



MANAGEMENTPLAN FÜR STUTTGART-FEUERBACH

D.T3.1.3

11 2019

SUMMARY

The project AMIGA has been initiated due a significant contamination of groundwater caused by the long-term and widespread use of contaminants in Central European urban areas. The goal of the project is to develop a strategic transnational management tool to handle groundwater contamination.

The focus of AMIGA is to establish a groundwater management plan for each of the seven AMIGA partner pilot sites, considering technical, financial and legal aspects. The Department for Environmental Protection of the City of Stuttgart has developed a groundwater management plan for the city district Feuerbach.

Introduction

The city district Feuerbach (Fig. Abbildung 1) is historically characterized by many industries and small commercial entities, handling with hazardous substances, which led to severe soil and groundwater contamination generated over the past decades. Thus, since 1983/84, the private responsables and municipality have investigated and remediated sites in Feuerbach that are contaminated with volatile chlorinated hydrocarbons (CHC). CHCs are of particular interest as pollutants, because they are (i) persistent and mobile in the underground, (ii) spread over a large area and (iii) endanger the quality of groundwater i.e. Stuttgart's mineral springs. The integral investigation of CHC contamination in soil and groundwater of Feuerbach has been also previously supported by EU-funded projects MAGIC and FOKS.

The integral groundwater investigations for Feuerbach performed in AMIGA 2017 and 2018 indicated that the reference values (CHC concentration $< 10 \mu\text{g/l}$ and load $< 20 \text{g/d}$) at some sites in Feuerbach could not be fully achieved with reasonable efforts and budget. Still it was unclear whether and how the CHC contamination of Feuerbach affects the regional mineral water aquifer Muschelkalk. Unreached reference values as well as the potential influence on the mineral springs were addressed in the management plan for Stuttgart-Feuerbach. The management plan has (i) summarized the results of the integral investigation, (ii) evaluated remediation effects, (iii) developed an action plan required to ensure the good groundwater status in Stuttgart-Feuerbach and (iv) defined an integral monitoring network for controlling the remediation effect.

Project area

Feuerbach is a city district in Northern part of Stuttgart. The long-term industrial and commercial use have caused considerable soil and groundwater contamination in certain areas. This contamination hinders the necessary conversion of industrial sites into new residential areas.

The geology of Feuerbach is characterized by a multi-layered groundwater aquifer system, which is divided into the (i) Quaternary aquifer, (ii) several Gipskeuper aquifers, (iii) Lower Keuper aquifer and (iv) mineral water aquifer Muschelkalk, see Fig. Abbildung 3.

In the Gipskeuper, four aquifers are distinguished: Mittlerer Gipshorizont (MGH), Dunkelrote Mergel (DRM), Bochsinger Horizont (BH) and Grundgipsschichten/Grenzdolomit (GGs/GD). In the Gipskeuper, the permeability and therefore the groundwater flow are heavily dependent on the lithological structure and the gypsum leaching (subsrosion). A vertical groundwater or mass transfer can occur depending on pressure conditions and along tectonic faults.

Based on described hydrogeological conditions, in the project area Stuttgart-Feuerbach, two major types of areas are distinguished, dependent from the expected influence of contamination in the underground:

- × Working area is the area, where the former and present industry of Feuerbach is allocated. The working area of the pilot Stuttgart-Feuerbach has in total 530 ha and was hydrogeologically delineated in the previous project MAGIC (see Fig. Abbildung 5, blue area). In total there are more than 140 known abandoned industrial sites located in the working area that are suspected and/or confirmed to emit CHCs in the groundwater of shallow aquifers. CHC inputs, which can cause a large-scale groundwater contamination and extend over several aquifers, have been detected at several sites.
- × Functional urban area (FUA) Stuttgart-Feuerbach is the area, which extends beyond the city administrative borders. Contaminated sites with CHC inputs exist both in the city and in the surrounding area. Contaminants that are localized in the city can influence the groundwater quality in the surrounding area and vice versa no matter from the administrative borders. Consequently, groundwater flow and contaminant transport in a large-scale aquifer system have to be considered also at the regional level (FUA). FUA Stuttgart-Feuerbach was delineated based on the groundwater flow in the Muschelkalk aquifer. FUA extends to an area over 4,810 ha (Fig. Abbildung 5, red line).

Working area (blue line), FUA (red line), administrative city border (black line), mineral springs (blue dots) and mineral spring's protection zones are shown in Fig. Abbildung 4.

In order to investigate the groundwater flow and contaminant situation as well as to design an integral monitoring network, three new groundwater wells were drilled, see Fig. Abbildung 2:

- × AMIIGA 1, screened in Bochinger Horizont (BH), 21.3 m deep
- × AMIIGA 2, screened in Muschelkalk (mo), 94 m deep
- × AMIIGA 3, screened in Bochinger Horizont (BH), 21.1 m deep.

Groundwater Flow

Figures Abbildung 4 and Abbildung 5 and the geological build-up (Fig. Abbildung 3) illustrate the complexity of the groundwater flow due to highly structured geological stratigraphy and numerous faults. Due to those hydraulic properties, the aquifers in the project area were divided into two aquifer units that interact with each other:

- × Local shallow aquifers (upper aquifer system) - Quaternary and Gipskeuper were investigated on the local scale of the working area
- × Regional deep aquifers (lower aquifer system) - Lower Keuper and Muschelkalk were investigated on the regional FUA scale.

The characterization of the groundwater flow for the period between 2007 and 2017 was conducted by means of (i) existing hydrogeological model, (ii) measurements of groundwater levels in the new drilled wells, (iii) available groundwater level data between 2008 and 2016 and (iv) extraction rates of the operated wells. Based on these data and information, a hydrogeological and a 3D transient flow numerical models were developed.

The main results can be summarized as follows:

- × The groundwater levels in shallow aquifers are in the falling trend since 2007. The observed drop was explained by (i) the lower groundwater recharge between 2007 and 2017 that was 15 % lower than in the decade before 2007, (ii) numerous withdrawals of groundwater and (iii) Pump & Treat remediation measures. Quaternary and MGH aquifers were completely dry in some areas. This caused a significant change in groundwater flow directions in shallow aquifers.
- × The mean drop of the groundwater level were as follows: Quaternary -3.1 m, MGH -2.7 m, DRM -2.6 m and BH -2.5 m. The major drop of groundwater levels occurred in the BH, where the level drop was more than 8 m in the southwestern part of the working area as compared to the 2007 measurements, see Fig. Abbildung 8.
- × A depression in the southwest of the working area around AMIIGA 1 was detected, which produced an important effect on vertical exchange processes, see Fig. Abbildung 9.
- × The aquifer BH is the major aquifer, with hydraulic conductivities of approximately 10^{-3} m/s, fed mainly by the southwest inflow from the Feuerbach valley. In the model, this water (approximately 14 l/s) flows together with the remaining water via aquifers GGS/GD and Unterkeuper (ku) into the underlying Oberer Muschelkalk (mo), see Figs. Abbildung 10 and Abbildung 11. This implies that the inflow from the working area in the Muschelkalk aquifer is about 10 % of the total Muschelkalk flow.
- × In contrary to the shallow aquifers, groundwater levels in deep aquifers have increased in 2017 compared to the 2007 measurements, see Fig. Abbildung 12. The observed increase of the groundwater levels in deep aquifers had no impact on groundwater flow direction, see Fig. Abbildung 13.
- × The numerical model results indicate that the groundwater in Muschelkalk aquifer originating from the Feuerbach area flows independently of the vertical connection towards the River Neckar.

CHC Contamination

The description of the CHC contamination for 2007 and 2017 was done by means of (i) existing hydrogeological model, (ii) performed groundwater sampling, (iii) available CHC concentration data between 2008 and 2016 from the municipal database and (iv) CHC concentration data gained from new drillings AMIIGA 1-3. Based on these data and information, a 3D transient contaminant transport numerical model was developed.

It was observed that CHCs affect significantly the groundwater quality of shallow aquifers (Quaternary and Gipskeuper aquifers). Due to their mobility, the dominant components of CHC are the tetrachloroethene (PCE) and trichloroethene (TCE). At some locations the degradation products dichloroethene (DCE) and vinyl chloride (VC) occur. For the numerical transport modeling of CHC, the transport of all chloroethene were simulated based on stoichiometric rations, as PCE equivalents.

The main results are:

- × The realized remediation measures at relevant contaminated sites were successful. Since 2007, there has been a significant decline in CHC emissions by more than 60 %.
- × 75 % of the still emitted CHC loads were taken from the groundwater system through ongoing remediation measures at the main contaminated sites. Therefore, maintaining these

measures is of great importance for improvement of groundwater quality. Accordingly, 25 % of the emitted CHC loads reach the groundwater and via geological faults can percolate in the deeper aquifers.

- × In addition to applied groundwater remediation measures, a natural degradation and attenuation play a role in a degradation process. Both aerobic and anaerobic degradation processes are taking place in the working area. As a result, only 20 % of the emitted CHC loads that have reached the groundwater are flowing downstream.
- × The PCE equivalent concentrations in the shallow aquifers decreased significantly with depth below the ground (from 100 to 1000 µg/l in DRM, from 10 to 100 µg/l generally in BH), see Figs. Abbildung 17 and Abbildung 18. In case of deeper Muschelkalk aquifer, the groundwater model simulated a PCE equivalent plume, which spread from Feuerbach towards the river of Neckar. The maximal simulated concentrations for 2017 were 2 to 3 µg/l, see Fig. Abbildung 25.
- × There was a significant decrease in the CHC pollution from 2007 to 2017, i.e. the CHC concentrations in 2017 were significantly lower than in 2007, see Figs. Abbildung 20, Abbildung 21 and Table Tabelle 11.
- × Based on the results of the new drilled well AMIIGA 1, it was concluded that there are unknown contaminated sites, which emit a significant PCE contamination reaching Bochniger Horizont.
- × In the well AMIIGA 2, traces of CHC were found (mostly TCE). During an integral pumping test (IPT), the PCE concentration increased to 2.4 µg/l. By evaluating the IPT results, a maximum of PCE concentrations up to approx. 12 µg/l could be calculated under certain conditions in the center of an assumed plume.
- × The results of the integral investigation showed that the vertical CHC migration within shallow aquifers occurs. If CHC contaminations reach BH, there is a high probability that the contamination percolate into the deep aquifers. Approximately 4 g/d of CHCs are percolating from BH and GGS/GD into the Muschelkalk. Therefore, CHC contamination in the working area endangers the groundwater quality of the deep aquifers and Muschelkalk. Nevertheless, the groundwater quality of Muschelkalk is good due to ongoing remediation measures, natural attenuation and dilution by 10 time thicker aquifer.

Goals of the Management Plan

The reference values for groundwater quality are defined in existing regulations. In Germany, legal regulations are primarily included in the Federal Soil Protection and Contamination Ordinance (BBodSchV) that is valid from 12.06.1999. The legal document “Grundwasserverordnung” fully corresponds to the EU Groundwater Directive from 2006. According to these documents a reference value of 10 µg/l for CHC (PCE+TCE) and a maximal CHC load of 20 g/d have been established downstream of contaminated sites (quality targets).

The regulations can be used to derive general quality targets for groundwater:

- × Priority 1: Reduction of contamination inputs from the Gipskeuper into the Muschelkalk up to 10 µg/l.

- × Priority 2: Reduction of the CHC load in the Quaternary and Gipskeuper aquifers outside contaminant sites, so that CHC concentration of 10 µg/l is not exceeded. This requirement should be applied to the main aquifer BH.
- × Priority 3: Reduction of emissions from contaminated sites to achieve the quality targets (CHC concentration <10 µg/l and CHC load <20 g/d downstream of a contaminated site).

Contaminated sites with direct influence on Muschelkalk aquifer have therefore a higher priority than sites, where CHC concentrations have only a local impact on the Quaternary and Gipskeuper aquifers.

Achievement of quality goals should be monitored by suitable "integral monitoring network" (IMN), which was defined for Stuttgart-Feuerbach.

Based on practical experience, in many cases it was not possible to reach the quality target value for CHC concentration with reasonable efforts and costs (principle of proportionality). Even 100 µg/l could often not be reached. Therefore, it is necessary to adjust and redefine a realistic and achievable target values for CHC. This could be defined based on the maximum allowed load of 20 g/d, e.g. the remediation goal was to reach 10 % of required CHC load, i.e., 2 g/d, by taking into account the principle of proportionality.

Taking into account the threat to the Muschelkalk through vertical connections of aquifers and the low observed CHC concentrations in Muschelkalk, the management plan for Stuttgart-Feuerbach primarily considered the areas, in which CHC concentration of 100 µg/l are exceeded. Firstly, it has to be achieved that no CHC concentrations higher than 10 µg/l occur in the Muschelkalk. A good groundwater status shall be ensured, if also in the Bochinger Horizont CHC concentrations of 10 µg/l are not exceeded.

Discussion

The integral investigation for 2017 proved that the remediation measures taken so far were absolutely necessary. They are still effective and necessary in order to prevent vertical percolation of CHCs to the lower aquifer system.

The reduced groundwater recharge in the upper aquifer system, which can also be considered as a consequence of climate change, has a negative effect on the groundwater balance in the Feuerbach work area. Therefore, realized Pump & Treat measures have reached their limits. A further increase of a withdrawal is only possible and reasonable to a limited extent.

The integral investigation also showed that there are still undetected pollutant sources in some areas of Feuerbach, which in some groundwater monitoring wells lead to an increase of CHC concentration compared to 2007. In these cases, investigation and possibly remediation measures are needed. Furthermore, the development of an integral monitoring network (IMN) in the Bochinger Horizont, as the main aquifer of the upper system, is technically and economically reasonable solution.

Table Tabelle 11 and Fig. Abbildung 28 show groundwater wells in Quaternary, MGH and DRM with concentrations above 100 µg/l as well as groundwater wells in Bochinger Horizont and GGS/GD above 10 µg/l. Table 11 also shows whether a decrease or an increase in concentration in these wells occurred, compared to 2007. Based on this information, investigation and/or remediation measures are defined for these areas. High concentrations in combination with an increase in CHC concentrations indicated an urgent need and high priority for action.



In order to define the need for action, three levels of consideration are distinguished:

1. Upper shallow aquifers (Quaternary, MGH, DRM)

These are mainly fed by groundwater recharge, almost no lateral CHC inflows. Locally high CHC concentrations reach the underlying BH. High concentrations of CHC show that the remediation measures have not completely prevented percolation into deeper aquifers.

There is a need for action in three areas: (i) wells P 954 and FB 6, (ii) well B 907 and (iii) well B 1. The location and CHC concentrations are shown in Table Tabelle 11 and Fig. Abbildung 28.

2. Middle aquifers (Bochinger Horizont and Grundgipsschichten/Grenzdolomit)

CHCs that are not removed by remediation measures in the overlying aquifers are gathered in the Bochinger Horizont, as the main aquifer of the upper aquifer system.

Due to a high PCE concentration of 210 µg/l in the well AMIIGA 1, there is an urgent need for investigation in this area. The contamination in BH is caused by an unknown pollutant source upstream of AMIIGA 1, which has to be investigated and remediated. Furthermore, the results of the numerical modelling showed that a vertical percolation of pollutants is possible in this area up to Muschelkalk (see Fig. Abbildung 29). Since, hydraulic remediation in the BH and GGS/GD is not very efficient, remediation is needed in upper layers. In BH, the integral monitoring is appropriate measure.

3. Lower deep aquifers (Unterkeuper, Muschelkalk)

The results of the numerical flow model showed that BH and GGS/GD aquifers are at least locally connected to the Muschelkalk and that a vertical percolation of CHC contaminants is possible.

Despite this vertical migration, the investigations carried out in the Mueschelkalk showed no evidence of significant CHC inputs from the working area Feuerbach. This was confirmed by CHC measurements in the downstream groundwater well, also in AMIIGA 2.

Therefore, there are no indications of any conflicts with the general quality goals and priority 1 (maximum CHC concentration of 10 µg/l) in Feuerbach. The CHC inputs at AMIIGA 1 are of local relevance and do not affect the quality of the water in the FUA.

Action Plan for Stuttgart-Feuerbach

The action plan summarizes all necessary measures, see also Annex 1. Those measures have the following development targets:

1. Reduction of CHC inputs in the shallow aquifers by (1.1) continuation of the ongoing remediation measures, (1.2) optimization of the danger prevention in the area of the well B 111, (1.3) investigation measures at four areas (P 954 and FB 6, P 907, B 1 and AMIIGA 1) and (1.4) detailed investigation and remediation of identified sources.



2. Integral monitoring of groundwater quantity and quality by (2.1) integral monitoring of upper aquifer system in 8 wells of Bochinger Horizont - yearly water level measurements and sampling, see Fig. Abbildung 31 and (2.2) monitoring in Muschelkalk - yearly collection of data, since other institutions perform the measurements and sampling.

3. Ensuring the implementation of the necessary measures. The results will be summarized and evaluated in reports approximately each 5 years.











The detailed Action Plan with development targets, measures, responsibilities, timetables and additional remarks is given in Annex 1 “Action Plan for Stuttgart-Feuerbach”.

Implementation

The additional costs of the necessary measures for the municipality are calculated for 20 years (from 2021 to 2040). Costs of the Measure 1.3 are approximately 750,000 €, costs of the Measure 2.1 area approximately 240,000 €. Therefore, the total costs of the municipality for 20 years are estimated to approximately 1,000,000 €.

Legend:  Action  Report

Timetable:

#	Action / Phase of action	2020	2021	2022	2023	2024	2025	2026	2027	2028	2029	2030	2031	2032	2033	2034	2035	2036	2037	2038	2039	2040			
1.1	Continuation of ongoing remediation measures																								
1.2	Optimization of danger prevention at the well B111																								
1.3	Investigation of 4 areas																								
1.4	Detailed investigation and remediation of identified sources																								
2.1	Integral monitoring of upper aquifer system																								
2.2	Monitoring of Oberer Muschelkalk																								
3	Reporting for ensuring the implementation of the necessary measures																								

Inhaltsverzeichnis

1. EINLEITUNG	11
1.1. Projektgebiete	12
1.1.1. Strukturdaten	12
1.1.2. Geologie und Hydrogeologie	13
1.1.3. Arbeitsgebiet	16
1.1.4. Stadt-Umland-Gebiet (FUA)	16
1.2. Betrachtungszeitraum	18
1.3. Neue Grundwassermessstellen AMIIGA 1 bis AMIIGA 3	18
2. GRUNDWASSERSTRÖMUNG UND GRUNDWASSERDYNAMIK	19
2.1. Grundwasserströmung und Grundwasserdynamik im Arbeitsgebiet	19
2.2. Grundwasserströmung und Grundwasserdynamik im Stadt-Umland-Gebiet (FUA)	26
3. LCKW-SITUATION	30
3.1. LCKW-Situation im Arbeitsgebiet	31
3.1.1. LCKW-Konzentrationen	31
3.1.2. LCKW-Austragsraten	35
3.1.3. Emittierte LCKW-Frachten	36
3.1.4. Modellierung der LCKW-Konzentrationen	38
3.2. LCKW-Situation im FUA	45
3.3. Mikrobiologischer LCKW-Abbau	49
4. QUALITÄTSZIELE	51
4.1. Allgemeine Qualitätsziele	52
4.2. Erreichbare Ziele	52
4.2.1. Praktische Erfahrungen	52
4.2.2. Zieldefinition für den Maßnahmenplan	53
5. SCHLUSSFOLGERUNGEN	53
5.1. Obere Aquifere (Quartär, Mittlerer Gipshorizont und Dunkelrote Mergel)	57
5.2. Mittlere Aquifere (Bochinger Horizont und Grundgipsschichten/Grenzdolomit)	58
5.3. Unteres Aquifersystem (Unterkeuper, Oberer Muschelkalk)	60
6. MAßNAHMENPLAN FÜR STUTTGART-FEUERBACH	60
6.1. Minimierung der LCKW-Einträge in die obersten Aquifere	61
6.1.1. Weiterführung laufender Sanierungsmaßnahmen	61

6.1.2. Optimierung der Gefahrenabwehr	61
6.1.3. Gefahrerforschung für vier Bereiche	61
6.2. Integrales Monitoring von Grundwasserdargebot und Grundwasserqualität	62
6.2.1. Integrales Monitoring im Oberen Aquifersystem.....	62
6.2.2. Monitoring Oberer Muschelkalk	63
6.3. Berichtswesen zur Sicherung der Durchführung erforderlicher Maßnahmen.....	63
7. UMSETZUNG	63
8. LITERATUR	65

1. Einleitung

Die Wasserrechtsbehörde der Landeshauptstadt Stuttgart begleitet seit 1983/84 die Untersuchung und Sanierung von Standorten, die mit leichtflüchtigen chlorierten Kohlenwasserstoffen (LCKW) kontaminiert oder kontaminationsverdächtig sind. LCKW sind als Schadstoff von besonderem Interesse, da sie sich aufgrund ihrer Persistenz und Mobilität in der Umwelt großflächig ausbreiten. Durch die Verlagerung in tiefere Grundwasserleiter sind auch die dem Oberen Muschelkalk entspringenden Stuttgarter Mineral- und Heilquellen bedroht. Bei Nachweis einer Verunreinigung des Untergrundes erfolgen Untersuchungs- und Sanierungsmaßnahmen durch die Verursacher oder Grundstückseigentümer, in manchen Fällen, z.B. bei städtischer Verantwortung oder bei Grundwasserkontaminationen im öffentlichen Raum, führen das Amt für Umweltschutz und das Tiefbauamt erforderliche Maßnahmen selbst durch.

Im Laufe der Zeit verbesserte sich der Untersuchungs- und Kenntnisstand an vielen Standorten im Stadtgebiet. Aufgrund der Beschränkung von Maßnahmen auf die Eintragsstellen der LCKW und auf wenige, eher zufällig entdeckte Grundwasserkontaminationen im öffentlichen Raum, aber auch aufgrund der komplexen hydrogeologischen Situation konnte jedoch bis in die 1990er Jahre hinein kein umfassendes Bild der standortübergreifenden LCKW-Verteilung im Grundwasser gewonnen werden. Deshalb hat das Amt für Umweltschutz im Jahre 1999 begonnen, integrale Grundwasseruntersuchungen durchzuführen. Mit dem INTERREG IIIB CADSES Projekt MAGIC (MANagement of Groundwater in Industrial Contaminated areas, 2005-2008) bekam die Stadtverwaltung die Möglichkeit, das Grundwasser im stark von industrieller und gewerblicher Nutzung geprägten Teil des Stadtbezirks Feuerbach (0,53 km²) integral zu untersuchen. Erstmals konnten im Untersuchungsraum laterale Schadstofftransportpfade identifiziert und das Stoffverhalten beschrieben werden. Die Untersuchungsergebnisse haben bestätigt, dass es nur mit Hilfe integraler Ansätze möglich ist, die wesentlichen Schadstoffbahnen in dem Untersuchungsgebiet und ihre jeweiligen Quellen zu erkennen.

