



Bericht

Waldklimafond-Projekt „CO-2-OPT“:
Hydrogeologische Bewertung von Waldstandorten
zur Beurteilung der Versickerungswirksamkeit von
Grundwasseranreicherungsmaßnahmen und zur
Wirksamkeit von Waldumbau auf das Abfluss-
geschehen von Oberflächengewässern
im Landkreis Harburg

Auftraggeber: **Landwirtschaftskammer Niedersachsen**
Johannssenstrasse 10
30159 Hannover

Bearbeitung: **CONSULAQUA • Hildesheim**
Geo-Infometric
Gropiusstraße 3
31137 Hildesheim

Bearbeiter:

Dipl. - Geogr. Jan Hohlbein (Jan.Hohlbein@consulaqua.de)

Dipl. - Geol. Michael Bruns (m.bruns@geo-infometric.de)

Projekt: 52973

Inhaltsverzeichnis

1	VERANLASSUNG UND AUFGABENSTELLUNG	4
2	ABGRENZUNG DES UNTERSUCHUNGSGEGENSTANDES	6
2.1	Untersuchungsgebiet	6
2.2	Untersuchungsgegenstand	9
3	DATENGRUNDLAGEN	11
4	ANWENDUNG DES BEWERTUNGSVERFAHRENS ZUR VERSICKERUNGSWIRKSAMKEIT IM GRUNDWASSER.....	12
4.1	Allgemeine Beschreibung	12
4.2	Erstellung eines geologischen 3D Strukturmodells.....	12
4.3	Erstellung eines Grundwassergleichenplans und Ableitung des Grundwasserflurabstandes	14
4.4	Beschreibung der Methodik und der Auswertung	15
4.4.1	Auswertung der Bodenübersichtskarte BUEK 50	15
4.4.2	Auswertung der Geologischen Karte	16
4.4.3	Verteilung und die Mächtigkeit der Grundwasserhemmer aus dem geologischen 3D Strukturmodell	16
4.4.4	Auswertung der Mächtigkeit der ungesättigten Zone	18
4.5	Gesamtbewertung der Versickerungswirksamkeit	18
5	ENTWICKLUNG EINES BEWERTUNGSVERFAHRENS ZUR VERSICKERUNGSWIRKSAMKEIT AUF DAS ABFLUSSGESCHEHEN VON OBERFLÄCHENGEWÄSSERN	20
5.1	Allgemeine Beschreibung	20
5.2	Methodische Vorbedingungen und Bewertungsmaßstab	21
5.3	Ursprüngliches Konzept der Basisabfluss-Berechnung	22
5.4	Überprüfung der Abflussberechnung anhand von Messdaten.....	23
5.5	Modifikation des Konzepts zur Berechnung der Basisabflüsse	26
5.6	Ermittlung des erzielbaren Sickerwassermehrertrags durch Waldumbau	29
5.7	Ermittlung des kalibrierten Basisabflusses in einem oberirdischen Einzugsgebiet	31
5.8	Bewertung der Eignung der oberirdischen Einzugsgebiete und der Waldstandorte für einen Waldumbau.....	35
6	ERGEBNISSE.....	37
6.1	Bewertungsverfahren „Grundwasser“	37
6.2	Bewertungsverfahren „Oberflächengewässer“	38
7	VERSICKERUNGSWIRKSAMKEIT MIT DER ZEIT	40
8	MENGENMÄßIGE VERSICKERUNGSWIRKSAMKEIT	43
9	ZUSAMMENFASSUNG DER ERGEBNISSE	45
10	ABBILDUNGEN UND TABELLEN	48
11	LITERATUR.....	50
12	ANLAGENVERZEICHNIS	51

ABKÜRZUNGEN

AQ	Aquifer (Grundwasserleiter)
AT	Aquitard (Grundwasserhemmer)
BUEK 50	Bodenübersichtskarte im Maßstab 1 : 50.000
CAH	CONSULAQUA Hildesheim Geo-Infometric, Niederlassung der CONSULAQUA Hamburg Beratungsgesellschaft mbH
DGM	Digitales Geländemodell (Geländehöhen)
EZG	Einzugsgebiet
GIS	Geographisches Informationssystem
GK 25	Geologische Karte im Maßstab 1 : 25.000
GK 50	Geologische Karte im Maßstab 1 : 50.000
GLD	Gewässerkundlicher Landesdienst
GWL	Grundwasserleiter
GWNB	Grundwasserneubildung
H	Grundwasserhemmer (Aquitard)
HUEK 200	Hydrogeologische Übersichtskarte im Maßstab 1 : 200.000
k_f -Wert	Durchlässigkeitsbeiwert
L	Grundwasserleiter (Aquifer)
LBEG	Landesamt für Bergbau, Energie und Geologie
LGLN	Landesamt für Geoinformation und Landesvermessung Niedersachsen
LK	Landkreis
LWK	Landwirtschaftskammer
NLWKN	Niedersächsischer Landesbetrieb für Wasserwirtschaft, Küsten- und Naturschutz
WET	Waldentwicklungstyp
WRRL	EG-Wasserrahmenrichtlinie

1 VERANLASSUNG UND AUFGABENSTELLUNG

Im Waldklimafonds-Projekt „Wasserwald“ („Entwicklung eines Anrechnungsverfahrens für erhöhte Wasserspende durch grundwasserbetonten Waldumbau bei sinkendem Grundwasserdargebot als Folge von Klimawandel“, Landwirtschaftskammer Niedersachsen, 2014-2015, Webcode: 01031096) wurde durch CONSULAQUA (CAH) im Arbeitspaket 6 eine Methode zur hydrogeologischen Bewertung von potenziellen Waldumbaustandorten hinsichtlich ihrer Versickerungseignung entwickelt und an zwei Fallbeispielen erprobt (CAH 2015). Die Versickerungseignung bezieht sich dabei auf das Grundwasser beziehungsweise auf den für die Fragestellung relevanten Grundwasserleiter. Anlässlich der Vorstellung der Ergebnisse wurde von den Mitgliedern des Projektbeirats „Wasserwald“ darüber diskutiert, dass neben einer Bewertung der Auswirkungen von Waldumbaumaßnahmen auf den Grundwasserhaushalt auch eine Bewertung der Auswirkungen auf den Basisabfluss der Oberflächengewässer notwendig sei.

Die aufgeworfene Fragestellung soll nun im Rahmen des Forschungsprojektes „CO₂-OPT“: „Optimierung der Waldbewirtschaftung und Holzverwendung mit dem Ziel, die CO₂-Senkenleistung Wald und Holz nachhaltig zu steigern“ (LWK Niedersachsen, 2014-2018, Webcode: 01032507) in einem Teilprojekt aufgegriffen werden. Als Untersuchungsgebiet wurde der Landkreis Harburg gewählt. Die Projektergebnisse sollen anschließend in einen Masterplan für den Landkreis Harburg eingebunden und veröffentlicht werden.

In diesem Teilprojekt sollen die Auswirkungen von Waldumbaumaßnahmen einerseits auf die Erhöhung des Grundwasserdargebots in einem Grundwasserleiter, andererseits auf den Basisabfluss der Oberflächengewässer untersucht werden. Dabei soll zum einen das im Projekt „Wasserwald“ entwickelte Bewertungsverfahren „**Grundwasser**“ hinsichtlich der Versickerungseignung von Waldstandorten zur Steigerung des Grundwasserdargebots angewendet werden, und zum anderen soll ein gänzlich neues Bewertungsverfahren „**Oberflächenwasser**“ hinsichtlich der Standorteignung zur Steigerung / Stützung des Basisabflusses der Oberflächengewässer entwickelt werden. Die beiden Methoden sollen dabei nicht aufeinander aufbauen oder verschnitten werden, sondern separat anwendbar sein und gleichwertig nebeneinanderstehen.

Ziel der mit hydrogeologischen Methoden durchzuführenden Auswertungen ist es, Aussagen zu erhalten, welche Teilmengen an zusätzlicher Grundwasserneubildung durch Waldumbau den Hauptgrundwasserleiter tatsächlich erreichen oder dem Basisabfluss der Oberflächengewässer zugutekommen und somit zu einer Stützung des Abflusses der Oberflächengewässer beitragen können. Beide Methoden sollen dabei ausschließlich mit vorhandenen, bei den Fachbehörden vorliegenden Daten auskommen. Die Erstellung von aufwendigen hydrogeologischen, numerischen Modellen oder Geländeaufnahmen sind explizit nicht vorgesehen.

Als Ergebnisse beider Bewertungsverfahren werden farbige Karten produziert, die in einfacher und übersichtlicher Weise die Standorteignung von potenziellen Waldumbaugebieten hinsichtlich ihrer Versickerungswirksamkeit für das Grundwasser bzw. hinsichtlich einer relevanten Stützung des Basisabflusses von Gewässern darstellen („Ampelkarten“).

Auf Grundlage der Verdingungsunterlagen zur Ausschreibung vom 25.07.2017 und des Angebots vom 04.08.2017 wurde CONSULAQUA Hildesheim Geo-Infometric von der Landwirtschaftskammer Niedersachsen mit der Bearbeitung des Teilprojektes beauftragt. Der vereinbarte abschließende Untersuchungsbericht wird hiermit vorgelegt.

2 ABGRENZUNG DES UNTERSUCHUNGSGEGENSTANDES

2.1 Untersuchungsgebiet

Das Untersuchungsgebiet (Landkreis Harburg) liegt im Norden des Landes Niedersachsen und grenzt im Nordwesten an den Landkreis Stade, im Südwesten an den Landkreis Rotenburg (Wümme), im Süden an den Landkreis Heidekreis, im Osten an den Landkreis Lüneburg und im Norden an die Bundesländer Hamburg und Schleswig-Holstein an. Die größten Städte im Landkreis sind Buchholz in der Nordheide und Winsen an der Luhe (Abbildung 1). Die Größe des Untersuchungsgebiets beträgt etwa 1.250 km².

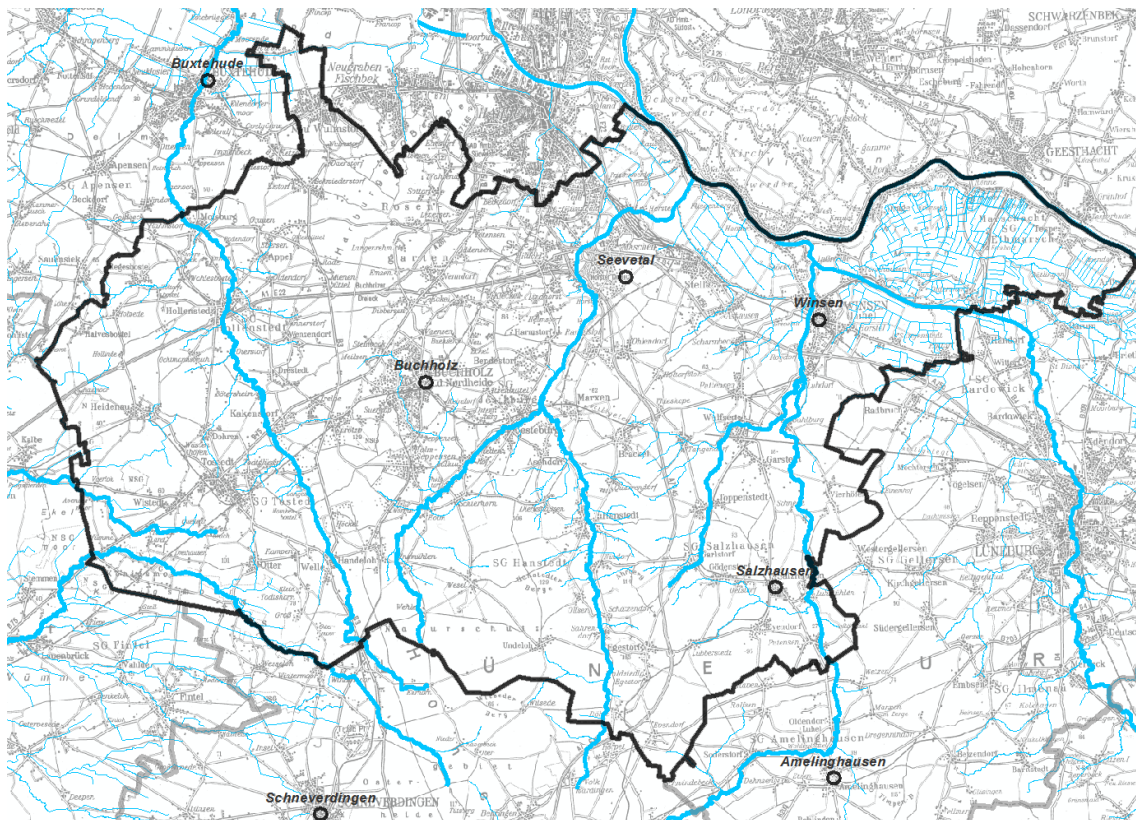


Abbildung 1: Lage des Untersuchungsgebiets

Naturräumlich zählt das Untersuchungsgebiet zur Hohen Heide, dessen Landschaftsbild im Wesentlichen durch die Vereisungen der Saale-Kaltzeit geprägt worden ist. Im Nordwesten liegen mit den Harburger Bergen die höchsten Erhebungen des Landkreises. Im Norden grenzt die Elbeniederung mit der Elbmarsch an. Die Geländehöhen im Landkreis Harburg liegen zwischen etwa 155 m ü. NHN und in der Elbmarsch bis zu wenige Meter unter NHN. Die Geländemorphologie ist in Abbildung 2 dargestellt.

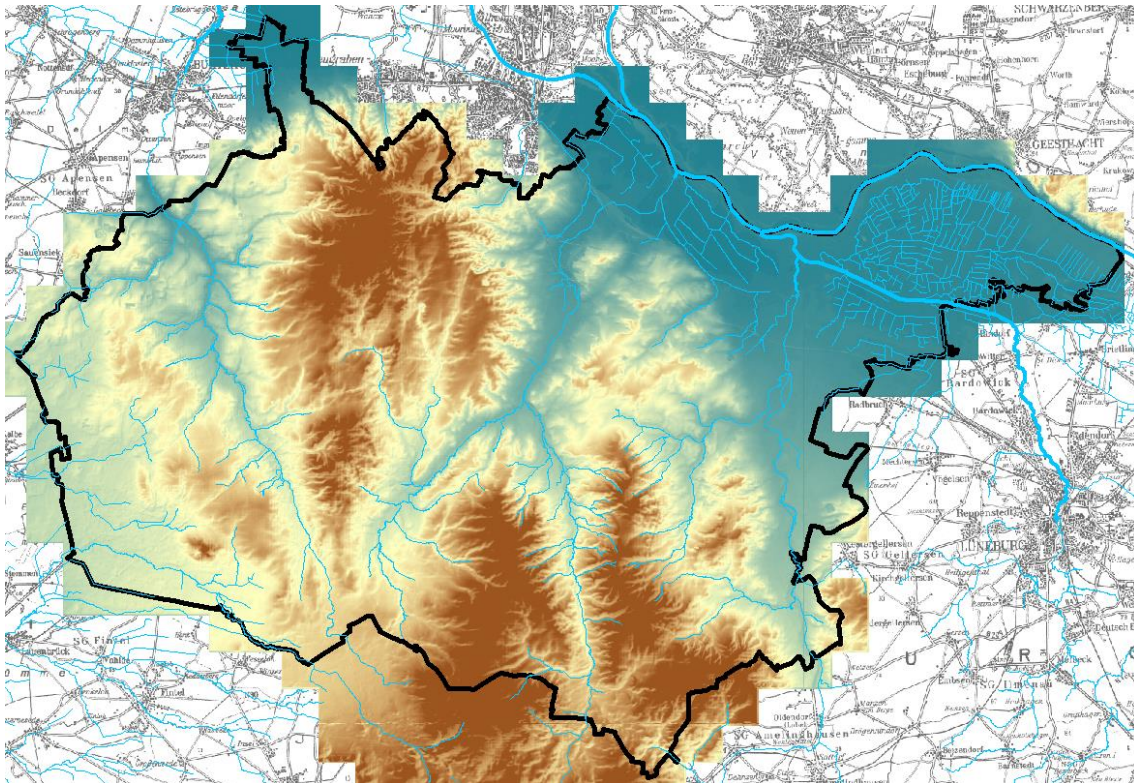


Abbildung 2: Geländemorphologie im Landkreis Harburg (braun = hoch (max. 155 m ü. NHN), blaugrün = niedrig (bis unter Meeresspiegelniveau))

Der Geländemorphologie folgend ist die Elbe der Hauptvorfluter der Region. Die größten Flüsse im Landkreis (von West nach Ost) sind darüber hinaus die Oste, die Wümme, die Este, die Seeve, die Schmale Aue, die Luhe und die Ilmenau (Abbildung 3).

Die größten Grundwasserkörper im Landkreis Harburg sind „Este-Seeve Lockergestein“ und „Ilmenau Lockergestein links“. Einen kleineren Flächenanteil haben außerdem „Oste Lockergestein rechts“, „Oste Lockergestein links“, „Wümme Lockergestein rechts“, „Wümme Lockergestein links“ und „Ilmenau Lockergestein rechts“.

Die Landnutzung (Quelle: CORINE Landcover 2006) im Landkreis Harburg ist mit ca. 47 % überwiegend Ackernutzung, gefolgt von ca. 28 % Waldnutzung und 14 % Grundlandnutzung. Die Siedlungsfläche beträgt etwa 9 % (Abbildung 4).

Die Wälder können nach ihren Besitzern weiter unterteilt werden. Etwa 26.000 ha sind in Privatbesitz, die Landesforsten umfassen eine Fläche von ca. 5.300 ha, und ca. 3.500 ha sind im Besitz der Klosterkammer. Der Nadelwaldanteil beträgt etwas über 70 % der gesamten Waldfläche (LWK 02/2018).

