Brandenburg. geowiss. Beitr.	Cottbus	**24** (2017), 1/2	S. 83–101	12 Abb., 12 Tab., 6 Zit.

Altersdatierung mittels Isotopenanalytik zur Verweilzeitbestimmung und Identifizierung von Speisungsanteilen des Grundwassers in Brandenburg

Isotope age dating for residence time estimation and identification of different groundwater influx portions in fresh water aquifers of Brandenburg

Falk Bednorz & Dietmar Brose

1 Einleitung

Die Nutzung isotopenhydrogeologischer Methoden in der Hydrogeologie auf dem Territorium des Landes Brandenburg begann mit lokalen Untersuchungen Anfang der 1970er Jahre. Diese wurden vordergründig von der Bergakademie Freiberg und dem Zentralinstitut für Isotopen- und Strahlenforschung durchgeführt.
Das Ziel dieser Arbeiten bestand in der alterstruktuellen Zuordnung der Grundwässer, der Entwicklungsverfolgung der durch Atombombentests stark angestiegenen Tritium (^{3}H)- und Kohlenstoff-14 (^{14}C)-Inputs im Grundwasser und der Geschütztheitsbewertung von Grundwasserlagerstätten.
So wurde z. B. das Wasserwerk (WW) Tettau (Südbrandenburg) langjährig von 1972 bis 1991 dahingehend in unregelmäßigen Abständen untersucht.
Großräumigere Untersuchungen gab es im Zusammenhang mit Braunkohleerkundungen im Raum Fürstenwalde Südost (Trettin 1997), in zahlreichen Wasserwerken des ehemaligen Bezirkes Cottbus (Bednorz 1992) und in sogenannten lokalen Polygonfeldern, die im Rahmen der Grundwasserbeschaffenheitsanalyse der DDR (unfertig abgebrochen) betrachtet wurden.
Die Analytik beschränkte sich damals im Wesentlichen auf Tritium, Kohlenstoff-13/14 (^{13}C/^{14}C) und vereinzelt Deuterium/Sauerstoff-18 (D/^{18}O).
Mitte der 1990er Jahre gab es erste Versuche des Landesamtes für Geologie und Rohstoffe Brandenburg (LGRB) und seit 2004 des Landesamtes für Bergbau, Geologie und Rohstoffe (LBGR) die isotopenhydrogeologischen Methoden zur Verifizierung des im LBGR entwickelten Genesemodells (Software GEBAH) heranzuziehen. Seit 2002 werden nun jährlich meist unterschiedliche Brunnen, Grundwassermessstellen (GWM) und vereinzelt Oberflächengewässer untersucht, um die Aussagen des Genesemodells zu prüfen und bezüglich des Alters bzw. der Verweilzeit des Grundwassers und dessen Speisungsbedingungen zu untersetzen. Dabei wurde das Beprobungs- und Analyseprogramm um die Edelgase Helium-3/Helium-4 (^{3}He/^{4}He) und aktuell auch um Schwefel-34 (^{34}S) erweitert.
Für die Isotopenanalytik wurden das Labor für Umweltisotope des Helmholtz-Zentrums für Umweltforschung GmbH Halle, das Institut für Umweltphysik der Universität Bremen und in Einzelfällen die Hydroisotop GmbH Schweitenkirchen einbezogen.
Von den in Abbildung 1 dargestellten Untersuchungsstandorten werden die markierten in diesem Beitrag erläutert.
In der Kombination von ^{3}H, ^{13}C/^{14}C, D/^{18}O, ^{3}He/^{4}He und teilweise ^{34}S ist es nun auch möglich, Mischwässer aus neubildungsgeprägten jungen und alten gegebenenfalls salinar geprägten Wässern zu identifizieren. Insbesondere bei der Differenzierung von anthropogenen und geogenen Salzquellen liefert die Methode wertvolle Ergebnisse.
Eine Gegenüberstellung und Erläuterung der isotopenphysikalischen mit den hydrogeochemisch-genetischen Befunden erfolgt anhand von Beispielen ausgewählter WW und GWM, in denen mittels GEBAH Speisungsanteile salinarer Tiefenwässer identifiziert wurden. Aber auch bei der Diagnostizierung von Wässern, die der reinen Grundwasserneubildung (GWN) ohne salinare Liegendspeisung unterliegen, konnte in Korrelation der hydrogeochemisch-genetischen Ergebnisse mit den Isotopendaten eine sehr gute Übereinstimmung erzielt werden. Dies soll an Beispielen der GWM mit Mehrfachausbau verdeutlicht werden.
Nur kurz wird die hydrogeochemisch-genetische Bewertung der Analysenergebnisse mit GEBAH dargestellt. Die ausführliche Beschreibung der GEBAH-Klassifikation erfolgt im Beitrag von D. Brose in diesem Band.

2 Isotopenhydrogeologische Methodik

Bei den isotopenhydrogeologischen Untersuchungsmethoden spielen stabile und radioaktive Isotope gleichermaßen eine Rolle. Dabei werden Unterschiede in der Isotopen-Output-Konzentration bzw. -Aktivität in Grundwässern bewertet. Diese werden in Abhängigkeit von Ort, Zeit und Intensität des Eintritts in die Hydrosphäre und von Zerfalls- und Wechselwirkungsprozessen betrachtet (siehe Abb. 2).

Abb. 1: Standorte der Untersuchungen im Land Brandenburg; Nummer 1–6 im Text vorgestellte Standorte
Fig. 1: Investigation sites, 1–6 are discussed in paper

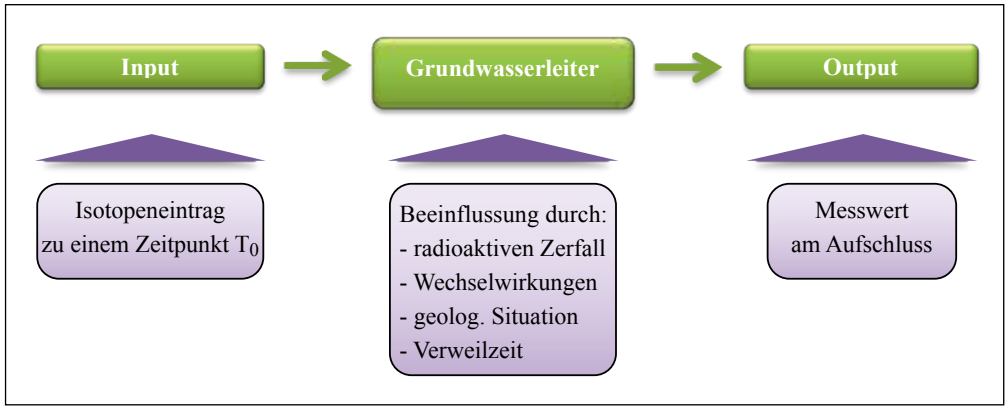

Abb. 2: Grundschema zur Auswertung isotopenhydrogeologischer Daten

Fig. 2: Basic scheme for assessment of isotope data in hydrogeology

Insbesondere die wassermolekülinternen Isotope ^{3}H, ^{2}H (D) sowie ^{18}O aber auch die He-Isotope sind dabei ideale Tracer, da sie die Bewegung des Wassers an sich nachvollziehen und die Möglichkeit bieten, eine maximale potentielle Stoffmigration zu simulieren, da sie:

- der Bewegung des Wassers folgen,
- nicht durch irreversible Sorption und durch physikalische, chemische und biologische Vorgänge fixiert werden,
- nicht die physikalischen Eigenschaften des Wassers verändern,
- eine genügend lange Lebensdauer haben und
- auch in großer Verdünnung nachweisbar sind.

3 Kurzcharakteristik der analysierten Isotope

3.1 Tritium

^{3}H hat eine Halbwertzeit von 12,43 a. Es zerfällt unter Abgabe von β-Strahlen in das stabile ^{3}He. Die Tritium-Aktivität wird in T. E. (Tritium-Einheiten) oder T. R. (tritium ratio) angegeben (1 T. E. = 0,12 Bq/kg Wasser). Für die isotopenhydrogeologische Bewertung spielen zwei genetische Ursachen eine Rolle:

1. der **natürlich-kosmogene Eintrag** mit einem Jahresmittel von ca. 5 T. E. ^{3}H entsteht vorwiegend in den oberen atmosphärischen Schichten durch die Einwirkung von Neutronen auf Stickstoff-14-Atome. Nach der Oxydation zu Tritiumoxid gelangt ^{3}H zu 90 % in die Hydrosphäre. Im Wassermolekül folgt es der Bewegung der atmosphärischen Feuchtigkeit.
2. der **anthropogen verursachte ^{3}H-Eintrag** durch vorwiegend überirdische Kernwaffentests seit 1953 und durch Kernkraftwerke/Aufbereitungsanlagen. Im Zusammenhang mit den Atomtests stieg die durchschnittliche Tritium-Aktivität im Niederschlag um das 1 000fache und bildet somit die eigentliche Grundlage für die Anwendung in der hydrogeologischen Untersuchungsmethodik.

Seit 1963 nimmt die Tritium-Aktivität im Zusammenhang mit dem Teststoppabkommen für oberirdische Atomtests wieder ab. Es ist jedoch nicht zu erwarten, dass der Aktivitätslevel den ursprünglichen Stand aufgrund von vorhin genannten Kernkraftwerken und Aufbereitungsanlagen erreichen wird. Die Differenz wird jedoch zunehmend geringer und es steigen die Ansprüche an den laborativen Nachweis und die Interpretation.

3.2 Kohlenstoff-14

^{14}C ist ebenfalls ein Radionuklid und entsteht durch das Einfangen thermischer Neutronen durch das Isotop ^{14}N.

$$^{14}_{7}N\ (n,p) \rightarrow {}^{14}_{6}C \qquad [1]$$

Als Maß der spezifischen ^{14}C-Aktivität ist die Bezeichnung „%-modern = pmc“ gebräuchlich. Dabei entsprechen 100 %-modern der spezifischen ^{14}C-Aktivität in Holz von 1950 mit 0,226 Bq/g Kohlenstoff. Im Gegensatz zu ^{3}H wurde die ^{14}C-Aktivität im atmosphärischen Kohlendioxid (CO_2) und damit auch im Pflanzen- und Boden-CO_2 durch Atomtests lediglich verdoppelt. 1964 lag die ^{14}C-Aktivität in der Atmosphäre somit bei 200 %-modern. ^{14}C besitzt eine Halbwertzeit von 5 730 a und ist für Altersbestimmungen zwischen 1 000 bis max. 70 000 a geeignet. In Korrelation der vorliegenden Befunde zur Altersdatierung mit den geologischen Lagerungsverhältnissen sind in Brandenburg plausible Ergebnisse überwiegend mit ^{14}C-Anfangsgehalten von 55–65 pmc und nur vereinzelt bis 85 pmc ableitbar. Bei Wechselwirkungen mit Braunkohle führenden Schichten und Anteilen toten Kohlenstoffs (C) können die Anfangsgehalte jedoch verfälscht sein.

3.3 Kohlenstoff-13

^{13}C ist ein stabiles Isotop und im natürlichen C zu 1,12 % enthalten. Es wird durch die Größe $\delta^{13}C$ charakterisiert [2]. Als Standard gilt dabei das CO_2 des PDB (= Belemnella-Standard aus der PeeDee Belemnite limestone formation South Carolina). Die Messung erfolgt massenspektrometrisch und der Messwert wird am Standard verglichen.

$$\delta = \frac{R_F + R_S}{R_S} \times 1\,000\ ‰ \qquad [2]$$

R_F = Isotopenverhältnis der Probe
R_S = Isotopenverhältnis des Standards

Durch eine Reihe von Isotopieeffekten sind bei einer isotopenhydrogeologischen Auswertung die verschiedenen natürlichen Variationsbereiche von ^{13}C in den beteiligten Teilreservoiren des Kohlenstoffkreislaufes nutzbar, wobei innerhalb des Systems bei Milieu ändernden Faktoren (z. B. Kalklösung aus dem Gestein [3])

$$CaCO_3 + CO_2 + H_2O \leftrightarrows 2HCO_3^- + Ca^{2+} \qquad [3]$$

der ^{13}C-Wert verschoben wird. ^{13}C spielt ebenfalls bei der Ermittlung der ^{14}C-Anfangsgehalte eine Rolle.

3.4 Helium-Isotope

Im Vergleich zur alleinigen Datierung des Grundwassers mit ^{3}H lassen sich zusammen mit dessen Tochternuklid ^{3}He belastbarere Ergebnisse erzielen.
Da die Bestimmung und Auswertung von ^{3}H-Analysen insbesondere von Erstmalsbeprobungen zunehmend Unsicherheiten unterliegt, wird seit 2003 das Zerfallsprodukt ^{3}He einbezogen. Damit lässt sich eine genauere Datierung des Grundwassers als bisher bis zurück in die 1950er Jahre durchführen.

