

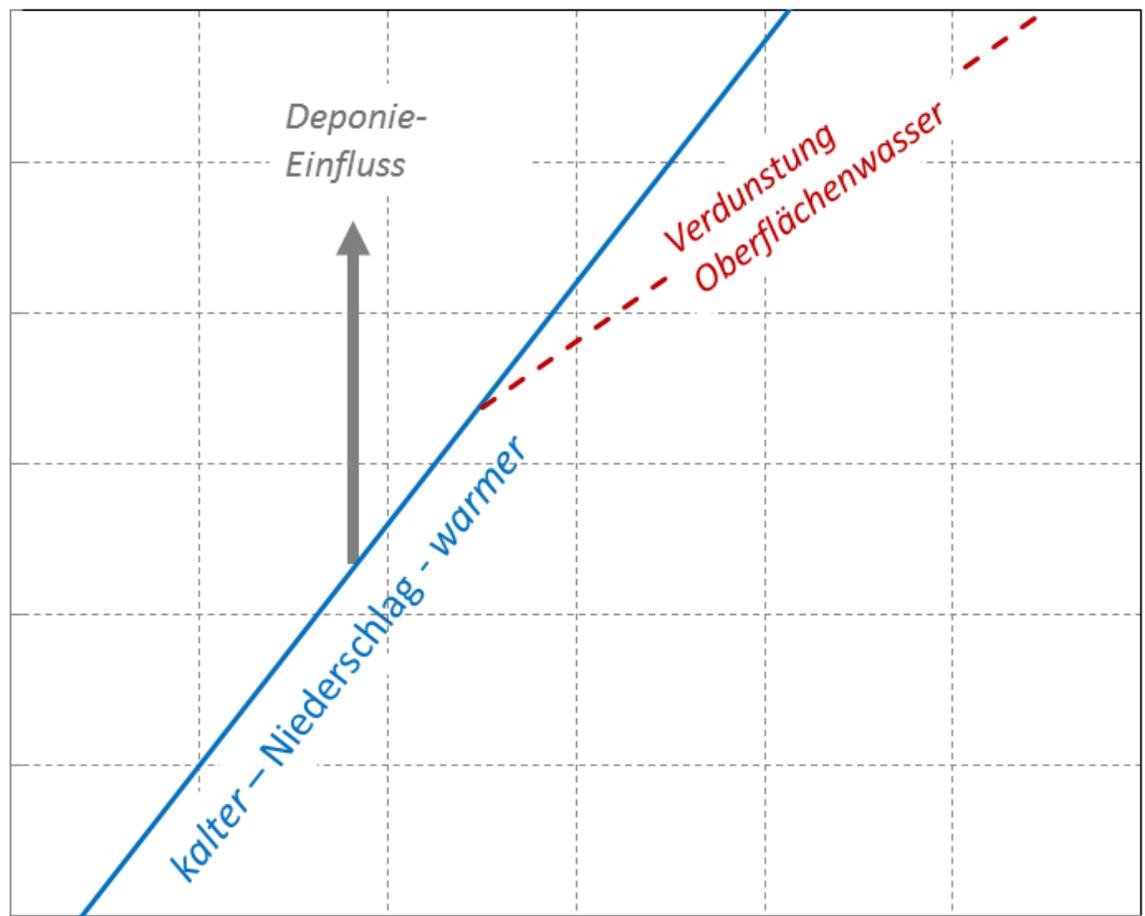
Grundwasserhydrologie und Wasserwirtschaft

Grundwasserqualität im Abstrom der Deponie Ihlenberg

Untersuchung im Hinblick auf Sickerwassereinfluß

Prof. Dr. Christoph Külls

Dezember 2015



Grundwasserqualität im Abstrom der Deponie Ihlenberg

Untersuchung im Hinblick auf Sickerwassereinfluß

Prof. Dr. Christoph Külls

Fachhochschule Lübeck

Fachbereich Bauwesen

Bericht des Labors für Hydrologie und Wasserwirtschaft

eingereicht am 07.12.2015

Erstellt für Hansesstadt Lübeck, Bereich Umwelt-, Natur- und Verbraucherschutz

Unter HyWa-2015-03

Geprüft von Prof. Dr. C. Külls

Disclaimer: Der Inhalt dieses Berichtes darf nicht zur nicht autorisierten Publikation und Vervielfältigung oder Weiterverbreitung verwendet werden. Die Nennung von Markennamen stellt keine offizielle Unterstützung der Verwendung solcher Produkte dar. Alle Produkt- und Markennamen sind und bleiben Eigentum ihrer jeweiligen Rechthebesiter. Die Ergebnisse dieses Berichtes stellen keine offizielle Meinung der Fachhochschule Lübeck dar, es sei denn, dies ist ausdrücklich so kenntlich gemacht.

Inhaltsverzeichnis

Abbildungsverzeichnis	iv
Tabellenverzeichnis	v
1 Einleitung	1
2 Das Untersuchungsgebiet	3
3 Methoden.....	8
3.1 Wasserchemie.....	8
3.1.1 Haptionen.....	8
3.1.2 Chlorid	8
3.1.3 Halogenide Bromid und Fluorid	9
3.1.4 Bor	9
3.2 Isotopenuntersuchungen	10
4 Ergebnisse.....	13
4.1 Vor Ort Parameter	13
4.2 Haptionen.....	13
4.3 Metalle und Schwermetalle.....	18
4.4 Organische Schadstoffe.....	19
4.5 Stabile Isotope des Wassers.....	20
4.6 Stabile Isotope des Kohlenstoffes.....	21
4.7 Radioaktives Isotop des Wassers - Tritium	24
5 Zusammenfassung und Schlussfolgerungen	25
Literaturverzeichnis.....	27
Anhang: Analysenergebnisse - Vor Ort Parameter	28
Anhang: Analysenergebnisse - Wasserchemie	29
Anhang: Analysenergebnisse - Isotope.....	30

Abbildungsverzeichnis

Abbildung 1: Lageplan des Untersuchungsgebietes mit den Probenahmestellen HY 1,3 und 5 und Höhenlinien auf Basis des Höhenmodelles SRTM (NASA), Landnutzung nach Openlayers.....	3
Abbildung 2: Schichtenaufbau und Verfilterung der Grundwassermessstellen HY 1, 3 und 5 im Untersuchungsgebiet mit der im Bericht verwendeten Bezeichnung der Filterstellungen F1, F2, F3 und F4.....	4
Abbildung 3: Vorhandensein der grundwasserleitenden Schichten und Grundwassergleichenpläne nach G. Agster (2014)	5
Abbildung 4: Stichtagsmessung der Grundwassergleichen durch das LLUR.....	6
Abbildung 5: Methode zur Untersuchung des Deponieeinflusses auf das Grundwasser mit stabilen Wasserisotopen.....	11
Abbildung 6: Methode zur Untersuchung des Deponieeinflusses mit stabilen Kohlenstoffisotopen. Pfeil entspricht natürlichem Grundwasser Lübeck	11
Abbildung 7: Piperdiagramm der Hauptionen, die Kreise zeigen die elektrische Leitfähigkeit relativ an.....	15
Abbildung 8: Schoellerdiagramm der Hauptionen	16
Abbildung 9: Borkkonzentrationen in Abhängigkeit der Chloridwerte im Untersuchungsgebiet.....	17
Abbildung 10: Auswertung der stabilen Isotope des Wassers	22
Abbildung 11: Auswertung der stabilen Isotope des Kohlenstoffes	23
Abbildung 12: Auswertung der stabilen Isotope des Kohlenstoffes	23
Abbildung 13: Auswertung der Tritiumwerte.....	24

Tabellenverzeichnis

Tabelle 1: Vor-Ort-Parameter	13
Tabelle 2: Ergebnisse der Untersuchung auf Hauptionen	14
Tabelle 3: Ergebnisse der Untersuchung auf Metalle.....	18
Tabelle 4: Ergebnisse der Untersuchung auf organische Summenparameter.	19
Tabelle 5: Ergebnisse der Untersuchung auf organische Schadstoffe	20
Tabelle 6: Ergebnisse der Isotopenuntersuchung	22

1 Einleitung

Im Auftrag der Hansestadt Lübeck, Bereich Umwelt-, Natur- und Verbraucherschutz, Abt. Wasser, Boden und Abfall wurden drei Messstellen (HY 1/95, HY 3/95 und HY 5/95) an der östlichen Landesgrenze zu Mecklenburg-Vorpommern beprobt. Die Grundwassermessstelle HY 1/95 hat zwei, HY 3/95 drei und HY 5/95 vier Filterstellungen. Diese insgesamt 9 Proben wurden als Prüfgegenstand gemäß BBodSchV Anhang 1 auf Färbung, Geruch, Trübung, T°C, pH, elektr. Leitfähigkeit, CSB, Säurekapazität bis pH 4,3, HCO₃, DOC, Na, K, Fe, Mn, Ca, Mg, NH₄, Cl, NO₃, NO₂, SO₄, H₂S, F, Cyanide ges., Cyanide leicht freisetzbar, SiO₂, B, Al, Pb, Cd, Cu, Ni, Hg, Zn, AOX, KW, Phenolindex, LHKW, auf Polyzyklische Aromatische Kohlenwasserstoffe PAK (EPA) und auf ein Leitpestizid untersucht.

Zusätzlich wurden die stabilen Isotope des Wassers und des Kohlenstoffes als mögliche Indikatoren für einen Einfluss von Deponiesickerwasser untersucht. Eine Bestimmung des mittleren Grundwasseralters mit Tritium wurde vorgenommen. Die mögliche Verwendung von Tritium als Indikator für Deponiesickerwasser wurde quantifiziert.

Die Probenahme erfolgte durch das beauftragte Labor, das die Ergebnisse der wasserchemischen und Isotopenanalysen über den Auftraggeber dem Labor für Hydrologie und Wasserwirtschaft der Fachhochschule Lübeck zur Verfügung gestellt hat. Das Labor für Hydrologie und Wasserwirtschaft der Fachhochschule Lübeck hat nach Erhalt der Analysenergebnisse eine Auswertung und Interpretation der Prüfwerte der 15 Wasserproben als Prüfgegenstände vorgenommen.

Ziel der Auswertung war es, zu klären,

- ob eine mögliche Beeinflussung der Traverinne durch die Sickerwässer der Deponie Ihlenberg vorliegt und
- ob eine zukünftige Beeinflussung durch ein Auftreten von Indikatoren für Deponiesickerwasser an den Probenahmestellen im Vorfeld zu erwarten ist.

Die Auswertung umfasst im Einzelnen eine Interpretation der physikalischen und chemischen Parameter hinsichtlich einer Abweichung von natürlichen Hintergrundwerten oder von früheren Werten.

Die Auswertung enthält eine hydrogeochemische Einordnung der Wässer anhand der Hauptionen und Spurenstoffe (Schwermetalle und Spurenelemente) und eine Bewertung der gemessenen Werte hinsichtlich gesetzlicher Grenzwerte und Abweichungen von natürlichen Hintergrundwerten. Schließlich werden die Parameter KW, AOX, LHKW und PAK hinsichtlich der Fragestellung bewertet.

Die Isotopenwerte werden gemäß ihrer Indikatorfunktion für Deponiesickerwässer interpretiert. Die Methode der Bewertung wird für diese Parameter als Hintergrund genauer erläutert. Abschließend erfolgt eine Auswertung der Verweilzeitindikatoren hinsichtlich der Fließdauer des Grundwassers an den Probenahmestellen. Die Fließdauer ist maßgebend für die Gefährdung der Brunnen an der östlichen Stadtgrenze von Lübeck entlang der Traverinne und im Abstrom der Deponie Ihlenberg.