In dem INTERREG IVB CENTAL EUROPE Projekt FOKS (FOcus on Key Sources of environmental risks, 2009-2013) wurden im MAGIC-Untersuchungsgebiet Zusammenhänge zwischen Schadensherden und Schadstoffbahnen im Grundwasser hergestellt und LCKW-Transporte quantitativ beschrieben. Dabei konnten Haupteintragsstellen der LCKW identifiziert und Prioritäten für die Schadensherdsanierung in Feuerbach ermittelt werden.

Im LIFE+ 2008 Projekt MAGPlan (Management-Plan zur Sicherstellung eines guten chemischen Grundwasserzustandes durch Vermeidung von Schadstoffeinträgen aus Altlasten, 2010-2015) wurde das Konzept der „integralen Altlastenbearbeitung“ erstmals bei einem Stadtgebiet von rund 20 km² Grundfläche angewendet. Das Projekt konzentrierte sich auf eine raum-zeitliche Analyse der LCKW-Ausbreitung in der Stuttgarter Innenstadt (im Nesenbachtal) und die dabei ablaufenden Abbau- und Umbauprozesse zwischen den Eintragsstellen und dem Rezeptor Mineral- und Heilquellen. Dabei wurde erstmals ein „Grundwassermanagementplan“ entwickelt, der die Ergebnisse der integralen Grundwasser- und Altlastenuntersuchung und die zur Sicherstellung des guten Grundwasserzustandes in Stuttgart notwendigen Maßnahmen zusammenfasst.

Seit 35 Jahren werden LCKW-Verunreinigungen im Boden und Grundwasser, auch unterstützt durch EU-geförderte Projekte, in Feuerbach systematisch untersucht und saniert. Die Bewertung erfolgt mit Hilfe der in Baden-Württemberg für LCKW geltenden Mindestanforderungen für die Grundwassersanierung. Danach ist, dem Grundsatz der „Verhältnismäßigkeit der Mittel“ entsprechend, eine Abstromkonzentration kleiner als 10 µg/l und eine Abstromfracht kleiner als 20 g/d einzuhalten.

Die jüngsten, im Rahmen des AMIIGA-Projektes in den Jahren 2017 und 2018 durchgeführten Grundwasseruntersuchungen zeigen, dass die Mindestanforderungen an einigen Standorten in Feuerbach immer noch nicht vollständig eingehalten werden.

Angesichts dieser Ausgangslage soll mit Hilfe einer integralen Untersuchung geklärt werden, ob die Standort-Sanierungen und natürliche Abbauprozesse zu einer nachhaltigen Verbesserung der Grundwasserqualität im Abstrom der Schadensherde geführt haben oder sich ein entsprechender Erfolg abzeichnet. Außerdem ist zu klären, ob und wie sich die Schadstoffe von Feuerbach auf das regionale Untere Aquifersystem mit dem Oberen Muschelkalks als regionalbedeutsamen Aquifer auswirken.

Erklärtes Ziel der integralen Untersuchung ist es, ein integrales Monitoring-Messnetz zur künftigen Kontrolle des Sanierungserfolgs und der LCKW-Konzentrationsentwicklungen zu erarbeiten und einen Maßnahmenplan für Feuerbach zu entwickeln.

1.1. Projektgebiete

1.1.1. Strukturdaten

Die dicht besiedelte Region Stuttgart erstreckt sich auf einer Fläche von 3.654 km². Hier wird bei einer Einwohnerzahl von 2,7 Millionen Menschen ein Bruttoinlandsprodukt von rund 124 Milliarden Euro, vergleichbar mit dem Ungarns, erwirtschaftet. In Stuttgart, der Landeshauptstadt von Baden-Württemberg und dem Zentrum der Region, leben rund 612.000 Einwohner (Stand 31.08.2018) auf einer Fläche von 207 km², die zu über 50 % aus Siedlungsflächen besteht.



Abbildung 1 Stadtbezirk Feuerbach, Blick vom Zentrum nach Westen (Landeshauptstadt Stuttgart 2016).

Feuerbach ist ein Stadtbezirk im Norden Stuttgarts, gekennzeichnet von einer hohen Konzentration an Industrie- und Gewerbestandorten. Auf jeden der 29.000 Einwohner kommen rund 1,3 Beschäftigte. Global Player wie auch kleine Betriebe trugen und tragen zur wirtschaftlichen Stärke bei. Viele Produktionsstandorte haben eine lange und oft abwechslungsreiche Nutzungsgeschichte. Insbesondere kleinere Betriebe haben jedoch seit den 1980er Jahren die Produktion verlagert oder beendet und sind heute als Altstandorte verzeichnet. Die langjährige industrielle und gewerbliche Nutzung hat bereichsweise erhebliche Boden- und Grundwasserverunreinigungen verursacht. Die Verunreinigungen erschweren die notwendige Umwandlung von Industrie- und Gewerbebrachen in neue Wohngebiete.

Im Jahre 2018 ist nur noch der östliche Teil des Stadtbezirks Feuerbach stark industriell und gewerblich geprägt. Der westliche Teil von Feuerbach (Abbildung 1) mit dem Zentrum des Stadtbezirks ist dicht bevölkert. Im westlichen Umfeld des Bahnhofs Feuerbach (dem ehemaligen Gewerbegebiet Feuerbach West) hat eine Umwandlung gewerblicher Flächen in Wohnflächen stattgefunden. In Teilbereichen findet diese Entwicklung auch im Jahr 2018 noch statt.

1.1.2. Geologie und Hydrogeologie

Die Basis der im AMIIGA-Projekt untersuchten Schichtenfolge (Abbildung 3) bildet der etwa 80 m mächtige Obere Muschelkalk. Dieser wird dominiert von einer Abfolge von mikritischen Blaukalken und bioklastischen Schalenrümmerbänken, denen untergeordnet Tonmergelsteine im Wechsel mit Kalksteinbänken zwischengeschaltet sind.

Darüber steht der etwa 20 m mächtige Unterkeuper an, der aus einer Wechselfolge von Dolomitstein und Tonstein besteht. Das oberste Schichtglied des Unterkeupers, der Grenzdolomit (GD), wird hydrogeologisch mit den Grundgipsschichten (GGs) des Gipskeupers zu einer Einheit zusammengefasst (GGs/GD).

Es folgt der bis zu 110 m mächtige Gipskeuper, der sich aus Tonsteinen mit einzelnen karbonatischen, zumeist dolomitischen Bänken sowie aus Sulfatgesteinen (Gips und Anhydrit) zusammensetzt. Die Formationsunterglieder des Gipskeupers sind

- × die bis zu 22 m mächtigen Grundgipsschichten (GGs) mit einem Sulfatgesteinsanteil (un- ausgelaut) bis zu 80 %; im ausgelauten Zustand sind sie nur 9 m mächtig,
- × die 5 m mächtigen Tonsteine des Bochinger Horizonts (BH), welche eine bis zu 15 cm dicke Dolomitsteinbank (die sog. Bochinger Bank) einschließen,
- × die bis zu 18 m mächtigen, rötlichbraunen bis violetten Tonsteine der Dunkelroten Mergel (DRM),
- × die bis zu 38 m mächtigen Tonsteine des Mittleren Gipshorizonts (MGH), in die im un- bzw. teilausgelauten Zustand Sulfatgesteine in dünnen Bänken und Knollen eingelagert sind.

Im oberen Hangbereich um das Feuerbacher Tal schließt der Gipskeuper mit den Estherienschichten ab. Auf den Kuppen lagern noch Erosionsreste aus Schilfsandstein und stratigraphisch höheren Schichtgliedern.

In Abhängigkeit von Schichtlagerung und Bruchtektonik ist die genannte Schichtenfolge im Projektgebiet gebietsweise bis auf den basalen Gipskeuper oder Unterkeuper abgetragen, entlang von Tälern sogar bis in den Oberen Muschelkalk. Dies ist im Westteil des Projektgebiets längs der Glems und deren Nebengewässern der Fall sowie im Nordosten im Unterlauf des Feuerbachs. Letzterer liegt bereits auf der Hochscholle des sogenannten Fildergrabens, dessen Ostrandverwerfung in NW-

SE-Richtung von Zuffenhausen über Feuerbach nach Bad Cannstatt die Schichtenfolge um 60 bis mehr als 100 m vertikal versetzt. Zahlreiche Verwerfungen mit kleinem Sprungbetrag durchziehen parallel oder quer zur Fildergraben-Ostrandverwerfung das Projektgebiet.

Die Festgesteine werden von quartärzeitlichen Bildungen überdeckt: an den Hängen von Hanglehm und -schutt, in der Talniederung von Ablagerungen des Feuerbachs (Bach-, Wanderschutt, Auenlehm und Sumpfton).

Die Hydrogeologie des Projektgebiets ist geprägt durch ein mehrschichtiges Grundwasserleitersystem, das sich in das Quartär der Talniederung, den Gipskeuper (mit Teilstockwerken) sowie - ab einer Tiefe von rund 50 Metern unter Gelände - in den Unterkeuper und den Oberen Muschelkalk gliedert. Innerhalb des Gipskeupers werden - sofern nicht bereits abgetragen - zusätzlich noch vier Horizonte hydrogeologisch unterschieden (von oben nach unten): Mittlerer Gipshorizont (MGH), Dunkelrote Mergel (DRM), Bochinger Horizont (BH) und Grundgipsschichten/Grenzdolomit (GGS/GD). Das unterste Schichtglied GGS/GD nimmt eine Sonderstellung ein, da der Grenzdolomit stratigraphisch dem Unterkeuper, hydraulisch jedoch den Grundgipsschichten zugeordnet wird (Spitzberg und Ufrecht 2008).

Die Grundwasserströmungsverhältnisse in Feuerbach sind aufgrund des differenzierten, stark gegliederten geologischen Schichtenaufbaus und zahlreicher Verwerfungen sehr komplex (siehe Abbildung 3). Im Gipskeuper ist die Durchlässigkeit und damit die Grundwasserleitung stark vom lithologischen Aufbau (geklüftete Dolomitsteinbänke) und der Gipsauslaugung (Subrosion) abhängig (Ufrecht 2017). Die Gipsauslaugung ist heute nur noch im Kernbereich des Projektgebiets aktiv, nämlich im Stadtgebiet Feuerbach längs der Hangbereiche und im Umfeld des Wiener Platzes (Ufrecht 2019). Sofern der Gips in allen Teilstockwerken des Gipskeupers ausgelaugt ist, entstehen Vertikalverbindungen (sog. hydraulische Fenster) zum Unterkeuper und Oberen Muschelkalk. An solchen hydraulischen Fenstern kann es, abhängig von Druckverhältnissen, zu einem vertikalen Grundwasser- bzw. Stoffaustausch kommen, erkennbar in einer Aufkonzentrierung des Grundwassers im Unterkeuper und Oberen Muschelkalk mit gelöstem Sulfat. Derartige Prozesse sind entlang tektonischer Störungen (Verwerfungen) verstärkt möglich.

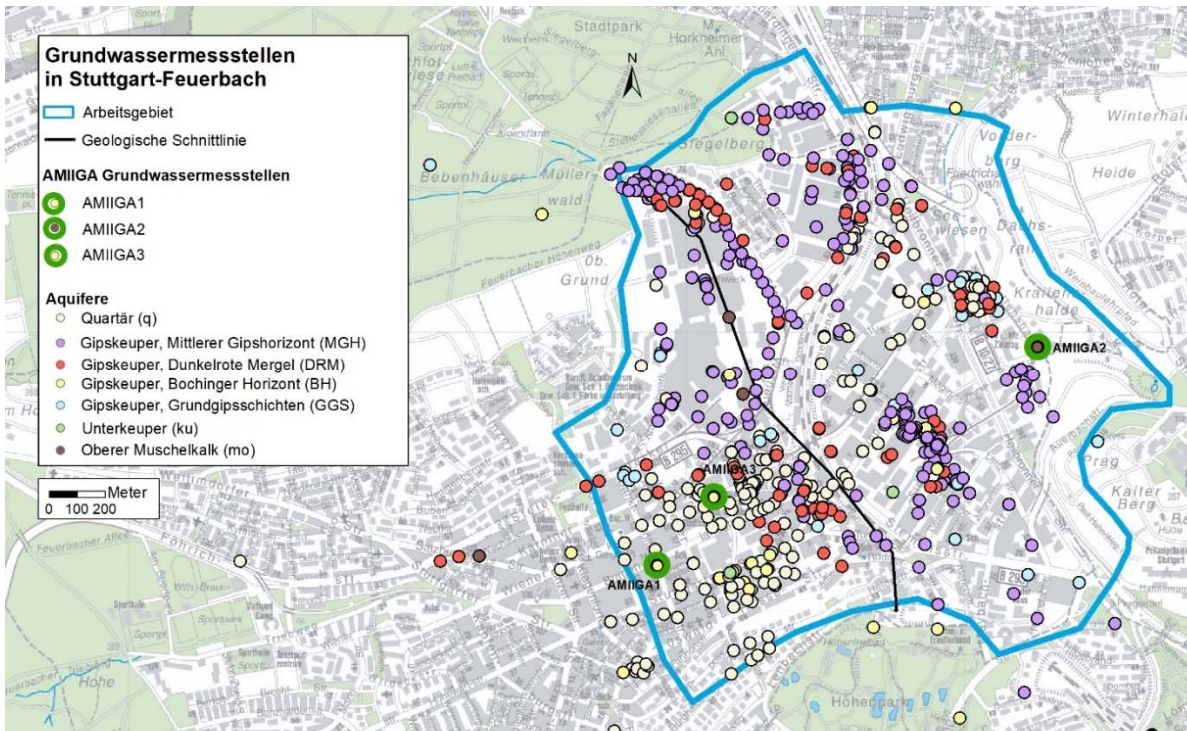


Abbildung 2 Stadtbezirk und Arbeitsgebiet Feuerbach mit Lage der 682 stockwerksspezifisch ausgebauten Grundwassermessstellen (7 Aquifere) mit der Schnittlinie des Geologischen Schnitts (Landeshauptstadt Stuttgart 2017).

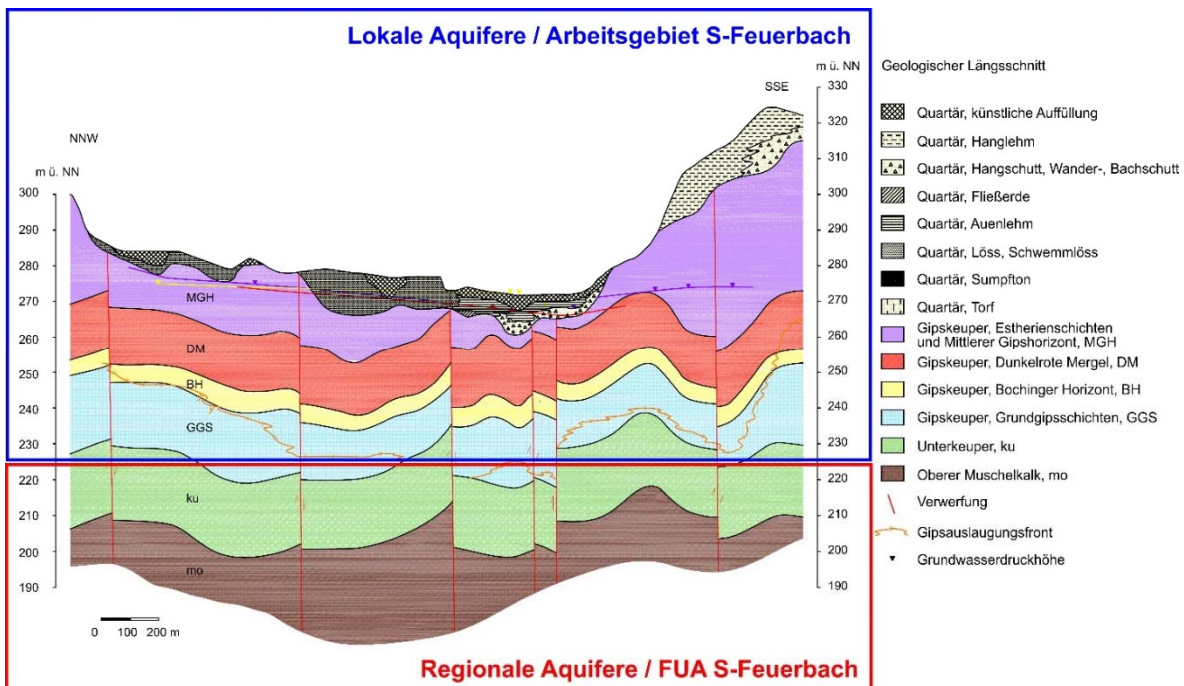


Abbildung 3 Geologischer Schnitt durch das Arbeitsgebiet Feuerbach mit oberem (lokalem) und unterem (regionalem) Aquifersystemen. Schwarze Linien: Brunnen. Rot: Verwerfungen. Orange gestrichelt: Gipsauslaugungsfront. Der Pfeil deutet vertikale Austauschvorgänge in beide Richtungen an. Abkürzung der Schichten siehe Abbildung 2. (Landeshauptstadt Stuttgart 2009/2017).

Aufgrund der hydraulischen Eigenschaften lassen sich die Grundwasserleiter im Projektgebiet in zwei Aquifereinheiten zusammenfassen:

- × Lokale Aquifere (Oberes Aquifersystem): Quartär (nicht flächig) und Teilstockwerke des Gipskeupers,
- × Regionale Aquifere (Unteres Aquifersystem): Unterkeuper und Oberer Muschelkalk.

Die integrale Untersuchung seit 2005 hat in Verbindung mit der Entwicklung konzeptioneller und numerischer Modelle dazu beigetragen, die komplexe Situation besser verstehen und die hydraulischen Verhältnisse zutreffender beurteilen zu können. Zwischenzeitlich liefern 682 Grundwasser-Aufschlüsse, die im städtischen Informationssystem BOISS archiviert sind, stockwerkspezifische Daten, die bis zu sieben unterschiedlichen Aquiferen zuzuordnen sind (siehe Abbildung 2).

1.1.3. Arbeitsgebiet

Das AMIIGA-Arbeitsgebiet (siehe Abbildung 2 und Abbildung 4) umfasst die Gewerbegebiete Feuerbach-West und Feuerbach-Ost. Die Grenzen des Arbeitsgebietes wurden im Projekt MAGIC hydrogeologisch begründet. Das Arbeitsgebiet ist randlich anhand des oberirdischen Einzugsgebiets des Gewässers Feuerbach abgegrenzt. Der Feuerbach durchfließt das Projektgebiet von Südwesten nach Nordosten bzw. nach Norden. Die Gemarkungsgrenze zu Zuffenhausen in der rund 500 Meter breiten Talniederung des Feuerbachs - etwa in Höhe der Fildergraben-Ostrandverwerfung - wurde als nordöstliche Arbeitsgebietsgrenze gewählt. Der westliche Rand des ehemaligen Gewerbegebietes Feuerbach-West bildet die Grenze des westlichen Zustroms. Somit umschließt das Arbeitsgebiet eine Fläche von rund 530 ha (Landeshauptstadt Stuttgart 2009). Auf dieser Fläche sind über 400 meist aufgegebene Industrie- und Gewerbebestände als kontaminationsverdächtige oder kontaminierte Standorte verzeichnet. Bei rund 140 Standorten besteht der Verdacht auf den Einsatz leichtflüchtiger chlorierter Kohlenwasserstoffe (LCKW), sie sind potentielle Gefahrenherde hinsichtlich einer Grundwasserverunreinigung. Bei mehreren Standorten wurden LCKW-Einträge nachgewiesen, die großflächige Grundwasserverunreinigungen verursachen und sich über mehrere Grundwasserstockwerke in die Tiefe erstrecken können. Bei der Umwandlung von Gewerbeflächen konnten die LCKW-Verunreinigungen in vielen Fällen nicht vollständig beseitigt werden.

1.1.4. Stadt-Umland-Gebiet (FUA)

Im INTERREG-Programm CENTRAL EUROPE 2020 wird unter „functional urban area - FUA“ eine funktionale ökonomische Einheit verstanden, bestehend aus einem dicht bevölkerten urbanen Zentrum (hier: dem Arbeitsgebiet) und seinem Umland. In diesem Bericht wird diese Einheit als „Stadt-Umland-Gebiet (FUA)“ bezeichnet.

Standorte mit Schadstoffeinträgen existieren sowohl in der Stadt wie auch im Umland. Großflächige Verunreinigungen, die in der Stadt lokalisiert werden, können die Grundwasserqualität im Umland beeinflussen und umgekehrt. Denn Grundwasserverunreinigungen verlagern sich auch über Verwaltungsgrenzen hinweg. Aus diesem Grund müssen Grundwasserströmung und Schadstofftransport in großflächigen Aquifersystemen und bei persistenten Schadstoffen auch auf regionaler Ebene betrachtet werden.

In Stuttgart-Feuerbach erfolgt die Beurteilung der Fließverhältnisse und der Qualität des Grundwassers im Stadt-Umland-Gebiet (FUA) daher für das Untere Aquifersystem, insbesondere den Oberen Muschelkalk.

Das Stadt-Umland-Gebiet (FUA) wird durch fachspezifische Merkmale definiert, im vorliegenden Fall anhand des Strömungsregimes des Oberen Muschelkalks. Dabei wurde auf die großräumigen hydrogeologischen Erkenntnisse zurückgegriffen, die bei der Ausweisung des Stuttgarter Quellenschutzgebiets und im Rahmen des LIFE-Projekts MAGPlan (Kirchholtes und Ufrecht 2015) gewonnen wurden.

Abbildung 4 zeigt die Lage des Stadt-Umland-Gebiets (FUA) im Stuttgarter Quellenschutzgebiet. In Abbildung 5 sind die Abgrenzungskriterien des Stadt-Umland-Gebiets (FUA) zu erkennen: Die Grundwassergleichen im Oberen Muschelkalk, die zur FUA-Abgrenzung dienten, sind das Ergebnis der Fortführung der hydrogeologischen Modellierung für das regionale Grundwassersystem im Oberen Muschelkalk (aufbauend auf Ufrecht 1996). Es wird deutlich, dass die Grundwasserströmung im Oberen Muschelkalk großräumig von Westen nach Osten gerichtet ist, d.h. das Grundwasser fließt von Ditzingen und Gerlingen im Landkreis Ludwigsburg über die Stuttgarter Stadtbezirke Weilimdorf, Feuerbach, Zuffenhausen, Münster und Mühlhausen zum Neckar, der in seiner Funktion als Vorfluter das Grundwasser aus dem Oberen Muschelkalk aufnimmt. Die FUA-Gebietsgrenzen werden seitlich über Randstromlinien definiert. Oberstromig wurde die Grundwassergleiche von 280 m ü NN gewählt, unterstromig bildet der Neckar den Vorfluter. Somit erstreckt sich das Stadt-Umland-Gebiet Feuerbach (FUA) über 4.810 ha (bzw. 48,2 km²).

