

Brandenburg. Geowiss. Beitr.	Cottbus	28 (2021), 1/2	S. 29–44	5 Abb., 3 Tab., 52 Zit.
------------------------------	---------	----------------	----------	-------------------------

Vergleichende Analyse und Validierung flächenhafter Bewertungsmethoden der Grundwasservulnerabilität am Beispiel Nordost-Brandenburg

Comparative analysis and validation of groundwater vulnerability methods using the example of northeastern Brandenburg

ANTONIA ERBER, STEFAN BRODA, SILVIO JANETZ, MAXIMILIAN NÖLSCHER, ACHIM SCHULTE

Einleitung

Grundwasser ist eine wertvolle natürliche Ressource, die vor einer Verschlechterung und chemischen Verschmutzung geschützt werden muss (EU-GWRL 2006). In diesem Zusammenhang ist die Bewertung der Grundwasservulnerabilität relevant. Das Ziel ist die Ausweisung von Gebieten, die auf natürliche Weise besser bzw. schlechter vor Schadstoffeinträgen durch die Grundwasserüberdeckung geschützt sind (MAGIERA 2000). Diese wird von HÖLTING et al. (1995) als Boden- und Gesteinskörper über dem obersten zusammenhängenden Grundwasserstockwerk definiert, welches für die Erschließung von Grundwasser nutzbar ist. Die Schutzfunktion bewertet die Rückhalteeigenschaften der Grundwasserüberdeckung, während sich die Grundwasservulnerabilität auf die Verschmutzungsempfindlichkeit eines Grundwasserleiters gegenüber anthropogenen Einflüssen bezieht. Beide Bewertungsmethoden beschreiben somit die Gefährdungssituation des vom Nutzer vorgegebenen Bewertungshorizonts (z. B. entweder des obersten Grundwasserleiters oder der darüber liegenden Deckschichten) auf eine unterschiedliche Weise.

Die vorliegende Arbeit stützt sich auf VBRA & ZAPOROZEC (1994). Sie beschreiben die Vulnerabilität als intrinsische Eigenschaft eines Grundwassersystems und dessen Empfindlichkeit gegenüber menschlichen und/oder natürlichen Einflüssen. Grundsätzlich wird die intrinsische von der spezifischen Vulnerabilität unterschieden. Diese Arbeit konzentriert sich auf die intrinsische (= allgemeine oder natürliche) Vulnerabilität, die als unabhängig von einem bestimmten Schadstoff- sowie Verunreinigungsszenario gilt (NEUKUM 2012). Nach SINREICH et al. (2009) gehen in die Bewertung nur dem System inhärente Eigenschaften in Form von pedologischen, hydrologischen und hydrogeologischen Parametern ein. Die Vulnerabilität wird durch die Grundwasserüberdeckung beeinflusst.

Zur Beurteilung der Grundwasservulnerabilität wurde in der Vergangenheit eine Vielzahl unterschiedlicher Methoden entwickelt und angewendet. Nach MAGIERA (2000) können diese in fünf Kategorien unterschieden werden:

1. Hydrogeologische Systembetrachtungen
2. Indexverfahren und Analogiemodelle
3. Punktbewertungs- und Matrixverfahren
4. Mathematische Modelle
5. Statistische Verfahren

Bei den hydrogeologischen Systembetrachtungen wird versucht, die Erkenntnisse von einem untersuchten System A auf ein anderes System B zu übertragen, das ähnliche hydrogeologische Charakteristika aufweist. In diese Kategorie zählen zum Beispiel die Arbeiten von MARGAT (1968) und ALBINET & MARGAT (1970).

Bei Indexverfahren und Analogiemodellen werden mathematische Gleichungen zur Erfassung hydrogeologischer Prozesse verwendet, um die Grundwasservulnerabilität zu ermitteln. Ein Indexverfahren ist zum Beispiel der Aquifer Vulnerability Index (AVI) von VAN STEMPOORT et al. (1993). Das Verfahren der DIN 19732 (2011) wird beispielsweise in die Gruppe der Analogiemodelle eingeordnet.

Bei den Punktbewertungs- und Matrixverfahren werden die Eingangsparameter klassifiziert, bewertet und gewichtet bzw. in einer Matrix gegenübergestellt. Ein Matrixverfahren ist zum Beispiel die GOD-Methode von FOSTER (1987) oder das HK50-Verfahren von VOIGT (1987). Zu den Punktbewertungsmethoden gehören beispielsweise Verfahren wie DRASTIC (ALLER et al. 1987), SINTACS (CIVITA 1994), ISIS (CIVITA & DE REGIBUS 1995), GALDIT (CHACHADI et al. 2003), EPIK (DOERFLIGER et al. 1999), PI (GOLDSCHIEDER et al. 2000), COP (COST 2003) oder die GLA-Methode (HÖLTING et al. 1995).

Mit mathematischen Modellen wird die Grundwasservulnerabilität über die Schadstoffverlagerung bewertet. Bei den statistischen Verfahren wird versucht, die Komplexität der Prozesse zu erfassen, die die Grundwasservulnerabilität beeinflussen. Hierfür kommen beispielsweise Korrelations- und Regressionsanalysen zur Anwendung (MAGIERA 2000).

In der Literatur existiert eine Vielzahl an Untersuchungen, die sich mit der Grundwasservulnerabilität befassen. Der Vergleich von verschiedenen Vulnerabilitätsmethoden zeigt, dass oft vergleichbare, mitunter jedoch größere Abweichungen zwischen den Bewertungsergebnissen bestehen (z. B. GOGU et al. 2003, POLEMIO et al. 2009, BRINDHA & ELANGO 2015, LUOMA et al. 2016).

Neben der Vulnerabilitätsbewertung ist die Validierung der Ergebnisse ein wichtiger Bestandteil bei der Ergebnisüberprüfung und -interpretation. Ein einheitliches Verfahren existiert nicht (NEUKUM 2012). Die Validierung kann beispielsweise über Abflussganglinien, hydrochemische Daten, bakteriologische Wasseranalysen, Markierungsversuche, numerische Simulationen oder isotopenhydrologische Analysen erfolgen (DALY et al. 2002, NEUKUM 2012). Die Validierung mit hydrochemischen Daten, insbesondere mit Nitratkonzentrationen, wird am häufigsten angewendet. Beispiele dafür sind die Untersuchungen von KUMAR et al. (2013), OUEDRAOGO et al. (2016) und JARRAY et al. (2017).

Aktuell fordert die europäische Wasserrahmenrichtlinie die Charakterisierung der Grundwasserüberdeckung in den Mitgliedsstaaten (EU-WRRL 2000). Dazu zählt die Bestimmung der Grundwasservulnerabilität der Grundwasserkörper (HEINKELE et al. 2002). Diese Aufgabe wird in Deutschland von den Bundesländern übernommen (BANNICK et al. 2008). Aufgrund der unterschiedlichen angewendeten Methoden, den bundeslandbedingten Anpassungen und verschiedenen Datengrundlagen sind die Ergebnisse deutschlandweit nicht einheitlich. Sichtbar wird dies an den Bundesländergrenzen, wo teilweise Bewertungssprünge auftreten (BGR 2005, BGR & SGD 2021).

Um die Gemeinsamkeiten und Unterschiede der Methoden hinsichtlich der Vulnerabilitätsbewertung zu analysieren, konzentriert sich der vorliegende Artikel auf den Vergleich ausgewählter Grundwasservulnerabilitätskarten für ein Untersuchungsgebiet in Brandenburg. Im Untersuchungsgebiet liegen drei verschiedene Vulnerabilitätsbewertungen vor, die auf unterschiedlichen Verfahren basieren. Diese sind:

- Karte der Grundwassergefährdung des Hydrogeologischen Kartenwerks (HK50) der DDR nach dem Matrixverfahren von VOIGT (1987) (HK50-Methode),
- Karte der Schutzfunktion der Grundwasserüberdeckung der Hydrogeologischen Karte des Landes Brandenburg (HYK50) nach der Punktbewertungsmethode von HÖLTING et al. (1995) (GLA-Methode),
- Karte der Verweilzeit des Sickerwassers in der Grundwasserüberdeckung (LUGV 2013) nach dem Analogiemodell der DIN 19732 (2011) (DIN-Methode).

Die Methoden wurden ausgewählt, da die Grundwasservulnerabilitätsbewertungen im Untersuchungsgebiet in einem vergleichbaren Bearbeitungsmaßstab vorliegen und deutschlandweit zum Einsatz kommen. Das Ziel der Untersuchung ist, die Unterschiede zwischen den drei Vulnerabi-

litätsbewertungen zu ermitteln und eine Vergleichsmöglichkeit zwischen den verschiedenen Methoden herzustellen. Außerdem wird der Versuch unternommen, die Ergebnisse zu validieren. Das Ziel der Validierung ist die Überprüfung der Vulnerabilitätsbewertungen mit gemessenen Daten aus dem Untersuchungsgebiet. Dafür werden Parameterkarten des anthropogenen Stoffeintrags (Ammonium, Nitrat, Sulfat) aus dem Gütebericht zur Grundwasserbeschaffenheit des Landesamts für Umwelt Brandenburg (LFU 2015) und Daten zu Grundwasserstandsganglinien (LFU 2018) verwendet. Die Validierung mit Grundwasserstandsganglinien erfolgt mithilfe von Niederschlagsdaten des Deutschen Wetterdienstes (DWD 2018). Es wird berechnet, mit welcher zeitlichen Verzögerung die Ganglinien auf ein Niederschlagsereignis reagieren. Die Ergebnisse werden den Verweilzeitenklassen der GLA-Methode zugeordnet.

Material und Methoden

Untersuchungsgebiet

Das Untersuchungsgebiet (Abb. 1) liegt in Nordost-Brandenburg. Es erstreckt sich über die Landkreise Barnim, Märkisch-Oderland, Uckermark und Oberhavel bis an die polnische Grenze. Es liegt ungefähr zwischen 52°40' bis 53°0' nördlicher Breite und 13°30' bis 14°20' östlicher Länge. Die Größe beträgt 1.812 km² und es werden Geländehöhen von 0 bis etwa 155 m ü. NHN erreicht (Abb. 1).