2 Das Untersuchungsgebiet

Das Untersuchungsgebiet liegt im Osten Lübecks (Abb. 1). Die Deponie Ihlenberg, 1979 errichtet und bis 1991 als Deponie Schönberg betrieben, befindet sich in ca. 14 km Entfernung südöstlich der Traverinne und des heutigen Verlaufes der Trave. Der Ihlenberg stellt eine natürliche Anhöhe von über 60 m Höhe dar, an deren Südflanke die Deponie errichtet worden ist.



Abbildung 1. Lageplan des Untersuchungsgebietes mit den Probenahmestellen HY 1,3 und 5 und Höhenlinien auf Basis des Höhenmodelles SRTM (NASA), Landnutzung nach Openlayers

Die mögliche Gefährdung der Wasserressourcen der Stadt Lübeck wird wesentlich durch die Lage der Deponie im oberirdischen und vor allem im Grundwasserfließsystem bestimmt. Durch die umfangreichen Untersuchungen zur Hydrogeologie und Grundwasserneubildung von Lübeck und Bad Segeberg (G. Agster, 2014) ist die hydrogeologische Situation im Umfeld der Deponie Ihlenberg gut bekannt.

Der Untergrund ist durch eine Folge von quartären Schichten in mehreren Stockwerken charakterisiert, die im Bereich des Untersuchungsgebietes tertiäre Schichten der unteren Braunkohlesande überlagern: Das oberste Stock-

werk wird im Bereich der Deponie Ihlenberg durch den ungespannten freien Grundwasserleiter (qpWL1) gebildet. Dieses wird durch die Hauptdeckschicht (DS) unterlagert, welche den Hauptgrundwasserleiter (HWL_{qo}) als gespannten Grundwasserleiter bedeckt. Dieser kann im Bereich der Rinne von Rinnenton durchzogen sein und ein weiteres Stockwerk abgrenzen. Im Bereich des Untersuchungsgebietes fehlen durch die Salztektonik die jung-tertiären Schichten der Kaolinsande (KS), Glimmerfeinsande (GFS) als grundwasserleitende Schichten und der obere Glimmerton (OGT) als wichtige stauende Schicht, auch die oberen Braunkohlesande (OBKS) und der Hamburger Ton (HT) wurden erodiert. Wegen dieser Schichtlücke folgen somit die unteren Braunkohlesande (UBKS) und die Vierlandfeinsande. Die Schichtenfolge wird durch den Unteren Glimmerton (UGT) begrenzt, der die Basis des Grundwasserleitersystems darstellt.

Die Brunnen HY 1 und HY 5 sind bis in die unteren Braunkohlesande verfiltert und, die Grundwassermessstelle HY 3 reicht nur bis zum quartären Sande an der Basis Hauptgrundwasserleiter (Abb. 2).

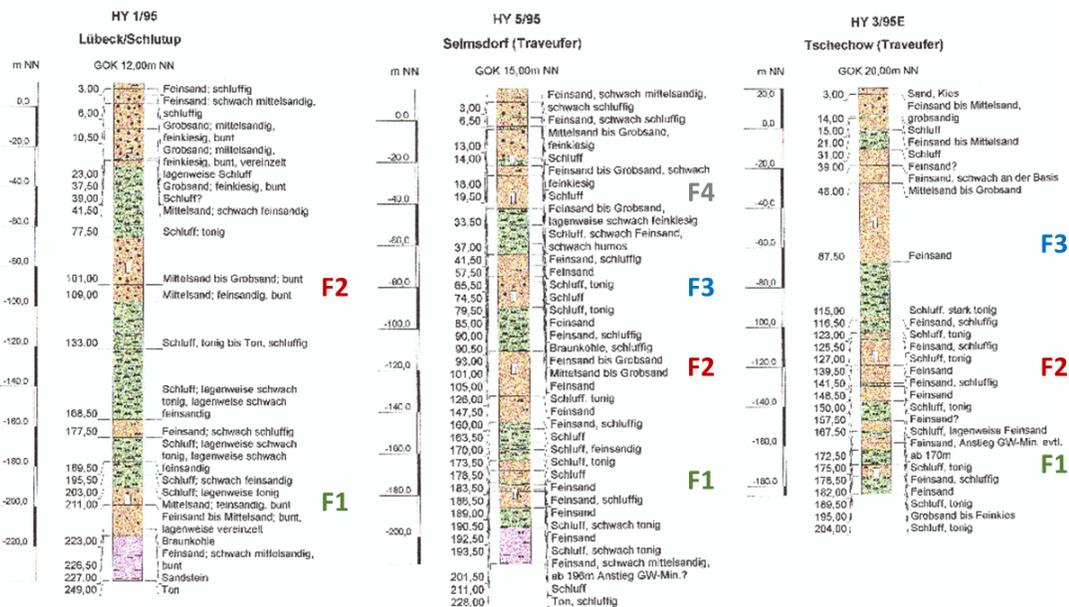


Abbildung 2. Schichtenaufbau und Verfiltrung der Grundwassermessstellen HY 1, 3 und 5 im Untersuchungsgebiet mit der im Bericht verwendeten Bezeichnung der Filterstellungen F1, F2, F3 und F4

Die Grundwassermessstellen sind durch eine Abfolge von Fein-, Mittel- und Grobsand alternierend mit Schluffbändern gekennzeichnet. Im unteren Bereich der Profile HY 1 und HY 5 werden die unteren Braunkohlesande erreicht, die direkt an die quartären Sande anschließen (HY 1) oder durch ein Schluffband von der quartären Sandschicht getrennt sind (HY 5).

Auf Grund der Schichtenfolge ergeben sich für die Untersuchung und die Untersuchungsfragen wichtige Randbedingungen (Abb. 3). Die oberen quartären Sande sind im südöstlichen Teil des Untersuchungsgebietes nicht ausgeprägt. Im Kernbereich des Ihlenberges stehen also die Deckschichten an und ein Grundwasserleiter fehlt. Die oberflächennahe Entwässerung durch Abflussbildung erfolgt durch ein südöstlich parallel zur Trave verlaufendes Gewässer in den Dassower See (1). Erst nordwestlich dieser Entwässerungslinie beginnt der oberflächennahe, ungespannte quartäre Aquifer aus Decksanden. Eine direkte hydrogeologische Verbindung im obersten ungespannten Aquifer besteht nach dem geologischen Konzeptmodell nicht (G. Agster, 2014), dennoch kann nicht ausgeschlossen werden, dass eine solche Fließverbindung über geologische Fenster oder quartäre Schichten besteht.

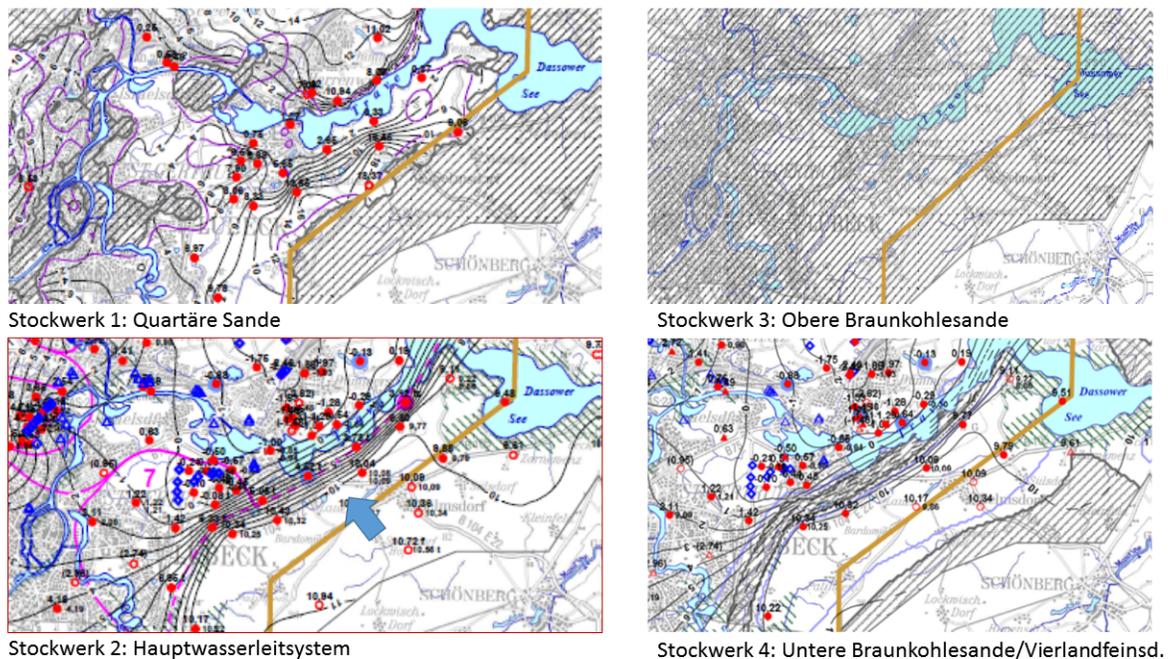


Abbildung 3. Vorhandensein der grundwasserleitenden Schichten und Grundwassergleichenpläne nach G. Agster (2014)

Eine hydrogeologische Verbindung besteht allerdings im für die Wasserversorgung wichtigen Hauptleitersystem. In diesem System ist auch die Fließrichtung direkt von der Deponie Ihlenberg auf die Traverinne in nordwestlicher Richtung ausgebildet. In diesem Grundwasserleiter ist also ein Gefährdungspotential vorhanden. Das wird auch durch die Stichtagsmessung der Grundwassergleichen im Hauptwasserleitsystem (HWL) bestätigt (LLUR).

Die oberen Braunkohlesande fehlen als Aquifer im Untersuchungsgebiet, in diesem Stockwerk besteht also kein Gefährdungspotential. Die unteren Braunkohlesande sind erst nord-westlich der Deponie ausgebildet. Hier besteht ein

indirektes Gefährdungspotential, wenn es zu einer Verbindung von quartärem Hauptwasserleiter und unteren Braunkohlesanden über geologische Fenster kommt. Zur Durchlässigkeit des geologischen Untergrundes wurden mehrere bohrlochgeophysikalische Untersuchungen durchgeführt (BLM, 1997) und (BLM, 1998). Bei diesen Untersuchungen handelt es sich jedoch um Punktdaten. Im regionalen Maßstab können durch geologische Fenster und präferentielle Fließwege höhere laterale Durchlässigkeiten erreicht werden und gelten. Regionale Arbeiten zur Bestimmung des Barrierepotentials und Rückhaltevermögens von quartären Schichten im Untergrund und Umfeld der Deponie Ihlenberg legte Hammer (2003) vor. Das tatsächliche Verhalten des Fließs-

