



Scopus Indexed Journal

Waldökologie, Landschaftsforschung und Naturschutz – *Forest Ecology, Landscape Research and Nature Conservation*

www.afsv.de/index.php/waldoeekologie-landschaftsforschung-und-naturschutz


Ableitung des Grundwasserflurabstandes für Waldstandorte im niedersächsischen Tiefland

Estimation of depth to groundwater level for forest sites in the lowlands of Lower Saxony

Bernd Ahrends, Christian Steinicke, Michael Köhler & Henning Meesenburg

Abstract

The increasing demand for site and soil data in high spatial resolution for planning and decision support in forestry amongst others requires information on the depth to groundwater level. The depth to groundwater level enters either statistical or process-oriented models and is a requirement for digital forest site mapping. In this study, a disaggregation approach of groundwater level information was developed for the Lower Saxonian lowlands. A model was developed to translate the average minimum groundwater level from a state wide digital soil map in the scale 1 : 50,000 (BÜK50) into depth to groundwater level classes of the Lower Saxonian forest site mapping scheme in the scale 1 : 25,000. The procedure yields significant improvements of groundwater estimation from the digital soil map for forest sites in the lowlands. The accuracy (AC) increased from 0.64 to 0.69 and the kappa coefficient from 0.34 to 0.48. Nevertheless, the agreement between modeled and field-mapped values yielded a kappa coefficient value of 0.48, which could be described as a “moderate” agreement.

Keywords: *Forest site mapping, soil property map, disaggregation*

Zusammenfassung

Die steigende Nachfrage nach großmaßstäblichen Standorts- und Bodeninformationen im Bereich der forstlichen Planungs- und Entscheidungsunterstützung umfasst auch die Grundwasserflurabstände. Diese gehen entweder direkt in statistische und prozessorientierte Modelle ein oder sind eine wichtige Grundlage für die digitale Standortprognose. In dieser Untersuchung wurde für das niedersächsische Tiefland ein Disaggregierungsansatz entwickelt, mit dem

der mittlere Grundwassertiefstand (MNGW) der flächen-deckenden BÜK50 von Niedersachsen (1 : 50 000) in die Grundwasserflurabstandseinstufung der Standortkartierung (1 : 25 000) übersetzt werden kann, die nicht flächendeckend vorliegt. Die Ergebnisse zeigen, dass durch die Disaggregation eine Verbesserung der Ableitung von Grundwasserinformation für Waldstandorte aus der BÜK50 erreicht werden kann. Die Genauigkeit (AC) erhöhte sich von 0,64 auf 0,69 und der Kappa-Koeffizient von 0,34 auf 0,48. Trotzdem ist die Übereinstimmung zwischen modellierten und kartierten Einstufungen mit einem Kappa-Koeffizienten von 0,48 des Validierungsdatensatzes nur als „moderat“ zu bezeichnen.

Schlüsselwörter: Standortkartierung, Bodenübersichtskarte, Disaggregation

1 Einleitung

Die steigende Nachfrage nach großmaßstäblichen Standorts- und Bodeninformationen im Bereich der forstlichen Planungs- und Entscheidungsunterstützung resultiert im Wesentlichen aus den sich verändernden klimatischen und stofflichen Rahmenbedingungen und einer immer größeren Anzahl von Simulationsmodellen und Entscheidungsunterstützungssystemen für forstliche Fragestellungen (AHRENDTS 2012a, b, AHRENDTS et al. 2010, GUCKLAND et al. 2012, MEIWES et al. 2013, PANFEROV et al. 2011, SUTMÖLLER et al. 2011, 2013). Ein Hauptproblem beim Einsatz dieser Modelle und gekoppelten Modellsysteme in der Praxis bilden oft die entweder zu gering aufgelösten oder fehlenden Standorts- und Bodeninformationen. Eine häufig benötigte Information bei der Wasser- und Stoffhaushaltsmodellierung ist z. B. der Grundwasserflurabstand (GWF) als untere Randbedingung (AHNER et al. 2013, WESSOLEK et al. 2009). Ob Waldbestände ihren Wasserbedarf teilweise durch den kapillaren Aufstieg aus dem Grundwasser decken können, ist eine wichtige Information für die

Beurteilung eines möglichen Trockenstressrisikos (RAISSI et al. 2009) oder zur Berechnung der Grundwasserneubildungsrate (WESSOLEK et al. 2009). Ferner werden viele Stoffumsatzprozesse wie insbesondere Redoxprozesse durch hoch anstehendes Grundwasser beeinflusst.

Aufgrund der hohen Bedeutung des GWF wird dieser Parameter in der niedersächsischen forstlichen Standortskartierung (STOK 1 : 25 000) mit erfasst und bei der Standortsbewertung berücksichtigt. In der niedersächsischen forstlichen Standortsaufnahme für den Anwendungsbereich des Tieflandes werden entsprechend die Wasserhaushaltsziffern (WHZ) 32 bis 35 ausschließlich anhand des mittleren GWF in der Vegetationszeit klassifiziert (NFP 2009a). Für Moorstandorte, die allgemein mit der WHZ 31 klassifiziert werden, wird der GWF mittels einer zusätzlichen Indexziffer beschrieben. Die forstliche Standortskartierung liegt aber nicht flächendeckend vor und ist i. d. R. nur durch aufwendige und zeitintensive Geländearbeiten durchführbar. Weitere Informationen sind häufig durch ihre fehlende landesweite Abdeckung limitiert. So liegt z. B. der lieferbare Datenbestand der Hydrogeologischen Karte 1 : 50 000 (HK50) aktuell noch nicht flächendeckend für Niedersachsen vor (Stand 05.01.2016). Flächendeckende Informationen über die Lage der Grundwasseroberfläche sind in Form der geringer aufgelösten Hydrogeologischen Übersichtskarte 1 : 200 000 (HÜK200) und des GWF aus der Bodenübersichtskarte 1 : 50 000 (BÜK50) verfügbar. Da die Informationen aus der HÜK200 bei der Entwicklung der BÜK50 berücksichtigt wurden (GEHRT & BOCK 2009), liegt der Fokus bei der weiteren Auswertung auf der BÜK50. Allerdings ist hier zu beachten, dass den Grundwasserständen in der BÜK50 und der STOK unterschiedliche Definitionen zugrunde liegen. So gilt für die BÜK50 die Definition nach der AD-HOC-AG BODEN (2005), „ständig vorhandenes, alle Poren füllendes Bodenwasser, das – nicht an die Bodenmatrix gebunden – nur der Schwerkraft unterworfen ist und sich durch Gefälle oder unterschiedliche Druckpotenziale bewegen kann“ (GEHRT & RAISSI 2008). Demgegenüber wird in der STOK die Tiefe des oberen Kapillarsaums des Grundwassers in der Mitte der Vegetationszeit (MGWV) als Grundlage für die Einteilung der Standorte verwendet (SCHMIDT et al. 2015). Damit wird deutlich, dass neben unterschiedlichen Maßstäben auch inhaltliche Unterschiede zwischen den beiden Kartierverfahren vorliegen.

MEER (2007) zeigte, dass reliefbasierte Disaggregierungsverfahren eine geeignete Methode sein können, um den Aussagegehalt von Bodeninformationen der BÜK50 zu verbessern. Unter Disaggregation wird hierbei die Zerlegung größerer Einheiten in kleinere mit geringerer Heterogenität verstanden. Eine Übersicht über verschiedene Disaggregierungsmethoden geben BIERKENS et al. (2000) und McBRATNEY (1998). Als möglicher Parameter für eine Transferfunktion im niedersächsischen Tiefland bieten sich zur Disaggregation der Grundwasserinformationen Reliefparameter, wie z. B. der „Vertical Distance to Channel Network“ (VDCN) an (GEHRT & BOCK 2009).

Entsprechend war es Ziel dieser Arbeit, die Informationen zum Grundwasserstand aus der BÜK50 mit Hilfe geeigneter Reliefparameter zu disaggregieren und in die Stufen der forstlichen Standortskartierung im niedersächsischen Tiefland zu überführen.

2 Material und Methoden

2.1 Datengrundlagen

2.1.1 Ableitung von Grundwasserständen aus der STOK

Als Grundlage für die Bearbeitung diente die digitale Fassung der forstlichen Standortskartierung für das Niedersächsische Tiefland (NFP 2009a). Hierbei wurden den WHZ 32 bis 35 (inklusive der Varianten) die mittleren MGWV der Tab.1 zugeordnet. Für die Moorstandorte (WHZ 31) wurden MGWV in Abhängigkeit der Indexziffern, die in der niedersächsischen Standortskartierung den aktuellen Wasserhaushalt der Moorstandorte beschreiben, zugeordnet (Tab. 2, vgl. auch NFP 2009a, b). Für alle anderen WHZ, also für die „grundwasserfernen“ Standorte, wurde ein GWF von 400 cm hinterlegt. Der absolute Wert dieser Festlegung ist von nachrangiger Bedeutung, da auch in der BÜK50 für alle grundwasserfernen Standorte vergleichbare Werte festgelegt wurden (vgl. Kapitel 2.1.2) und es im Zuge der Auswertung um die Minimierung der Differenzen zwischen der STOK und der BÜK50 geht.