Die Lagepläne (Abbildung 4 und Abbildung 5) und der geologische Schnitt durch das Arbeitsgebiet (Abbildung 3) verdeutlichen die Zusammenhänge: Während die Fließ- und Transportverhältnisse in den oberflächennahen Aquiferen des Quartärs und des Gipskeupers im lokalen Maßstab des Arbeitsgebietes erfasst werden können, erfordert die Untersuchung der tieferen Aquifere (Unterkeuper und Oberer Muschelkalk eine regionale Betrachtung im Stadt-Umland-Gebiet (FUA). Zur plausiblen Beschreibung der hydrogeologischen und chemischen Situation und zur Erarbeitung eines wirtschaftlichen und effektiven Managementplans ist die Betrachtung dieser beiden Ebenen sowie deren hydraulische Interaktion erforderlich.

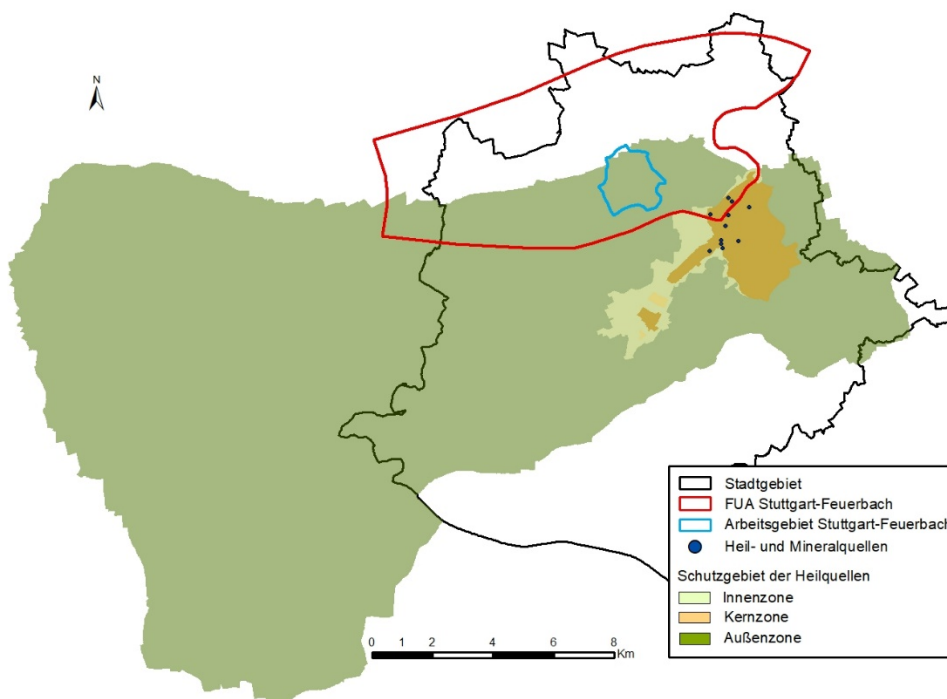


Abbildung 4 Projektgebiete (Arbeitsgebiet und Stadt-Umland-Gebiet (FUA)) mit Quellenschutzgebiet (eigene Darstellung 2018).

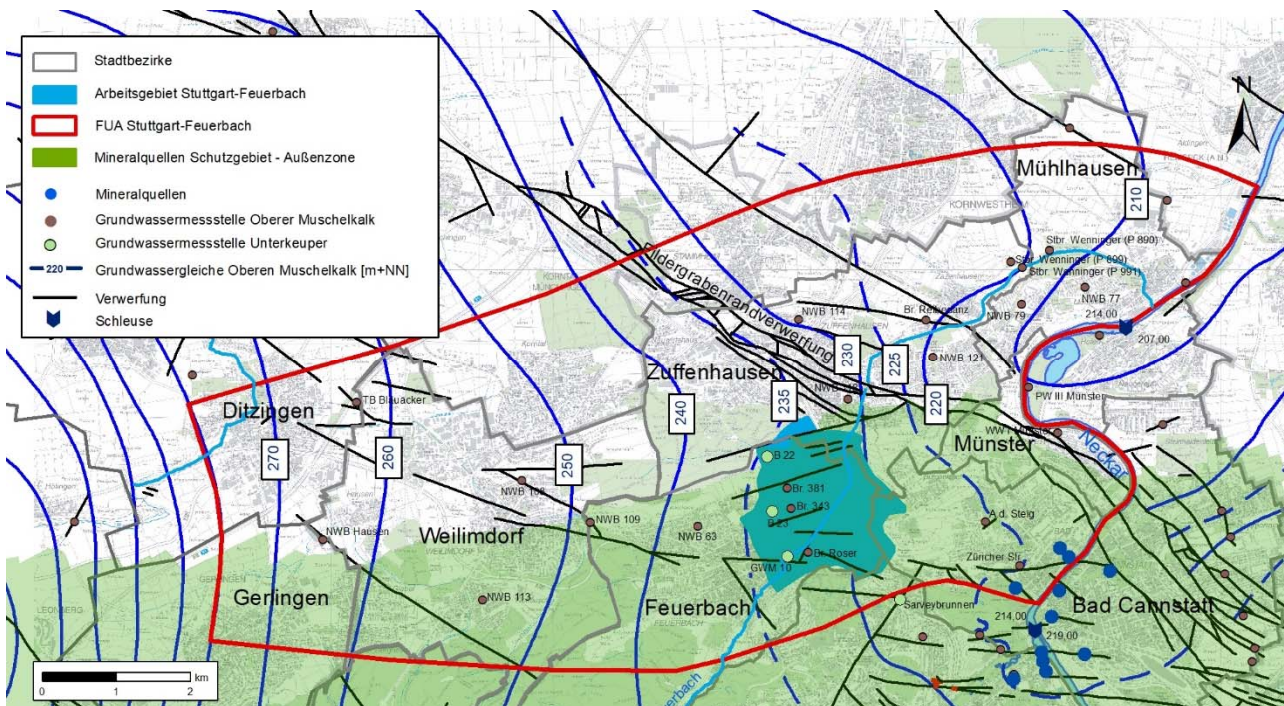


Abbildung 5 Projektgebiete Stuttgart-Feuerbach: Arbeitsgebiet und FUA inklusive der hydrogeologischen Situation zu Projektbeginn in den tiefen Aquiferen (aufbauend auf Ufrecht 1996, Plümacher und Ufrecht 1997).

1.2. Betrachtungszeitraum

Um die temporäre Entwicklung der Fließ- und Schadstoff-Verhältnisse beurteilen zu können, wurde ein Betrachtungszeitraum von 2007 bis 2017 festgelegt. Untersuchungen, die projektbedingt erst 2018 oder 2019 durchgeführt werden konnten, werden dem Jahr 2017 zugeordnet.

1.3. Neue Grundwassermessstellen AMIIGA 1 bis AMIIGA 3

Zur Untersuchung der Grundwasserströmung und der LCKW-Verteilung im Grundwasser sowie zum Aufbau eines für integrale Betrachtungen nutzbaren Netzwerks an Grundwasseraufschlüssen mussten die drei neuen Grundwassermessstellen AMIIGA 1 bis 3 eingerichtet werden (siehe Abbildung 2).

AMIIGA 1 erschließt den Bochinger Horizont im Bereich des südwestlichen Zustroms zum Arbeitsgebiet. Die Messstelle wurde bis in den Grenzdolomit abgeteuft, um den vertikalen hydraulischen Gradienten im Bereich einer vermuteten Depression der Gipskeuper-Aquifere zu überprüfen. Schließlich wurde die Bohrung AMIIGA 1 unterhalb 21,3 m u. GOK teilverschlossen und darüber mit einer Filterstrecke bis 15,3 m u. GOK als Grundwassermessstelle im Bochinger Horizont ausgebaut (Guthke et al. 2018c).

Mit AMIIGA 2 wurde eine Abstrommessstelle im Oberen Muschelkalk unterstromig zum Arbeitsgebiet geschaffen. Die neue Grundwassermessstelle ermöglicht es, den nach Osten gerichteten Abstrom aus Feuerbach, eine mögliche Ablenkung der Strömung vor der Fildergrabenrandverwerfung und die Interaktion zwischen dem Oberen und dem Unteren Aquifersystem zu beschreiben. AMIIGA 2 besitzt zwei Filterstrecken im Oberen Muschelkalk, eine flache von 73 bis 82 m u. GOK und - durch eine Tonabdichtung getrennt - eine tiefe von 86 bis 94 m u. GOK (Guthke et al. 2018c).

AMIIGA 3 erschließt den Bochinger Horizont nordöstlich von AMIIGA 1 zur Abgrenzung der Depression. Die Grundwassermessstelle wurde mit einer Filterstrecke von 18,10 bis 21,10 m u. GOK ausgebaut (Schollenberger und Kiffer 2019a).

2. Grundwasserströmung und Grundwasserdynamik

2.1. Grundwasserströmung und Grundwasserdynamik im Arbeitsgebiet

Die Beschreibung des Ausgangszustands der Grundwasserströmung im Jahr 2007 erfolgt für die flachen Aquifere (Quartär und Gipskeuper) auf Grundlage der Grundwasserstands- und Pumpversuchsdaten, die u.a. beim Projekt MAGIC gewonnen wurden (siehe Landeshauptstadt Stuttgart 2009). Im zugehörigen hydrogeologischen Modell (Spitzberg und Ufrecht 2008) wurden die Strömungsdaten für das Arbeitsgebiet Feuerbach flächendeckend ausgewertet.

Der Zustandsbeschreibung für das Jahr 2017 liegen Grundwasserstandsmessungen in 173 repräsentativ ausgewählten Grundwassermessstellen des Arbeitsgebiets zugrunde. Im Januar/Februar 2017 fand dazu eine großräumige Stichtagsmessung in den flachen Aquifere zur Beschreibung der hydrogeologischen Verhältnisse im Arbeitsgebiet statt. Von den 682 im Jahr 2016 bestehenden Grundwassermessstellen (GWM, siehe Abbildung 2) wurden 252 zur Messung ausgewählt. Die Messungen konnten vom 30.01.2017 bis 03.02.2017 in 173 GWM (siehe Tabelle 1) erfolgen. 79 GWM waren nicht zugänglich, nicht auffindbar oder verschlossen. Die aufgezeichneten Daten flossen in die Fortschreibung des hydrogeologischen Modells ein (siehe Guthke und Schollenberger 2017a, Guthke und Schollenberger 2017c). Insbesondere im Quartär, aber auch in den Gipskeuper-Aquifere wurden 2017 einige der zur Stichtagsmessung vorgesehenen GWM trocken angetroffen.

Mit einer weiteren Stichtagsmessung an 12 Bochinger Horizont Grundwassermessstellen konnte im April 2019 die Grundwasserströmung in diesem Aquifer im Arbeitsgebiet näher untersucht werden. Die erreichte Abgrenzung des Zustroms zur Depression AMIIGA 1 (Abbildung 15) zeigt, dass der nördliche Zustrom weitaus größer ist als erwartet (siehe Schollenberger und Kiffer 2019b).

Die Dynamik der Grundwasserstände im Zeitraum zwischen MAGIC (2007) und AMIIGA (2017) wurde mit Zeitreihen von Grundwasserstandsdaten aus dem Bohrdaten-Informationssystem BOISS beschrieben. Dabei wurde auf die Daten einzelner Messstellen zurückgegriffen, die im genannten Zeitraum kontinuierlich, halbjährlich oder jährlich untersucht worden sind. Verwendet wurden zudem die Daten der im Jahr 2011 im Rahmen des FOKS-Projektes in Teilbereichen durchgeführten Stichtagsmessungen.

Als weitere Grundlage für die instationäre numerische Modellierung im Zeitraum 2007 bis 2017 wurden Grundwasser-Entnahmedaten der Wasserbehörde von 108 bewirtschafteten (flachen) Aufschlüssen verwendet. Es handelt sich um 22 Brauchwasserhaltungen mit Entnahmemengen in der Summe von 6 bis 20 l/s und um 86 Sanierungsbrunnen mit Entnahmemengen in der Summe von 7 bis 13 l/s. Lage und die Aquifere der Grundwasserentnahmen sind in Abbildung 6 dargestellt.

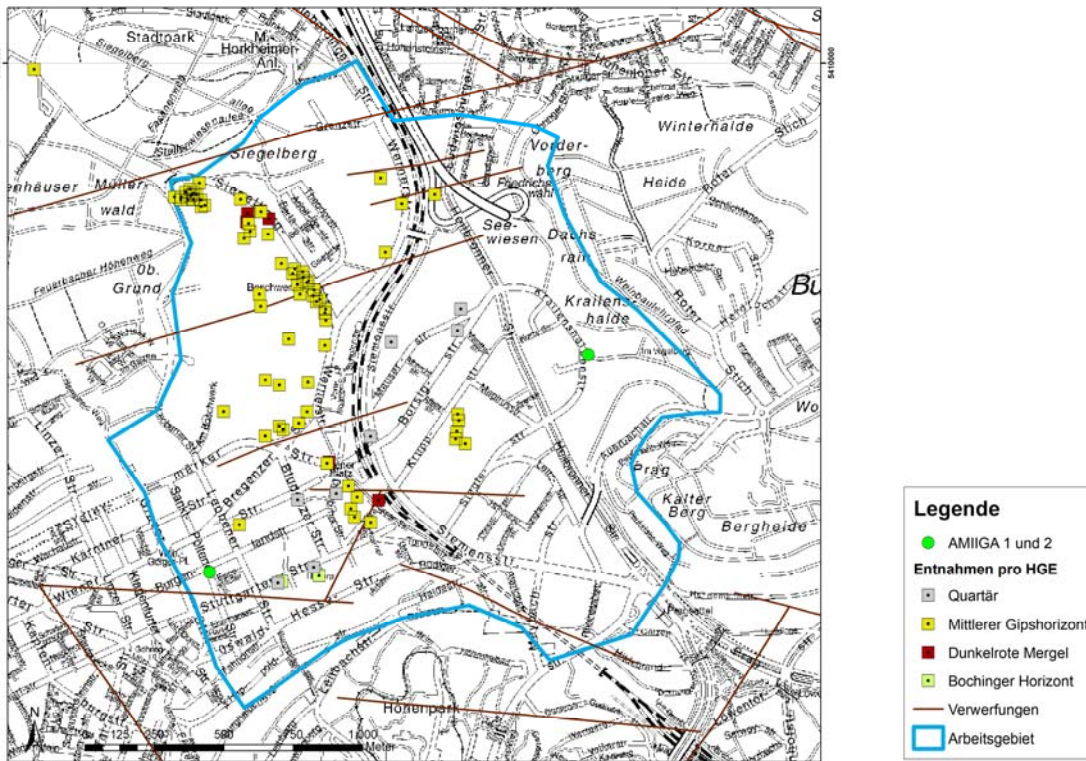


Abbildung 6 Lage der Grundwasserentnahmen im Arbeitsgebiet.

Insgesamt wurden im Arbeitsgebiet im Jahr 2017 signifikant niedrigere Grundwasserstände bzw. Druckhöhen als 2007 gemessen. Die Unterschiede betragen im Mittel:

Quartär: -3,08 m, MGH: -2,70 m, DRM: -2,58 m und BH: -2,48 m (Guthke und Schollenberger 2017c).

Die beobachteten Absenkungen der Druckspiegelhöhen werden durch Logger-Daten bestätigt, die im Zuge des Bahnprojektes „Stuttgart 21“ in Feuerbach kontinuierlich erfasst werden (siehe Abbildung 7). Auch hier zeichnet sich seit dem Jahre 2015 eine signifikante Absenkung der Grundwasserdruckhöhen ab.

Tabelle 1 Anzahl der überprüften Messstellen im Rahmen der Stichtagsmessungen im Arbeitsgebiet Feuerbach

Aquifer	MAGIC	AMIIGA	
	Stichtagsmessung 2007	Stichtagsmessung Januar/Februar 2017	Stichtagsmessung April 2019
Quartär	47	40	-
Mittlerer Gipshorizont	42	63	-
Dunkelrote Mergel	38	44	-
Bochinger Horizont	18	25	17
Grundgipsschichten/Grenzdolomit	4	3	-
Summe	149	175	17

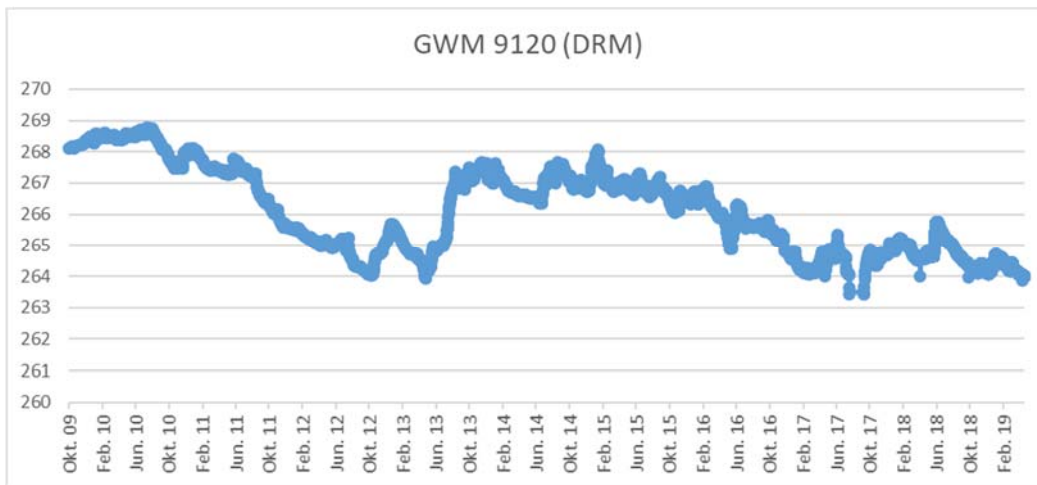


Abbildung 7 Ganglinie der Grundwasserstände in der Messstelle B9120 (Dunkelroten Mergel) in den Jahren 2009-2019, Lageplan Abbildung 28, eigene Darstellung.

Das Ausmaß der Absenkung der Druckhöhen zwischen 2007 und 2017 ist ungleich über die Aquifere und das Arbeitsgebiet verteilt. Während sich bei den Wasserspiegeln bzw. Druckhöhen im nordöstlichen Bereich eine Abnahme von weniger als 2 Meter abzeichnet, beträgt die Druckhöhendifferenz im südwestlichen Bereich des Arbeitsgebiets Feuerbach bis zu über 8 Meter (siehe z.B. für den Bochinger Horizont Abbildung 8).

Im hydrogeologischen Strömungsmodell ergeben sich für 2017 gegenüber 2007 durch die geänderten Druckspiegelhöhen bereichsweise geänderte Grundwasserfließrichtungen. Dies trifft besonders auf den Gipskeuper-Aquifer Bochinger Horizont im südwestlichen Bereich des Arbeitsgebietes zu. Für diesen ergibt sich eine Depression im Bereich der Grundwassermessstelle AMIIGA 1 (Abbildung 9). Die Depression ist von großer Bedeutung, da hier aufgrund des dort über alle Teilstockwerke des Gipskeupers fallenden hydraulischen Gradienten eine vertikale Verlagerung von LCKW in die Tiefe stattfinden kann. Dieses Phänomen kann auch im numerischen Modell nachgebildet werden. Selbst wenn es sich möglicherweise nur um ein temporäres Phänomen handeln sollte, erfordert es angesichts der geringen Dichte von Grundwasseraufschlüssen und Messdaten in diesem Gebiet erhöhte Aufmerksamkeit.