Die Methode funktioniert auf Grundlage des Piston-Flow-Modells, das sich für die in den vergangenen Jahren beprobten Messstellen und Brunnen in Brandenburg als plausibler Modellansatz bewährt hat.
Da bei der ^{3}He-^{3}H-Methode nur das Verhältnis dieses Nuklidpaares genutzt wird, ist man von der Variation des ^{3}H-Eintrags unabhängig.
In der praktischen Anwendung ist es zusätzlich möglich, die Mischungsanteile von jungem Wasser (< 40 a) mit altem Wasser zu quantifizieren.
Durch die Analyse weiterer Edelgasisotope, speziell ^{4}He, gewinnt man Informationen über Alter auf Zeitskalen von ~100–1 000 000 a. Eine eindeutige Methodik zur Ableitung von Altern/Verweilzeiten aus ^{4}He für das Grundwasser gibt es nicht. Der Parameter dient jedoch der Prüfung der Plausibilität von ^{14}C-Altern und gibt Hinweise auf potenzielle Einflüsse von totem C auf die ^{14}C-Ergebnisse.

3.5 Deuterium und Sauerstoff-18

Das Hauptreservoir von D und ^{18}O befindet sich in den Ozeanen mit Konzentrationen von ca. 320 ppm (D) und ca. 2 000 ppm (^{18}O) (Moser & Rauert 1980). Bei den Binnenmeeren hängen die Konzentrationen von der Kommunikation mit den Ozeanen, Verdunstungsverlusten und Süßwasserzuflüssen ab.
In der Hydrogeologie wird ausgenutzt, dass unter verschiedenen regionalen Bedingungen unterschiedliche Isotopenfraktionierungen für D und ^{18}O auftreten. Somit sind u. a. folgende Effekte zu berücksichtigen:

1. Kontinentaleffekt: D- und ^{18}O-Abreicherung aufgrund von Ausregnung und Zumischung kontinental gebildeter Niederschläge, die D- und ^{18}O-Werte nehmen mit zunehmender Entfernung zu den Ozeanen und Meeren ab.
2. Höheneffekt: In Gebirgen findet beim Aufsteigen feuchter Luftmassen eine Abreicherung von D und ^{18}O statt (wird z. B. im Hochgebirgsbereich zur Lokalisierung von Grundwassereinzugsgebieten genutzt).
3. Temperatureffekt: Aus den D- und ^{18}O-Werten kann auf die Bildungstemperaturen des Niederschlages geschlossen werden, von dem die zu betrachtenden Grundwässer gespeist wurden. Warm- bzw. kaltzeitlich gebildete Wässer lassen sich damit unterscheiden. So haben pleistozäne Wässer deutlich niedrigere D- und ^{18}O-Werte als Wässer aus warmzeitlichen Perioden.
4. Verdunstungseffekte in Seen: Durch die meist negative Wasserbilanz im Bereich von Binnenseen reichern sich D und ^{18}O darin an. Insbesondere zuflusslose Seen und Bergbaurestlöcher haben deshalb hohe D- und ^{18}O-Gehalte. Mit diesem Effekt lassen sich sowohl die Größenordnung von Grundwasserzuflüssen in den See aber auch eine gegebenfalls vorhandene Speisung in das Grundwasser bewerten (Beispiel: Uferfiltrat).

3.6 Schwefel-34

Für die genetische Zuordnung von Sulfaten im Grundwasser wird in der Hydrogeologie die Untersuchung von δ^{34}S und δ^{18}O am Sulfat eingesetzt.
So lassen sich z. B. die Isotopenverhältnisse im Sulfatschwefel von Evaporitsulfaten verschiedener geologischer Formationen gut voneinander unterscheiden.
Im Lockergesteinsbereich spielt dies jedoch eine untergeordnete Rolle. Hier ist vielmehr gefragt, ob die Herkunft des Sulfats mehr den mesozoischen Evaporiten oder sekundärem Sulfat aus anthropogenen Einträgen oder der Pyrit-Verwitterung zugeordnet werden kann.
Die sekundären Sulfate haben eine ^{34}S-Signatur, die sich signifikant von mesozoischen Evaporiten unterscheidet. Damit kann eingeschätzt werden, ob das Sulfat im Grundwasser aus den Ursprungsgesteinen oder aus anderen Quellen stammt oder ob Mischungen beider Komponenten wahrscheinlich sind.

4. Hydrogeologische und hydrogeochemisch-genetische Beschreibung der Standorte mit geogen salinarer Beeinflussung

4.1 WW Lindow-Gühlen

Durch das WW Lindow-Gühlen wird für die Trinkwassergewinnung ein tiefes bedecktes Grundwasserstockwerk [Grundwasserleiterkomplex (GWLK) 2 nach LGRB-Nomenklatur; Manhenke et al. 1995] genutzt, das sich aus elster- bis saalekaltzeitlichen Sanden zusammensetzt. Diese Grundwasserlagerstätte wird von einem 32–70 m mächtigen Grundwasserstauerkomplex (Grundwasserhemmer) aus saalekaltzeitlichen glazilimnischen Bildungen und Geschiebemergeln überlagert, der eine hydraulische Barriere zu den darüber liegenden weichselkaltzeitlichen Schmelzwassersanden (GWLK 1 nach LGRB-Nomenklatur) bildet.
Die durch die Brunnen erschlossene Grundwasserlagerstätte ist durch komplizierte geologische Lagerungsverhältnisse gekennzeichnet, die sich in kleinräumigen Veränderungen des lithofaziellen Aufbaus der Schichtenfolgen widerspiegeln. So konnte durch Untersuchungsarbeiten im Rahmen der Hydrogeologischen Dargebotserkundung Lindow-Gühlen 1993 der Nachweis eines einheitlichen, im gleichen Niveau ausgebildeten, durchgehend verbreiteten Grundwasserleiters (GWL) im Einzugsgebiet der Wasserfassung nicht erbracht werden. Dieser Tatsache geschuldet, sind die ursprünglich genutzten vier Förderbrunnen des WW selbst in unterschiedlichen Niveaus verfiltert (Abb. 3).
Das unterirdische Einzugsgebiet der Wasserfassung Lindow-Gühlen befindet sich am Rand einer quartären Ausräumungszone (QAZ). Aus dieser Rinnenrandposition resultieren die z. T. stark steilstehenden Schichtenfolgen im Betrachtungsraum. Über den Rinnenrand erfolgt zudem die Intrusion salinarer Tiefenwässer, die eine Qualitätsbeeinträchtigung des durch die Brunnen des WW Lindow-Gühlen geförderten Grundwassers bewirken.

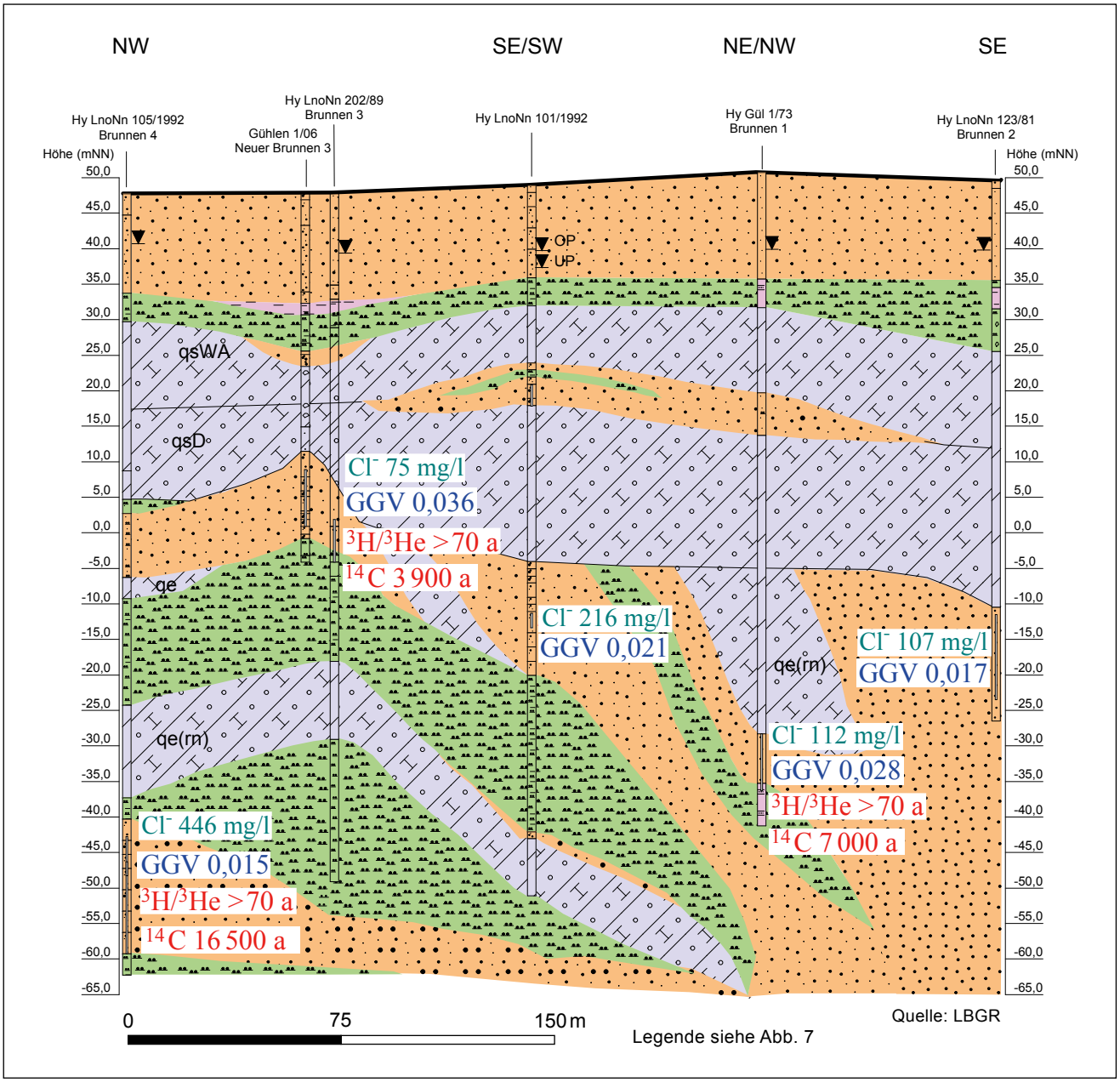

Abb. 3: Fassungsschnitt Wasserwerk Lindow-Gühlen
Fig. 3: Hydrogeological cross section of waterworks Lindow-Gühlen

In allen Brunnen ist aufgrund der genetischen Befunde die Intrusion salinarer Tiefenwässer deutlich erkennbar. Das Verhältnis von Süß- zu Salzwasseranteilen ist jedoch in den einzelnen Brunnen unterschiedlich ausgebildet. So ist der Brunnen 4 vollständig „aufgesalzen“, was schon durch einen Chlorid (Cl^-)-Gehalt von 446 mg/l belegt wird [Genetisches Grundverhältnis (GGV) (nach Rechlin 2008) = 0,015]. Der „Aufsalzungsgrad“ von Brunnen 1 und 2 ist als hoch zu bezeichnen (GGV 0,028 bzw. 0,017). Im Gegensatz zu Brunnen 4 (nicht mehr am Netz) ist jedoch zumindest im Brunnen 1 ein deutlich höherer, noch förderfähiger Süßwasseranteil zur Abdeckung von Bedarfsspitzen identifizierbar. Der Brunnen 3 besitzt den höchsten Anteil förderfähigen Süßwassers (Betrieb in Grundlast), der „Aufsalzungsgrad“ mit Cl^--Gehalten von 75 mg/l (GGV 0,036, aber auch hier Hinweis auf intrusiv migrierend!) ist am geringsten ausgeprägt (Abb. 3 und 4).

In Tabelle 1 sind die Ergebnisse der Isotopenanalytik aufgeführt, anhand derer eine Altersdatierung vorgenommen wurde. Die Ergebnisse der Altersbestimmungen sind in Tabelle 2 enthalten.

Nach dem $^3H/^3He$-Befund (Tab. 1) lässt sich ableiten, dass kein Jungwasser aus den Brunnen gefördert wird und das Alter in allen drei Brunnen über 70 a liegt.