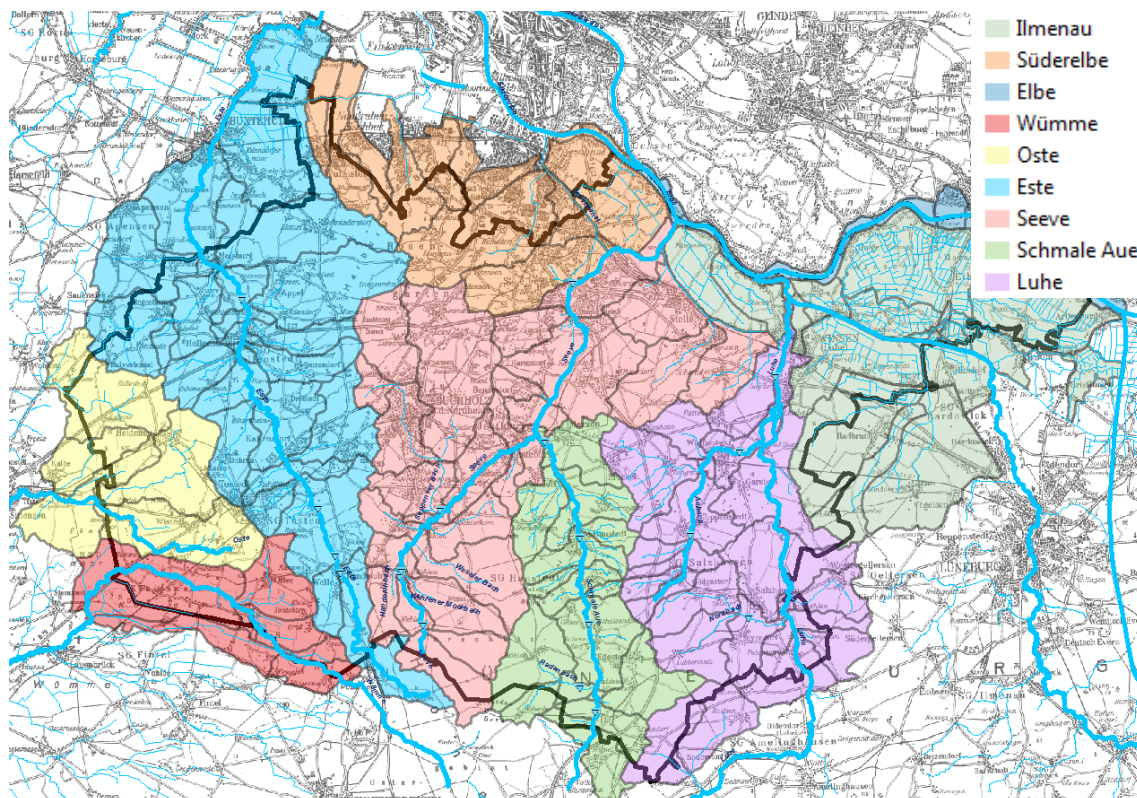


Abbildung 3: Flussgebiete im Landkreis Harburg

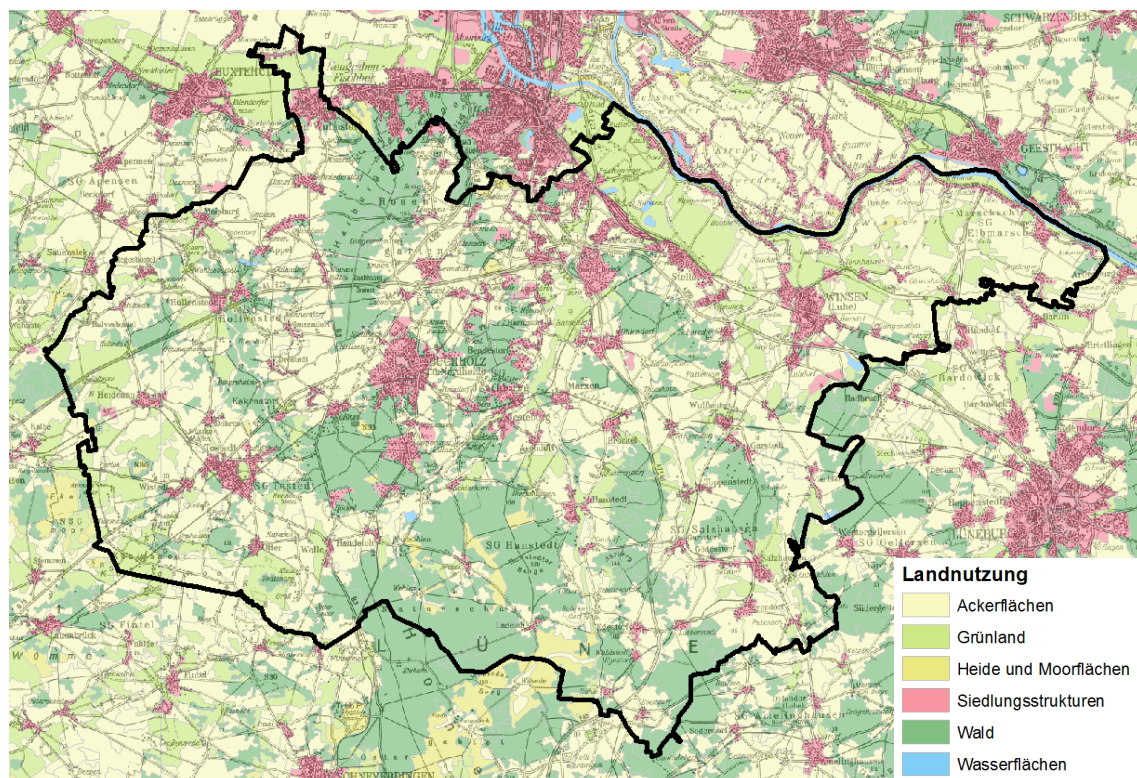


Abbildung 4: Landnutzung im Landkreis Harburg

2.2 Untersuchungsgegenstand

Entsprechend der Projektfragestellung sollen sowohl die Versickerungswirksamkeit von Grundwasseranreicherungsmaßnahmen („Bewertungsverfahren Grundwasser“), als auch die Standorteignung eines Waldstandortes zur Steigerung des Basisabflusses der Oberflächengewässer bewertet werden („Bewertungsverfahren Oberflächenwasser“).

Mit Bewertungsverfahren „Grundwasser“ wird ermittelt, ob und in welchem Umfang eine Steigerung der Sickerwassermenge durch Waldumbau einen positiven Effekt auf die Grundwasserneubildung hat und damit die Dargebotsmenge eines zuvor festzulegenden „Zielaquifers“¹ erhöht werden kann und welche Flächen für den Waldumbau dafür zu priorisieren sind. Dabei wird vereinfacht ein vertikaler Wirkungspfad zwischen der Geländeoberfläche und der Grundwasseroberfläche angenommen.

Für den Landkreis Harburg wurde der Grundwasserleiter „Hy-L2“ als „Zielaquifer“ definiert. Die Nomenklatur der hydrogeologischen Einheiten erfolgt in Anlehnung an die hydrostratigraphische Gliederung Niedersachsens (REUTTER 2011: LBEG GeoFakten 21). Der Schichtbezeichnung des für das Bewertungsverfahren erstellte Strukturmodells wird aber zu Unterscheidungszwecken ein „Hy“ vorangestellt.

Der „Hy-L2“-Aquifer besteht überwiegend aus saalezeitlichen Schmelzwasserablagerungen und entspricht überwiegend dem Aquifer L3 nach LBEG-GeoFakten-Nomenklatur (vgl. Tabelle 1 in Kap. 4.2). Diese Schmelzwasserablagerungen werden im Landkreis Harburg weit verbreitet durch Grundmoränenablagerungen des Drenthe-Stadiums überlagert. Eine detailliertere Beschreibung der Geostruktur befindet sich in Kap. 4.2.

Mit Bewertungsverfahren „Oberflächenwasser“ wird ermittelt, ob und in welchem Umfang eine Steigerung der Sickerwassermenge durch Waldumbau einen positiven und quantitativ wesentlichen Effekt auf die Abflussmengen der Gewässer hat und welche Flächen für den Waldumbau dafür zu priorisieren sind.

Für dieses Bewertungsverfahren bilden die Fließgewässer und die oberirdischen Gewässer-einzugsgebiete des NLWKN (10/2017) eine wesentliche Grundlage. Die Gewässer im LK Harburg sind in insgesamt 160 Teilabschnitte bzw. Teil-Einzugsgebiete unterteilt (LAWA-Richtlinie, 2009, vgl. Kap 0) wobei kleine Entwässerungsgräben oder kleine Bäche in diesem Datensatz nicht enthalten sind und Stillgewässer generell nicht betrachtet werden.

Diese 160 oberirdischen Teil-Einzugsgebiete der Oberflächengewässer werden als Bewertungsmaßstab verwendet. Eine kleinräumigere Betrachtung ist angesichts des ohnehin schon sehr komplexen Wirkungspfades Sickerwasser -> Basisabfluss nicht mehr ohne ein numerisches Grundwasserströmungsmodell zu leisten.

Beide Verfahren bewerten Effekte, die sich durch Waldumbaumaßnahmen erzielen lassen. Daher sind für die Bewertung diejenigen Flächen maßgeblich, die einen Nadelwaldbestand aufweisen und prinzipiell, d. h. auf Grund ihres Standortes und ihrer hydrogeologischen Standortbedingungen für Waldumbaumaßnahmen in Frage kommen.

¹ Aquifer, der im Fokus der Auswertungen steht: z. B. derjenige Aquifer, aus dem die überwiegenden Grundwasserentnahmen stattfinden

Zur Identifizierung der maßgeblichen Waldflächen wurde von der Landwirtschaftskammer Niedersachsen am 12.10.2017 ein ArcGIS-Shape-File mit den Baumbestandsdaten zum Privatwald übergeben. Daten zum hauptsächlichen Baumbestand der Waldflächen der Klosterkammer wurden ebenfalls durch die Landwirtschaftskammer im Februar 2018 zur Verfügung gestellt². Als Nadelholz wurden beim Privatwald alle Standorte mit der führenden Baumart Kiefer (71 %), Fichte (22 %), Douglasie (3 %) und Lärche (3 %) verwendet. Das durchschnittliche Bestandsalter wurde bei der Bewertung nicht berücksichtigt. Insgesamt wurden etwa 19.190 ha Nadelwaldfläche in Privatbesitz für die Bewertung herangezogen.

² Die Daten der Klosterkammer wurden in anonymisierter Form übergeben. Für die Klosterkammer erfolgt zudem aus datenschutzrechtlichen Gründen keine Veröffentlichung der Auswertungen

3 DATENGRUNDLAGEN

Für die Projektbearbeitung wurden überwiegend amtliche und bereits vorhandene Daten verwendet. Darüber hinaus wurden seitens HAMBURG WASSER eine Verwendung von Ergebnissen aus den im Untersuchungsgebiet vorhandenen numerischen Grundwassermodellen gestattet. Die Durchführung von zusätzlichen Bohrungen oder Grundwasser- bzw. Abflussmessungen war nicht vorgesehen.

Im Einzelnen wurden folgende Datensätze verwendet:

- Digitale Bodenübersichtskarte 1 : 50.000 (BUEK 50, LBEG, Datenbereitstellung: 10/2017)
- Digitale Geologische Karte 1 : 25.000 (GK 25, LBEG, Datenbereitstellung: 10/2017)
- Digitale Geologische Karte 1 : 50.000 (GK 50, LBEG, Datenbereitstellung: 10/2017)
- Digitales Geländemodell (DGM 5 und DGM 25, LGLN, Datenbereitstellung: 10/2017)
- Gewässernetz (NLWKN, Datenbereitstellung als Shape: 10/2017)
- Oberirdische Gewässereinzugsgebiete (NLWKN: Datenbereitstellung als Shape: 10/2017)
- ATKIS Digitales Landschaftsmodell (DLM), Objektbereich „Gewässer“ (LGLN, Datenbereitstellung: 10/2017)
- Digitale Hydrogeologische Übersichtskarte 1 : 200.000, (HUEK 200, Lage der Grundwasseroberfläche, LBEG, Datenbereitstellung: 10/2017)
- Digitale Hydrogeologische Karte 1 : 50.000, (HK 50, Grundwasserneubildung nach mGROWA (LBEG, Datenbereitstellung: 02/2017)
- Bohrungen mit freigegebenen Schichtenverzeichnissen (LBEG, Datenbereitstellung: 10/2017)
- (Hydro-) Geologische Schnitte (LBEG, NIBIS-Kartenserver, Abfragedatum: 10/2017)
- Daten zum Privatwald (LWK Nds 10/2017) sowie zu den Flächen der Klosterkammer (LWK Nds., Datenbereitstellung: 02/2018)
- Höhenlage der Grundwasseroberfläche aus dem „HAMBURGMODELL“ (HAMBURG WASSER, Datenabfrage: 10/2017)
- Geologisches 3D Strukturmodell „Nordheide“ (HAMBURG WASSER, Datenabfrage: 10/2017)
- Digitale Karte der Grundwasserneubildung, Methode mGROWA (LBEG, Datenbereitstellung 10/2017)
- CORINE Land Cover (European Environment Agency, 2006)

4 ANWENDUNG DES BEWERTUNGSVERFAHRENS ZUR VERSICKERUNGSWIRKSAMKEIT IM GRUNDWASSER

4.1 Allgemeine Beschreibung

Zur Bewertung der Versickerungswirksamkeit im Grundwasser (Bewertungsverfahren Grundwasser) müssen u. a. die Eigenschaften des Untergrundes zwischen Geländeoberfläche und der Grundwasseroberfläche untersucht werden. Hierzu werden in jeweils separaten Einzelbetrachtungen vier Eingangsgrößen bewertet und anschließend in einer summarischen Gesamtbewertung aggregiert. Die Bewertung der Eingangsparameter erfolgt in einem 4-stufigen System: 0 Punkte steht dabei für „nicht geeignet“, der höchste Wert 3 Punkte steht für „sehr geeignet“. Anschließend werden die Punkte an jedem Standort addiert, wobei im Endergebnis ein Standort immer mit dem Wert 0 („nicht geeignet“) bewertet wird, wenn mindestens einer der Eingangsparameter den Wert 0 erhalten hat. Bei der Gesamtbewertung kann ein Standort maximal 12 Punkte (4 x 3) erreichen.

Die vier Eingangsparameter sind:

- 1) die Bodenkarte (BUEK 50): Aus den in der Bodenkarte angegebenen Bodentypen wird abgeleitet, ob es sich um stau- und/oder grundwasserbeeinflusste Böden handelt, die nicht für Versickerungsmaßnahmen geeignet sind.
- 2) die Geologische Karte (GK 25 / GK 50): In der Geologischen Karte werden unterhalb der Geländeoberfläche anstehenden Sedimente/Gesteine betrachtet. Für die Auswertung wird petrographisch nach Grundwasserleitern und Grundwasserstauern unterschieden.
- 3) die Verteilung und die Mächtigkeit der Grundwasserhemmer aus dem geologischen 3D Strukturmodell: Hier werden die im geologischen Strukturmodell ausgewiesenen grundwasserhemmenden Schichten oberhalb des Zielaquifers bewertet. Dabei geht sowohl die Verbreitung der Hemmer als auch deren Mächtigkeit in die Bewertung ein. Für den Landkreis Harburg wurde der Zielaquifer „Hy-L2“ definiert. Dieser entspricht dem Aquifer, der unter der saalezeitlichen Drenthe-Grundmoräne („Hy-H1“) ansteht. Oberhalb dieses Grundwasserhemmers Hy-H1 werden zusätzlich noch ein weiterer lokal vorkommender (Deck-)Hemmer „Hy-H0“ sowie die jeweils darüber bzw. darunter vorkommenden Aquifere „Hy-L1“ und „Hy-L0“ in der Bewertung berücksichtigt.
- 4) die Mächtigkeit der ungesättigten Zone: Die ungesättigte Zone umfasst nach DIN 4049-3 „den Gesteinskörper der zum Betrachtungszeitraum nicht vollständig mit Wasser erfüllt ist“, oder allgemein den Porenraum zwischen der Geländeoberfläche und der Grundwasserdruckfläche des obersten Grundwasserstockwerks.

4.2 Erstellung eines geologischen 3D Strukturmodells

Ein geologisches Strukturmodell ist Voraussetzung für eine fundierte hydrogeologische Standortbewertung. Insbesondere die Bewertung der beiden Eingangsparameter „Verteilung und Mächtigkeit der Grundwasserhemmer“ und „Mächtigkeit der ungesättigten Zone“ ist ohne ein

Strukturmodell nicht möglich. Bei der Erstellung des Strukturmodells konnte in diesem Falle auf die Strukturinformation eines bestehenden Modells zurückgegriffen werden. HAMBURG WASSER genehmigte zu diesem Zwecke die Verwendung des bestehenden Nordheide-Modells (GEO-INFOMETRIC 2006). Dieses Modell hat eine räumliche Abdeckung von ca. 80 % der Fläche des Landkreises Harburg. Zusätzlich wurden mehr als 400 verfügbare Bohrungen mit mindestens 10 m Bohrtiefe beim LBEG angefordert und für die Erstellung eines landkreisweiten Strukturmodells herangezogen.

Den schematischen Aufbau des geologischen 3D-Strukturmodells gibt folgende Tabelle wieder.

Tabelle 1: Schematischer Aufbau Strukturmodell (roter Rahmen = Zielaquifer)

Einheit Struktur- modell	Nomenklatur LBEG "Hydrostratigraphische Gliederung Niedersachsens" (GeoFakten 8 bzw. 21)	Beschreibung
Hy-L0	L0-L1	Sedimente oberhalb des Hy-H0. I.d.R. ungesättigte Zone.
Hy-H0	H1-H3.1	Drenthe2-Grundmoränen sowie teilweise jüngere grundwasserhemmende Ablagerungen (Mudden, Torfe, limnische Ablagerungen). „Deckhemmer“.
Hy-L1	L0-L2	Holozäne, warthezeitliche und saalezeitliche Ablagerungen (Schmelzwasserablagerungen, Flussschotter, Flussterrassenablagerungen, Flugsande, etc.)
Hy-H1	H3.2-H3.3	Drenthe1-Grundmoränen sowie teilweise elsterzeitliche Grundmoränen und Beckenschluffe
Hy-L2	L2-L3	saalezeitliche Ablagerungen (Schmelzwasserablagerungen, Flussschotter, Flussterrassenablagerungen, etc.)

Neben den Bohrdaten und dem Strukturmodell von HAMBURG WASSER wurden die geologischen Schnitte des LBEG sowie die Geologischen Kartenwerke (GK 25 und GK 50) bei der Auswertung berücksichtigt. Außerdem wurde die Lage der Grundwasseroberfläche als Unterscheidungskriterium der Grundwasserhemmer verwendet. Die punktuellen Informationen der Bohrprofile wurden geologisch interpretiert und zu lithologisch zusammengehörigen Schichten zusammengefasst. Anschließend wurden die Ober- bzw. Unterkanten der geologischen Strukturen interpoliert und mit den Schichten des Nordheide-Modells verbunden.

Das erstellte 3D- Strukturmodell liefert Informationen über den Aufbau des Untergrundes und im Speziellen über die Verbreitung und die Mächtigkeit von grundwasserhemmenden Schichten. Im Sinne der Fragestellung ist ein besonderes Augenmerk auf die genaue Verbreitung der Grundwasserhemmer zu legen. Da das Vorkommen von Hemmern oberhalb des Zielaquifers entweder zum Ergebnis „nicht geeignet“ oder zu einer Abstufung in der Bewertung führt, ist

die Verwendung von möglichst vielen Informationen ratsam. Ein vereinfachtes Strukturmodell, welches z.B. nur unter Verwendung von wenigen ausgesuchten Bohrungen erstellt wurde, würde hier zu deutlich unsichereren (oder falschen) Ergebnissen führen, als ein umfangreiches Strukturmodell. Wird ein Zielaquifer gewählt, der unterhalb der in Nord-Niedersachsen fast flächenhaft verbreiteten Drenthe-Grundmoräne liegt, so ist es erforderlich, geologische Fenster in dieser Moräne so gut wie möglich abzubilden. Hierauf wurde bei der Erstellung des Strukturmodells gesteigerte Aufmerksamkeit gelegt.

4.3 Erstellung eines Grundwassergleichenplans und Ableitung des Grundwasserflurabstandes

Ein Grundwassergleichenplan gibt die Höhenlage der Oberfläche der interpolierten Standrohrspiegelhöhen wieder (Grundwasserdruckfläche). Er ist Grundlage für die Berechnung der Mächtigkeit der ungesättigten Zone, die im vierten Eingangsparameter bewertet wird.

Die Lage der Grundwasseroberfläche wurde in diesem Projekt aus dem von HAMBURG WASSER zur Verfügung gestellten regionalen Grundwassermodell „HAMBURG MODELL“ herangezogen. Sie repräsentiert in etwa langjährige mittlere Grundwasserverhältnisse. Das Grundwassermodell deckt etwa 80 % der Landkreisfläche ab. In den nicht abgedeckten Bereichen wurden Stützstellen aus der amtlichen Hydrogeologischen Übersichtskarte (HUEK 200: „Lage der Grundwasseroberfläche“) verwendet.

Für die Berechnung der Grundwasserüberdeckung wird die Geländehöhe – abgeleitet aus dem DGM – mit der Lage der Grundwasseroberfläche verschnitten. Aufgrund der besonderen Bedeutung des Grundwasserflurabstandes wurde in den Flussniederungen ein DGM 5 und in allen anderen Bereichen ein DGM 25 verwendet, um die Geländehöhen abzubilden. Beide Geländemodelle wurden zu einem gemeinsamen Geländemodell mit einer Rasterzellengröße von 10 x 10 m verschmolzen.

Für den Landkreis Harburg wurden Grundwasserflurabstände³ von bis zu 75 m berechnet. Weite Teile der Landesfläche weisen jedoch Grundwasserflurabstände von kleiner als 2 m auf. Dies ist vor allem in den Flusstälern und insbesondere in der Elbmarsch der Fall. Die größten Flurabstände treten im Bereich der Harburger Berge im Nordwesten bzw. im Süden im Bereich des Wilseder Berges auf.