Um Randeffekte (z. B. Brüche im Verlauf der MGWV durch Übergänge zwischen zwei Standortstypen) bei der statistischen Auswertung zu minimieren, wurde für jedes Polygon der STOK mit ArcGis Version 10.2 der Zentroid innerhalb des Polygons berechnet und diesem alle weiteren Metainformationen als Grundlage für die weiteren Auswertungen zugeordnet. Die Zuordnung erfolgte durch einfaches Verschneiden im Geographischen Informationssystem (GIS). Dieser Ansatz der „Area to point“ Zuordnung wird bei der Regionalisierung in der Bodenkunde häufig verwendet (GOODMAN & OWENS 2012, KERRY et al. 2012), auch wenn er insbesondere bei sehr unterschiedlich großen Polygonen zu Problemen hinsichtlich der räumlichen Verteilungsstruktur führen kann (GOTWAY & YOUNG 2002).

2.1.2 Daten aus der Bodenübersichtskarte BÜK50

Den Zentroiden der STOK wurden zunächst die GWF-Werte für den mittleren Grundwasserhochstand (MHGW) und für den mittleren Grundwassertiefstand (MNGW) aus der Bodenübersichtskarte im Maßstab 1 : 50 000 für Niedersachsen (BÜK50, LBEG ©2015) zugeordnet. Grundwasserferne Standorte wurden vergleichbar mit der STOK mit Werten von 300 cm für MHGW und 400 cm für MNGW belegt. Dieser Differenz liegt die Annahme von steigenden Grundwasseramplituden mit zunehmenden Grundwasserflurabständen zu Grunde (GEHRT & RAISSI 2008). Die so ermittelten Grundwasserstände und weitere Attribute aus der BÜK50 (Bodenkundliche Feuchtestufe (BKF), Bodentyp usw.) wurden den Zentroiden der STOK durch Verschneiden im GIS zugeordnet.

2.1.3 Digitales Geländehöhenmodell und Reliefparameter

Um mit vertretbarem Rechenaufwand und Datenvolumen niedersachsenweit arbeiten zu können, wurde als Datengrundlage für die digitalen Reliefanalysen das digitale Geländehöhenmodell (DGM10, Rasterweite 10 m) (LGLN © 2014a) und nicht das ebenfalls verfügbare DGM5 verwendet. Aus diesem wurden mit der Software zur Reliefanalyse SAGA (<http://www.saga-gis.org>) (CONRAD 2007, CIMMERY 2010, OLAYA

Tab. 1: Verschlüsselung der mittleren Grundwasserflurabstände in der Vegetationszeit (Tiefenbereich, cm unter Geländeoberfläche) nach dem „Geländeökologischen Schätzrahmen“ (Standortskartierung Tiefland Niedersachsen, NFP 2009a) und abgeleitete Mittelwerte (MGWV) für die jeweiligen Wasserhaushaltsziffern (WHZ) inklusive Varianten in Anlehnung an SCHMIDT et al. (2015).

Tab. 1: Encoding of average depth to groundwater level during growing season (depth range, cm below ground level) after the field-ecological evaluation guidelines for forest site mapping in Lower Saxony (NFP 2009a) and derived averages (MGWV) for the water budget classes (WHZ) and their variants, modified according to SCHMIDT et al. (2015).

WHZ	Erläuterung	Tiefenbereich [cm]	MGWV [cm]
32f	Sehr stark grundwasserbeeinflusste, grundnasse bis kurzfristig grundfeuchte Standorte	< 30	20
32		30 – 50	40
32t		50 – 60	55
33f	Stark grundwasserbeeinflusste, grundfeuchte Standorte	60 – 70	65
33		70 – 90	80
33t		90 – 100	95
34f	Mäßig grundwasserbeeinflusste, grundfrische Standorte	100 – 120	110
34		120 – 140	130
34t		140 – 150	145
35f	Schwach bis sehr schwach grundwasserbeeinflusste, grundfrische Standorte	150 – 180	165
35		180 – 250	215
35t		250 – 300	275

Tab. 2: Verschlüsselung der mittleren Grundwasserflurabstände in der Vegetationszeit (MGWV) (cm unter Geländeoberfläche) nach dem „Geländeökologischen Schätzrahmen“ (Standortskartierung Tiefland Niedersachsen, NFP 2009a) und abgeleitete Mittelwerte für die Indexziffern der Moorstandorte (NFP 2009b).

Tab. 2: Encoding of average depth to groundwater level during growing season (depth range, cm below ground level) after the field-ecological evaluation guidelines for forest site mapping in Lower Saxony (NFP 2009a) and estimated averages (MGWV) for moor site classes (NFP 2009b).

Index	Erläuterung	MGWV [cm]
0	Moor voll mit Wasser gefüllt (weitgehend intakter Moorwasserhaushalt)	20
1	Kapillarsaum des Wassers im Moor bzw. im unterlagernden Mineralboden im Mittel der Vegetationszeit oberhalb von 60 cm uGOF	40
2	Kapillarsaum des Wassers im Moor bzw. im unterlagernden Mineralboden im Mittel der Vegetationszeit zwischen 60 und 100 cm uGOF	80
3	Kapillarsaum des Wassers im Moor bzw. im unterlagernden Mineralboden im Mittel der Vegetationszeit zwischen 100 und 150 cm uGOF	125
4	Kapillarsaum des Wassers im Moor bzw. im unterlagernden Mineralboden im Mittel der Vegetationszeit zwischen 150 und 300 cm uGOF	225

2004) zahlreiche Reliefparameter (z. B. „Terrain classification index for Lowlands“, „Downslope Distance Gradient“, „Confusion index“, „Topographic Wetness Index“, „Terrain surface convexity“, „Positive Topographic Openness“, „Vertical Distance to Channel Network“) abgeleitet. Die meisten Reliefparameter werden an dieser Stelle nicht weiter erläutert, da sich analog zu GEHRT & BOCK (2009) herausstellte, dass der Parameter „Vertical Distance to Channel Network“ (VDCN) aus der Modulbibliothek „Terrain Analysis – Channels“ bei der Datenanalyse einen so hohen Erklärungswert besitzt, dass keine weiteren Reliefparameter berücksichtigt werden mussten. VDCN beschreibt den Vertikalabstand über dem Tiefenlinienniveau (hier Grundwasseroberfläche). Nähere

Informationen zur inhaltlichen Beschreibung dieses Parameters geben GEHRT & BOCK (2009). Zur Berechnung ist ein Raster der Tiefenlinien (channelnetwork) erforderlich. Hierzu wurde die Gewässerkarte aus dem Niedersächsischen Umweltportal (LGLN © 2014b) verwendet. Im Preprozessing wurden größere Kanäle aus dem Gewässernetz entfernt, da z. B. der Mittellandkanal oft deutlich oberhalb der Geländeoberfläche liegt. Das Gewässernetz wird benötigt, da die Berechnungen der Annahme folgen, dass das Höhenniveau der Grundwasseroberfläche mit derjenigen von Oberflächen-gewässern übereinstimmt. Zwischen diesen Punkten kommt es dann zu einer Überhöhung der Grundwasseroberfläche (GEHRT & BOCK 2009). Die Berechnungen wurden mit SAGA

Tab. 3: Grundwasserstufen in Anlehnung an die Tiefenbereiche (MGWV) der Niedersächsischen forstlichen Standortskartierung (SCHMIDT et al. 2015).

Tab. 3: Groundwater level classes based on depth ranges (MGWV) from the field-ecological evaluation guidelines for forest site mapping in Lower Saxony (SCHMIDT et al 2015).

Grundwasserstufe	Tiefenbereich [cm]	Grundwasserbeeinflussung
GWST1	< 60	sehr stark
GWST2	60 – 100	stark
GWST3	100 – 150	mäßig
GWST4	150 – 300	gering
GWST5	> 300	keine

Version 2.1.3 (64bit) durchgeführt. Weitere Informationen (z. B. aus den vorhandenen Grundwasserbeobachtungssystemen) wurden nicht berücksichtigt. Es wurde angenommen, dass diese großenteils schon in die Entwicklung der BÜK50 eingeflossen sind.

2.2 Datenanalysen und Statistische Methoden

Insgesamt standen für die Auswertungen im Niedersächsischen Tiefland 74276 Zentroide von STOK-Polygonen zur Verfügung. Diese wurden per Zufallsauswahl in einen Kalibrierungs- (75 %) und einen Validierungsdatensatz (25 %) getrennt. Zunächst erfolgte ein Vergleich der GWF der BÜK50 mit der STOK. Deshalb wurden die Angaben beider Kartenwerke anhand der Tabelle 3 in einheitliche Klassen überführt. Anhand einer Kontingenztafel (vgl. Tab. 4) wurden dann an allen Zentroiden des Gesamtdatensatzes für jede Klasse die Zahl übereinstimmender bzw. nichtübereinstimmender Klassifikationen zwischen BÜK50 und STOK festgestellt.