Für die ^{14}C-Altersbestimmungen wurden Anfangsgehalte zwischen 56 und 65 pmc ermittelt. Daraus resultieren Alter zwischen 3 900 und 16 500 a. Die ^4He-Konzentrationen bestätigen die Plausibilität dieser ^{14}C-Altersbewertung. Die

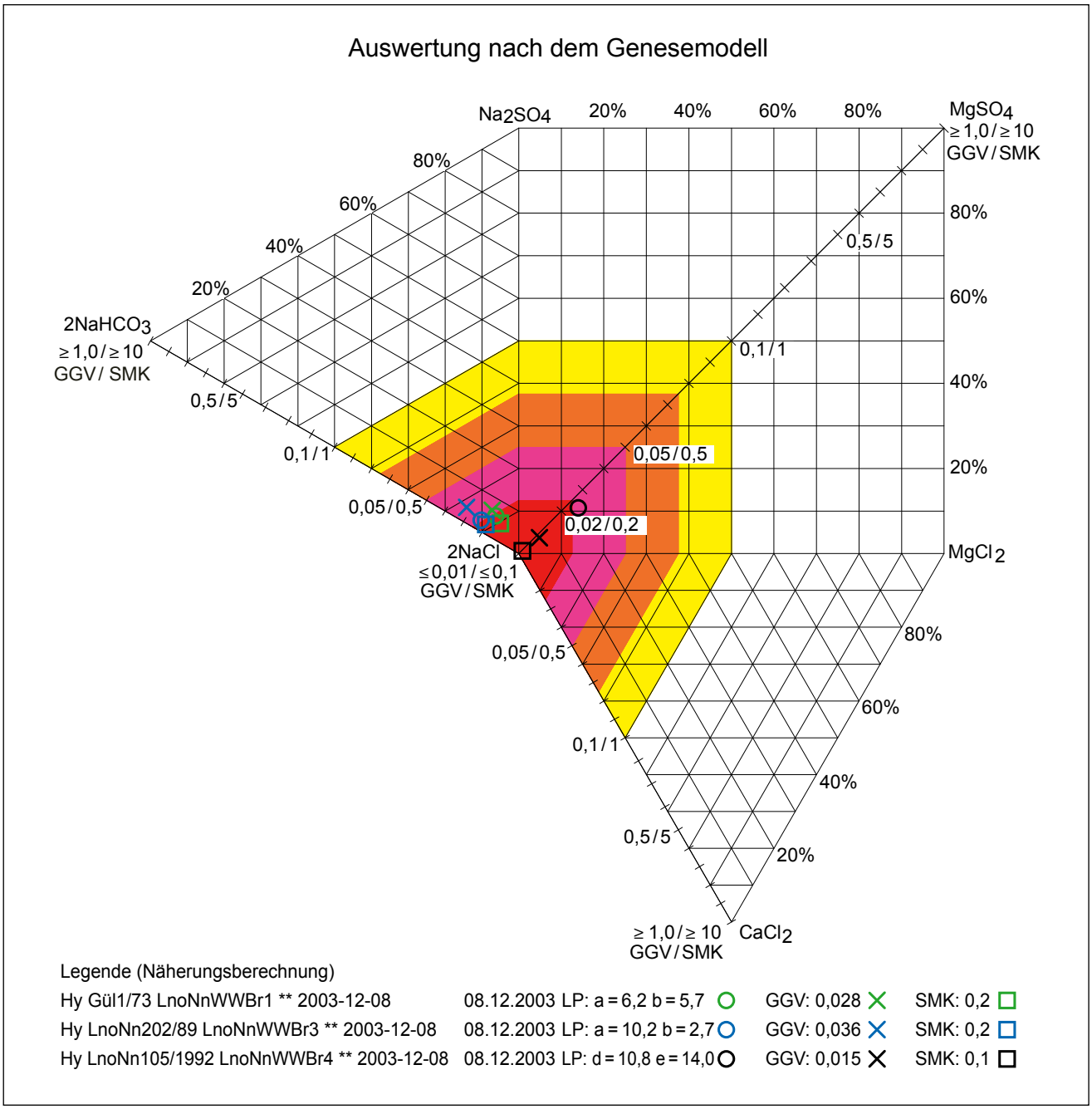

Abb. 4: Wasserwerk Lindow-Gühlen, genetische Bewertung mit GEBAH
Fig. 4: Waterworks Lindow-Gühlen, genetic assessment by using GEBAH

Projekt	Name	Probenahme	^{3}H	^{3}He tritiogen	$^{3}H/^{3}He$ gesamt	^{4}He radiogen	^{14}C	$\delta^{13}C$	$\delta^{18}O$	$\delta^{2}H$
		Datum	[T.E.]	[T.E.]	[T.E.]	[Nml/kg]	[pMC]	[‰]	[‰]	[‰]
Lindow-Gühlen	WW Brunnen 1	08.12.2003	0,008	0,42	0,43	$2,50*10^{-4}$	24,3	-13,5	-8,83	-64,1
	WW Brunnen 3	08.12.2003	0,013	1,06	1,07	$1,87*10^{-4}$	39,7	-13,8	-8,88	-63,5
	WW Brunnen 4	08.12.2003	0,013	0,16	0,17	$6,82*10^{-4}$	9,0	-13,3	-9,22	-67,6

Tab. 1: Ergebnisse der Isotopenbestimmungen für das Wasserwerk (WW) Lindow-Gühlen
Tab. 1: Results of isotope analytics for waterworks Lindow-Gühlen

Projekt	Name	Alter nach $^{3}H/^{3}He$ [a]	Alter nach $^{14}C/^{4}He$ [a]	Bewertung Temperatureffekt $\delta^{18}O/\delta^{2}H$
Lindow-Gühlen	WW Brunnen 1	> 70	7 000	warmzeitlich (Holozän)
	WW Brunnen 3	> 70	3 900	warmzeitlich (Holozän)
	WW Brunnen 4	> 70	16 500	Übergang kaltzeitlich zu warmzeitlich oder Zumischung präpleistozäner Wässer

Tab. 2: Ergebnisse der Altersbestimmungen/Bewertung stabiler Isotope Wasserwerk (WW) Lindow-Gühlen
Tab. 2: Results of age dating/assessment stable isotopes for waterworks Lindow-Gühlen

hier zu beobachtenden Schwankungen der Altersstruktur in der Wasserfassung sind nur durch die unterschiedlichen Anteile salinarer Tiefenwässer erklärbar. Der Brunnen 4 mit dem stärksten Salinareinfluss hat somit auch das höchste Alter. Bei den stabilen Isotopen ^{18}O und D deuten sich für den Brunnen 4 kältere Bildungstemperaturen an. Die Messwerte liegen jedoch noch nicht in der für eiszeitliche Bildungen typischen Größenordnung von < -10 ‰ (^{18}O) bzw. < -70 ‰ (D). Die Befunde lassen auf Wässer aus dem Übergang von kaltzeitlichen zu warmzeitlichen Bildungen der Grundwässer oder auf eine Zumischung präpleistozäner Wässer schließen.
Mit den Isotopenbefunden konnte die genetisch identifizierte salinare Liegendspeisung in allen Brunnen sowohl bestätigt als auch altersstrukturell spezifiziert werden. Der förderfähige Süßwasseranteil ist ^{3}H-frei und unterliegt somit nicht der aktuellen Grundwasserneubildung. In Korrelation der hydrogeochemisch-genetischen und isotopenphysikalischen Ergebnisse mit den geologischen Lagerungsverhältnissen weist der GWLK 2 einen sehr hohen Geschütztheitsgrad auf.

4.2 WW Flatow

Das WW Flatow befindet sich regionalgeologisch auf der Glien-Hochfläche, einer saaleglazial angelegten und weichselkaltzeitlich überprägten Grundmoränenplatte. Die drei Brunnen des WW fördern aus dem Hauptgrundwasserleiter (HGWL) des Betrachtungsraumes (GWLK 2), der ab einer Teufe von 33 m erbohrt wurde und von saalekaltzeitlichen Schmelzwassersanden aufgebaut wird. Der GWLK 2 erreicht eine Mächtigkeit von bis zu 12 m, sein mittlerer kf-Wert kann mit $5*10^{-4}$ m/s angegeben werden. Überlagert wird er von einer bindigen Schichtenfolge, die sich aus einer Wechsellagerung von Geschiebemergel und schluffig-tonigen Beckenablagerungen zusammensetzt. In diesen Schichtenkomplex, der insgesamt als Grundwasserhemmer fungiert, sind vereinzelt sandige Horizonte geringer Mächtigkeit eingeschaltet. Im Standortbereich stehen oberflächig Sande des Brandenburger Stadiums (qw1) mit einer Mächtigkeit von ca. 3 m (GWLK 1) an, die nur eine saisonale Wasserführung aufweisen. Der mittlere Grundwasserstand liegt im Betrachtungsraum bei 37–38 m NN, die generelle Grundwasserfließrichtung verläuft von E nach W. Der Ruhewasserspiegel des gespannten Grundwassers im HGWL wurde in den Brunnenbohrungen zwischen 7,8 und 10 m unter Geländeoberkante (GOK) ermittelt.
Ungefähr 2,5 km westlich vom WW-Standort verläuft eine QAZ, deren Basis zwischen -200 und -300 m NN liegt. Durch seismische Untersuchungen wurden Fehlstellen im Rupelton nachgewiesen. Die hydrogeochemisch-genetische Bewertung der vorliegenden Rohwasseranalysen des WW Flatow mit GEBAH weist für alle Förderbrunnen Speisungsanteile salinarer Tiefenwässer nach. Die Beeinflussung in den langjährigen Untersuchungsreihen reicht von „diffus migrierend bis migrierend“ (GGV 0,046 Brunnen 1) über „migrierend bis intrusiv migrierend“ (GGV 0,037 Brunnen 2) bis zu „intrusiv migrierend bis nahe intrusiv“ (GGV 0,022 Brunnen 3; Abb. 5). Im weiteren Anstrom des WW selbst konnte in den im wasserwirtschaftlich genutzten HGWL installierten Bewässerungsbrunnen der Nachweis geogen salinarer Wässer nicht erbracht werden. Hingegen sind die nordwestlich des WW Flatow im GWLK 2 ausgebauten Bewässerungsbrunnen, die sich zwischen der QAZ und den WW-Brunnen befinden, hydrogeochemisch-genetisch deutlich durch salinare Liegendspeisung gekennzeichnet (Abb. 6). Der Transport und die Intrusion des Salzwassers im wasserwirtschaftlich genutzten GWL erfolgt somit verstärkt durch hydraulische Entlastung entgegen der Grundwasserfließrichtung.
Die Ergebnisse der Altersbestimmungen aus den Isotopendaten liefern (mit der Quantifizierung der Jungwasser- bzw. Altwasserkomponenten) wichtige zusätzliche Hinweise zu den Speisungsbedingungen des HGWL und fließen somit bei der Entscheidungsfindung für dessen Weiterbewirtschaftung (Prognose) durch die Wasserfassung Flatow mit ein. Für die Identifizierung der Herkunft der Sulfat-Gehalte (20–30 mg/l) bei Anwesenheit salinarer Tiefenwässer erfolgte zusätzlich eine Bestimmung der ^{34}S-Signatur.
Tabelle 3 fasst die Befunde der Isotopenanalytik zusammen, anhand derer Altersbestimmungen vorgenommen wurden (Ergebnisse in Tab. 4).
Unter Ansatz eines Anfangsgehaltes von 60 pmc ergeben sich Alter zwischen 1 020 und 3 000 Jahren (Abb. 6). Diese Alter erscheinen aus der Sicht des möglichen Fließweges und daraus resultierender Fließzeiten relativ hoch. Der ^{14}C-Befund kann jedoch durch ^{14}C-freie Tiefenwässer beeinflusst sein.