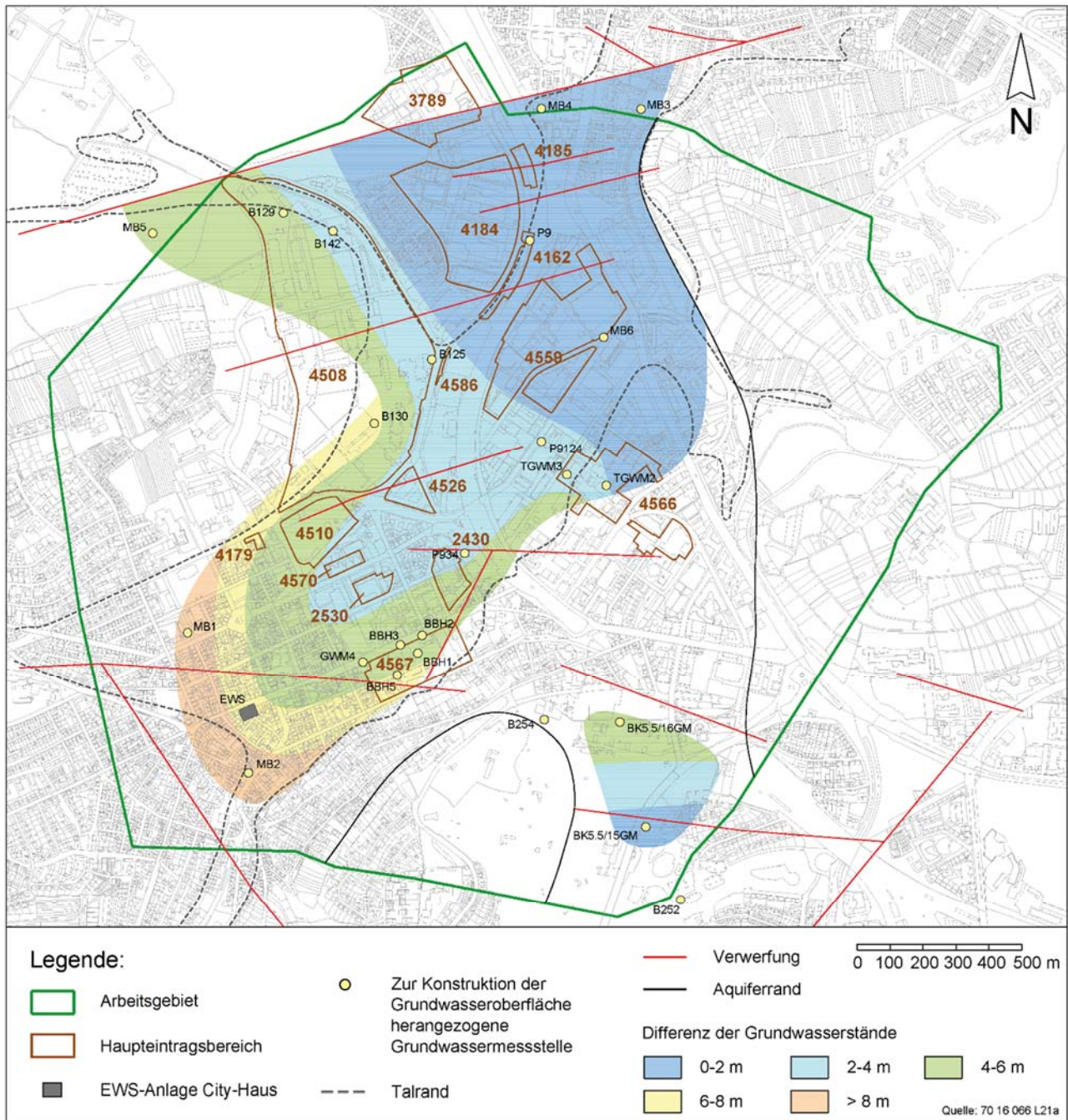
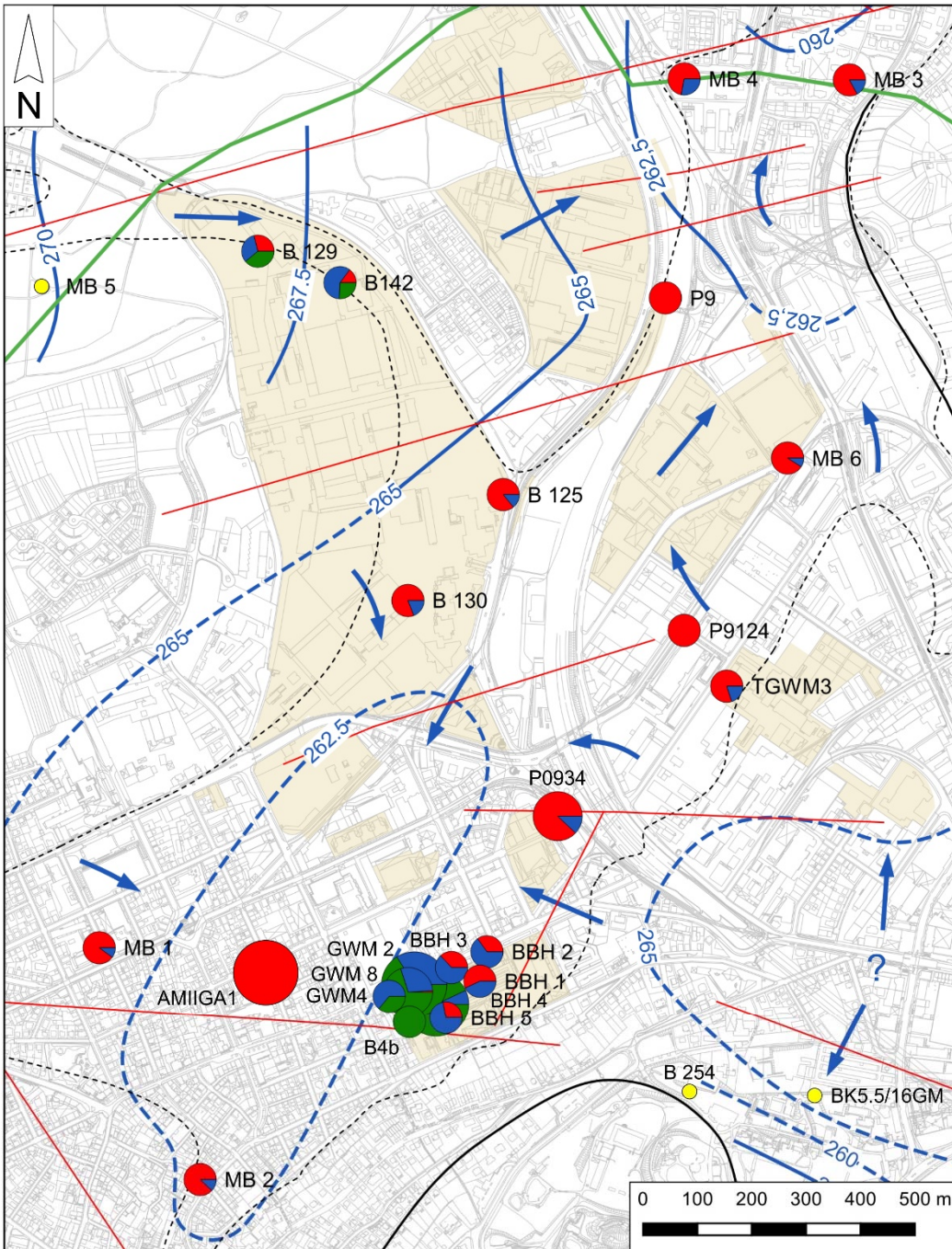


Abbildung 8 Bereiche gleicher Grundwasserdruckspiegelabnahmen im Bochinger Horizont zwischen 2007 und Projektbeginn 2017 (Guthke und Schollenberger 2017c).



Legende

- Arbeitsgebiet
- Haupteintragsbereich
- Verwerfung
- GWM BH
- - - - Grundwasserhöhengleiche sicher/vermutet [m ü. NN] (Stichtagsmessung Jan./Feb. 2017)
- LCKW-Summenkonzentration [µg/l]
- < BG
- < 10
- < 100
- < 1.000
- Talrand
- Aquiferrand
- Stoffmengenanteil [Mol-%]
- PCE
- TCE
- cDCE
- VC
- andere

Abbildung 9 Grundwassergleichen im Bochringer Horizont (STM vom Jan./Feb. 2017), Guthke et al. 2018c.

Die numerische Modellierung im Jahr 2007 erfolgte stationär. Um instationär modellieren zu können, musste für 2017 ein neues Modell aufgebaut werden. Dazu wurde auf die Daten aus dem Jahre 2007 (siehe Tabelle 1) und das zugehörige hydrogeologische Modell zurückgegriffen.

Die Ergebnisse der instationären Strömungsmodellierung sind im Bericht Lang et al. 2018 zusammengefasst, siehe Abbildung 10. Die Auswertung der Modellierung ergibt folgende Erkenntnisse:

- × Die Grundwasserneubildung im Arbeitsgebiet ist 2017 gegenüber 2007 um 15 % zurückgegangen. Dieser Rückgang betrifft insbesondere die oberen Aquifere (Quartär und Mittlerer Gipshorizont).
- × Das Grundwasser der oberen Aquifere (Quartär und Mittlerer Gipshorizont) wird mit 5 l/s (in Trockenzeiten) bis 15 l/s im nordöstlichen Bereich fast vollständig durch Pumpmaßnahmen entnommen.
- × Im Gegensatz zur stationären Strömungsmodellierung im Jahr 2007 wird in der instationären Modellierung von 2017 nicht von einer Interaktion der oberen Aquifere mit dem Gewässer Feuerbach ausgegangen.
- × Das Grundwasser in den Dunkelroten Mergeln wird hauptsächlich durch randliche Zuflüsse gespeist (ca. 4,5 l/s). Es tritt überwiegend in den Bochinger Horizont über.
- × Der Bochinger Horizont als Hauptaquifer im Arbeitsgebiet weist hohe Durchlässigkeiten von bis zu 10^{-3} m/s auf. Er wird hauptsächlich von den Talhängen gespeist. Aus dem Bochinger Horizont erfolgt mit ca. 14,3 l/s eine weitgehende Vertikalverlagerung in tiefere Schichten, siehe Abbildung 10.
- × Die Grundgipsschichten wirken als Trennhorizont. Dennoch sinkt das Grundwasser in den Bereichen, in denen die Trennwirkung reduziert ist (z.B. an entsprechend durchlässigen Störungszonen) mit ca. 15,3 l/s weitgehend in tiefere Schichten ab.
- × Der Abfluss aus Bochinger Horizont und Grundgipsschichten erreicht 2007 wie auch 2017 den Oberen Muschelkalk als Vorfluter. Es gibt nur einen geringen lateralen Abstrom über den unteren Rand (ca. $0,5 \text{ l/s} + 0,4 \text{ l/s} = 0,9 \text{ l/s}$).
- × Trotz veränderter Grundwasserdruckhöhen im Vergleich 2007 zu 2017 sind die generellen Strömungsrichtungen gleichgeblieben. Es können lokale Abweichungen bestehen, die das numerische Strömungsmodell jedoch nicht abbilden kann.
- × Die Depression im südwestlichen Modellgebiet, die erstmals im hydrogeologischen Modellierungs-Update von Guthke und Schollenberger 2017c beschrieben wurde und nur durch eine Vertikalverlagerung nach unten erklärt werden kann, wurde im numerischen Modell zunächst nicht nachvollzogen. Das Phänomen erfordert Kenntnisse zur vertikalen Durchlässigkeiten im Zentrum der Depression, die nicht vorliegen. Mit Hilfe des Strömungsmodells konnte jedoch gezeigt werden, dass unter der Annahme eines Bereichs höherer vertikaler Durchlässigkeit im Bereich der Verwerfung südlich von AMIIGA 1 (siehe Abbildung 9) die Depression vom numerischen Modell plausibel nachvollzogen wird.

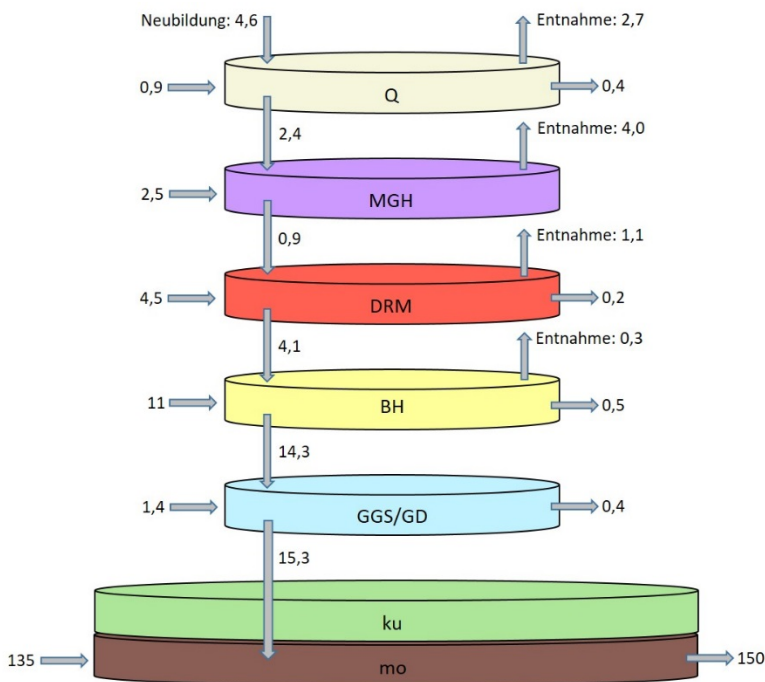


Abbildung 10 Stationäre Wasserbilanz des Strömungsmodells für das Jahr 2017, Angaben in Liter pro Sekunde.

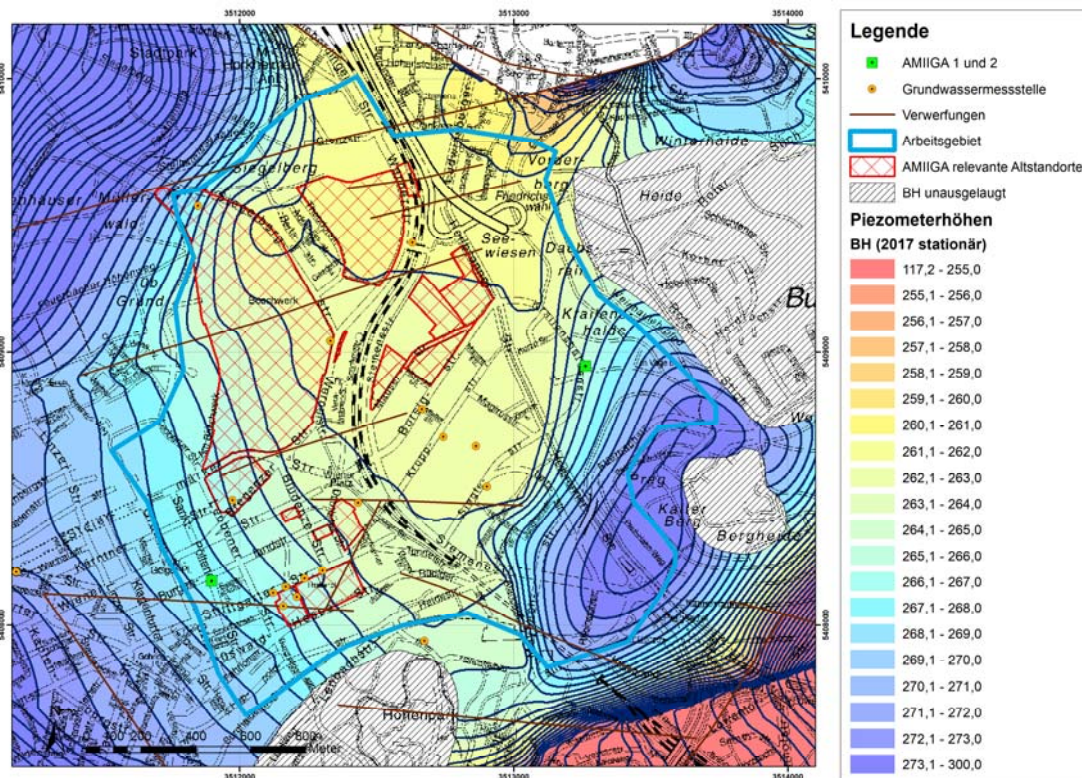


Abbildung 11 Berechnete Piezometerhöhenverteilung im Bochinger Horizont für 2017 (Lang et al. 2018).

Exemplarisch für die numerische Strömungsmodellierung ist in Abbildung 11 ein Strömungsbild für den Gipskeuper-Aquifer Bochinger Horizont im Jahr 2017 dargestellt. Die Modellierung ergibt für die Jahre 2007 und 2017 unverändert eine für Feuerbach charakteristische Strömung von den



Hängen ins Feuerbacher Tal und von dort aus generell nach Nordosten. Diese Strömungsrichtung entspricht der Fließrichtung des Gewässers Feuerbach, das heute im Bereich des Arbeitsgebietes verdolt ist. Im Gewerbegebiet Feuerbach-Ost kommt es zu einer starken Verflachung des Gradienten.

2.2. Grundwasserströmung und Grundwasserdynamik im Stadt-Umland-Gebiet (FUA)

Die im Unterkeuper und Oberen Muschelkalk ausgebauten Brunnen im Stadt-Umland-Gebiet (FUA) Stuttgart-Feuerbach werden meist zur Notwasser- bzw. zur Brauchwasserversorgung genutzt bzw. vorgehalten. Einige Brunnen dienen als Messstellen für das Monitoring im Zustrom auf die Stuttgarter Mineral- und Heilquellen. Alle Brunnen werden regelmäßig überprüft und beprobt. Dadurch liegen für die tiefen Aquifere langjährige Messreihen vor. Zur Beschreibung des Ausgangszustands im AMIIGA-Projekt werden die hydrogeologischen Modellierungen für Unterkeuper (10/2009) und Oberen Muschelkalk (05/1994) verwendet (siehe Plümacher und Ufrecht 1997, in Guthke et al. 2018a). Die Daten wurden im Rahmen des MAGPlan-Projektes (Kirchholtes und Ufrecht 2015) für das Jahr 2010 aktualisiert und in ein regionales Modell eingebettet.

Der Zustandsbeschreibung für das Jahr 2017 liegen Grundwasserstandsmessungen in repräsentativ ausgewählten Grundwassermessstellen des Stadt-Umland-Gebietes (FUA) zugrunde (siehe Tabelle 2).

Sieben der Brunnen sind stockwerksübergreifend ausgebaut. Wegen der Gefahr der vertikalen Schadstoffverschleppung wurden die meisten stockwerksübergreifenden Brunnen im Stadtgebiet von Stuttgart in den 1990-er Jahren saniert, d.h. eine Stockwerkstrennung vorgenommen. Seither befinden sich im Arbeitsgebiet keine stockwerksübergreifend ausgebaute Brunnen mehr.

Tabelle 2 Anzahl der gemessenen Messstellen bei der Stichtagsmessung in Feuerbach im FUA

Aquifer	AMIIGA	
	Stichtagsmessung Februar 2017	Stichtagsmessung Juli 2018
Unterkeuper	5	6
Oberer Muschelkalk	5	11
Stockwerksübergr.	1	7
Summe	11	24

Im Januar/Februar 2017 fand eine erste Stichtagsmessung statt. Aus organisatorischen Gründen erfolgte im Juli 2018 eine erneute Stichtagsmessung in den tiefen Aquiferen des Unterkeupers und des Oberen Muschelkalks. Beim Stichtag 2018 wurden außerdem die von Datenloggern aufgezeichneten Wasserstände von 11 GWM einbezogen. Die aufgezeichneten Daten sind in Tabelle 3 zusammengestellt und flossen in die hydrogeologische Modellierung ein (siehe Guthke et al. 2018c).

Generell ergibt sich für die tiefen Aquifere eine östlich gerichtete Grundwasserströmung (siehe Abbildung 5) hin zum Vorfluter Neckar zwischen Bad Cannstatt und Münster/Mühlhausen, dessen Wasserspiegel zwischen den Staustufen Bad Cannstatt und Hofen bei 214 bzw. 207 m ü NN liegt (Guthke et al. 2018a). Ein wichtiges, das Strömungsregime beeinflussendes Element ist die Fildergrabenrandverwerfung, die nordöstlich des Arbeitsgebietes verläuft. Aufgrund der geringen Messstellendichte bleibt deren Wirkung weiterhin ungeklärt.



Tabelle 3 Stichtagsmessung im Stadt-Umland-Gebiet (FUA) Feuerbach am 03.07.2018 (Guthke et al. 2018c), Lage der GWM siehe Abbildung 5

BOISS-ID	Name	Aquifer	Wasserstand [m ü NN]
Wasserstandsmessung			
9157	Nwbr.79	mo	209,10
2302731	Nwbr.113	ku	310,10
2303916	MAG 11	mo	225,44
2200107	AMIIGA2	mo	226,84
1575	Nwbr.67	mo	236,71
9119	Nwbr.121	ku, mo	213,20
1305665	Nwbr. Hausen	km1, ku, mo	262,40
47022	B 22	ku	256,85
47023	B 23	ku	239,12
1400602	GWM 10	ku	250,22
	GWM 1	ku, mo	298,24
1400010	GWM14	mo	209,20
9159	Nwbr.77	mo, mm	207,73
Datenlogger			
1541	Nwbr.118	mo	231,33
7076	Nwbr.109	mo	248,72
8966	Sarweybr.-flach	ku	239,52
9072	Auf der Steig	mo	225,11
9211	GWM Züricher Str. (P840)	mo	225,00
9492	P835	ku	220,58
47343	B343	mo	ca. 233
1308010	Nwbr LGA	mo	226,69
7080	Nwbr.108	ku, mo	261,30
8962	Nwbr.114	mo, mm	223,59
9122	Nwbr.117	km1,ku	260,75

Die vorliegenden Daten von GW-Ständen im Oberen Muschelkalk belegen, dass sich die Grundwasserstände bzw. die Druckspiegel in den tieferen Aquiferen von 2007 bis 2017 um ein bis sechs Meter erhöht haben. Diese Entwicklung konnte auch im Nesenbachtal und in den Randbereichen des Stadt-Umland-Gebietes (FUA) beobachtet werden. Die Schüttungen der Heil- und Mineralquellen zeigen gleiche Charakteristika. Seit 2016 deuten die Messwerte auf einen deutlichen Rückgang der Druckspiegel hin. Die Entwicklung wird exemplarisch anhand von GWM 343 veranschaulicht, die im Zentrum des Arbeitsgebiets liegt (Lage siehe Abbildung 5, Ganglinie Abbildung 12).

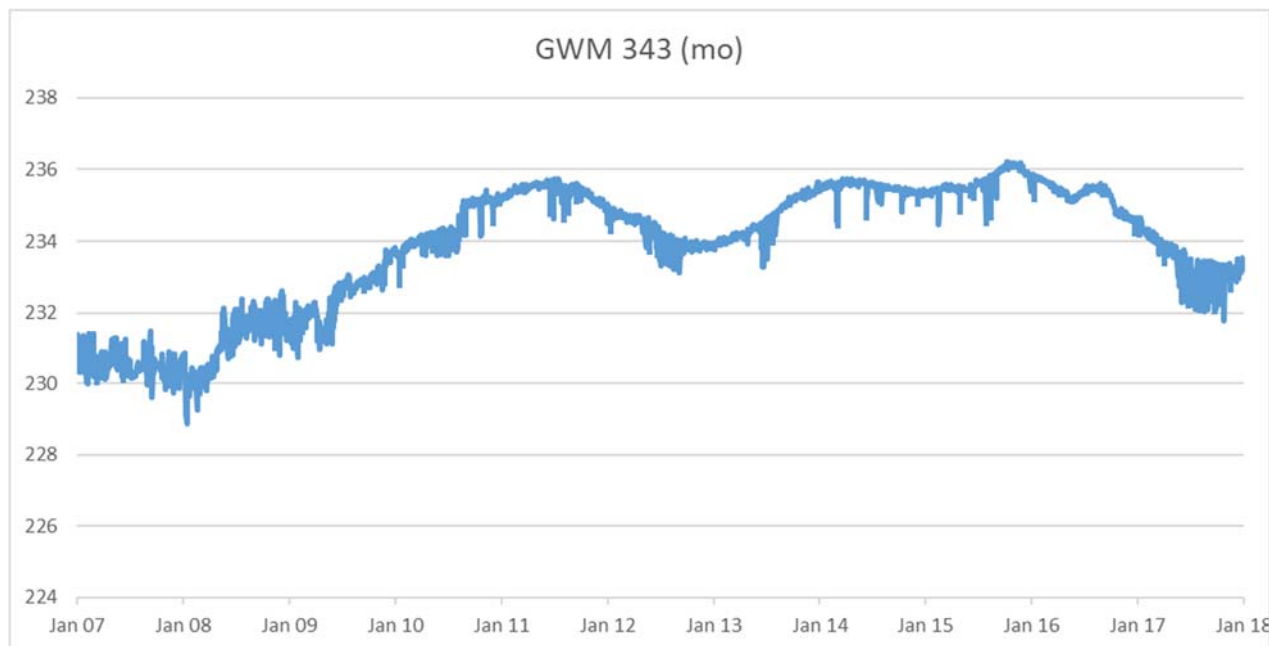


Abbildung 12 Ganglinie der Grundwasserstände in der GWM 343 (Oberer Muschelkalk) in den Jahren 2007-2017, eigene Darstellung.

Auch die numerische Modellierung zeigt, dass die Druckhöhen im Oberen Muschelkalk in den Jahren 2017/2018 großräumig um ca. ein bis drei Meter über den vergleichbaren Höhen von 2007 liegen. Diese Druckspiegeländerungen haben jedoch keine erkennbaren Auswirkungen auf die Grundwasserfließrichtung (Abbildung 13). Die Strömungsbilder für den Oberen Muschelkalk sind für die Jahre 2007 und 2017 trotz unterschiedlicher Druckhöhen kongruent.