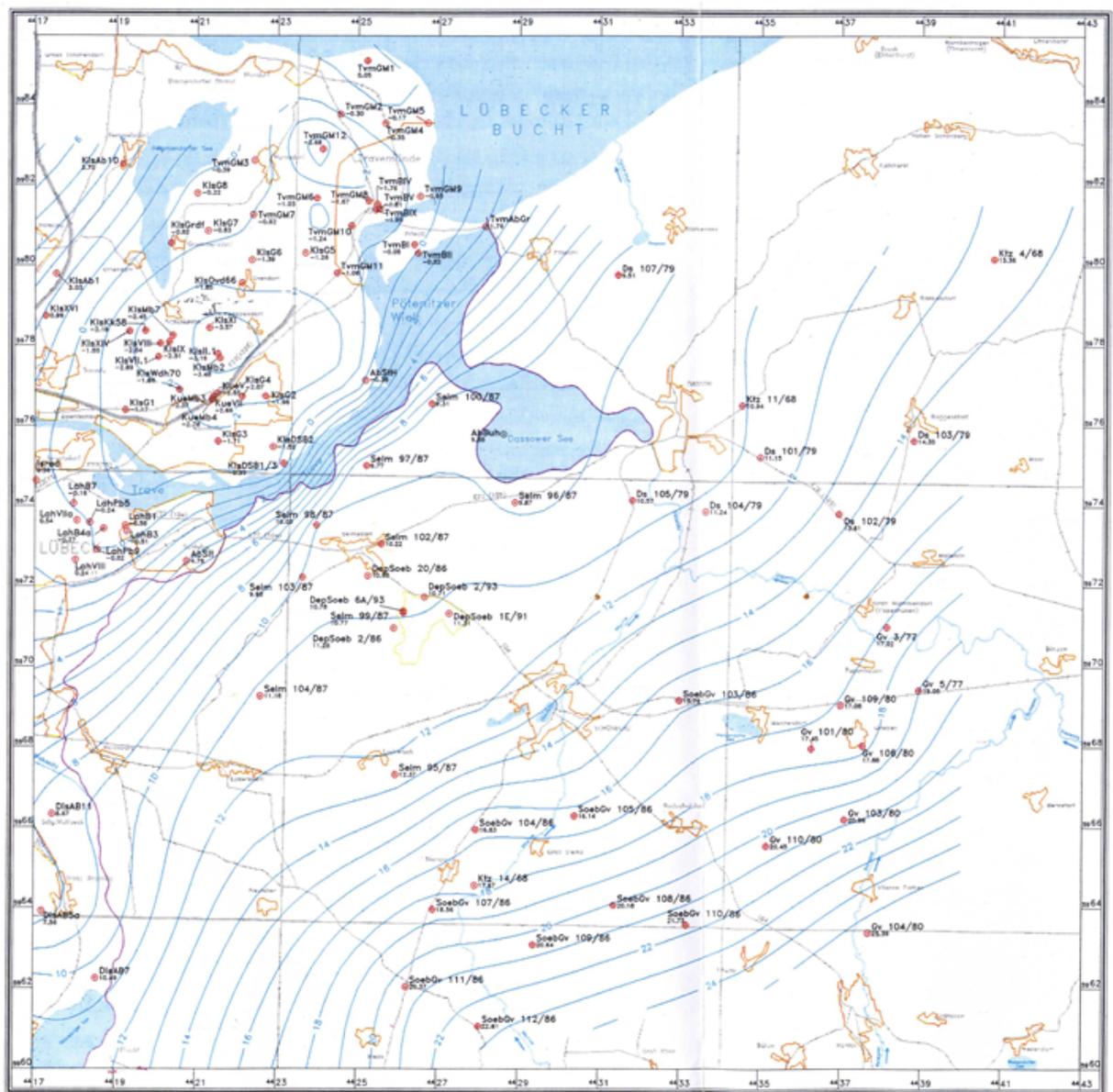


Abbildung 4. Stichtagsmessung der Grundwassergleichen durch das LLUR

stems kann wegen der Heterogenität des Untergrundes jedoch nicht a priori sondern nur durch eine Überwachung erfasst werden.

3 Methoden

Die Proben wurden nach den gängigen DIN-Normen in zertifizierten Laboren gemessen. Die Prüfergebnisse wurden, wie im Anhang berichtet, mitgeteilt. Die Auswertung der Proben erfolgte auf der Grundlage bekannter geochemischer, hydrochemischer und isotopenhydrologischer Verfahren (Leibundgut et al. (2009) für die Isotopenauswertung.

3.1 Wasserchemie

3.1.1 Hauptionen

Die Hauptionen bestehend aus den Kationen Calcium (Ca), Magnesium (Mg), Natrium (Na), Kalium (K) und den Anionen Hydrogencarbonat, Sulfat (SO_4), Nitrat (NO_3) und Chlorid (Cl) stellen in der Regel mehr als 95 % der Wasserinhaltsstoffe dar. Unter den Hauptionen können vor allem Sulfat, Nitrat, Chlorid einen Hinweis auf Deponiesickerwasser geben. Allerdings unterliegen Sulfat und Nitrat beide hydrochemischen Folgereaktionen: Beide Stoffe werden durch organische Belastungen, die auch typisch für Deponiesickerwasser sind und aus dem mit Organik angereicherten Hausmüll stammen, über Reduktions-Oxidations-Prozesse (RedOx) abgebaut und in ihre reduzierten Formen ($\text{SO}_4^{2-} \rightarrow \text{H}_2\text{S}$ und $\text{NO}_3^- \rightarrow \text{NO}_2^-$, NH_4^+ oder N_2 (je nach Reduktionsgrad) umgewandelt. Somit zeigen belastete Grundwässer häufig statt erhöhter Sulfat- und Nitratwerte typischerweise ein vollständiges Fehlen dieser Ionen, die je nach geologischer und pedologischer Situation auch immer in geringen Mengen natürlich auftreten. Ein Fehlen von Sulfat und Nitrat ist ein möglicher Hinweis, aber kein Beweis für Anteile von Deponiesickerwasser, da die Abbauprozesse auch durch natürlich vorkommende organische Ablagerungen im Aquifer ausgelöst werden können. Dazu gehören Braunkohlesande, anmoorige Ablagerungen und natürliche Vorkommen von Erdgas oder Erdöl. Im Untersuchungsgebiet treten in den Braunkohlesanden organische Sedimente in Form von Braunkohlen auf.

3.1.2 Chlorid

Da auch Chlorid selber aus Deponien stammen kann, ist es hier sinnvoll, nach einer Korrelation zwischen dem Chlorid/Natrium-Verhältnis oder dem Chlorid/Bromid-Verhältnis zu prüfen. Das Chlorid/Natrium Verhältnis von

Meerwasser konvergiert gegen 1.175 (bzw. gegen den Kehrwert von 0.85 für das molare Na/Cl-Verhältnis).

3.1.3 Halogenide Bromid und Fluorid

Die Halogensalze Bromid und Fluorid liegen in deutlich geringeren Konzentrationen vor. Bromid kommt im Meerwasser angereichert vor, da es bei Ausfällungen in Lösung bleibt. Ein Bromid/Chlorid-Verhältnis von 3.4 ‰ ist typisch für Meerwasser. Dieses Verhältnis bleibt bei Mischung mit Süßwasser erhalten. Interessant ist, dass Bromid/Chlorid-Verhältnisse von ausgelaugten Salzen aus Salzdiapiren, die im Untergrund des Untersuchungsgebietes auftreten, sehr geringe Br/Cl-Verhältnisse von 0.014 bis 0.32 ‰ aufweisen. Versalzung durch die Auslaugung von Salzen im Untergrund können also leicht erkannt werden, indem untersucht wird, ob bei zunehmendem Salzgehalt eine Abnahme des Br/Cl-Verhältnisses erfolgt. Natürliche Wasser werden zunächst durch Aerosole der Meeresbrandung beeinflusst, die ein Br/Cl-Verhältnis von 3.4 aufweist. Dieses verändert sich durch Verdunstung und Prozesse im Wasserkreislauf nicht. Fluorid kann aus geochemischen Quellen stammen und ist häufig mit geothermisch beeinflussten Grundwässern assoziiert. Fluorid-Konzentrationen über 1 mg/L sind für die Gesundheit des Menschen abträglich. Fluorid kann mit Deponiewässern zunehmen, dieses geochemische Merkmal ist allerdings wenig spezifisch.

3.1.4 Bor

In terrestrischem Süßwasser ist Bor ein empfindlicher Indikator für Verschmutzungen. Bor aus anthropogenen Quellen stammt aus den früher als Bleichmittel und Aufheller in Waschmitteln verwendeten Boraten, die über in Verpackungen enthaltene Waschmittelreste und wegen ihrer guten Löslichkeit in Wasser häufig in Deponiesickerwässern erhöht sind. In der Regel werden mehr als 200 µg/L B⁻ im Grundwasser als Indikator für Verschmutzungen angesehen, da die natürlichen Hintergrundwerte meist geringer sind. Bor kommt jedoch auch mit 4.45 mg/L in Meerwasser vor. In der Ostsee liegt der Borgehalt wegen der geringeren Salinität der Ostsee allerdings nur bei ca. 500 bis 700 µg/L. Das Auftreten erhöhter Bor-Konzentrationen von bis zu 700 µg/L allein ist noch kein hinreichender Hinweis auf Deponie-Sickerwasser. Es muss zusätzlich untersucht werden, ob die Anreicherung mit Bor mit weiteren Indikatoren von Versalzung mit Meerwasser wie Bromid oder Chlorid korreliert. Wenn erhöhte Borkonzentrationen nicht mit Indikatoren für eine natürliche Versalzung aus Meerwasser korrelieren, kann dies als ein guter und sicherer Hinweis auf anthropogene Quellen gelten.

Ein zusätzliches Indiz für die Herkunft von Bor liefert die Bor-Isotopenanalytik (Vengosh et al., 1994): Mit dieser Methode können marine von terrestrischen Borquellen unterschieden werden. In (Hammer, 2003) werden die Borisotopenuntersuchungen an der Deponie Ihlenberg referiert. Borisotope sollten nicht allein, sondern immer im Kontext mit den hydrochemischen Daten betrachtet werden und können dann den Nachweis von Deponiesickerwassereinfluss bestätigen und absichern.

3.2 Isotopenuntersuchungen

Isotopenuntersuchungen stellen ein geeignetes Mittel dar, um bei Altlastenuntersuchungen und bei der Untersuchung von Deponieeffekten geologische, hydrogeologische, geophysikalische und hydrochemische Daten zu ergänzen (Leibundgut et al., 2009). Bei der Untersuchung von Altlasten und Grundwässern im Umfeld von Deponien gehören Isotope zum Methodenspektrum (Hammer, 2003).

Für die Untersuchung von Deponieeffekten können die Isotopenverhältnisse der stabilen Isotope des Wassers $^{18}\text{O}/^{16}\text{O}$ und $^2\text{H}/^1\text{H}$ verwendet werden. Diese werden auf die Isotopenzusammensetzung von Meerwasser nach einem internationalen Standard V-SMOW (Vienna Standard Mean Ocean Water) normiert und in einer δ -Signatur als Abweichung in ‰ angegeben. Der Deponieeffekt kann durch die Veränderung des $^2\text{H}/^1\text{H}$ Verhältnisses im Grundwasser bestimmt werden. Im Deponiekörper kommt es zur Bildung von Wasserstoff. Bei diesem Prozess werden die leichten Isotope $^1\text{H}_2\text{O}$ des Wassers verstärkt in Wasserstoff umgewandelt. Dadurch kommt es zur Anreicherung des schwereren Isotops ^2H im Wasser. Die Sauerstoffisotope werden von diesem Prozess nicht beeinflusst. Im ^{18}O - ^2H Diagramm kommt es somit bei Deponieeffekt zu einer Veränderung der Werte entlang einer vertikal ansteigenden Linie.

Auch die Isotope des Kohlenstoffes können einen Deponieeffekt anzeigen. Der ^{13}C -Wert der Kohlendioxide in der Atmosphäre liegt bei -7.0 bis 8.8 ‰ für den internationalen Standard VPDB (Vienna Pee Dee Belemnite), der wiederum der mittleren Zusammensetzung von Karbonaten im Meerwasser entspricht. Pflanzen nehmen verstärkt leichten Kohlenstoff ^{12}C auf, damit entsteht je nach Typ der Pflanze eine mittlere Zusammensetzung von -23.5 ‰ bis -17 ‰ VPDB. Durch die Lösung von Kohlendioxid im Grundwasser verändert sich der Wert erneut und erreicht schließlich Werte von ca. -12 bis -15.5 ‰ VPDB. Im Deponiekörper kommt es zur Umwandlung von Hydrogencarbonat durch mikrobiologischen Abbau und hydrochemische Prozesse. Dabei wird wiederum das schwere Kohlenstoffisotope ^{13}C weniger stark abgebaut als das leichte und reichert sich im Deponiesickerwasser an.