³ Der Grundwasserflurabstand wird lt. DIN 4049-3 als „*lotrechter Abstand zwischen einem Punkt an der Geländeoberfläche und der Grundwasseroberfläche des ersten Grundwasserstockwerks*“ definiert. Für die beiden Bewertungsverfahren „Grundwasser“ und „Oberflächenwasser“ wird pragmatisch „Grundwasserflurabstand = Mächtigkeit ungesättigte Zone“ angesetzt.

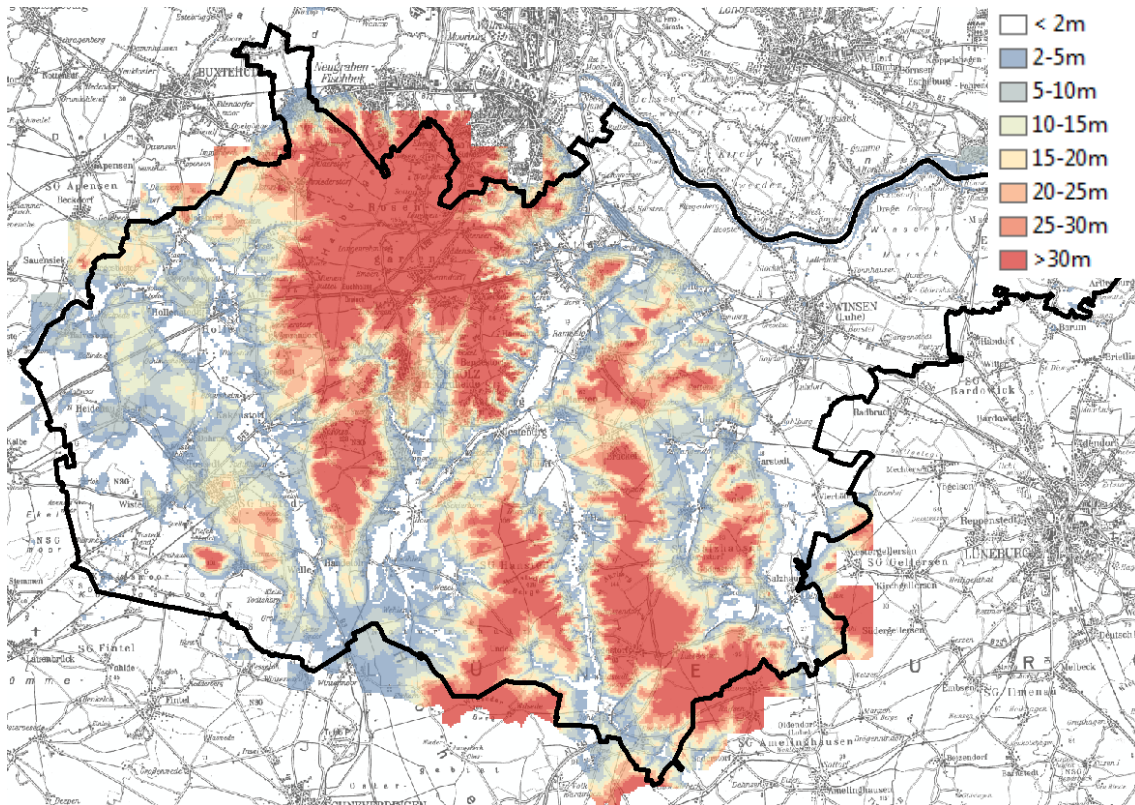


Abbildung 5: Grundwasserflurabstand

4.4 Beschreibung der Methodik und der Auswertung

4.4.1 Auswertung der Bodenübersichtskarte BUEK 50

Aus den Bodentypen wird abgeleitet, ob es sich um Stau- und/oder grundwasserbeeinflusste Böden handelt, die nicht für Versickerungsmaßnahmen geeignet sind. Als Indizien für oberflächennahe Stauer werden die Bodentypen Pseudogley (S) und Hochmoor (HH) angesehen. Alle in der Bodenkarte vermerkten Flächen mit diesen Bodentypen werden selektiert und auskartierte.

Weiterhin gehen die grundwasserbeeinflussten Bodentypen wie Gley (G), Niedermoor (HN), Marschen (M) und Auenböden (AB) in die Bewertung ein, da aus ihrem Vorkommen abgeleitet wird, dass Grund- oder Stauwasser oberflächennah ansteht.

Für die Bewertung wird zudem zwischen Normbodentyp und Mischformen mit einem anderen Bodentyp unterschieden.

Bewertung „Boden“:

Auenböden, Marschböden, Moorböden, sowie Gleye und Pseudogleye	Wert: 0 (nicht geeignet)
Gley- und Pseudogley-Mischböden (Haupttyp: Gley oder Pseudogley)	Wert: 1 (mäßig geeignet)
Gley- und Pseudogley-Mischböden (Untertyp: Gley oder Pseudogley)	Wert: 2 (geeignet)
alle anderen Bodentypen	Wert: 3 (sehr geeignet)

4.4.2 Auswertung der Geologischen Karte

In der Geologischen Karte werden unterhalb der Geländeoberfläche anstehende Sedimente/Gesteine (Betrachtungstiefe 2 m) dargestellt. Für die Auswertung wird petrographisch nach Grundwasserleitern und Grundwasserstauern unterschieden. Für den LK Harburg liegen fast flächendeckend Daten der GK 25 vor. Bereiche, die nicht von der GK 25 abgedeckt sind, wurden durch die GK 50 ergänzt.

Das Attributfeld „Schichten“ in der digitalen Geologischen Karte des LBEG enthält aggregierte Informationen zu Stratigraphie, Petrographie und Genese. Dieses Feld wurde im Rahmen einer GIS-Bearbeitung ausgelesen und die vorhandene Information über Abfragen hinsichtlich der Durchlässigkeit der oberflächennah anstehenden Sedimente bewertet. Dabei wurde in erste Linie die Petrographie berücksichtigt. Im Zweifelsfalle wurden auch stratigraphische oder genetische Informationen mitverarbeitet.

Bewertung Geologie:

Hemmer	Wert: 0 (nicht geeignet)
Leiter	Wert: 3 (sehr geeignet)

4.4.3 Verteilung und die Mächtigkeit der Grundwasserhemmer aus dem geologischen 3D Strukturmodell

Hier werden die im geologischen Strukturmodell ausgewiesenen grundwasserhemmenden Schichten oberhalb des Zielaquifers bewertet. Dabei geht sowohl die Verbreitung der Hemmer als auch deren Mächtigkeit in die Bewertung ein. Da der Zielaquifer Hy-L2 bis zu zwei überlagernde Grundwasserhemmer (Hy-H0 und Hy-H1, siehe Tabelle 1) aufweisen kann, wird ein geschachteltes Bewertungsverfahren angewandt, welches in Abbildung 6 dargestellt ist.

Für die Bewertung wird zuerst der oberste Grundwasserhemmer berücksichtigt. Dabei werden in Anlehnung an die Auswertung des LBEG zum Schutzpotential der Grundwasserüberdeckung (LBEG 1982) für die Mächtigkeiten des oberflächennahen Grundwasserhemmers Hy-H0 folgende Abstufungen gewählt:

Bewertung Hemmer Hy-H0:

Hemmer Hy-H0 > 5 m mächtig	Wert: 0 (nicht geeignet)
Hemmer Hy-H0 zwischen 1 m und 5 m mächtig	Wert: 1 (mäßig geeignet)
Hemmer Hy-H0 < 1 m mächtig	Wert: 2 (geeignet)
kein Hemmer Hy-H0 vorhanden	Wert: 3 (sehr geeignet)

Da oberhalb des Zielaquifers Hy-L2 aber zwei unterschiedliche Grundwasserhemmer vorkommen können, wird im nächsten Bearbeitungsschritt nach dem Bewertungsschema in Abbildung 6 vorgegangen:

Kommt Hy-H0 vor, so wird die Fläche je nach Mächtigkeit des Hy-H0 mit 0 bis 2 Punkten bewertet (siehe oben). Fehlt der Hy-H0, so wird das Vorkommen von Hy-H1 geprüft. Kommt Hy-H1 vor und ist dieser oberflächennah anzutreffen (weniger als 5 m Grundwasserleiter-Überdeckung), so wird er bewertet wie der Hy-H0. Kommt Hy-H1 vor, ist aber erst tiefer im Untergrund anzutreffen (mehr als 5 m Grundwasserleiter-Überdeckung), so wird von der ursprünglichen Bewertung (Hy-H0 nicht vorhanden = 3 Punkte) ein Punkt abgezogen und – unabhängig von der Mächtigkeit des Hy-H1 – die Fläche mit 2 Punkten bewertet. Dieser Herangehensweise liegt die Annahme zugrunde, dass die zusätzlichen Sickerwassermengen durch Waldumbau in einen oberen, relativ mächtigen Grundwasserleiter gelangen, somit „im System“ sind. Das Grundwasser gelangt dann zwar nicht unmittelbar, auf direktem Wege in den Zielaquifer, erreicht ihn aber schließlich. Ein Ausschluss solcher Flächen erscheint daher nicht gerechtfertigt.

Fehlen beide Grundwasserhemmer, so wird die Fläche insgesamt mit 3 Punkten bewertet.

Die Gesamtbewertung aller Hemmer (Hy-H ges) oberhalb des Zielaquifers wird im nachfolgenden Schema zusammengefasst.

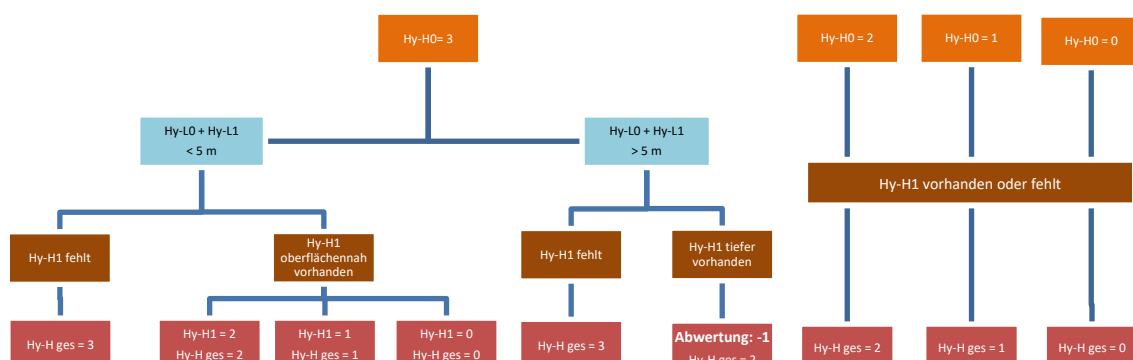


Abbildung 6: Bewertungsschema „Hemmer im Strukturmodell“ für zwei Grundwasserhemmer oberhalb des Zielaquifers

4.4.4 Auswertung der Mächtigkeit der ungesättigten Zone

Es wird angesetzt, dass eine geringe Mächtigkeiten ($< 3\text{m}$) der ungesättigten Zone von Nachteil für die Versickerungswirksamkeit ist. Als Grund wird hier zum einen die Gefahr von Ver-nässung gesehen, und zum anderen wird ein Teil des zusätzlich versickernden Wassers durch Kapillaraufstieg und Verdunstung sowie durch Aufnahme durch Pflanzen wieder schnell aus dem System genommen. Zudem treten geringe Mächtigkeiten der ungesättigten Zone vor allem in Gewässernähe auf, wenn die Gewässer einen hydraulischen Kontakt zum Grundwasser haben. In einem solchen Falle würde die zusätzliche Sickerwassermenge zeitnah als erhöhter Abfluss über die Fließgewässer wieder abgeführt.

Sehr große Mächtigkeiten der ungesättigten Zone werden ebenfalls als (geringer) Nachteil für die Versickerungswirksamkeit bewertet, da hier aufgrund der langen Fließwege im Porenraum mit längeren Fließzeiten zu rechnen ist und auch die Dispersion eine zunehmende Rolle spielt. Hierdurch kommt es zu einem abgepufferten Effekt des Sickerwasserzustroms sowie zu erhöhten Unsicherheiten in der Bewertung, ob das Sickerwasser tatsächlich dem Zielaquifer zugutekommt. Großen Grundwasserüberdeckungen ($> 30\text{ m}$) wird daher der Wert 2 („geeignet“) zugeordnet.

Folgende Bewertung wird angesetzt:

Bewertung Mächtigkeit ungesättigte Zone:

Mächtigkeit der ungesättigten Zone $< 3\text{ m}$	Wert: 0 (nicht geeignet)
Mächtigkeit der ungesättigten Zone zwischen 3 m und 30 m	Wert: 3 (sehr geeignet)
Mächtigkeit der ungesättigten Zone $> 30\text{ m}$	Wert: 2 (geeignet)

4.5 Gesamtbewertung der Versickerungswirksamkeit

Für die hydrogeologische Gesamtbewertung der Versickerungswirksamkeit von grundwasseranreichernden Maßnahmen an einem Standort werden die Einzelbewertungen der vier Eingangsparameter addiert. Ein Standort wird jedoch immer mit dem Wert 0 (nicht geeignet) bewertet, wenn mindestens einer der Eingangsparameter den Wert 0 erhalten hat.

Für die Gesamtbewertung werden alle Informationen auf ein Bewertungsraster von $200 \times 200\text{ m}$ Größe übertragen. Die räumliche Auflösung dieser Bewertung orientiert sich an den Eingangsdaten. Eine noch feinere Aufschlüsselung würde eine Genauigkeit suggerieren, die nicht durch die Eingangsdaten abgesichert ist.

Nach der Addition der Einzelparameter können im besten Falle 12 Punkte an einem Standort erreicht werden. Dann würden also alle vier bewerteten Eingangsdaten eine sehr gute Eignung hinsichtlich der Versickerungswirksamkeit anzeigen. Der geringste Wert, der – abgesehen von 0 Punkten – vorkommen kann ist der Wert 7 (Boden: 1 Punkt, Geologie: 3 Punkte, Strukturmodell Hemmer: 1 Punkt, Mächtigkeit der ungesättigten Zone: 2 Punkte).

Folgende Unterteilung für die Gesamtbewertung wurde gewählt:

Gesamtbewertung Standorteignung für grundwasseranreichernde Maßnahmen:

0 Punkte	nicht geeignet	rote Flächensignatur
7-9 Punkte	mäßig geeignet	gelb-orange Flächensignatur
10-11 Punkte	geeignet	hellgrüne Flächensignatur
12 Punkte	sehr geeignet	dunkelgrüne Flächensignatur

5 ENTWICKLUNG EINES BEWERTUNGSVERFAHRENS ZUR VERSICKERUNGSWIRKSAMKEIT AUF DAS ABFLUSSGESCHEHEN VON OBERFLÄCHENGEWÄSSERN

5.1 Allgemeine Beschreibung

Die Versickerungseignung der oben beschriebenen Methode „Grundwasser“ bezieht sich auf die Erhöhung des Grundwasserdargebots in einem für die Fragestellung relevanten Grundwasserleiter (hier Hy-L2). Entweder steht dieses erhöhte Grundwasserdargebot für Grundwassernutzungen zur Verfügung oder es führt ungenutzt letztendlich zu einem erhöhten Abfluss in den Oberflächengewässern.

Es ist daher anzunehmen, dass Steigerungen von Sickerwassermengen durch Waldumbaumaßnahmen auch positive Auswirkungen auf den Basisabfluss der Oberflächengewässer haben. Es wurde daher ein im folgenden beschriebenes Verfahren entwickelt, welches den Fokus von der Anreicherung des Grundwassers auf die Steigerung / Stützung des Oberflächenwasserabflusses lenkt und die standortbezogene Wirksamkeit von Waldumbaumaßnahmen auf das Abflussgeschehen der Oberflächengewässer abbildet und bewertet.

Folgende Fragestellungen sind mit dem zu entwickelnden Verfahren u. a. zu beantworten:

- Wie ist die Wirkung der zusätzlichen Sickerwassermengen auf den Abfluss in den Oberflächengewässern zu bewerten?
- Kann durch Waldumbaumaßnahmen ein wirkungsvoller Beitrag zur Stützung des Basisabflusses der Oberflächengewässer geleistet werden?
- Welche Waldstandorte sind besonders geeignet, um den Basisabfluss der Gewässer bzw. bestimmter Gewässerabschnitte zu stützen?

Für die Bearbeitung der Fragestellung ist zunächst das Verständnis erforderlich, wie sich der Gesamt-Abfluss eines Oberflächengewässers zusammensetzt. Der Abfluss an einem bestimmten Punkt eines Fließgewässers kann als integrierte Antwort des oberirdischen und unterirdischen Einzugsgebietes auf den Niederschlag verstanden werden. Die Abflussbildung wird in Abbildung 7 schematisch dargestellt.

Allgemein hat alles Wasser, welches sich als Abfluss im Fließgewässer wiederfindet, seinen Ursprung im Niederschlag. Trifft der Niederschlag auf den Boden auf, so fließt – vereinfacht – ein Teil oberflächlich dem Vorfluter zu (Landoberflächenabfluss), ein Teil versickert und fließt in der ungesättigten Zone in Richtung des Vorfluters (Zwischenabfluss) und ein Teil versickert bis er in der gesättigten Zone angekommen ist und als neugebildetes Grundwasser (Grundwasserabfluss) dem Vorfluter zuströmt (Abbildung 7). Aufgrund der Fließzeitlänge kommt es zu einer verzögerten Ankunft des Niederschlags über den Zwischenabfluss und den Grundwasserabfluss im Vorfluter. Bei verzögertem Eintreffen des Wassers im Vorfluter spricht man vom Basisabfluss, bei unmittelbarem oder sehr zeitnahe Eintreffen vom Direktabfluss.

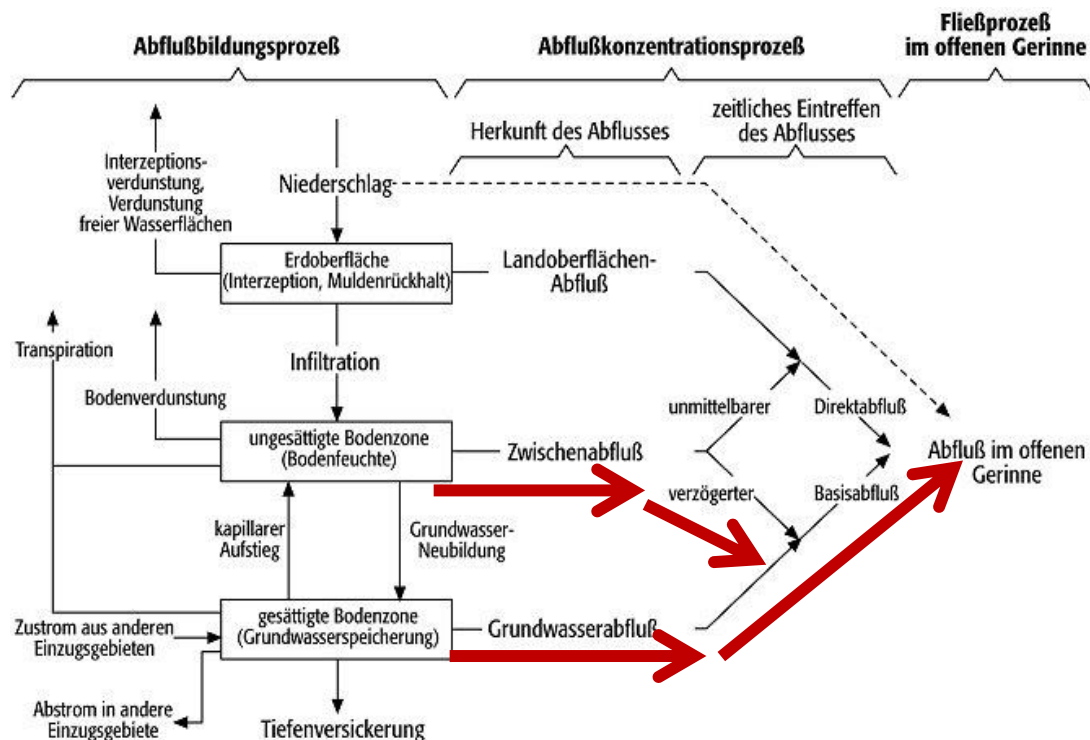


Abbildung 7: Schema Abflussbildung. Quelle: Baumgartner, A., & Liebscher, H. J. (1990)

5.2 Methodische Vorbedingungen und Bewertungsmaßstab

Durch Waldumbau und der daraus resultierenden Erhöhung der Sickerwassermenge lässt sich prinzipiell auch die Abflussmenge im Gewässer steigern. Für eine ökologisch nachhaltige, positive Beeinflussung der Abflussmengen im Gewässer ist jedoch eine Steigerung des Basisabflusses erforderlich. Kommt es zu einer Erhöhung des Direktabflusses, so verpufft die Wirkung schnell, oder es hat sogar negative Auswirkungen (z.B. Erosion der Gewässersohle).