Die glazialen und interglazialen Prozesse im Quartär haben eine insgesamt 100 bis 150 m mächtige Abfolge von Lockergesteinen sowie zwei prägende geomorphologische Formen hinterlassen: Die Hochflächen des Barnim und der Uckermark sowie die Niederungsbereiche des Eberswalder Urstromtals und Oderbruchs (STACKEBRANDT et al. 2010). Die Hochflächen weisen überwiegend bindige Ablagerungen in Form von Geschiebemergeln und -lehen auf, die zum Teil durch Eisbewegung verursachte Lagerungsstörungen und an den südlichen Randbereichen durch sandig-kiesige Sanderablagerungen charakterisiert sind. Die Hochflächen werden als Grundwasserneubildungsgebiete angesehen. Sie weisen meist bedeckte Grundwasserleiter und gespannte Grundwasserverhältnisse auf. Die Mächtigkeit der Grundwasserüberdeckung beträgt im Mittel zwischen 20 und 30 Metern. Der Flurabstand liegt durchschnittlich bei 20 Metern (HERMSDORF et al. 1999, AD-HOC AG HYDROGEOLOGIE 2016). Die Niederungsgebiete stellen ehemalige Schmelzwasserabflussbahnen (Eberswalder Urstromtal) bzw. fluviatile Akkumulationen des Holozäns (Oderbruch) dar. Diese weisen ca. 20 bis 30 Meter mächtige sandig-kiesige Grundwasserleiter auf, die zum Großteil unbedeckt sind und nur lokal eine geringmächtige Bedeckung aus Auenlehen, Torfen, Mudden, Schluffen oder Tonen aufweisen. Die Niederungsbereiche können als Grundwasserentlastungsgebiete angesehen werden. Der Flurabstand liegt im Mittel bei unter fünf Metern (HOTZAN 1998, HERMSDORF et al. 1999, AD-HOC AG HYDROGEOLOGIE 2016).

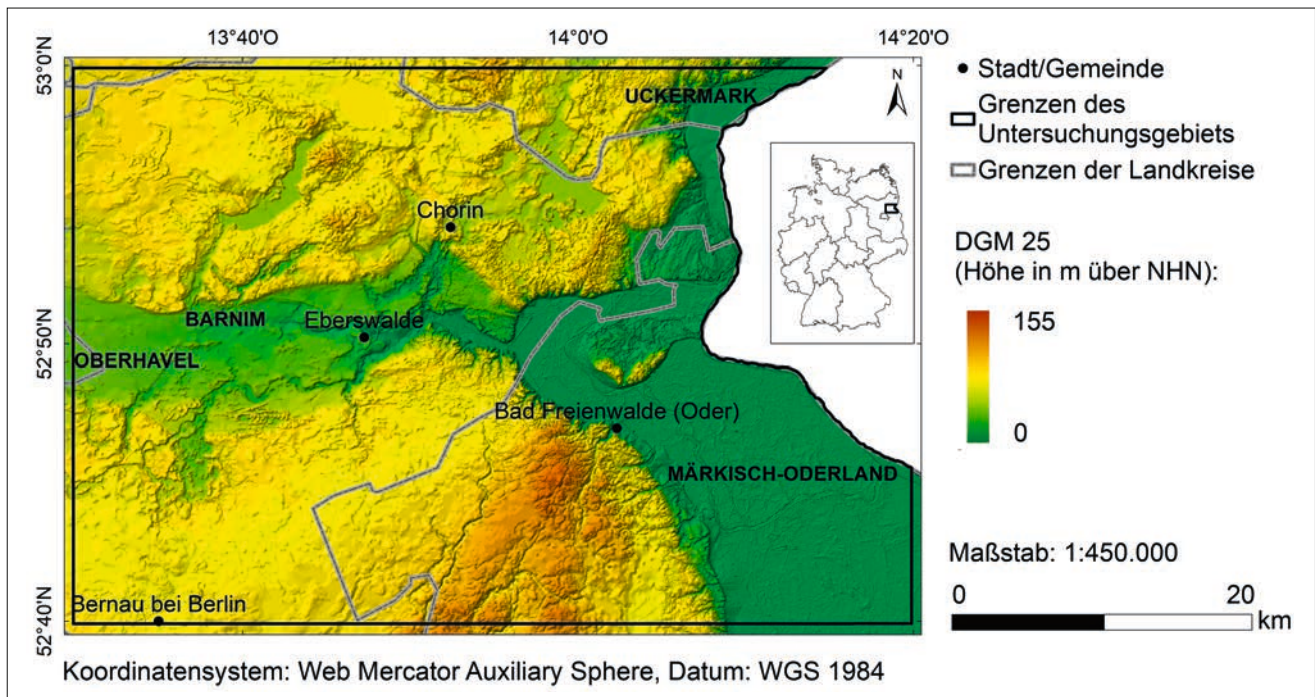


Abb. 1: Übersichtskarte des Untersuchungsgebiets im Nordosten Brandenburgs, Datengrundlage: DGM 25 (WMS-LBGR-BORELIEF) (LBGR 2018), Bundesländer- und Landkreisgrenzen (BKG 2011/2018)

Fig. 1: Overview map of the study area in the northeast of Brandenburg, data basis: DEM 25 (WMS-LBGR-BORELIEF) (LBGR 2018), borders of federal states and counties (BKG 2011/2018)

Das Untersuchungsgebiet wird durch ein subkontinentales, niederschlagsbenachteiligtes Klima charakterisiert (IFL 2003). Die mittleren Jahresniederschlagswerte liegen für den Nordosten Brandenburgs bei zum Teil unter 500 mm (GERSTENGARBE et al. 2003). Zum größten Teil wird das Untersuchungsgebiet landwirtschaftlich (ca. 50 %) und forstwirtschaftlich (ca. 30 %) genutzt. Geringere Anteile nehmen die Siedlungs- und Verkehrsflächen, Gewässer und sonstige Flächen ein (LBV BRANDENBURG 2013).

Verwendete Grundwasservulnerabilitätsverfahren

Die *HK50-Methode* fällt nach MAGIERA (2000) in die Kategorie der Matrixverfahren. Die Parameter sind in Klassen definiert, mit denen die Vulnerabilität bewertet wird. Die *HK50-Methode* liegt in den ostdeutschen Bundesländern als Karte der Grundwassergefährdung des Hydrogeologischen Kartenwerks der DDR im Maßstab 1:50.000 für den ersten süßwasserführenden Grundwasserleiter vor (VOIGT 1987). Die Eingangsparameter bei den Lockergesteinen sind (1) der Flurabstand des Grundwassers und (2) die Mächtigkeit stauender Zwischenschichten ausgedrückt als Prozentanteil bindiger/stauender Schichten an der ungesättigten Zone. Für den Flurabstand wird bei ungespanntem Grundwasser der Abstand zur Grundwasseroberfläche und bei gespanntem Grundwasser der Abstand zur Grundwasserdeckfläche verwendet (VOIGT 1987, MAGIERA 2000).

Die Bestimmung der Grundwasservulnerabilität erfolgt für Locker- und Festgesteine getrennt. Für beide werden drei Hauptvulnerabilitätsklassen ausgewiesen: A (nicht geschützt), B (relativ geschützt) und C (geschützt). In allen drei Klassen gibt es Unterkategorien.

Die *GLA-Methode* ist ein Punktbewertungsverfahren (MAGIERA 2000). Im Untersuchungsgebiet wird die *GLA-Methode* für die Schutzfunktionskarte der Grundwasserüberdeckung der Hydrogeologischen Karte Brandenburgs 1:50.000 (LBGR 2019) verwendet. Die Bewertung der Schutzfunktion bezieht sich auf den obersten angetroffenen Grundwasserleiter. In der Schutzfunktionskarte wird zwischen dem Grundwasserleiterkomplex 1 (mit und ohne Bedeckung) und dem Grundwasserleiterkomplex 2 (wasserwirtschaftlicher Hauptgrundwasserleiter) unterschieden. Die Parameter der *GLA-Methode* werden klassifiziert und mit einer Punktzahl versehen bzw. gewichtet. Abschließend werden die Punktzahlen aller betrachteter Parameter addiert, um eine Gesamtpunktzahl zu ermitteln. Dieser werden ein Vulnerabilitätsgrad und eine Verweilzeit zugeordnet. Die Vulnerabilitätsbewertung wird für die Boden- und die ungesättigte Zone getrennt vorgenommen. Die Parameter zur Bewertung der Bodenzone sind (1) die nutzbare Feldkapazität und (2) die Sickerwassermenge. Letztere ergibt sich aus der Grundwasserneubildungsrate oder alternativ aus der klimatischen Wasserbilanz. Zur Berechnung der Vulnerabilität der Bodenzone (S_1) wird die Punktzahl der nutzbaren Feldkapazität (B) mit dem Faktor der Sickerwassermenge (W) multipliziert:

$$S_1 = B \cdot W \quad (1)$$

Bei den Lockergesteinen der ungesättigten Zone wird die Gesteinsart als Parameter verwendet. Die abgeleitete Punktzahl (G) wird mit der jeweiligen Schichtenmächtigkeit (M) multipliziert und zu einer Gesamtpunktzahl aufsummiert. Diese wird mit dem Faktor der Sickerwassermenge (W) multipliziert. Artesische Druckverhältnisse (D) und schwebende Grundwasserstockwerke mit Quellaustritten (Q) können über Punktzuschläge berücksichtigt werden. Für die Berechnung der Schutzfunktion der Grundwasserüberdeckung (S2) gilt:

$$S_2 = (G_1 \cdot M_1 + G_2 \cdot M_2 + \dots + G_n \cdot M_n) \cdot W + D + Q \quad (2)$$

Die errechneten Punktzahlen der Boden- und ungesättigten Zone werden abschließend addiert, um eine Gesamtpunktzahl zu erhalten. Bei der GLA-Methode kommen fünf Klassen zum Einsatz, mittels derer die zugeordnete Gesamtschutzfunktion der Grundwasserüberdeckung und Verweilzeit ablesbar ist. Generell gilt: Je höher die Punktzahl, desto länger ist die Verweilzeit des Sickerwassers in der Grundwasserüberdeckung und desto geringer ist die Vulnerabilität (HÖLTING et al. 1995).