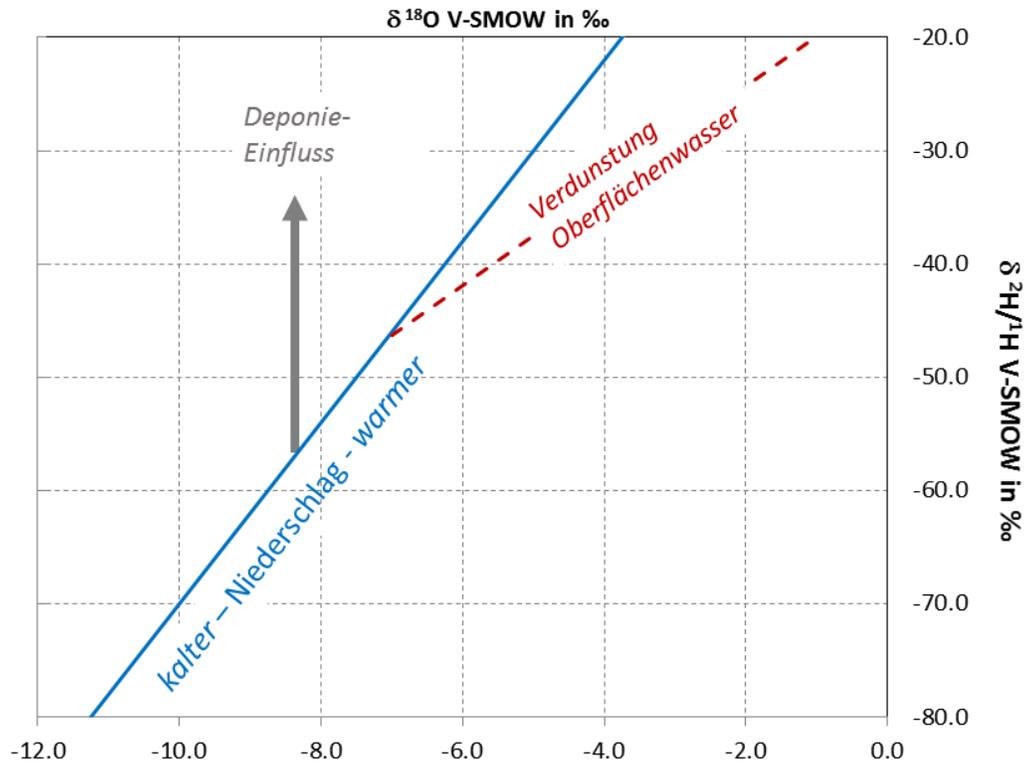


Abbildung 5. Methode zur Untersuchung des Deponieeinflusses auf das Grundwasser mit stabilen Wasserisotopen

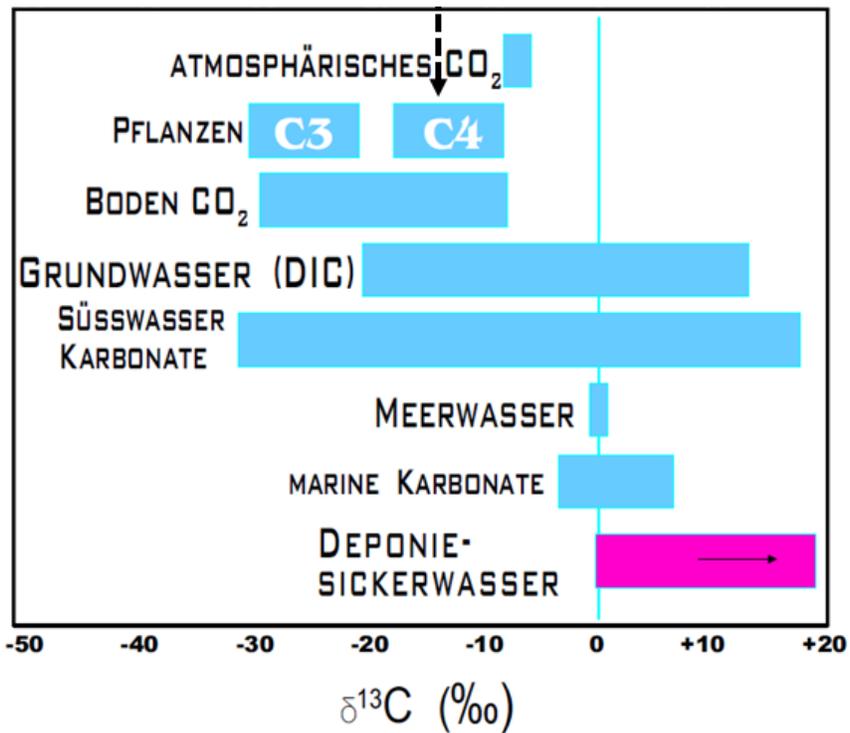


Abbildung 6. Methode zur Untersuchung des Deponieeinflusses mit stabilen Kohlenstoffisotopen. Pfeil entspricht natürlichem Grundwasser Lübeck

Schließlich kann Tritium, das radioaktive Isotope des Wassers 3^H zur Untersuchung von Deponien verwendet werden. Tritium zerfällt mit einer Halbwertszeit von 12.3 Jahren. Tritium wird in Tritium-Einheiten, sogenannten Tritium-Units (T.U.) gemessen. Eine Tritium-Einheit entspricht einer Radioaktivität von 0.118 Bq/L. In Deutschland gilt für Trinkwasser ein Grenzwert von 1000 T.U. Tritium kommt als natürliches radioaktives Isotope in der Atmosphäre vor und ist in geringen Mengen von ca. 5.5 T.U. mit einer saisonalen Schwankung im Niederschlag enthalten. Ab ca. 1950 stieg die Tritiumaktivität im Niederschlag durch oberirdische Nukleartests stark an und erreichte auf der Nordhalbkugel kurzzeitig Werte von über 1.000 T.U. (Einzelproben bis 6.300 T.U.) im Niederschlag. Seit Anfang der 1960er Jahre fällt die Tritiumkonzentration wieder ab und hat seit ca. 2010 auf der Nordhalbkugel wieder annähernd die natürlichen Hintergrundwerte erreicht. Dennoch kann mit dem in der Vergangenheit in den Wasserkreislauf gelangten Tritium bei älteren Grundwässern noch eine Altersdatierung mittels der vorhandenen Tritiumkonzentration vorgenommen werden. Dabei muss der radioaktive Zerfall und der zeitliche Verlauf der Tritiumwerte im Niederschlag berücksichtigt werden.

Tritium kommt jedoch auch als Indikatorstoff in Deponien vor. Grund dafür können Tritium-haltige Leuchtziffernblätter sein, die mit dem Hausmüll abgelagert wurden. In mehreren Deponien wurden Tritiumwerte von mehreren hundert T.U. bis über 1000 T.U. beobachtet. Diese Tritium-Markierung kann nun selbst als Indikator für Deponiesickerwasser dienen. In dem Fall, dass eine Beeinflussung besteht, kann allerdings eine eindeutige Altersdatierung mit Tritium nicht mehr erfolgen.

4 Ergebnisse

4.1 Vor Ort Parameter

Während der Probenahme wurden die Vor-Ort-Parameter bestimmt (Tab. 1). Die untersuchten Parameter umfassen neben den Randbedingungen Entnahmetiefe und Wasserstand die Färbung, Trübung, den Geruch, die Temperatur, den pH-Wert und die elektrische Leitfähigkeit in $\mu\text{S}/\text{cm}$.

Tabelle 1. Vor-Ort-Parameter

Brunnen	Tiefe m	Färbung	Trübung	Geruch	Temp. [C]	pH-Wert	Leitfähigkeit [$\mu\text{S}/\text{cm}$]
HY 5/95 F1	16.0	farblos	klar	unauffällig	11.3	7.34	1331
HY 5/95 F2	16.0	farblos	klar	unauffällig	10.4	7.37	868
HY 1/95 F1	9.0	farblos	klar	unauffällig	12.5	7.41	1579
HY 1/95 F2	10.0	farblos	klar	unauffällig	11.7	7.42	581
HY 1/95 F3	20.0	farblos	klar	unauffällig	10.2	7.49	655
HY 5/95 F4	20.0	farblos	klar	unauffällig	9.8	7.42	862
HY 3/95E F1	20.0	farblos	klar	unauffällig	11.6	7.65	7690
HY 3/95E F2	20.0	farblos	klar	unauffällig	10.8	7.33	992
HY 3/95E F3	22.0	farblos	klar	unauffällig	9.6	7.52	748

Keine der Proben wies eine Färbung, eine Trübung oder einen spezifischen Geruch auf. Die pH Werte liegen im normalen Bereich des Kalk-Kohlensäuregleichgewichtes zwischen 7.33 und 7.65 und sind damit unauffällig. Die Temperatur liegt im Bereich der Jahresmitteltemperatur, in den tieferen Stockwerken ist entsprechend der geothermischen Tiefenstufe aus natürlichen Gründen eine leicht höhere Temperatur festzustellen. Die elektrische Leitfähigkeit reicht von 581 $\mu\text{S}/\text{cm}$ im Hauptgrundwasserleiter bis zu 7690 $\mu\text{S}/\text{cm}$ im tiefen Filter von HY 3/95E-F1. Werte über 1000 $\mu\text{S}/\text{cm}$ deuten auf eine erhöhte Mineralisierung hin. Die Ursache der Mineralisierung kann aus den mit der Mineralisierung korrelierenden Hauptionen erschlossen werden. Dazu werden die Konzentrationen der Hauptionen im folgenden Kapitel näher untersucht.

4.2 Hauptionen

Die Analysen der Hauptionen und der Spurenstoffe sind in Tabelle 2 dargestellt. Es wurden im Einzelnen die Kationen Calcium (Ca), Magnesium (Mg), Natrium (Na), Kalium (K), Ammonium (NH_4) und Strontium (Sr), sowie die Anionen Hydrogencarbonat, Sulfat (SO_4), Nitrat (NO_3), Nitrit (NO_2), Chlo-

rid (Cl), Bromid (Br), Fluorid (F), Bor (B) sowie Sulfide leicht freisetzbar, die Säurekapazität bis pH 4.3 und Kieselsäure (SiO₂) untersucht.

Tabelle 2. Ergebnisse der Untersuchung auf Hauptionen

Parameter	Einheit	HY1/95F1	HY1/95F2	HY3/95F1	HY3/95F2	HY3/95F3
Ca ⁺²	mg/L	86.2	98.3	74.3	86.6	125
Mg ⁺²	mg/L	16.1	4.59	49.7	20.5	7.6
Na ⁺	mg/L	215	10.4	1470	85.7	21.2
K ⁺	mg/L	6	1.6	16.1	5.1	1.1
NH ₄ ⁺	mg/L	0.84	0.38	2.6	0.96	0.025
Sr ⁺²	mg/L	1.9	0.32	5.5	1.4	0.25
HCO ₃ ⁻	mg/L	483.3	231.9	434.4	441.2	205.6
SO ₄ ⁻²	mg/L	8.2	52.7	3	3.3	178
NO ₃ ⁻	mg/L	0.2	0.8	0.2	1.1	0.5
NO ₂ ⁻	mg/L	0.008	0.008	0.008	0.008	0.008
Cl ⁻	mg/L	263	40.8	2330	97.7	33.3
Br ⁻	mg/L	0.34	0.1	3.45	0.18	0.09
F ⁻	mg/L	0.27	0.12	0.5	0.27	0.05
B ⁻	mg/L	0.46	0.04	2.4	0.29	0.05

Parameter	Einheit	HY5/95F1	HY5/95F2	HY5/95F3	HY5/95F4
Ca ⁺²	mg/L	85.7	81.1	88.4	145
Mg ⁺²	mg/L	20.6	17	13.5	6.72
Na ⁺	mg/L	186	72.4	21	23.6
K ⁺	mg/L	6.1	4.7	4.6	2.2
NH ₄ ⁺	mg/L	1.5	1.4	0.28	0.008
Sr ⁺²	mg/L	1.9	1.3	0.62	0.46
HCO ₃ ⁻	mg/L	460.7	421.6	223.9	234.9
SO ₄ ⁻²	mg/L	3.5	1	100	185
NO ₃ ⁻	mg/L	0.2	0.2	0.2	19
NO ₂ ⁻	mg/L	0.008	0.008	0.008	0.14
Cl ⁻	mg/L	204	85	41	50.5
Br ⁻	mg/L	0.32	0.14	0.07	0.12
F ⁻	mg/L	0.27	0.25	0.2	0.05
B ⁻	mg/L	0.37	0.27	0.12	0.09

Die Hauptionen zeigen deutliche Unterschiede nach der jeweiligen Tiefe. In der unteren Filterstellung 1 (F1) treten zum Teil hohe bis sehr hohe Natrium- und Chloridkonzentrationen auf. Die höchsten Werte werden in der Grundwassermessstelle HY3/95 F1 mit 1,470 mg/L Natrium und 2,330 mg/L Chlorid erreicht. Auch HY1/95 F1 und HY5/951 F1 weisen mit 263 mg/L und 204 mg/L Chlorid erhöhte Salzgehalte auf.