Zur klassenübergreifenden Bewertung der Modellgüte wurde der Kappa-Koeffizient (K) nach CONGALTON et al. (1991) berechnet:

$$K = \frac{N \sum_{i=1}^r x_{ii} - \sum_{i=1}^r (x_{i+} \cdot x_{+i})}{N^2 - \sum_{i=1}^r (x_{i+} \cdot x_{+i})}, \tag{1}$$

mit:

- r: Anzahl der Zeilen in der Kontingenztafel
- x_{ii} : Anzahl der Beobachtungen in der Zeile i und Spalte i
- x_{i+} : Summe der Zeile i
- x_{+i} : Summe der Spalte i
- N: Gesamte Anzahl an Beobachtungen

Die Kappa-Statistik liefert jedoch nicht nur Information für eine einzelne Matrix, sondern ermöglicht auch den statistischen Vergleich von Kontingenztafeln (CONGALTON 1991). Diese Tests wurden mit der Software „MARGFIT AND KAPPA ANALYSIS PROGRAMS“ (CONGALTON 1991 & CONGALTON & GREEN 2009)

durchgeführt. Als weiteres Gütemaß wurde die Prognosegüte (AC) nach BEHRENS et al. (2005) ermittelt:

$$AC = \frac{(tt + ff)}{(tt + tf + ft + ff)}, \tag{2}$$

mit:

- tt: richtig positiv vorhergesagt
- ff: richtig negativ vorhergesagt
- ft: falsch negativ vorhergesagt
- tf: falsch positiv vorhergesagt

Als Gütekriterium innerhalb der Grundwasserklassen wurde der F_1 -Wert nach SCHMIDT et al. (2008) berechnet.

$$F_1 = \frac{2 \cdot RC \cdot PC}{(RC + PC)}, \tag{3}$$

wobei RC die Trefferquote beschreibt:

$$RC = \frac{tt}{(tt + ft)}, \tag{4}$$

und PC die Präzision ausdrückt:

$$PC = \frac{tt}{(tt + tf)}, \tag{5}$$

Tab. 4: Beispiel einer Kontingenztafel zur Gegenüberstellung von in der Standortskartierung aufgenommenen und prognostizierten Grundwasserstufen als Grundlage für die Berechnung von Prognosegüte (AC) und des harmonischen Mittel (F_1 -Wert) aus Präzision (PC) und Trefferquote (RC) (in Anlehnung an BEHRENS et al. 2005).

Tab. 4: Example of a confusion matrix to compare mapped and predicted depth to groundwater level as a basis for accuracy (AC) and harmonic mean of under- and overestimation (F_1) calculated from precision (PC) and recall (RC) (acc. to BEHRENS et al. 2005).

		kartiert	
		wahr	falsch
prognostiziert	wahr	tt	tf
	falsch	ft	ff

Die Klassenbildung nach Tabelle 3 bietet sich zur Überprüfung der Modellgüte an, da alle grundwasserfernen Standorte mit einem einheitlichen Wert belegt wurden (vgl. Kapitel 3.4). Die in Kapitel 2.1.1 beschriebene Übersetzung von Klassen in metrische Grundwasserstände erfolgte unabhängig hiervon, da für die Disaggregierungsmodelle metrische Zielgrößen benötigt werden.

Ein Grundproblem bei der Disaggregation war zunächst die sehr inhomogene Verteilung der unterschiedlichen Grundwasserflurabstandsbereiche der Ausgangsdaten. Die Mehrzahl der Werte liegt bei den grundwasserfernen Standorten (GWST5). Um dieses zu umgehen, wurde zur Differenzierung zwischen potenziell grundwasserfernen und -nahen Standorten mit der R-Bibliothek rpart (THERNEAU & ATKINSON 2008) ein Klassifikationsbaum zur Trennung der beiden Bereiche entwickelt. Diese Bibliothek beinhaltet den Algorithmus CART (Classification and Regression Trees, BREIMAN et al. 1984). Sowohl für die potenziell grundwasserfernen als auch für die -nahen Standorte wurden die Differenzen zwischen den GWF der BÜK50 und der STOK (DSTOKBÜK50_{GWf}) berechnet:

$$DSTOKBÜK50_{GWf} = GWSTOK - GWBÜK50 \quad (6)$$

Um DSTOKBÜK50_{GWf} mit Hilfe von Transferfunktionen zu beschreiben, wurde ein verallgemeinertes additives Regressionsmodell (gam) (HASTIE & TIBSHIRANI 1990) verwendet, das im Statistikpaket R 3.0.1 (R Core Team 2013) unter Verwendung der Bibliothek mgcv 1.6-0 (WOOD 2006) parametrisiert wurde. Additive Modelle erlauben es, nichtlineare Effekte der Prädiktorvariablen auf die Zielvariablen (Residuen der Grundwasserflurabstände) zu identifizieren, ohne dass Annahmen über eine bestimmte Funktionsform vorgegeben werden müssen. Die allgemeine Form des verwendeten verallgemeinerten additiven Modells (gam) lautet für normal und homogenverteilte Beobachtungen wie folgt:

$$y = a + f(x) + f(RW_i, HW_i) + \varepsilon_i \quad (7)$$

mit:

- a: konstantes Glied (Interzept)
- y: Zielvariable (Differenzen der Grundwasserstände)
- x: erklärende Variable(n)
- RW_i : Rechtswert des Zentroiden i
- HW_i : Hochwert des Zentroiden i
- f: glättende Funktion
- ε_i : ein unabhängig und identisch verteilter Fehlerterm mit $\varepsilon_i \sim N(0, \sigma^2)$

Durch die Berücksichtigung der Koordinaten im Modell (vgl. auch ASQUITH et al. 2013, AUGUSTIN et al. 2013) kann ein möglicher räumlicher Trend abgebildet werden. Dieser quantifiziert den Einfluss einer regionalen Komponente auf die Differenzen zwischen der STOK und der BÜK50 und subsumiert sämtliche Effekte, die nicht explizit von den anderen Modellvariablen beschrieben werden können. Hierzu zählen der substratbedingte Einfluss des kapillaren Aufstieges, regionale Unterschiede innerhalb der Grundwasserstufen (vgl. Tab. 1), besondere Situationen durch Ausgangsgesteine

und/oder die subjektiven Einschätzungen des jeweiligen Kartierers. Zur Überprüfung der Modellannahmen und zur Beurteilung der Modellgüte wurden Residualanalysen durchgeführt. Die Überprüfung der Normalverteilung der Residuen erfolgte graphisch anhand von Histogrammen und Q-Q-Diagrammen. Die Präzision der Modelle wurde über das korrigierte Bestimmtheitsmaß R^2_{adj} beurteilt. Durch den dominanten Effekt des Reliefparameters VDCN (vgl. Kapitel 2.1.3) erübrigen sich weitere Ausführungen zur Modellselektion.

3 Ergebnisse und Diskussion

3.1 Vergleich der Grundwassereinstufung aus Bodenübersichtskarte (BÜK50) und Standortkartierung (STOK)

Wie oben erläutert, liegen den Grundwasserständen in der BÜK50 (MNGW bzw. MHGW) und in der STOK unterschiedliche Definitionen zugrunde. Entsprechend ist ein Vergleich der beiden Größen nur bedingt möglich. Es soll dennoch zunächst durch eine direkte Gegenüberstellung der Grundwasserinformationen aus der BÜK50 und STOK der Grad der Übereinstimmung beider Kartenwerte beurteilt werden. Bei diesem Vergleich (Tab.5) wurde der Gesamtdatensatz (n = 74276) verwendet. Im Kapitel 3.4 erfolgt dieses noch einmal für den Validierungsdatensatz, um eine bessere Vergleichbarkeit der erzielten Ergebnisse zu gewährleisten.

Die statistischen Kenngrößen zeigen, dass der MNGW insgesamt besser geeignet ist, um die Grundwasserstände der STOK (MGWV) zu beschreiben. Auch der Kappa-Koeffizient ist mit 0,35 signifikant ($p < 0,001$) größer als für MHGW (0,32). Die Prognosegüte von etwas über 60% (AC = 0,64) resultiert jedoch überwiegend aus der hohen Übereinstimmung ($F_1 = 0,87$) für die GWST5. Dies bedeutet, dass mit der BÜK50 relativ sicher zwischen grundwasserfernen und -nahen Standorten unterschieden werden kann. Entsprechend bietet es sich an, für die Disaggregation zunächst nach potenziell grundwassernahen und -fernen Standorten zu differenzieren. Dieser Ansatz ist im folgenden Kapitel beschrieben.

3.2 Vorschätzung von grundwasserfernen und -nahen Standorten

Der zur Vorschätzung entwickelte Entscheidungsbaum berücksichtigt neben dem MNGW auch den Reliefparameter VDCN und die bodenkundliche Feuchtestufe der BÜK50 (BKF). Letztgenannte beschreibt die Feuchtesituation von Standorten. Berücksichtigt werden bei der Ableitung bodenkundliche, klimatische und hydrologische Informationen (MÜLLER & WALDECK 2011). Ermittelt werden 12 Feuchtestufen, die nach Frühjahrs-/Sommerzahl (z. B. 4/2) weiter differenziert werden können. Diese Unterscheidung ist z. B. für grundwasserbeeinflusste Standorte wichtig, bei denen im Sommer der Grundwasseranschluss nicht mehr gegeben ist. Durch die Berücksichtigung der Bodenart bei der Ermittlung der BKF wird der kapillare Aufstieg berücksichtigt, so dass dieser Parameter als Verbindungsglied zur Standortskartierung dienen kann. Zur Vereinfachung wurde die BKF in eine numerische Ziffer übersetzt. Eine Trennung zwischen grundwassernah und -fern erfolgt an der Grenze der BKF kleiner als 4/2 (1,2,2/1,3,3/1,3/2,4,4/1) (Abb. 1). Dies erscheint plausibel, da bei der BKF 4/2 im Sommer der Grundwasseranschluss abreißt, und diese Standorte entsprechend der

Tab. 5: Übereinstimmung zwischen den Grundwasserstufen der Niedersächsischen Standortskartierung in der Vegetationszeit (MGWV) einerseits und dem mittleren Grundwassertiefstand (MNGW) sowie dem mittleren Grundwasserhochstand (MHGW) der BÜK50 andererseits. Ermittelt für den Gesamtdatensatz aller STOK-Zentroide (n = 74276). AC = Genauigkeit, PC = Präzision, RC = Trefferquote, F_1 = harmonisches Mittel aus Präzision und Trefferquote, K = Kappa-Koeffizient.