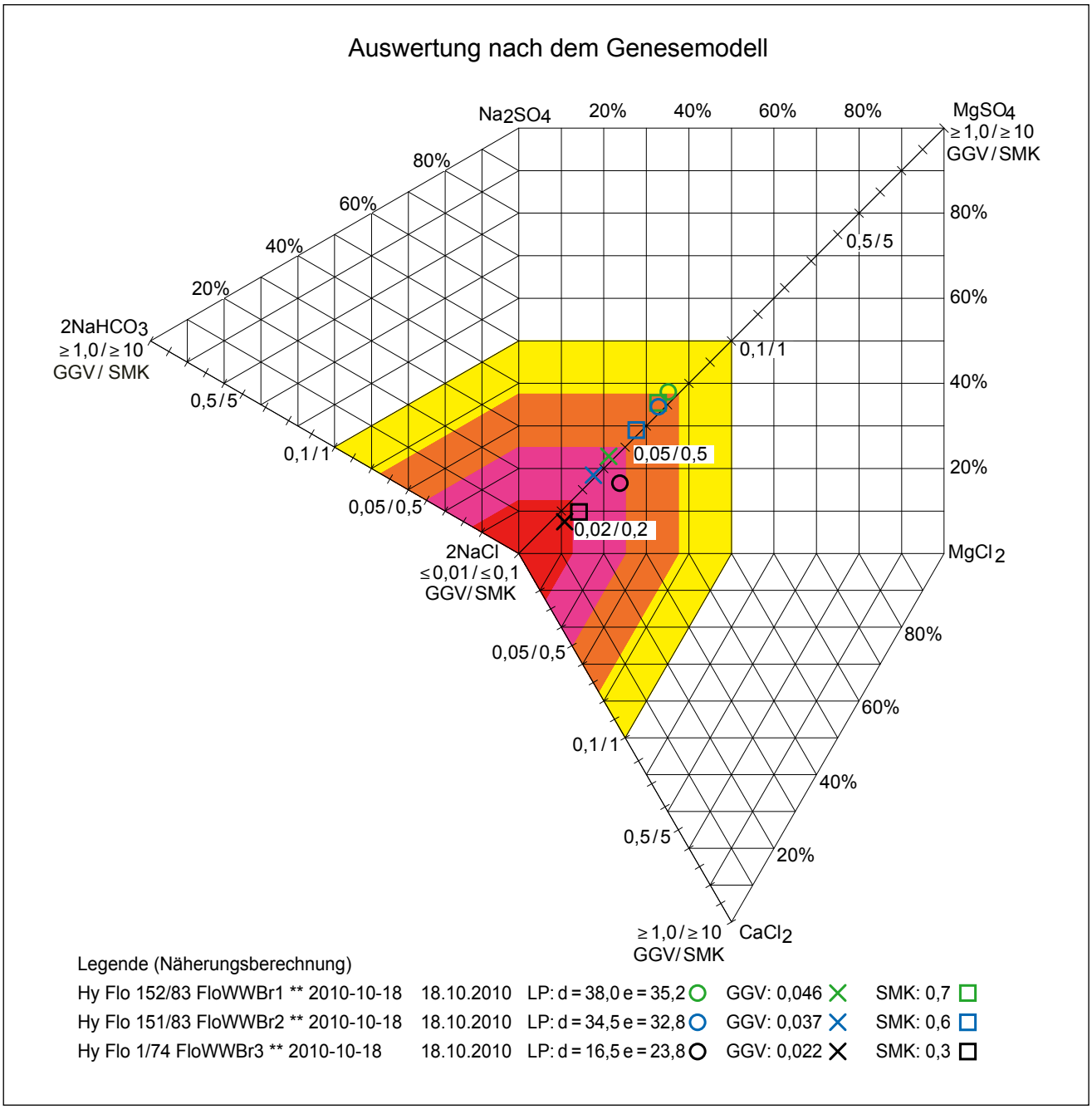

Abb. 5: Wasserwerk Flatow, genetische Bewertung mit GEBAH
Fig. 5: Waterworks Flatow, genetic assessment by using GEBAH

Generell kann eingeschätzt werden, dass das Wasser sicher mehr als 60 a, wahrscheinlich einige hundert bis < 3 000 a alt ist und nicht dem Einfluss der aktuellen Grundwasserneubildung unterliegt.

2015 wurden die Brunnen 1 bis 3 ausschließlich auf ^{34}S mit dem Ziel untersucht, die genetische Herkunft der Sulfat-Anteile im Grundwasser zu präzisieren. Die Ergebnisse aller drei Brunnen zeigen dabei eine ähnliche Größenordnung. Die Werte lassen auf eine Mischung von Wässern mit ^{34}S-Anteilen schließen, die sowohl aus mesozoischen Evaporiten als auch aus jüngeren Sekundärsulfaten stammen. Mit den Isotopenbefunden konnte die genetisch identifizierte salinare Liegendspeisung auch hier bestätigt und altersstrukturell untersetzt werden. Der förderfähige Süßwasseranteil ist nahezu ^{3}H-frei und unterliegt somit nicht der aktuellen Grundwasserneubildung. In Korrelation der hydrogeochemisch-genetischen und isotopenphysikalischen Ergebnisse mit den geologischen Lagerungsverhältnissen weist der HGWL einen sehr hohen Geschütztheitsgrad auf.

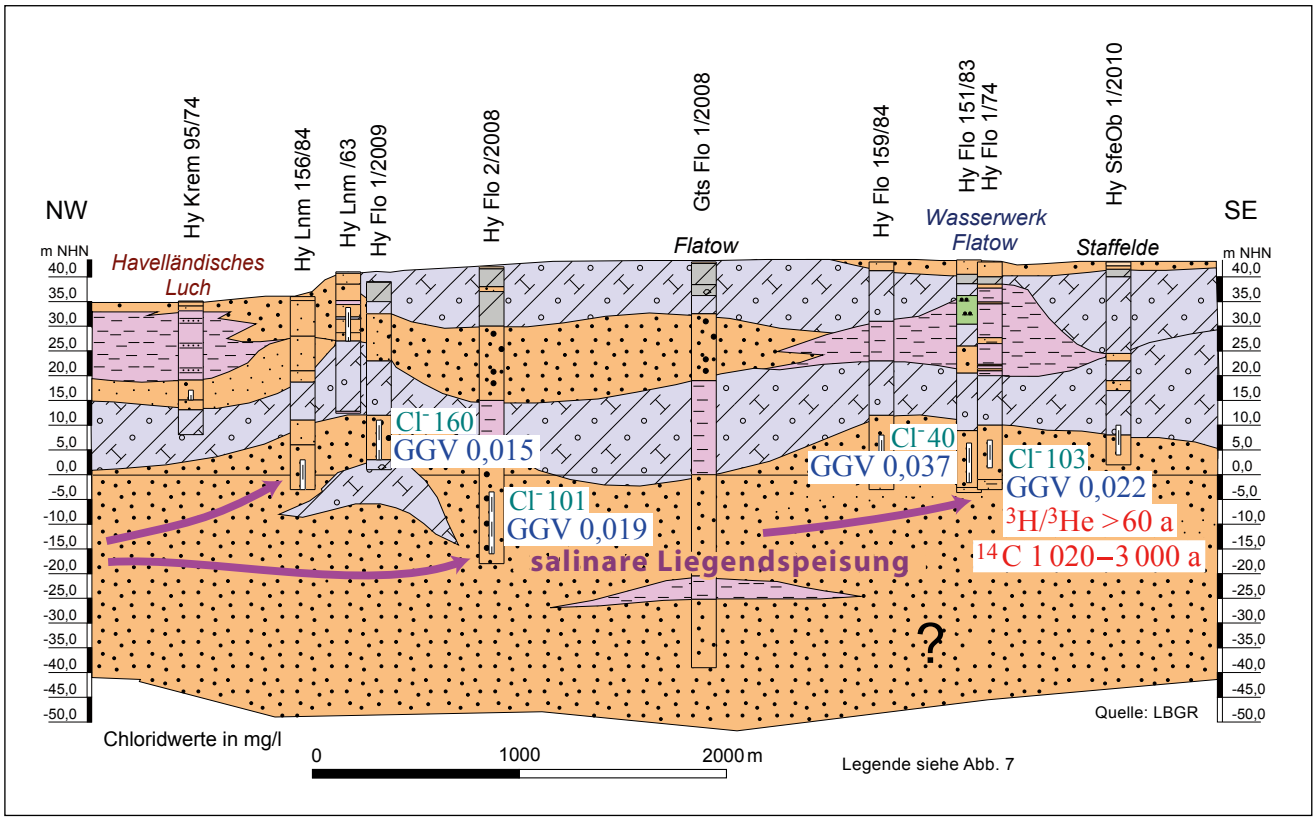

Abb. 6: Hydrogeologischer Profilschnitt Wasserwerk Flatow
Fig. 6: Hydrogeological cross section of waterworks Flatow

Projekt	Name	Probe-nahme	^{3}H	^{3}He tritiogen	^{3}H/^{3}He gesamt	^{4}He radiogen	^{14}C	δ^{13}C	δ^{18}O	δ^{2}H	^{34}S * v. SO_4	^{18}O * v. SO_4
		Datum	[T.E.]	[T.E.]	[T.E.]	[Nml/kg]	[pmc]	[‰]	[‰]	[‰]	[‰]	[‰]
WW Flatow	Brunnen 1	18.10.2010	0,06	2,0	2,06	$9{,}60*10^{-5}$	43,3±0,7	-13,7	-8,93	-64,4	3,4	7,5
	Brunnen 2	18.10.2010	0,06	2,0	2,06	$1{,}06*10^{-4}$	53,1±0,8	-14,4	-9,02	-64,8	3,6	7,0
	Brunnen 3	18.10.2010	0,02	2,0	2,02	$2{,}64*10^{-4}$	42,0±0,7	-15,2	-9,00	-64,8	3,4	7,4

*Tab. 3: Ergebnisse der Isotopenbestimmungen für das Wasserwerk (WW) Flatow; *Nachbeprobung am 21.09.2015*
Tab. 3: Results of isotope analytics for waterworks Flatow

Projekt	Name	Alter nach ^{3}H/^{3}He	Alter nach ^{14}C*/^{4}He	Bewertung Temperatureffekt δ^{18}O/δ^{2}H
		[a]	[a]	
WW Flatow	Brunnen 1	> 60	2 700	warmzeitlich (Holozän)
	Brunnen 2	> 60	1 020	warmzeitlich (Holozän)
	Brunnen 3	> 60	3 000	warmzeitlich (Holozän)

*Tab. 4: Ergebnisse der Altersbestimmungen/Bewertung stabiler Isotope Wasserwerk (WW) Flatow; *berechnet mit einem Anfangsgehalt von 60 pmc*
Tab. 4: Results of age dating/assessment stable isotopes for waterworks Flatow

4.3 WW Mildenberg

Die Wassergewinnung erfolgt aus drei ca. 200 m nördlich des WW gelegenen Brunnen, die aus einem bedeckten quartären GWL (GWLK 2) fördern. Im Bereich der Wasserfassung gibt es einen oberen unbedeckten GWL (GWLK 1), bestehend aus bis zu 10 m mächtigen weichselzeitlichen Sanden. Im südwestlichen Einzugsgebiet des WW werden diese größtenteils von 0,3–0,6 m (max. 2 m) mächtigen holozänen Bildungen (Humus, Torf) bedeckt. Unterlagert wird der GWLK 1 von einem Grundwasserhemmer, der sich aus 5–15 m mächtigen weichselzeitlichen Geschiebemergeln, Schluffen und Bändertonen zusammensetzt. Darunter folgt der vom WW Mildenberg wasserwirtschaftlich genutzte GWL (GWLK 2), welcher von saale- bis weichselzeitlichen, glazifluviatilen, sandig-kiesigen Schichten gebildet wird. Deren Mächtigkeit beträgt etwa 20–40 m (am WW-Standort ca. 30 m). Im Liegenden sind saalezeitliche Geschiebemergel und Schluffe mit Mächtigkeiten zwischen 10 und 40 m verbreitet. Diese sind im Bereich der WW-Brunnen nicht durchgängig ausgebildet, so dass Verbindungen zu tiefer liegenden Grundwasserstockwerken wahrscheinlich sind. Auch ein Kontakt zu höher mineralisierten Wässern des Tiefenwasserstockwerkes ist insbesondere im Bereich einer nahegelegenen quartären Ausräumungszone nicht auszuschließen (Abb. 7).