Die *DIN-Methode* ist ein Analogiemodell (MAGIERA 2000). In der Fassung von 1997 wurde die DIN-Methode zuerst im zweistufigen Vulnerabilitätsbewertungsverfahren von HEINKELE et al. (2002) verwendet. ZEILFELDER et al. (2011) wenden die DIN-Methode später für das Bundesland Mecklenburg-Vorpommern an. In Brandenburg nutzte das Landesamt für Umwelt, Gesundheit und Verbraucherschutz (LUGV) die DIN-Methode in der Fassung von 2011 zur Erstellung der Verweilzeitenkarte des Sickerwassers in der Grundwasserüberdeckung (LUGV 2013). Die Berechnung der Verweilzeiten bezieht sich auf den wasserwirtschaftlichen Hauptgrundwasserleiter, welcher nicht zwangsläufig der oberste Grundwasserleiter sein muss. Die Vulnerabilität wird nach der DIN-Methode anhand der Verweilzeit des Sickerwassers in der Grundwasserüberdeckung über zwei Formeln abgeleitet. Zunächst wird die Verlagerungsgeschwindigkeit (v_s) des Sickerwassers unterhalb der effektiven Durchwurzelungstiefe berechnet. Dafür werden die Sickerwasserrate bzw. die Grundwasserneubildungsrate (SR) und der Volumenanteil an Wasser (V_w) (über die Feldkapazität) benötigt:

$$v_s = SR / V_w \quad (3)$$

Die berechnete Verlagerungsgeschwindigkeit wird verwendet, um mithilfe der Mächtigkeit der ungesättigten Zone (Z_u) die Verweilzeit des Sickerwassers (t_s) in Jahren zu berechnen:

$$t_s = Z_u / v_s \quad (4)$$

Für Gebiete mit gespanntem Grundwasser erfolgt durch das LUGV (2013) eine Weiterentwicklung der DIN-Methode, da der Verweilzeit der ungesättigten Zone die Zeit für

die Passage zwischen der Grundwasserdruckfläche und Grundwasserdeckfläche hinzugerechnet werden muss. Aufgrund der angenommenen Wassersättigung des Porenraums können die Formeln der DIN 19732 nicht übertragen werden. Stattdessen wird über den Durchlässigkeitsbeiwert ($k_{f(z)}$), der durchflusswirksamen Porosität (n_{dw}) und einem hydraulischen Gradienten (i) die gesättigte hydraulische Durchlässigkeit bzw. vertikale Abstandsgeschwindigkeit $v_{a(z)}$ nach dem Darcy-Gesetz berechnet:

$$v_{a(z)} = k_{f(z)} \cdot i / n_{dw} \quad (5)$$

Für die Schematisierung der vertikalen Sickerströmung wird ein hydraulischer Gradient von $i = 1$ [mm/mm] angenommen. Die Zeit (t_s), die für die Passage durch den wassergesättigten Bereich benötigt wird, errechnet sich über die ermittelte Abstandsgeschwindigkeit ($v_{a(z)}$) und Schichtmächtigkeit (M):

$$t_s = M / v_{a(z)} \quad (6)$$

Die Ergebnisse der einzelnen Schichten werden aufsummiert. Um die Verweilzeit des Sickerwassers in der Grundwasserüberdeckung zu bestimmen, werden abschließend die Verweilzeit der ungesättigten Zone und die Zeit der Passage durch den gesättigten Bereich in Gebieten mit gespanntem Grundwasser zusammengeführt (LUGV 2013). Die errechneten Verweilzeiten werden im Rahmen dieser Arbeit nach dem Schema von HÖLTING et al. (1995) in fünf Klassen gruppiert.

Datengrundlage und methodisches Vorgehen

Die Grundlage für diese Arbeit sind die drei existierenden Karten zur Grundwasservulnerabilität. Diese wurden vom Landesamt für Bergbau, Geologie und Rohstoffe (LBGR) und vom Landesamt für Umwelt (LfU) Brandenburg zur Verfügung gestellt. Während die HK50- und GLA-Daten als Vektordaten vorliegen, wurden die Ergebnisse der DIN-Methode als Rasterdaten geliefert. Für die Validierung werden Grundwasserstandsganglinien des LfU (2018), Niederschlagsdaten des Deutschen Wetterdienstes (2018) und die Parameterkarten zum anthropogenen Stoffeintrag des LfU (2015) verwendet. Die parameterbezogene Auswertung der Grundwasserbeschaffenheit für den Hauptgrundwasserleiter wird anhand von Mittelwerten der zuletzt bestimmten Analysen (hier der Jahre 2011/12) für jede einzelne Grundwassermessstelle in der jeweiligen Übersichtskarte dargestellt. Die wesentlichen Bearbeitungsschritte sind:

- die Reklassifizierung,
- die Gegenüberstellung der Vulnerabilitätsbewertungen der Methoden,
- der Vergleich der Methoden hinsichtlich der Eingangsparameter und -daten,
- der Validierungsversuch mit Grundwasserstandsganglinien und Parameterkarten zu anthropogenen Stoffeinträgen.

Reklassifizierung

Die Notwendigkeit der Reklassifizierung zur Vereinheitlichung der Ergebnisse wird beispielsweise von GOGU et al. 2003 beschrieben. Um eine einfachere und bessere Vergleichbarkeit der Ergebnisse zu erzielen, wird eine Reklassifizierung in fünf einheitlich festgelegte Klassen durchgeführt (sehr geringe, geringe, mittlere, hohe und sehr hohe Vulnerabilität). Diese werden im Anschluss als prozentuale Anteile an der Gesamtfläche des betrachteten Gebiets gegenübergestellt. Die vorliegende Arbeit orientiert sich bei der Darstellung der Reklassifizierungsergebnisse u. a. an der Vorgehensweise von GOGU et al. 2003. Die Reklassifizierung dient dazu, die Ergebnisse der drei Methoden zu vereinheitlichen. Dies ist notwendig, da die aus den einzelnen Bewertungsmethoden resultierende Grundwasservulnerabilität in unterschiedlichen Klasseneinteilungen ausgedrückt wird. Während die HK50-Methode die Klasse A, B, C und deren Unterkategorien nutzt, geben das GLA- und DIN-Verfahren Verweilzeitenklassen an. Die Reklassifizierung wird in fünf Klassen vorgenommen (Tab. 1). Diesen Klassen werden die von HÖLTING et al. (1995) definierten Verweilzeiten zugeordnet. Bei der HK50-Methode wird das Verfahren des Sächsischen Landesamts für Umwelt, Landwirtschaft und Geologie (LFULG 2003) zur Umwandlung der Klassen A, B, C und ihrer Unterkategorien in fünf Vulnerabilitätsklassen zu Hilfe genommen.

Gegenüberstellung der Vulnerabilitätsbewertungen der Methoden

Über eine Überlagerungsanalyse wird analysiert, wo die Methoden eine übereinstimmende bzw. nicht übereinstimmende Bewertung aufweisen. Um herauszufinden, um wie viele Klassen sich die Methoden bei nicht übereinstimmenden Bewertungen unterscheiden, wird eine Subtraktionsanalyse durchgeführt. In Anlehnung an BRINDHA & ELANGO (2015) werden die Übereinstimmungen bzw. Abweichungen zwischen zwei Methoden als prozentuale Anteile bezogen auf die Gesamtfläche des Untersuchungsgebiets angegeben. Der wesentliche Schritt besteht darin, die

reklassifizierten Bewertungskategorien zweier Methoden voneinander zu subtrahieren.

Validierungsversuch mit Grundwasserstandsganglinien

Ein Versuch die Vulnerabilitätskarten zu validieren, erfolgt mit Grundwasserstandsganglinien und Niederschlagsdaten. Es wird berechnet, mit welcher zeitlichen Verzögerung die Ganglinien der jeweiligen Grundwassermessstellen auf ein Niederschlagsereignis reagieren. Die getroffene Annahme lautet: Je größer (kleiner) die zeitliche Verzögerung ist, desto langsamer (schneller) versickert das Niederschlagswasser. Die Grundwasservulnerabilität müsste demnach geringer (höher) sein.

Es werden nur Grundwasserstandsganglinien verwendet, die keine zeitlichen Lücken in der Messwertaufzeichnung aufweisen und sich auf den Hauptgrundwasserleiter beziehen. Insgesamt können 163 Grundwassermessstellen (LFU 2018) berücksichtigt werden. Über Thiessen-Polygone werden die Ganglinien den 21 relevanten Niederschlagsstationen (DWD 2018) zugeordnet. Für die Berechnung der zeitlichen Verzögerung müssen die Zeiträume der Grundwasserstandsganglinien auf die Zeitspannen der Niederschlagsdaten zugeschnitten werden. Die mithilfe eines in R implementierten Algorithmus berechneten Verzögerungen werden in Monaten angegeben. In Anlehnung an die Verweilzeiten der GLA-Methode werden die Verzögerungen klassifiziert. Die berechneten Verzögerungen fallen in die drei Kategorien: ≤ 1 Jahr, > 1 bis 3 Jahre und > 3 bis 10 Jahre. Die Klassifizierung wird durchgeführt, um den Vergleich zwischen den errechneten Verzögerungen und den Vulnerabilitätsbewertungen zu vereinfachen. Die Grundwassermessstellen mit den berechneten Verzögerungen werden mit den Vulnerabilitätskarten verschnitten. Für jede Messstelle ist ablesbar, wie die Vulnerabilität bewertet wird und welche Verzögerung berechnet wurde.

Reklassifizierung	Beschreibung der Klassen	Verweilzeiten (verändert nach HÖLTING et al. 1995)
Klasse 1	sehr geringe Vulnerabilität	> 25 Jahre
Klasse 2	geringe Vulnerabilität	$> 10 - 25$ Jahre
Klasse 3	mittlere Vulnerabilität	$> 3 - 10$ Jahre
Klasse 4	hohe Vulnerabilität	$> 1 - 3$ Jahre
Klasse 5	sehr hohe Vulnerabilität	≤ 1 Jahr

Tab. 1: Reklassifizierte Vulnerabilitätsklassen, deren Beschreibung und zugeordnete Verweilzeiten

Tab. 1: Reclassified vulnerability classes, their description and associated residence times

Validierungsversuch mit Parameterkarten der anthropogenen Stoffeinträge

Für einen weiteren Validierungstest werden die Parameterkarten der anthropogenen Stoffeinträge verwendet; in diesem Fall sind die betrachteten Parameter: Ammonium, Nitrat und Sulfat. Die gemessenen Konzentrationen stehen für 119 Grundwassermessstellen im Untersuchungsgebiet zur Verfügung. Für die Stoffe werden nach der Grundwasserverordnung (GrwV 2010) Schwellenwerte angegeben (Ammonium: 0,5 mg/l, Nitrat: 50 mg/l, Sulfat: 240 mg/l) (LfU 2015). Es wird untersucht, ob die Grundwassermessstellen mit schwellenwertüberschreitenden Konzentrationen in vulnerabel bewerteten Gebieten liegen. Dabei gilt: Ist die Konzentration der Stoffe größer oder gleich der Schwellenwerte, sind sie als schwellenwertüberschreitend einzuordnen. Die Ergebnisse der Grundwassermessstellen werden mit den Vulnerabilitätsbewertungen der Methoden verschnitten. Für jede Messstelle ist ablesbar, wie die Vulnerabilität bewertet wird.

Ergebnisse

Methodenvergleich

Der Vergleich der Methoden erfolgt hinsichtlich der Eingangsparameter und -daten. Dafür werden die Informationen aus der Literatur zusammengetragen. Die Tab. 2 zeigt, welche Parameter bei den Methoden für das Untersuchungsgebiet eingehen. Es ist ersichtlich, dass alle Methoden die Lithologie der ungesättigten Zone, den Grundwasserflurabstand und die Mächtigkeit als Eingangsparameter

verwenden. Während die Mächtigkeit bei der GLA- und DIN-Methode als Wert eingeht, sind bei der HK50-Methode Klassen definiert. Alle Verfahren berücksichtigen die Druckverhältnisse. In Form von festgelegten Klassen wird bei der HK50-Methode zwischen gespanntem und ungespanntem Grundwasser differenziert. Bei der GLA-Methode können artesischen Druckverhältnisse als Punktzuschlag einbezogen werden. Beim vom LUGV (2013) weiterentwickelten DIN-Ansatz werden Gebiete mit gespanntem Grundwasser gesondert berücksichtigt. Die Grundwasserneubildungsrate wird sowohl bei der DIN- als auch bei der GLA-Methode verwendet. Letztere bezieht sie als Gewichtungsfaktor in die Berechnung mit ein. Beim DIN-Verfahren geht die Grundwasserneubildungsrate als Quotient ein. Alle anderen dargestellten Parameter werden jeweils nur von einer Methode berücksichtigt.