Der Faktor (Fließ-) Zeit spielt somit eine Rolle und muss bei der Methodik berücksichtigt werden. Die Fließzeit kann ohne Grundwassermodell jedoch nur indirekt hergeleitet werden. Mögliche Parameter, über die eine Differenzierung getroffen werden könnte, sind die Distanz zum Gewässer mit der Annahme, dass eine größere Distanz zu einer längeren Fließzeit führt und / oder der Grundwasserflurabstand. Hierfür gilt die Annahme, dass die Fließzeit zunimmt, je höher der Grundwasserflurabstand ist, da die Versickerungszeiten zunehmend eine Rolle spielen und Gebiete mit hohen Flurabständen oftmals weit von den Gewässern entfernt liegen.

Bereiche, in denen der Grundwasserflurabstand sehr gering ist, sind für Waldumbaumaßnahmen eher ungeeignet, da ein Teil der zusätzlichen Sickerwassermenge über kapillaren Aufstieg und Verdunstung aus dem Untergrund entzogen wird. Allgemein wird der durchwurzelte Boden bis in zwei Meter Tiefe als ungeeignet erachtet. Neben dem kapillaren Aufstieg würden hier noch zusätzlich eine Aufnahme von (Sicker-) Wasser und anschließende Transpiration durch Pflanzen möglich sein.

Zur Entwicklung des Bewertungsverfahrens für die Versickerungswirksamkeit auf das Abflussgeschehen der Oberflächengewässer ist die Frage nach dem Bewertungsmaßstab von entscheidender Bedeutung. Im Rahmen eines Projektarbeitstreffens im Oktober 2017 in Winsen wurde durch CAH vorgeschlagen, nicht komplette Fließgewässer als Ganzes (z. B. die Seeve), sondern einzelne Gewässer-Teilabschnitte zu bewerten. Als Bewertungsmaßstab wurden die oberirdischen Einzugsgebiete der einzelnen Gewässerabschnitte vorgeschlagen. Ein Datensatz mit einer entsprechenden Einzugsgebietsuntergliederung liegt beim NLWKN vor und wurde für das Projekt zur Verfügung gestellt.

Da der Abfluss an einem Gewässerpunkt jedoch eine integrierte Antwort des oberirdischen und insbesondere des unterirdischen Einzugsgebiets (Grundwasserzustrom) auf den Niederschlag ist, wird deutlich, dass eine auf oberirdischen Einzugsgebiete fokussierte Bewertung der Fragestellung eigentlich nicht vollumfänglich gerecht wird. Die Verwendung der oberirdischen Einzugsgebiete hat jedoch pragmatische Gründe: zum einen liegen die Daten für ganz Niedersachsen bereits aufbereitet beim NLWKN vor und zum anderen haben die oberirdischen Teil-Einzugsgebiete vorgegebene Außengrenzen und definierte Oberlieger und Unterlieger. Die unterirdischen Einzugsgebiete sind hingegen nicht klar bekannt und können nur aus Grundwassergleichplänen oder numerischen Grundwassermodellberechnungen abgeleitet werden. Je nach Datenqualität der Eingangsdaten und angewandter Berechnungsmethode ergeben sich daher Streubreiten in Lage und Größe der unterirdischen Einzugsgebiete. Eine Vergleichbarkeit zwischen einzelnen Einzugsgebieten wäre so nur schwer möglich.

Für das Bewertungsverfahren daher oberirdische Einzugsgebiete (EZG) als Bewertungsmaßstab verwendet von denen im Landkreis Harburg ca. 160 (EZG) kartiert sind und berücksichtigt wurden.

5.3 Ursprüngliches Konzept der Basisabfluss-Berechnung

Zur Bewertung der Wirkung der zusätzlichen Sickerwassermengen auf den Basisabfluss in den Oberflächengewässern und zur Beantwortung der Frage, ob ein wirkungsvoller Beitrag zur Stützung des Basisabflusses der Oberflächengewässer geleistet wird, müssen je bewertetem Gebiet zwei Eingangsdaten berechnet werden:

- 1) Wie groß ist der Sickerwassermehrertrag bei Umbau aller umbauwürdigen Flächen in einem EZG
- 2) Wie hoch ist der Basisabfluss aus diesem EZG in den zugehörigen Gewässerabschnitt, inkl. des Basisabflusses, der in oberstromig liegenden EZG gebildet wird?

Der Quotient beider Parameter ist ein Maß für die Stärke der Wirkung?

$$\frac{\text{pot. Neubildungssteigerung (= Sickerwassermehrertrag durch Waldumbau)} \\ \text{in einem oberird. EZG}}{\text{gesamter Basisabfluss in diesem oberird. EZG, inkl. oberstromiger EZG}} \quad (1)$$

Durch diese Berechnung wird gewährleistet, dass ein gleich großer Sickerwassermehrertrag in einem EZG mit relativ geringem Basisabfluss in ein kleines Gewässer eine größere Wirkung erzielt, als in einem EZG eines großen Gewässers, bei dem der Sickerwassermehrertrag im Gesamtabfluss „untergeht“. Insbesondere die Oberläufe der Fließgewässer stehen hierbei im Fokus, da sie durch ihre vergleichsweise geringen Basisabflussmengen sehr sensibel auf natürliche oder anthropogen verursachte Schwankungen der Basisabflussmengen reagieren. Zudem sind die Oberläufe häufig ökologisch besonders wertvoll.

Die Berechnung des gesamten Basisabflusses in einem oberirdischen EZG ist jedoch nicht trivial. Als erste Näherung eignet sich die einfache Wasserhaushaltsgleichung:

$$A = N - V \text{ (Abfluss = Niederschlag - Verdunstung)} \quad (2)$$

Der Term „Niederschlag – Verdunstung“ kann vereinfacht gleichgesetzt werden mit „Grundwasserneubildung“ (GWNB). Daten zur Grundwasserneubildung liegen bei den Fachbehörden flächendeckend vor und können somit herangezogen werden, um den Abfluss, bzw. besser den Basisabfluss abzuschätzen. Vereinfacht wird also angenommen:

$$A \approx \text{Grundwasserneubildung} \quad (3)$$

5.4 Überprüfung der Abflussberechnung anhand von Messdaten

Diese stark vereinfachte Annahme, dass der Basisabfluss der Grundwasserneubildung im zugehörigen Einzugsgebiet entspricht, ist für große Einzugsgebiete hinreichend genau, um die abflusswirksame Menge aus der Grundwasserneubildung zu bestimmen. Vor der Übertragung auch auf kleinere Einzugsgebiete wurde jedoch die Gültigkeit der Annahme anhand von Messdaten von 18 Gewässerpegeln an acht Fließgewässern im Landkreis Harburg überprüft. Die Lage der überprüften Gewässerpegel ist in Abbildung 8 dargestellt. Die Pegeldata bilden bereits im Rahmen des laufenden Wasserrechtsverfahrens zur Erneuerung des Wasserrechts für die Fassungen Nordheide Ost und West sowie die Fassung Schierhorn der Hamburger Wasserwerke GmbH die Grundlage für umfangreichen Untersuchungen und Berechnungen (CAH 2014).

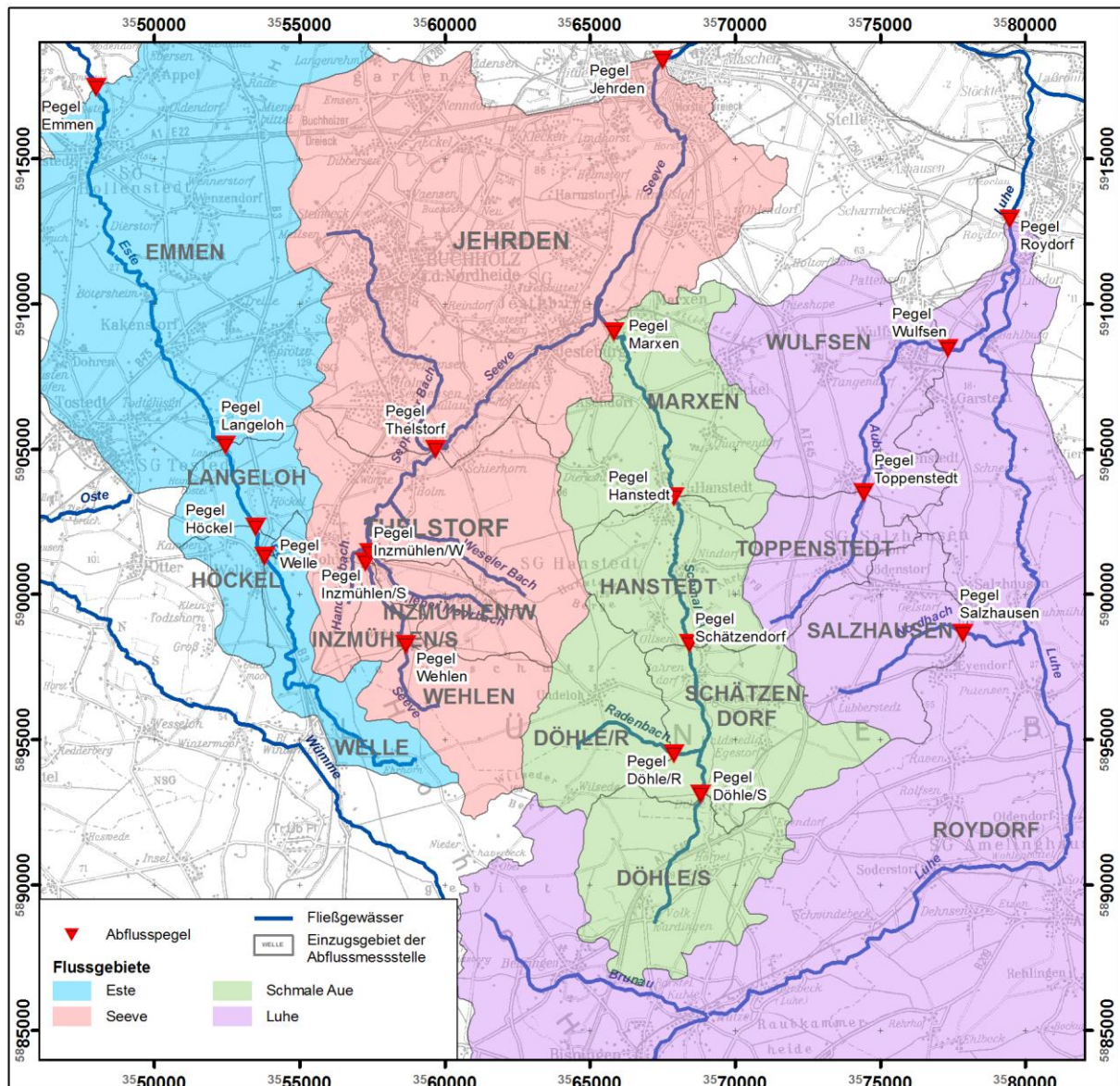


Abbildung 8: Lage der überprüften Abflusspegel im LK Harburg

Für alle in Abbildung 8 untersuchten Pegel wurde u. a. der Basisabfluss über die mittleren monatlichen Niedrigabflüsse (nach WUNDT 1958) aus den vorliegenden, langjährigen Zeitreihen abgeleitet. Die Ergebnisse befinden sich in der Tabelle 2 in der Spalte „MoMNQ [m³/s]“. Weiterhin wurde der mittlere Abfluss ermittelt. Er wird nachrichtlich in der Spalte Mittelwert „MQ [m³/s]“ aufgeführt.

Für die aufgeführten Pegel wurde anschließend unter Verwendung der umgewandelten vereinfachten Wasserhaushaltsgleichung (3) der Basisabfluss aus der Flächengröße der Einzugsgebiete der Pegel und der Grundwasserneubildungsrate abgeschätzt. Als Datengrundlage für die gebietsspezifische Grundwasserneubildung wurde das vom LBEG herausgegebene Modell mGROWA (2013) herangezogen, das auf langjährigen Mittelwerten (1961 – 1990) der Eingangsparameter beruht (siehe Spalte „GWNb=abgesch. Basisabfluss [m/s]“).

Schließlich wurde anhand der Daten der 18 Gewässerpegel überprüft, in wie weit gemessene und nach dem Verfahren nach WUNDT berechnete Basisabflüsse mit denen aus der Berechnung von Einzugsgebietsgröße und Grundwasserneubildungsrate übereinstimmen. Die prozentuale Abweichung beider Methoden wird in Spalte „Verhältnis MoMNQ / abgesch. Basisabfluss“ in Tabelle 2 aufgelistet.

Tabelle 2: Aus Messdaten ermittelter Basisabfluss (MoMNQ) und über die einfache Wasserhaushaltsgleichung abgeschätzter Basisabfluss (GWNB = abgeschätzter Basisabfluss) an ausgewählten Pegeln im Vergleich

Gewässer	Nr	Pegel	Beobachtungsperiode: 1983-2013				EZG-Größe [km²]	GWNB aggregiert für EZG [m³/a]	GWNB=abgeschätzter Basisabfluss [m³/s]	Verhältnis MoMNQ/abgesch. Basisabfluss
			Zeitraum	MoMNQ [m³/s]	Mittelwert MQ [m³/s]	Verhältnis MoMNQ/MQ [%]				
Este	1	WELLE	1983-2013	0,056	0,076	74,5%	19,5	4.261.425	0,135	42%
	2	HÖCKEL	1983-2003	0,133	0,192	70,1%	28	5.609.836	0,178	75%
	3	LANGELOH	1983-2013	0,229	0,314	73,3%	46	8.960.003	0,284	81%
	4	EMMEN	1983-2013	1,408	1,780	79,3%	189	44.013.894	1,396	101%
Seeve	5	WEHLEN	1983-2003	0,031	0,037	84,9%	22	5.510.144	0,175	18%
	6	INZMÜHLEN/S	1983-2013	0,345	0,370	93,4%	27	6.485.877	0,206	168%
	8	THELSTORF	1983-2013	0,876	1,005	87,5%	86	22.504.193	0,714	123%
	9	JEHRDEN	1983-2013	3,554	4,321	82,4%	409	108.279.156	3,434	104%
Wehleener Moorbach	7	INZMÜHLEN/W	1983-2003	0,067	0,085	80,0%	12	3.221.767	0,102	66%
Schmale Aue	10	DÖHLE/S	1983-2013	0,095	0,130	73,0%	34	8.446.208	0,268	35%
	12	SCHÄTZENDORF	1984-2003	0,420	0,525	80,3%	91	26.185.235	0,830	51%
	13	HANSTEDT	1983-2013	0,601	0,794	76,0%	116	30.882.331	0,979	61%
	14	MARXEN	1983-2013	0,856	1,140	75,4%	157	43.181.441	1,369	63%
Radenbach	11	DÖHLE/R	1984-2003	0,109	0,128	85,3%	24	7.826.490	0,248	44%
Aubach	15	TOPPENSTEDT	1983-2013	0,039	0,075	51,4%	17,5	4.041.934	0,128	30%
	16	WULFSEN	1983-2013	0,313	0,461	68,2%	68	15.095.590	0,479	65%
Nordbach	17	SALZHAUSEN	1983-2013	0,119	0,175	68,3%	28	6.971.420	0,221	54%
Luhe	18	ROYDORF	1983-2013	3,828	4,632	82,9%	465	94.172.870	2,986	128%

Die Auswertung zeigt, dass beide Basisabflusswerte bei den großen Einzugsgebieten der Gewässer-Unterläufe sehr gut übereinstimmen. So beträgt z. B. die Abweichung an den Pegeln Emmen und Jehrden maximal 4 %. Für den Pegel Roydorf an der Luhe ergibt sich keine gute Übereinstimmung, was jedoch darauf zurückzuführen ist, dass ein großer Teil des Luhe-Einzugsgebietes außerhalb des Landkreises Harburg liegt und hierfür keine Daten vorlagen.

Die Auswertung zeigt weiter, dass sich immer schlechtere Übereinstimmungen ergeben, je weiter im Gewässer-Oberlauf ein Pegel liegt. Insgesamt überschätzt die Methode der vereinfachten Wasserhaushaltsgleichung (Abflussberechnung aus Grundwasserneubildung) die tatsächlichen Basisabflüsse zum Teil deutlich. Am Pegel Wehlen an der Seeve beträgt der aus Messwerten abgeleitete Basisabfluss lediglich 18 % dessen, was über die vereinfachte Wasserhaushaltsgleichung abgeschätzt wurde.

Als Ergebnis dieser Überprüfung kann zusammenfassend festgestellt werden, dass die vorgeschlagene Methode an den Pegeln im Unterlauf eine sehr hohe Abbildungsgüte aufweist, jedoch erhebliche Abweichungen im Bereich der Gewässeroberrläufe vorhanden sind.

Ursachen hierfür sind zum einen in geologischen (z.B. Einfluss schwebender Grundwasserleiter) oder anthropogenen Besonderheiten (z.B. Teichwirtschaft) der kleinen Einzugsgebiete zu sehen. Zum anderen – und das ist der wesentlich entscheidendere Faktor – weichen hier die

oberirdischen und die unterirdischen Einzugsgebiete zum Teil deutlich voneinander ab. In der Regel wird ein Teil der im Oberlauf neugebildeten Grundwassermenge erst in einem weiter unten liegenden Fließgewässerabschnitt abflusswirksam und nicht in dem oberirdischen Einzugsgebiet, in dem der Niederschlag angefallen ist.

5.5 Modifikation des Konzepts zur Berechnung der Basisabflüsse

Als Folge der Überprüfung wurde die Notwendigkeit abgeleitet, die im ursprünglichen Konzept vorgeschlagene Herangehensweise zu modifizieren. Daher wurde eine Kalibrierung und Evaluation zwischen unterschiedlichen Methodenansätzen durchgeführt, um eine geeignete Möglichkeit zu finden, die abflusswirksame Grundwasserneubildung innerhalb der oberirdischen Einzugsgebiete auch für die Oberläufe der Gewässer besser abbilden zu können.

Zur Erhöhung der Anpassungsgüte des Verfahrens an die Messdaten („Kalibrierung“) wurden folgende Schritte durchgeführt und deren Auswirkung evaluiert:

- Ermittlung der unterirdischen EZG anhand des Grundwassergleichenplans aus dem regionalem Grundwassermodell „HAMBURG MODELL“ (siehe Kap. 4.3)
- Herleitung von zwei möglichen Parametern zur „Kalibrierung“ (Erhöhung der Anpassungsgüte) des Verfahrens: Grundwasserflurabstand und Distanz zum Gewässer
- Überprüfung der Auswirkungen der beiden Kalibriergrößen auf den Basisabfluss unter Verwendung verschiedener Wichtungsfaktoren (Evaluation)

Über die Wichtungsfaktoren werden alle Unwägbarkeiten summarisch erfasst und betrachtet. Die fachliche Herleitung erfolgt über Wahrscheinlichkeiten: je höher zum Beispiel der Grundwasserflurabstand, desto wahrscheinlicher wird die Neubildung dieser Flächen in einem weiter unterstromig liegenden EZG wirksam (Abbildung 9).