Die hydrogeochemisch-genetische Bewertung der vorliegenden Rohwasseranalysen des WW Mildenberg mit GEBAH weist für alle Förderbrunnen Speisungsanteile salinarer Tiefenwässer nach. Die Beeinflussung reicht von „migrierend“ (GGV 0,053 Brunnen 1) bis zu „intrusiv migrierend“ (GGV 0,046 Brunnen 2; GGV 0,037 Brunnen 3; Abb. 8). Die Ergebnisse der Altersbestimmungen aus den Isotopendaten liefern (mit der Quantifizierung der Jungwasser- bzw. Altwasserkomponenten) wichtige zusätzliche Hinweise zu den Speisungsbedingungen des GWLK 2 und fließen somit bei der Entscheidungsfindung für dessen Weiterbewirtschaftung (Prognose) durch die Wasserfassung Mildenberg mit ein. Um zu klären, ob der unmittelbar östlich an die Wasserfassung angrenzende Tonstich bei der Ausweisung des Wasserschutzgebietes einzubeziehen ist, wurden zur Identifizierung von Uferfiltratanteilen im GWLK 2 die Befunde der Isotopensignatur von D/^{18}O aus dem Tonstich mit dem Grundwasser abgeglichen. Die Analysenergebnisse gemäß Tabelle 5 zeigen eindeutig die für derartige überwiegend niederschlagsgespeisten Teiche typischen Eindunstungseffekte. Die Gehalte an D und ^{18}O unterscheiden sich damit signifikant von den Befunden aus den Brunnen. Daraus kann abgeleitet werden, dass eine Kommunikation zwischen den Brunnen des WW Mildenberg und dem östlich angrenzenden Tonstich nicht gegeben ist.
In Tabelle 5 sind die Ergebnisse der Isotopenanalytik

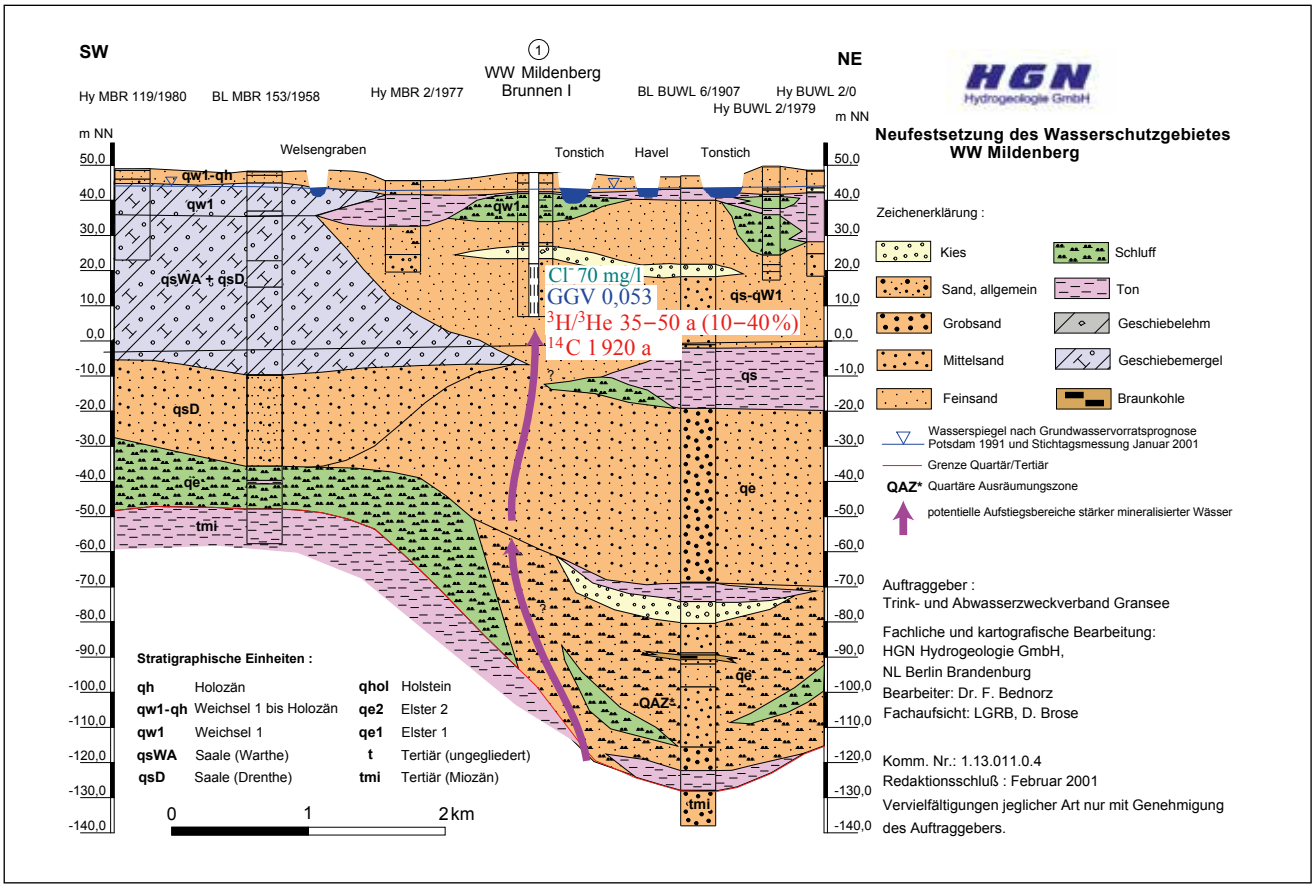

Abb. 7: Hydrogeologischer Profilschnitt Wasserwerk (WW) Mildenberg
Fig. 7: Hydrogeological cross section of waterworks Mildenberg

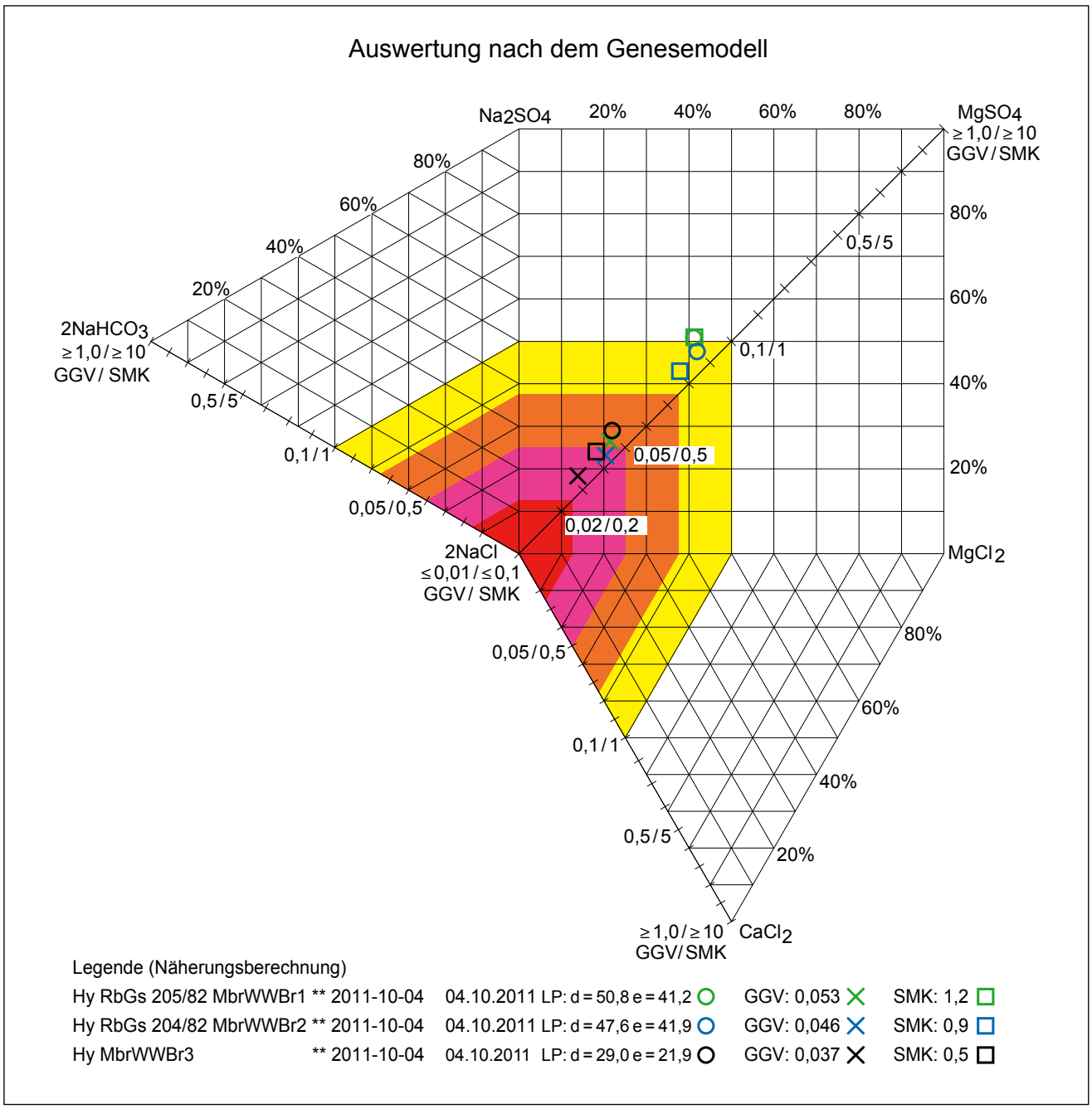

Abb. 8: Wasserwerk Mildenberg, genetische Bewertung mit GEBAH
Fig. 8: Waterworks Mildenberg, genetic assessment by using GEBAH

Projekt	Name	Probenahme Datum	^{3}H [T.E.]	^{3}He tritiogen [T.E.]	$^{3}H/^{3}He$ gesamt [T.E.]	^{4}He radiogen [Nml/kg]	^{14}C [pmc]	$\delta^{13}C$ [‰]	$\delta^{18}O$ [‰]	$\delta^{2}H$ [‰]
WW Mildenberg	Brunnen 1	04.10.2011	2,65	25,0	27,6	$18,5*10^{-5}$	47,6 ± 0,5	-10,7	-8,45	-59,9
	Brunnen 2	04.10.2011	4,45	37,0	41,4	$18,6*10^{-5}$	57, 2 ± 0,5	-10,6	-8,64	-60,6
	Brunnen 3	04.10.2011	1,2	n.b.	>1,2	n.b.	18,5 ± 0,3	-11,1	-8,44	-59,8
Mildenberg	Tonstich	10.10.2012	-	-	-	-	-	-	-1,66	-26,5

Tab. 5: Ergebnisse der Isotopenbestimmungen für das Wasserwerk (WW) Mildenberg
Tab. 5: Results of isotope analytics for waterworks Mildenberg

Projekt	Name	Alter nach $^{3}H/^{3}He$ [a]	Alter nach $^{14}C^{*}/^{4}He$ [a]	Anteil junge Komponente [%]	Anteil alte Komponente [%]	Bewertung Temperatureffekt $\delta^{18}O/\delta^{2}H$
WW Mildenberg	Brunnen 1	ca. 35–50	1 920	10–40	60–90	warmzeitlich (Holozän)
	Brunnen 2	ca. 35–50	365	20–60	40–80	warmzeitlich (Holozän)
	Brunnen 3	-	9 500	5–15	85–95	warmzeitlich (Holozän)

*Tab. 6: Ergebnisse der Altersbestimmungen/Bewertung stabiler Isotope Wasserwerk (WW) Mildenberg; *berechnet mit einem Anfangsgehalt von 60 pmc*

Tab. 6: Results of age dating/assessment stable isotopes for waterworks Mildenberg

aufgeführt, anhand derer eine Altersdatierung vorgenommen wurde. Die Ergebnisse der Altersbestimmungen der einzelnen Mischwasserkomponenten sind in Tabelle 6 enthalten.

Der Brunnen 2 hat mit ca. 20–60 % den höchsten Jungwasseranteil. Im Brunnen 3 mit dem niedrigsten GGV und Salinar-Matrix-Koeffizient (SMK; Rechlin 2008) dominiert mit 85–95 % der Anteil der alten Komponente. Der ^{14}C-Gehalt für den Brunnen 2 deutet darauf hin, dass das Wasser insgesamt deutlich jünger ist als im Brunnen 1.

Für die ^{14}C-Altersdatierung bestätigt sich durch den Befund der stabilen Isotope, dass der Anfangsgehalt am Standort nicht größer sein kann als 60 pmc. Anderenfalls würden sich ^{14}C-Alter von mehr als 10 000 a ergeben (Weichsel-Kaltzeit), was jedoch den $D/^{18}O$-Werten widersprechen würde, die klar warmzeitliche Bildungstemperaturen anzeigen.

Aufgrund der nachweislichen Jungwasseranteile sind die Brunnen 1 und 2 weniger durch einen potenziellen Aufstieg salinarer Wässer gefährdet als der Brunnen 3.

Mit den Isotopenbefunden konnte sowohl die genetisch identifizierte salinare Liegendspeisung als auch die GWN-Komponente bestätigt und altersstrukturell untersetzt werden. Die Förderbrunnen weisen jeweils unterschiedliche Anteile einer Jung- und Altwasserkomponente auf. Dem förderfähigen Süßwasseranteil (Jungwasserkomponente) konnte eine Verweilzeit zugeordnet werden, die einer älteren GWN zuzuordnen ist. Die Brunnen des WW Mildenberg fördern demnach aus einem alten statischen Grundwasservorrat, dem partiell eine jüngere Komponente aus der Neubildung zuströmt. In Korrelation der hydrogeochemisch-genetischen und isotopenphysikalischen Ergebnisse mit den geologischen Lagerungsverhältnissen weist der GWLK 2 am WW-Standort und im fassungsnahen Einzugsgebiet einen hohen Geschütztheitsgrad auf.

4.4 Grundwassermessstelle Spreenhagen

Diese Messstellengruppe wurde 2011 im Auftrag des LBGR im Rahmen des Salinarmonitorings errichtet.