Neben dem Vergleich der Eingangsparameter müssen die Eingangsdaten betrachtet werden. Für die HK50-Methode liegen keine detaillierten Informationen über die Eingangsdaten vor. Als Hauptdatengrundlage werden von VOIGT (1987) die Hydrogeologische Grundkarte und die Karte der hydrogeologischen Kennwerte für alle Parameter benannt. Beide Karten beruhen auf der Lithofazieskarte Quartär 1:50.000 (CEPEK 1968, CEPEK 1999).

Für die Vulnerabilitätsbewertung nach der GLA-Methode werden die Eingangsdaten vom LBGR (2001) beschrieben. Für die Bewertung der Mächtigkeit, Druckverhältnisse, Lithologie und schwebenden Grundwasserstockwerke werden hauptsächlich Bohrungsdaten verwendet. Teilweise kommen ergänzend die Geologische Karte 1:25.000 und die Hydrogeologische Karte 1:50.000 zum Einsatz. Die

Eingangsparameter	HK50-Methode	GLA-Methode	DIN-Methode
Lithologie (ungesättigte Zone)	x	x	x
Mächtigkeit	x	x	x
Flurabstand	x	x	x
Druckverhältnisse	x	x	x
Grundwasserneubildungsrate		x	x
nutzbare Feldkapazität		x	
schwebende Grundwasserstockwerke mit Quellaustritten		x	
Feldkapazität			x
Lithologie (gesättigte Zone)			x
durchflusswirksame Porosität			x
Durchlässigkeitsbeiwert (kf-Wert)			x
Gradient zur Schematisierung des Fließgefälles			x

Tab. 2: Eingangsparameter für das Lockergestein und das Untersuchungsgebiet

Tab. 2: Input parameters for the unconsolidated rock and the study area

Werte für die nutzbare Feldkapazität und Grundwasserneubildungsrate wurden aus HÖLTING et al. (1995) entnommen und für Brandenburg angepasst. Die Karte der Schutzfunktion der Grundwasserüberdeckung im Maßstab 1:50.000 wurde digital auf Grundlage der Bohrungsdaten erstellt und anschließend vom Kartenbearbeiter flächenhaft extrapoliert. Die Erstellung der Vulnerabilitätskarte nach der DIN-Methode wird im Bericht des LUGV (2013) beschrieben.

Reklassifizierung

Die Ergebnisse der Reklassifizierung zeigt die Abb. 2. Es wird ersichtlich, dass die Methoden zum Teil ähnliche, mitunter aber sehr verschiedene Vulnerabilitätsbewertungen für gleiche Gebiete ergeben.

Die HK50-Methode bewertet einen Flächenanteil von rund 32 % der Gesamtfläche mit einer mittleren Vulnerabilität in den Niederungsgebieten. Der südöstliche Teil des Oderbruchs sowie das Eberswalder Urstromtal werden mit einer sehr hohen Vulnerabilität (Klasse 5) charakterisiert. Die Hochflächen sind zu 33 % durch eine geringe bis sehr geringe Vulnerabilität (Klassen 1 und 2) gekennzeichnet.

Bei der GLA-Methode wird das Untersuchungsgebiet insgesamt stärker vulnerabel klassifiziert. Die Klasse 5 nimmt die größte Fläche ein ($\approx 36\%$) und erstreckt sich von den nordwestlichen Bereichen der Uckermarkhochfläche über das Urstromtal bis in den Oderbruch. Die zweitgrößte Fläche nimmt die Klasse 2 mit ca. 22 % ein. Sie befindet sich auf den Hochflächen.

Die DIN-Methode bewertet das Untersuchungsgebiet nahezu flächendeckend als gering bis sehr gering vulnerabel. Die Klassen 1 und 2 nehmen dabei fast 70 % der Gesamtfläche ein. Teilweise werden die Niederungsbereiche vulnerabler eingeschätzt. Im Unterschied zur HK50- und GLA-Methoden werden die Gewässer nicht als separate Klasse ausgewiesen, sondern fallen überwiegend in die Klasse 5.

Gegenüberstellung der Vulnerabilitätsbewertungen der Methoden

Durch die Überlagerungsanalyse wird sichtbar, wo zwei Methoden eine übereinstimmende bzw. nicht übereinstimmende Bewertung aufweisen. Bei der Subtraktionsanalyse wird ermittelt, um wie viele Klassen sich die Bewertungen der betrachteten Methoden unterscheiden. Die Ergebnisse zeigt zusammengefasst für beide Analysen die Tab. 3. In der Abb. 3 werden die Subtraktionsergebnisse graphisch dargestellt.

Die HK50- und GLA-Methode weisen rund 39 % der Gesamtfläche mit einer übereinstimmenden Bewertung aus. Für die nicht übereinstimmenden Bewertungen zeigt sich,

dass die HK50-Methode zum größten Teil ($\approx 23\%$) eine Klasse (-1) niedriger als der GLA-Ansatz bewertet. Das bedeutet, wenn die GLA-Methode die Klassen 5, 4, 3, 2 vergibt, weist die HK50-Methode entsprechend die Klassen 4, 3, 2, 1 aus. Die HK50-Methode bewertet die Vulnerabilität geringer. Wird dies räumlich verortet, fällt auf, dass die Klasse -1 sowohl auf den Hochflächen als auch in den Niederungsbereichen auftritt. Werden alle Ergebnisse betrachtet, wird ersichtlich, dass die HK50-Methode für alle Subtraktionskategorien (-4/4, -3/3, -2/2, -1/1) einen größeren Anteil in der negativen Richtung aufweist, d. h. die Vulnerabilität geringer einstuft.

Die Gegenüberstellung der HK50- mit der DIN-Methode zeigt, dass rund 22 % der Gesamtfläche übereinstimmend bewertet werden. Den größten Anteil bei den nicht übereinstimmenden Bewertungen hat die Subtraktionsklasse 2 ($\approx 27\%$). Dies bedeutet, dass die HK50-Methode die Vulnerabilität je zwei Klassen über der DIN-Bewertung einschätzt. Wenn die HK50-Methode die Klassen 5, 4, 3 ausweist, bewertet das DIN-Verfahren die Vulnerabilität mit 3, 2, 1. Werden alle Ergebnisse betrachtet, wird deutlich, dass die HK50-Methode gegenüber der DIN-Methode die Vulnerabilität stets höher einschätzt, da die positiven Subtraktionsklassen (1–4) einen größeren Flächenanteil einnehmen. Im südöstlichen Bereich des Oderbruchs sind die Abweichungen mit 4 Klassen besonders hoch.

Der Vergleich zwischen der GLA- und DIN-Methode zeigt eine Übereinstimmung beider Methoden für etwa 22 % der Gesamtfläche an. Der größte Anteil (je $\approx 23\%$) wird vom GLA-Verfahren um eine bzw. zwei Klassen höher eingeschätzt. Die Gesamtbetrachtung der Ergebnisse zeigt, dass die GLA-Methode bei allen Subtraktionsklassen einen größeren Flächenanteil in der positiven Richtung aufweist. Dies spiegelt sich tendenziell im gesamten Untersuchungsgebiet wider.

Ergebnisse der Validierungsversuche

Die Ergebnisse der Validierungsversuche mit Grundwasserstandsganglinien und den Parameterkarten der anthropogenen Stoffeinträge fallen nicht wie erwartet aus. Der Grund dafür ist die relativ geringe Übereinstimmung zwischen den Grundwasservulnerabilitätsbewertungen und den Ergebnissen der Grundwasserstandsganglinien bzw. Parameterkarten.

Bei den Grundwasserstandsganglinien zeigt Abb. 4 die räumliche Verteilung der errechneten Verzögerungen, die anzeigen, wie schnell die Grundwasserganglinien auf ein Niederschlagsereignis reagieren. In den Niederungsbereichen liegen hauptsächlich die Grundwassermessstellen mit Verzögerungen von > 1 bis 3 Jahren und > 3 bis 10 Jahren. Die Mehrheit der Messstellen in den Niederungsbereichen und auf den Hochflächen weist jedoch eine Verzögerung von unter einem Jahr auf. Dies entspricht jedoch mögli-

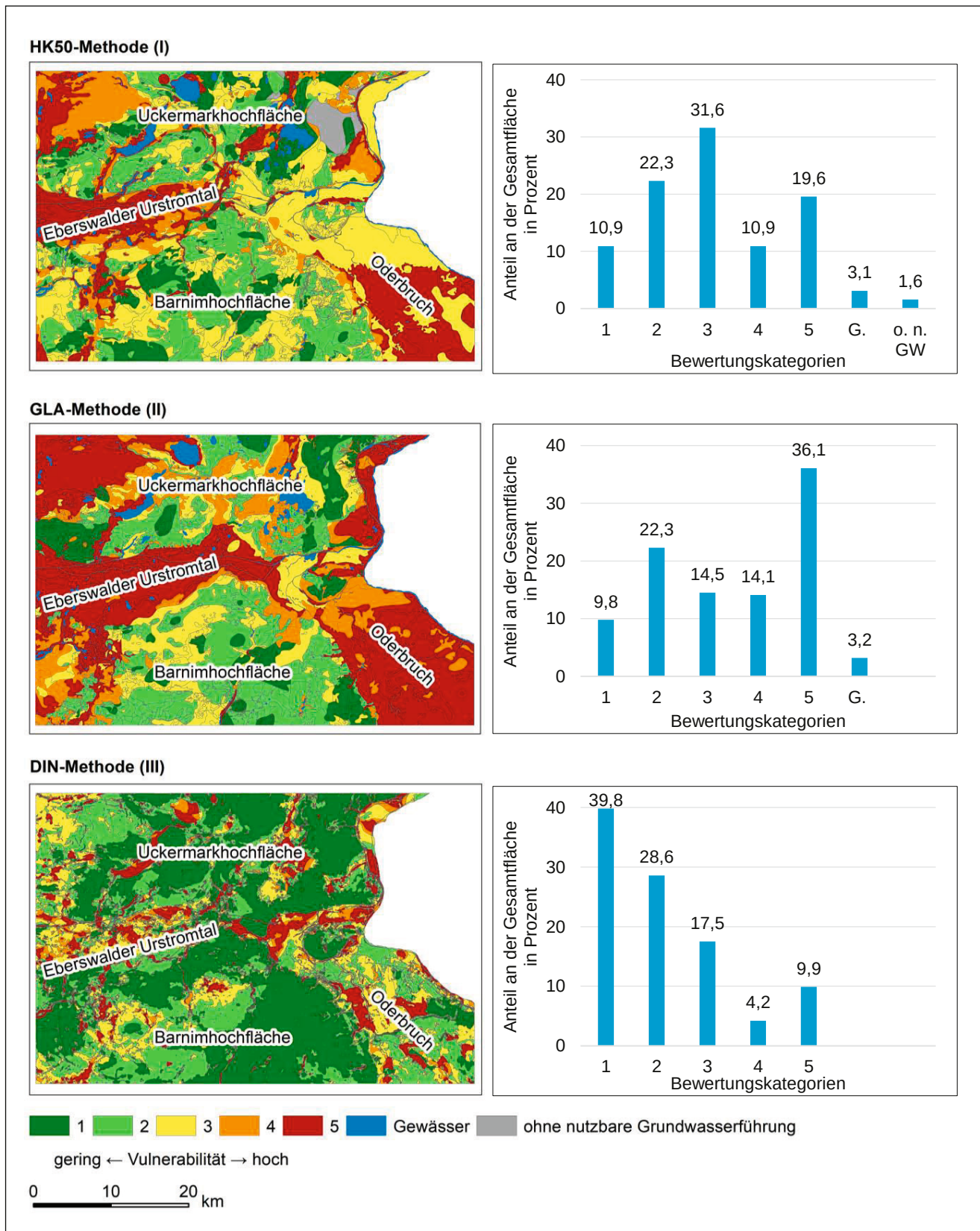


Abb. 2: Reklassifizierungsergebnisse und Prozentanteile der Bewertungsklassen an der Gesamtfläche des Untersuchungsgebiets, G: Gewässer, o. n. GW: ohne nutzbare Grundwasserführung