Die relativen Anteile der Hauptionen Ca-Mg-Na+K und der Anionen HCO₃, SO₄, NO₃ und Chlorid können sehr anschaulich im Piperdiagramm dargestellt werden (Abb. 7).

Dieses ternäre Diagramm zeigt unten links die relative Kationenverteilung und unten rechts die relative Anionenverteilung. In der Mitte wird die Gesamtchemie dargestellt. Die Gesamtkonzentration der Ionen wird durch die Größe

eines Kreises um die Analyse dargestellt. Das Piperdiagramm zeigt deutlich die unterschiedlichen Gruppen der Wassertypen (Abb. 7). Die Proben aus der Filterstellung F3 und F4, dem oberen ungespannten quartären Aquifer haben eine $\text{Ca-HCO}_3\text{-SO}_4$ Signatur und sind gering mineralisiert. Sulfat ist noch vorhanden, da unter oxidativen Bedingungen im oberen Aquifer kein Abbau von Sulfat zu Schwefelwasserstoff stattfinden kann. Die Filterstellung F2 ist durch den zunehmenden Austausch mit Alkaliionen (Na und K) und durch den nun einsetzenden Abbau von Nitrat und Sulfat gekennzeichnet. Die Filterstellung F1 ist deutlich durch eine Versalzung aus tieferen Schichten geprägt, das Grundwasser entwickelt sich zu einem $\text{Na-HCO}_3\text{-Cl}$ Wassertyp. Durch diese Einteilung in Wassertypen ist eine Gliederung auch unabhängig von der Fil-

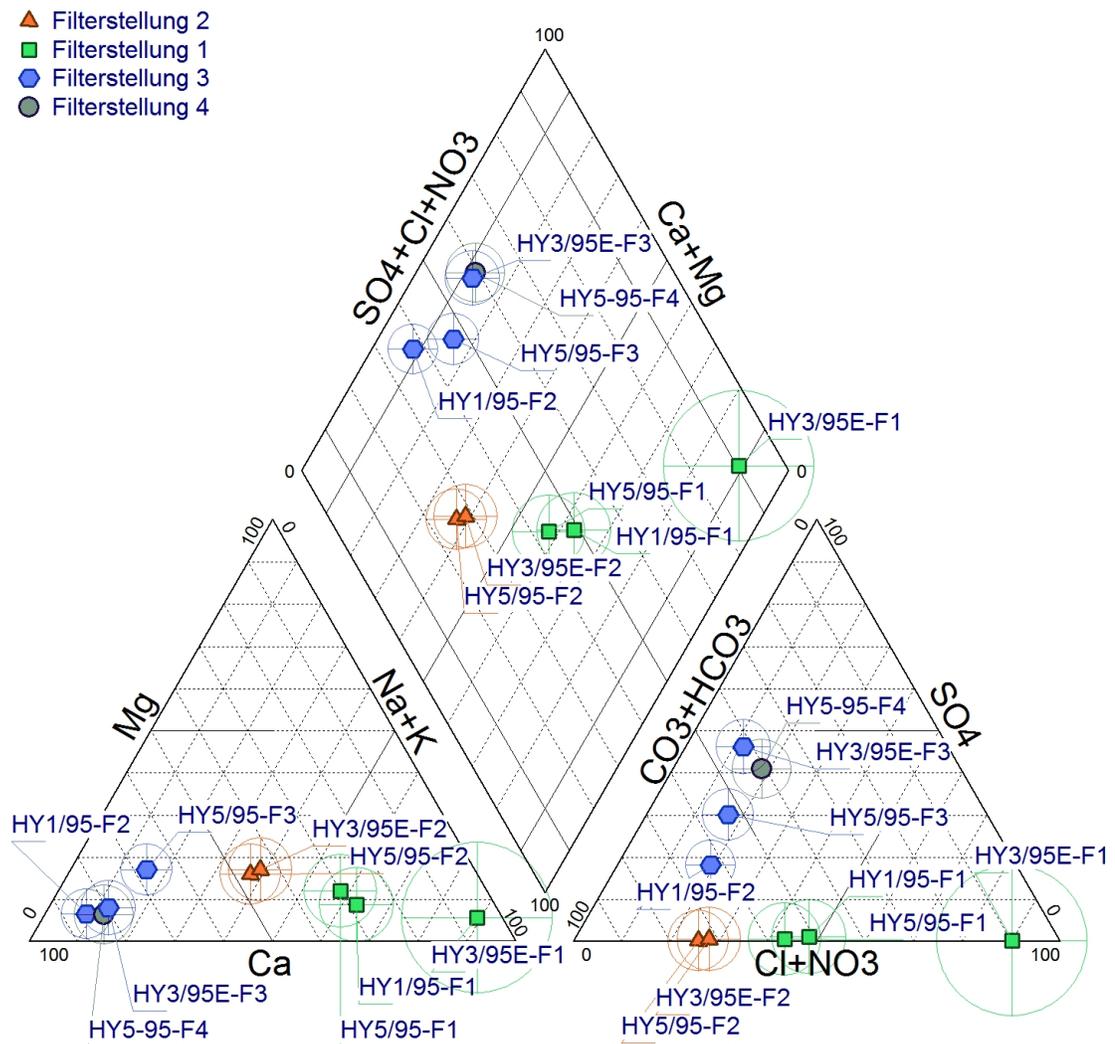


Abbildung 7. Piperdiagramm der Hauptionen, die Kreise zeigen die elektrische Leitfähigkeit relativ an

terstellung möglich und HY 1/95-F2 kann als Grundwasser des oberen Stockwerkes identifiziert und klassifiziert werden.

Das Schoeller-Diagramm zeigt die Veränderungen der Wassertypen in einer geordneten Darstellung in Milli-Äquivalenten dar (Abb. 8). Hierdurch wird noch einmal die Einteilung in drei distinkte Gruppen klar und die selektive Entfernung von Nitrat und Sulfat durch Reduktionsprozesse. Diese Reduktion kann, muss aber nicht durch eine organische Verschmutzung mit Deponiesickerwasser ausgelöst werden.

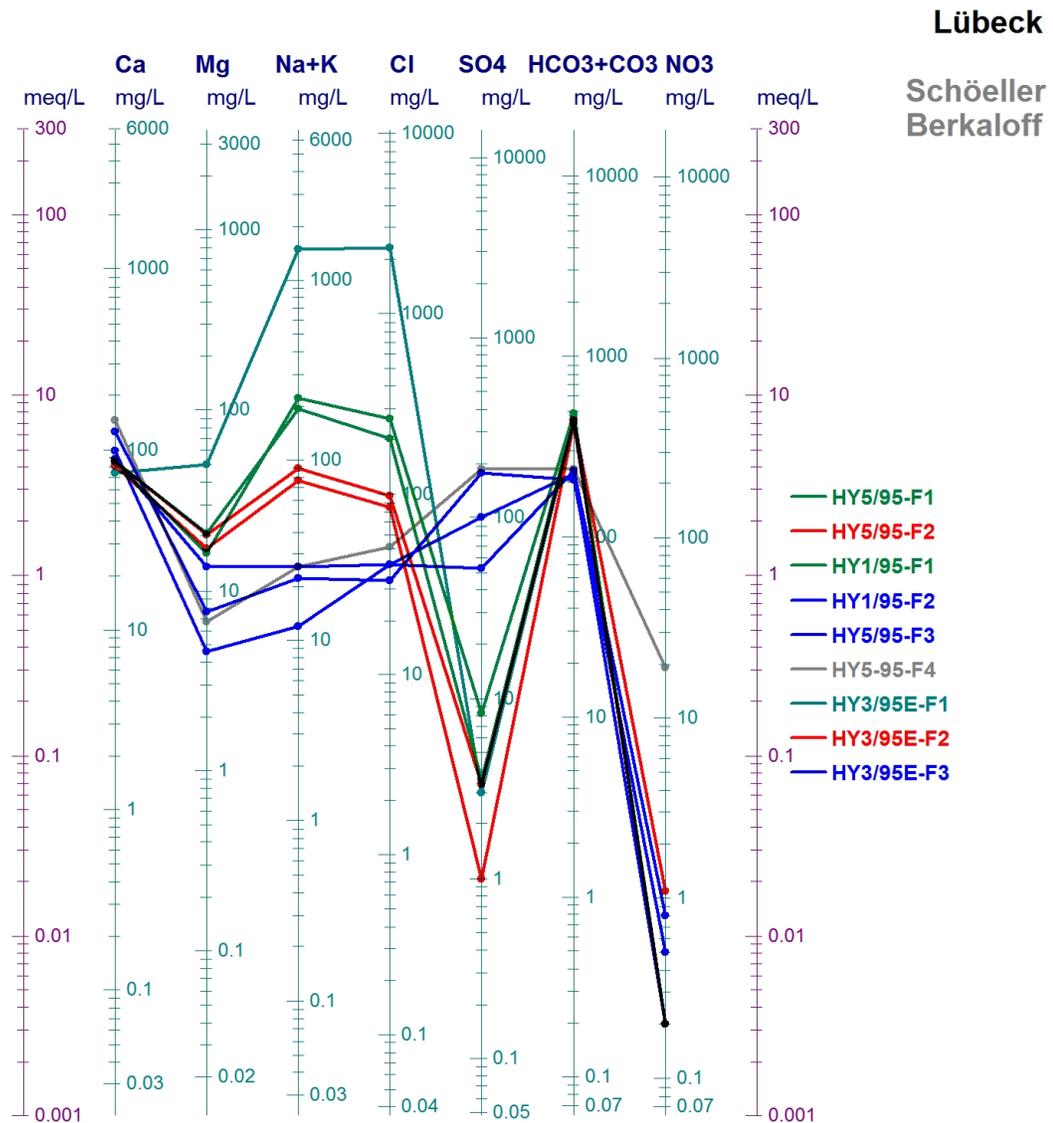


Abbildung 8. Schoellerdiagramm der Hauptionen

Es fällt auf, dass die Hydrogenkarbonatwerte in zwei Gruppen auftreten: Die Messstellen mit tiefen Filterstellungen HY1/95 F1, HY3/95 F1+F1, HY5/95 F1+F2 haben hohe Konzentrationen zwischen 421.6 und 483.3 mg/L, hingegen

liegen die Werte bei den flacheren Filterstellungen HY1/95 F2, HY3/95 F3, HY5/95 F3+F4 nur zwischen 205.6 und 234.9 mg/L. Die Konzentration von Hydrogenkarbonat im Grundwasser wird zunächst über den Partialdruck von Kohlendioxid im Boden bestimmt und kann dann durch sekundäre Prozesse im Aquifer steigen (Bildung von CO_2) oder sinken (Abbau von Hydrogenkarbonat in reduziertem Milieu z. Bsp. durch organische Verschmutzung).