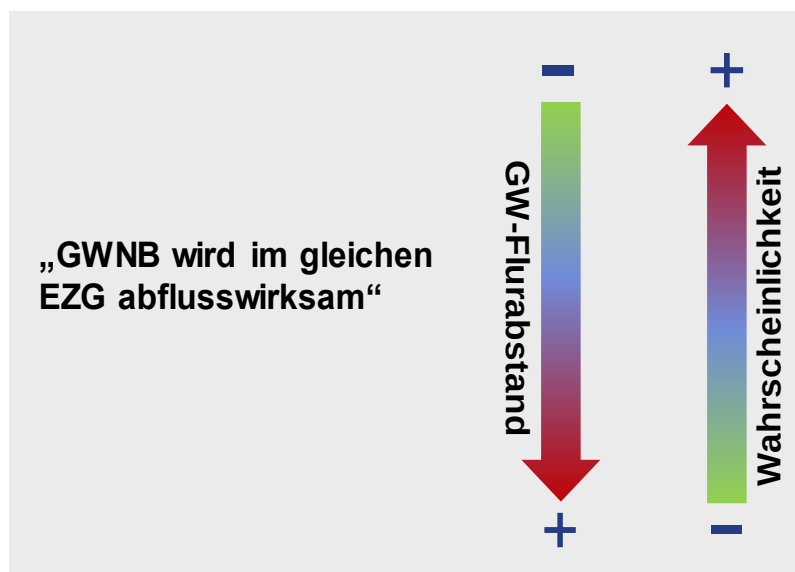


Abbildung 9 Beziehung zwischen GW-Flurabstand und Wahrscheinlichkeit

Insgesamt führt die Einführung von Kalibriergrößen in allen getesteten Modifikationen zu einer Verbesserung der Abbildungsgüte. Für die unterirdischen Einzugsgebiete ergibt sich jedoch die Einschränkung, dass deren Ermittlung nicht trivial ist und die Qualität stark von der Qualität des Datensatzes zur Grundwasseroberfläche abhängt. Je nach Qualität der Eingangsdaten und Auswertungsmethode ergibt sich eine unterschiedliche Form und Größe der unterirdischen Einzugsgebiete. Zudem lassen sich unterirdische Einzugsgebiete außerhalb des Landkreises nur schwer oder gar nicht bewerten.

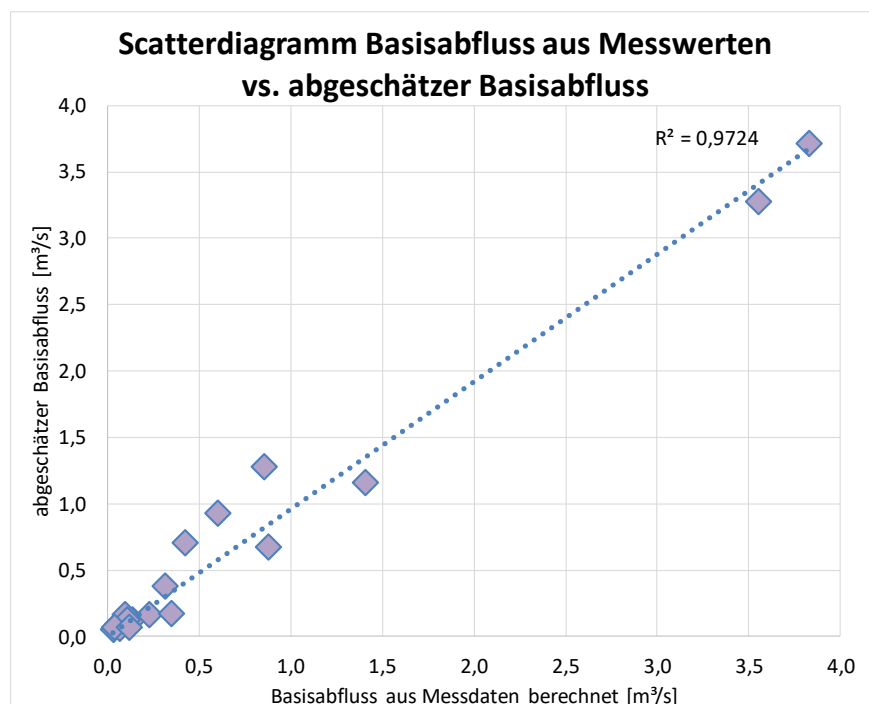
Auf einer Arbeitskreis-Sitzung im November 2017 in Winsen wurde nach ausführlicher Fachdiskussion übereingekommen, eine Methodenanpassung über die Kalibriergröße „Grundwasserflurabstand“ bzw. einem daraus abgeleiteten „Wichtungsfaktor“ vorzunehmen. Dabei erfolgt je Grundwasserflurabstandsklasse eine Wichtung, in welchem Umfang das in einem oberirdischen Einzugsgebiet neugebildete Grundwasser in dem zugehörigen Gewässerabschnitt abflusswirksam wird.

Die Kalibrierung erfolgte durch Variation einzelner Wichtungsfaktoren in mehreren Iterationen und anschließender Sensitivitätsanalyse zur Optimierung der Abbildungsgüte an allen 18 Pegeln im Vergleich zu den aus Messdaten abgeleiteten Basisabflüssen. Die besten Übereinstimmungen wurden mit nachfolgenden Parametern erreicht.

Tabelle 3: Kalibrierte Wichtungsfaktoren für den Parameter „Grundwasserflurabstand“

Flurabstand	Wichtungsfaktor <i>[Der %-Wert gibt den Anteil der GWNB an, der im betrachteten EZG abflusswirksam wird]</i>
0 - 2 m	90%
3 - 5 m	80%
5 - 10 m	60%
10 - 15 m	30%
15 - 20 m	20%
20 - 30 m	10%
> 30 m	5%

Die erzielte Abbildungsgüte für die 18 Gewässerpegel ergibt sich aus dem folgenden Scatterdiagramm (Abbildung 10):



Mittlere Abweichung

0,006 m³/s

Betrag der mittleren Abw.

0,135 m³/s

Bestimmtheitsmaß

$R^2 = 0,9724$

Abbildung 10: Scatterdiagramm Basisabfluss aus Messwerten vs. abgeschätzter Basisabfluss

Tabelle 4: Aus Messdaten ermittelter Basisabfluss (MoMNQ) und über die kalibrierte Methode abgeschätzter Basisabfluss (GWNB = abgeschätzter Basisabfluss) an ausgewählten Pegeln im Vergleich

Gewässer	Nr	Pegel	Zeitraum	MoMNQ [m³/s]	Mittelwert MQ [m³/s]	EZG-Größe [km²]	GWNB aggregiert für EZG [m³/a]	GWNB=abgeschätzter Basisabfluss [m³/s]	abs. Diff modelliert vs. gemessen [m³/s]	Verhältnis MoMNQ/abgesch. Basisabfluss	ursprüngl. Konzept
Este	1	WELLE	1983-2013	0,056	0,076	19,5	2.937.691	0,093	0,037	61%	42%
	2	HÖCKEL	1983-2003	0,133	0,192	28	3.893.948	0,123	-0,010	108%	75%
	3	LANGELOH	1983-2013	0,229	0,314	46	5.181.150	0,164	-0,065	139%	81%
	4	EMMEN	1983-2013	1,408	1,780	189	36.701.733	1,164	-0,244	121%	101%
Seeve	5	WEHLEN	1983-2003	0,031	0,037	22	1.800.542	0,057	0,026	54%	18%
	6	INZMÜHLENS	1983-2013	0,345	0,370	27	5.516.159	0,175	-0,171	198%	168%
	8	THELSTORF	1983-2013	0,876	1,005	86	21.406.923	0,679	-0,198	129%	123%
	9	JEHRDEN	1983-2013	3,554	4,321	409	103.270.666	3,275	-0,280	109%	104%
Wehlener Moorbach	7	INZMÜHLENWW	1983-2003	0,067	0,085	12	1.987.193	0,063	-0,004	107%	66%
Schmale Aue	10	DÖHLE/S	1983-2013	0,095	0,130	34	5.298.239	0,168	0,073	56%	35%
	12	SCHÄTZENDORF	1984-2003	0,420	0,525	91	22.215.291	0,704	0,284	60%	51%
	13	HANSTEDT	1983-2013	0,601	0,794	116	29.224.781	0,927	0,325	65%	61%
	14	MARXEN	1983-2013	0,856	1,140	157	40.341.898	1,279	0,423	67%	63%
Radenbach	11	DÖHLE/R	1984-2003	0,109	0,128	24	4.010.078	0,127	0,018	86%	44%
Aubach	15	TOPPENSTEDT	1983-2013	0,039	0,075	17,5	2.329.386	0,074	0,035	52%	30%
	16	WULFSEN	1983-2013	0,313	0,461	68	11.911.918	0,378	0,065	83%	65%
Nordbach	17	SALZHAUSEN	1983-2013	0,119	0,175	28	2.134.788	0,068	-0,051	176%	54%
Luhe	18	ROYDORF	1983-2013	3,828	4,632	465	117.172.877	3,716	-0,113	103%	128%

Die Auswertung der nach Kalibrierung berechneten Basisabfluss in Tabelle 4 zeigt, dass an 12 von 18 Pegeln eine verbesserte Abbildungsgüte gegenüber dem ursprünglichen Konzept erzielt werden konnte (Spalte „Verhältnis“ ist grün hinterlegt).

Insbesondere bei den Oberläufen sind die Abweichungen zwischen den aus Messdaten und den über die kalibrierte Methode abgeschätzten Basisabflüssen als gering einzustufen. Am Pegel Wehlen beträgt die absolute Abweichung beispielsweise nach der Kalibrierung noch 26 Liter pro Sekunde (ursprünglich 144 Liter pro Sekunde). In den Unterläufen von Este und Seeve sind die Abweichungen dagegen etwas schlechter geworden. Ursache ist, dass über die kalibrierte Methode ein relativ großer Teil der Grundwasserneubildung direkt der Elbe als Hauptvorfluter zugeschlagen wird.

Zusammenfassend ist festzuhalten, dass die erreichte Abbildungsgüte als ausreichend gut einzustufen ist, um die im Projekt verfolgten Fragestellungen zu beantworten. Vor allem die weniger guten Anpassungen in den Unterläufen sind für die späteren Aussagen nicht von Belang, da hier der potentielle Sickerwassermehrertrag durch Waldumbau keinen spürbaren Effekt auf die vergleichsweise großen Abflussmengen haben würde.

Nach Anpassung der Methode ergibt sich die modifizierte Berechnungsformel zur Bewertung der oberirdischen Einzugsgebiete:

$$\frac{\text{pot. Neubildungssteigerung (= Sickerwassermehrertrag durch Waldumbau)} \\ \text{in einem oberird. EZG}}{\text{kalibrierter Basisabfluss aus diesem oberird. EZG, inkl. oberstromiger EZG}} \quad (4)$$

5.6 Ermittlung des erzielbaren Sickerwassermehrertrags durch Waldumbau

Im nächsten Arbeitsschritt wird für den Zähler der Formel **(4)** der maximal erzielbare Sickerwassermehrertrag durch Waldumbau je oberirdischem Einzugsgebiet ermittelt.

Dazu wird angenommen, dass alle Nadelwaldflächen umgebaut werden und somit die Sickerwassermenge gesteigert wird. Im Projekt „Wasserwald“ wurde in der Ostheide von der Nordwestdeutschen Forstlichen Versuchsanstalt (NW-FVA) aus Göttingen (Prof. J. Nagel) und dem Büro UDATA aus Neustadt/Wstr. (Dr. J. Scherzer) untersucht, welcher Waldentwicklungstyp unter verschiedenen Klimaentwicklungsszenarien den optimalen Sickerwassermehrertrag unter den Bedingungen in der Ostheide erbringen würde. Als besonders geeignet erwies sich hierbei der Waldentwicklungstyp 10 (WET 10) mit der Eiche als führenden Baumart. Unter der Annahme, dass das heutige Klima in den nächsten Dekaden Bestand hat, tritt unter Eichenwald 60 Jahre nach Umbau ein Sickerwassermehrertrag von 95 mm/a auf (Tabelle 5).

Tabelle 5: Sickerwassermehrertrag nach Waldumbau in der Ostheide
(Quelle: UDATA, 2015)

Grundwassermehrertrag durch Waldumbau, heutiges Klima	erste Dekade nach Umbau (mm/a)			erste 60 Jahre nach Umbau (mm/a)		
	min	Mittel	max	min	Mittel	max
WET67 (Douglasie/Kiefer)	-19	-13	-2	-37	-31	-23
WET62 (Douglasie/Buche)	2	15	32	-15	-8	0
WET17 (Eiche/Kiefer)	27	46	53	49	72	85
WET10 (Eiche)	36	57	68	65	95	113

UDATA

Landwirtschaftskammer
Niedersachsen

09.11.2015, Uelzen

Da es keine expliziten Untersuchungen zu diesem Sachverhalt gibt, die sich auf die Nordheide, bzw. den Landkreis Harburg beziehen, wurden die Ergebnisse von UDATA aus der Ostheide übernommen. Dabei wird bewusst in Kauf genommen, dass dies einen methodischer Fehler darstellt, da die Ostheide klimatisch bereits weniger atlantisch und mehr kontinental geprägt ist und die Eiche als führende Baumart im Landkreis Harburg überwiegend vermutlich nicht der optimale Waldentwicklungstyp wäre. Aufgrund der durchschnittlich höheren Niederschläge im Landkreis Harburg im Vergleich zur Ostheide ist davon auszugehen, dass die realen Sickerwassermehrerträge im LK Harburg leicht über denen von UDATA übernommenen liegen werden. Die Angaben sind daher als konservativ anzusehen.

Die Berechnung der potentiellen Neubildungssteigerung kann jedoch nicht einfach als Multiplikation zwischen der maximal umbauwürdigen Fläche und dem übertragenen Sickerwassermehrertrag für den WET 10 erfolgen, sondern muss vielmehr die jeweiligen Gewässereinzugsgebiete und die kalibrierten Wichtungsfaktoren je Grundwasserflurabstandsklasse berücksichtigen. Für jede Nadelwaldfläche muss daher zuerst ermittelt werden, in welcher Grundwasserflurabstandsklasse diese liegt. Gibt es Überschneidungen von mehr als einer Grundwasserflurabstandsklasse, so wird diejenige mit dem größten Flächenanteil für die weiteren Berechnungen verwendet. Liegt eine Nadelwaldfläche in mehreren oberirdischen Einzugsgebieten, so wird diese flächengewichtet aufgeteilt und den jeweiligen Einzugsgebieten zugeordnet. Bei der Berechnung der potentiellen Neubildungssteigerung je oberirdischem Einzugsgebiet werden schließlich alle Nadelwaldflächen in diesem Gebiet mit ihren jeweiligen Gewichtungsfaktoren multipliziert und anschließend mit dem übertragenen Sickerwassermehrertrag von 95 mm/a multipliziert. Die Summe ergibt die Menge an zusätzlichem Sickerwasser die jährlich anfallen würde, wenn alle Nadelwaldflächen in dem jeweils betrachteten Einzugsgebiet in einen Laubwald mit Eiche als führender Baumart umgebaut würden.

5.7 Ermittlung des kalibrierten Basisabflusses in einem oberirdischen Einzugsgebiet

Für das Bewertungsverfahren muss im nächsten Arbeitsschritt noch der Nenner in der Berechnungsformel **(4)** bestimmt werden.

In Kap. 5.5 sind die Basisabflüsse für die oberirdischen Einzugsgebiete der 18 Pegel kalibriert und berechnet worden. Auf dieser Grundlage muss nun der Basisabfluss für jedes einzelne der insgesamt 160 oberirdischen Einzugsgebiete ermittelt werden. Die Überprüfung der ursprünglich vorgesehenen Formel **(3)** ergab, dass, wenn die gesamte Grundwasserneubildung in einem Einzugsgebiet zur Abschätzung des Basisabflusses herangezogen wird, dieser überschätzt wird. Folglich führt ein Teil einer Erhöhung der Grundwasserneubildung nicht zur Steigerung des Basisabflusses in diesem Gebiet bzw. im dazugehörigen Fließgewässerabschnitt, sondern zur Steigerung des Basisabflusses in einem anderen Fließgewässerabschnitt.

Die in einem oberirdischen Einzugsgebiet neugebildete Menge an Grundwasser wird also aufgeteilt und in unterschiedlichen unterstromig gelegenen Einzugsgebieten bzw. Gewässerabschnitten abflusswirksam.

Die folgende Abbildung 11 verdeutlicht diesen Prozess.

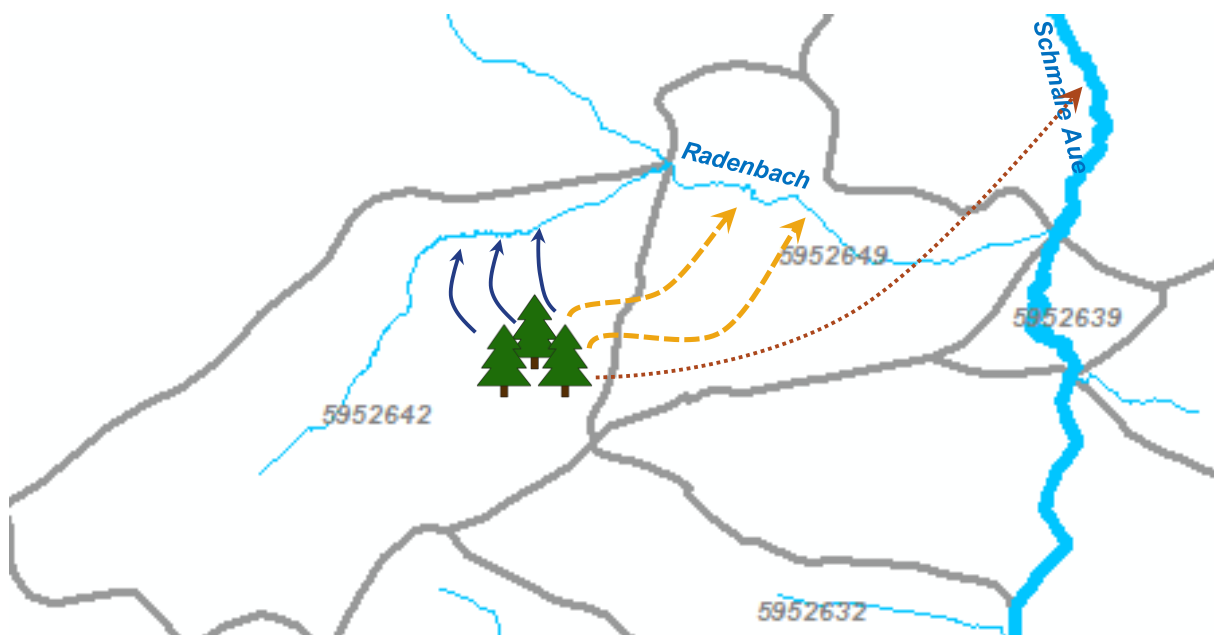


Abbildung 11: Schematische Darstellung des abflusswirksamen Anteils der Grundwasserneubildung in einem oberirdischen Einzugsgebiet (blaue Pfeile: wird im oberird. EZG selbst abflusswirksam, gelbe Pfeile: wird im darauffolgenden EZG abflusswirksam, roter Pfeil, wird im übernächsten EZG abflusswirksam, grau: oberird. EZG)

Für die hier angewandte Methodik wird vereinfachend angenommen, dass die jeweils beiden folgenden Unterlieger eines EZG einen Teil der Neubildungsmenge als unterirdischen Zustrom erhalten. Wird beispielsweise, wie in Abbildung 11 dargestellt, im oberirdischen Einzugsgebiet mit der Nummer 5952642 ein Nadelwald umgebaut und dadurch die Sickerwassermenge bzw.

die Grundwasserneubildungsmenge gesteigert, so strömt ein Teil des neu gebildeten Grundwassers dem Bach im selben EZG zu und wird dort als Basisabfluss wirksam (blaue Pfeile). Ein Teil strömt dem flussabwärts liegenden Radenbach (EZG-Nr. 5952649) zu und wird dort zusätzlich als Basisabfluss wirksam (gelbe Pfeile). Ein weiterer Teil wird erst im übernächsten EZG, der Schmalen Aue, wirksam (roter Pfeil).