Fig. 2: Reclassification results and the percentage of rating classes in the study area, G: water bodies, o. n. GW: no usable groundwater

	← geschützt/wenig vulnerabel				übereinstimmend	nicht geschützt/stärker vulnerabel →			
Anzahl der abweichenden Vulnerabilitätsklassen	-4	-3	-2	-1	0	1	2	3	4 ohne Angabe
HK50-Methode im Vergleich zur GLA-Methode	0,7%	3,5%	13,5%	23,3%	39,2%	12,5%	4,4%	0,5%	0,1%
HK50-Methode im Vergleich zur DIN-Methode	0,3%	0,5%	4,2%	6,3%	22,2%	25,7%	27,1%	7,5%	1,5%
GLA-Methode im Vergleich zur DIN-Methode	0,2%	0,4%	1,6%	4,6%	21,7%	22,7%	22,5%	17,7%	5,4%
									3,2%

Tab. 3: Subtraktionsergebnisse als prozentuale Anteile bezogen auf die Gesamtfläche des Untersuchungsgebiets

Tab. 3: Subtraction results shown as percentage related to the whole study area

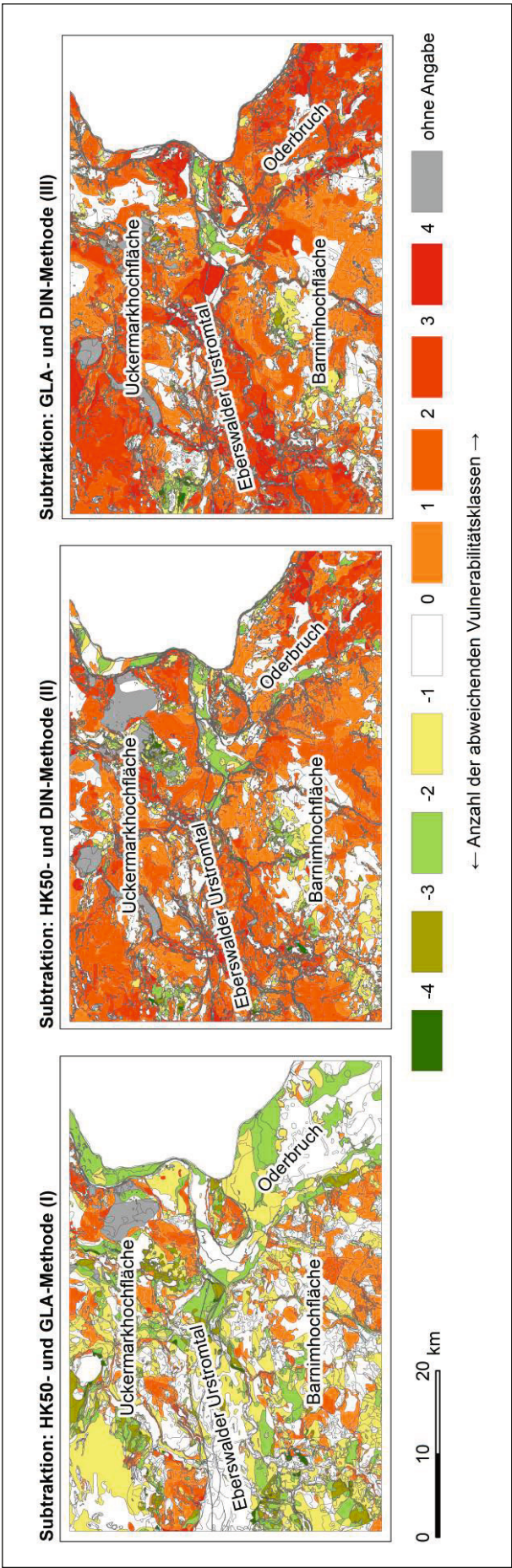


Abb. 3: Subtraktionsergebnisse der Methoden im Untersuchungsgebiet

Fig. 3: Subtraction results of the methods in the study area

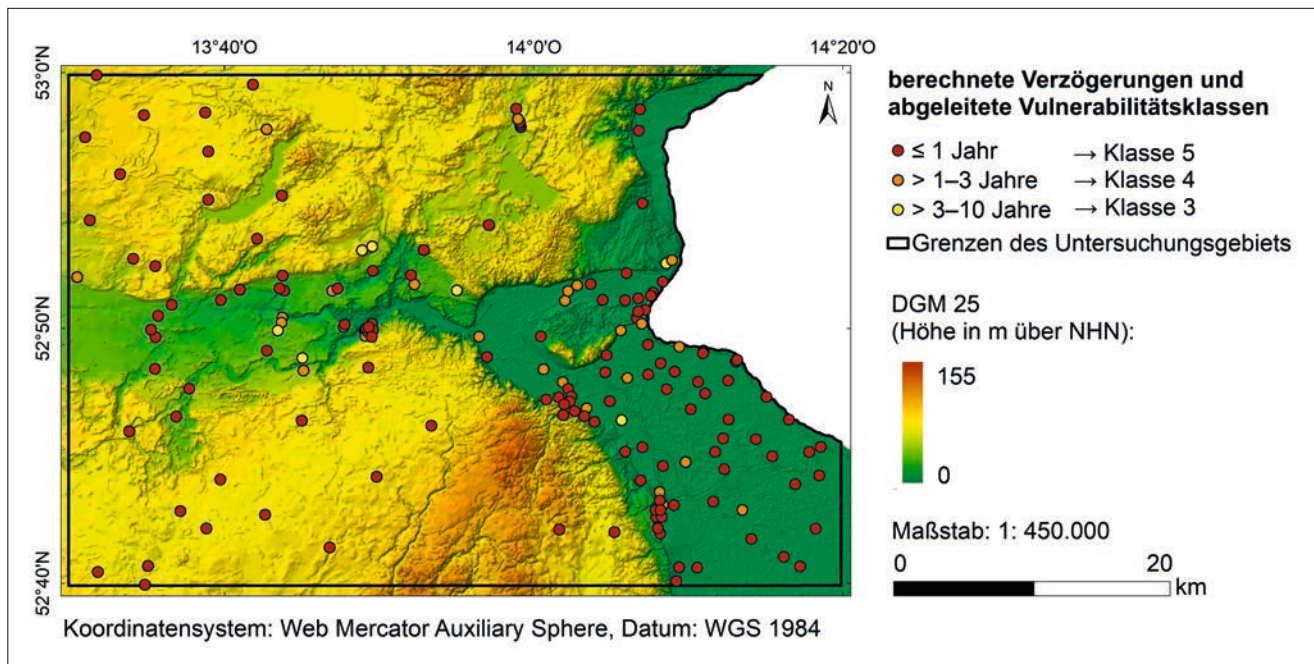


Abb. 4: Messstellen der Grundwasserstandsganglinien und die berechneten Verzögerungen auf ein Niederschlagsereignis (eigene Darstellung), Datengrundlage: DGM 25 (WMS-LBGR-BORELIEF) (LBGR 2018), Grundwasserstandsganglinien (LfU 2018)

Fig. 4: Measuring points of hydrographs of groundwater levels and the calculated lags (own map), data basis: DEM 25 (WMS-LBGR-BORELIEF) (LBGR 2018), hydrographs of groundwater levels (LfU 2018)

cherweise nicht den erwarteten regionalen hydrogeologischen Gegebenheiten. Insbesondere für die Hochflächen wurde angenommen, dass längere Verzögerungen berechnet werden und damit eine stärkere Differenzierung zwischen Niederungsbereichen und Hochflächen erkennbar ist. Die Gegenüberstellung mit den Vulnerabilitätsbewertungen der drei Methoden ergibt in der Folge nur bedingt Übereinstimmungen mit den berechneten Verzögerungen. Die Ergebnisse deuten darauf hin, dass die größte Übereinstimmung zwischen den berechneten Verzögerungen und der GLA-Methode bestehen.

Für die Parameterkarten der anthropogenen Stoffeinträge zeigt Abb. 5, bei welchen Grundwassermessstellen eine Schwellenwertüberschreitung bei mindestens einem der betrachteten Stoffe (Ammonium, Nitrat, Sulfat) feststellbar ist. Die Mehrheit der Messstellen mit Schwellenwertüberschreitungen liegt in den Niederungsbereichen, vor allem im Oderbruch. Auf den Hochflächen finden sich nur vereinzelt Messstellen, an denen der Schwellenwert der Grundwasserverordnung (Grwv 2010) überschritten wird. Die Gegenüberstellung der Ergebnisse mit den Vulnerabilitätsbewertungen deutet an, dass die größten Übereinstimmungen mit der GLA-Methode bestehen. Dies wird damit begründet, dass die Mehrheit der Grundwassermessstellen mit Schwellenwertüberschreitungen in (sehr) hoch vulnerabel bewertete Gebiete fallen bzw. viele der Messstellen ohne Schwellenwertüberschreitung in gering vulnerabel bewertete.