Tab. 5: Correspondence between mapped depth to groundwater level from forest site mapping in Lower Saxony (MGWV) and the different depths to groundwater level (MNGW & MHGW) from the digital soil map BÜK50, respectively. Calculated for all site mapped centroids (n = 74276). AC = accuracy, PC = precision, RC = recall, F_1 = harmonic mean of under- and overestimation, K = Cohen's kappa coefficient.

Parameter	Tiefenstufe	K	AC	PC	RC	F1
MNGW	Alle Stufen	0,35	0,64	-	-	-
	GWST1	-	-	0,15	0,00	0,00
	GWST2	-	-	0,40	0,15	0,22
	GWST3	-	-	0,26	0,24	0,25
	GWST4	-	-	0,20	0,33	0,25
	GWST5	-	-	0,83	0,92	0,87
MHGW	Alle Stufen	0,32	0,62	-	-	-
	GWST1	-	-	0,16	0,69	0,26
	GWST2	-	-	0,23	0,10	0,14
	GWST3	-	-	0,24	0,06	0,09
	GWST4	-	-	0,62	0,00	0,00
	GWST5	-	-	0,83	0,92	0,87

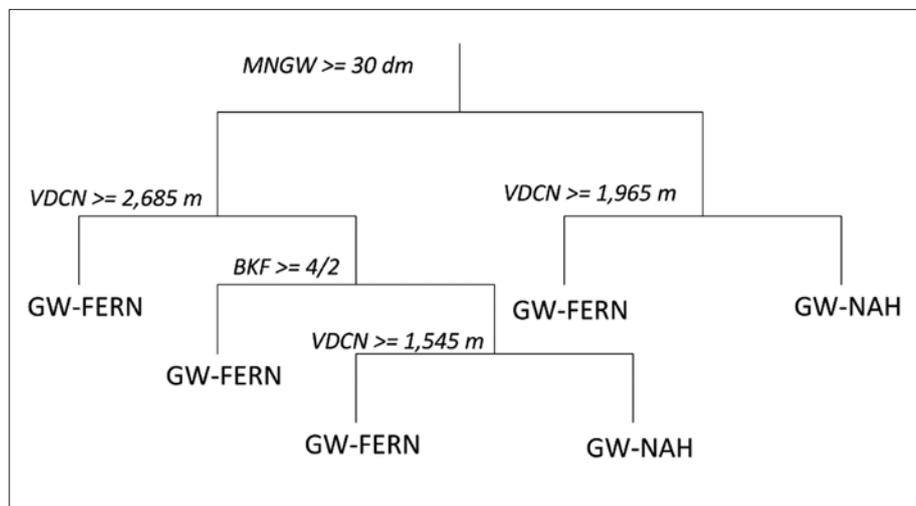


Abb. 1: Klassifikationsbaum zur Vorschätzung von grundwasserfernen und -nahen Standorten der Standortskartierung. MNGW: Mittlerer Grundwassertiefstand, VDCN: „Vertical Distance to Channel Network“, BKF: Bodenkundliche Feuchtestufe.

Abb. 1: Classification tree for estimation of groundwater depth status for forest sites in Lower Saxony. MNGW: Mean lower groundwater level, VDCN: “Vertical Distance to Channel Network”, BKF: Soil moisture level.

Standortskartierung als nicht mehr grundwasserbeeinflusst angesehen werden.

Der erstellte Klassifikationsbaum führt immerhin noch bei 38 % der Standorte zu Fehlklassifikationen. Dieser Fehler kann jedoch in der zweiten Modellstufe noch weiter reduziert werden, da durch die Hinzunahme einer räumlichen Komponente (vgl. Gl. 7) Standorte aus der grundwasserfernen Gruppe grundwassernahe GWF erhalten können und umgekehrt.

3.3 Korrekturfunktionen für grundwasserferne und grundwassernahe Standorte

Das Modell der Gleichung 7 wurde ausgewählt, um die Differenzen zwischen der STOK und der BÜK50 für grundwasserferne und grundwassernahe Standorte zu beschreiben. Die BKF wird hierbei als Faktorvariable behandelt.

$$DSTOKBÜK50_{GWF} = a + f(VDCN) + BKF_{FR} \beta + f(MNGW) + f(RW_i, HW_i) + \varepsilon_i \quad (8)$$

mit:

$DSTOK-BÜK50_{GWF}$: Differenz zwischen dem Grundwasserstand der BÜK50 und der STOK (cm)

a : konstantes Glied (Interzept)

β : Parameter in Abhängigkeit von der bodenkundl. Feuchtestufe

BKF_{FR} : Bodenkundliche Feuchtestufe im Frühjahr (0-11)

$MNGW$: Mittlerer Grundwassertiefstand (dm)

$VDCN$: „Vertical Distance to Channel Network“ (m)

RW_i : Rechtswert des Zentroiden i

HW_i : Hochwert des Zentroiden i

f : glättende Funktion

ε_i : ein unabhängig und identisch verteilter Fehlerterm mit $\varepsilon_i \sim N(0, \sigma^2)$

Die Parametrisierung erfolgte getrennt für grundwasserferne und grundwassernahe Standorte. Durch die Trennung konnte nicht nur die Modellgüte bei der Validierung erhöht, sondern auch die Verteilungsstruktur der Modellresiduen verbessert werden. Bei der Ergebnisinterpretation (Abb. 2 u. 3, Tab. 6)

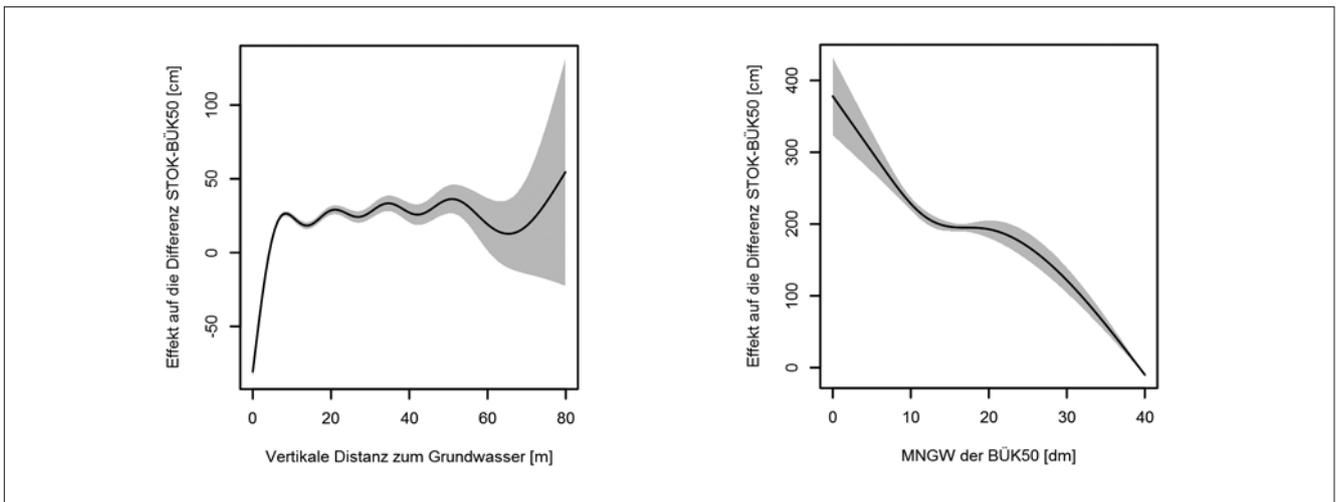


Abb. 2: Partielle nichtlineare Effekte der Vertikalen Distanz zum Grundwasser (VDCN) (links) und des mittleren Grundwassertiefstands (MNGW) (rechts) auf die Differenzen zwischen der STOK und BÜK50 für grundwasserferne Standorte inklusive der Prognoseintervalle (grau hinterlegt, 5% Irrtumswahrscheinlichkeit). Es wurden die Originaleinheiten der Parameter beibehalten (z. B. MNGW der BÜK50 in dm).

Abb. 2: *Partial nonlinear effects of vertical distance from the groundwater (VDCN) (left) and the average groundwater minimum (MNGW) (right) on the differences between STOK and BÜK50 for sites with low groundwater levels. The gray areas indicate 95% pointwise prognosis intervals. The original parameter units were retained (e. q. MNGW from the BÜK50 in dm).*

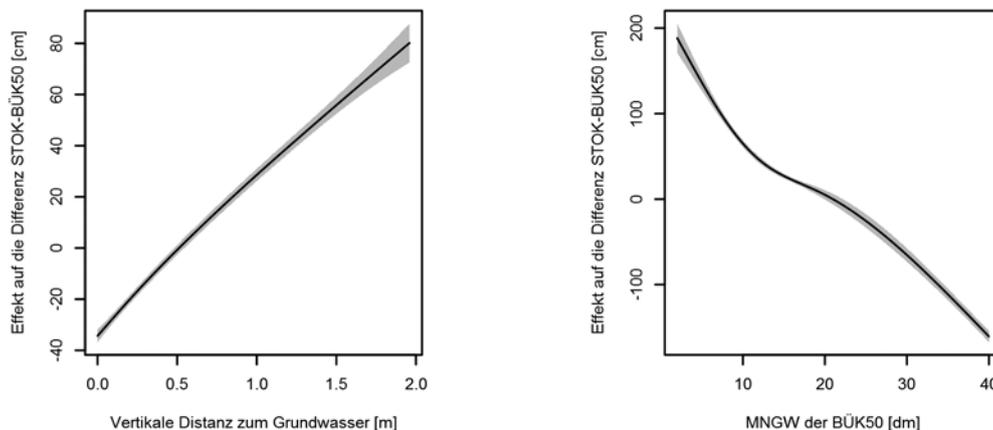


Abb. 3: Partielle nichtlineare Effekte der Vertikalen Distanz zum Grundwasser (VDCN) (links) und des mittleren Grundwassertiefstand (MNGW) (rechts) auf die Differenzen zwischen der STOK und BÜK50 für grundwassernahe Standorte inklusive der Prognoseintervalle (grau hinterlegt, 5% Irrtumswahrscheinlichkeit). Es wurden die Originaleinheiten der Parameter beibehalten (z. B. MNGW der BÜK50 in dm).