Die Nitratwerte sind mit Ausnahme der Grundwassermessstelle HY5/95 F4, welche 19 mg/L Nitrat aufweist, sehr gering und liegen unter 1.1 mg/L, meist nur bei 0.1 bis 0.2 mg/L. Dieses deutet darauf hin, dass in den tiefen und mittleren Stockwerken und den Filterstellungen F1 und F2, teilweise auch F3 ein Nitratabbau stattfindet. Der Nitratabbau im Grundwasser erfolgt, wenn der bei der Grundwasserneubildung gelöste Sauerstoff durch Abbau organischer Substanz aufgezehrt wurde. Erhöhte Bromidwerte treten in den F1 und in geringerem Maße F2 auf. Die Fluoridwerte überschreiten nicht 0.5 mg/L und sind daher unauffällig.

Es fallen in der Untersuchung der Analysenergebnisse die erhöhten Bor-Konzentrationen auf (Abb. 9). Bor-Konzentrationen von mehr als 200 $\mu\text{g/L}$ können einen Einfluss von Deponiesickerwasser darstellen. Allerdings ist Bor auch in Meerwasser enthalten (4.5 mg/L). Durch die geringere Salinität der Ostsee erreichen die Borkonzentrationen des Ostseewassers rezent allerdings nur ca. 0.5 bis 0.7 mg/L.

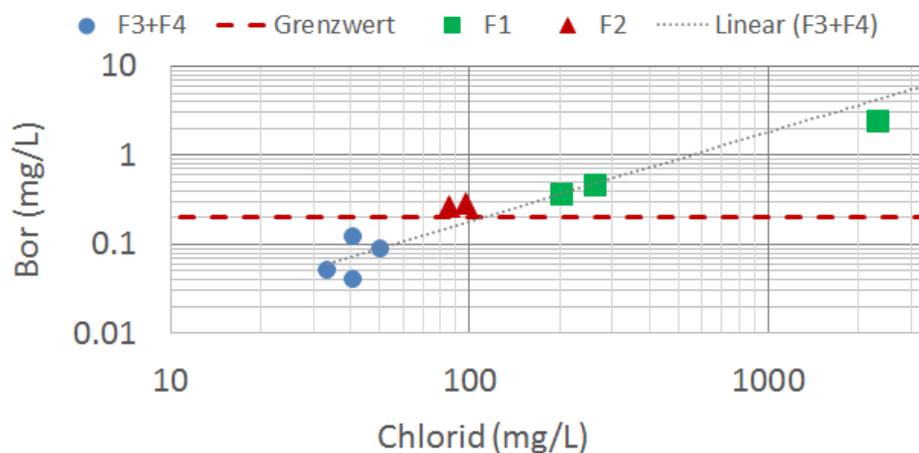


Abbildung 9. Borkonzentrationen in Abhängigkeit der Chloridwerte im Untersuchungsgebiet

Bei einer Probe liegt dieser Wert über 0.7 mg/l. Dieser hohe Wert in der untersten Filterstufe 1 der Messstelle HY3/95E kann durch natürliche Prozesse nur mit Formationswasser oder mit Auslaugungen von tieferen Salzstöcken erklärt werden oder zeigt eben bereits einen Einfluss von Deponiesickerwasser an. Ins-

gesamt wird in der Wasserchemie eine Korrelation von Natrium mit Chlorid und von Bromid mit Chlorid beobachtet. Eine solche Korrelation deutet auf Versalzungsprozesse hin.

4.3 Metalle und Schwermetalle

Die Metalle Eisen (Fe), Mangan (Mn) werden getrennt betrachtet, da sie Redoxanzeiger ohne physiologische Toxizität darstellen. Die Eisen- und Mangankonzentrationen liegen in den tieferen Stockwerken tiefer. Sie sind kein Anzeiger für eine Verschmutzung. Sie zeigen reduzierende Bedingungen an, die natürliche Ursache (natürliche organische Ablagerungen, Braunkohle) oder anthropogene Ursachen haben können. Eine nähere Interpretation ist nur unter Verwendung der Kohlenstoffisotope möglich.

Die Schwermetalle Blei (Pb), Cadmium (Cd), Selen (Se), Kupfer (Cu), Nickel (Ni), Quecksilber (Hg), Zink (Zn) konnten in den Proben nicht nachgewiesen werden und lagen somit unter Nachweisgrenzen der in DIN EN ISO 17294-2 (E 29) spezifizierten Methoden. Eine signifikante Erhöhung dieser Konzentration kann als Nachweis für eine anthropogene Belastung dienen, sofern die geochemischen Hintergrundwerte deutlich überschritten werden.

Tabelle 3. Ergebnisse der Untersuchung auf Metalle

Parameter	Einheit	HY1/95 F1	HY1/95 F2	HY3/95E F1	HY3/95E F2	HY3/95E F3
Aluminium (Al)	mg/l	<0.02	<0.02	<0.02	<0.02	<0.02
Eisen (Fe)	mg/l	1.7	3.2	2.0	2.5	0.74
Mangan (Mn)	mg/l	0.18	0.25	0.083	0.18	0.1
Blei (Pb)	mg/l	<0.0025	<0.0025	<0.0025	<0.0025	<0.0025
Cadmium (Cd)	mg/l	<0.0005	<0.0005	<0.0005	<0.0005	<0.0005
Selen (Se)	mg/l	<0.001	<0.001	<0.001	<0.001	<0.001
Kupfer (Cu)	mg/l	<0.005	<0.005	<0.005	<0.005	<0.005
Nickel (Ni)	mg/l	<0.002	<0.002	<0.002	<0.002	<0.002
Quecksilber (Hg)	mg/l	<0.0001	<0.0001	<0.0001	<0.0001	<0.0001
Zink (Zn)	mg/l	<0.01	<0.01	<0.01	<0.01	<0.01

Parameter	Einheit	HY 5/95 F1	HY 5/95 F2	HY 5/95 F3	HY 5/95 F4
Aluminium (Al)	mg/l	<0.02	<0.02	<0.02	<0.02
Eisen (Fe)	mg/l	2.5	2.7	1	<0.010 (+)
Mangan (Mn)	mg/l	0.16	0.17	0.31	0.029
Blei (Pb)	mg/l	<0.0025	<0.0025	<0.0025	<0.0025
Cadmium (Cd)	mg/l	<0.0005	<0.0005	<0.0005	<0.0005
Selen (Se)	mg/l	<0.001	<0.001	<0.001	<0.001
Kupfer (Cu)	mg/l	<0.005	<0.005	<0.005	<0.005
Nickel (Ni)	mg/l	<0.002	<0.002	<0.002	<0.002
Quecksilber (Hg)	mg/l	<0.0001	<0.0001	<0.0001	<0.0001
Zink (Zn)	mg/l	<0.01	<0.01	<0.01	<0.01

Schwermetalle sind unter neutralem pH und bei den beobachteten pH-Werten im Grundwasserleiter kaum mobil. Daher ist die Mobilität von Schwermetallen

in Grundwasser, das sich im Kohlensäuregleichgewicht befindet, sehr stark eingeschränkt. Eventuell in den Hauptgrundwasserleiter eintretende Sickerwässer würden daher erheblich retardiert werden und sich durch Sorption auf Austauschplätzen oder durch Oberflächenkomplexierung erheblich langsamer als das Wasser bewegen. Schwermetalle sind daher keine geeigneten Indikatoren für eine Verschmutzung.

4.4 Organische Schadstoffe

Der gesamte gelöste organische Kohlenstoff (DOC, engl. dissolved organic carbon) in mg/L zeigt an, wie viel Organik insgesamt im Wasser gelöst ist, darunter können natürliche und anthropogene Stoffe fallen. Der chemische Sauerstoffbedarf (CSB) in mg/L Sauerstoff gibt an, wie viel Sauerstoff benötigt wird, um die abbaubaren chemischen Verbindungen abzubauen, die sich im Wasser befinden. Die adsorbierbaren organisch gebundenen Halogene (AOX), der Kohlenwasserstoff-Index für Kohlenwasserstoffe wie Mineralöl, Diesel, Heizöl an und der Phenolindex für Phenole sind Summenparameter (Tab. 4).

Tabelle 4. Ergebnisse der Untersuchung auf organische Summenparameter.

Parameter	Einheit	HY1/95 F1	HY1/95 F2	HY3/95E F1	HY3/95E F2	HY3/95E F3
Cyanide leicht freisetzbar	mg/l	<0.005*	<0.005*	<0.005*	<0.005*	<0.005*
Cyanide ges.	mg/l	<0.003*	<0.003*	<0.003*	<0.003*	<0.003*
DOC	mg/l	2.6	3.5	7.5	2.6	1.5
CSB	mg/l	<15	<15	41	<15	<15
AOX	mg/l	0.02	0.02	0.03	0.02	0.02
Kohlenwasserstoff-Index	mg/l	<0.10	<0.10	<0.10	<0.10	<0.10
Phenolindex	mg/l	<0.01*	<0.01*	<0.01*	<0.01*	<0.01*

Bei mit einem Stern markierten Proben stellt der Wert die analytische Nachweisgrenze dar. Die farbig markierten Werte (grün und orange) zeigen erhöhte Konzentrationen von gelöstem organischen Kohlenstoff (DOC) und von chemischem Sauerstoffbedarf (CSB).

Parameter	HY 5/95 F1	HY 5/95 F2	HY 5/95 F3	HY 5/95 F4
Cyanide leicht freisetzbar	<0.005*	<0.005*	<0.005*	<0.005*
Cyanide ges.	<0.003*	<0.003*	<0.003*	<0.003*
DOC	2.5	2.4	1.6	1.6
CSB	<15	<15	<15	<15
AOX	0.08	0.03	0.02	0.02
Kohlenwasserstoff-Index	<0.10	<0.10	<0.10	<0.10
Phenolindex	<0.01*	<0.01*	<0.01*	<0.01*

Während bei der Untersuchung Cyanide, Kohlenwasserstoff- und Phenolindex nicht nachgewiesen wurden, fallen die erhöhten DOC und CSB-Werte bei HY 3/95E F1 auf.

Es wurden als organischen Schadstoffe die leichtflüchtigen halogenierten Kohlenwasserstoffe (LHKW), die polyzyklischen aromatischen Kohlenwasserstoffe und ein Pestizid untersucht (Tab. 5). Alle Analysen lagen unter der jeweiligen Nachweisgrenze.