Diskussion

Unterschiede zwischen den Vulnerabilitätsbewertungen

Die Vulnerabilität des Untersuchungsgebiets wird vom GLA-Ansatz tendenziell als hoch und von der HK50-Methode als mittel bewertet. Die DIN-Methode zeigt nahezu flächendeckend eine geringe bis sehr geringe Vulnerabilität. Räumlich gesehen, werden die Niederungsbereiche mit einer höheren Vulnerabilität ausgewiesen. Die hydrogeologischen Gründe dafür sind die sandig-kiesigen Ablagerungen, die oftmals fehlenden stauenden Deckschichten und der geringere Grundwasserflurabstand. Im Gegensatz dazu werden die Hochflächen mit einer geringeren Vulnerabilität bewertet. Hydrogeologisch kann dies durch die bindigen Ablagerungen, die mächtigere Überdeckung und den größeren Grundwasserflurabstand erklärt werden. Insgesamt ist die räumliche Abgrenzung der Niederungsgebiete und Hochflächen durch die unterschiedlichen Vulnerabilitätsbewertungen am deutlichsten beim GLA-Verfahren und teilweise bei der HK50-Methode zu erkennen. Bei der DIN-Methode sind die Grenzen nur ansatzweise sichtbar, da flächendeckend eine geringe Vulnerabilität ausgewiesen wird.

Durch die Überlagerungs- und Subtraktionsanalyse wird ermittelt, dass die HK50- und GLA-Methode die größte Übereinstimmung in ihrer Bewertung haben. Dies erklärt sich durch die ähnliche Charakterisierung der Hochflä-

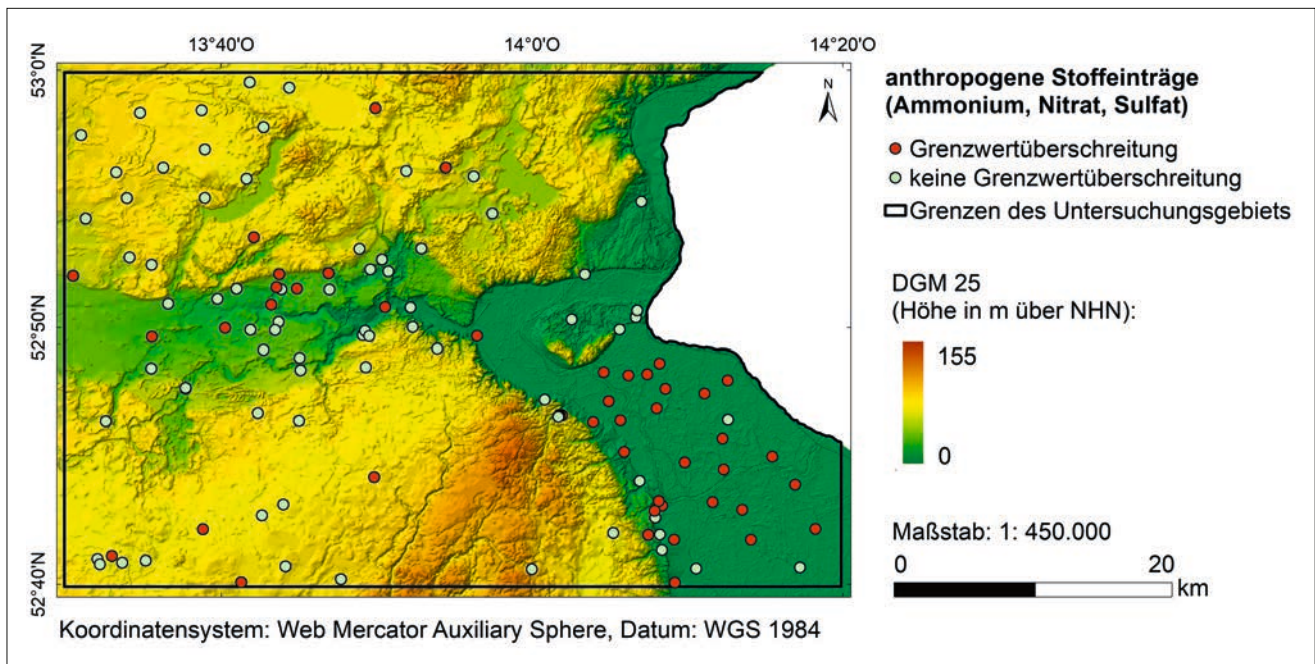


Abb. 5: Messstellen der anthropogenen Schadstoffeinträge mit und ohne Schwellenwertüberschreitung bei mindestens einem der betrachteten Stoffe (Ammonium, Nitrat, Sulfat) (eigene Darstellung), Datengrundlage: DGM 25 (WMS-LBGR-BORELIEF (LBGR 2018), anthropogene Stoffeinträge (LfU 2018)

Fig. 5: Measuring points of anthropogenic pollution inputs with and without exceeding the limit values for at least one of the considered substances (ammonium, nitrate, sulphate) (own image), data basis: DEM 25 (WMS-LBGR-BORELIEF (LBGR 2018), anthropogenic pollution inputs (LfU 2018)

chen und Niederungsbereiche. Im Gegensatz dazu weisen die HK50- und DIN-Methode bzw. GLA- und DIN-Methode geringe Übereinstimmungen auf. Dies wird mit der überwiegend gering eingeschätzten Vulnerabilität durch die DIN-Methode erklärt, welche von den beiden anderen Methoden abweicht. Vor allem in den Niederungsbereichen werden die Unterschiede zwischen den Methoden sichtbar.

Gründe für die Unterschiede der Vulnerabilitätsbewertungen

Für die Unterschiede lassen sich vier Gründe bestimmen: (1) die Vorgehensweise der Methoden, (2) die Eingangsparameter, (3) die Eingangsdaten und (4) die Subjektivität bei Entscheidungen in der Methodenanwendung.

Die Vorgehensweise ist bei allen Methoden unterschiedlich. Die HK50-Methode ist ein Matrixverfahren und basiert auf fest definierten Klassen. Die GLA-Methode ist ein Punktbewertungsverfahren, bei dem der errechneten Gesamtpunktzahl eine Verweilzeit zugewiesen wird. Der DIN-Ansatz ist ein Analogiemodell und berechnet die Verweilzeit. Die unterschiedliche Vorgehensweise und der sich daraus ergebende unterschiedliche Einfluss der Parameter werden von HEINKELE et al. (2002) für die GLA- und DIN-Methode untersucht. Anhand eines Beispiels stellen sie fest, dass sich die Ergebnisse sogar bei gleichen Eingangsdaten unterscheiden. Die GLA-Methode leitet für Grundwas-

serneubildungsraten von 300 mm und 50 mm jeweils eine Verweilzeit von 3 – 10 Jahren ab. Die DIN-Methode berechnet hingegen fünf Jahre (300 mm) und 30 Jahre (50 mm). HEINKELE et al. (2002) bemerken weiterhin, dass der GLA-Ansatz die Verweilzeit in den Neubildungsgebieten tendenziell um eine bzw. zwei Klassen niedriger einschätzt als die DIN-Methode. Die Ursache führen sie auf die unterschiedliche Berechnung der Verweilzeit zurück. Während bei der DIN-Methode die Grundwasserneubildungsrate als Quotient eingeht, wird sie nach HÖLTING et al. (1995) in einen Faktor umgewandelt. Der Einfluss der Grundwasserneubildungsrate wird vom GLA-Verfahren abgeschwächt und unterschätzt (HEINKELE et al. 2002).

Ein weiterer Grund für die Abweichungen zwischen den Methoden sind die unterschiedlichen Parameter. Während beispielsweise die Parameter Lithologie oder Mächtigkeit bei allen Methoden verwendet werden, wird die Grundwasserneubildungsrate nicht bei allen Bewertungsverfahren berücksichtigt.

Die Hauptursache für die Unterschiede ist die verwendete Datengrundlage. Im Untersuchungsgebiet wird beispielsweise die Mächtigkeit bei der HK50-Methode über die zugrunde gelegten Karten abgeleitet. Beim GLA-Verfahren wird sie über Bohrungsdaten und die geologische Karte ermittelt. Die DIN-Methode berechnet die Mächtigkeit über ein digitales Geländemodell und einen Grundwassergleichenplan. In der Folge ergeben sich unterschiedliche Mächtigkeitswerte, die die Vulnerabilitätsbewertung beeinflussen.

Außerdem kommt es zu subjektiven, vom jeweiligen Bearbeiter bzw. regionalen Hydrogeologen abhängigen Entscheidungen bei der Methodenanwendung, die Einfluss auf das jeweilige Ergebnis und somit auf die Vergleichbarkeit mit anderen bewerteten Regionen haben.

Vergleichbarkeit zwischen der HK50-, GLA- und DIN-Methode

Eine Vergleichbarkeit kann nur erreicht werden, wenn die Methoden in ein einheitliches Bewertungsschema überführt werden. Dafür wurde die Reklassifizierung eingesetzt. Grundsätzlich gibt es dafür verschiedene Möglichkeiten. In der vorliegenden Arbeit wurde sie in Form von fünf Klassen vorgenommen. Die Ergebnisse basieren auf dieser Reklassifizierungsart. Damit hat sie einen maßgeblichen Einfluss auf die getroffenen Aussagen. Kritisch sei angemerkt, dass die Reklassifizierung in fünf Klassen eine unscharfe Grenze zwischen den Kategorien mit sich bringt. Die Differenzierung in „sehr geringe“ bzw. „geringe“ oder vergleichbar „hohe“ bzw. „sehr hohe“ Vulnerabilität ist nicht eindeutig. Dennoch wird diese Unterteilung in der Literatur, beispielsweise von NEUKUM & HÖTZL (2006), angewendet.

Für die statistische Analyse wurden die Überlagerungs- und Subtraktionsanalysen durchgeführt, mit denen die Gemeinsamkeiten und Unterschiede zwischen den Methoden herausgearbeitet wurden. Für die Vergleichbarkeit der Methoden sind die Gegenüberstellung der Eingangsparameter und -daten sowie die Einflussweise der Parameter wichtig. Nur so kann beurteilt werden, worin (abgesehen von den Vulnerabilitätsergebnissen) und warum die Unterschiede bestehen.

Validierungsversuche mit Grundwasserstandsganglinien und Parameterkarten des anthropogenen Stoffeintrags

Die Ergebnisse der Validierungsversuche zeigen, dass die Vulnerabilitätsbewertungen nur ansatzweise mit den gemessenen Daten im Untersuchungsgebiet übereinstimmen. Es deutet sich an, dass davon die größte Übereinstimmung mit der GLA-Methode besteht. Im räumlichen Vergleich weisen die Niederungsbereiche tendenziell eine größere Übereinstimmung auf. Auf den Hochflächen, insbesondere bei dem Validierungstest mit den Grundwasserstandsganglinien, weichen die Ergebnisse deutlich voneinander ab. Die gering berechneten Verzögerungen passen nicht mit den hydrogeologischen Gegebenheiten zusammen. So deuten große Flurabstände bzw. eine mächtigere Grundwasserüberdeckung sowie gespannte Verhältnisse im Bereich der Hochflächen auf längere Verweilzeiten hin.