Allgemein gilt, dass sich der Basisabfluss in einem Gewässerabschnitt aus dem Teil der Grundwasserneubildung des eigenen oberirdischen Einzugsgebietes speist, sowie einen oberirdischen und einen unterirdischen Zustrom aus allen flussaufwärts liegenden Einzugsgebieten erhält⁴.

Bevor die weitere Methodik beschrieben wird, soll hier noch ein kurzer Exkurs zur Nomenklatur der oberirdischen Einzugsgebiete der Gewässer vorangestellt werden:

Die Abgrenzung der oberirdischen Einzugsgebiete erfolgt bundesweit systematisiert nach der LAWA-Richtlinie für die Gebiets- und Gewässerverschlüsselung (LAWA 2009). Über eine bis zu 10 Stellen lange Gebietskennzahl kann jedes oberirdische Einzugsgebiet eindeutig identifiziert werden. Dabei folgt die Systematik einer hierarchischen Struktur. Somit lassen sich alle Gewässer in den Einzugsgebieten der in der Bundesrepublik vorkommenden sechs Ströme (Donau, Rhein, Ems, Weser, Elbe und Oder) bzw. einem Küstengebiet zuordnen. Mit dem Quellgebiet bei Ziffer 1 beginnend, werden bis zur Mündung grundsätzlich neun Teileinzugsgebiete festgelegt. Einzugsgebiete der Nebenfließgewässer erhalten die geraden Ziffern 2, 4, 6 und 8 und die Einzugsgebiete entlang des Hauptfließgewässers (Zwischengebiete) die ungeraden Ziffern 3, 5, 7 und 9. Die Aufteilung eines Zwischengebietes erfolgt entsprechend der gleichen zuvor genannten Systematik (LAWA 2009). Mit jedem einmündenden Gewässer wird demnach ein neues Einzugsgebiet abgegrenzt. Die Größe dieser Einzugsgebiete ist jedoch nicht einheitlich, sondern wird von der Entfernung zweier einmündenden Gewässer bestimmt. Münden zwei Gewässer kurz nacheinander ein, so werden die Einzugsgebiete bei jeder Einmündung geteilt und sind dementsprechend relativ klein.

Für die hier erarbeitete Methodik zur Bewertung der Versickerungswirksamkeit auf das Abflussgeschehen der Oberflächengewässer ist dies insofern von Belang, als in kleinen Einzugsgebieten eher weniger Grundwasserneubildung abflusswirksam wird als in größeren. Es ist also eine Fallentscheidung notwendig, bei der je nach Größe der nachfolgenden Einzugsgebiete die Zuweisung des flussaufwärts neu gebildeten Grundwassers erfolgen muss. Eine schematisierte Übersicht gibt Abbildung 12 wieder.

⁴ Liegt ein Teil des oberirdischen Einzugsgebietes eines Gewässers außerhalb des Landkreises, so muss eine Basisabflussmenge abgeschätzt werden, die an der Landkreisgrenze in das System „hereinfließt“. Hierbei können Pegeldata oder Einzugsgebietsgrößen und abgeschätzte Grundwasserneubildungsraten herangezogen werden.

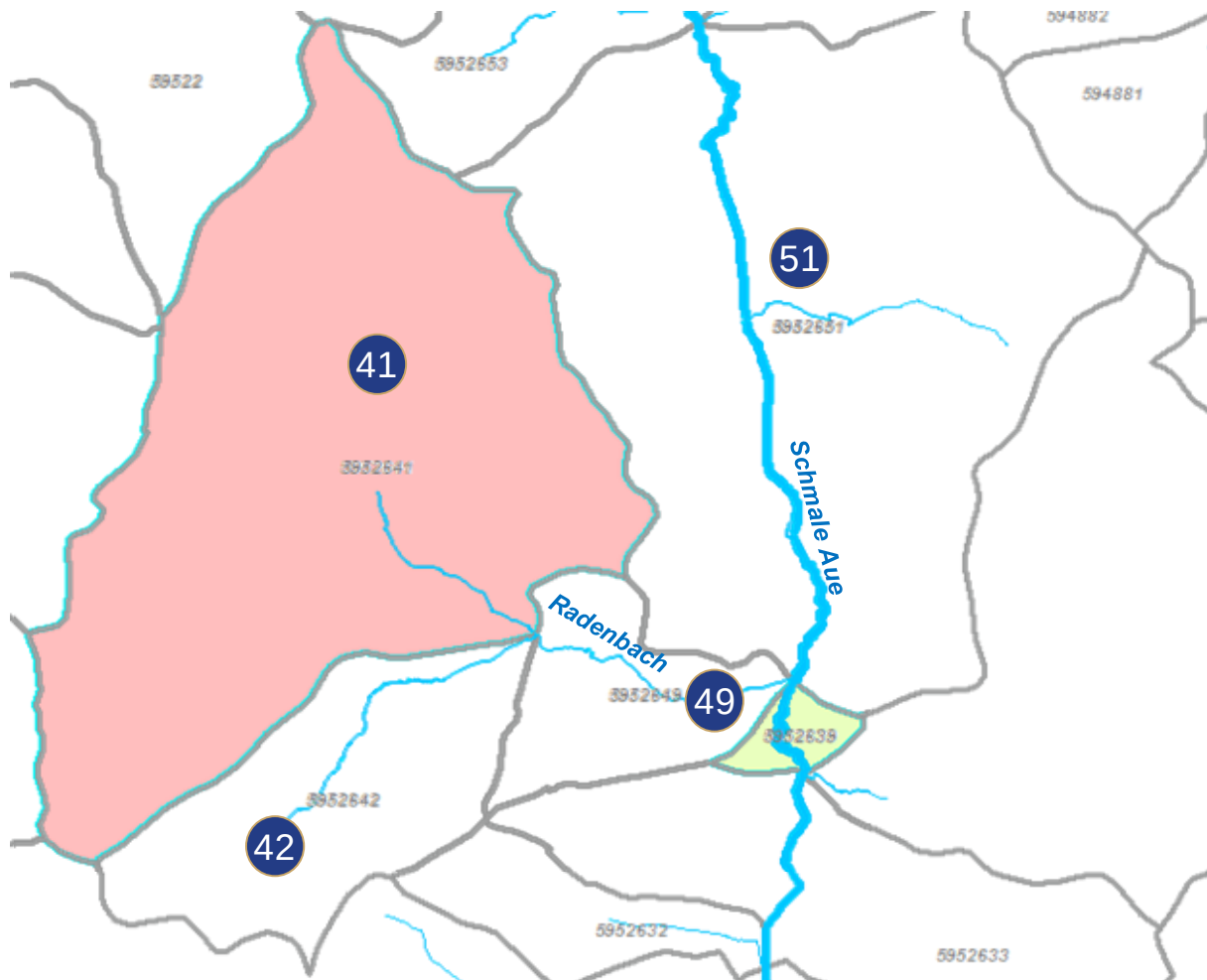


Abbildung 12: Schema der Gebietsunterteilung der oberirdischen Einzugsgebiete

Die EZG-Größe ist unter anderem abhängig von der Oberflächenmorphologie und dem Abstand der Zuflüsse. Es entstehen zum Teil sehr große (rot = 17,5 km²), aber auch sehr kleine (grün = 0,5 km²) Einzugsgebiete. Die Wahrscheinlichkeit, dass kleine Einzugsgebiete einen hohen Grundwasserzustrom erhalten ist relativ klein, weshalb eine separate Fallbehandlung je nach Größe der nachfolgenden Einzugsgebiete erforderlich ist.

Es ist also gebietsgrößenabhängig zu bestimmen, wieviel der Grundwasserneubildungsmenge im betrachteten Gebiet abflusswirksam wird und wieviel der Neubildungsmenge „übrig“ bleibt und erst in den nachfolgenden Gebieten abflusswirksam wird. Für diese „übrigbleibende“ Wassermenge hat sich im Rahmen der Kalibrierung der Wichtungsfaktoren für den Parameter Grundwasserflurabstand herausgestellt, dass eine Aufteilung von 80 % für das erste nachfolgende EZG und 20 % für das übernächste EZG die beste Anpassungsgüte ergeben hat. Dieser Zusammenhang gilt bei nachfolgenden Einzugsgebieten, welche größer als 3 km² sind. Ist das nachfolgende Einzugsgebiet kleiner als 3 km², so ergab eine Aufteilung von 30 % zu 70 % die beste Anpassung. Damit wird der Hauptanteil der Grundwasserneubildung erst im übernächsten EZG abflusswirksam, nicht in dem kleinen „Zwischeneinzugsgebiet“.

Die Berechnung des gesamten kalibrierten Basisabflusses soll an zwei Beispielen für zwei in Abbildung 12 gezeigte oberirdische Einzugsgebiete noch einmal näher erläutert werden:

Stellvertretend für ein oberirdisches Einzugsgebiet im Quellbereich eines Fließgewässers soll der Oberlauf des Radenbaches (Gebiet 41) betrachtet werden. Hierfür würde mit der Formel des ursprünglichen Konzeptes **(3)** ein abgeschätzter Basisabfluss von 5,2 Mio. m³/a errechnet werden. Dieses Ergebnis würde den tatsächlichen Basisabfluss am Oberlauf des Radenbaches sehr stark überschätzen. Im Einzugsgebiet liegen zudem überwiegend sehr große Grundwasserflurabstände vor. Unter Verwendung der kalibrierten Formel **(4)** wird der Basisabfluss für den Oberlauf lediglich mit 800.000 m³/a abgeschätzt, die Differenz von 4,4 Mio. m³/a werden erst in den nachfolgenden Einzugsgebieten Nr. 49 und Nr. 51 abflusswirksam. Da das EZG Nr. 49 kleiner als 3 km² ist, werden die 4,4 Mio. m³/a im Verhältnis 30 % / 70 % aufgeteilt und folglich 1,3 Mio. m³/a im Gebiet Nr. 49 und 3,1 Mio. m³/a im Gebiet Nr. 51 (Schmale Aue) abflusswirksam.

Stellvertretend für ein oberirdisches Einzugsgebiet mit einem oberstromigen Zufluss soll der Unterlauf des Radenbaches (Gebiet 49) betrachtet werden. Neben dem unter Verwendung der kalibrierten Formel **(4)** abgeschätzten Basisabfluss, müssen noch die oberirdischen und unterirdischen Zuströme aus den oberstromig liegenden Einzugsgebieten berücksichtigt werden. Hier errechnen sich die in Tabelle 6 aufgeführten Mengen.

Tabelle 6: Beispielhafte Mengenermittlung für den Radenbach
(Gebiet Nr. 49 in Abbildung 12)

Ursprung	Menge [m ³ /a]
Kalibrierter abgeschätzter Basisabfluss aus Gebiet Nr. 49 selbst	450.000 m ³ /a
Unterirdischer Zustrom aus EZG Nr. 41	1.300.000 m ³ /a
Oberirdischer Zustrom aus EZG Nr. 41	850.000 m ³ /a
Unterirdischer Zustrom aus EZG Nr. 42	1.000.000 m ³ /a
Oberirdischer Zustrom aus EZG Nr. 42	400.000 m ³ /a
Summe Basisabfluss in Gebiet Nr. 49	4.000.000 m³/a

Insgesamt ergibt sich ein abgeschätzter Basisabfluss für den Radenbach von ca. 4 Mio. m³/a oder 0,127 m³/s. Dies deckt sich sehr gut mit den Pegeldaten des wenige hundert Meter vor der Einzugsgebietsgrenze liegenden Pegel „Döhle/R“. Hier wurde ein langjähriger mittlerer Abfluss von 0,128 m³/s gemessen und daraus ein Basisabfluss nach WUNDT von 0,109 m³/s abgeleitet (Abflusswerte von 1984-2003). Mit der kalibrierten Methode wird der Basisabfluss am Radenbach demnach um nur noch ca. 16 % überschätzt (ohne Kalibrierung: +228 %). Berücksichtigt man zusätzlich noch das etwas kleinere Einzugsgebiet des Pegels Döhle/R, so verbessert sich die Schätzung noch weiter.

Unter Anwendung dieser Methodik wurde für jedes der 160 Einzugsgebiete der für den zugehörigen Fließgewässerabschnitt wirksame Basisabfluss errechnet.

5.8 Bewertung der Eignung der oberirdischen Einzugsgebiete und der Waldstandorte für einen Waldumbau

In Kap. 5.5 wurde das modifizierte Konzept zur Berechnung der kalibrierten Basisabflüsse der oberirdischen Einzugsgebiete beschrieben. Des Weiteren sind die in Formel (4) benötigten Eingangsdaten und deren Ermittlung in den darauffolgenden Kapiteln 5.6 und 0 dargelegt. Für die Bewertung wird nun für jedes oberirdische Einzugsgebiet berechnet, wie hoch der potentielle Sickerwassermehrertrag durch Waldumbau wäre und wie hoch der Basisabfluss in den zugehörigen Gewässerabschnitten – inklusive der Berücksichtigung von unter- und oberirdischen Zustrom der oberliegenden Einzugsgebiete – ist. Beide Parameter werden dazu ins Verhältnis zueinander gesetzt, um dadurch die Wirkung der zusätzlichen Sickerwassermengen auf den gesamten Basisabfluss im jeweiligen oberirdischen Einzugsgebiet eines Oberflächengewässers zu ermitteln.

Die größte Wirkung kann demnach in den oberirdischen Einzugsgebieten von Weseler Bach, Schierhorn Bach und Schwindebach erzielt werden. Hier würde der Anteil des maximal möglichen Sickerwassermehrertrags bei ca. 15 % des gesamten Basisabflusses liegen, wenn alle in Frage kommenden Nadelwälder in Eichenmischwälder umgebaut würden. Der Grund ist zum einen, dass der Basisabfluss der drei Bäche relativ gering ist und zum anderen, dass es in allen drei Einzugsgebieten ausgedehnte Nadelwaldflächen gibt.

Im Gegensatz dazu ist die Wirkung von Waldumbau in den Unterläufen von Este, Seeve, Luhe und Ilmenau zum Teil weit weniger als ein Promille des gesamten Basisabflusses und damit vernachlässigbar klein.

Die Ergebnisse der der Verhältnisberechnungen (Wirkung des Sickerwassermehrertrags) werden zu Clustern (Eignungsstufen) zusammengefasst:

- Stufe 3 (Farbe dunkelgrün): > 10 %
- Stufe 2 (Farbe hellgrün) 5 – 10 %
- Stufe 1 (Farbe orange) 1 – 5 %
- Stufe 0 (Farbe rot) < 1 %

Das Ergebnis für alle oberirdischen Einzugsgebiete ist **Anlage 2.1** zu entnehmen.

Für die weiterführende Eignungsbewertung eines Nadelwaldstandortes ist jedoch nicht alleine das Verhältnis aus dem Sickerwassermehrertrag durch Waldumbau und dem Basisabfluss eines oberirdischen Einzugsgebietes maßgeblich. Generell erhalten alle Nadelwaldflächen zunächst die Eignungsstufe des oberirdischen Einzugsgebietes in dem sie liegen, entsprechend den oben aufgeführten Clustern. Weisen jedoch Nadelwaldstandorte Kriterien auf, die ungünstig für die Versickerungseignung hinsichtlich des Abflussgeschehens sind, so erhalten diese Standorte einen Wertungsabzug (Tabelle 7).

Tabelle 7: Bedingungen für Wertungsabzug bei Nadelwaldstandorten

Bedingung	Wertungsabzug
Nadelwaldfläche liegt überwiegend dichter als 200 m an einem Fließgewässer (vgl. Kap. 5.2)	Minus 1 Eignungsstufe
Nadelwaldfläche hat überwiegend einen Grundwasserflurabstand von < 2 m (vgl. Kap. 5.2)	Minus 1 Eignungsstufe
Nadelwaldfläche hat überwiegend einen Grundwasserflurabstand von > 30 m (vgl. Kap. 5.5)	Minus 2 Eignungsstufen

Aufgrund der standorttypischen Unterschiede der einzelnen Nadelwaldflächen ergibt sich durch den Wertungsabzug eine Binnendifferenzierung der Bewertung innerhalb eines oberirdischen Einzugsgebietes. Dies ist erforderlich, um zum einen den in Kap. 5.2 beschriebenen methodischen Vorbedingungen zu genügen und zum anderen eine Folge der ermittelten Wirkungsfaktoren im Rahmen der Kalibrierung, wie in Kap. 5.5 beschrieben. Weist ein Nadelwaldstandort z.B. einen sehr hohen Flurabstand auf, so gilt auch hier die Annahme, dass nur ein geringer Teil der hier neugebildeten Grundwassermenge in dem Fließgewässer abflusswirksam wird, in dessen Einzugsgebiet die Nadelwaldfläche liegt. Diese Annahme gilt unabhängig von der generellen Eignung des Einzugsgebietes. Liegen beispielsweise mehrere Nadelwaldstandorte in einem geeigneten oberirdischen Einzugsgebiet, so sind diejenigen Standorte zu priorisieren, die einen Mindestabstand von 200 m zum Gewässer einhalten und gleichzeitig Flurabstände zwischen 2 und 30 m aufweisen. Flächen die diesen Kriterien nicht genügen, können ebenfalls zur Erhöhung des Basisabflusses in diesem Einzugsgebiet beitragen, sind aber vergleichsweise ungünstiger, als Flächen, die diese Kriterien einhalten.

6 ERGEBNISSE

6.1 Bewertungsverfahren „Grundwasser“

Die Ergebnisse stellen eine flächenhafte Standortbewertung dar, ob eine durch Waldumbau gesteigerte Grundwasserneubildung dem Zielaquifer zugutekommt. Die Ergebnisdarstellung erfolgt in Form einer 4-farbigen Karte („Ampelkarte“). Sie soll als Planungsgrundlage und Entscheidungshilfe für Landwirte, Verbände und Behörden verstanden werden.

In den **Anlagen 1.1 bis 1.4** sind die Ergebniskarten „Grundwasser“ für den gesamten Landkreis Harburg flächenhaft für jeden Einzelparameter dokumentiert. Zudem sind dort auch die Gesamtergebnisse „Grundwasser“ einmal flächenhaft für den gesamten Landkreis und einmal verschnitten mit den sich in Privatbesitz befindlichen Nadelwaldflächen dokumentiert (**Anlagen 1.5 und Anlage 1.6**).

An dieser Stelle wird auf eine ausführliche Beschreibung der Einzelergebnisse verzichtet und ausschließlich kurz auf die Gesamtergebnisse eingegangen. Die detaillierten Ergebnisse wurden zudem der Landwirtschaftskammer Niedersachsen als ArcGIS-shape-Dateien zur Verfügung gestellt.

Im Landkreis Harburg sind etwa 77 % der Gesamtfläche aus hydrogeologischer Sicht nicht für Grundwasseranreicherungsmaßnahmen geeignet (Tabelle 8). Knapp 20 % der Gesamtfläche können hingegen mindestens als „geeignet“ eingestuft werden. Für die Fragestellung relevanter ist die Bewertung der Nadelwaldflächen in Privatbesitz. Hier sind etwa 52 % (ca. 9.900 ha) aus hydrogeologischer Sicht nicht für Waldumbaumaßnahmen geeignet, etwa 45 % (ca. 8.500 ha) sind als „geeignet“ oder „sehr geeignet“ eingestuft worden.

Tabelle 8: Gesamtergebnis Bewertungsverfahren „Grundwasser“

Bewertung	Gesamtfläche Landkreis		privater Nadelwald	
	Fläche [ha]	Prozent	Fläche [ha]	Prozent
0 (nicht geeignet)	98.316	77,0%	9.873	51,5%
7 – 9 (mäßig geeignet)	3.064	2,4%	759	4,0%
10 – 11 (geeignet)	23.292	18,2%	7.299	38,0%
12 (sehr geeignet)	3.120	2,4%	1.256	6,5%
Gesamtfläche	127.792	100,0%	19.187	100,0%

Vor allem die Elbmarsch und die Niederungsbereiche an den Mittel- und Unterläufen der Flüsse Wümme, Oste, Este, Seeve und Luhe fallen aufgrund des geringen Abstandes zwischen der Geländeoberfläche und der Grundwasseroberfläche weg. Dagegen sind die oft bewaldeten Hochlagen vor allem im Süden des Landkreises häufig gut geeignet.