Tabelle 5. Ergebnisse der Untersuchung auf organische Schadstoffe

Parameter	Einheit	HY1/95 F1	HY1/95 F2	HY3/95E F1	HY3/95E F2	HY3/95E F3
Leichtflüchtige Halogenierte Kohlenwasserstoffe						
Bromdichlormethan	µg/l	<0.3	<0.3	<0.3	<0.3	<0.3
cis-1,2-Dichlorethen	µg/l	<0.5	<0.5	<0.5	<0.5	<0.5
Dibromchlormethan	µg/l	<0.2	<0.2	<0.2	<0.2	<0.2
Dichlormethan	µg/l	<0.5	<0.5	<0.5	<0.5	<0.5
Tetrachlorethen	µg/l	<0.1	<0.1	<0.1	<0.1	<0.1
Tetrachlormethan	µg/l	<0.1	<0.1	<0.1	<0.1	<0.1
trans-1,2-Dichlorethen	µg/l	<0.2	<0.2	<0.2	<0.2	<0.2
Tribrommethan	µg/l	<0.3	<0.3	<0.3	<0.3	<0.3
Trichlorethen	µg/l	<0.1	<0.1	<0.1	<0.1	<0.1
Trichlormethan	µg/l	<0.1	<0.1	<0.1	<0.1	<0.1
Vinylchlorid	µg/l	<0.1	<0.1	<0.1	<0.1	<0.1
1,1-Dichlorethen	µg/l	<0.2	<0.2	<0.2	<0.2	<0.2
1,1-Dichlorethan	µg/l	<0.1	<0.1	<0.1	<0.1	<0.1
1,1,1-Trichlorethan	µg/l	<0.1	<0.1	<0.1	<0.1	<0.1
1,1,2-Trichlorethan	µg/l	<0.1	<0.1	<0.1	<0.1	<0.1
1,1,2,2-Tetrachlorethan	µg/l	<0.2	<0.2	<0.2	<0.2	<0.2
1,2-Dichlorethan	µg/l	<0.2	<0.2	<0.2	<0.2	<0.2
LHKW - Summe	µg/l	n.b.	n.b.	n.b.	n.b.	n.b.
Polyzyklische Aromatische Kohlenwasserstoffe (PAK)						
Naphthalin	µg/l	<0.020	<0.010	<0.010	<0.010	<0.010
Acenaphthylen	µg/l	<0.10	<0.05	<0.05	<0.05	<0.05
Acenaphthen	µg/l	<0.010	<0.005	<0.005	<0.005	<0.005
Fluoren	µg/l	<0.010	<0.005	<0.005	<0.005	<0.005
Phenanthren	µg/l	<0.010	<0.005	<0.005	<0.005	<0.005
Anthracen	µg/l	<0.010	<0.005	<0.005	<0.005	<0.005
Fluoranthren	µg/l	<0.010	<0.005	<0.005	<0.005	<0.005
Pyren	µg/l	<0.010	<0.005	<0.005	<0.005	<0.005
Benzo(a)anthracen	µg/l	<0.010	<0.005	<0.005	<0.005	<0.005
Chrysen	µg/l	<0.010	<0.005	<0.005	<0.005	<0.005
Benzo(b)fluoranthren	µg/l	<0.010	<0.005	<0.005	<0.005	<0.005
Benzo(k)fluoranthren	µg/l	<0.010	<0.005	<0.005	<0.005	<0.005
Benzo(a)pyren	µg/l	<0.010	<0.005	<0.005	<0.005	<0.005
Indeno(1,2,3-cd)pyren	µg/l	<0.010	<0.005	<0.005	<0.005	<0.005
Dibenzo(ah)anthracen	µg/l	<0.010	<0.005	<0.005	<0.005	<0.005
Benzo(ghi)perylen	µg/l	<0.010	<0.005	<0.005	<0.005	<0.005
PAK nach EPA	µg/l	n.b.	n.b.	n.b.	n.b.	n.b.
Pestizide						
1,2-Dichlorpropan	µg/l	<0.070	<0.070	<0.070	<0.070	<0.070

4.5 Stabile Isotope des Wassers

Die stabilen Isotopen des Wassers bieten eine Möglichkeit, Deponieeinfluss zu erkennen. Untersucht wurden die Isotopenverhältnisse des Wassers $^{18}O/^{16}O$ und $^2H/^1H$. Die Isotopenverhältnisse werden im Bezug auf das Meerwasser als international gültiger Standard Vienna Standard Mean Ocean Water (V-SMOW) in ‰ angegeben.

Parameter	Einheit	HY 5/95 F	HY 5/95 F2	HY 5/95 F3	HY 5/95 F4
Leichtflüchtige Halogenierte Kohlenwasserstoffe					
Bromdichlormethan	µg/l	<0.3	<0.3	<0.3	<0.3
cis-1,2-Dichlorethen	µg/l	<0.5	<0.5	<0.5	<0.5
Dibromchlormethan	µg/l	<0.2	<0.2	<0.2	<0.2
Dichlormethan	µg/l	<0.5	<0.5	<0.5	<0.5
Tetrachlorethen	µg/l	<0.1	<0.1	<0.1	<0.1
Tetrachlormethan	µg/l	<0.1	<0.1	<0.1	<0.1
trans-1,2-Dichlorethen	µg/l	<0.2	<0.2	<0.2	<0.2
Tribrommethan	µg/l	<0.3	<0.3	<0.3	<0.3
Trichlorethen	µg/l	<0.1	<0.1	<0.1	<0.1
Trichlormethan	µg/l	<0.1	<0.1	<0.1	<0.1
Vinylchlorid	µg/l	<0.1	<0.1	<0.1	<0.1
1,1-Dichlorethen	µg/l	<0.2	<0.2	<0.2	<0.2
1,1-Dichlorethan	µg/l	<0.1	<0.1	<0.1	<0.1
1,1,1-Trichlorethan	µg/l	<0.1	<0.1	<0.1	<0.1
1,1,2-Trichlorethan	µg/l	<0.1	<0.1	<0.1	<0.1
1,1,2,2-Tetrachlorethan	µg/l	<0.2	<0.2	<0.2	<0.2
1,2-Dichlorethan	µg/l	<0.2	<0.2	<0.2	<0.2
LHKW - Summe	µg/l	n.b.	n.b.	n.b.	n.b.
Polyzyklische Aromatische Kohlenwasserstoffe (PAK)					
Naphthalin	µg/l	<0.010	<0.010	<0.020	<0.020
Acenaphthylen	µg/l	<0.05	<0.05	<0.10	<0.10
Acenaphthen	µg/l	<0.005	<0.005	<0.010	<0.010
Fluoren	µg/l	<0.005	<0.005	<0.010	<0.010
Phenanthren	µg/l	<0.005	<0.005	<0.010	<0.010
Anthracen	µg/l	<0.005	<0.005	<0.010	<0.010
Fluoranthren	µg/l	<0.005	<0.005	<0.010	<0.010
Pyren	µg/l	<0.005	<0.005	<0.010	<0.010
Benzo(a)anthracen	µg/l	<0.005	<0.005	<0.010	<0.010
Chrysen	µg/l	<0.005	<0.005	<0.010	<0.010
Benzo(b)fluoranthren	µg/l	<0.005	<0.005	<0.010	<0.010
Benzo(k)fluoranthren	µg/l	<0.005	<0.005	<0.010	<0.010
Benzo(a)pyren	µg/l	<0.005	<0.005	<0.010	<0.010
Indeno(1,2,3-cd)pyren	µg/l	<0.005	<0.005	<0.010	<0.010
Dibenzo(ah)anthracen	µg/l	<0.005	<0.005	<0.010	<0.010
Benzo(ghi)perylen	µg/l	<0.005	<0.005	<0.010	<0.010
PAK nach EPA	µg/l	n.b.	n.b.	n.b.	n.b.
Pestizide					
1,2-Dichlorpropan	µg/l	<0.070	<0.070	<0.070	<0.070

Die Isotopenwerte können einen Deponiesickerwassereinfluss dadurch anzeigen, dass die Wasserstoffisotopenverhältnisse steigen, ohne dass die Sauerstoffisotope sich verändern. Die Analysen der stabilen Isotope zeigen keinen deutlich erkennbaren Einfluss von Deponiesickerwasser. Die Abweichungen nach oben in Richtung schwerer Wasserstoffisotopenwerte liegen im Bereich der Schwankungen des Niederschlages.

Tabelle 6. Ergebnisse der Isotopenuntersuchung

Brunnen	Tiefe m	$^{18}\text{O}/^{16}\text{O}$ δ ‰	$^2\text{H}/^1\text{H}$ δ ‰	$^{13}\text{C}/^{12}\text{C}$ δ ‰	^3H T.U.
HY 5/95 F1	16.0	-8.35	-55.00	-14.80	1.5
HY 5/95 F2	16.0	-8.33	-54.20	-15.10	1.3
HY 1/95 F1	9.0	-8.49	-56.70	-15.17	<0.6
HY 1/95 F2	10.0	-8.17	-54.90	-14.06	1.3
HY 1/95 F3	20.0	-8.73	-58.00	-13.20	1.9
HY 5/95 F4	20.0	-8.46	-55.70	-13.20	6.5
HY 3/95EF1	20.0	-8.91	-61.00	-12.04	<0.6
HY 3/95E F2	20.0	-8.27	-53.70	-15.05	<0.6
HY 3/95E F3	22.0	-8.69	-56.70	-12.06	9.6

4.6 Stabile Isotope des Kohlenstoffes

Die Untersuchung der stabilen Isotope des Kohlenstoffes zeigt Werte von -12.04 bis -15.17 ‰ V-PDB. Diese Werte liegen unter der Grenze von 0-5 ‰ V-PDB, die auf einen Deponiesickerwassereinfluss hindeuten würde.

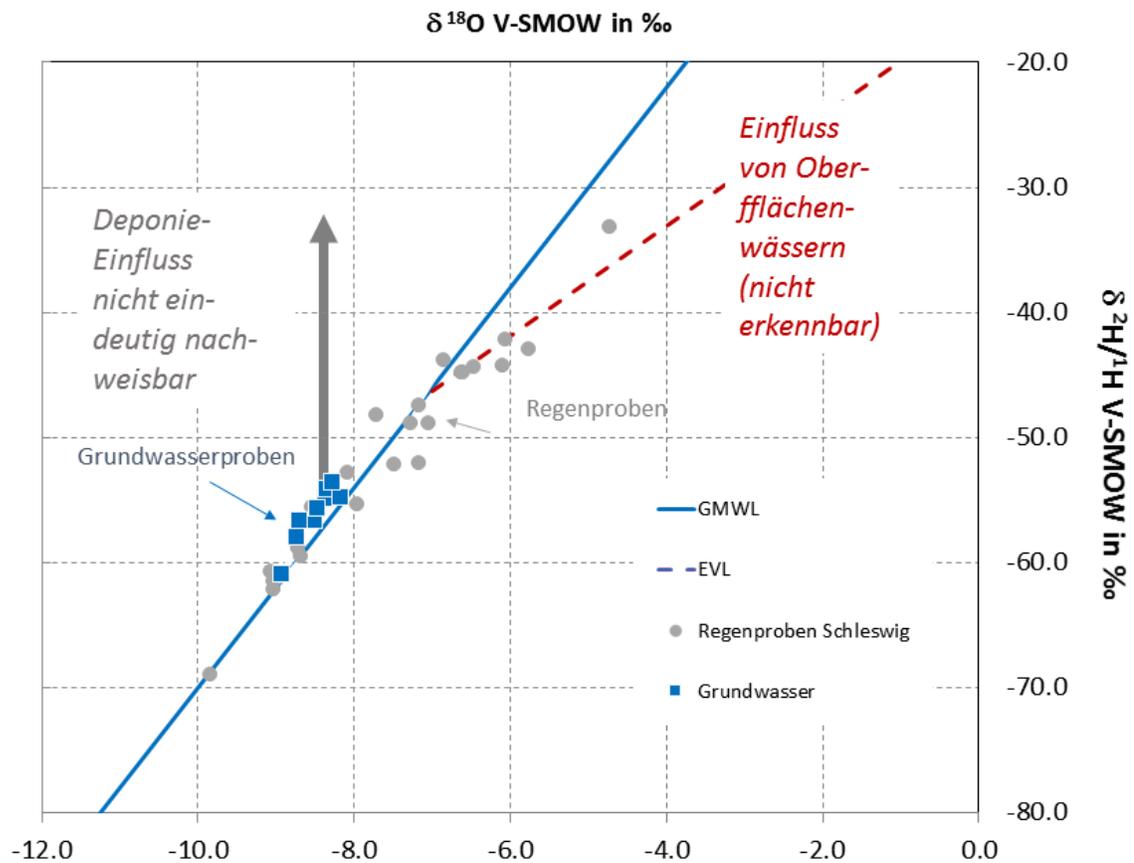


Abbildung 10. Auswertung der stabilen Isotope des Wassers

In Kombination mit dem Parameter des Wasserstoffisotopes müsste eine Veränderung zu schwereren Kohlenstoffisotopenwerten und schwereren Wasserstoffisotopenwerte zu beobachten sein. Die Werte in den unterschiedlichen Filterstufen zeigen diesen Einfluss nicht.