Als mögliche Gründe können bei den Grundwasserstandsganglinien Undichtigkeiten des Ringraums, Fehler bei der Zuordnung der Grundwasserleiter, die Zuord-

nung der Ganglinien und Niederschlagsstationen nach den Thiessen-Polygonen, die Zuordnung der Niederschlagsereignisse sowie die Problematik der nicht in die Bewertung einfließenden Grundwasserdynamik (Ort des Eintrags ist nicht notwendigerweise Ort der Schwellenwertüberschreitung) angeführt werden. Bei den Parameterkarten der anthropogenen Stoffeinträge wurde nur zwischen Überschreitung und keiner Überschreitung des Schwellenwerts unterschieden. Erhöhte Stoffkonzentrationen, die noch unter dem Schwellenwert liegen, wurden nicht berücksichtigt. Eine feinere Differenzierung könnte andere Ergebnisse liefern. Möglicherweise ergäbe sich daraus eine größere bzw. geringere Übereinstimmung mit den Vulnerabilitätsbewertungen. Außerdem muss berücksichtigt werden, dass beispielsweise der Abbau von Schadstoffen relevant ist und die Ergebnisse beeinflusst. In den Vulnerabilitätsbewertungen werden diese Prozesse nicht berücksichtigt.

Ein Problem in beiden Validierungsverfahren ist die schwierige Vergleichbarkeit zwischen qualitativ arbeitenden Matrix- und Punktbewertungsverfahren und quantitativen Daten. Ein direkter Vergleich zwischen den Karten und Daten ist nicht möglich, da ordinale Vulnerabilitätsklassen und physikalische Größen aufeinandertreffen. Nur über Annahmen können Aussagen getroffen werden (NEUKUM 2012), beispielsweise die Annahme, dass die schwellenwertüberschreitenden Konzentrationen in vulnerabel ausgewiesenen Gebieten liegen sollten.

Schlussfolgerungen

In der vorliegenden Arbeit werden die Vulnerabilitätsbewertungen der HK50-, GLA- und DIN-Methode am Beispiel eines Untersuchungsgebiets im Nordosten Brandenburgs verglichen. Ein wichtiger Schritt für den Vergleich ist die Reklassifizierung der Vulnerabilitätsklassen, der in fünf Klassen vorgenommen wird. Die Gegenüberstellung der reklassifizierten Daten zeigt, dass zwischen den Methoden zum Teil deutliche Abweichungen bestehen. Das DIN-Verfahren bewertet die Vulnerabilität fast flächendeckend gering. Die HK50-Methode weist tendenziell eine mittlere Vulnerabilität aus und die GLA-Methode schätzt sie eher hoch ein. Räumlich werden die Niederungsbereiche eher vulnerabel und die Hochflächen weniger vulnerabel eingestuft. Dies lässt sich auf die hydrogeologischen Gegebenheiten zurückführen.

Begründet werden die Abweichungen mit der jeweiligen methodischen Vorgehensweise, den verschiedenen Eingangsparametern und -daten sowie den subjektiven Einschätzungen. Um die teilweise deutlichen Unterschiede zwischen den Vulnerabilitätsbewertungen zu überwinden und auf nationaler Ebene eine Vergleichbarkeit zu schaffen, wird empfohlen, die Datengrundlage zu harmonisieren. Beispielsweise könnte in Abstimmungsprozessen länderübergreifend geklärt werden, welche Daten (nicht) zur Verfügung stehen, welche Maßstäbe verwendet werden,

ob Vektor- oder Rasterdaten zum Einsatz kommen, welche Modelle zur Ableitung von Parametern genutzt werden etc. Insbesondere an Bundesländergrenzen ist die Abstimmung wichtig, damit keine durch Eingangsdaten verursachten Bewertungssprünge bei der Vulnerabilitätseinschätzung auftreten.

Beide Validierungsversuche zeigen, entgegen der Erwartung, nur ansatzweise Übereinstimmungen zwischen den gemessenen Daten im Untersuchungsgebiet und den Vulnerabilitätsbewertungen der Methoden. Als mögliche Gründe werden beispielsweise Undichtigkeiten im Ringraum der Grundwassermessstellen, Fehler bei der Zuordnung der Grundwasserleiter und die fehlende Berücksichtigung von Schadstoffabbauprozessen benannt. Die Ergebnisse der Validierungsversuche verdeutlichen die Schwierigkeit, qualitative Vulnerabilitätsmethoden mit quantitativen Daten zu vergleichen. Gleichzeitig zeigen sie für das Untersuchungsgebiet die Notwendigkeit, die Validierungsversuche auszubauen. Beispielsweise könnte bei den anthropogenen Stoffeinträgen der Frage nachgegangen werden, wie sich eine stärkere Differenzierung der Werte in geringe, hohe und schwellenwertüberschreitende Konzentration auf den Vergleich mit den Vulnerabilitätsbewertungen auswirkt. Für zukünftige Arbeiten bietet daher vor allem die Validierung Anknüpfungspotential.

Zusammenfassung

Für ein Untersuchungsgebiet in Nordost-Brandenburg werden drei Grundwasservulnerabilitätsmethoden verglichen. Untersucht werden die HK50-Methode nach dem Matrixverfahren von VOIGT (1987), die GLA-Methode nach dem Punktbewertungssystem von HÖLTING et al. (1995) und die DIN-Methode nach dem Analogiemodell der DIN 19732 (2011).

Der Kartenvergleich zeigt teilweise deutliche Unterschiede in der Vulnerabilitätseinschätzung, die hauptsächlich auf eine inhomogene Datengrundlage und methodische Unterschiede zurückzuführen sind. Während beim Matrix- und Punktbewertungsverfahren ca. 39 % der Gesamtfläche übereinstimmend bewertet werden, zeigt die Gegenüberstellung beider Methoden mit dem Analogiemodell eine Übereinstimmung von nur etwa 22 %. Das Punktbewertungssystem zeigt für das Untersuchungsgebiet eine hohe, das Matrixverfahren eine mittlere und das Analogiemodell eine geringe Vulnerabilität.

Die Validierung der Vulnerabilitätsbewertungen erfolgt mithilfe des Niederschlags- bzw. Ganglinienverhaltens an 163 Grundwassermessstellen und der Beurteilung von anthropogenen Stoffeinträgen an 119 Grundwassergütemessstellen.

Um die Vulnerabilitätsbewertungen auf nationaler und internationaler Ebene zukünftig besser vergleichen zu können, wird empfohlen, die Datengrundlage zu harmonisieren.

Summary

Three groundwater vulnerability methods are compared for a study area in northeastern Germany: the HK50 method based on the matrix method of VOIGT (1987), the GLA method according to the point-count system of HÖLTING et al. (1995) and the DIN method based on the analogue model of DIN 19732 (2011).

The vulnerability maps differ due to inhomogeneous data and methodological differences. While the matrix and point-count system, indicate a similar vulnerability assessment for 39 % of the study area, the comparison with the analogue model shows an agreement of 22 %. The point-count system shows a high, the matrix method a medium and the analogue model a low vulnerability for the study area.

Precipitation data, hydrographs from 163 and anthropogenic pollutant inputs from 119 groundwater-monitoring stations are used for validation.

To improve the comparability of future vulnerability assessments at a national and international level, it is recommended to harmonise the data basis.

Danksagung

Für die Bereitstellung der Daten und Informationen danken wir Frau Hermsdorf vom Landesamt für Umwelt Brandenburg.

Literaturverzeichnis

- AD-HOC-AG HYDROGEOLOGIE (2016): Regionale Hydrogeologie von Deutschland – Die Grundwasserleiter: Verbreitung, Gesteine, Lagerungsverhältnisse, Schutz und Bedeutung. 456 S.; Geologisches Jahrbuch, Reihe A, Heft 163, Hannover
- ALBINET, M. & J. MARGAT (1970): Cartographie de la vulnérabilité à la pollution des nappes d'eau souterraines. Bull. BRGM, zème série, section 3 4, 13–22
- ALLER, L., BENNETT, T., LEHR, J. H., PETTY, R. H., HACKETT, G. (1987): DRASTIC – a standardized system for evaluating groundwater pollution potential using hydrogeologic setting. Environmental Protection Agency, 600/2-87/035, 641 S.
- BANNICK, C., ENGELMANN, B., FENDLER, R., FRAUENSTEIN, J., GINZKY, H., HORNE-MANN, C., ILVONEN, O., KIRSCHBAUM, B., PENN-BRESSEL, G., RECHENBERG, J., RICHTER, S., ROY, L., WOLTER, R. (2008): Grundwasser in Deutschland. <https://www.umweltbundesamt.de/sites/default/files/medien/publikation/long/3642.pdf>. Zugriffen am: 05. August 2019

- BGR & SGD (2021): Prüfung der Methoden zur Ermittlung der Schutzfunktion der Grundwasserüberdeckung hinsichtlich Anwendbarkeit, verfügbarer Datengrundlagen, Fortentwicklungsbedarf. – Abschlussbericht der AG Hydrogeologie. https://www.infogeo.de/Infogeo/DE/BIZ/Downloads/AG_hydrogeologie_AA-HY2_abschlussbericht.zip?__blob=publicationFile&v=4 zugegriffen am 20.09.2021
- BGR (2005): Europäische Wasserrahmenrichtlinie. Charakterisierung der Deckschichten. https://www.bgr.bund.de/DE/Themen/Wasser/Projekte/abgeschlossen/Beratung/Sgwu/sgwu_karte.pdf?__blob=publicationFile&v=5. Zugriffen am: 05. August 2019
- BRINDHA, K. & L. ELANGO (2015): Cross comparison of five popular groundwater pollution vulnerability index approaches. *Journal of Hydrology* 524, 597–613
- CEPEK, A. G. (1968): Projekt Lithofazieskarte Quartär für die angewandte Geologie. 178 S.; Zentrales Geologisches Institut (ZGI), Berlin
- CEPEK, A. G. (1999): Die Lithofazieskarten Quartär 1:50 000 (LKQ 50) – eine Erläuterung des Kartenkonzepts mit Hinweisen für den Gebrauch. *Brandenburgische Geowissenschaftliche Beiträge* 6/2, 3–38
- CHACHADI, A. G., LOBO-FERREIRA, J. P., NORONHA, L., CHOUDRI, B. S. (2003): Assessing the impact of sea-level rise on salt water intrusion in coastal aquifers using GALDIT, APRH/CEAS. *Seminário Sobre Águas Subterrâneas*, Lisbon
- CIVITA, M. (1994): Le carte della vulnerabilità degli acquiferi all'inquinamento. Teoria & pratica (Aquifer vulnerability maps to pollution). Pitagora Ed, Bologna
- CIVITA, M. & C. DE REGIBUS (1995): Sperimentazione di alcune metodologie per la valutazione della vulnerabilità degli acquiferi. *Quaderni di Geologia Applicata*, Pitagora Ed. Bologna, 3, 63–71
- COST (2003): Action 620 – Vulnerability and risk mapping for the protection of carbonate (karst) aquifers. European Commission, Directorate-General for Research, EU-Report 20912, Luxemburg
- DALY, D., DASSARGUES, A., DREW, D., DUNNE, S., GOLDSCHIEDER, N., NEALE, S., POPESCU, I. C., ZWAHLEN, F. (2002): Main concepts of the „European approach“ to karst-groundwater-vulnerability assessment and mapping. *Hydrogeology Journal* 10, 340–345
- DIN 19732 (2011): Bodenbeschaffenheit – Bestimmung des standörtlichen Verlagerungspotentials von nichtsorbierbaren Stoffen. 12 S.; Deutsches Institut für Normung, Berlin
- DOERFLIGER, N., JEANNIN, P.-Y., ZWAHLEN, F. (1999): Water vulnerability assessment in karst environments: a new method of defining protection areas using a multi-attribute approach and GIS tools (EPIK method). *Environmental Geology*, 39(2), 165–176
- DWD (2018): CDC – Climate Data Center. Niederschlagsdaten Brandenburg. <https://cdc.dwd.de/portal/201912031600/view1>. Zugriffen am: 29. November 2018
- EU-GWRL (2006): Richtlinie 2006/118/EG des Europäischen Parlaments und des Rates vom 12. Dezember 2006 zum Schutz des Grundwassers vor Verschmutzung und Verschlechterung.- Amtsblatt Nr. L 372 vom 27/12/2006, S. 0002–0018
- EU-WRRL (2000): Richtlinie 2000/60/EG des Europäischen Parlaments und des Rates vom 23. Oktober 2000 zur Schaffung eines Ordnungsrahmens für Maßnahmen der Gemeinschaft im Bereich der Wasserpolitik.- Amtsblatt Nr. L 327 vom 22/12/2000, S. 0001–0073
- FOSTER, S. S. D. (1987): Fundamental concepts in aquifer vulnerability, pollution risk and protection strategy. In: VAN DUJVENBOODEN, W., VAN WAEGENINGH, H. G. (Hrsg.): *Vulnerability of soil and groundwater to pollutants*, international conference, Noordwijk aan Zee, the Netherlands, 69–86
- GERSTENGARBE, F.-W., BADECK, F., HATTERNMANN, F., KRYSANOVA, V., LAHMER, W., LASCH, P., STOCK, M., SUCKOW, F., WECHSUNG, F., WERNER, P. C. (2003): PIK Report 83: Studie zur klimatischen Entwicklung im Land Brandenburg bis 2055 und deren Auswirkungen auf den Wasserhaushalt, die Forst- und Landwirtschaft sowie die Ableitung erster Perspektiven. https://www.pik-potsdam.de/4c/web_4c/publications/pik_report_83.pdf. Zugriffen am: 05. August 2019
- GOGU, R. C., HALLET, V., DASSARGUES, A. (2003): Comparison of aquifer vulnerability assessment techniques. Application to the Néblon river basin (Belgium). *Environmental Geology* 44, S. 881–892
- GOLDSCHIEDER, N., KLUTE, M., STURM, S., HÖTZL, H. (2000): The PI method – a GIS-based approach to mapping groundwater vulnerability with special consideration of karst aquifers. *Zeitschrift für angewandte Geologie*, 46(3), 157–166
- GRWV (2010): Verordnung zum Schutz des Grundwassers vom 09.11.2010 (Grundwasserverordnung). Bundesministeriums der Justiz, Berlin.
- HEINKELE, T., VOIGT, H.-J., JAHNKE, C., HANNAPPEL, S., DONAT, E. (2002): Charakterisierung der Empfindlichkeit von Grundwasserkörpern. *Forschungsbericht* 299 22 278. 126 S.; Umweltbundesamt, Dessau-Roßlau

- HERMSDORF, A., HOTZAN, G., JESCHKE, R., KALATZ, R. (1999): Grundwasserlagerstätten im Land Brandenburg. Brandenburgische Geowissenschaftliche Beiträge 6/1, 47–55
- 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. 19 S.; Schweizerbart'sche Verlagsbuchhandlung, Stuttgart
- HOTZAN, G. (1998): Hydrogeologische Verhältnisse im brandenburgischen Abschnitt des Odertales. Brandenburgische Geowissenschaftliche Beiträge 5/2, 73–79
- IFL (2003): Nationalatlas Bundesrepublik Deutschland. Band 3 – Natur und Umwelt II: Klima, Pflanzen- und Tierwelt. 176 S.; Spektrum Akademischer Verlag, Heidelberg
- JARRAY, H., OUESSAR, M., ZAMMOURI, M., HAMZAOU, F. (2017): Groundwater vulnerability based on GIS approach: Case study of Zeuss-Koutine aquifer, South-Eastern Tunisia. *Geofísica Internacional* 56-1, 7–12
- KUMAR, S., THIRUMALAIVASAN, D., RADHAKRISHNAN, N., MATHEW, S. (2013): Groundwater vulnerability assessment using SINTACS model. *Geomatics, Natur Hazards and Risk* 4, 339–354
- LBGR (2001): Richtlinien zur Hydrogeologischen Bearbeitung des Landes Brandenburg im Maßstab 1:50.000. 26 S.; unveröffentlicht
- LBGR (2019): Hydrogeologische Karte des Landes Brandenburg 1:50.000. <http://www.geo.brandenburg.de/lbgr/hydrogeologie>. Zugriffen am: 05. August 2019
- LBV (2013): Berichte der Raumbbeobachtung. Kreisprofil Barnim; Märkisch-Oderland; Uckermark 2013. <https://lbv.brandenburg.de/3099.htm>. Zugriffen am: 15. Oktober 2019
- LFU (2015): Bericht zur Grundwasserbeschaffenheit im Land Brandenburg 2006 – 2012. https://mlul.brandenburg.de/media_fast/4055/guetebericht_lgb.pdf. Zugriffen am: 05. August 2019
- LFU (2018): Zeitreihen von Grundwasserständen an 163 Messstellen. LfU Brandenburg, Potsdam
- LFULG (2003): Handbuch zur Altlastenbehandlung. Teil 3. Gefährdungsabschätzung, Pfad und Schutzgut Grundwasser. <https://www.umwelt.sachsen.de/umwelt/download/boden/hza3.pdf>. Zugriffen am: 05. August 2019
- LUGV (2013): Karten des Grundwasserflurabstandes und der Verweilzeit des Sickerwassers in der Grundwasserüberdeckung des Hauptgrundwasserleiters. 78 S.; unveröffentlicht
- LUOMA, S., OKKONEN, J., KORKKA-NIEMI, K. (2016): Comparison of the AVI, modified SINTACS and GALDIT vulnerability methods under future climate-change scenarios for a shallow low-lying coastal aquifer in southern Finland. *Hydrogeology Journal* 25, 203–222
- MAGIERA, P. (2000): Methoden zur Abschätzung der Verschmutzungsempfindlichkeit des Grundwassers. *Grundwasser – Zeitschrift der Fachsektion Hydrogeologie* 3, 103–114
- MARGAT, J. (1968): Vulnérabilité des nappes d'eau souterraine à la pollution. BRGM-Veröffentlichung, 68 SGL 198 HYD
- NEUKUM, C. (2012): Eine Übersicht zu Methoden und Anwendungen der Validierung von Vulnerabilitätsbewertungen. *Grundwasser – Zeitschrift der Fachsektion Hydrogeologie* 18, 15–24
- NEUKUM, C., HÖTZL, H. (2006): Standardization of vulnerability maps. *Environmental Geology* 51(5), 689–694
- OUEDRAOGO, I., DEFURNY, P., VANCLOOSTER, M. (2016): Mapping the groundwater vulnerability for pollution at the pan African scale. *Science of the Total Environment* 544, 939–953
- POLEMIO, M., CASARANO, D., LIMONI, P. P. (2009): Karstic aquifer vulnerability assessment methods and results at a test site (Apulia, southern Italy). *Natural Hazards and Earth System Sciences* 9, S. 1461–1470
- SINREICH, M., KOZEL, R., MEYLAN, B., MURALT, R. (2009): Konzept der Vulnerabilität im Grundwasserschutz. Anwendung auf die Verhältnisse der Schweiz. Gas, Wasser, Abwasser: schweizerische Zeitschrift für Gasversorgung und Siedlungswasserwirtschaft 89/2, 109–117
- STACKEBRANDT, W., MANHENKE, V., LIPPSTEU, L. (2010): Atlas zur Geologie von Brandenburg im Maßstab 1:1.000.000. https://www.geobasis-bb.de/geodaten/lbgr/pdf/4_Geoatlas.pdf. Zugriffen am: 05. August 2019
- VAN STEMPOORT, D., EWERT, L., WASSENAAR, L. (1993): Aquifer Vulnerability Index AVI: a GIS compatible method for groundwater vulnerability mapping. *Canadian Water Resources Journal/Revue canadienne des ressources hydriques*, 18, 25–37
- VBRA, J., ZAPOROZEC, A. (1994): Guidebook on Mapping Groundwater Vulnerability. 131 S.; Verlag Heinz Heise, Hannover
- VOIGT, H.-J. (1987): Hydrogeologisches Kartenwerk der DDR 1: 50.000, Berlin

ZEILFELDER, S., REJMAN-RASINSKA, E., HANNAPPEL, S.
(2011): Ermittlung der Verweilzeiten des Sickerwassers
in der Grundwasserüberdeckung nach der DIN 19732
für Mecklenburg-Vorpommern. [http://www.wtrl-mv.de/
doku/2011_verweilzeiten_sickerwasser.pdf](http://www.wtrl-mv.de/doku/2011_verweilzeiten_sickerwasser.pdf). Zugriffen
am: 21. Oktober 2019 (2011)

Anschrift der Autoren:

M.Sc. Antonia Erber
Freie Universität Berlin
Malteserstraße 74–100, 12249 Berlin
E-Mail: antonia.erber@outlook.de

Dr. Stefan Broda
Bundesanstalt für Geowissenschaften und Rohstoffe
(BGR),
Arbeitsbereich Flächeninformation Grundwasser (B2.2)
Wilhelmstraße 25–30, 13593 Berlin
E-Mail: Stefan.Broda@bgr.de
Telefon: 030 36993250
Fax: 0511 643531250

Dr. Silvio Janetz
Landesamt für Bergbau, Geologie und Rohstoffe
Brandenburg
Dezernat Hydrogeologie
Inselstraße 26, 03046 Cottbus
E-Mail: Silvio.Janetz@lbgr.brandenburg.de
Telefon: 0355 48640162
Fax: 0355 48640110

M.Sc. Maximilian Nölscher
Bundesanstalt für Geowissenschaften und Rohstoffe
(BGR),
Arbeitsbereich Flächeninformation Grundwasser (B2.2)
Wilhelmstraße 25–30, 13593 Berlin
E-Mail: Maximilian.Noelscher@bgr.de
Telefon: 030 36993260

Prof. Dr. Achim Schulte
Freie Universität Berlin
Fachrichtung Angewandte Physische Geographie,
Umwelthydrologie und Ressourcenmanagement
Malteserstraße 74–100, 12249 Berlin
E-Mail: Achim.Schulte@fu-berlin.de
Telefon: 030 83870253
Fax: 030 838 458705