Sie befindet sich westlich der Ortslage Spreenhagen unmittelbar südlich des Oder-Spree-Kanals, relativ zentral innerhalb des Berliner Urstromtals. Im nördlichen Vorland des Urstromtals dominieren große Sanderflächen, deren Oberflächen von ca. 65 m NN bis auf ca. 35 m NN im Bereich des Oder-Spree-Kanals abfallen. Im Urstromtal bilden die glazifluviatilen Sande einen oberen unbedeckten und bis zu 50 m mächtigen GWL (GWLK 1), der als HGWL des Gebietes fungiert. Der Ruhewasserspiegel liegt bei ca. 2,5 m u. GOK. Die Basis des GWLK 1 besteht aus bis zu 15 m mächtigen Holstein-zeitlichen Schluffen und schluffigen Sanden mit hohem organischen Anteil und vereinzelten Exemplaren von *Viviparum diluvianus*. Im Liegenden bauen elsterzeitliche Sande den GWLK 2 auf, der durch Schluffhorizonte aufgespalten wird. Etwa 70 m u. GOK wurden tertiäre Schichtenfolgen erbohrt, die sich aus miozänen Braunkohleschluffen und Fein- bis Mittelsanden zusammensetzen. Letztere werden nach LBGR-Nomenklatur dem GWLK 3 zugeordnet. Der Rupelton konnte in der Bohrung in einer Teufe ab 135 m nachgewiesen werden.

Da in diesem Betrachtungsraum der Aufstieg salinarer Tiefenwässer bis in das Niveau der Vorflut hinlänglich bekannt ist, erfolgte zum direkten Nachweis bzw. zur regelmäßigen Beobachtung und Beschreibung der Aufstiegsmechanismen im Rahmen der hydrogeochemischen Früherkennung mit GEBAH ein Mehrfachausbau der GWM in dafür relevanten Horizonten. Der Oberpegel (OP) wurde im GWLK 1 im Teufenbereich zwischen 19 und 23 m errichtet. Der Ausbau des Mittel- (MP) und Unterpegels (UP) erfolgte jeweils im GWLK 3, der MP in einem Teufenbereich zwischen 104 und 108 m. Der UP wurde unmittelbar oberhalb der erbohrten Rupel-Folge in einer Teufe von 131–135 m innerhalb der Cottbuser Schichten installiert (Abb. 9). Anhand der im Rahmen der Probenahmen gemessenen Grundwasserspiegel ist tendenziell ein abwärts gerichteter Druckgradient innerhalb der Messstellengruppe zu verzeichnen.

Die Wässer des UP sind zum Zeitpunkt der Probenahme mit einem Cl^{-}-Gehalt von 478 mg/l und einem GGV von 0,011 deutlich salinar geprägt und werden in GEBAH mit „intrusiv“ eingestuft. Im MP werden die salinaren Speisungsanteile mit GEBAH durch ein GGV von 0,061 immer noch identifiziert, obwohl der Cl^{-}-Gehalt mit ca. 26 mg/l eher unauffällig erscheint. Genau diese Identifikationen (GGV/Cl^{-}-Gehalt) erlangen im Hinblick auf die hydrogeochemisch-genetische salinare Früherkennung eine außerordentlich wichtige Bedeutung und bedürfen vor diesem Hintergrund einer langfristigen Beobachtung und Bewertung. Der OP ist hydrogeochemisch-genetisch eindeutig durch Wässer der Grundwasserneubildung gekennzeichnet, Speisungsanteile salinarer Tiefenwässer sind nicht diagnostizierbar (Abb. 10).

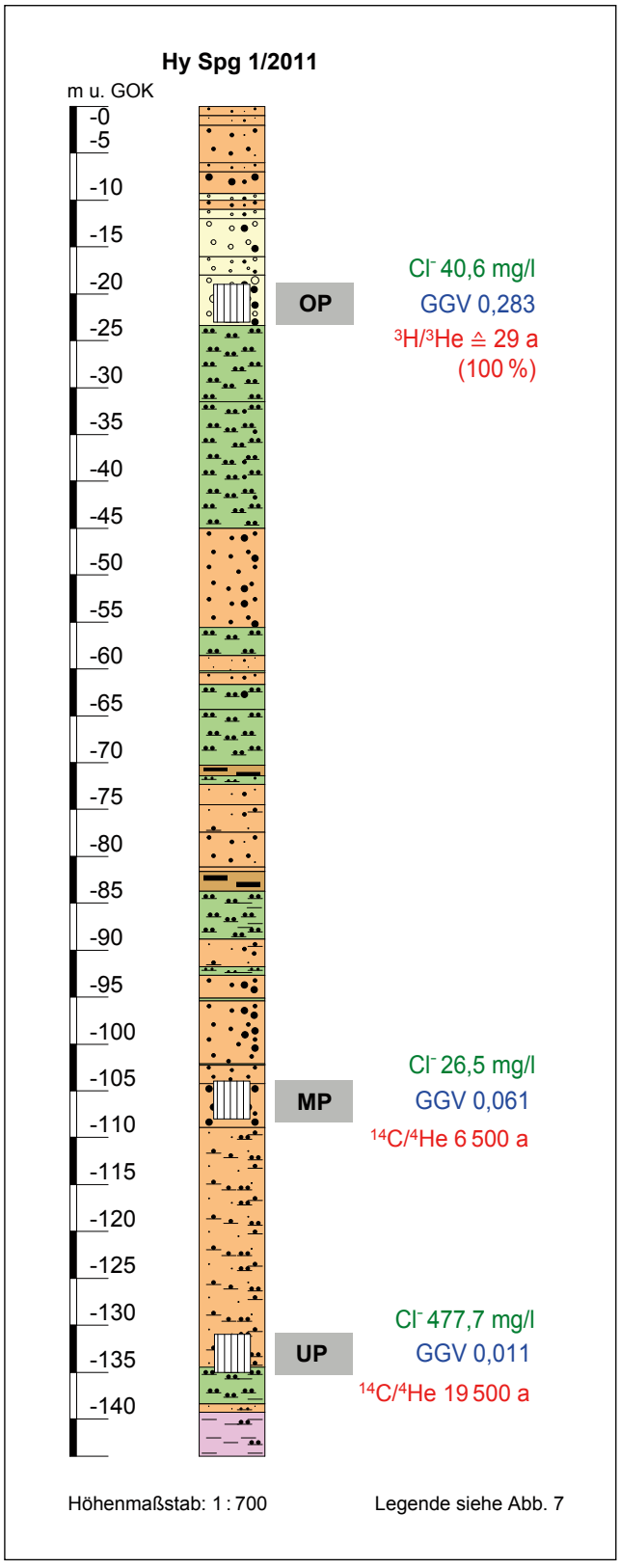

Abb. 9: Schichtenverzeichnis mit Ausbau der Grundwassermessstellen (GWM) Spreenhagen
Fig. 9: Drill lock with groundwater observation well Spreenhagen

Zur Klärung der Kommunikation Oder-Spree-Kanal mit dem GWLK 1 wurden die Befunde der Isotopensignatur von D/^{18}O aus dem Kanal mit dem Grundwasser abgeglichen. Im Ergebnis dessen konnte eine Speisung durch Uferfiltratanteile aus dem Oder-Spree-Kanal in den GWLK 1 im Standortbereich nachgewiesen werden.

In Tabelle 7 sind die Ergebnisse der Isotopenanalytik aufgeführt, anhand derer Altersbestimmungen vorgenommen wurden (Tab. 8).

Der OP der Messstellengruppe hat ein junges neubildungsgeprägtes Wasser mit einem ^{3}H-Alter von ca. 29 a. Der geringe Gehalt an radiogenem ^{4}He belegt, dass keine Altwasserkomponente beteiligt ist. Mit den stabilen Isotopen D und ^{18}O wurden Eindunstungswässer aus dem Oder-Spree-Kanal identifiziert, der hier durch die Einstauhaltung der Schleuse Wernsdorf in den GWLK 1 einspeist.

Der ^{14}C-Gehalt ist im OP hoch und rein rechnerisch ergibt sich daraus ein Alter < 60 a und damit in der Größenordnung des ^{3}H-Befundes. Da anhand der radiogenen ^{4}He-Gehalte keine Altwasserkomponente im OP existiert, bestätigt sich in diesem Fall deutlich die Richtigkeit des ^{14}C-Anfangsgehaltes von 65 pmc.

Beim MP wurde aufgrund der Tiefenlage des Filters von 104–108 m u. GOK auf die Untersuchung von ^{3}H/^{3}He verzichtet. Mit einem ^{14}C-Gehalt von 30 pmc ist der Zerfallsprozess stark vorangeschritten und es ergibt sich daraus bereits ein Alter von ca. 6 500 a. Aus dem ^{13}C-Befund deutet sich ein Einfluss von Austauschprozessen durch toten C an, was im Zusammenhang mit den tertiären Braunkohlenhorizonten in dieser Region plausibel ist.

Generell passt dieses isotopenphysikalische Bild zur Einstufung im Genesemodell als ein sehr gering mineralisiertes Wasser des Natrium-Typs mit einem geringen diffus migrierenden Salinareinfluss.

Der UP hat im Vergleich zum MP nur noch einen ^{14}C-Wert von 6 pmc, woraus sich ein hohes ^{14}C-Alter von 19 500 a bei einem Anfangsgehalt von 65 pmc ergibt. Auch hier sind Austauschprozesse mit totem C aus den ^{13}C-Werten abzuleiten.

Die stabilen Isotope D/^{18}O zeigen für den UP einen Einfluss kälterer Bildungstemperaturen an, so dass ^{14}C-Alter von ca. 12 000 a durchaus zum Ende der Weichsel-Kaltzeit passen.

Diese Aussage wird zudem von dem sehr hohen radiogenen ^{4}He-Wert gestützt, der das hohe Alter bestätigt. Die Wässer im GWL des UP nehmen offenbar kaum am Wasserkreislauf teil.

Mit den Isotopenbefunden konnte die genetisch identifizierte salinare Liegendspeisung sowohl im UP als auch im MP (beachte im MP die geringen Cl^{-}-Gehalte!) als auch die GWN-Komponente im OP bestätigt und altersstrukturell untersetzt werden.

Aufgrund der hier geschilderten Befunde ist diese Messstellengruppe für die kontinuierliche Beschreibung der Mechanismen der salinaren Früherkennung in den MP und OP in Abhängigkeit von den Niederschlagsereignissen bestens geeignet und wird im Rahmen des Salinarmonitorings des LBGR weiterhin langfristig einmal jährlich beprobt und hydrogeochemisch mit GEBAH bewertet.

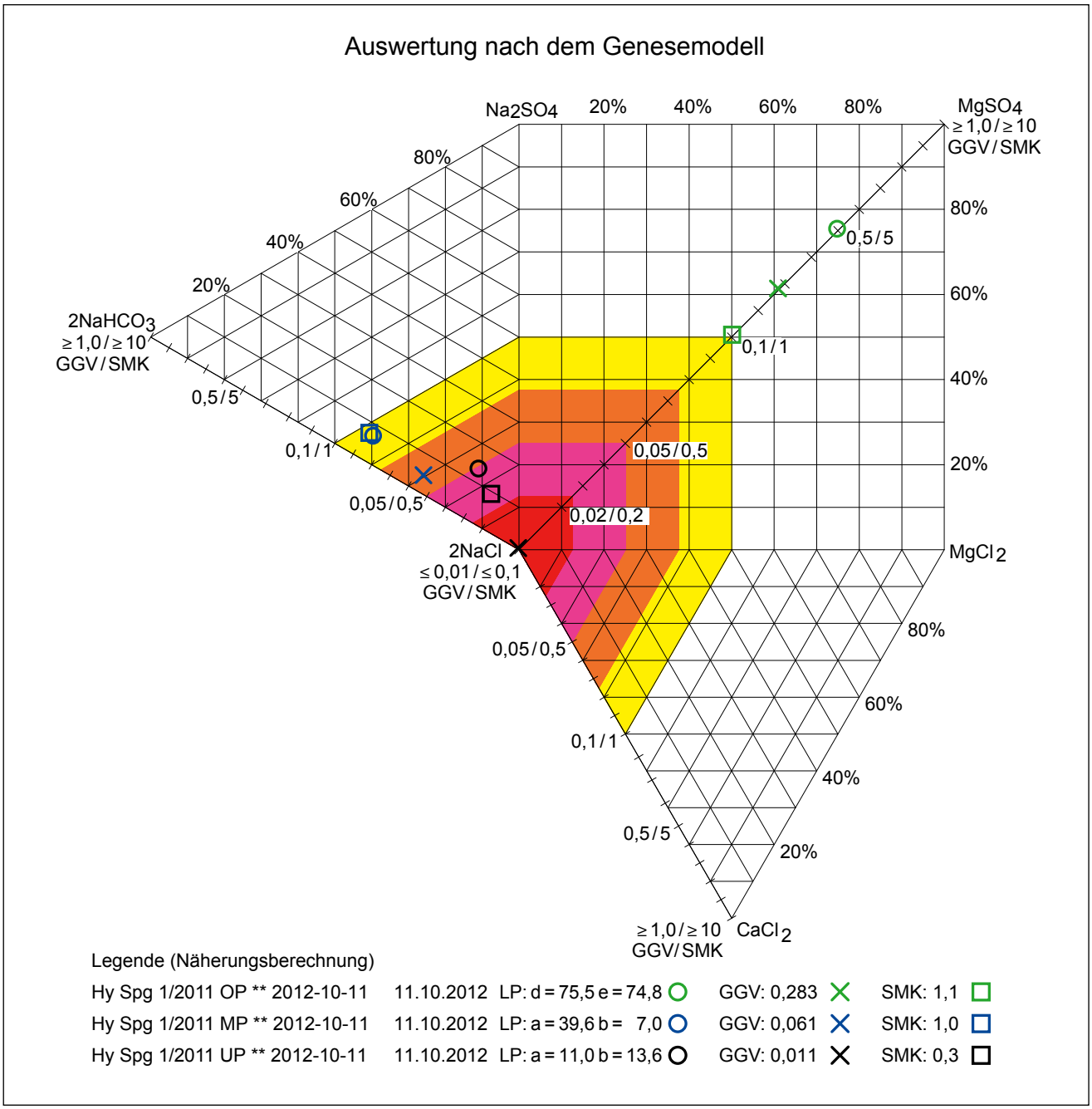

Abb. 10: Grundwassermessstellen (GWM) Spreenhagen, genetische Bewertung mit GEBAH
Fig. 10: Groundwater observation well Spreenhagen, genetic assessment by using GEBAH