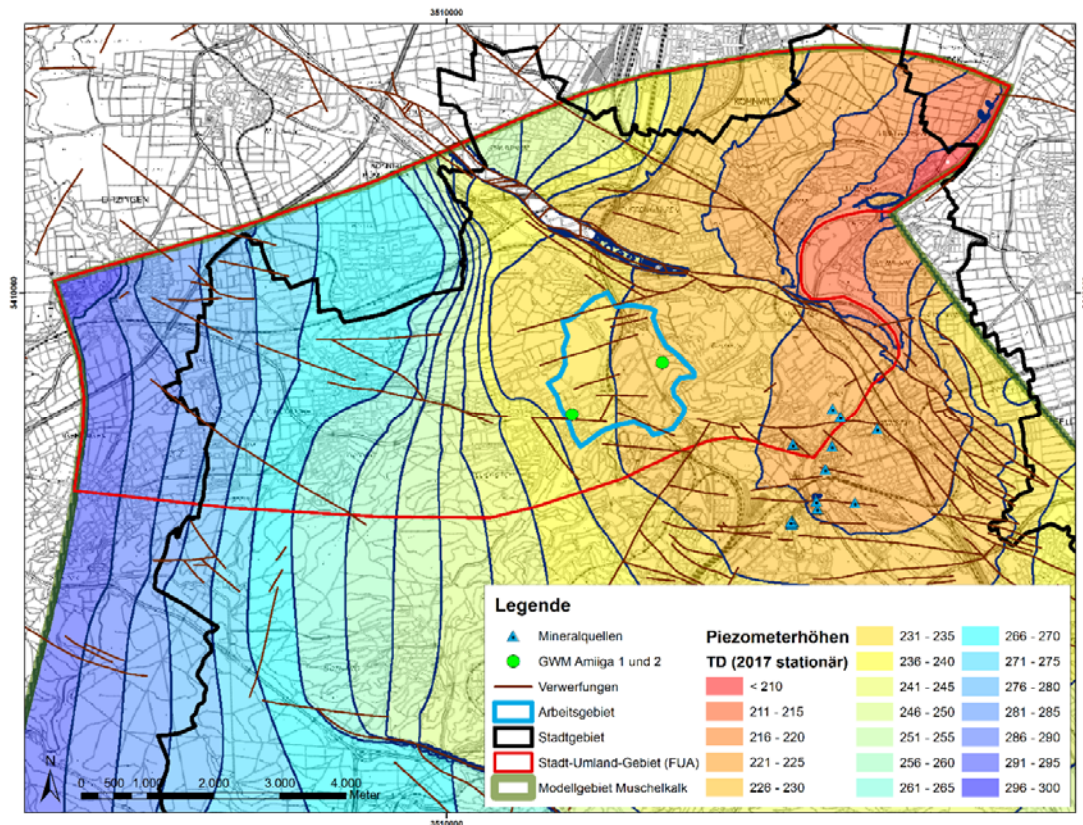


Abbildung 13 Grundwasserströmungsbild 2017 Oberer Muschelkalk (Lang et al. 2018).

Ein wichtiges Ergebnis der numerischen Strömungsmodellierung für das Stadt-Umland-Gebiet (FUA) ist, dass das Grundwasser aus dem Arbeitsgebiet Feuerbach nicht die Mineral- und Heilquellen erreicht, sondern vielmehr nördlich der Mineral- und Heilquellen in den Vorfluter Neckar entwässert (Lang et al. 2018). Das bestätigt die Ergebnisse früherer Untersuchungen (Lang und Schäfer 2015; Goldscheider et al. 2001). Diese Erkenntnis relativiert eine Gefährdung der Mineral- und Heilquellen durch die in Kapitel 2.1 beschriebene mögliche Vertikalströmung und damit verbundene, tiefreichende Schadstoffverschleppung in den Oberen Muschelkalk in Feuerbach.

Die numerische Modellierung zeigt die Relationen der Grundwasser-Volumenströme auf: Im Oberen Muschelkalk wird das Arbeitsgebiet Feuerbach von rund 135 l/s unterströmt. Der Vertikalzustrom aus dem oberen in das untere Aquifersystem beträgt rund 15 l/s, d.h. der Zustrom aus dem Arbeitsgebiet beläuft sich auf rund 10 % des Volumenstroms im Oberen Muschelkalk. Dementsprechend ist eine deutliche Verdünnung der verfrachteten Schadstoffe zu erwarten.

In der Grundwassermessstelle AMIIGA 2, die im Oberen Muschelkalk ausgebaut ist, wurde im Juni 2018 ein 4-tägiger Immissionspumpversuch (IPV) durchgeführt (siehe Guthke et al. 2018c). Damit konnte ein Teil des unmittelbaren Grundwasser-Abstroms aus dem Arbeitsgebiet Feuerbach im Oberen Muschelkalk erfasst werden. Die dabei erzielte Abstrombreite beträgt rund 76 Meter bei einer Gesamtabstrombreite des Arbeitsgebietes von ca. 1.000 Metern.

3. LCKW-Situation

Die Grundwasserqualität in Feuerbach ist stark von kontaminierten Standorten (Altlasten) geprägt. Als maßgebliche Schadstoffe sind die leichtflüchtigen chlorierten Kohlenwasserstoffe (LCKW) identifiziert worden, welche die Grundwasserbeschaffenheit im Oberen Aquifersystem (Quartär und Gipskeuper-Stockwerke) seit mehreren Jahrzehnten nachweislich erheblich und großräumig beeinträchtigen. Die dominierenden Einzelstoffe sind aufgrund der Persistenz und Mobilität die Chlorethene Tetrachlorethen (PCE) und Trichlorethen (TCE), die als Reinigungs- und Lösemittel im Einsatz waren. Darüber hinaus finden sich örtlich die Abbauprodukte Dichlorethen (DCE) und Vinylchlorid (VC). Für die Transportmodellierung werden alle Chlorethene entsprechend dem Molekulargewicht als PCE-Äquivalente zusammengefasst.

Die LCKW-Verunreinigungen des Grundwassers entstehen auf den kontaminierten Standorten an den Eintragstellen oder Schadensherden durch Einträge in das Obere Aquifersystem in Bereichen, in denen LCKW gelagert, umgeschlagen oder eingesetzt wurden und durch unsachgemäßen Umgang in den Untergrund gelangt sind.

Erhöhte Schadstoffgehalte im Bereich der Schadensherde werden als Schadstoffherde bezeichnet. Von den Schadstoffherden gehen Schadstofffahnen aus, die meist über die Grundstücksgrenzen hinausreichen. Bei hohen LCKW-Emissionen können sich im Abstrom sekundäre Schadstoffherde bilden, die später aufgrund von Desorptionsprozessen eigene Schadstoffeinträge verursachen. Sekundäre Schadstoffherde sind nur schwer zu lokalisieren.

Hinweise auf sekundäre Schadstoffherde wurden z.B. am Altstandort Stuttgarter Str. 10, ISAS-Nr. 2497, beobachtet. Dieser Altstandort war vorwiegend durch das selten eingesetzte LCKW 1.1.1-Trichlorethan (TCA) verunreinigt. Im Schadensherd wurden in den Schichten des Mittleren Gipshorizonts bis zu 100.000 µg/l nachgewiesen. In den darunter anstehenden Dunkelroten Mergeln wurden dagegen Konzentrationen unter 10 µg/l gemessen. In den Jahren 2013/14 erfolgte eine thermische Sanierung des Standorts mit festen Wärmequellen und Bodenluftabsaugung in den Schichten von Quartär und Mittlerem Gipshorizont. Anschließend erfolgte eine Überwachung der Schadstoffentwicklung im Grundwasser. Nach Abschluss der Sanierung wurden am Standort im Mittleren Gipshorizont noch 197 bis 687 µg/l TCA gemessen, die emittierte Restfracht betrug 3,5 g/d. Im Abstrom traten mit 196 bis 2.282 µg/l höhere Konzentrationen als im Schadensherd auf. Dies ist ein Hinweis auf einen vom primären Schadensherd losgelösten sekundären Schadstoffherd. Das Beispiel illustriert das Phänomen abgelöster Fahnen („sekundärer Schadstoffherde“), die nur schwer identifiziert, untersucht und saniert werden können.

Die integrale Untersuchung und der AMIGA-Managementplan für Feuerbach konzentrieren sich auf die Schadstoffsituation in den Schadstofffahnen im Abstrom der Schadstoffherde.

Für das Arbeitsgebiet liegen die meisten Daten von LCKW-Frachten und LCKW-Konzentrationen im Grundwasser im Bereich der Schadstoffherde vor, da hier LCKW-Schäden intensiv untersucht und saniert wurden und werden. Im Abstrom dagegen sind nur vergleichsweise wenige Grundwassermessstellen und LCKW-Konzentrationsmesswerte vorhanden. Um trotzdem zu einer befriedigenden Aussage über die Situation im Abstrom zu gelangen, werden ergänzend die Ergebnisse der Schadstoffherduntersuchungen und der Dokumentationen von Sanierungsmaßnahmen ausgewertet.

Die Situation in dem für das Stadt-Umland-Gebiet (FUA) maßgebenden Unteren Aquifersystem kann nur großflächig erfasst werden. Neben Einträgen aus dem Grundwasser-Oberstrom (außerhalb

des Arbeitsgebietes) sind mögliche Vertikalverbindungen zwischen dem Oberen und dem Unteren Aquifersystem von Bedeutung. Direkte Einträge im Arbeitsgebiet z.B. über Brunnen können derzeit ausgeschlossen werden.

3.1. LCKW-Situation im Arbeitsgebiet

Zur Beschreibung der LCKW-Situation im Arbeitsgebiet für das Jahr 2007 wurden zunächst die Ergebnisse des MAGIC-Projektes verwendet (siehe Landeshauptstadt Stuttgart 2009). Ergänzend wurden die im Jahr 2011 erfolgte Aktualisierung und vertiefte Auswertung der Herd-Fahnenbeziehung im Rahmen des Projektes FOKS (Kirchholtes et al. 2012) einbezogen. Übernommen wurden die Haupteintragsstellen von LCKW unter Betrachtung der Grundwasserstockwerke des Oberen Aquifersystems (Quartär, Mittlerer Gipschizont, Dunkelrote Mergel, Bochinger Horizont, Grundgipsschichten/Grenzdolomit).

Im Rahmen des AMIIGA-Projektes wurden ergänzend alle nach 2007 bzw. 2011 gewonnenen Untersuchungsergebnisse zusammengestellt, zwei neue Monitoring-Grundwassermessstellen im Bochinger Horizont erstellt (AMIIGA 1 und AMIIGA 3), drei Stichtagsmessungen und Beprobungen durchgeführt (Guthke und Schollenberger 2017a und b, Schollenberger und Kiffer 2009b) und eine instationäre numerische Transportmodellierung für das Arbeitsgebiet im Zeitraum 2007 bis 2017 aufgebaut (Lang et al. 2018).

Zur Beschreibung der Entwicklung der LCKW-Verunreinigungen des Grundwassers werden zunächst die Ergebnisse der Datenrecherche und der Stichtagsbeprobungen zusammengestellt. Danach werden die LCKW-Austragsraten bilanziert, die im Rahmen von Sanierungsmaßnahmen aus dem Untergrund entfernt werden. Die Entwicklung gibt Aufschluss über Sanierungstätigkeit und Sanierungserfolg, aber auch über Schadstoffpotenziale in den Schadstoffherden und lassen Rückschlüsse auf LCKW-Emissionen zu.

Schließlich werden die LCKW-Frachten zusammengestellt, die von den Standorten emittiert werden. Diese Frachten erzeugen im numerischen Transportmodell Schadstofffahnen-Konzentrationen, die mit den gemessenen Konzentrationswerten kalibriert werden.

Ergänzend wird ein mikrobiologischer LCKW-Abbau im Arbeitsgebiet zugrunde gelegt, der notwendig ist, um die gemessenen LCKW-Konzentrationen in weiter von den Schadensherd entfernten gelegenen Grundwassermessstellen nachbilden zu können.

3.1.1. LCKW-Konzentrationen

Die LCKW-Konzentrationsverteilung für 2017 wurde durch Zusammenstellung aller verfügbaren aktuellen Datensätze der 655 bestehenden Grundwassermessstellen ermittelt. In den flachen Aquiferen fand im Mai/Juni 2017 eine Stichtagsbeprobung statt, bei der 45 Proben gewonnen wurden (siehe Tabelle 4). Es handelt sich um Grundwassermessstellen im Abstrom der Schadstoffherde (siehe Abbildung 14), die überwiegend im öffentlichen Straßenraum liegen. Die Anzahl der untersuchten Messstellen ist auch deshalb gering, weil die Grundwassermessstellen im obersten Aquifer (insbesondere im Quartär, aber auch im Mittleren Gipschizont) in vielen Fällen mittlerweile trockengefallen sind und nicht mehr beprobt werden können.

Tabelle 4 Anzahl der beprobten Messstellen im Arbeitsgebiet Feuerbach

Projekt	MAGIC	AMIIGA	
	Stichtagsbeprobung 2007	Stichtagsbeprobung* Mai/Juni 2017	Stichtagsbeprobung April 2019
Quartär	63	11	-
Mittlerer Gipshorizont	11	9	-
Dunkelrote Mergel	29	14	-
Bochinger Horizont	7	8	12
Grundgipsschichten/ Grenzdolomit	1	3	-
ungegliedert/stockwerksübergreifend	57	-	-
Summe	168	45	12

* Mai/Juni 2017 inklusive AMIIGA 1 in BH und GGS/GD in November 2017

Die 2017 gemessenen Schadstoffkonzentrationen sind in Tabelle 5 in die Klassen < 1 µg/l (unauffällig), 1-10 µg/l (Spuren), 10-100 µg/l (erhöhte LCKW-Gehalte) und >100 µg/l (auffällig) eingeteilt. Die überwiegende Zahl der Messstellen weisen Konzentrationen zwischen 10 und 100 µg/l auf.

Tabelle 5 LCKW-Gehalte in GWM der flachen Aquifere im Jahr 2017

Aquifer	Quartär	Mittlerer Gipshorizont	Dunkelrote Mergel	Bochinger Horizont	Grundgips- schichten/ Grenzdolomit	Summe
< 1 µg/l	1	0	0	1	0	2
1-10 µg/l	2	1	0	6	0	9
10-100 µg/l	5	6	9	0	2	22
> 100 µg/l	3	2	5	1	1	12
SUMME	11	9	14	8	3	45

Tabelle 6 LCKW-Gehalte in BH-GWM der flachen Aquifere im Jahr 2019

Aquifer	Bochinger Horizont
< 1 µg/l	0
1-10 µg/l	7
10-100 µg/l	3
> 100 µg/l	2
SUMME	12

2019 erfolgte eine weitere Beprobung von Grundwassermessstellen im Bochinger Horizont, um die LCKW-Verteilung in diesem Hauptaquifer des Oberen Aquifersystems unter Einbeziehung der beiden AMIIGA-Messstellen zur überprüfen. Außerdem diente die Untersuchung zur Planung des in-

tegralen Monitoring-Messnetzes. Dazu wurden 17 Bochinger Horizont-Grundwassermessstellen ausgewählt (siehe Abbildung 15), in denen der Wasserstand gemessen wurde. 12 der Messstellen wurden beprobt und auf LCKW untersucht. Die gemessenen Schadstoffkonzentrationen sind in Tabelle 6, in Schadstoffkonzentrationsbereiche eingeteilt, zusammengestellt.

In den AMIIGA-Messstellen wurden Immissionspumpversuche durchgeführt. Die Auswertung hat für AMIIGA 1 bestätigt, dass die Grundwassermessstelle im Zentrum einer PCE-Fahne liegt. Die mittleren Konzentrationen betragen 260 µg/l PCE und 0,8 µg/l TCE. In AMIIGA 3 steigen die anfangs gemessenen Konzentrationen von 12 µg/l PCE und 6,9 µg/l TCE am Ende des Immissionspumpversuchs auf 30 µg/l PCE und 52 µg/l TCE deutlich an. Das spricht für eine vertikale Verlagerung von LCKW aus den Dunkelroten Mergeln im Bereich von AMIIGA 3, die durch die Druckspiegelabsenkung des Pumpversuchs verstärkt wird (Schollenberger und Kiffer 2019a).

Die LCKW-Zusammensetzung in AMIIGA 3 weicht wesentlich von derjenigen in AMIIGA 1 ab. Da AMIIGA 3 im Zustrom von AMIIGA 1 liegt, kann die geringe TCE-Konzentration in AMIIGA 1 durch einen (aeroben) TCE-Abbau erklärt werden. Außerdem weist die mit 260 µg PCE/l in AMIIGA 1 zu 30 µg PCE/l in AMIIGA 3 deutlich höhere Konzentration darauf hin, dass die Herkunft des festgestellten PCE-Schadens südlich oder westlich von AMIIGA 1 zu suchen ist.

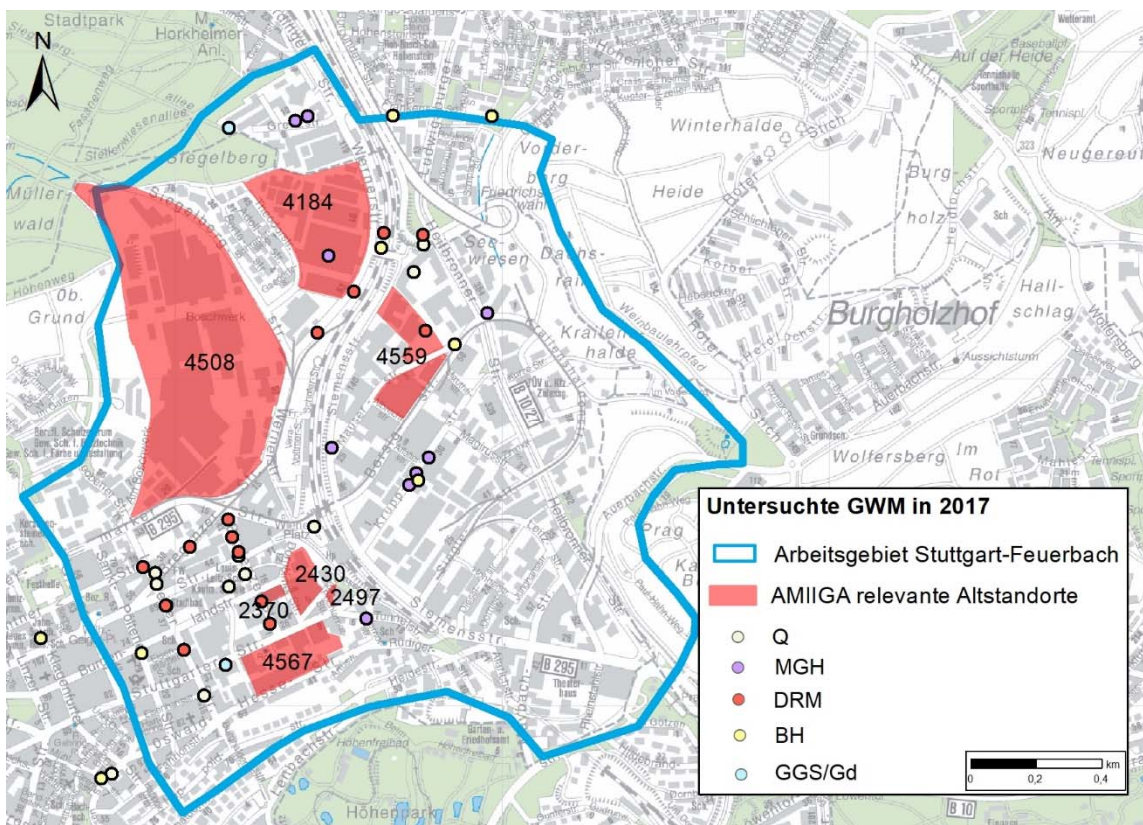
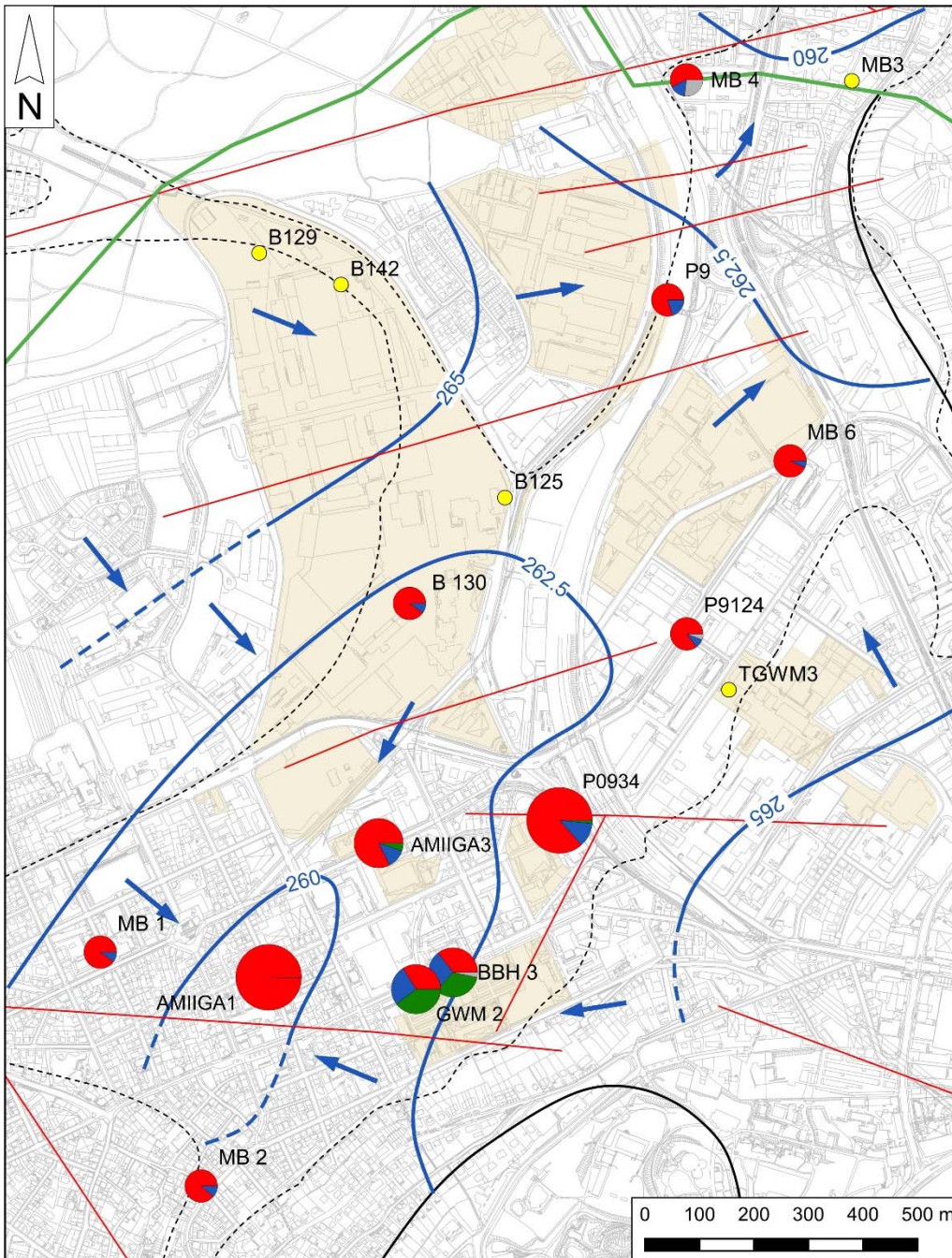


Abbildung 14 Verteilung der 2017 untersuchten Grundwassermessstellen im Arbeitsgebiet, eigene Darstellung.