Betrachtet man die Ursache für die Einstufung eines Standortes als „nicht geeignet“, so ergibt sich ein differenziertes Bild (Tabelle 9). Beim Lesen der Tabelle ist zu beachten, dass auch

„Mehrfachnennungen“ vorkommen können, d. h., eine Fläche kann sowohl aufgrund von ungünstigen Bodeneigenschaften als auch aufgrund einer gering mächtigen ungesättigten Zone als ungeeignet eingestuft werden. Die Summe der Fläche der Einzelparameter muss demnach immer mindestens so groß sein wie die der gesamten ungeeigneten Fläche. In der Regel wird sie aber wegen der „Mehrfachnennungen“ größer sein.

Tabelle 9: Ursachen für Bewertung "nicht geeignet" im Bewertungsverfahren „Grundwasser“ (Mehrfachnennung möglich)

Einzelparameter	Gesamtfläche Landkreis		privater Nadelwald	
	Fläche [ha]	Prozent	Fläche [ha]	Prozent
Bodenkarte	39.136	30,6%	1.393	7,3%
Geologische Karte	53.840	42,1%	3.027	15,8%
Hemmer im Strukturmodell	45.532	35,6%	6.417	33,4%
Mächtigkeit ungesättigte Zone	50.196	39,3%	2.892	15,1%

Die Tabelle 9 zeigt, dass die einzelnen Ausschlusskriterien bei der Gesamtfläche relativ gleichmäßig verteilt sind (zwischen ca. 30 und 42%). Betrachtet man ausschließlich private Nadelwaldflächen, so ist der Einzelparameter „Hemmer im Strukturmodell“ der deutlich häufigste Ausschlussgrund für eine Eignung. Hier verhindern teilweise mächtige Geschiebemergelablagerungen, dass die durch Waldumbau erzeugte zusätzliche Grundwasserneubildung den Zielaquifer auf direktem Wege erreichen kann.

6.2 Bewertungsverfahren „Oberflächengewässer“

Im Verfahren Oberflächengewässer erfolgt eine auf Nadelwaldflächen bezogenen Standortbewertung, ob und in welchem Umfang durch Waldumbau der Basisabfluss in oberirdischen Einzugsgebieten gesteigert werden kann.

Die Ergebnisdarstellung erfolgt – analog zum Bewertungsverfahren „Grundwasser“ – in Form von 4-farbigen Karten („Ampelkarte“). Sie sollen als Planungsgrundlage und Entscheidungshilfe für Forstwirte und Waldbesitzer dienen.

In **Anlage 2.1** wird die Eignung aller oberirdischen Einzugsgebiete dargestellt, inwieweit ein Waldumbau aller Nadelwaldflächen in diesem Gebiet einen wirkungsvollen Beitrag zur Stützung des Basisabflusses in dem entsprechenden Gewässerabschnitt leisten würde. Die **Anlage 2.2** zeigt das Gesamtergebnis „Oberflächengewässer“ für die sich in Privatbesitz befindlichen Nadelwaldflächen. Hierbei sind bei der Bewertung auch spezifische standörtliche Nachteile der Flächen über einen Abzug von ein oder zwei Wertigkeitsstufen berücksichtigt, so dass sich hieraus eine Priorisierung von Standorten ablesen lässt.

Die Berechnung des Verhältnisses aus dem Sickerwassermehrertrag durch Waldumbau und dem Basisabfluss eines oberirdischen Einzugsgebietes hat ergeben, dass der Basisabfluss in

einigen Gewässerabschnitten um mehr als 10 % gesteigert werden kann, wenn alle in Frage kommenden Nadelwälder in Eichenmischwälder umgebaut würden. Waldumbau kann damit durchaus zu einer Unterstützung des Abflussgeschehens beitragen und z.B. einen nachhaltig höheren Abfluss in den besonders sensiblen Gewässeroberläufen unterstützen. Allerdings muss hierbei die relativ lange Zeitspanne berücksichtigt werden, die für einen Waldumbau benötigt wird. Waldumbau kann jedoch ein probates Mittel sein, um etwaige zukünftige klimatisch- oder nutzungsbedingte Reduktionen der Abflüsse abzumildern.

Tabelle 10: Gesamtergebnis Bewertungsverfahren „Oberflächengewässer“

Bewertung	privater Nadelwald	
	Fläche [ha]	Flächenanteil [Prozent]
0 (nicht geeignet)	9.736	51%
1 (mäßig geeignet)	3.888	20%
2 (geeignet)	3.055	16%
3 (sehr geeignet)	2.510	13%
Gesamtfläche	19.188	100,0%

Als Gesamtergebnis des Bewertungsverfahrens ergibt sich, dass im Landkreis Harburg etwa 51 % der Nadelwaldflächen in Privatbesitz aus hydrogeologischer Sicht nicht geeignet sind, um das Abflussgeschehen der Oberflächengewässer in ihrem Einzugsgebiet in einem nennenswerten Umfang zu steigern. Dagegen sind ca. 30 % der Nadelwaldflächen in Privatbesitz mindestens als geeignet anzusehen. Das entspricht einer Fläche an mindestens geeigneten Nadelwaldstandorten von ca. 5.500 ha. Ein Umbau dieser Wälder könnte das Abflussgeschehen der betreffenden Oberflächengewässer in ihrem jeweiligen Einzugsgebiet nachhaltig verbessern.

7 VERSICKERUNGSWIRKSAMKEIT MIT DER ZEIT

Eine ergänzende Fragestellung zur Methodik „Grundwasser“ war neben der standörtlichen Eignung für Grundwasseranreicherungsmaßnahmen auch die Abschätzung der zugehörigen Sickerzeiten in der ungesättigten Zone. Die Frage lautete, wie lange es dauert, bis die zusätzliche Menge an Grundwasserneubildung im Aquifer wirksam wird.

Die Fragestellung wurde auch bereits im Bericht zum Arbeitspaket 6 im Projekt Wasserwald (CAH 2015) erörtert. Die dort getroffenen Feststellungen gelten auch für den Landkreis Harburg. Die Ergebnisse des Projekts Wasserwald werden daher hier ebenfalls vorgestellt.

Bei der Bewertung der Sickerzeiten lassen sich prinzipiell zwei Herangehensweisen unterscheiden:

- a) Eine stoffbasierte Sichtweise, bei der ein einzelner Wassertropfen, der die Bodenzone in Richtung Grundwasser verlässt, die ungesättigte Zone durchsickert und nach einer gewissen Zeit an der Grundwasseroberfläche angelangt ist. Die Wirksamkeit einer gesteigerten Grundwasserneubildung würde dann nur sehr langsam erfolgen.
- b) Eine druckbasierte Sichtweise, bei der eine zusätzliche Menge an Grundwasserneubildung den hydrostatischen Druck im ungesättigten Bereich erhöht und durch einen hydraulischen Impuls eine Wassermenge an der Austauschfläche zwischen Grundwasser und ungesättigter Zone ins Grundwasser abgibt. In diesem Falle würde es zu einer sehr schnellen Reaktion der Grundwasserstände auf eine gesteigerte Neubildung kommen.

Die stoffbasierte Sichtweise wird beispielsweise herangezogen, um die Verweilzeiten von mit Schadstoffen belastetem Sickerwasser in der ungesättigten Zone abzuschätzen. Die Berechnung der Verweilzeiten ist in der DIN 19732 (aktuelle Version: 1997-06) festgelegt. Dieser Ansatz ist aber für die vorliegende Fragestellung nicht zielführend, da es nicht von Bedeutung ist, welcher Wassertropfen das Grundwasser erreicht, sondern nur die Reaktionszeit der Grundwasserstände auf die gesteigerte Neubildung von Interesse ist.

Trotz einer ausführlichen Literaturrecherche zur druckbasierten Sichtweise ließ sich hierzu keine einschlägige und zielführende Literatur finden.

Deshalb wurde ein stark vereinfachter, theoretischer Modellansatz realisiert, um die Reaktionszeit der Grundwasserdruckoberfläche auf den Impuls einer gesteigerten Neubildung bei unterschiedlich durchlässigen und mächtigen Sedimenten zu überprüfen.

Mit der Grundwassermodellierungssoftware FeFlow 6.2 (DHI-WASY, 2015) wurde ein stark vereinfachtes, theoretisches Boxmodell aufgebaut. Die Kantenlänge beträgt 1000 x 1000 m. Im Modell wurde eine 30 m mächtige ungesättigte Zone angesetzt. Die Durchlässigkeit des Sediments wurde als isotrop angenommen. Die vertikale Auflösung des Modells beträgt 1 m (eine Modellschicht je Meter Tiefe). Auf jeder Modellschicht wurden der modellierte Sättigungsgehalt und die hydrostatische Druckschwankung aufgezeichnet. Um die Fließvorgänge in der ungesättigten Zone abzubilden, wurde auf die Standardeinstellungen von FeFlow zurückgegriffen. Dabei werden unter Zuhilfenahme des empirischen Modells von *van Genuchten* die

Fließeigenschaften von Wasser bei unterschiedlichen Wassersättigungsgraden in der ungesättigten Zone durch die in FeFlow hinterlegten Algorithmen berechnet.

Bei der Herleitung der Reaktionszeiten wurde das Boxmodell instationär gerechnet. Zuerst wurde 90 Jahre lang eine typische Grundwasserneubildungsrate angesetzt, um einen möglichst realistischen Sättigungsgrad der Sedimentschichten zu modellieren. Anschließend wurde die Grundwasserneubildung variiert und der daraus resultierende Impuls über die Tiefe und die Zeit verfolgt und ausgewertet. Dabei wurden fünf unterschiedliche Modellläufe berechnet, bei denen die Durchlässigkeitsbeiwerte des Sediments variiert und alle übrigen Parameter konstant gehalten wurden.

Aus den Ergebnissen des Boxmodells lassen sich folgende Schlussfolgerungen ableiten:

- Je undurchlässiger die Sedimente, desto langsamer die Reaktion an der Grundwasserdruckoberfläche. Zwischen den einzelnen k_f -Klassen verändern sich die Reaktionszeiten dabei exponentiell.
- Je mächtiger die ungesättigte Zone ist, desto langsamer die Reaktion an der Grundwasserdruckoberfläche. Die Reaktionszeit steigt dabei, unabhängig von der Körnung, nahezu linear.

Die absoluten Ergebnisse der Auswertung können jedoch aufgrund der stark vereinfachten Modellannahmen nicht direkt in die Praxis übertragen werden. Effekte wie präferierte Fließwege auf Grund von Inhomogenitäten, sowie laterale Fließkomponenten konnten nicht berücksichtigt werden. Aus diesem Grunde wird auf eine flächenhafte Darstellung der Ergebnisse in Absprache mit dem GLD (17.03.2015 in Hannover) verzichtet.

Dennoch waren die aus dem Boxmodell abgeleiteten Ergebnisse geeignet, um eine größenordnungsmäßige Abschätzung der Reaktionszeiten einer gesteigerten Neubildung im Zielaquifer des Teilgebiets 1 im Projekt Wasserwald (Ostheide) zu erhalten. Die Durchlässigkeiten und Mächtigkeiten der Modellschichten sind aus dem numerischen Grundwasserströmungsmodell des AQUARIUS-Projektes bekannt und wurden für die Auswertung verwendet (CAH 2012).

Das folgende Histogramm zeigt die Häufigkeitsverteilung der Reaktionszeiten im Gesamtgebiet auf Grundlage von mehr als 5 Mio. ausgewerteten Berechnungszellen:

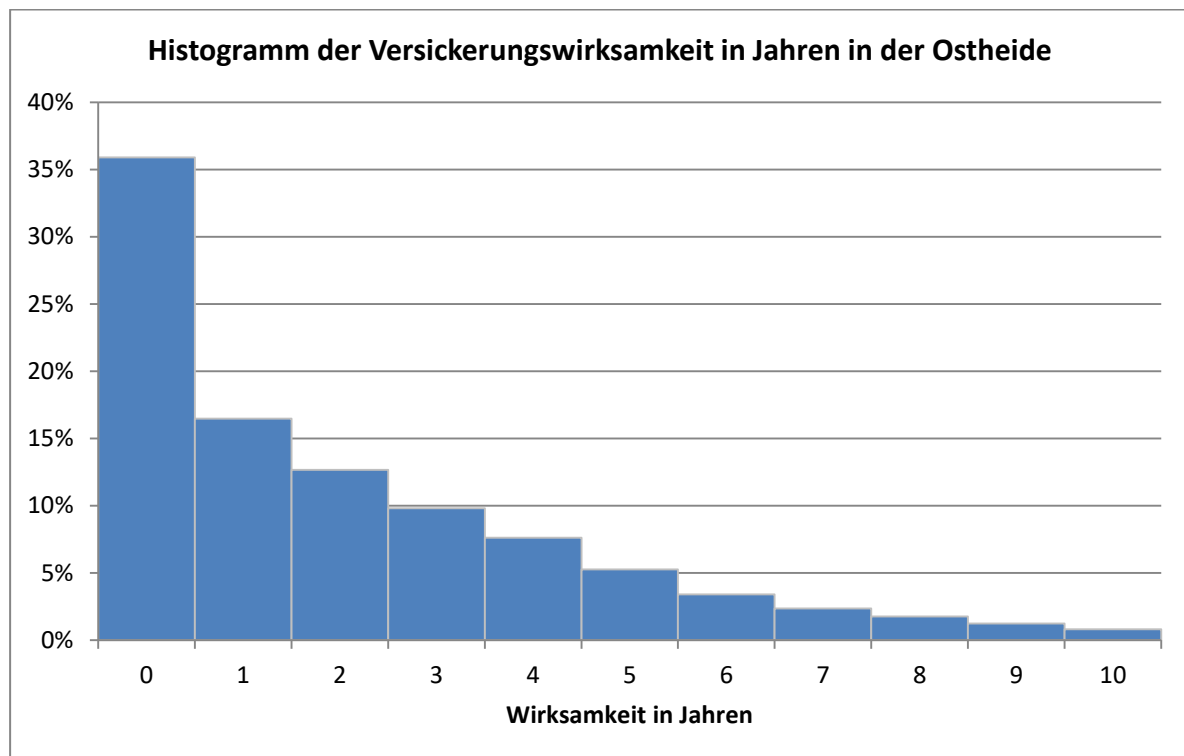


Abbildung 13: Histogramm der Versickerungswirksamkeit in Jahren in der Ostheide, bezogen auf den Zielaquifer AQ3 (CAH 2015)

Wie dem Diagramm zu entnehmen ist, wird an etwa 2/3 aller bewerteten Standorte eine gesteigerte Neubildung innerhalb der ersten 2 Jahre im Zielaquifer wirksam. Innerhalb von 8 Jahren ist sie an über 95 % der Standorte wirksam geworden. Diese Zeitspanne der Wirksamkeit ist selbst unter der Annahme eines großen Unsicherheitsbereiches weit kürzer als die Zeitspanne, die für Waldumbaumaßnahmen zur Umsetzung benötigt würde.

Dieser Aussage hat annähernd generellen Charakter, da das betrachtete Gebiet in der Ostheide viele unterschiedliche Landschaftseinheiten umfasst, die so oder ähnlich typisch für weite Bereiche im Nordosten Niedersachsens sind. Es wird daher davon ausgegangen, dass die Aussage auch auf den Landkreis Harburg übertragbar ist, ohne dass eine modelltechnische Überprüfung der Aussage erfolgt ist.

Diese stark vereinfachte, theoretische Auswertung hat gezeigt, dass die Zeitspanne, bis die zusätzliche Menge an Grundwasserneubildung im Aquifer wirksam wird, relativ kurz ist (wenige Monate bis wenige Jahre). Das heißt, für die Fragestellung des Waldumbaus, der mehrere 10er Jahre in Anspruch nimmt, ist sie ohne Relevanz und braucht daher im Bewertungsverfahren nicht weiterführend berücksichtigt zu werden.

8 MENGENMÄßIGE VERSICKERUNGSWIRKSAMKEIT

Eine weitere ergänzende Fragestellung des Bewertungsverfahrens „**Grundwasser**“ ist, welche Teilmengen an zusätzlicher Grundwasserneubildung durch Waldumbau oder andere Grundwasseranreicherungsmaßnahmen den Zielaquifer je Ergebnisklasse tatsächlich erreichen.

Eine gesicherte und detaillierte Mengenermittlung ist innerhalb des vorgegebenen Untersuchungsrahmens wegen der vielen Einflussfaktoren nicht möglich.

Um dennoch praktikable Angaben zur möglichen Erhöhung des Grundwasserdargebots zu erhalten, wurde als pragmatischer Ansatz eine Abschätzung auf Grundlage der vier Ergebnisklassen der Standortbewertung vorgenommen. Die Ergebnisse der oben beschriebenen Methodik liefern eine summarische Betrachtung vieler am Standort vorkommenden Bedingungen, die einen Einfluss auf die Versickerungswirksamkeit haben. Es wird davon ausgegangen, dass ein Standort, der als hydrogeologisch sehr geeignet für den Waldumbau klassifiziert ist, prinzipiell gute Bedingungen für die Versickerung von zusätzlichen Neubildungsmengen aufweist und damit ein Großteil dieser Mengen den Zielaquifer erreicht. Umgekehrt ist an einem nicht geeigneten Standort zu erwarten, dass aufgrund von aus hydrogeologischer Sicht ungünstigen Standortbedingungen für den Waldumbau Faktoren vorkommen, die das Sickerwasser am Erreichen des Zielaquifers hindern. Dabei ist es von nachrangiger Bedeutung, ob die Ursache hierfür ein stauwasserbeeinflusster Bodentyp oder ein mächtiger Hemmer oberhalb des Zielaquifers oder eine gering-mächtige ungesättigte Zone in einer Gewässerniederung ist.

Die anhand der Ergebnisklassen abgeschätzten Wertebereiche für den Anteil an zusätzlicher Grundwasserneubildung, die den Zielaquifer erreicht, sind in nachfolgender Tabelle 11 dokumentiert:

Tabelle 11: Abgeschätzter Anteil an zusätzlicher Grundwasserneubildung, die den Aquifer erreicht

Ergebnis	Bewertung	abgeschätzter Anteil der zusätzlichen GWNB, die im Aquifer ankommt
0 Punkte	nicht geeignet	0 – 20 %
7-9 Punkte	mäßig geeignet	20 – 50 %
10-11 Punkte	geeignet	50 – 80 %
12 Punkte	sehr geeignet	80 – 100 %

Die in der Tabelle aufgeführten Wertebereiche wurden im Rahmen des Projekts „Wasserwald“ (CAH 2015) am 24.04.2015 in Hannover mit allen Projektbeteiligten abgestimmt und einvernehmlich festgelegt.

Dieser Ansatz ist auch auf den Landkreis Harburg übertragbar. Werden alle innerhalb des Landkreises im Privatbesitz befindlichen Nadelwaldflächen in Eichenwälder (WET 10) umgebaut, ergäbe sich nach dem angesetzten Sickerwassermehrertrag (95 mm/a, bei heutigem Klima, 60 Jahre nach Waldumbau) ein landkreisweiter Sickerwassermehrertrag (SW) von ca.

18,2 Mio. m³/a. Unter Anwendung des Bewertungsverfahrens „Grundwasser“ lässt sich hieraus eine Erhöhung des Grundwasserdargebots (GW) für den Grundwasserleiter Hy-L2 in einer Spanne zwischen 4,6 und 9,0 Mio. m³/a ableiten. Die Waldumbauflächen (ha) und die Werte der potentiellen Erhöhungen der Sickerwassermengen und des Grundwasserdargebots werden in der folgenden **Tabelle 12** differenziert nach den einzelnen Grundwasserkörpern aufgelistet.