Standort	Name	Pobenahme	Filter	^{3}H	^{3}He tritiogen	^{3}H/^{3}He gesamt	^{4}He radiogen	^{14}C	δ^{13}C	δ^{18}O	δ^{2}H
		Datum	m u. GOK	[T.E.]	[T.E.]	[T.E.]		[pmc]	[‰]	[‰]	[‰]
Spreen-hagen	Hy Spg 1/2011 OP	11.10.2012	19–23	5,41	23,5	28,9	0,02*10^{-4}	64,6 ± 1,3	-11,7	-7,92	-58,2
	Hy Spg 1/2011 MP	11.10.2012	104–108	-	-	-	1,55*10^{-4}	30,1 ± 0,6	-13,0	-8,72	-62,2
	Hy Spg 1/2011 UP	11.10.2012	131–135	-	-	-	10,4*10^{-4}	6,0 ± 0,4	-13,2	-9,66	-68,6
	Oder-Spree-Kanal	05.06.2013	-	-	-	-	-	-	-	-7,87	-57,6

Tab. 7: Ergebnisse der Isotopenbestimmungen für die Grundwassermessstelle Spreenhagen
Tab. 7: Results of isotope analytics for observation well Spreenhagen

Standort	Name	Alter nach $^{3}H/^{3}He$ [a]	Alter nach $^{14}C/^{4}He$ [a]	Anteil junge Komponente [%]	Anteil alte Komponente [%]	Bewertung Temperatureffekt $\delta^{18}O/\delta^{2}H$
Spreenhagen	Hy Spg 1/2011 OP	29	15 oder 58***	100	0	warmzeitlich (Holozän)
	Hy Spg 1/2011 MP	-**	6 500*	0	100**	warmzeitlich (Holozän)
	Hy Spg 1/2011 UP	-**	19 500*	0	100**	Übergang kaltzeitlich zu warmzeitlich oder Zumischung präpleistozäner Wässer

Tab. 8: Ergebnisse der Altersbestimmungen/Bewertung stabiler Isotope für die GWM Spreenhagen;
** berechnet mit einem Anfangsgehalt von 65 % pmc*
*** in Anbetracht der Filtertiefe kann Tritium-Freiheit als sicher angenommen werden*
**** Die Software Multis bietet hier zwei mögliche Lösungen an*
Tab. 8: Results of age dating/assessment stable isotopes for observation well Spreenhagen

4.5 Grundwassermessstelle Biegenbrück

Diese Messstellengruppe wurde ebenfalls im Auftrag des LBGR im Rahmen des Salinarmonitorings im Jahr 2012 errichtet. Der Standort der GWM liegt ca. 6 km westlich der Ortschaft Müllrose und befindet sich regionalgeologisch im Berliner Urstromtal. Im Urstromtal bilden die glazifluviatilen Sande einen oberen unbedeckten GWL (GWLK 1), der am Standort mit einer Mächtigkeit von ca. 14 m erbohrt wurde. Der mittlere Ruhewasserspiegel liegt bei ca. 2,5 m u. GOK.
Circa 2 km westlich der Bohrung verläuft eine etwa N–S streichende Quartärrinne (Neubrück-Merz-Rinne), die bis in das Mesozoikum reicht und den Rupelton vollständig ausgeräumt hat. An den Rinnenrändern steigen salinare Tiefenwässer bis in den quartären GWL auf und migrieren in Richtung der Ortschaft Müllrose. Diese wurden bei hydrogeologischen Erkundungsarbeiten 1988 im Raum Müllrose bis in den GWLK 1 nachgewiesen.
Zur Charakterisierung der Grundwasserbeschaffenheit und zur Identifizierung von Salinarfahnen bzw. deren Transportbahnen wurden am Standort drei GWM in unterschiedlichen Niveaus installiert. Der OP wurde in den glazifluviatilen Sanden der Saale-Kaltzeit (GWLK 2), die am Bohrungsstandort von einem etwa 8 m mächtigen tonig-schluffigen Grundwasserhemmer überlagert werden, im Teufenbereich von 29–34 m errichtet. Die Filter des MP und UP wurden jeweils im GWLK 3 ausgebaut, der MP im miozänen Quarzsand-Horizont von 108–112 m u. GOK, der UP in den Cottbuser Schichten unmittelbar über dem Rupelton von 160–164 m u. GOK (Abb. 11). Zwischen den Niveaus des MP und UP wurden keine ausreichend mächtigen bindigen Sedimente erbohrt, die eine signifikante hydraulische Trennung der wasserführenden Schichten bewirken könnten. Der ermittelte Druckwasserspiegel innerhalb des GWLK 3 liegt daher in einem einheitlichen Niveau bei 41,55 m NN. Der Ruhewasserspiegel im OP wurde am Stichtag mit 41,76 m NN gelotet, d. h. am Standort tritt ein abwärts gerichteter Druckgradient auf.
Die Wässer des MP und UP sind allein schon durch einen Cl^--Gehalt von 3 040 mg/l bzw. 3 271 mg/l als Salzwässer schlechthin einzustufen und werden demzufolge in GEBAH durch die direkte Lage am NaCl-Pol und einem GGV von 0,004 als intrusiv klassifiziert. Im OP hingegen sind mit GEBAH salinare Speisungsanteile durch ein GGV von > 0,1 nicht diagnostizierbar, hier handelt es sich genetisch (Natrium-Typ) um alte Neubildungswässer mit längeren Verweilzeiten im Untergrund, die durch die Isotopenanalytik altersstrukturell spezifiziert werden (Abb. 12, Tab. 9, 10).
Beim ca. 30 m tief verfilterten OP der GWM Hy Bbc 1/2012 konnte ein Mischwasser mit einer Altwasserkomponente von 90 % mit einem ^{14}C-Alter von ca. 1 000 bis 3 600 a identifiziert werden. Mit nur 10 % ist der Anteil von Wässern aus der Grundwasserneubildung gering.
Die Wässer des MP und UP sind erheblich älter. ^{14}C ist weitgehend zerfallen, woraus sich ein Alter von über 20 000 a ableiten lässt. Der D/^{18}O-Befund zeigt insbesondere für den UP niedrige Bildungstemperaturen an, so dass die aus dem ^{14}C-Alter ableitbare Zuordnung der Wässer zur Weichsel-Kaltzeit plausibel ist. Auch die extrem hohen ^{4}He-Werte sind ein sicheres Indiz für ein sehr hohes Alter der Wässer.
Dass der ^{14}C-Wert im MP etwas geringer ist als im UP, liegt möglicherweise an unterschiedlichen Einflüssen von organischem Material. Nach Abgleich mit dem Schichtenverzeichnis der Bohrung ist der MP mit hoher Wahrscheinlichkeit stärker von organischem toten C beeinflusst als der UP, was ein höheres ^{14}C-Alter im MP vortäuscht.
Aufgrund der hier geschilderten Befunde ist in dieser Messstellengruppe durch die schon im MP und UP nachgewiesene Versalzung, der OP für die kontinuierliche Beschreibung der Mechanismen der salinaren Früherkennung in Abhängigkeit von den Niederschlagsereignissen und damit möglicherweise einhergehender Veränderung des Druckpotenzials bestens geeignet. Im Rahmen des Salinarmonitorings des LBGR werden diese GWM weiterhin langfristig einmal jährlich beprobt und hydrogeochemisch mit GEBAH bewertet.

4.6 Grundwassermessstelle Müllrose des Landesamtes für Umwelt (LfU)

Eine ausführliche hydrogeochemisch-genetische Charakterisierung dieser Messstellengruppe mit Zuordnung zu Geneseklassen erfolgt in dem Beitrag von G. Hotzan in diesem

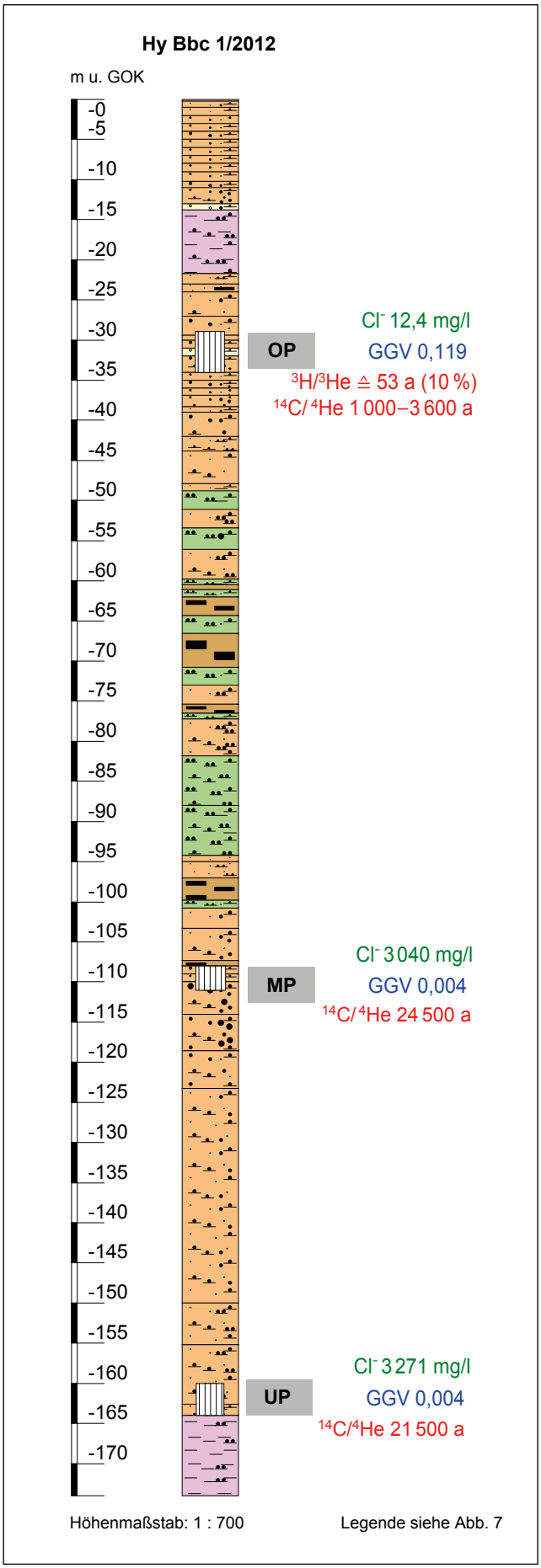

Abb. 11:
Schichtenverzeichnis mit Ausbau der Grundwassermessstellen Biegenbrück

Fig. 11:
Drill lock with groundwater observation well Biegenbrück

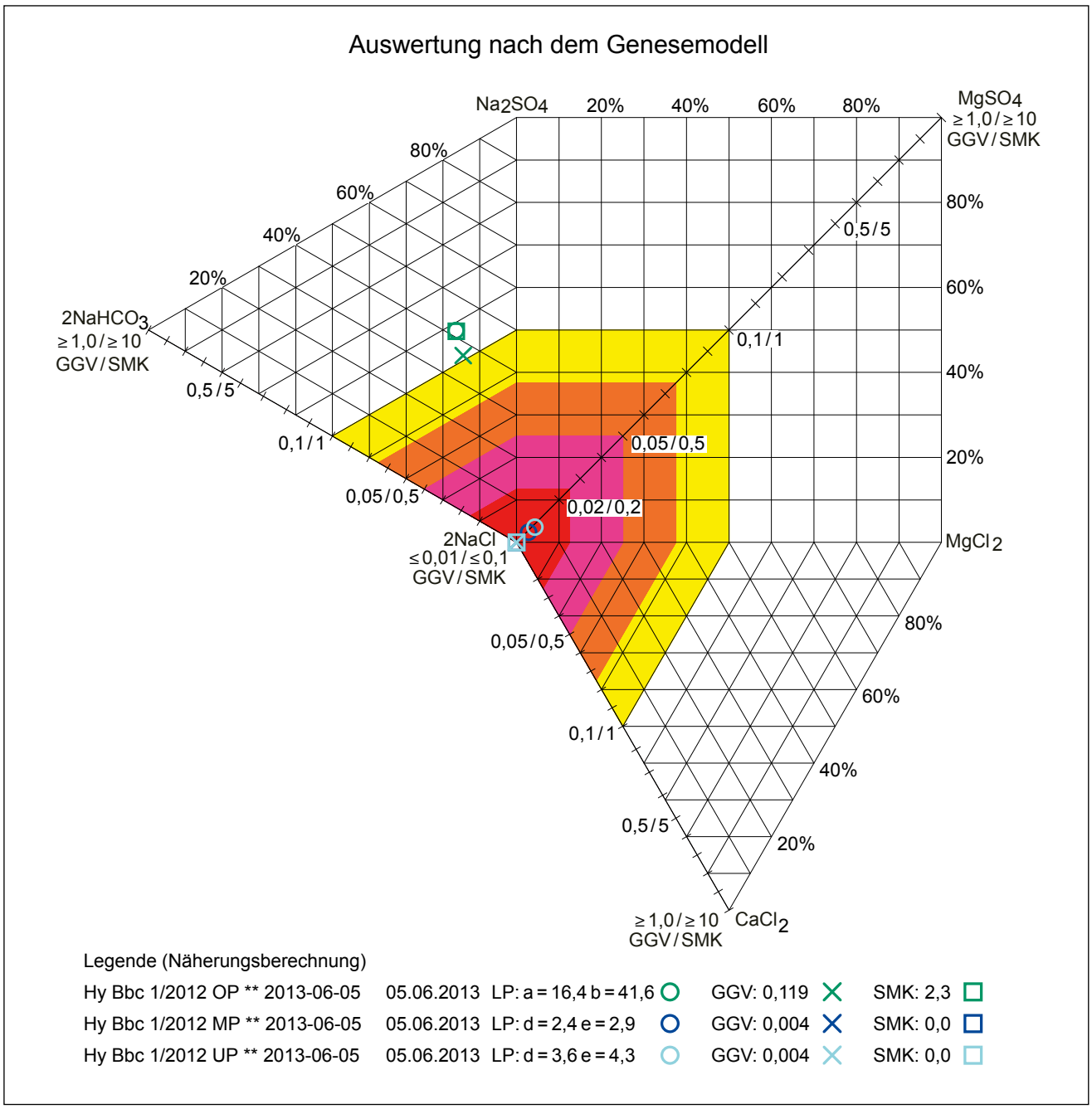

Abb. 12: Grundwassermessstellen Biegenbrück, genetische Bewertung mit GEBAH
Fig. 12: Groundwater observation well Biegenbrück, genetic assessment by using GEBAH

Standort	Name	Probe-nahme	Filter	^{3}H	^{3}He tritiogen	$^{3}H/^{3}He$ gesamt	^{4}He radiogen	^{14}C	$\delta^{13}C$	$\delta^{18}O$	$\delta^{2}H$
		Datum	m u. GOK	[T.E.]	[T.E.]	[T.E.]	[Nml/kg]	[pmc]	[‰]	[‰]	[‰]
Biegenbrück	Hy Bbc 1/2012 OP	05.06.2013	29–33	1,0	18,0	19,0	$18{,}7*10^{-5}$	59,7 0,8	-13,4	-9,12	-64,7
	Hy Bbc 1/2012 MP	05.06.2013	108–112	-	-	-	$2100*10^{-5}$	3,3 ± 0,1	-11,3	-9,11	-65,3
	Hy Bbc 1/2012 UP	05.06.2013	160–164	-	-	-	$2100*10^{-5}$	4,8 ± 0,3	-13,6	-9,65	-69,0

Tab. 9: Ergebnisse der Isotopenbestimmungen für die Grundwassermessstelle Biegenbrück
Tab. 9: Results of isotope analytics for observation well Biegenbrück

Standort	Name	Alter nach $^{3}H/^{3}He$ [a]	Alter nach $^{14}C/^{4}He$ [a]	Anteil junge Komponente [%]	Anteil alte Komponente [%]	Bewertung Temperatureffekt $\delta^{18}O/\delta^{2}H$
Biegenbrück	Hy Bbc 1/2012 OP	53	1.000–3 600***	10	90	warmzeitlich (Holozän)
	Hy Bbc 1/2012 MP	-**	24 500*	0	100	Übergang kaltzeitlich zu warmzeitlich, Einfluss toter C wahrscheinlich
	Hy Bbc 1/2012 UP	-**	21 500*	0	100	kaltzeitliche Bildungstemperaturen

Tab. 10: Ergebnisse der Altersbestimmungen/Bewertung stabiler Isotope für die Grundwassermessstelle Biegenbrück
**berechnet mit einem Anfangsgehalt von 65 pmc*
*** Tritium-Freiheit wurde in dieser Tiefe als sicher vorausgesetzt*
****berechnet mit einem Anfangsgehalt von 65–85 pmc mit Infiltrationsmodell*
Tab. 10: Results of age dating/assessment stable isotopes for observation well Biegenbrück

Band, so dass hier nur eine kurze Darstellung und Bewertung der Isotopenergebnisse (Tab. 11 und 12) vorgenommen wird. Trotz des geringen Teufenunterschiedes zum MP3 ist der UP der GWM Hy Müe 133/87 ^{3}H-frei und hat mit 4 300 a ein deutlich höheres ^{14}C-Alter. Im nur 3 m höher gelegenen MP3 wird ein Jungwasseranteil < 65 a von 20–30 % abgeleitet. Dies bestätigt sich auch in dem deutlich geringeren ^{14}C-Alter. Der ^{4}He-Wert ist im UP mit $240*10^{-5}$ Nml/kg sehr hoch und lässt ebenfalls auf ein hohes Alter schließen. Der Unterschied zwischen MP3 und MP2 ist gering und die Altersstruktur nach $^{3}H/^{3}He$ und ^{14}C weitgehend identisch. Lediglich die ^{4}He-Werte unterscheiden sich und deuten auf unterschiedliche Mischungsverhältnisse älterer und jüngerer Komponenten hin.
Die im Beitrag von G. Hotzan beschriebene hydrogeochemisch-genetische Zonierung innerhalb des GWL konnte somit durch die Isotopenuntersuchungen altersstrukturell untersetzt und bestätigt werden.

Zusammenfassung

Bei der Korrelation der isotopenphysikalischen mit den hydrogeochemisch-genetischen Ergebnissen konnte eine sehr

Standort	Name	Probenahme Datum	Filter m u. GOK	^{3}H [T.E.]	^{3}He tritiogen [T.E.]	$^{3}H/^{3}He$ gesamt [T.E.]	^{4}He radiogen [Nml/kg]	^{14}C [pmc]	$\delta^{13}C$ [‰]
Müllrose	Hy Müe 133/87 UP	14.07.2016	36,4–37,4	0,02	0,00	0,02	$240*10^{-5}$	35,7 ± 0,6	-13,6
	Hy Müe 133/87 MP3	14.07.2016	32,3–33,3	2,05	0,00	2,05	$81*10^{-5}$	56,3 ± 0,9	-13,8
	Hy Müe 133/87 MP2	14.07.2016	28,4–29,4	1,73	0,00	1,73	$57*10^{-5}$	56,7 ± 1,0	-14,5

Tab. 11: Ergebnisse der Isotopenbestimmungen für die Grundwassermessstelle Müllrose
Tab. 11: Results of isotope analytics for observation well Müllrose

Standort	Name	Alter nach $^{3}H/^{3}He$ [a]	Alter nach $^{14}C^{*}/^{4}He$ [a]	Anteil junge Komponente [%]	Anteil alte Komponente [%]
Müllrose	Hy Müe 133/87 UP	>65	4 300	0	100
	Hy Müe 133/87 MP3	0–60	530	20–30	70–80
	Hy Müe 133/87 MP2	0–60	470	15–25	75–85

Tab. 12: Ergebnisse der Altersbestimmungen für die Grundwassermessstelle Müllrose
**berechnet mit einem Anfangsgehalt von 60 pmc*
Tab. 12: Results of age dating for observation well Müllrose

gute Übereinstimmung erzielt werden. Da mit GEBAH lediglich die genetisch prägenden dominanten Lösungsanteile eines Mischwassers bewertet werden, gelingt es mit den o. g. verschiedenen Komponenten der Isotopenanalytik die Alt- bzw. Jungwasseranteile näher zu spezifizieren und diese einer Alterssignatur bzw. Verweilzeit im jeweiligen GWL zuzuordnen.
Die Bestimmung von ^{34}S ermöglichte es unter anderem im WW Flatow Mischwässer mit Anteilen mesozoischer Evaporitsulfate zu identifizieren.
Weiterhin konnte durch D/^{18}O-Bestimmung und den Vergleich der Isotopensignatur des Oberflächen- mit dem Grundwasser eine Speisung des durch das WW Mildenberg genutzten GWLK 2 aus dem in Brunnennähe gelegenen Tonstich sicher ausgeschlossen werden, so dass dieser bei der Ausgrenzung des Wasserschutzgebietes nicht mit einbezogen werden muss.
Zusammenfassend ist festzustellen, dass die genetisch identifizierten salinaren Speisungsanteile durch die Isotopenanalytik eindeutig einer Altwasserkomponente mit entsprechender Alterssignatur zugeordnet werden konnten. Somit wurde die Methodik der konzentrationsunabhängigen Salinar-Früherkennung mittels GEBAH durch die Isotopenuntersuchungen bestätigt und altersstrukturell untersetzt.

Summary

With the isotope groundwater investigations in observation and pumping wells a good correlation between isotope and hydrochemical genetic results could be observed. For the genetic assessment of the different water samples the genetic groundwater model GEBAH can be used for classification according to the formative dominant solute portions. Age related classifications were only possible in rough units. In combination with isotope analytics (tritium, carbon-13/14, helium-3/4) it was possible to specify the groundwater age/residence time and to distinguish between old and young water components within the different aquifers.
The analytics of sulphur-34 isotope allowed to identify mixed water with parts of old mesozoic evaporate sulphat in waterworks Flatow.
Based on deuterium- and oxygen-18-analytics in waterworks Mildenberg a geohydraulic connection between ponds from earlier clay mining activities and the aquifer used for drinking water supply could be excluded. So the ponds didn't have to be included into the groundwater protection area for the water works.
In conclusion it can be stated that the genetically identified saliniferous parts in fresh water aquifers could be explicitly related to old water components with corresponding high ages.
Hence the method of the concentration-independent early detection of saliniferous water with GEBAH could be confirmed by the isotope investigations and groundwater aging.

Literatur

Trettin, R., Hiller, A., Wolf, M., Deibel, K. & W. Gläsßer (1997): Isotopenuntersuchungen tiefliegender Grundwässer südöstlich Berlins. – Zeitschrift Grundwasser **2**, S. 65–76

Bednorz, F. (1992): Beschaffenheitsanalyse und Geschütztheitsbewertung von Aquiferen Südbrandenburgs. – Dissertation Bergakademie Freiberg, 118 S. (unveröff.)

Manhenke, V., Hannemann, M. & B. Rechlin (1995): Gliederung und Bezeichnung der Grundwasserleiterkomplexe im Lockergestein des Landes Brandenburg. – Brandenburg. geowiss. Beitr. **1**, S. 12

Moser, H. & W. Rauert (1980): Isotopenmethoden in der Hydrogeologie. – S. 23 ff, Berlin, Stuttgart

Rechlin, B. (2008): Eine Methode zur konzentrationsunabhängigen Früherkennung von Salzwasserintrusionen in süßwasserführende Grundwasserleiter und Oberflächengewässer. – Brandenburg. geowiss. Beitr. **15**, 1/2, S. 57 – 68

Rechlin, B., Hoffknecht, A., Scholz, H. & A. Helms (2010): Genetische Bewertung von Analysen der Hydrosphäre. – Software GEBAH Vers. 1.1 LBGR/GCI, Cottbus, Königs Wusterhausen

Anschrift der Autoren:

Dr. Falk Bednorz
Fugro Consult GmbH
Wolfener Straße 36 U
12681 Berlin
F.Bednorz@fugro.com

Dipl.-Geol. Dietmar Brose
Landesamt für Bergbau, Geologie und Rohstoffe
Brandenburg
Dezernat Hydrogeologie
Inselstraße 26
03046 Cottbus
dietmar.brose@lbgr.brandenburg.de