Legende

- Arbeitsgebiet
- Haupteintragsbereich
- Verwerfung
- GWM BH
- - - Grundwasserhöhengleiche sicher/vermutet [m ü. NN] (Stichtagsmessung April 2019)
- LCKW-Summenkonzentration [$\mu\text{g/l}$]
- < BG < 10 < 100 < 1.000
- Stoffmengenanteil [Mol-%]
- PCE ● TCE ● cDCE ● VC ● andere
- Talrand
- Aquiferrand

Abbildung 15 Ergebnisse der Stichtagsbeprobung April 2019 in den Bochinger Horizont-Grundwassermessstellen im Arbeitsgebiet (Schollenberger und Kiffer 2019b).

3.1.2. LCKW-Austragsraten

Seit 1984 finden in Feuerbach neben Bodenluft- und Aushubsanierungen von LCKW-Verunreinigungen zahlreiche Grundwassersanierungen durch Pump & Treat statt. Die Schadstoffentnahme aus dem Grundwasser lässt auch Rückschlüsse auf die vom Standort emittierte LCKW-Fracht zu, da die erklärten Ziele der Grundwasser- und LCKW-Entnahme, die Reduzierung des LCKW-Vorrats und die Verhinderung weiterer LCKW-Verfrachtungen, erfahrungsgemäß nicht vollständig erreicht werden können. Im AMIIGA-Projekt werden die Austragsraten dazu verwendet, die am Standort eingetragenen und die emittierten LCKW-Frachten abzuschätzen.

Maßnahmenträger für Pump & Treat Maßnahmen ist entweder der Verursacher oder der Grundstückseigentümer. Die Wasserrechts- und Bodenschutzbehörde verlangt und kontrolliert die Durchführung der schadensspezifischen Erkundungs- und Sanierungsmaßnahmen. Sie beurteilt anhand vorzulegender Gutachterberichte den Sanierungserfolg. Maßgebliche Beurteilungskriterien sind neben Konzentrationsminderungen und technisch ausgetragenen Schadstoffmengen auch die Höhe der vom Standort abströmenden Schadstofffracht.

Da nicht alle Standort-Sanierungsberichte LCKW-Austragsraten bilanzieren und die Behörde die Bilanzierung nicht erzwingen kann, sind die Daten unvollständig und geben kein vollständiges Bild der Sanierungserfolge. Beispielhaft werden die Daten von zwei Standorten aufgelistet, die Bilanzierungen in vorbildlicher Weise liefern: ISAS 4508 und ISAS 4184 (Schwerpunktfälle).

Tabelle 7 LCKW-Austrag beim Standort ISAS 4508 aus dem Grundwasser (GW) und über die Bodenluft

Jahre	GW	Davon MGH	Davon DRM	Bodenluft
2014	121,6 kg	67,3 kg	54,3 kg	92,0 kg
2015	76,4 kg	43,4 kg	33,0 kg	72,5 kg
2016	57,4 kg	34,9 kg	22,5 kg	52,7 kg
2017	33,2 kg	20,2 kg	13,0 kg	549,2 kg*
Summe 1984 bis 2017	8.466,6 kg	k.A.	k.A.	14.973,1 kg

* 2017 Optimierung durch Zuschaltung neuer Bodenluftabsaugbrunnen

k.A. = keine Angabe, da ältere Daten nicht verfügbar

Tabelle 8 LCKW-Austrag beim Standort ISAS 4184 aus dem Grundwasser (GW)

Jahre	GW
2014-2015	10,8 kg
2016-2018	7,7 kg
Summe 2006 bis 2017	104,6 kg

Die Austragsraten der Beispielfälle (Tabelle 7 und Tabelle 8) zeigen, dass die LCKW-Austräge über die Zeit deutlich abnehmen. Dies lässt allgemein darauf schließen, dass die Schadensherdsanierungen wirksam und erfolgreich sind. Eine Ausnahme stellt die Entnahme über die Bodenluft beim Standort ISAS 4508 im Jahre 2017 dar, hier ergab sich aufgrund einer Optimierung der Sanierung ein signifikant erhöhter Austrag.

3.1.3. Emittierte LCKW-Frachten

Zur numerischen Modellierung des LCKW-Transports (in PCE-Äquivalenten) wurden virtuelle LCKW-Einträge in die Aquifere an den MAGIC-Eintragstellen so dimensioniert, dass die in den Grundwassermessstellen gemessenen LCKW-Konzentrationen nachgebildet werden können. Für das Jahr 2017 wurden die gleichen Eintragstellen angesetzt wie bei der MAGIC-Modellierung 2007. Die Summe aller virtuellen Einträge eines kontaminierten Standorts ergibt die in Tabelle 9 jeweils angegebene emittierte Schadstofffracht. In Tabelle 9 sind alle Standorte zusammengestellt, deren 2007 und 2017 emittierte Frachten die gewählte Relevanzschwelle von 2 g/d überschreiten, d.h. die mehr als 10 % der höchstzulässigen Fracht von 20 g/d emittieren. Die Standorte sind in Abbildung 16 rot markiert.

Unter den sieben in Tabelle 9 aufgelisteten Standorten befinden sich die drei im Projekt FOKS (Kirchholtes et al. 2012) als Hauptemittenten im Arbeitsgebiet identifizierten Standorte mit den Standort-Nummern 2430, 4508 und 4567. Die numerische Transportmodellierung im Projekt FOKS (Kirchholtes et al. 2012) ergab, dass bei einer berechneten Gesamtemission von 540 g/d im Jahr 2007 89 % der LCKW an vier Schadensherden eingetragen werden: ISAS 4508 (72 %), ISAS 4567 (8 %), ISAS 2430 (6 %) und P954 (4 %). Letztere ist in Tabelle 9 nicht explizit aufgelistet, sondern unter „Sonstige“ erfasst. Der unbekannte Emittent im Bereich der Grundwassermessstelle P954 konnte bisher nicht identifiziert werden, weist aber bei einer Fracht von 23 g/d einen signifikanten Schadstoffeintrag und eine erhebliche Emission auf.

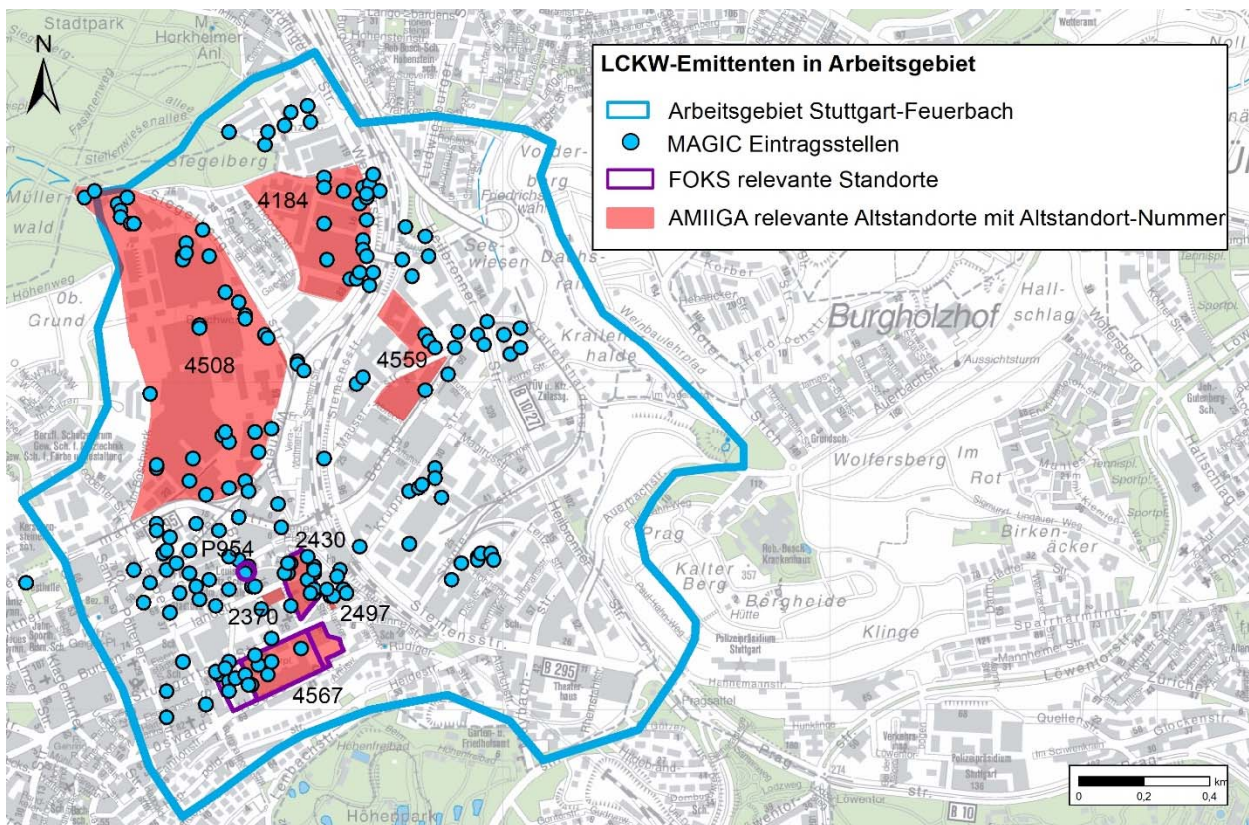


Abbildung 16 Modellierte LCKW-Eintragstellen (MAGIC 2007) und größere Altstandorte FOKS (2011) bzw. AMIIGA mit LCKW-Emissionen größer 2 g/d im Arbeitsgebiet.



Tabelle 9 ermöglicht durch Vergleich der emittierten Frachten der Jahre 2007 und 2017 auch eine Beurteilung der Erfolge der Schadstoffherdsanierungen. Insbesondere die Standorte ISAS-Nr. 4508, 4567 und 2430 emittierten 2017 im Vergleich zu 2007 deutlich geringere LCKW-Frachten.

Tabelle 9 gibt die Ergebnisse der instationären dreidimensionalen Transportmodellierung wieder. Hier wurde für das Jahr 2007 eine Gesamtemission von LCKW in PCE-Äquivalenten von 404 g/d berechnet. Die Abweichung von der in FOKS ermittelten Gesamtemission von 540 g/d ist modelltechnisch begründet. Die Größenordnung wird aber als gleichwertig angesehen. Die Abweichung zeigt deutlich, dass aufgrund der Komplexität des Systems die berechneten Zahlenwerte nur in ihrer Größenordnung, keinesfalls aber genau angegeben werden können.

Tabelle 9 Für die Frachtmodellierung in AMIIGA relevante LCKW-Emittenten (Standorte) mit berechneten emittierten LCKW-Frachten größer 2 g/d für die Jahre 2007 und 2017

Standort-Nummer	LCKW-Emission (g/d) in den Jahren 2007 und 2017	Betroffene Aquifere	Informationen zu Standort und Altlasten-Bearbeitung
2430	36,5 g/d (2007) 3,6 g/d (2017)	DRM	Branche: Galvanik (1925-2004) Sanierung seit 2007, Aushubsanierung 2015-2018, Grundwassersicherung wird fortgesetzt
2497	3,4 g/d (2007) <2 g/d (2017)	MGH	Branche: Fe-Metallverarbeitung (1943-1954), Stahl- und Leichtmetallbau (1955-2010) Sanierung von 1998 bis 2013 Kontrolle seit 2014
4184	6,7 g/d (2007) 6,7 g/d (2017)	MGH	Branche: Fe-Metallverarbeitung (seit 1905) Sanierung seit 2012
4508	285 g/d (2007) 101 g/d (2017)	MGH, DRM	Branche: diverse (1920-1997) Sanierung seit 2004
4567_2 und _3	15,6 g/d (2007) 15,4 g/d (2017)	Q, BH u. GGG/GD	Branche: Lederherstellung und Verarbeitung (1875-1995) Sanierung seit 2004
2370	2,9 g/d (2007) 2,9 g/d (2017)	BH	Branche: Herstellung von Eisen- und Metallwaren (1899-1904), Stahl- und Leichtmetallbau (1905-1976), Fe-Metallverarbeitung (1974-1977) Orientierende Untersuchung seit 2004
4559	5,2 g/d (2007) 2,0 g/d (2017)	Q	Branche: Fe-Metallverarbeitung Detailuntersuchung seit 2009 Sanierung 2003, 2009 Orientierende Untersuchung seit 2013
Rest	48,7 g/d (2007) 35,4 g/d (2017)		
SUMMEN	404 g/d (2007) 167 g/d (2017)		

3.1.4. Modellierung der LCKW-Konzentrationen

Die Verteilung der LCKW-Konzentrationen im Arbeitsgebiet war für das Jahr 2007 im Projekt MAGIC (siehe Landeshauptstadt Stuttgart 2009) entsprechend der damaligen technischen Möglichkeiten mit Hilfe eines zweidimensionalen, stationären numerischen Transportmodells simuliert worden. Als Grundlage der Transportmodellierung diente eine Stichtagsbeprobung an 168 Grundwassermessstellen (Landeshauptstadt Stuttgart 2009). Zur Nachbildung der gemessenen Konzentrationen wurden 186 LCKW-Eintragsstellen positioniert, die in Abbildung 16 als blaue Punkte dargestellt sind. Die numerische Transportmodellierung ermöglichte es, LCKW-Fahnenbilder berechneter PCE-Äquivalente für jeden der fünf Aquifere des Oberen Aquifersystems zu entwickeln.

Die Transportmodellierung im Jahr 2017 erfolgte dem Stand der Technik gemäß dreidimensional und instationär. Die instationäre Modellierung zielt darauf ab, die Entwicklung des LCKW-Transports im Zeitraum 2007 bis 2017 nachzubilden. Dazu wurden zunächst die LCKW-Konzentrationsverteilungen im Grundwasser für die Jahre 2007 und 2017 ermittelt. Für 2007 wurden an den 186 MAGIC-LCKW-Eintragsstellen die gleichen LCKW-Einträge wie in der Modellierung 2007 angesetzt, für 2017 die reduzierten Frachten gemäß Tabelle 9. Die Kalibrierung der berechneten PCE-Äquivalent-Konzentrationsverteilungen (LCKW-Fahnen) erfolgte mit Hilfe der gemessenen Konzentrationen für die Jahre 2007 und 2017. Danach wurden die Zwischenzustände unter Verwendung von Konzentrations-Zeitreihen in ausgewählten Grundwassermessstellen modelliert.

Beispielhaft für die Ergebnisse sind zwei LCKW-Fahnen für das Jahr 2017 abgebildet: In Abbildung 17 die LCKW-Verteilung in den Dunkelroten Mergeln (DRM) und in Abbildung 18 die LCKW-Verteilung 2017 im Bochinger Horizont (BH). In den grünen Bereichen liegt die Konzentration unter $1 \mu\text{g/l}$, sie sind als LCKW-frei anzusehen. In hellbraunen Bereichen liegt die Konzentration über $1 \mu\text{g/l}$, aber unter $10 \mu\text{g/l}$. Hier sind die Prüfwerte eingehalten und es besteht kein Handlungsbedarf. Für die weitere Bearbeitung interessant sind die mittelbraunen Bereiche zwischen 10 und $100 \mu\text{g/l}$ und zwischen 100 und $1.000 \mu\text{g/l}$ sowie die Konzentrationen über $1.000 \mu\text{g/l}$, die in den oberflächennahen Aquifere Quartär und Mittlerer Gipshorizont auftreten.

Es fällt auf, dass die mittelbraunen Bereiche im Bochinger Horizont (BH) als Hauptaquifer des Oberen Aquifersystems größer sind als die entsprechenden Bereiche in den Dunkelroten Mergeln. Da es nach derzeitigem Kenntnisstand keine LCKW-Direkteinträge in den Bochinger Horizont gibt, müssen alle Einträge über die Dunkelroten Mergel erfolgen. Dabei liegen, wie an AMIIGA 3 beobachtet, in den Bereichen mit LCKW-Tiefenverlagerungen die LCKW-Konzentrationen in den Dunkelroten Mergeln deutlich über denen im Bochinger Horizont (z.B. mit Faktor 10:1). In den Dunkelroten Mergeln liegen die LCKW-Konzentrationen zwischen 100 und $1.000 \mu\text{g/l}$, im Bochinger Horizont dagegen zwischen 10 und $100 \mu\text{g/l}$. Die LCKW können sich im Bochinger Horizont infolge dort höheren Durchlässigkeiten flächig verteilen.

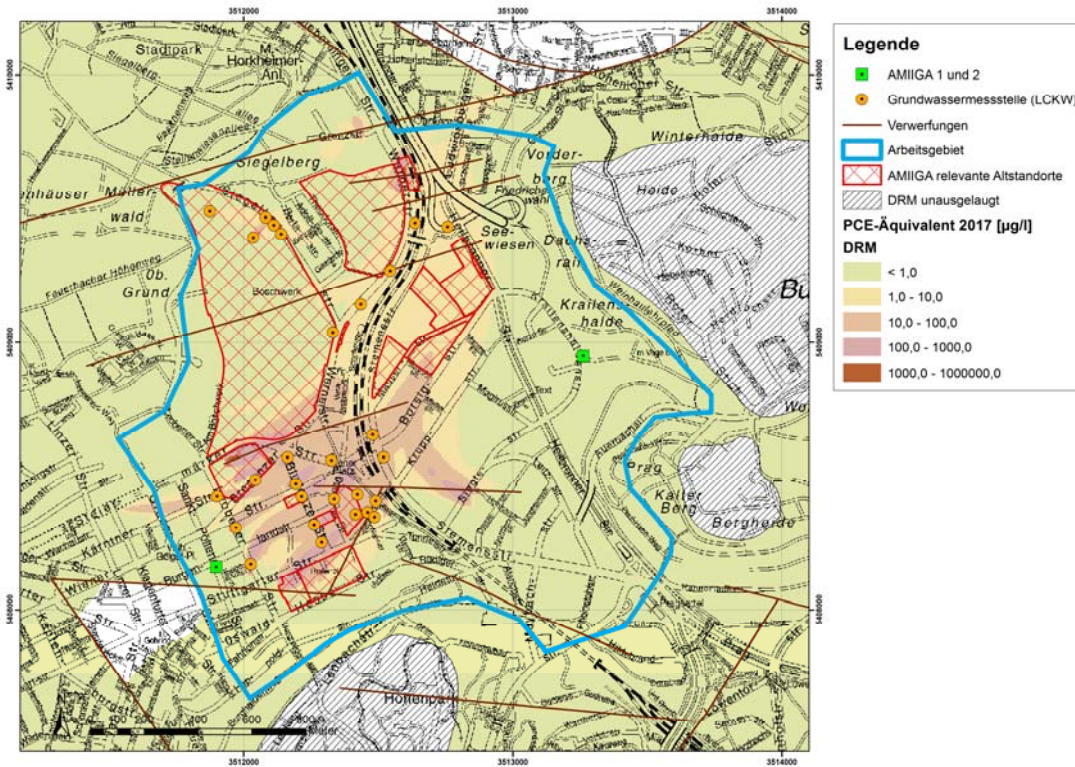


Abbildung 17 Berechnete PCE-Äquivalent-Konzentration in den Dunkelroten Mergeln für 2017 für das Arbeitsgebiet (Lang et al. 2018).

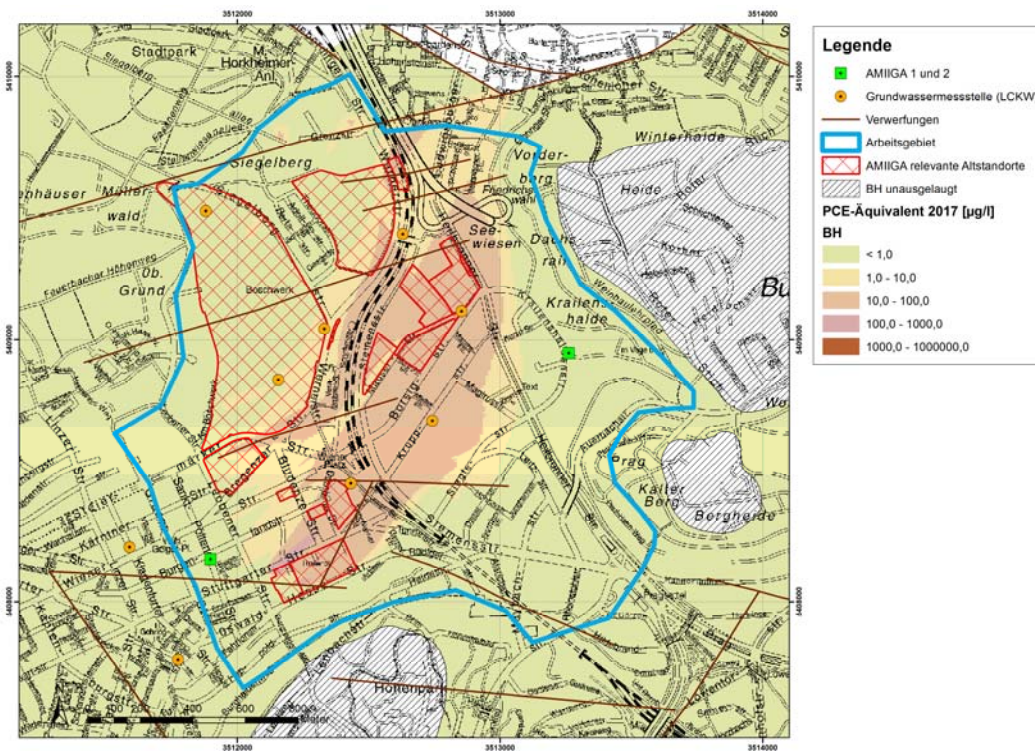


Abbildung 18 Berechnete PCE-Äquivalent-Konzentration im Bochinger Horizont für 2017 für das Arbeitsgebiet (Lang et al. 2018).