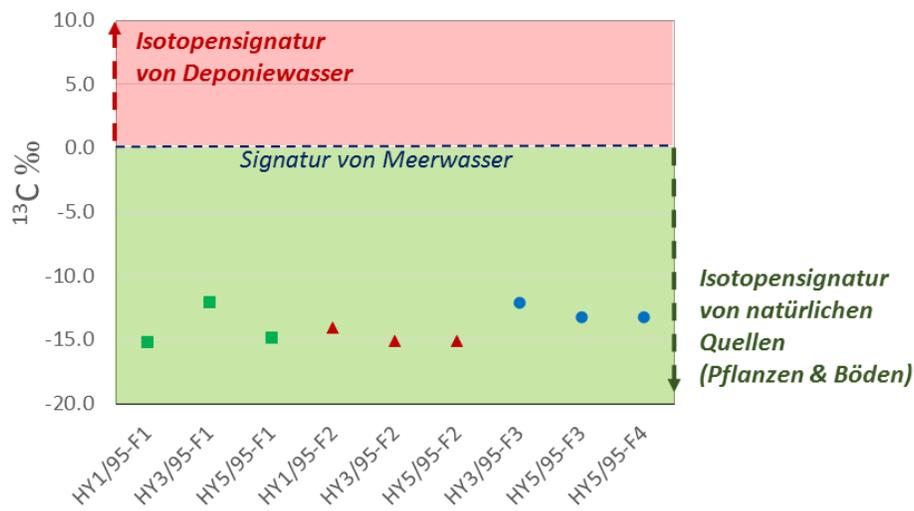


Abbildung 11. Auswertung der stabilen Isotope des Kohlenstoffes

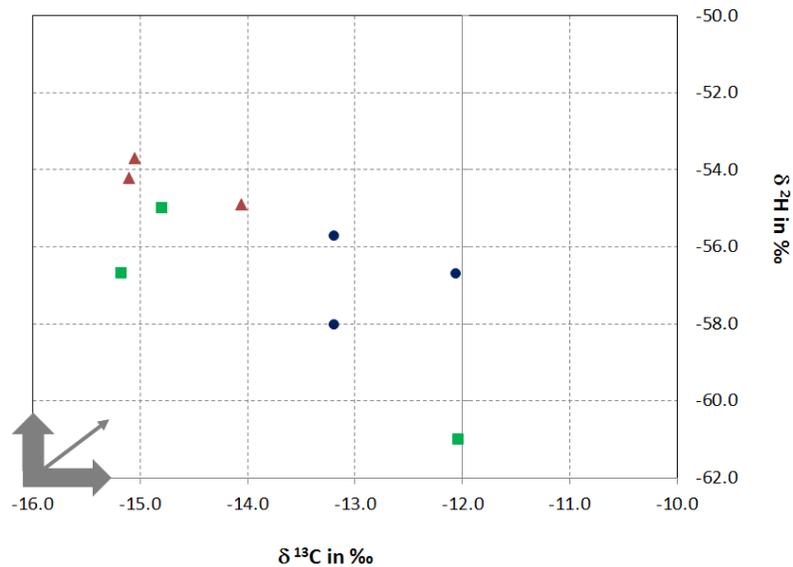


Abbildung 12. Auswertung der stabilen Isotope des Kohlenstoffes

4.7 Radioaktives Isotop des Wassers - Tritium

Die Isotopenuntersuchungen umfassen schließlich auch die Untersuchung von Tritium. Die Werte reichen von < 0.6 T.U. unter der Nachweisgrenze bis zu maximal 9.6 T.U. Diese Werte liegen im Bereich der Werte, die ohne Deponie-sickerwasser erreicht werden können. Zunächst wurde an Hand der vorliegenden Werte eine Altersbestimmung unter der Annahme durchgeführt, dass keine Beeinflussung durch Tritium aus der Deponie vorliegt. Werden die Tritiumwerte unter dieser Annahme mit den jeweiligen Tritiumwerten der Niederschläge seit 1950 verglichen und wird dabei der radioaktive Zerfall berücksichtigt, so ergeben sich Neubildungsalter zwischen mehr als 65 Jahren für die tiefe Filterstrecke (F1), 50 bis 15 Jahren für die mittlere Filterstrecke (F2) und 0 bis 15 Jahren für die oberen Filterstrecken (F3 und F4) (Abb. 13).

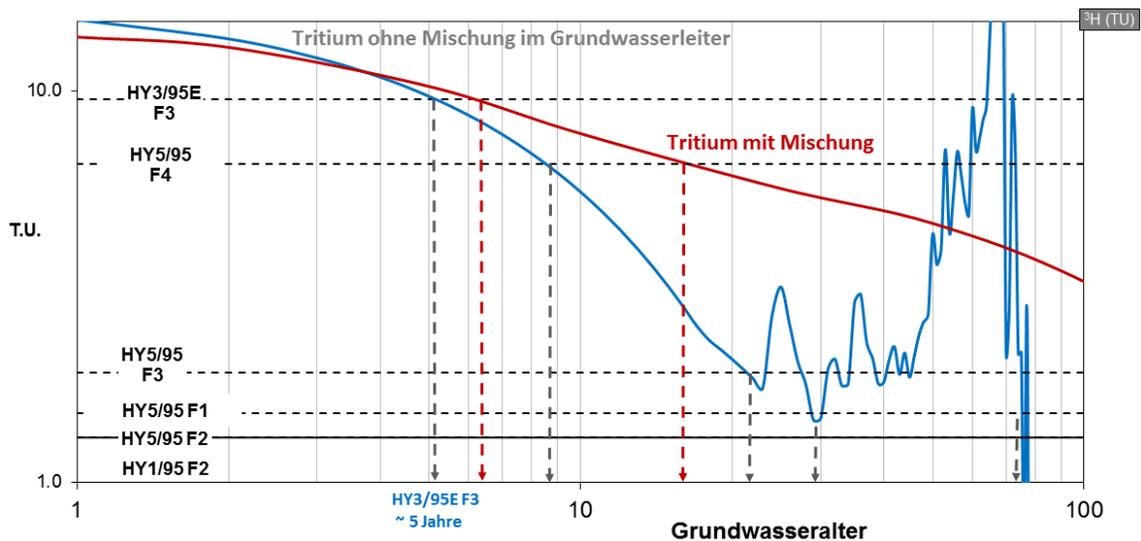


Abbildung 13. Auswertung der Tritiumwerte

Die Altersinformation stellt für das tiefere Stockwerk ein Mindestalter dar; da die Proben hier keinen Nachweis von Tritium zeigen und unter 0.6 T.U. liegen, kann hier sicher von einem mittleren Grundwasseralter > 65 Jahre ausgegangen werden.

5 Zusammenfassung und Schlussfolgerungen

Zusammenfassend können durch die Untersuchung mehrere Aussagen zu einem möglichen Sickerwassereinfluss an der östlichen Landesgrenze im Abstrom der Deponie Ihlenberg getroffen werden:

- Die Grundwasserchemie nach Hauptionen konnte gruppiert und klar unterschiedlichen Stockwerken zugewiesen werden. Dies ist für zukünftige Untersuchungen und Mischungsrechnungen hilfreich. Die Hauptionen zeigen eine Versalzung in den tieferen Stockwerken an.
- Im Untersuchungsgebiet treten teilweise erhöhte Borwerte auf. Diese können auf Deponiesickerwasser hindeuten, sie können jedoch auch durch Versalzung verursacht werden. Borwerte korrelieren mit Chlorid-Konzentrationen und Bromidkonzentrationen, dies kann auf einen Zusammenhang mit natürlicher Versalzung hindeuten, schließt einen Deponiesickerwassereinfluss aber nicht aus.
- H3/95E-F1 zeigt mehrere Auffälligkeiten: Es liegt ein hoher CSB 41 mg/L vor, DOC ist erhöht 7.5 mg/L, Bor liegt mit 2.4 mg/L über dem natürlichen Hintergrund und über dem heutigen Gehalt von Ostseewasser. Ein natürlicher Einfluss von Formationswasser oder von Salzwasser aus tieferen Stockwerken ist nicht auszuschließen. Es fehlt ein Nachweis von Tritium als Nachweis von einem rezenten Deponiesickerwassereinfluss. Dennoch sollte HY3/95E-F1 in Zukunft genauer untersucht werden.
- Es gab keinen Nachweis von Schwermetallen, LHKW, Pestiziden oder PAK in den Messstellen HY1/95, HY3/95E und HY5/95 in den untersuchten Filterstrecken und im Rahmen der untersuchten Parameter.
- Die Altersbestimmung lieferte eine Orientierung zur Altersverteilung des Grundwassers: Die tieferen Stockwerke weisen mittlere Grundwasseralter von mehr als 50 bis 65 Jahren auf, das mittlere Stockwerk von 15 bis 50 Jahren und das obere Stockwerk von weniger als 15 Jahren. Das Alter für das tiefere Stockwerk kann als gesichert gelten. Dennoch sind alle Alter Mischalter und schließen jüngere Komponenten nicht aus.
- Die Untersuchung der stabilen Isotope des Wassers hat keinen Nachweis auf Deponiesickerwasser geliefert. Die Methode bietet jedoch gute Mög-

lichkeiten für ein Monitoring in Zukunft. Dazu sind genaue Werte der Zusammensetzung des Deponiesickerwassers für ^{18}O und 2H erforderlich.

- Die Untersuchung der stabilen Isotope des Kohlenstoffs hat keinen Nachweis auf Deponiesickerwasser geliefert. Die Methode bietet jedoch gute Möglichkeiten für ein Monitoring in Zukunft. Dazu sind genaue Werte der Zusammensetzung des Deponiesickerwassers für ^{13}C erforderlich.
- Tritium ist wegen seiner Eigenschaft sich als Teil des Wassermoleküls mit dessen Geschwindigkeit zu bewegen ein sehr geeigneter Indikator für zukünftige Untersuchungen. Auf Grundlage der bekannten Tritiumwerte in der Deponie können selbst unter Berücksichtigung des radioaktiven Zerfalls beim Transport über 45 Jahre noch Anteile von $> 4\%$ Deponiesickerwasser am Zustrom in die Traverinne nachgewiesen werden.
- Es wird empfohlen, die Messstelle HY3/95E genauer zu untersuchen.
- Es wird empfohlen, bessere Daten über die Zusammensetzung des Sickerwassers hinsichtlich aller Parameter, die für das Monitoring als Indikatoren hilfreich sind, direkt von der Deponie zu erfragen und anzufordern.

Literaturverzeichnis

- BLM (1997). Bestimmung von Filtrationsgeschwindigkeit und Fließrichtung in Pegeln der Deponie Ihlenberg. Ber. Gesell. für bohrlochgeophysikalische und geökologische Messungen mbH, Gotha.
- BLM (1998). Bestimmung von Filtrationsgeschwindigkeit und Fließrichtung in Pegeln der Deponie Ihlenberg. Ber. Gesell. für bohrlochgeophysikalische und geökologische Messungen mbH, Gotha.
- G. Agster, E. Fischer, R. O. K. S. (2014). Endbericht zum Untersuchungsprogramm zur Ermittlung des nutzbaren Grundwasserangebots im Raum Lübeck und Bad Segeberg. Landesamt für Landwirtschaft, Umwelt und ländliche Räume.
- Hammer (2003). Quartäre Sedimente als geologische Barrieren. Handbuch zur Erkundung des Untergrundes von Deponien und Altlasten. Band 9. LUNG, Landesamt für Umwelt, Naturschutz und Geologie des Landes Mecklenburg-Vorpommern.
- Leibundgut, C., Maloszewski, P., and Külls, C. (2009). Tracers in Hydrology. Wiley.
- Vengosh, A., Heumann, K., Juraske, S., and Kasher, R. (1994). Boron isotope application for tracing sources of contamination in groundwater. Environ. Sci. Technol., 28:1968–1974.

Anhang: Analysenergebnisse - Vor Ort Parameter

Anhang: Analysenergebnisse - Wasserchemie

Anhang: Analysenergebnisse - Isotope