Abb. 3: *Partial nonlinear effects of vertical distance from the groundwater (VDCN) (left) and average groundwater minimum (MNGW) (right) on the differences between STOK and BÜK50 for sites with high groundwater levels. The gray areas indicate 95% pointwise prognosis intervals. The original parameter units were retained (e. q. MNGW from the BÜK50 in dm).*

Tab. 6: Statistische Kenngrößen der Disaggregierungsmodelle zur Ableitung der Grundwassereinstufung der Standortskartierung aus der BÜK50. BKF_{FR} : Bodenkundliche Feuchtestufe im Frühjahr. Die BKF_{FR} 10 & 11 kamen im Datensatz nicht vor.

Tab. 6: Estimated coefficients and statistical characteristics of the disaggregation models. BKF_{FR} : Spring soil moisture level. The BKF_{FR} 10 & 11 did not appear in the dataset.

Modell Grundwasserfern		$R^2_{adj.} = 0,39$	$n = 35187$		
Parameterkoeffizienten:					
	Schätzwert	Std.Fehler	t-Wert	p-Wert	Signifikanz
(Intercept)	-22,4389	2,5851	-8,680	< 2e-16	***
$BKF_{FR}2$	0,4875	2,6876	0,181	0,85605	
$BKF_{FR}3$	0,2458	3,2822	0,075	0,94031	
$BKF_{FR}4$	-2,0806	3,8439	-0,541	0,58832	
$BKF_{FR}5$	3,6145	2,9833	1,212	0,22568	
$BKF_{FR}6$	6,6218	3,2148	2,060	0,03943	*
$BKF_{FR}7$	9,2111	3,3023	2,789	0,00529	**
$BKF_{FR}8$	-22,0081	7,6576	-2,874	0,00406	**
$BKF_{FR}9$	-56,4187	18,5791	-3,037	0,00239	**
Approximierte Signifikanz der glättenden Terme:					
	edf	Est.rank	F	p-Wert	Signifikanz
s(VDCN)	8,843	8,991	332,52	< 2e-16	***
s(MNGW)	2,947	2,997	2644,78	< 2e-16	***
s(RW, HW)	369,338	394,179	14,21	< 2e-16	***
Modell Grundwassernah		$R^2_{adj.} = 0,552$	$n = 20513$		
Parameterkoeffizienten:					
	Schätzwert	Std.Fehler	t-Wert	p-Wert	Signifikanz
(Intercept)	-50,545	7,475	-6,762	1,40e-11	***
$BKF_{FR}2$	23,609	6,809	3,467	0,000527	***
$BKF_{FR}3$	33,160	7,749	4,279	1,88e-05	***
$BKF_{FR}4$	10,917	7,707	1,416	0,156656	
$BKF_{FR}5$	36,541	8,286	4,410	1,04e-05	***
$BKF_{FR}6$	42,089	8,245	5,105	3,34e-07	***
$BKF_{FR}7$	32,519	8,618	3,774	0,000161	***
$BKF_{FR}8$	10,113	8,528	1,186	0,235682	
$BKF_{FR}9$	14,448	9,251	1,562	0,118344	
Approximierte Signifikanz der glättenden Terme:					
	edf	Est.rank	F	p-Wert	Signifikanz
s(VDCN)	2,465	3,087	595,75	< 2e-16	***
s(MNGW)	2,911	2,992	901,61	< 2e-16	***
s(RW, HW)	382,483	397,411	25,51	< 2e-16	***
Signif. Schlüssel: '***' 0,001 '**' 0,01 '*' 0,05 '.' 0,1 '.' 1.					

wird ebenfalls ersichtlich, dass durch die Trennung andere Parametrisierungen des Schätzmodells erreicht werden.

Die Koeffizienten der kategorischen Variable BKF haben bei den grundwasserfernen Standorten ab $BKF \geq 6$ (stark frisch und feuchter) einen signifikanten Erklärungswert hinsichtlich der Differenzen ($DSTOKBÜK50_{GWF}$). Die nicht-linearen Effekte sind in beiden Modellen hochsignifikant (vgl. Tab. 6). Die nicht-linearen Effekte inklusive der Prognoseintervalle (5% Irrtumswahrscheinlichkeit) sind in den Abbildungen 2 und 3 dargestellt. Bei der Interpretation der partiellen Effekte muss die Korrelation der Prädiktorvariablen untereinander beachtet werden. Da z. B. häufig geringe VDCN-Werte auch mit geringen MNGW-Werten einhergehen, darf nicht vom VDCN-Effekt direkt auf die Veränderung der Differenzen geschlossen werden.

Die Abbildung 2 zeigt, dass bei den grundwasserfernen Standorten deutliche Effekte auf die Differenz bei geringen VDCN-Werten vorliegen und entsprechend erfolgt eine negative Korrektur der Werte. Bei Standorten mit VDCN-Werten über etwa 6 m erfolgt generell eine positive Korrektur. Die Konfidenzintervalle zeigen, dass die Effekte in den Randbereichen nicht überinterpretiert werden dürfen, da sie mit nur wenigen Daten belegt sind. Bei hohen MNGW-Werten der BÜK50 (vgl. Abb. 2) zeigen sich keine Effekte auf die Differenz. Anders verhält es sich bei geringen MNGW-Werten der BÜK50. Wenn einem Standort z. B. durch die BÜK50 ein MNGW von 5 dm zugeordnet würde, dann würde im Modell eine Korrektur von über 250 cm erfolgen, damit der Standort (in Kombination mit den anderen Faktoren) als grundwasserfern beschrieben werden kann. Vergleichbare Zusammenhänge gelten auch für die grundwassernahen Standorte, nur dass hier die Nulllinie verschoben ist (vgl. Abb. 3). Der Effekt des VDCN-Wertes folgt bei den grundwassernahen Standorten fast einer linearen Funktion. Bei hohen VDCN-Werten erfolgt eine positive Korrektur, um höhere Grundwasserflurabstände zu erzielen.

Beide Modelle unterstreichen die große Bedeutung des Reliefparameters VDCN für eine verbesserte Beschreibung der GWF (vgl. GEHRT & BOCK 2009). Inhaltlich enthalten die Modelle zwei Komponenten. Zum einen wird die Disaggregation im eigentlichen Sinne mit Hilfe des VDCN durchgeführt. Zum anderen erfolgt die Übersetzung der Grundwasserstände aus der BÜK50 in die Grundwasserstände der STOK (unterschiedliche Definitionen). Um zu untersuchen, welcher Teil der Verbesserung aus der direkten Übersetzung der Grundwasserstände der BÜK50 stammt und welcher Teil dem Disaggregierungsmodell zugesprochen werden kann, wurde das Modell nur unter Berücksichtigung der Parameter aus der BÜK50 parametrisiert. Für die grundwasserfernen Standorte ergibt sich ein $R^2_{adj.}$ von 0,19 und für die grundwassernahen von 0,28. Im Vergleich mit den Bestimmtheitsmaßen für die Gesamtmodelle der Tabelle 6 zeigt sich, dass beide Komponenten (Disaggregation & Übersetzung von MNGW auf GW STOK) etwa zu gleichen Teilen zur Erklärung der Modellabweichungen beitragen.

3.4 Evaluierung des Disaggregierungsmodells

Zur Evaluierung der entwickelten Transferfunktionen wurden die vorab beschriebenen Bearbeitungsschritte auf die 25% zurückgehaltenen Standortkartierungspunkte ($n = 18576$) angewendet. Für jeden dieser Punkte wurde zunächst eine Vorschätzung mit dem Klassifikationsbaum der Abbildung 1

vorgenommen und anschließend mit dem entsprechenden Regressionsmodell die Differenzen zwischen BÜK50 und STOK geschätzt. Diese wurden dann zum MNGW der BÜK50 addiert. Der auf diesem Wege ermittelte Grundwasserflurabstand (MGWVDIS) wurde in die Klassen der Tabelle 3 eingeteilt. Anschließend wurde die Übereinstimmung der so erhaltenen Klassen mit den Grundwasserflurabständen der STOK anhand der Gütemaße (Gl.1-5) bewertet (Tab. 7). Zur besseren Vergleichbarkeit der MGWV mit dem MNGW der BÜK50 wurde diese Gegenüberstellung noch einmal für den Validierungsdatensatz durchgeführt. Der F_1 -Wert von 0 der BÜK50 für die GWST1 zeigt, dass methodisch bedingt der GWF der BÜK50 immer etwas größer ist als bei der STOK. Diese materialabhängige Differenz wird durch Berücksichtigung der BKF weiter differenziert, da bei der Ermittlung der BKF die Bodenart einen starken Einfluss hat.

Die statistischen Parameter zwischen dem Trainings- und Validierungsdatensatz unterscheiden sich nur geringfügig, bzw. der Kappa-Koeffizient weist keine signifikanten Unterschiede auf ($p < 0,001$). Dieses deutet darauf hin, dass der Ansatz relativ robust ist. Die F_1 -Werte haben sich durch die Disaggregation bei allen grundwasserbeeinflussten Tiefenstufen erheblich gegenüber der Einstufung durch die BÜK50 verbessert (vgl. Tab. 7).

Die Differenzierung zwischen den grundwassernahen GWF-Stufen ist nach wie vor mit großen Unsicherheiten behaftet. Bei dieser Unterscheidung der GWF-Stufen geht es z. T. um wenige Zentimeter bis Dezimeter, so dass schon durch die Verwendung des DGM10 (Genauigkeit der Stufe 2 = $\pm 1,5$ m) (LGLN 2015) inhaltliche Grenzen gesetzt sind. Bei regionalen Anwendungen lässt sich dieser Fehler eventuell durch eine lokale Nachkalibrierung mit dem DGM5 reduzieren. Mit einem Kappa-Koeffizienten von 0,48 erreicht das Modellsystem eine Übereinstimmung zwischen den modellierten Grundwassereinstufungen und denen der STOK, die nach VIERA & GARRETT (2005) als „moderat“ zu bewerten ist. Die direkte Zuordnung aus der BÜK50 (BÜK-MNGWV Tab. 7) ergibt dagegen einen signifikant ($p < 0,001$) schlechteren Kappa-Koeffizienten von 0,34.

Die Abbildung 4 zeigt die Verteilung der Validierungspunkte im niedersächsischen Tiefland. Ausgewählt wurden nur die Punkte mit Grundwasseranschluss ($GWST \leq 4$), um die Abbildung nicht zu überfrachten. Dieses Vorgehen erscheint angemessen, da die Ergebnisse der Tab. 7 zeigen, dass die grundwasserfernen Standorte mit einem hohen F_1 -Wert vorhergesagt werden können. Wie aufgrund der definitionsbedingten Unterschiede zwischen BÜK50 und STOK zu erwarten, zeigt die BÜK50 eine Tendenz, die GWF zu überschätzen. Dies kann damit begründet werden, dass die STOK den Kapillarsaum mit berücksichtigt (NFP 2009a). Die disaggregierte BÜK50 zeigt demgegenüber nicht nur einen höheren Anteil an gelben Punkten (richtig vorhergesagt), sondern auch eine gleichmäßigere räumliche Verteilung dieser. Kleinräumig zeigt sich, dass zu niedrige und zu große Einschätzungen in unmittelbarer Nachbarschaft vorkommen, so dass insbesondere die kleinräumliche Unsicherheit noch erheblich ist.

Unsicherheiten beim Vergleich der verschiedenen Verfahren ergeben sich außerdem durch die zeitliche Komponente. Da die vorliegende STOK ein aus vielen einzelnen Kartierungen über mehrere Jahrzehnte entstandenes Werk ist, haben zeitliche Veränderungen der Grundwasserflurabstände auch einen großen Einfluss auf die beschriebenen Differenzen zwischen geschätzten und kartierten Grundwasserständen.

Tab. 7: Fehlermaße für die prognostizierten im Vergleich zu den in der Standortkartierung ermittelten Grundwasserstufen der niedersächsischen Standortkartierung. Ermittelt für den Trainings-(T) ($n = 55700$) und Validierungsdatensatz (V) ($n = 18576$). AC = Genauigkeit, PC = Präzision, RC = Trefferquote, F_1 = harmonisches Mittel aus Präzision und Trefferquote. K: Kappa-Koeffizient.

Tab. 7: Accuracy measures for each predicted depth to groundwater level class. Estimated for the training (T) sites ($n = 55700$) and the separate validation (V) sites ($n = 18576$). AC = accuracy, PC = precision, RC = recall, F_1 = harmonic mean of under- and overestimation, K = Cohen's kappa coefficient.

Modell	Tiefenstufe	K	AC	PC	RC	F_1
MGWVDIS _T	Alle	0,49	0,70	-	-	-
	GWST1	-	-	0,56	0,22	0,31
	GWST2	-	-	0,48	0,30	0,37
	GWST3	-	-	0,43	0,34	0,38
	GWST4	-	-	0,29	0,60	0,39
	GWST5	-	-	0,91	0,90	0,91
MGWVDIS _V	Alle	0,48	0,69	-	-	-
	GWST1	-	-	0,57	0,24	0,33
	GWST2	-	-	0,52	0,31	0,38
	GWST3	-	-	0,42	0,33	0,37
	GWST4	-	-	0,27	0,58	0,37
	GWST5	-	-	0,91	0,90	0,90
BÜK-MNGWV ₁	Alle	0,34	0,64	-	-	-
	GWST1	-	-	0,00	0,00	0,00
	GWST2	-	-	0,41	0,16	0,23
	GWST3	-	-	0,26	0,23	0,25
	GWST4	-	-	0,19	0,32	0,24
	GWST5	-	-	0,82	0,92	0,87

1: Die direkte Abschätzung anhand des MNGW der BÜK50 wurde nur für den Validierungsdatensatz (V) durchgeführt. Vergleiche hierzu Tabelle 5.

Es ist in einigen Gebieten daher durchaus möglich, dass durch die aktuellere BÜK50 die Grundwassersituation besser beschrieben wird. So weisen z. B. HANNAPPEL & RIEK (2011) sowie NATKHIN et al. (2012) darauf hin, dass die GWF in Brandenburg innerhalb der letzten Jahrzehnte deutlichen Schwankungen unterlagen.

Da der Disaggregierungsansatz überwiegend über den Reliefparameter VDCN gesteuert wird, können kleinräumige Variationen, die nicht reliefabhängig sind, nicht berücksichtigt werden. Entsprechendes gilt auch für Grundwasserabsenkungen durch Wasserentnahme für die Beregnung in der Landwirtschaft oder die Trinkwassergewinnung. Da die Überhöhung der Grundwasseroberfläche zwischen zwei Gewässeraustritten sehr stark von der Leitfähigkeit der Substrate abhängig ist, sind vermutlich für Gebiete mit Substraten, die durch hohe Wasserleitfähigkeiten (Sander, Urstromtäler) gekennzeichnet sind, plausiblere Ergebnisse zu erwarten als in Gebieten mit geringeren Leitfähigkeiten (Grund- und Endmoränen) (vgl. auch RUSS & RIEK 2011a, b).

Der vorgestellte Ansatz basiert auf der Annahme, dass detaillierte Informationen über die Grundwasseroberfläche und ihrer Dynamik aus den niedersächsischen Grundwasserbeobachtungssystemen (z. B. Gewässerüberwachungssystem

Niedersachsen [GÜN] JANKOWSKI et al. 2014) schon bei der Erstellung der BÜK50 berücksichtigt wurden. Entsprechend konzentriert er sich auf die Einbeziehung von hochaufgelösten Reliefinformationen, die in dieser räumlichen Auflösung bei der Entwicklung der BÜK50 noch nicht vorlagen. Entsprechend kann es sein, dass bei regionalen Fragestellungen die HÜK50 eine belastbarere Datengrundlage darstellt. Das Ziel dieser Arbeit war es aber, vor allem mit Hilfe einer einheitlichen landesweit anwendbaren robusten Methodik eine homogene und flächendeckende Datengrundlage zu schaffen, die z. B. bei der Parametrisierung von statistischen Modellen (vgl. KÖHLER et al., dieser Band) eine wichtige Voraussetzung ist.

4 Folgerungen und Ausblick

Das entwickelte Disaggregierungsmodell dient zur Schätzung des Grundwasserflurabstandes für Waldstandorte im Flachland nach der Definition der niedersächsischen STOK. Im Vergleich zur direkten Schätzung des GWF aus dem MNGW der BÜK50 erhöhten sich durch die Disaggregation die Genauigkeit (AC) von 0,64 auf 0,69 und der Kappa-Koeffizient von 0,34 auf 0,48. Insbesondere der Reliefparameter VDCN bietet eine Möglichkeit, flächenhaft verfügbare Informationen für Waldstandorte in einer höheren inhaltlichen Auflösung zu erhalten und diese z. B. als Eingangsdaten

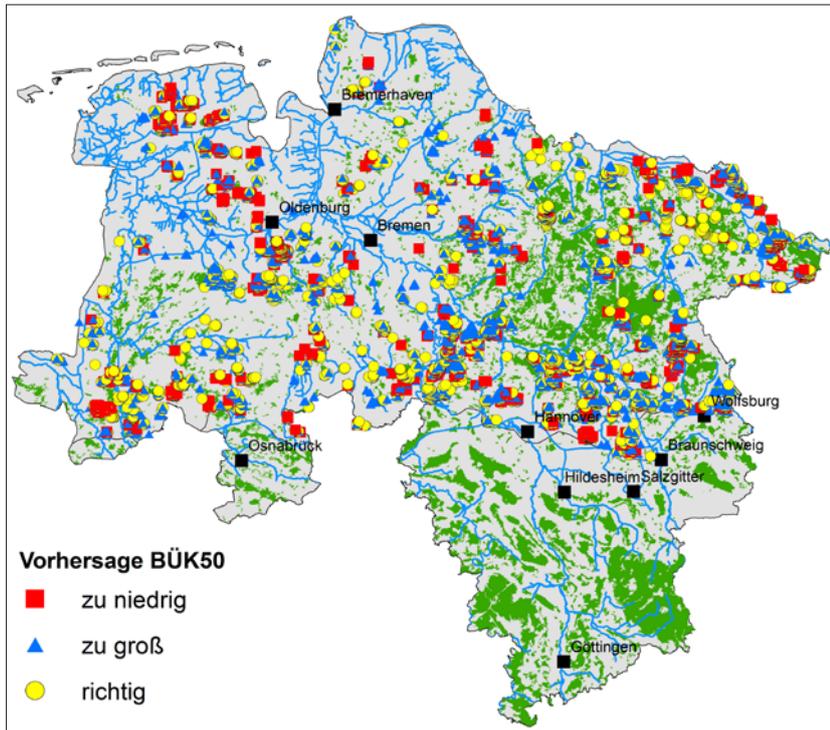


Abb. 4: Gegenüberstellung der Grundwasserflurabstandseinstufungen der BÜK50 (oben) und der Grundwasserflurabstandseinstufungen der disaggregierten BÜK50 (BÜK50DIS - unten) für die Validierungsstandorte mit Grundwasseranschluss im niedersächsischen Tiefland. Dargestellt ist die Prognosegüte: richtig vorhergesagt, zu niedrig vorhergesagt und zu groß vorhergesagt. „groß“ meint, dass die Grundwasserflurabstände größer als in der Standortskartierung eingeschätzt werden. Kartengrundlagen: CORINE Land Cover (CLC2006); Umweltbundesamt, DLR-DFD 2009 und OpenStreetMap.

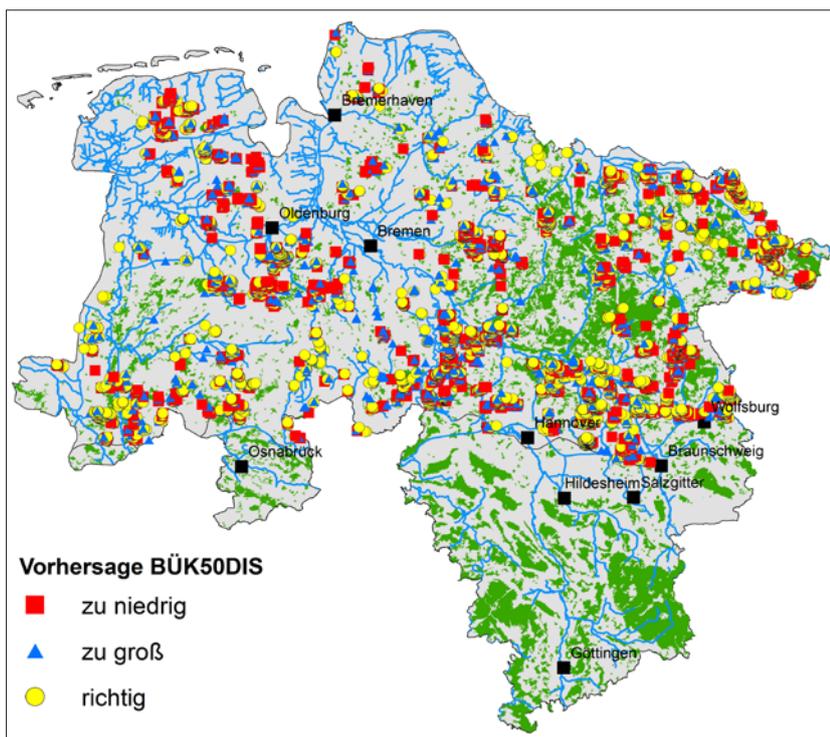


Abb. 4: Comparison between depths to groundwater level from the digital soil map (BÜK50) (top) and predicted depths to groundwater level from disaggregated soil map (BÜK50DIS) (lower) for validation sites with low groundwater levels in Lower Saxony. Mapped is the prediction accuracy: true predicted, underestimated, overestimated. Overestimated means, that the estimated depth to groundwater level is higher than the mapped level. Source: CORINE Land Cover (CLC2006); Federal Environmental Agency, DLR-DFD 2009 and OpenStreetMap.

für die digitale Standortskartierung oder andere Modell-anwendungen bereitzustellen und somit einen Beitrag für mehr Planungssicherheit bei ökologischen und forstlichen Fragestellungen zu leisten. Die räumlich höher aufgelösten Eingangsdaten verringern die Unsicherheiten bei räumlichen Modellierungen des Wasser- und Stoffhaushaltes. Es muss jedoch auch klar hervorgehoben werden, dass die Unsicherheiten bei der Schätzung der GWF nach wie vor nicht unerheblich sind. Mit einem Kappa-Koeffizienten von 0,48 liefert der Ansatz nur „moderate“ Schätzergebnisse. Es ist jedoch nicht unwahrscheinlich, dass sich die Vorhersagegüte

durch die Verwendung des DGM5 und durch regionale Nachkalibrierungen erheblich verbessern lässt.

5 Danksagung

Die Autoren danken dem Bundesministerium für Ernährung und Landwirtschaft und dem Bundesministerium für Umwelt, Naturschutz, Bau und Reaktorsicherheit sowie dem Projektträger Bundesanstalt für Landwirtschaft und Ernährung (BLE) für die Förderung der Arbeit im Rahmen des Waldklimafonds, Projekt „Veränderte Produktivität und Kohlenstoffspeicherung

der Wälder Deutschlands angesichts des Klimawandels“ (WP-KS-KW) (FKZ 28WC400303) sowie „DSS Risikomanagement – Entscheidungsunterstützung zur Verteilung und Begrenzung von Risiken für die Forstwirtschaft vor dem Hintergrund des Klimawandels“ (DSS-RiskMan) (FKZ 28WB401501).

Literatur

- AD-HOC-AG-BODEN (2005): Bodenkundliche Kartieranleitung. Hannover: 438 S.
- AHNER, J., AHRENDTS, B., ENGEL, F., HANSEN, J., HENTSCHEL, S., HURLING, R., MEESENBURG, H., MESTERMACHER, U., MEYER, P., MÖHRING, B., NAGEL, J., NAGEL, R., PAPE, B., ROHDE, M., RUMPF, H., SCHMIDT, M., SCHMIDT, M., SPELLMANN, H., SUTMÖLLER, J. (2013): Waldentwicklungsszenarien für das Hessische Ried. Entscheidungsunterstützung vor dem Hintergrund sich beschleunigt ändernder Wasserhaushalts- und Klimabedingungen und den Anforderungen aus dem europäischen Schutzgebietssystem Natura 2000. Beitr. aus der Nordwestdeutschen Forstlichen Versuchsanstalt **10**: 398 S.
- AHRENDTS, B. (2012a): Dynamische Modellierung der Auswirkungen von Kalkungen und Nutzungsszenarien auf die Basensättigung im Wurzelraum. Beitr. aus der NW-FVA **9**: 95-114.
- AHRENDTS, B. (2012b): Regionalisierungskonzept zur flächendeckenden Bewertung des Austragsrisikos von Nitrat mit dem Sickerwasser aus Waldböden (RIKON). Beitr. aus der NW-FVA **9**: 115-148.
- AHRENDTS, B., MEESENBURG, H., DÖRING C., JANSEN, M. (2010): A spatio-temporal modelling approach for assessment of management effects in forest catchments. Status and Perspectives of Hydrology in Small Basins, IAHS Publ. **336**: 32-37.
- ASQUITH, W.H., HERRMANN, G.R., ASCE, M., CLEVELAND, T.G. (2013): Generalized Additive Regression Models of Discharge and Mean Velocity Associated with Direct-Runoff Conditions in Texas: Utility of the U.S. Geological Survey Discharge Measurement Database. J. Hydrol. Eng. **18** (10): 1331-1348, doi:10.1061/(ASCE)HE.1943-5584.0000635.
- AUGUSTIN, N.H., TRENKEL, V. M., WOOD, S.N., LORANCE, P. (2013): Space-time modelling of blue ling for fisheries stock management. Environmetrics **24**: 109-119, doi:10.1002/env.2196
- BEHRENS, T., FÖRSTER, H., SCHOLTEN, T., STEINRÜCKEN, U., SPIES, E.-D., GOLDSCHMITT, M. (2005): Digital soil mapping using artificial neural networks. J. Plant Nutr. Soil Sci. **168**: 21-33, doi:10.1002/jpln.200421414
- BIERKENS, M.F. P., FINKE, P.A., DEWILLINGEN, P. (2000): Upscaling and downscaling methods for environmental research. Development in Plant and Soil Sciences **88**: Kluwer Academic Publishers. Dordrecht: 190 S.
- BREIMAN, L., FRIEDMAN, J.H., OLSEN, R.A., STONE, C.J. (1984): Classification and Regression Trees. Chapman & Hall, N.Y.: 368 S.
- CIMMERY, V. (2010): User Guide for SAGA (version 2.0.5) <http://sourceforge.net/projects/saga-gis/files/>. [access 04-09-2015]
- CONGALTON, R.G. (1991): A Review of Assessing the Accuracy of Classifications of Remotely Sensed Data. Remote Sense. Environ. **37**: 35-46.
- CONGALTON, R., GREEN K. (2009): Assessing the Accuracy of Remotely Sensed Data: Principles and Practices. 2nd Edition, CRC/Tyler & Francis, Boca Raton, FL. 183 S.
- CONRAD, O. (2007): SAGA – Entwurf, Funktionsumfang und Anwendung eines Systems für Automatisierte Geowissenschaftliche Analysen. Mathematisch-Naturwissenschaftlichen Fakultäten, Georg-August-Universität zu Göttingen, Göttingen: 233 S.
- GEHRT, E., BOCK, M. (2009): Ermittlung der Grundwasserflurabstände auf Grundlage digitaler Höhenmodelle. Berichte der DBG: 4 S. URL: http://eprints.dbges.de/306/1/Text_GW_3.pdf [access 03-02-2015]
- GEHRT, E., RAISSI, F. (2008): Grundwasseramplituden in Bodenschichten Niedersachsens. GeoFakten, **20**: 8 S.
- GOODMAN, J.M., OWENS, P.R. (2012): Predicting soil organic carbon using mixed conceptual and geostatistical models. In: Minasny, B., Malone, B.P., McBratney, A.B.: Digital Soil Assessments and Beyond: Proceedings of the 5th Global Workshop on Digital Soil Mapping 2012, Sydney, Australia. Taylor & Francis Group. London: S. 155-159.
- GOTWAY, C.A., YOUNG, L.J. (2002): Combining Incompatible Spatial Data. J. Am. Stat. Assoc. **97** (458): 632-648. doi:10.1198/016214502760047140
- GUCKLAND, A., AHRENDTS, B., PAAR, U., DAMMANN, I., EVERS, J., MEIWES, K.J., SCHÖNFELDER, E., ULRICH, T., MINDRUP, M., KÖNIG, N., EICHHORN, J. (2012): Predicting depth translocation of base cations after forest liming – results from long-term experiments. Eur. J. For. Res. **131** (6): 1869-1887. doi:10.1007/s10342-012-0639-0
- HANNAPPEL, S., RIEK, W. (2011): Berechnung des Flurabstandes des oberflächennahen Grundwassers der Waldfläche Brandenburgs für hydrologisch typische Zeiträume. Hydrologie und Wasserwirtschaft, **55** (1): 4-15.
- HASTIE, T.J., TIEBSHIRANI, R.J. (1990): Generalized Additive Models. Monographs on Statistics and Applied Probability, 43. Chapman & Hall. London: 335 S.
- KERRY, R., GOOVAERTS, P., RAWLINS, B.G., MARCHANT, B.P. (2012): Disaggregation of legacy soil data using area to point kriging for mapping soil organic carbon at the regional scale. Geoderma **170**: 347-358, doi:10.1016/j.geoderma.2011.10.007
- KÖHLER, M., STEINICKE, C., EVERS, J., AHRENDTS, B. (2016): Modellierung von Wasserversorgung und Nährstoffausstattung von Wäldern im Rahmen der niedersächsischen forstlichen Standortskartierung. Waldökologie, Landschaftsforschung und Naturschutz **16**: 83-94.
- JANKOWSKI, A., KARFUSEHR, C., TE GEMPT, R., HEINBOCKEL, E., FEDEROLF, C., KLÖVER, T., HOFF, S., DE VRIES, D. (2014): Gewässerüberwachungssystem Niedersachsen (GÜN). Güte- und Standsmessnetz Grundwasser. Grundwasser, **18**: 46.
- LBEG (2015): Bodenübersichtskarte von Niedersachsen im Maßstab 1:50 000 (BÜK 50). Landesamt für Bergbau, Energie und Geologie, Hannover.
- LGLN (2014a): Digitales Geländemodell DGM 10. Niedersächsische Vermessungs- und Katasterverwaltung, Hannover.
- LGLN (2014b): Niedersächsisches Gewässernetz. Niedersächsische Vermessungs- und Katasterverwaltung, Hannover.
- MCBRATNEY, A.B. (1998): Some considerations on methods for spatially aggregating and disaggregating soil information. Nutrient Cycling in Agroecosystems **50**: 51-62. doi:10.1023/A:1009778500412
- MEER, U. (2007): Methoden zur Beurteilung der Heterogenität und Disaggregierungsverfahren zur Verbesserung des Aussagegehaltes von Bodenbasisdaten. Geosynthesis – online: 144 S.