Im tiefsten Aquifer des Oberen Aquifersystems, Grundgipsschichten/Grenzdolomit (GGs/GD), der in Feuerbach meist nur sehr gering ergiebig ist, sind zwei Grundwassermessstellen verfiltert. Sie weisen mit 25 µg/l bzw. 140 µg/l gegenüber dem Prüfwert von 10 µg/l erhöhte LCKW-Konzentrationen auf. Dies deutet darauf hin, dass die Schadstoffe bereichsweise zur Tiefe hin bis weit in den Grenzbereich Gips-/Unterkeuper vorgedrungen sind. Dies bestätigt das grundsätzliche Risiko, dass die dort angekommenen Schadstoffe - in entsprechend durchlässigeren Bereichen - in das Untere Aquifersystem absinken. Diese Tiefenverlagerung über Grundgipsschichten/Grenzdolomit bestätigt der Kurzpumptest im offenen Bohrloch von AMIIGA 1, bei dem in fraglichem Aquifer eine LCKW-Konzentration von 79 µg/l gemessen wurde.

Insgesamt belegen die Ergebnisse der numerischen Transportmodellierung, dass die LCKW-Konzentrationen im Arbeitsgebiet 2017 gegenüber 2007 deutlich und großflächig zurückgegangen sind.

Die Gegenüberstellung der Zu- und der Abnahmen der LCKW-Konzentrationen in Tabelle 10 bestätigt den überwiegend deutlichen Rückgang im Arbeitsgebiet. Es handelt sich dabei um eine Auswertung gemessener Konzentrationswerte aus Grundwassermessstellen im Schadenherden und im Abstrom. Von den 110 Grundwassermessstellen (GWM) in Quartär (Q), Mittlerem Gipshorizont (MGH) und Dunkelroten Mergeln (DRM) sind in 75 GWM signifikante Rückgänge der LCKW-Konzentrationen festzustellen. An 29 GWM blieb die Konzentration nahezu konstant. Einer näheren Betrachtung bedürfen die 15 GWM, in denen erhöhte LCKW-Konzentrationen gemessen wurden.

Tabelle 10 Entwicklung der LCKW-Konzentrationen von 2007 bis 2017 in den flachen Grundwassermessstellen (GWM) im Arbeitsgebiet

Aquifer	Abnahme der Konzentration		Keine signifikante Änderung	Erhöhung der Konzentration	
	Anzahl GWM	Differenz [µg/l]	Anzahl GWM	Anzahl GWM	Differenz [µg/l]
Quartär	10	bis-3.000	6	4	bis 5.000
Mittlerer Gipshorizont	44	bis-30.000	13	6	bis-400
Dunkelrote Mergel	21	bis-8.000	3	4	bis-350
Bochinger Horizont	1	bis 20	7	1	bis-60
Grundgipsschichten/Grenzdolomit	3	bis 300	0	0	-
SUMME	79		29	15	

Die Lage der 15 Grundwassermessstellen mit erhöhten LCKW-Konzentrationen ist Abbildung 19 zu entnehmen.

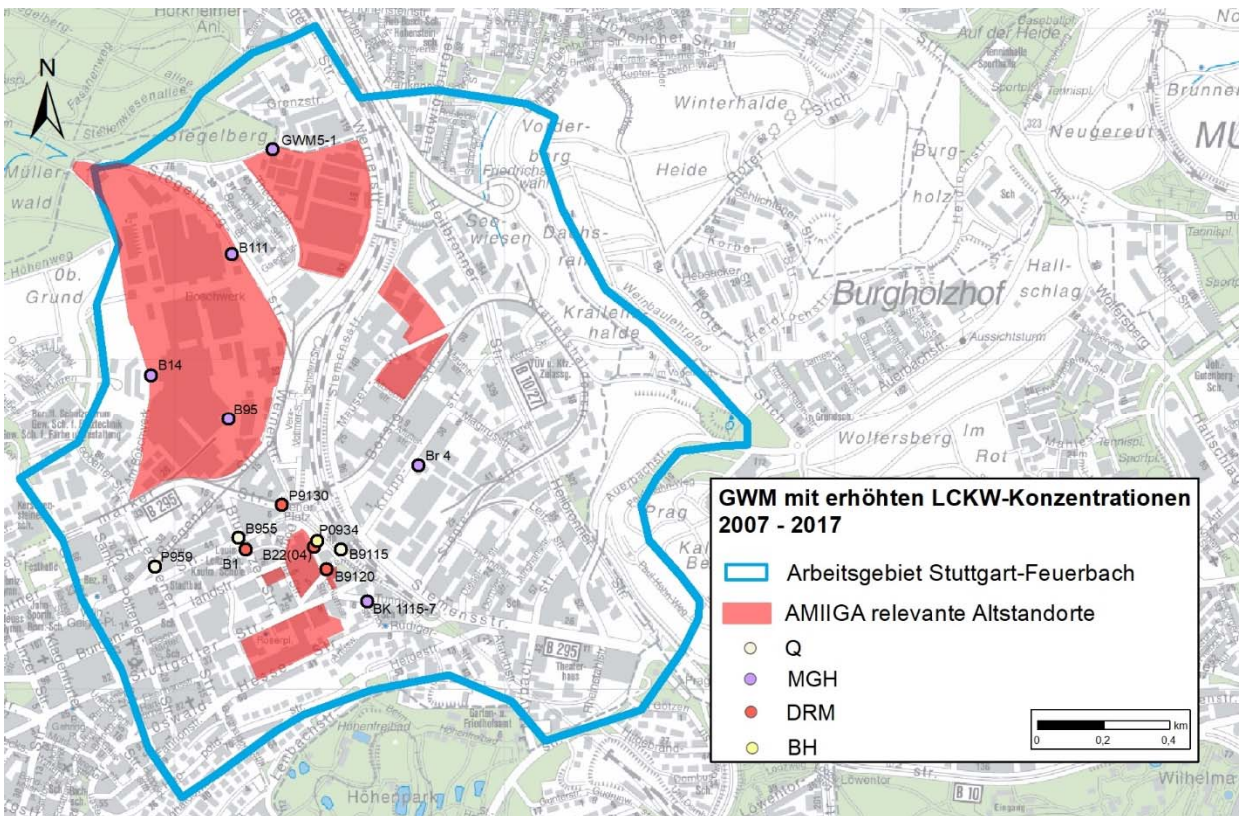


Abbildung 19 Grundwassermessstellen im Arbeitsgebiet, in denen 2017 gegenüber 2007 erhöhte LCKW-Konzentrationen gemessen wurden, eigene Darstellung.

Abbildung 20 und Abbildung 21 zeigen die räumliche Verteilung der Grundwassermessstellen, an denen sich die LCKW-Situation verbessert oder verschlechtert hat. Im Mittleren Gipshorizont ist kein Muster der räumlichen Verteilung der Verschlechterungen erkennbar, was darauf hindeutet, dass es sich um lokale Phänomene handelt. Als „lokale Phänomene“ werden hohe LCKW-Konzentrationen in Grundwassermessstellen verstanden, deren Ausbreitung lokal begrenzt ist und die keine messbaren Schadstofffahnen ausbilden.

In den Dunkelroten Mergeln zeichnet sich jedoch eine Verschlechterung der LCKW-Situation im Bereich Wiener Platz / Bludenzer Straße ab, die sich großräumig auswirkt.

Der Bochinger Horizont ist als Hauptaquifer von besonderer Bedeutung. Schadstoffe, die in diesen Aquifer gelangt sind, erreichen nach den Ergebnissen der numerischen Modellierung mit großer Wahrscheinlichkeit den Oberen Muschelkalk. Eine hohe LCKW-Verunreinigung wird im Bochinger Horizont im Bereich von AMIIGA 1 nachgewiesen. Dieser Bereich erfordert daher weitere Maßnahmen.

Da für die Grundgipsschichten/Grenzdolomit nur drei LCKW-Konzentrations-Werte bekannt sind, wird auf eine Abbildung verzichtet. Bei der numerischen Transportmodellierung wird für diesen Aquifer davon ausgegangen, dass trotz geringer lateraler Durchlässigkeiten vertikale Wegsamkeiten an tektonischen Strukturen vorliegen, die für ein weitgehende Vertikalverlagerung der LCKW in das Untere Aquifersystem verantwortlich sind.

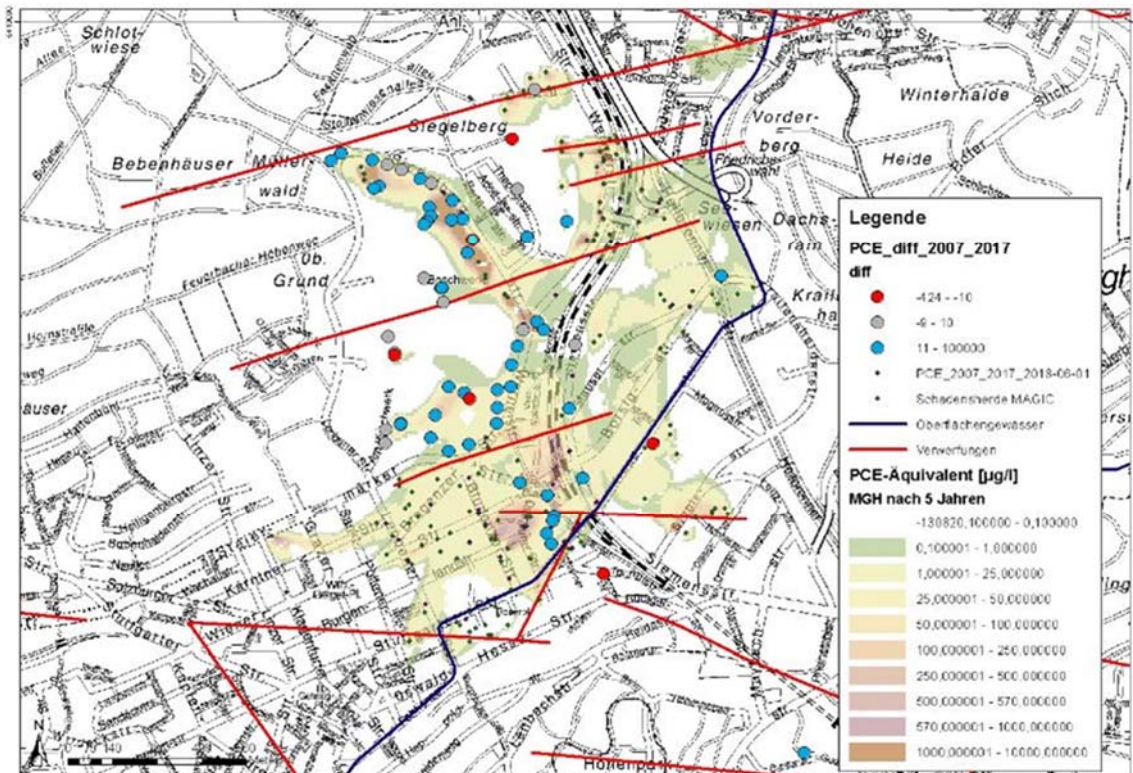


Abbildung 20 LCKW-Konzentrationsänderung 2007-2017 im Mittleren Gipshorizont (MGH). Verschlechterungen: rot; Verbesserung: blau (Lang et al. 2018).

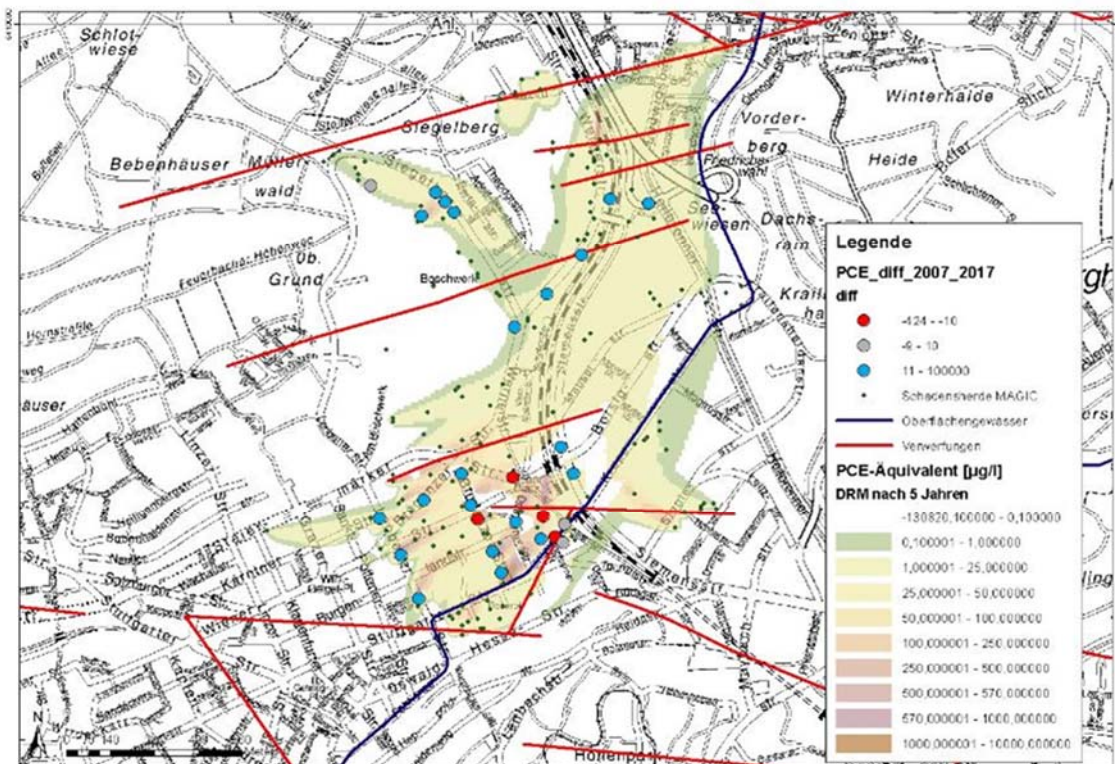
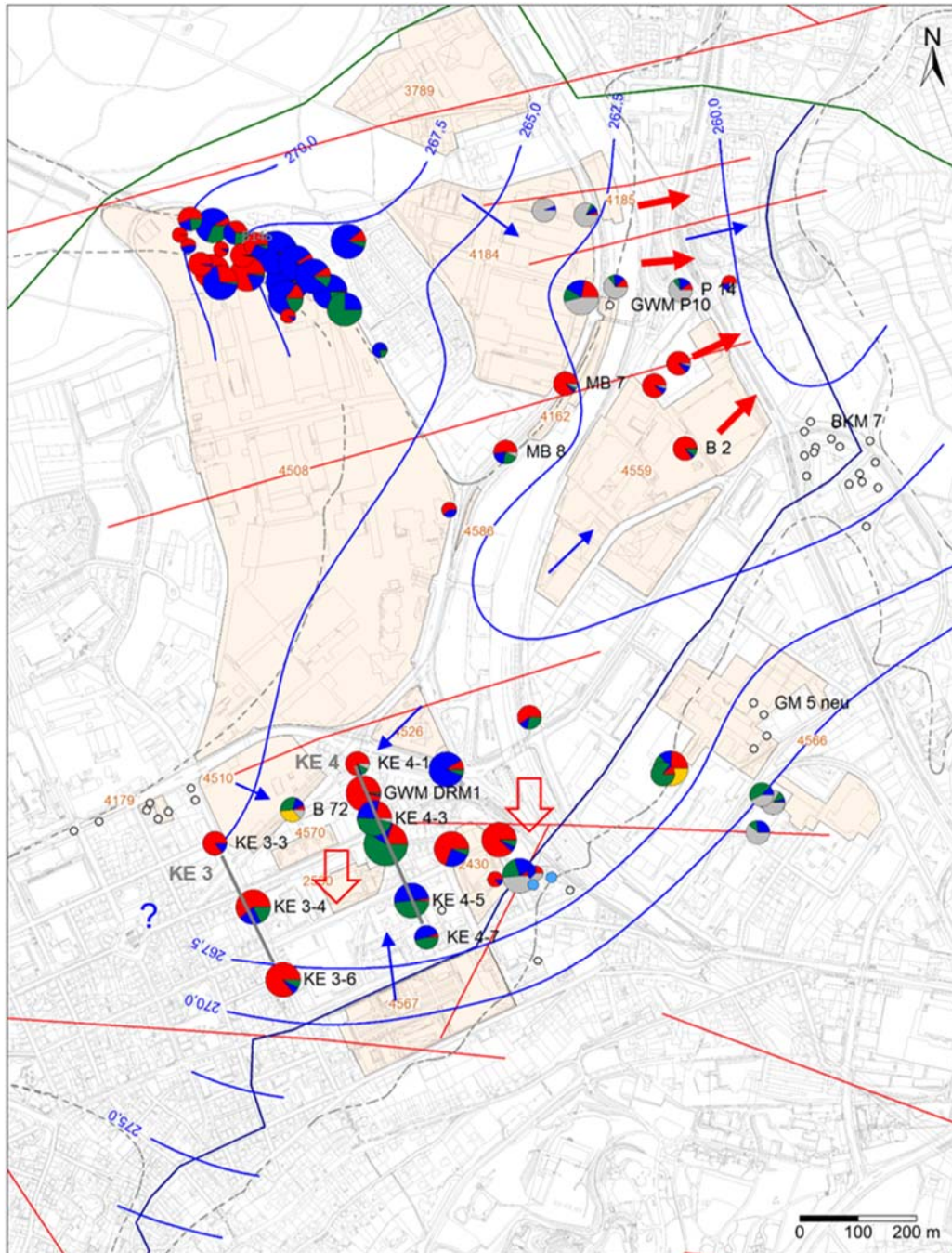


Abbildung 21 LCKW-Konzentrationsänderung 2007-2017 in den Dunkelroten Mergeln (DRM). Verschlechterung: rot; Verbesserung: blau (Lang et al. 2018).

Aus Abbildung 22 ist zu erkennen, dass die Grundwasserströmung im südlichen Bereich des Arbeitsgebietes, in denen die Grundwassermessstellen der MAGIC-Kontrollebenen KE 3 und KE 4 liegen, auch in den Dunkelroten Mergeln auf die Depression ausgerichtet ist. In einer Simulation war es mit Hilfe des numerischen Transportmodells möglich, im südlichen Bereich eine Vertikalverlagerung bis in den Oberen Muschelkalk nachzubilden. Das bestätigt die Annahme, dass in diesem Bereich, insbesondere entlang der Verwerfung, angesichts der stark abgesunkenen Grundwasserspiegel ein besonderes Risiko der vertikalen Verlagerung in das Untere Aquifersystem besteht.

Nicht alle LCKW-Fahnen können im Transportmodell bekannten, meist in der Sanierung befindlichen LCKW-Emittenten (Schadstoffherden) zugeordnet werden. Es gibt LCKW-Fahnen unbekannter Herkunft, die von noch zu ermittelnden Schadstoffherden ausgehen. Der Bereich AMIIGA 1 ist dafür ein gutes Beispiel.

Die Suche nach den Schadstoffherden wird dadurch erschwert, dass sich verschiedene Schadstoff-fahnen überlagern und vermischen. Insbesondere angesichts stark veränderlicher Grundwassersdrückhöhen sind Transportvorgänge teilweise instationär, die Strömungsrichtung kann sich zeitlich ändern (dies gilt für den Bereich um AMIIGA 1, siehe Abbildung 22, aber auch für den Bereich Wiener Platz). Vertikalverlagerungen finden meist an unbekanntem Stellen statt. Sie können nur modelliert werden, wenn zusätzliche Informationen über die vertikale Durchlässigkeit und die Wirkung von Verwerfungen verfügbar wären. Erschwert wird die Suche auch durch Sekundärschadstoffherde, die i.d.R. nicht lokalisierbar sind. Die Zusammensetzung der LCKW-Fahnen kann sich durch Schadstoffab- und -umbau verändern. Aus allen diesen Gründen ist es in der Regel notwendig und sehr aufwändig, die Entstehung von Fahnen mit unbekanntem Schadstoffherd technisch zu untersuchen.



Legende

- Arbeitsgebiet Stuttgart-Feuerbach
 - Feuerbach
 - Grundwasserhöhengleiche (Stichtagsmessung Jan./Feb. 2017), m ü. NN
 - Haupteintragsbereich
 - - - - - Talrand
 - Verwerfung
 - GWM
 - Fließrichtung
- LCKW-Summenkonzentration [$\mu\text{g/l}$]
- < BG
 - < 10
 - > 10
 - > 100
 - > 1.000
- Stoffmengenanteil [Mol-%]
- PCE
 - TCE
 - cDCE
 - VC
 - andere
- Horizontaler Schadstoffabstrom
 - ↓ Vermuteter vertikaler Schadstoffabstrom

Abbildung 22 LCKW-Konzentrationen und Fließverhältnisse in den Grundwassermessstellen der Dunkelroten Mergel im Arbeitsgebiet 2015-2017 (Guthke und Schollenberger 2017c).

3.2. LCKW-Situation im FUA

Das Untere Aquifersystem von Unterkeuper (ku) und Oberem Muschelkalk (mo) wird im Stadt-Umland-Gebiet (FUA) von 27 Grundwassermessstellen (GWM) erschlossen. Diese können dem Zustrom zum Arbeitsgebiet, dem Arbeitsgebiet selbst, dem Abstrom oder randlichen Bereichen zugeordnet werden (siehe Abbildung 23).

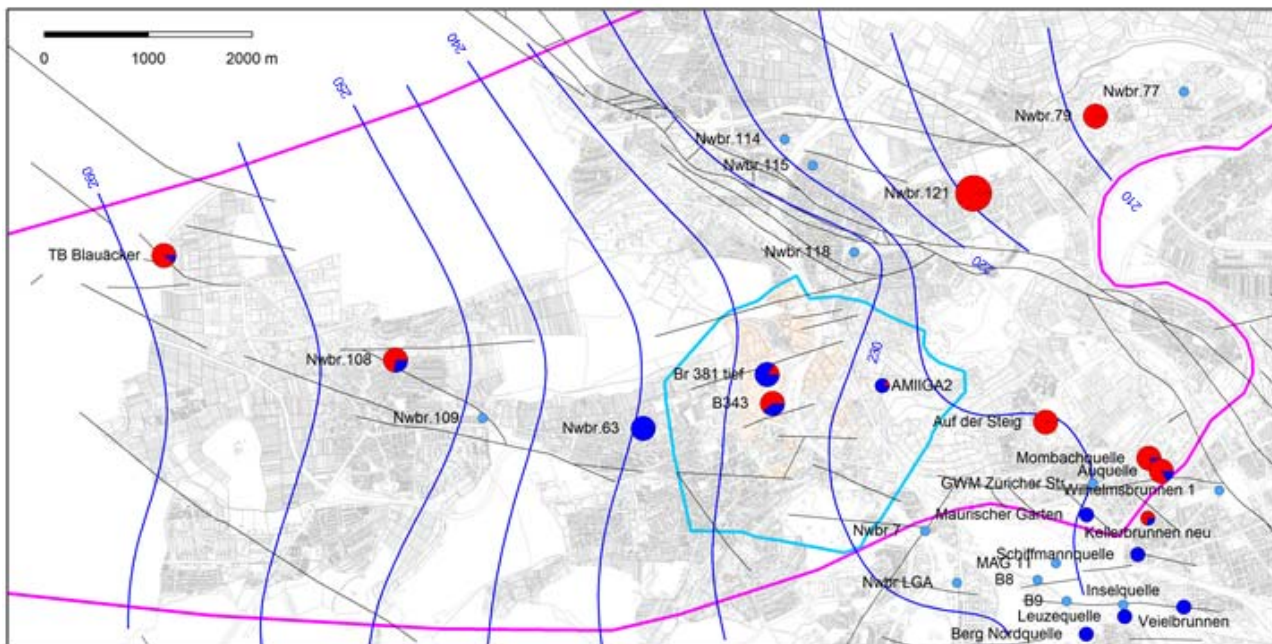
Es ist bekannt, dass auch im Zustrom zum Arbeitsgebiet, d.h. in Ditzingen und Weilimdorf LCKW-Einträge stattfinden, die das Grundwasser im Oberen Muschelkalk negativ beeinflussen. Die in Abbildung 23 dargestellten LCKW-Konzentrationen im Unteren Aquifersystem zeigen, dass im Zustrom zum Arbeitsgebiet gering erhöhte LCKW-Gehalte vorliegen (in Notwasserbrunnen (Nwbr. 108 (ku/mo): 3 µg/l PCE, 1 µg/l TCE und in Nwbr. 63 (km-mo): 2 µg/l TCE, 1 µg/l cDCE). Damit strömt dem Arbeitsgebiet gering LCKW-kontaminiertes Grundwasser zu.