Tabelle 12: Sickerwasser- und Grundwassermehrerträge je Grundwasserkörper

Landkreis	Grundwasserkörper	Ergebnis	Mehrertrag WET 10 [m³/a]	ha
LK Harburg	Este-Seeve Lockergestein	SW	13.852.019	14.581
		GW max	6.788.906	
		GW min	3.416.673	
	Ilmenau Lockergestein links	SW	3.464.661	3.647
		GW max	1.828.501	
		GW min	997.983	
	Wümme Lockergestein rechts	SW	301.678	318
		GW max	146.370	
		GW min	74.091	
	Oste Lockergestein rechts	SW	419.647	442
		GW max	132.783	
		GW min	41.820	
	Oste Lockergestein links	SW	149.952	158
		GW max	72.046	
		GW min	35.046	
	Wümme Lockergestein links	SW	36.345	38
		GW max	7.269	
		GW min	0	
Ilmenau Lockergestein rechts	SW	1.960	2	
	GW max	392		
	GW min	0		
Summe		SW	18.224.302	19.186
Summe		GW max	8.975.874	
Summe		GW min	4.565.612	

Wird berücksichtigt, dass die Annahme zum Sickerwassermehrertrag aus der klimatisch trockeneren Ostheide übertragen wurde, sind die angegebenen Summen bei den durchschnittlich höheren Niederschlägen in der Nordheide eher als eine konservative Schätzung anzusehen.

9 Zusammenfassung der Ergebnisse

Im Rahmen des Forschungsprojektes „CO2-OPT“: „Optimierung der Waldbewirtschaftung und Holzverwendung mit dem Ziel, die CO₂-Senkenleistung Wald und Holz nachhaltig zu steigern“ (LWK Niedersachsen, 2014-2018, Webcode: 01032507) wurde in einem Teilprojekt für den gesamten Landkreis Harburg untersucht und bewertet:

- ob und in welchem Umfang Waldumbaumaßnahmen zu einer Erhöhung des Grundwasserdargebots beitragen können und welche Standorte hierfür zu priorisieren sind (Bewertungsverfahren „Grundwasser“) sowie
- ob und in welchem Umfang Waldumbaumaßnahmen einen nennenswerten Beitrag zur Erhöhung bzw. Stützung des Basisabflusses der Gewässer beitragen können (Bewertungsverfahren „Oberflächenwasser“) und welche Standorte hierfür zu priorisieren sind.

Für das Thema Dargebotserhöhung im **Grundwasser** wurde das im Rahmen des Waldklimafonds-Projekts „Wasserwald“ („Entwicklung eines Anrechnungsverfahrens für erhöhte Wasserspende durch grundwasserbetonten Waldumbau bei sinkendem Grundwasserdargebot als Folge von Klimawandel“, Landwirtschaftskammer Niedersachsen, 2014-2015 durch CONSULAQUA entwickelte Verfahren zur Bewertung der Versickerungswirksamkeit von Waldumbaumaßnahmen auf das Grundwasser auf den Landkreis Harburg übertragen und angewendet.

Für das Thema Erhöhung / Stützung des Basisabflusses von **Oberflächengewässern** wurde ein neues Bewertungsverfahren zur Bewertung der Versickerungswirksamkeit von Waldumbaumaßnahmen entwickelt, nicht zuletzt, um die methodische Lücke des erstgenannten Verfahrens zu schließen.

Beide Verfahren sollen nicht aufeinander aufbauen, sondern gleichwertig nebeneinanderstehen.

Beide Verfahren gehen davon aus, dass durch Waldumbaumaßnahmen eine Erhöhung der Sickerwassermenge erreicht wird. Für die potentiellen Erhöhungsmengen wurden die im Rahmen des Projektes „Wasserwald“ durchgeführten Untersuchungen angesetzt, nach denen unter den heutigen klimatischen Bedingungen bei einer Umwandlung von Nadelwaldflächen in Eichenwälder (WET 10) nach 60 Jahren eine Steigerung von bis zu 95 mm/a (UDATA 2015) möglich ist.

Als Ergebnis beider Bewertungsverfahren wurden farbige Karten produziert, die in einfacher und übersichtlicher Weise die Standorteignung von potenziellen Waldumbaugebieten hinsichtlich ihrer Versickerungswirksamkeit für das Grundwasser bzw. hinsichtlich einer relevanten Stützung des Basisabflusses von Gewässern darstellen („Ampelkarten“). Die einfache und übersichtliche Art der Darstellung soll es ermöglichen Forstwirten und Waldbesitzern eine erste Einschätzung zu geben, an welchen Standorten ein Waldumbau je nach Zielstellung zu bevorzugen ist.

Im Bewertungsverfahren „Grundwasser“ wurden in jeweils separaten Einzelbetrachtungen vier Eingangsparameter zu den hydrogeologischen Standorteigenschaften bewertet und anschließend in einer summarischen Gesamtbewertung aggregiert. Die Bewertung der Eingangsparameter erfolgt in einem 4-stufigen System: 0 Punkte steht dabei für „nicht geeignet“,

der höchste Wert (3 Punkte) steht für „sehr geeignet“. Anschließend werden die Punkte aller vier Eingangsparameter an jedem Standort aufaddiert, wobei ein Standort immer mit dem Wert 0 („nicht geeignet“) bewertet wird, wenn mindestens einer der Eingangsparameter den Wert 0 erhalten hat. Bei der Gesamtbewertung kann ein Standort maximal 12 Punkte (4 x 3) erreichen.

Die Auswertung hat ergeben, dass etwa 77 % der Gesamtfläche des Landkreises aus hydrogeologischer Sicht für Grundwasseranreicherungsmaßnahmen ungeeignet sind. Knapp 20 % der Gesamtfläche können hingegen mindestens als „geeignet“ eingestuft werden.

Für die Fragestellung relevanter ist die Bewertung der Nadelwaldflächen in Privatbesitz. Hier sind etwa 52 % (ca. 9.900 ha) aus hydrogeologischer Sicht für Waldumbaumaßnahmen ungeeignet, etwa 45 % (ca. 8.500 ha) sind als „geeignet“ oder „sehr geeignet“ eingestuft worden.

Insgesamt lässt sich das Grundwasserdargebot bei einem vollständigen Umbau von im Privatbesitz befindlichem Nadelwald zu Eichenwald (WET 10) im zuvor definierten Grundwasserleiter „Hy-L2“ potentiell um 4,6 – 9,0 Mio. m³/a steigern.

Insgesamt hat sich das Verfahren „Grundwasser“ erneut als praktikabel und gut auf andere Gebiete übertragbar herausgestellt. Der einheitliche Bewertungsmaßstab ermöglicht die Vergleichbarkeit von Gebieten und ist damit z.B. für Verbände und Untere Wasserbehörden eine gute Entscheidungshilfe bei zukünftigen wasserrechtlichen Fragestellungen.

Im Bewertungsverfahren **„Oberflächengewässer“** wird ein Verhältnis zwischen dem vorhandenen Basisabfluss in Gewässerabschnitten und dem durch Waldumbau potentiell erreichbaren Mehrabfluss erstellt. Hierzu wurden die Gewässer im gesamten Landkreis Harburg in 160 Gewässerabschnitte mit ihren 160 zugehörigen oberirdischen Einzugsgebieten unterteilt.

Zunächst wurde anhand von Abflussdaten an 18 Pegeln überprüft, ob die für jedes Einzugsgebiet aus Flächengröße mal Grundwasserneubildungsrate errechneten und aggregierten Basisabflüsse mit den Messdaten an den Pegeln übereinstimmen. Für Pegelstandorte im Unterlauf ergab sich eine hohe Übereinstimmung zwischen berechneten und gemessenen Werten, jedoch waren erhebliche Abweichungen im Bereich der Gewässeroberläufe vorhanden. Wesentliche Ursache dafür ist, dass insbesondere in den Oberläufen der Gewässer die nach Geländemorphologie kartierten oberirdischen Einzugsgebiete in Lage und Größe zum Teil deutlich von den unterirdischen Einzugsgebieten (Grundwasserströmung zu den Gewässern) abweichen. In der Regel ist es so, dass ein Teil der im Oberlauf neugebildeten Grundwassermenge erst in einem weiter untenliegenden Fließgewässerabschnitt abflusswirksam wird und nicht in dem Gewässerabschnitt des oberirdischen Einzugsgebiets in dem die Grundwasserneubildung angefallen ist.

Um diesen Umstand zu berücksichtigen und eine bessere Übereinstimmung zwischen den aus oberirdischen Einzugsgebieten errechneten und an den Pegel gemessenen Basisabflüssen zu erreichen, wurde ein aufwändiges Kalibrierungs- und Evaluierungsverfahren durchgeführt, bei dem sich der Grundwasserflurabstand unter Verwendung unterschiedlicher Wichtungsfaktoren als wesentliche Kalibriergröße zur Ermittlung der Gebietsabflüsse herausgestellt hat. Dabei hat sich eine klare Beziehung ergeben: je größer der Grundwasserflurabstand, desto wahrscheinlicher wird die Grundwasserneubildung in einem betrachteten Einzugsgebiet

nicht im zugehörigen Gewässerabschnitt, sondern erst weiter im Unterstrom der Gewässer abflusswirksam.

Durch die Kalibrierung und Evaluation konnte eine wesentlich verbesserte Abbildungsgüte der Berechnungen des Basisabflusses erzielt werden. Insbesondere bei den Oberläufen sind die Abweichungen zwischen den aus Messdaten und den über die kalibrierte Methode ermittelten Basisabflüssen als gering einzustufen. Die Abbildungsgüte ist damit ausreichend hoch, um die im Projekt verfolgten Fragestellungen zu beantworten.

Auf dieser Grundlage wurden die durch Waldumbau erzielbaren Sickerwassermehrerträge in den einzelnen Einzugsgebieten ins Verhältnis zu den errechneten Basisabflussmengen (unter „heutigen“ Bedingungen) gesetzt.

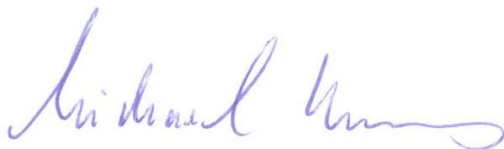
Die Auswertungen haben ergeben, dass besondere in den Teilabschnitten der Oberläufe der Gewässer durch Waldumbau Steigerungen des Basisabflusses möglich sind. In den Unterläufen gehen die erzielbaren Erhöhungen in den hier ohnehin schon hohen Abflussmengen unter.

Die auf diesen Auswertungen aufbauende und weitere Kriterien (Abstand zu den Gewässern und Grundwasserflurabstände) einbeziehende Bewertung der Standortorteignung für Waldumbaumaßnahmen hat ergeben, dass im Landkreis Harburg etwa 30 % der Nadelwaldflächen in Privatbesitz aus hydrogeologischer Sicht mindestens als geeignet anzusehen sind, um das Abflussgeschehen der Oberflächengewässer in ihrem zugehörigen Einzugsgebiet in einem nennenswerten Umfang zu steigern. Das entspricht einer Fläche an mindestens geeigneten Nadelwaldstandorten von ca. 5.500 ha. Ein Umbau dieser Wälder könnte in ihrem jeweiligen Einzugsgebiet das Abflussgeschehen des betreffenden Oberflächengewässerabschnitts nachhaltig verbessern. Allerdings muss hierbei die relativ lange Zeitspanne berücksichtigt werden, die für einen Waldumbau benötigt wird. Waldumbau kann jedoch ein probates Mittel sein, um etwaige zukünftige klimatisch- oder nutzungsbedingte Reduktionen der Abflüsse abzumildern.

Hildesheim, im Februar 2018

CONSULAQUA Hildesheim • Geo-Infometric

Niederlassung der CONSULAQUA Hamburg
Beratungsgesellschaft mbH



i. V. Dipl.-Geol. Michael Brun
Von der IHK Hannover öffentlich bestellter und
vereidigter Sachverständiger für das Sachgebiet
„Hydrogeologie“



i. A. Dipl.- Geogr. Jan Hohlbein

10 Abbildungen und Tabellen

Abbildungen

Abbildung 1:	Lage des Untersuchungsgebiets.....	6
Abbildung 2:	Geländemorphologie im Landkreis Harburg (braun = hoch (max. 155 m ü. NHN), blaugrün = niedrig (bis unter Meeresspiegelniveau)).....	7
Abbildung 3:	Flussgebiete im Landkreis Harburg	8
Abbildung 4:	Landnutzung im Landkreis Harburg	8
Abbildung 5:	Grundwasserflurabstand	15
Abbildung 6:	Bewertungsschema „Hemmer im Strukturmodell“ für zwei Grundwasserhemmer oberhalb des Zielaquifers	17
Abbildung 7:	Schema Abflussbildung. Quelle: Baumgartner, A., & Liebscher, H. J. (1990)	21
Abbildung 8:	Lage der überprüften Abflusspegel im LK Harburg.....	24
Abbildung 9:	Beziehung zwischen GW-Flurabstand und Wahrscheinlichkeit.....	26
Abbildung 10:	Scatterdiagramm Basisabfluss aus Messwerten vs. abgeschätzter Basisabfluss	28
Abbildung 11:	Schematische Darstellung des abflusswirksamen Anteils der Grundwasserneubildung in einem oberirdischen Einzugsgebiet (blaue Pfeile: wird im oberird. EZG selbst abflusswirksam, gelbe Pfeile: wird im darauffolgenden EZG abflusswirksam, roter Pfeil, wird im übernächsten EZG abflusswirksam, grau: oberird. EZG).....	31
Abbildung 12:	Schema der Gebietsunterteilung der oberirdischen Einzugsgebiete	33
Abbildung 13:	Histogramm der Versickerungswirksamkeit in Jahren in der Ostheide, bezogen auf den Zielaquifer AQ3 (CAH 2015)	42

Tabellen

Tabelle 1:	Schematischer Aufbau Strukturmodell (roter Rahmen = Zielaquifer)	13
Tabelle 2:	Aus Messdaten ermittelter Basisabfluss (MoMNQ) und über die einfache Wasserhaushaltsgleichung abgeschätzter Basisabfluss (GWNB = abgeschätzter Basisabfluss) an ausgewählten Pegeln im Vergleich.....	25
Tabelle 3:	Kalibrierte Wichtungsfaktoren für den Parameter "Grundwasserflurabstand".....	27
Tabelle 4:	Aus Messdaten ermittelter Basisabfluss (MoMNQ) und über die kalibrierte Methode abgeschätzter Basisabfluss (GWNB = abgeschätzter Basisabfluss) an ausgewählten Pegeln im Vergleich	28
Tabelle 5:	Sickerwassermehrertrag nach Waldumbau in der Ostheide (Quelle: UDATA, 2015)	30
Tabelle 6:	Beispielhafte Mengenermittlung für den Radenbach (Gebiet Nr. 49 in Abbildung 12)	34
Tabelle 7:	Bedingungen für Wertungsabzug bei Nadelwaldstandorten.....	36
Tabelle 8:	Gesamtergebnis Bewertungsverfahren „Grundwasser“	37
Tabelle 9:	Ursachen für Bewertung "nicht geeignet" im Bewertungsverfahren „Grundwasser“ (Mehrfachnennung möglich)	38
Tabelle 10:	Gesamtergebnis Bewertungsverfahren „Oberflächengewässer“	39

Tabelle 11:	Abgeschätzter Anteil an zusätzlicher Grundwasserneubildung, die den Aquifer erreicht	43
Tabelle 12:	Sickerwasser- und Grundwassermehrerträge je Grundwasserkörper	44

11 Literatur

- Baumgartner, A., & Liebscher, H. J. (1990). Allgemeine Hydrologie: Quantitative Hydrologie. Borntraeger.
- Bund/Länder-Arbeitsgemeinschaft Wasser (LAWA) (2009): Richtlinie Gebiets- und Gewässerverschlüsselung
- CAH (2012): AQUARIUS – Dem Wasser kluge Wege ebnen. Teilprojekt „Hydrogeologische Untersuchungen für die Grundwasserkörper Ilmenau Lockergestein rechts und Jeetzel Lockergestein links“. Abschlussbericht Anhang 4: Modelldokumentation.
- CAH (2014): Hydrologisches Gutachten zur Erneuerung des Wasserrechtes für die Fassungen Nordheide Ost und West sowie die Fassungen Schierhorn der Hamburger Wasserwerke GmbH
- CAH (2015): Wasserwald Arbeitspaket 6: Versickerungswirksamkeit von Grundwasseranreicherungsmaßnahmen aus hydrogeologischer Sicht
- DIN 19732 (1997-06): Bestimmung des standörtlichen Verlagerungspotentials von nichtsorbiebaren Stoffen. Normenausschuss Wasserwesen im Deutschen Institut für Normung, Juni 1997, Beuth Verlag, Berlin.
- DIN 4049-3 (1984): Hydrologie. Teil 3: Begriffe zur quantitativen Hydrologie. Beuth Verlag
- Geo-INFOMETRIC GmbH (2006): Grundwassermodell Nordheide. Dokumentation - Teil I, Erstellen und Beschreiben des hydrogeologischen Modells
- LBEG (Hrsg.) (1982): Hydrogeologische Übersichtskarte von Niedersachsen 1 : 200.000 - Schutzz Potenzial der Grundwasserüberdeckung. Landesamt für Bergbau, Energie und Geologie.
- LBEG (Hrsg.) (2009): GeoFakten 8. Neuß, M. & Dörhöfer, G.: Hinweise zur Anwendung numerischer Modelle bei der Beurteilung hydrogeologischer Sachverhalte und Prognosen in Niedersachsen. Landesamt für Bergbau, Energie und Geologie.
- LBEG (Hrsg.) (2011): GeoFakten 21. Reutter, E.: Hydrostratigrafische Gliederung Niedersachsens. Landesamt für Bergbau, Energie und Geologie.
- UDATA (2015): Wasserwald im Privatwald der östlichen Lüneburger Heide in Niedersachsen: Wasserhaushaltssimulationen, Versickerungstabellen und Versickerungskarten
- WUNDT, W. (1958): Die Kleinstwasserführung der Flüsse als Maß für die verfügbaren Grundwassermengen. In: R. Grahmann (Ed.): Die Grundwässer der Bundesrepublik Deutschland und ihre Nutzung. 47-54. Remagen.

12 Anlagenverzeichnis

Anlage 1 Ergebnisse Methodik Grundwasser

- Anlage 1.1 : Standorteignung für Waldumbau aus hydrogeologischer Sicht. Bewertungsverfahren „Grundwasser“:
Einzelparameter: Boden (BUEK 50)
- Anlage 1.2 : Standorteignung für Waldumbau aus hydrogeologischer Sicht Bewertungsverfahren „Grundwasser“:
Einzelparameter: Oberflächennahe Geologie (GK 25 / 50)
- Anlage 1.3 : Standorteignung für Waldumbau aus hydrogeologischer Sicht Bewertungsverfahren „Grundwasser“:
Einzelparameter: Grundwasserhemmer im Untergrund (Verbreitung + Mächtigkeit)
- Anlage 1.4 : Standorteignung für Waldumbau aus hydrogeologischer Sicht Bewertungsverfahren „Grundwasser“:
Einzelparameter: Mächtigkeit der ungesättigten Zone
- Anlage 1.5 : Standorteignung für Waldumbau aus hydrogeologischer Sicht Bewertungsverfahren „Grundwasser“:
GESAMTBEWERTUNG
- Anlage 1.6 : Standorteignung für Waldumbau aus hydrogeologischer Sicht Bewertungsverfahren „Grundwasser“:
GESAMTBEWERTUNG - Privatwald

Anlage 2 Ergebnisse Methodik Oberflächengewässer

- Anlage 2.1 : Standorteignung für Waldumbau aus hydrogeologischer Sicht Bewertungsverfahren „Oberflächengewässer“:
Eignung oberirdische Einzugsgebiete
- Anlage 2.2 : Standorteignung für Waldumbau aus hydrogeologischer Sicht Bewertungsverfahren „Oberflächengewässer“:
GESAMTBEWERTUNG - Privatwald