- MEIWES, K.J., RUMPF, S., AHRENDTS, B., RADEMACHER, P., NAGEL, J. (2013): Nährstoffexporte bei Vollbaumnutzung in Nordwestdeutschland – Einflussfaktoren und standörtliche Bewertung. *Berichte Freiburger Forstliche Forschung* **94**: 99-108.
- MÜLLER, U., WALDECK, A. (2011): Auswertungsmethoden im Bodenschutz – Dokumentation zur Methodenbank des Niedersächsischen Bodeninformationssystems (NIBIS®). *GeoBerichte* **19**: 415 S.
- NATKHIN, M., STEIDL, J., DIETRICH, O., DANNOWSKI, R., LISCH- EID, G. (2012): Differentiating between climate effects and forest growth dynamics effects on decreasing groundwater recharge in a lowland region in Northeast Germany. *J. Hydrol.* **448–449**: 245-254. doi:10.1016/j. jhydrol.2012.05.005
- NFP (2009a): Forstliche Standortsaufnahme – Gelände- ökologischer Schätzrahmen. Anwendungsbereich: Pleistozänes (Diluviales) Flachland. Wolfenbüttel: 14 S.
- NFP (2009b): Forstliche Standortsaufnahme. Geoökologi- scher Schätzrahmen Varianten. Wolfenbüttel: 5 S.
- OLAYA, V. (2004): A gentle introduction to SAGA GIS: [http:// www.saga-gis.org/en/about/references.html](http://www.saga-gis.org/en/about/references.html).
- PANFEROV, O., AHRENDTS, B., NUSKE, R.S., THIELE, J.C., JANSEN, M. (2011): Challenges in Climate-Driven Decision Sup- port Systems in Forestry. In: Jao, C.: *Efficient Decision Support Systems – Practice and Challenges in Multidis- ciplinary Domains*. InTech: S. 459-478.
- RAISSI, F., MÜLLER, U., MEESENBERG, H. (2009): Ermittlung der effektiven Durchwurzelungstiefe von Forststandorten. *GeoFakten* **9**: 1-7.
- R CORE TEAM (2013): R: A language and environment for statistical computing. R Foundation for Statistical Com- puting, Vienna, Austria. ISBN 3-900051-07-0, URL [http:// www.R-project.org](http://www.R-project.org).
- RUSS, A., RIEK, W. (2011a): Vergleich zweier Ansätze zur Ableitung von Grundwasserflurabständen für die Wald- fläche Brandenburgs. *Berichte der DBG*, [http://eprints. dbges.de/552](http://eprints.dbges.de/552) [access 15-02-2016]
- RUSS, A., RIEK, W. (2011b): Methode zur Ableitung des Grundwasserflurabstandes aus Karten der forstlichen Standortskartierung und digitalen Geländemodellen in Brandenburg. *Waldökologie, Landschaftsforschung und Naturschutz* **12**: 85-91.
- SCHMIDT, K., BEHRENS, T., SCHOLTEN, T. (2008): Instance selection and classification tree analysis for large spatial datasets in digital soil mapping. *Geoderma* **146**: 138-146, doi:10.1016/j.geoderma.2008.05.010
- SCHMIDT, W., STÜBER, V., ULRICH, T., PAAR, U., EVERS, J., DAM- MANN, K., HÖVELMANN, T., SCHMIDT, M. (2015): Synopse der Hauptmerkmale der Forstlichen Standortskartierungsver- fahren der Nordwestdeutschen Bundesländer. *Beitr. aus der NW-FVA* **12**: 136 S.
- SUTMÖLLER, J., HENTSCHEL, S., HANSEN, J., MEESENBERG, H. (2011): Coupled forest growth-hydrology modelling as an instrument for the assessment of effects of forest management on hydrology in forested catchments. *Adv. Geosci.* **27**: 149-154, doi:10.5194/adgeo-27-149-2011
- SUTMÖLLER, J., AHRENDTS, B., SCHMIDT, M., ALBERT, M., FLECK, S., PLASIL, P., HANSEN, J., OVERBECK, M., NAGEL, R., EVERS, J., SPELLMANN H., MEESENBERG, H. (2013): Klimafolgenstudie 2012: Forstwirtschaft. *Berichte des Landesamtes für Umweltschutz Sachsen-Anhalt* **8**: 150 S.
- THERNEAU, T.M., ATKINSON, B. (2008): rpart: Recursive partition- ing. R package version 4.1-1.
- VIERA, A.J., GARRETT, J.M. (2005): Understanding Interob- server Agreement: the Kappa Statistic. *Family Medicine* **37** (5): 360-363.
- WESSOLEK, G., KAUPENJOHANN, M., RENGER, M. (2009): Bodenphy- sikalische Kennwerte und Berechnungsverfahren für die Praxis. *Bodenökologie und Bodengenese* **40**: 80 S.
- WOOD, S.N. (2006): *Generalized additive models: an introduc- tion with R*. Texts in Statistical Science, Chapman & Hall. Boca Raton: 410 S.

submitted: 10.12.2015
 reviewed: 26.01.2016
 accepted: 04.04.2016

Autorenanschrift:

Dr. Bernd Ahrends, Christian Steinicke, Dr. Michael Köhler,
 Dr. Henning Meeseburg
 Nordwestdeutsche Forstliche Versuchsanstalt
 Abteilung Umweltkontrolle
 Grätzelstr. 2
 37079 Göttingen
 E-Mail: bernd.ahrends@nw-fva.de
michael.koehler@nw-fva.de
henning.meeseburg@nw-fva.de

Aktuelle Adresse:

Christian Steinicke
 Hessisches Landesamt für Naturschutz,
 Umwelt und Geologie
 Dezernat G3 – Boden und Altlasten
 Rheingaustraße 186
 65203 Wiesbaden
 E-Mail: christian.steinicke@hlnug.hessen.de