Bis in die 1990er Jahre gab es im Arbeitsgebiet Brunnen (z.B. Betriebsbrunnen), die stockwerksübergreifend bis in den Oberen Muschelkalk ausgebaut waren und zur Vertikalverschleppung von Schadstoffen beigetragen haben. Diese Brunnen wurden vollständig verschlossen oder saniert, d.h. die direkten hydraulischen Verbindungen zum Oberen Muschelkalk wurden unterbunden und die Stockwerkstrennung wurde wiederhergestellt. Daher sind künstliche Direkteinträge in den Oberen Muschelkalk im Arbeitsgebiet heute auszuschließen.

In Bereichen, in denen ein nach unten gerichtetes hydraulisches Gefälle vorliegt (wie z.B. im südwestlichen Teil des Arbeitsgebiets Feuerbach), erfolgt die Vertikalverlagerung bei entsprechenden homogenen Wegsamkeiten mehr oder weniger flächig, aber auch bevorzugt entlang von Verwerfungen.

Die numerische Transportmodellierung konzentriert sich auf den mächtigen, hoch ergiebigen und wasserwirtschaftlich überregional bedeutsamen Aquifer des Oberen Muschelkalks. Die Konzentration der Betrachtung des Unteren Aquifersystems auf den Oberen Muschelkalk ist möglich, da Schadstoffe, die in den Unterkeuper gelangen, früher oder später in den Oberen Muschelkalk gelangen.

Die Transportmodellierung bestätigt einen flächigen LCKW-Eintrag aus dem Arbeitsgebiet in den Oberen Muschelkalk von ca. 4 g/d. (Lang et al. 2018). Daraus resultiert theoretisch eine Erhöhung der LCKW-Konzentration im Grundwasser des Oberen Muschelkalks mit maximal 3 µg/l.



Legende

- Arbeitsgebiet
 - FUA S-Feuerbach
 - Haupteintragsbereich
 - GWM
 - Grundwasserhöhengleiche (Stichtagsmessung Juli 2018), m ü. NN
 - Verwerfung
- LCKW-Summenkonzentration [$\mu\text{g/l}$]
- < BG
 - < 1
 - > 1
 - > 10
- Stoffmengenanteil [Mol-%]
- PCE
 - TCE
 - cDCE
 - VC
 - andere

Abbildung 23 Aktuellste LCKW-Analysen in den Messstellen des ku/mo-Systems in der FUA seit 2010, Guthke et al. 2018c.

Wichtige Erkenntnisse über den LCKW-Transport im Oberen Muschelkalk ergeben sich aus der neu eingerichteten, 94 m tiefen Grundwassermessstelle AMIIGA 2. Das LCKW-Spektrum in AMIIGA 2 wird bei geringe LCKW-Konzentrationen von kleiner $0,7 \mu\text{g/l}$ von TCE dominiert (hellroter Bereich in Abbildung 24).

Die letzte Beprobung beim Immissionspumpversuch ergab nach 4 Tagen Pumpdauer Werte von $1,8 \mu\text{g/l}$ PCE und $0,6 \mu\text{g/l}$ TCE. Der LCKW-Gehalt von $2,4 \mu\text{g/l}$ kann so interpretiert werden, dass eine Schadstofffahne am Rand von AMIIGA 2 erfasst worden ist. Diese Fahne ist in Abbildung 24 exemplarisch rot eingetragen. Die Fahne könnte auch nördlich oder an beiden Rändern vorbeiströmen. Bei Annahme einer einseitig an AMIIGA 2 vorbeiströmenden LCKW-Fahne ergeben sich rechnerisch unter der Annahme, dass in einer Distanz von 38 Metern eine LCKW-Fahne einseitig an AMIIGA 2 vorbeiströmt, maximal mögliche Konzentrationen von $12 \mu\text{g PCE/l}$ und $2,6 \mu\text{g TCE/l}$ (Guthke et al. 2018c). Die Worst-Case-Berechnung beruht auf einem einzigen Messwert.

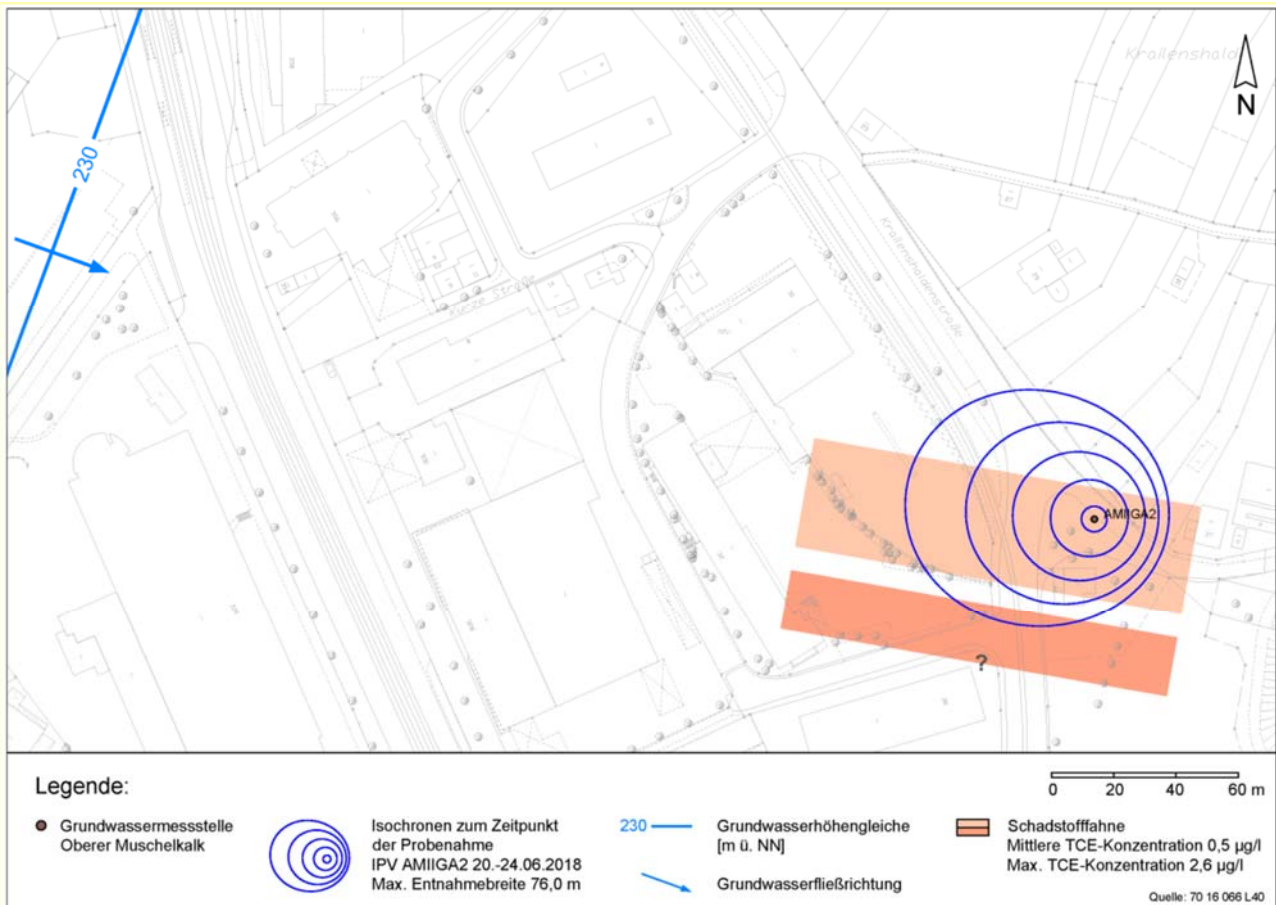


Abbildung 24 Isochronen und TCE-Schadstofffahne beim IPV in AMIIGA2 (Guthke et al. 2018c).

Mit Hilfe des numerischen Transportmodells wurde auch ein möglicher Zusammenhang untersucht, der zwischen der berechneten Schadstofffahne im Oberen Muschelkalk und dem PCE-Eintrag im Bereich der Depression Leobener/St. Pölterner Straße, der im Bochinger Horizont, in Grundgipsschichten bzw. Grenzdolomit durch AMIIGA 1 erfasst wird, bestehen könnte (siehe Abbildung 25). Als Ergebnis kann im Modell keine hydraulische Verbindung hergestellt werden. Der Abstrom des Depressionsbereichs um AMIIGA 1 ist eher in der Muschelkalk-Grundwassermessstelle „Auf der Steig“ zu suchen.

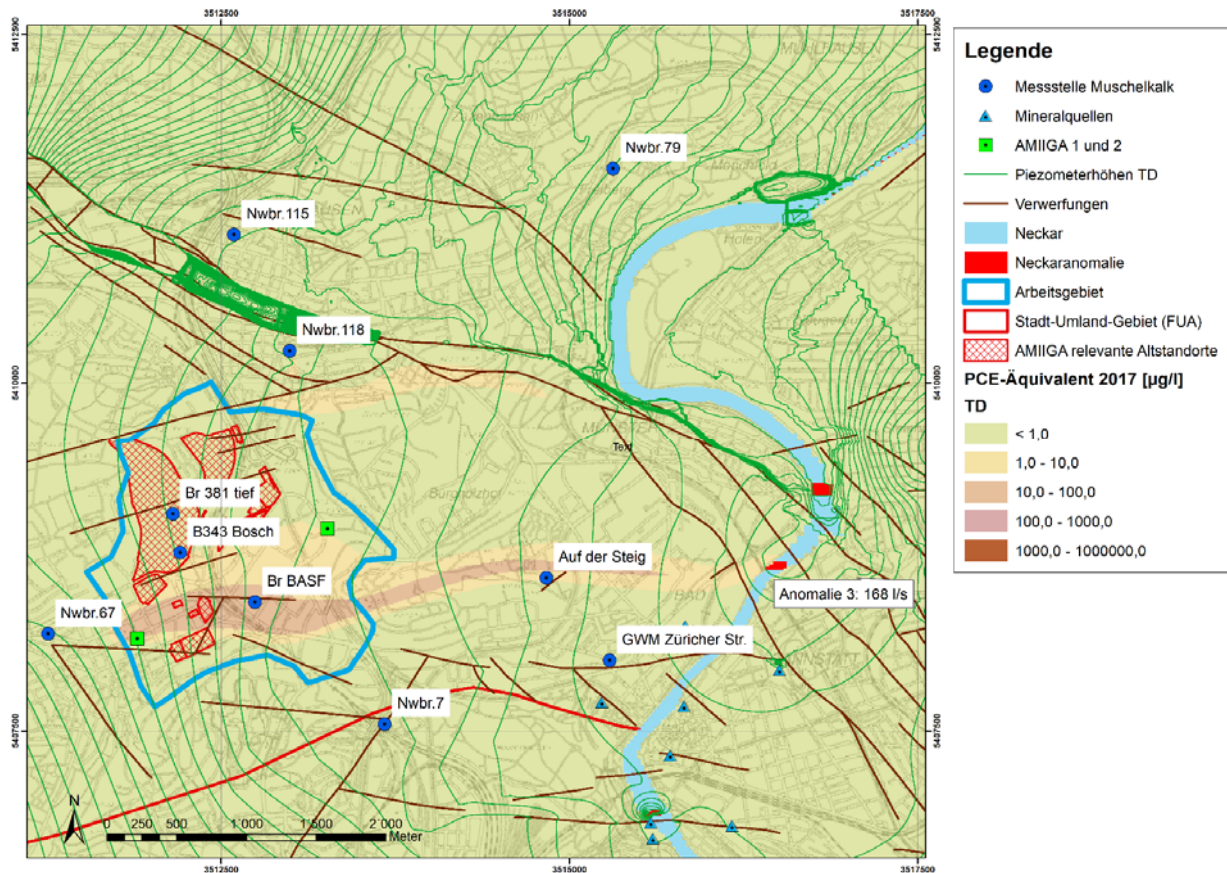


Abbildung 25 LCKW-Konzentration 2017 im Arbeitsgebiet im Oberen Muschelkalk, Lang et al. 2018.

In Abbildung 26 ist der Zustrombereich von AMIIGA 2 blau dargestellt, der mit Hilfe der numerischen Modellierung durch Rückwärtstransportberechnung ermittelt wurde. Die durch AMIIGA 2 erfasste Abstrombreite von rund 76 Metern nach 4-tägigem IPV erfasst mit 8 % der Gesamtabstrombreite des Arbeitsgebiets von rund 1.000 Metern einen kleinen, wenn auch zentralen Teil. Die Breite des Einzugsgebietes hängt wesentlich von den gewählten Randbedingungen (z.B. der den Fahnenrand begrenzenden Konzentration) ab. Die in AMIIGA 2 gemessenen LCKW-Konzentrationen lassen sich nicht eindeutig zuordnen, sie können von Br. 381 tief, aber auch von B 343 stammen.

Die numerische Transportmodellierung (Lang et al. 2018) gibt keinen Hinweis auf einen Abstrom von LCKW aus dem Arbeitsgebiet in Richtung auf die Mineral- und Heilquellen. Sie zeigt vielmehr auf, dass dieser im hydrogeologischen Modell (Guthke und Schollenberger 2017c) diskutierte Zusammenhang vielmehr praktisch ausgeschlossen werden kann.

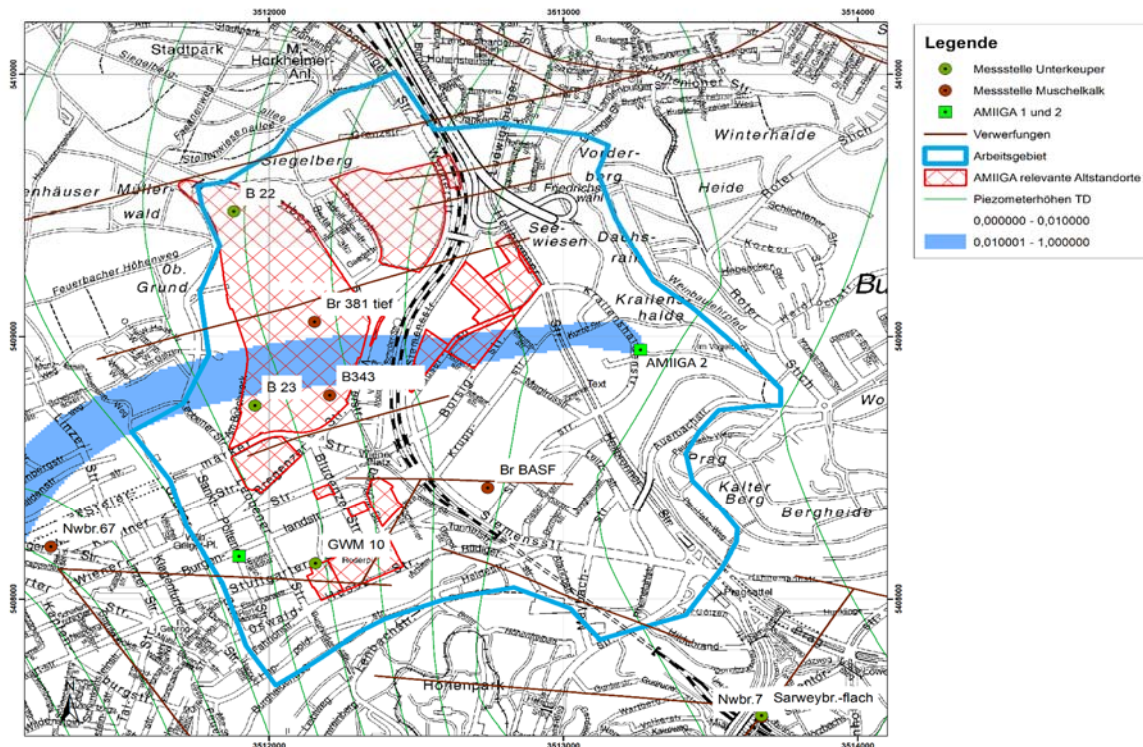


Abbildung 26 Berechneter Zustrombereich im Arbeitsgebiet auf AMIIGA 2, Lang et al. 2018.

Die Zusammenstellung der Untersuchungsergebnisse (Abbildung 23) gibt Hinweise auf randliche LCKW-Fahnen, z.B. in Nwbr. 121 (ku/mo) mit $23 \mu\text{g/l}$ PCE. Der Muschelkalk-Aquifer kann hier durch LCKW-Einträge beeinträchtigt werden. Die für diese Verunreinigung verantwortlichen Schadstoffeintragsstellen sind jedoch nicht im Arbeitsgebiet zu suchen, sondern - wegen der dort vorherrschenden geringen Überdeckung des Oberen Muschelkalks - vermutlich nördlich der Fildergrabenrandverwerfung.

3.3. Mikrobiologischer LCKW-Abbau

Die dominierenden LCKW im Arbeitsgebiet sind die Chlorethene Tetrachlorethen (PCE) und Trichlorethen (TCE), die als Reinigungs- und Lösemittel im Einsatz waren. Bei Dichlorethen (DCE) und Vinylchlorid (VC) handelt es sich dagegen um LCKW, die durch anaerobe mikrobiologische Abbauprozesse aus PCE und TCE entstehen. Ein Nachweis von DCE und VC belegt, dass anaerobe Abbauprozesse stattfinden.

Bei der MAGIC-Modellierung für das Jahr 2007 konnten die im weiteren Abstrom der Schadensherde gemessenen LCKW-Gehalte nur dadurch nachgebildet werden, dass ein flächiger LCKW-Abbau berücksichtigt wurde.

Zu der im Vergleich zu 2007 im Jahr 2017 deutlich verbesserten Belastungssituation tragen neben den zahlreichen Sanierungsmaßnahmen auch mikrobielle Abbauprozesse bei, die in den Schadensherden stattfinden. Im FOKS-Projekt wurden diese an verschiedenen Stellen im Arbeitsgebiet nachgewiesen (Spitzberg und Schollenberger 2011). Es ist also davon auszugehen, dass mikrobiologische Abbauprozesse sowohl im Bereich der Schadensherde als auch im Grundwasserabstrom stattfinden.

Im AMIIGA-Projekt wurden weitere Untersuchungen zum mikrobiellen Abbau in den Aquiferen durchgeführt, um ein besseres Verständnis dieser Prozesse zu erlangen (Schollenberger et al. 2018). Zum Einsatz kamen substanzspezifische Analysen auf stabile Kohlenstoffisotope (CSIA) und Bio-Molecular Tools (BMT) zur Bestimmung und Quantifizierung der DNA verschiedener schadstoffabbauender Bakterien, darunter auch die zur vollständigen reduktiven Dechlorierung fähigen Bakterien der Gattung *Dehalococcoides*. BMT-Befunde geben durch Nachweis der entsprechenden Spezies Hinweise auf die Art der unter den örtlichen Gegebenheiten ablaufenden Abbauprozesse.

Im Juli 2017 wurden an neun Grundwassermessstellen Proben zur CSIA- und BMT-Analyse entnommen, später erfolgte auch eine Probenahme an AMIIGA 1 (siehe Abbildung 27). Ergänzend zu den Grundwasserproben wurden in fünf Messstellen perforierte Rohrstücke, sogenannte „BMT Tubes“ zum Langzeitmonitoring eingehängt. Den Tubes konnten zu verschiedenen Zeitpunkten fadenförmige Kunststoffelemente, sogenannte „Carrier“ entnommen werden. Dadurch konnte die zeitliche Entwicklung der biologischen Aktivität beobachtet werden. Die Carriers wurden im Dezember 2017 und März 2018 ausgebaut und zur mikrobiellen Untersuchung zur Universität Liberec (Projektpartner) geschickt.

Die Untersuchungsergebnisse weisen nach, dass südwestlich der Leobener Straße (MAGIC-Kontroll Ebene 3) grundsätzlich anaerobe LCKW-Abbauprozesse stattfinden. In den Proben aus den Messstellen KE3-6, KE4-3, KE4-5 und B 72 konnten Bakterien der Gattung *Dehalococcoides* nachgewiesen werden. Beim Langzeitmonitoring wurden auch in der Muschelkalk-Messstelle B 343 *Dehalococcoides* nachgewiesen. In hohen Konzentrationen waren die Bakterien allerdings nur in der Messstelle B 72 vorhanden; dort liegen streng anaerobe Verhältnisse vor, die durch einen Teerölschaden verursacht sind. In den übrigen Messstellen waren die Bakterien nur in geringer Konzentration nachweisbar.

Neben den anaerob dechlorierenden Bakterien konnten im Langzeitmonitoring in allen untersuchten Messstellen auch aerobe VC-Reduktasen nachgewiesen werden und zwar in relativ hoher Konzentration. Dieser Befund belegt, dass im Arbeitsgebiet anaerobe und aerobe Prozesse nebeneinander ablaufen.

Die Ergebnisse der CSIA-Untersuchungen decken sich grundsätzlich mit den Ergebnissen der BMT-Untersuchungen. Intensiver anaerober Abbau konnte nur in der Messstelle B 72 festgestellt werden. In den übrigen untersuchten Messstellen deuten die Ergebnisse auf einen nur verhältnismäßig geringen anaeroben Abbau hin.

In der Muschelkalk-Messstelle B343 waren die LCKW-Konzentrationen für eine Isotopenuntersuchung (CSIA) zu gering.

Im November 2017 wurden an der neuen Messstelle AMIIGA 1 CSIA-Untersuchungen im Grundwasser des Bochinger Horizonts und des Grenzdolomits durchgeführt. Stabile Kohlenstoffisotope konnten nur an PCE bestimmt werden, die übrigen LCKW-Einzelsubstanzen waren nur in sehr geringer Konzentration nachweisbar oder nicht bestimmbar. