4.2
700	bis	999	hoch	4.1
1000	bis	1499	mittel	3.2
1500	bis	1999	mittel	3.1
2000	bis	2499	gering	2.2
2500	bis	3999	gering	2.1
ab		4000	sehr gering	1

Abb. 5 (Anhang): Modifizierte Klassifikation der Risikobewertung des Stoffeintrags in das Grundwasser - Bewertung der Schutzfunktion der Grundwasserüberdeckung nach Hölting et al. (1995)
 Hier: Gesamtwert SG = S1 + S2.
 Die Klassen aus der Originalliteratur sind an den Ziffern vor dem Punkt identifizierbar

Beispiel aus dem Mittelgebirge: **WSG Brakel-Nethetal**

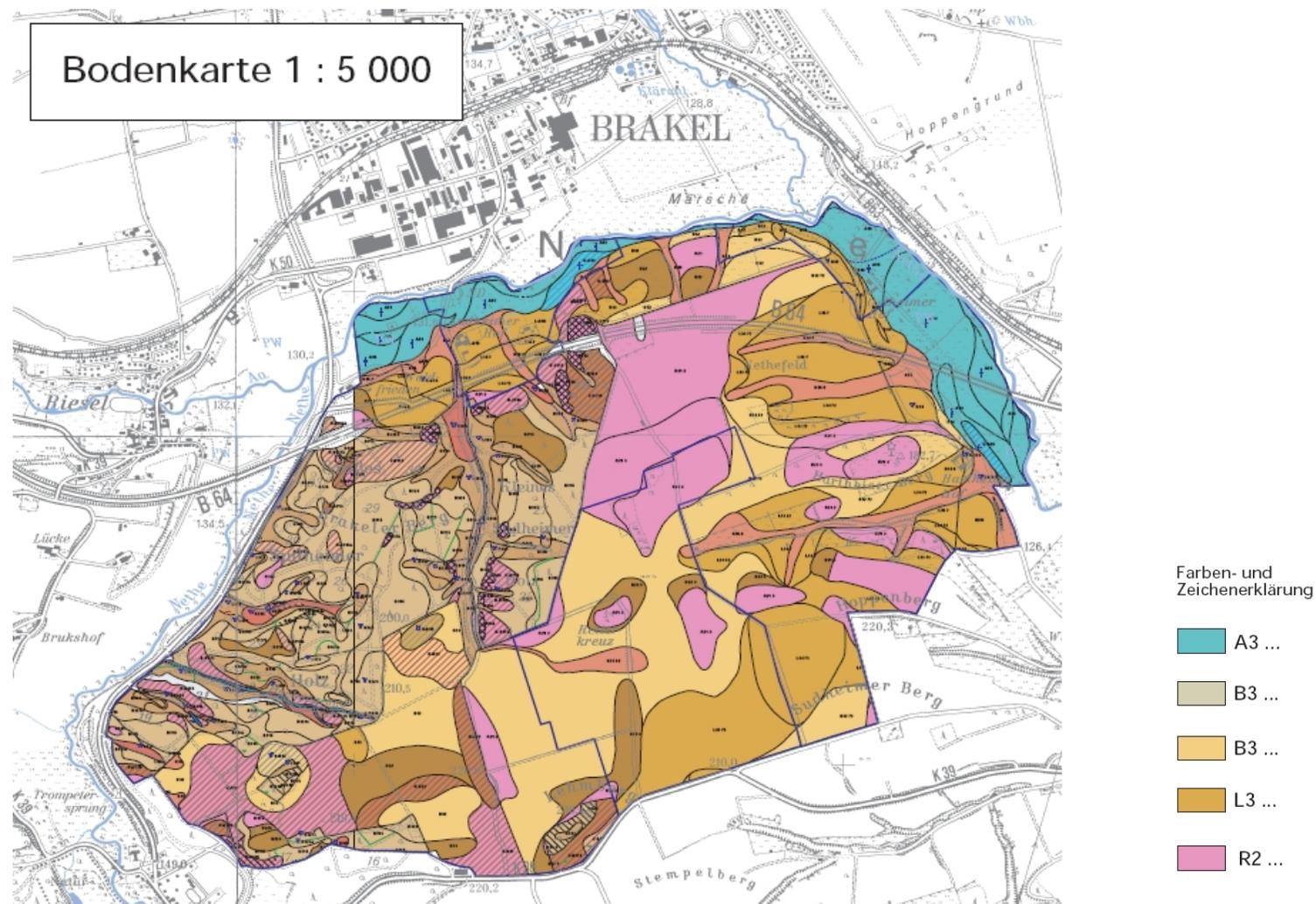


Abb. 6 (Anhang): Bodenkarte i. M. 1 : 5 000 (BK 5) des WSG Brakel-Nethetal (**Pilotprojekt**), verkleinert

Beispiel aus dem Mittelgebirge: **WSG Brakel-Nethetal**

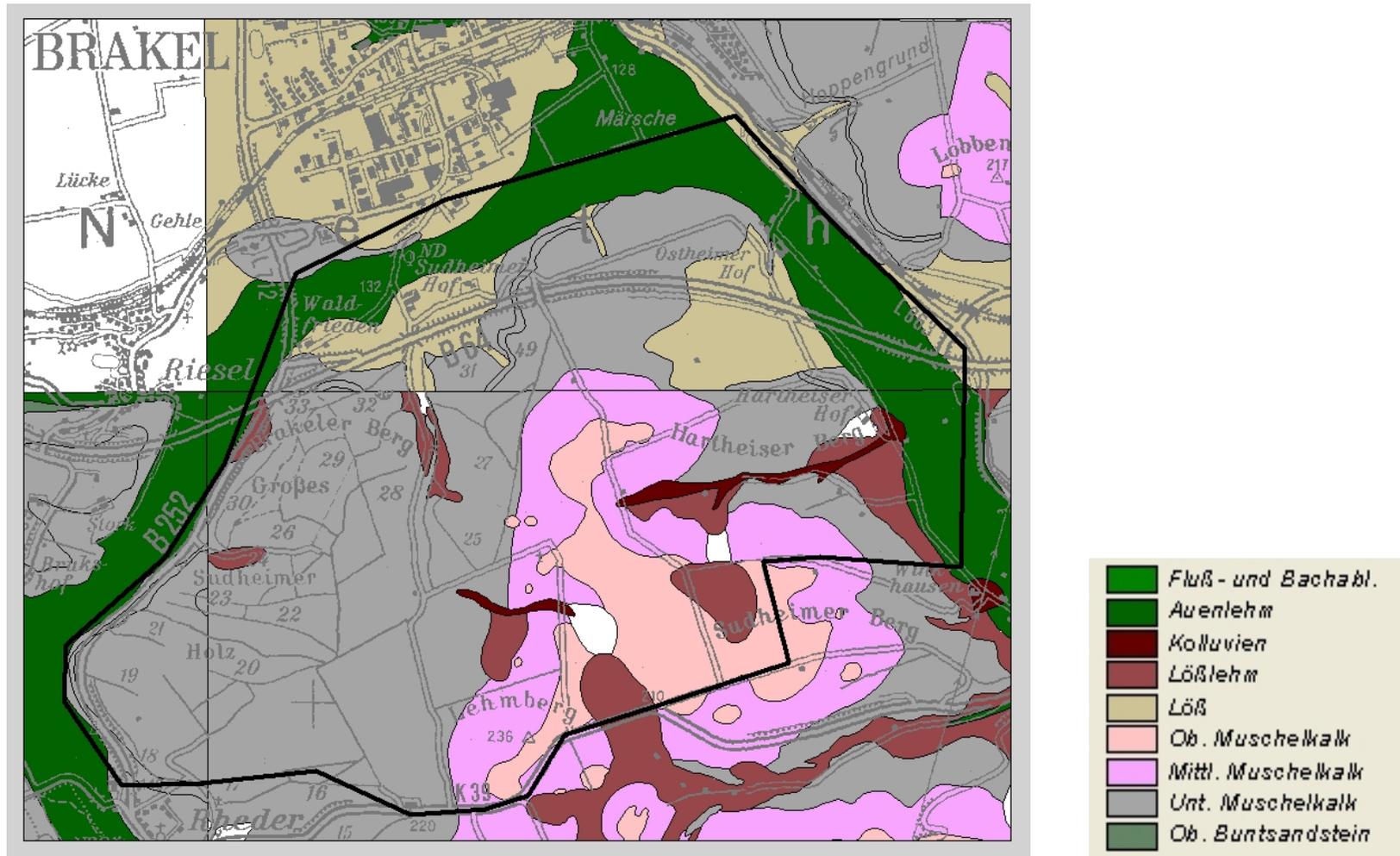
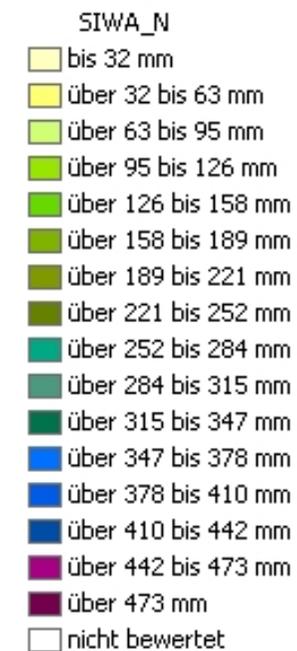
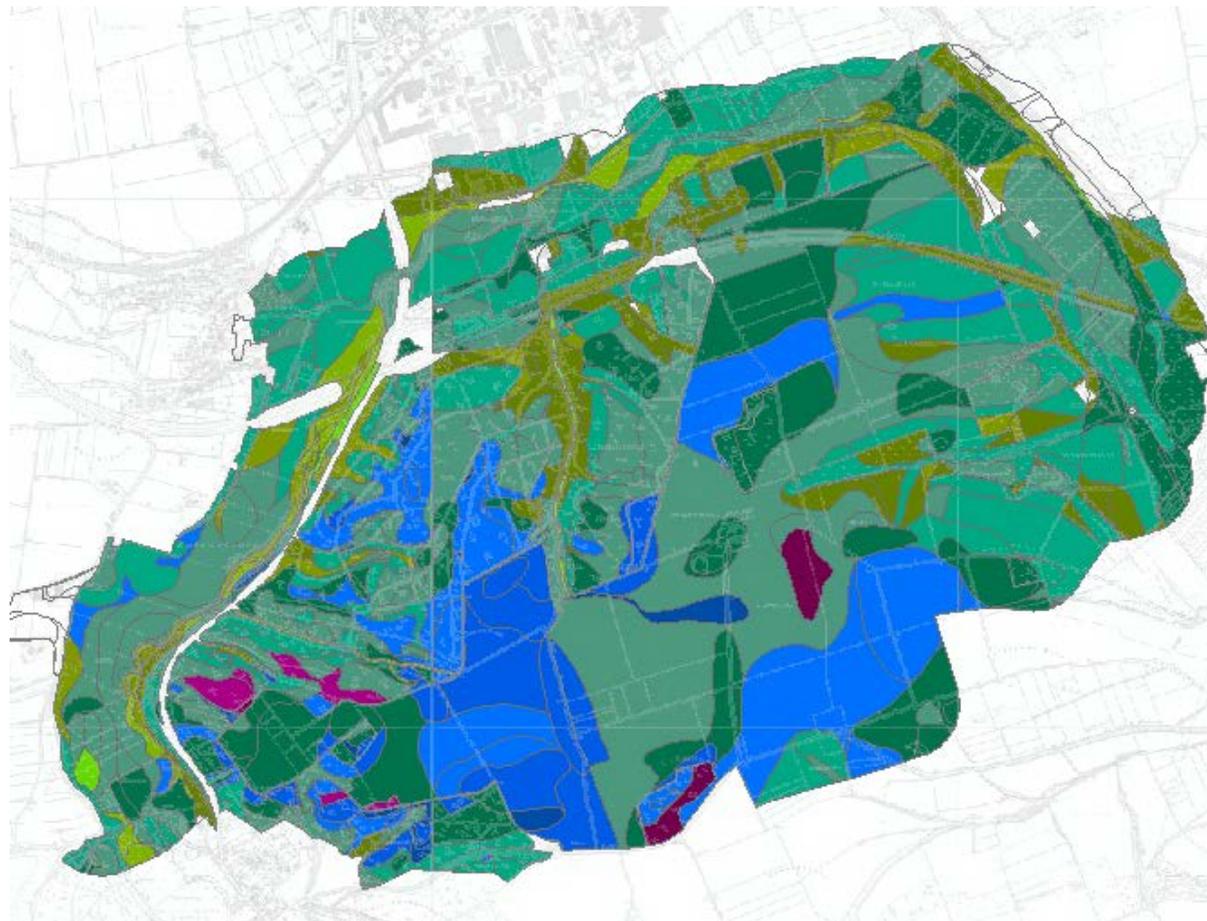


Abb. 7 (Anhang): Vereinfachte geologische Verhältnisse (nach GK 100) des WSG Brakel-Nethetal

Beispiel aus dem Mittelgebirge: **WSG Brakel-Nethetal**



31,6 mm entsprechen etwa $1 \text{ l}/(\text{s} \cdot \text{km}^2)$

Abb. 8 (Anhang): Karte der mittleren jährlichen Sickerwasserrate aus dem effektiven Wurzelraum 1961 – 1990 (**Auswertemodul 1**)

Beispiel aus dem Mittelgebirge: **WSG Brakel-Nethetal**

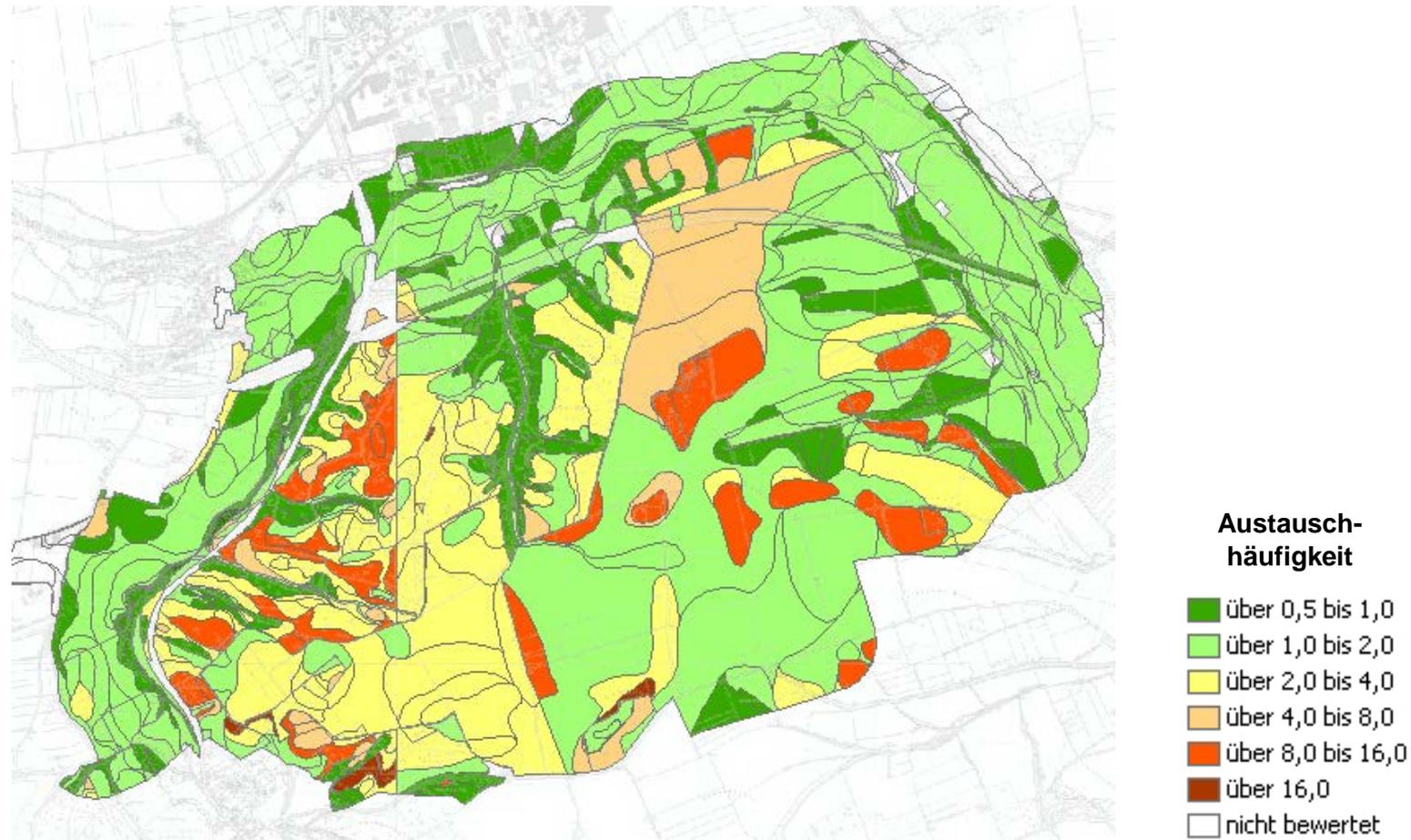


Abb. 9 (Anhang): Karte der Austauschhäufigkeit des Bodenwassers im effektiven Wurzelraum (**Auswertemodul 2**)

Beispiel aus dem Mittelgebirge: **WSG Brakel-Nethetal**

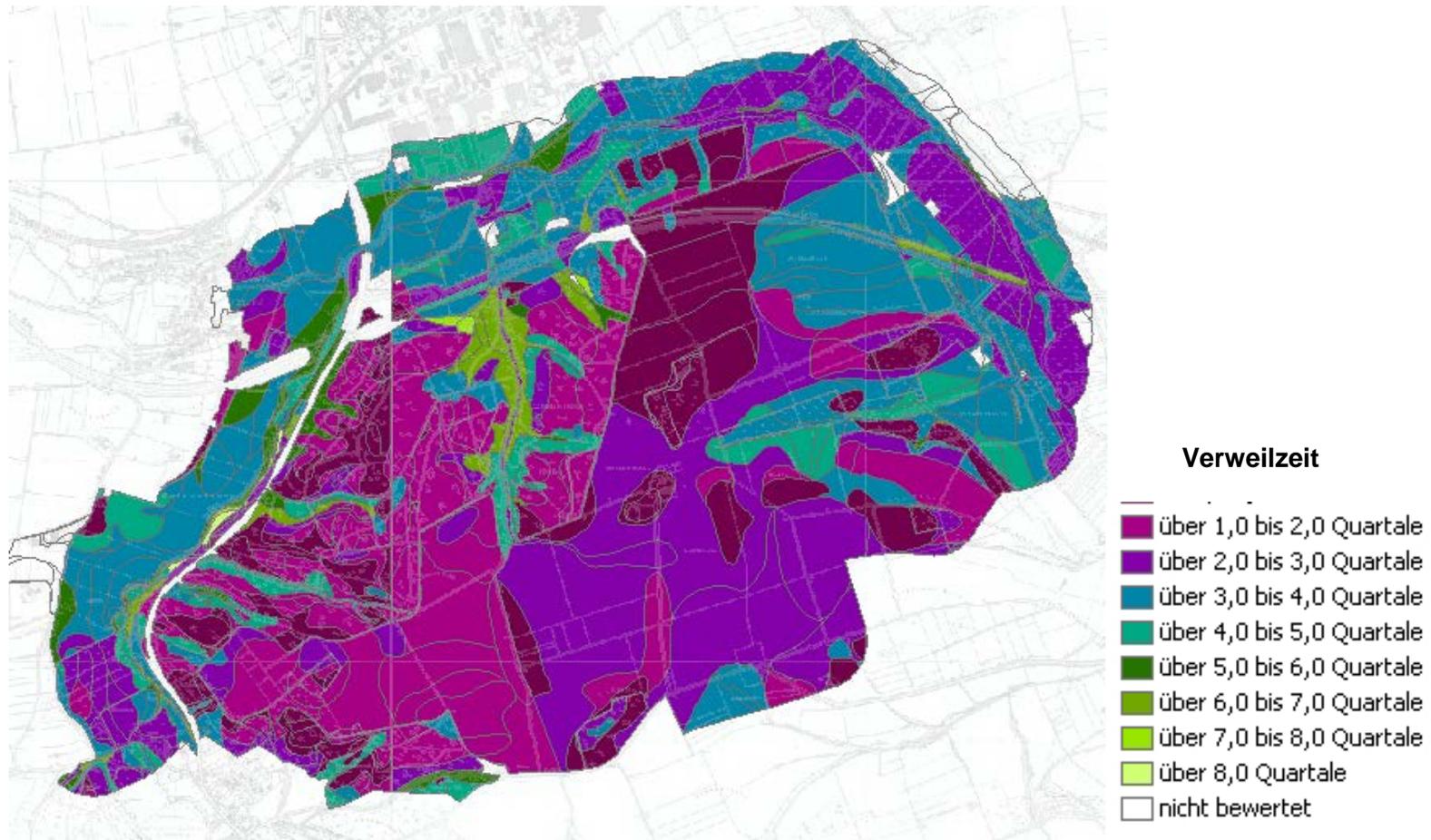


Abb. 10 (Anhang): Karte der Verweilzeiten des Bodenwassers im effektiven Wurzelraum (**Auswertemodul 3a**)

Beispiel aus dem Mittelgebirge: **WSG Brakel-Nethetal**

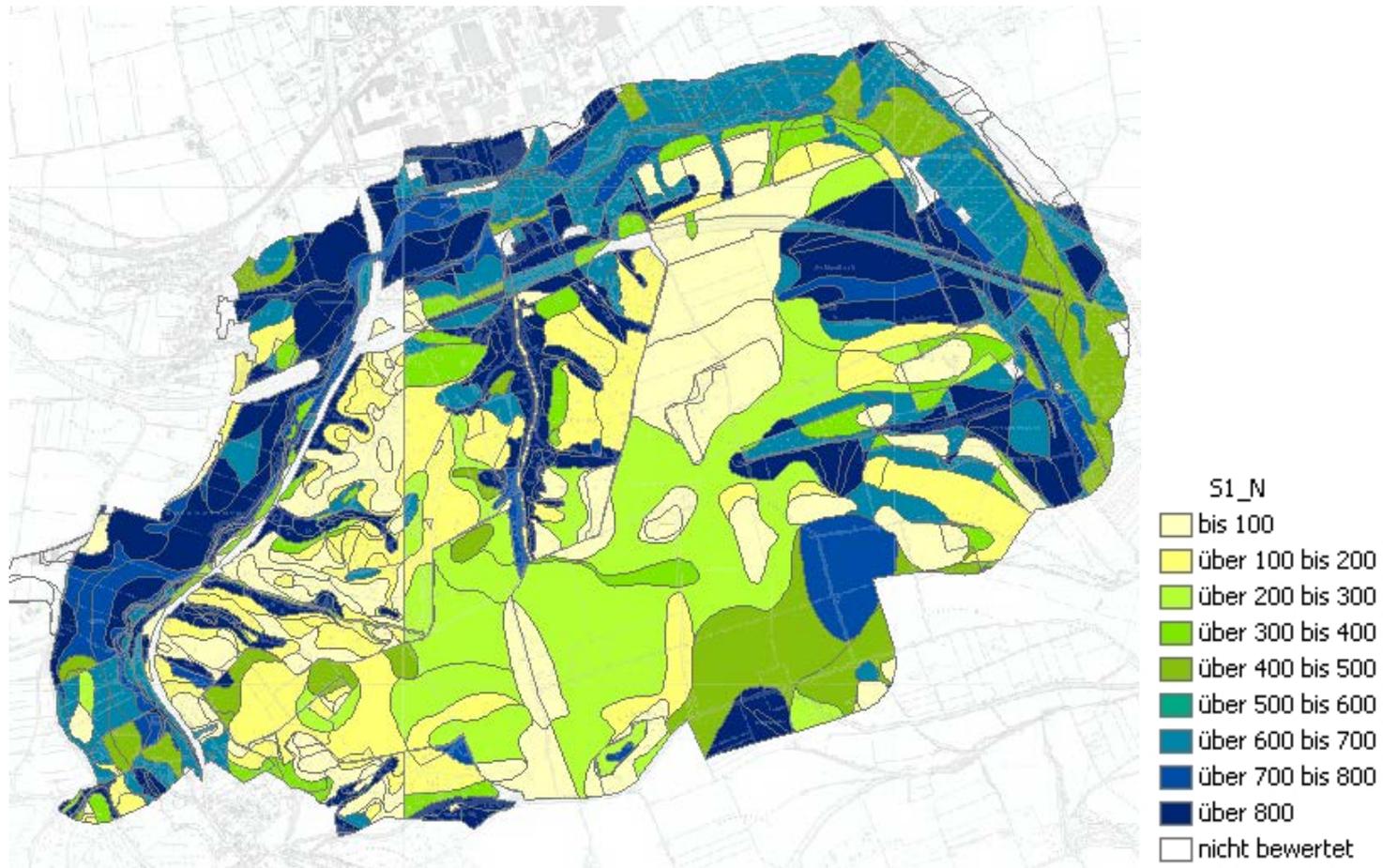


Abb. 11 (Anhang): Bewertung der Schutzfunktion der Grundwasserüberdeckung (S1-Wert, Bodenbereich) nach HÖLTING et al. 1995, modifiziert

Beispiel aus dem Mittelgebirge: **WSG Brakel-Nethetal**

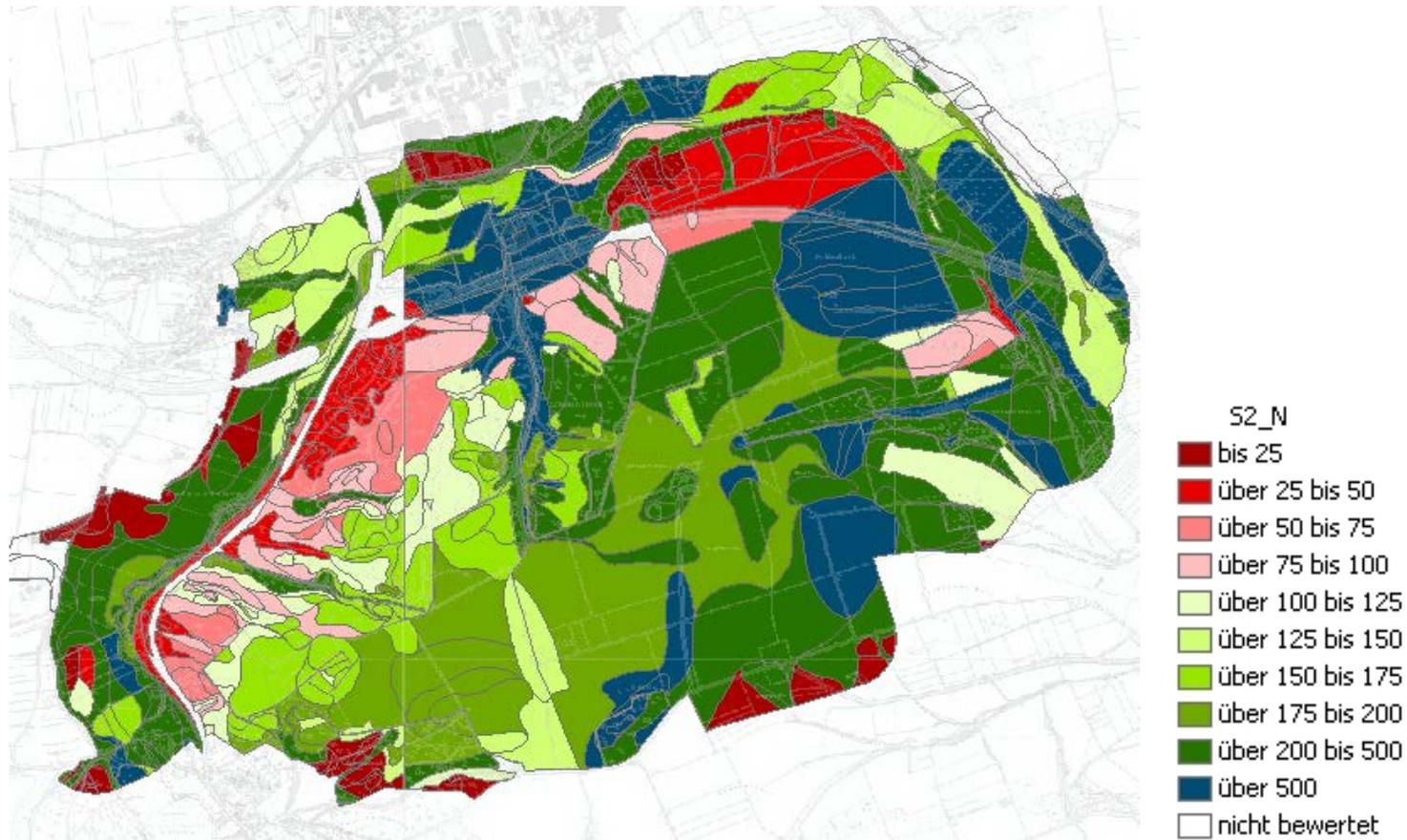


Abb. 12 (Anhang): Bewertung der Schutzfunktion der Grundwasserüberdeckung (S2-Wert, übriger Sickerraum) nach HÖLTING et al. 1995, modifiziert

Beispiel aus dem Mittelgebirge: **WSG Brakel-Nethetal**

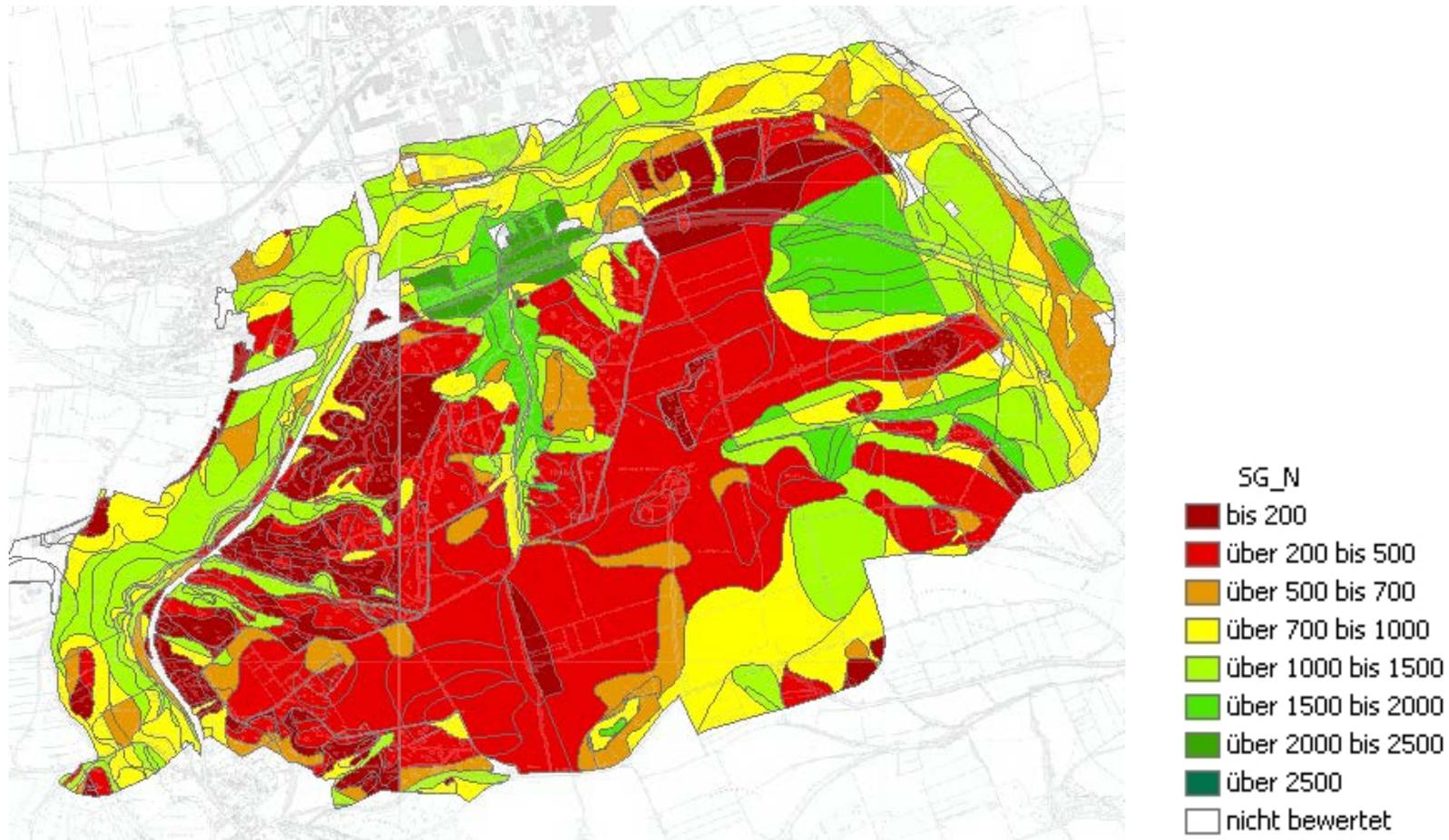


Abb. 13 (Anhang): Bewertung der Schutzfunktion der Grundwasserüberdeckung (gesamt, SG-Wert) nach HÖLTING et al. 1995, modifiziert (**Auswertemodul 5**)

Beispiel aus dem Flachland:

Trinkwassereinzugsgebiet Fellerhöfe, Kr. Viersen

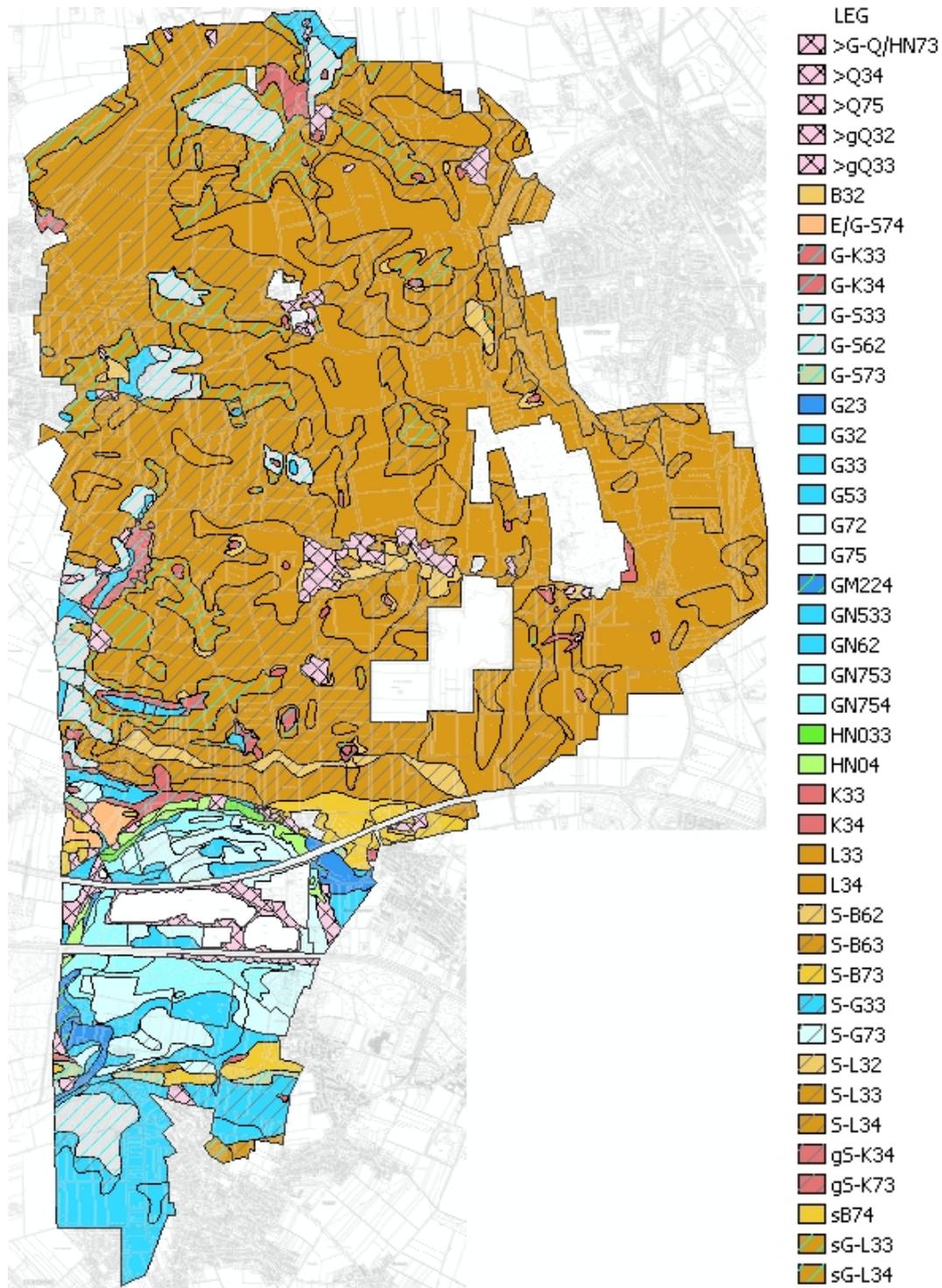
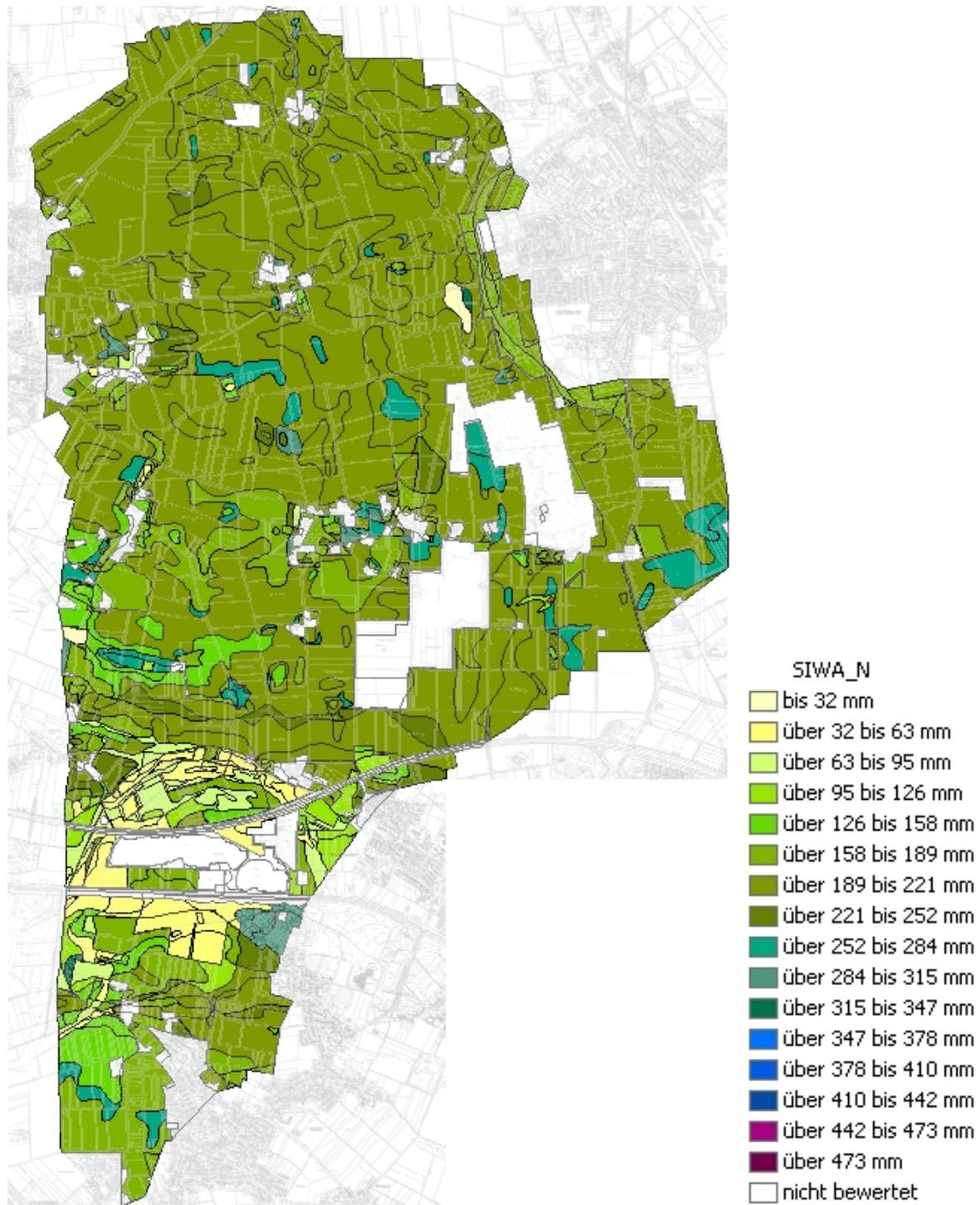


Abb. 14 (Anhang): Bodenkarte 1 : 5 000 (BK 5) des Trinkwassereinzugsgebiets Fellerhöfe, verkleinert

Beispiel aus dem Flachland:

Trinkwassereinzugsgebiet Fellerhöfe, Kr. Viersen



31,6 mm entsprechen etwa 1 l/(s • km²)

Abb. 15 (Anhang): Karte der mittleren jährlichen Sickerwasserrate aus dem effektiven Wurzelraum 1971 – 2000 (**Auswertemodul 1**)

Beispiel aus dem Flachland:

Trinkwassereinzugsgebiet Fellerhöfe, Kr. Viersen

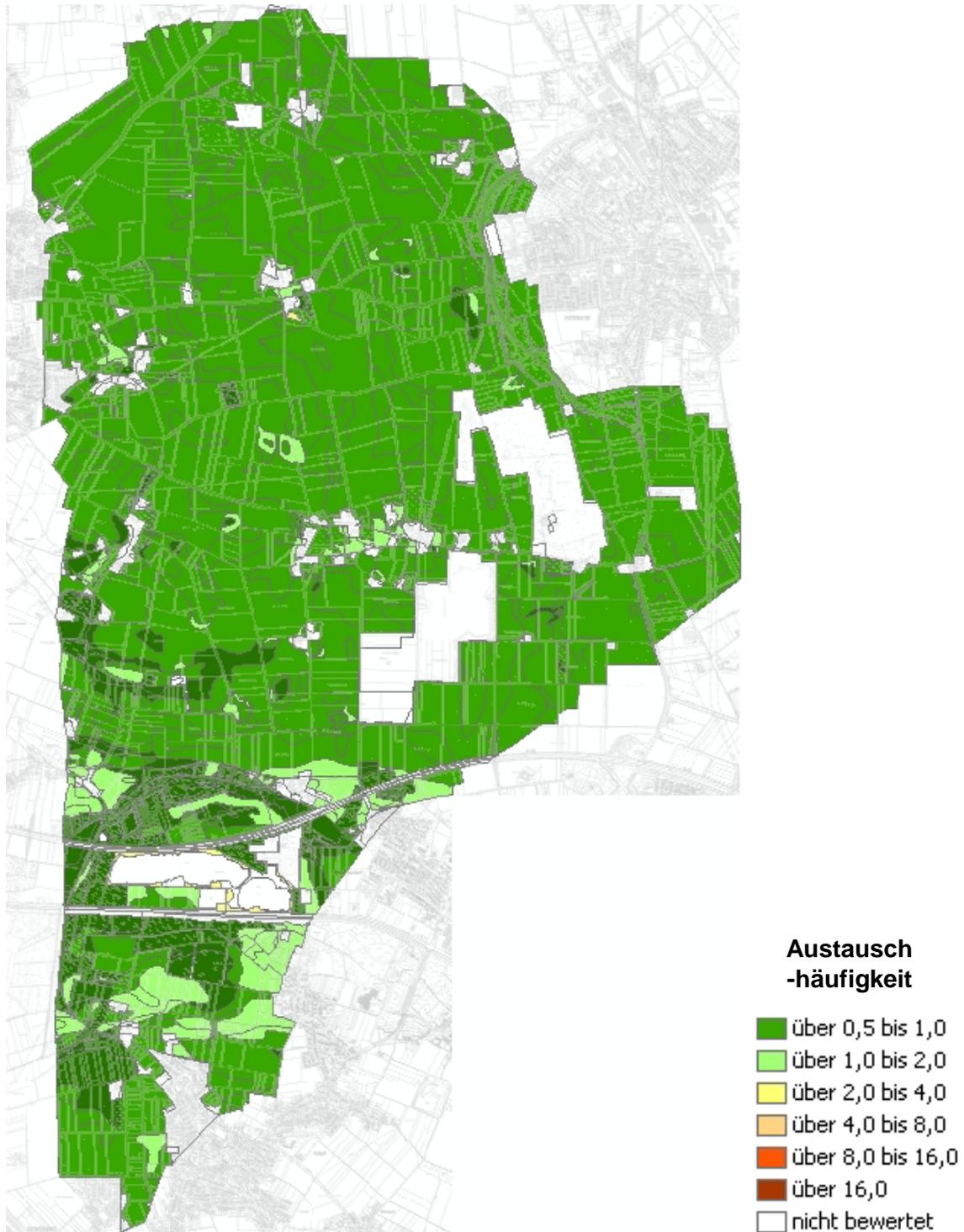


Abb. 16 (Anhang): Karte der Austauschhäufigkeit des Bodenwassers im effektiven Wurzelraum (**Auswertemodul 2**)

Beispiel aus dem Flachland:

Trinkwassereinzugsgebiet Fellerhöfe, Kr. Viersen

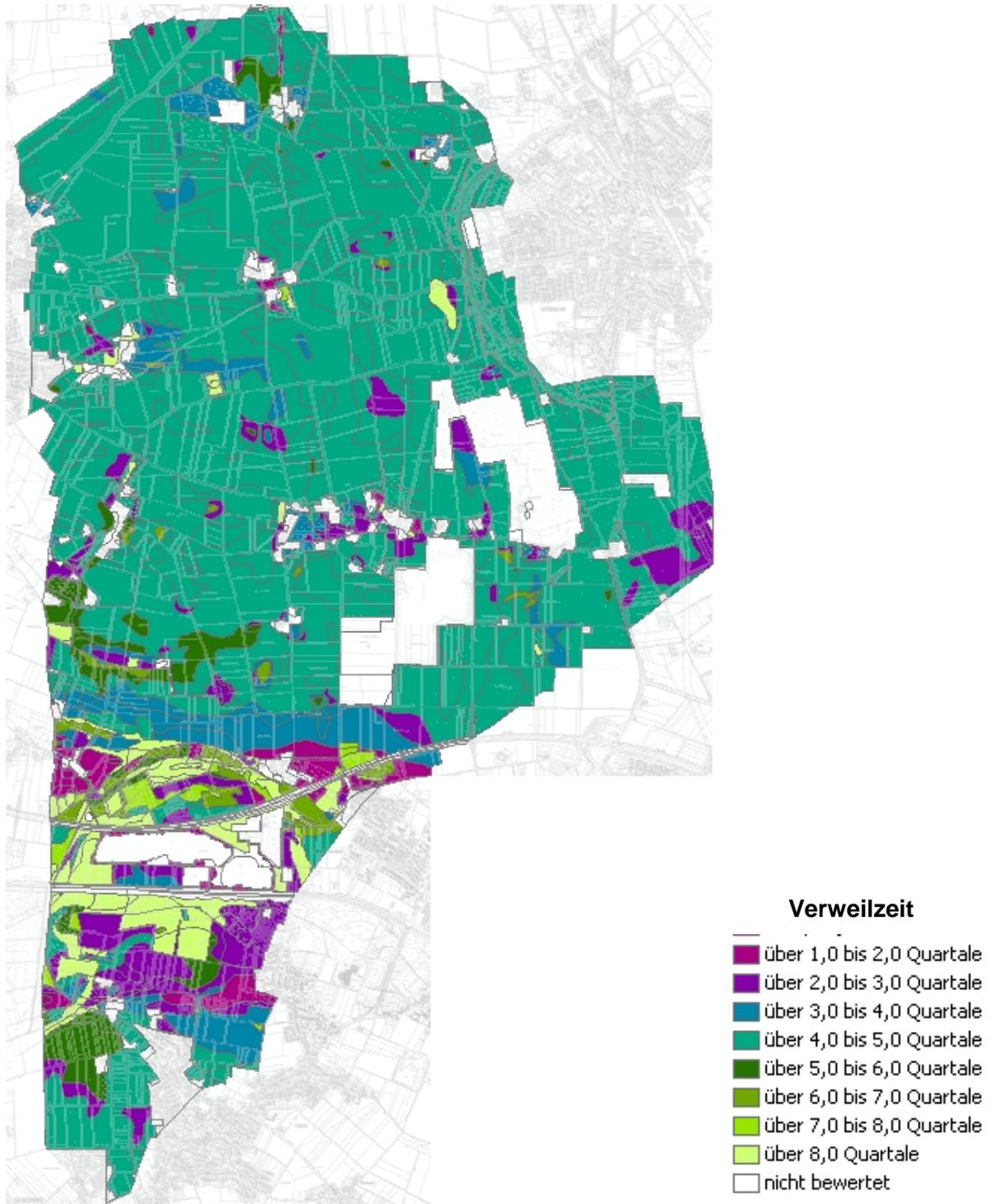


Abb. 17 (Anhang): Karte der Verweilzeiten des Bodenwassers im effektiven Wurzelraum (Auswertemodul 3a)

Beispiel aus dem Flachland:

Trinkwassereinzugsgebiet Fellerhöfe, Kr. Viersen

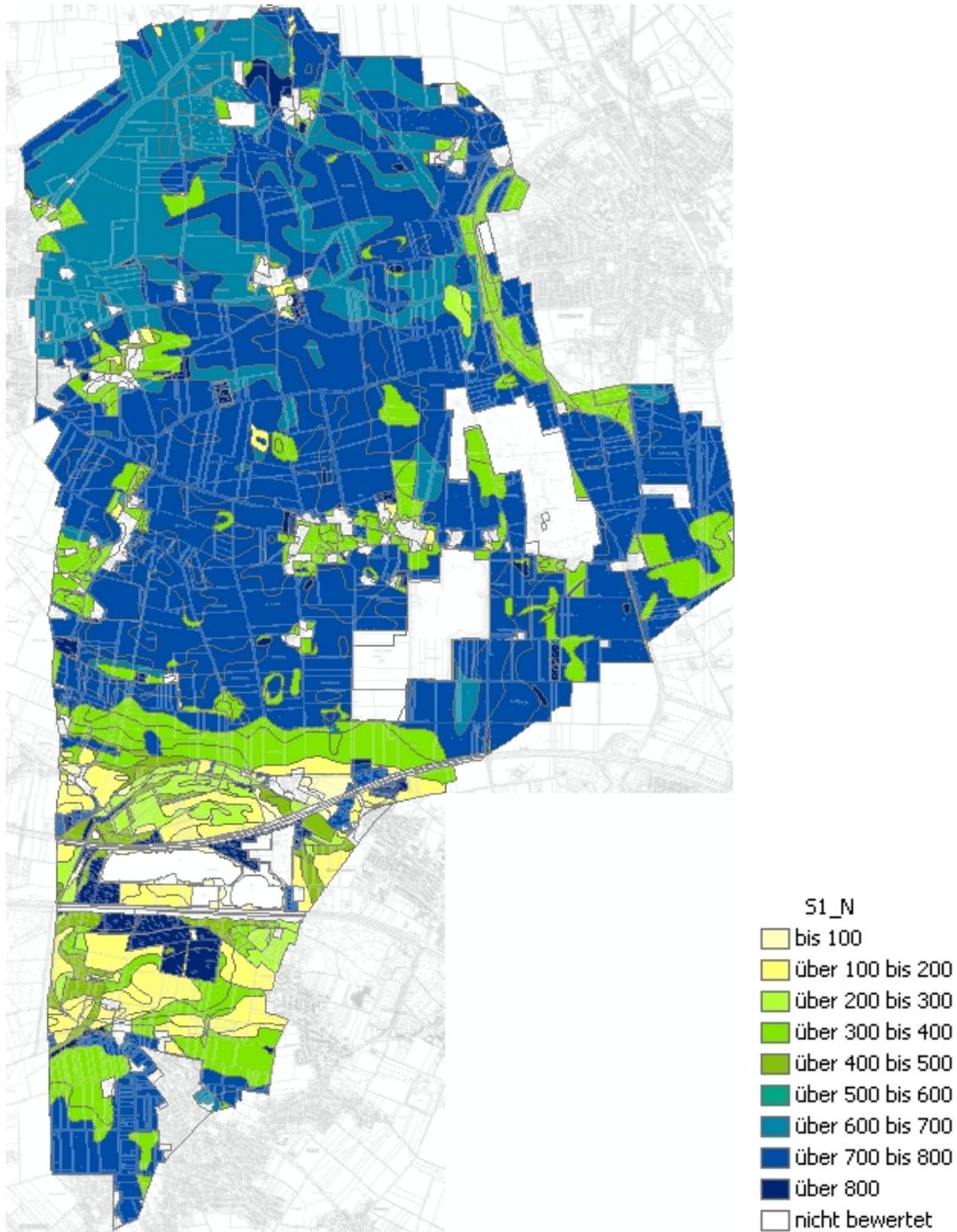


Abb. 18 (Anhang): Bewertung der Schutzfunktion der Grundwasserüberdeckung (S1-Wert, Bodenbereich) nach HÖLTING et al. 1995, modifiziert

Beispiel aus dem Flachland:

Trinkwassereinzugsgebiet Fellerhöfe, Kr. Viersen

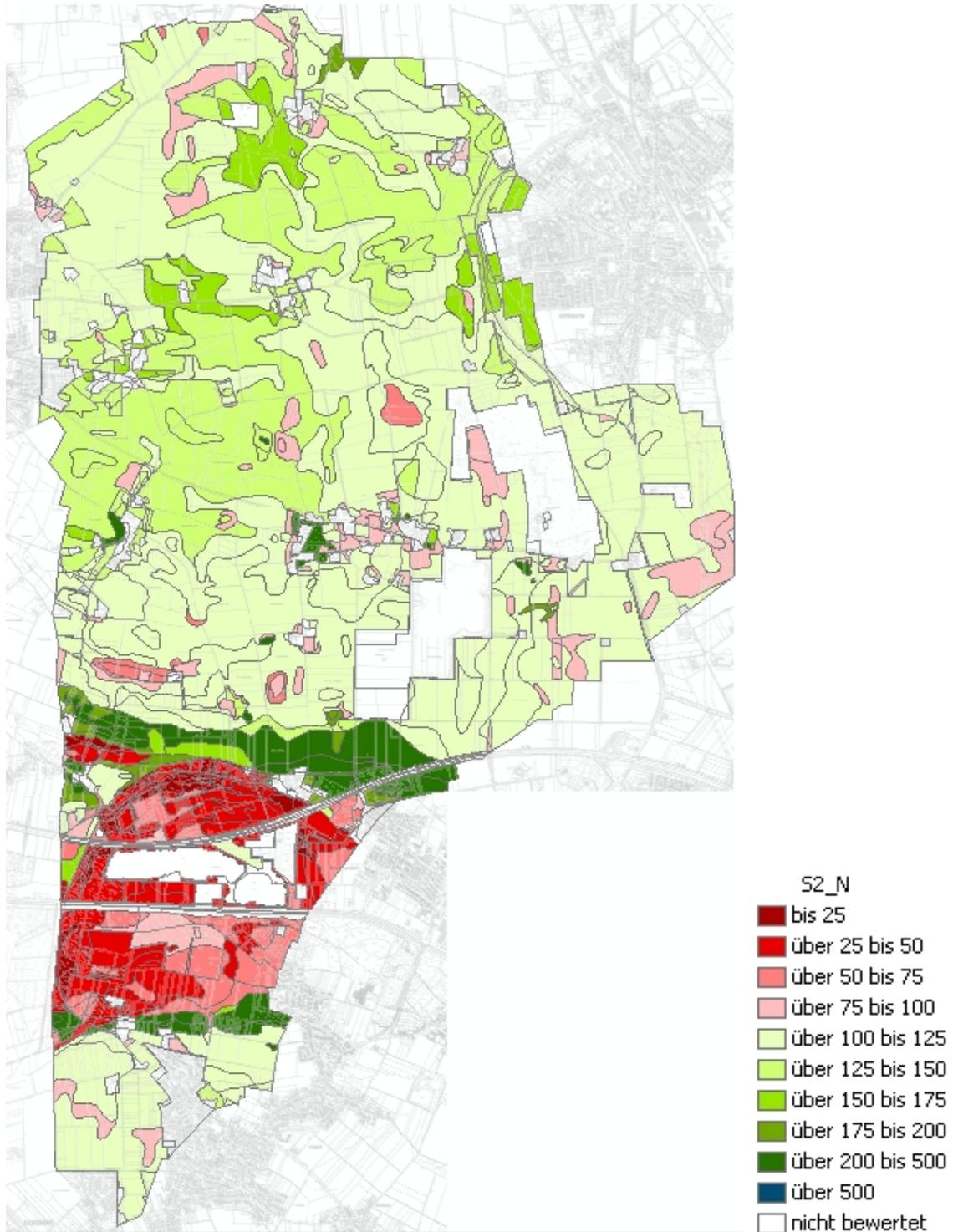


Abb. 19 (Anhang): Bewertung der Schutzfunktion der Grundwasserüberdeckung (S2-Wert, übriger Sickerraum) nach HÖLTING et al. 1995, modifiziert

Beispiel aus dem Flachland:

Trinkwassereinzugsgebiet Fellerhöfe, Kr. Viersen

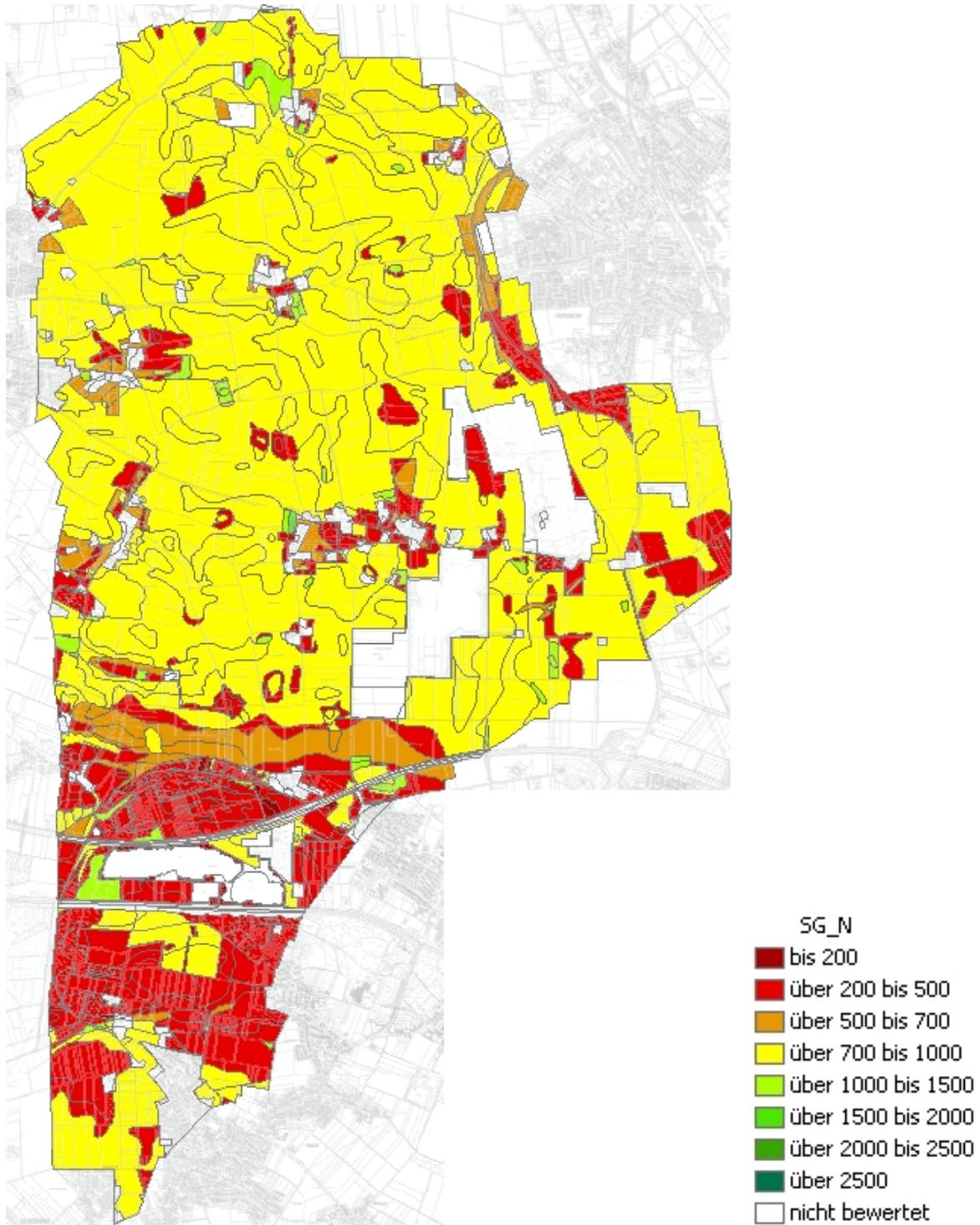


Abb. 20 (Anhang): Bewertung der Schutzfunktion der Grundwasserüberdeckung (SG-Gesamt-Wert) nach HÖLTING et al. 1995, modifiziert (Auswertemodul 5)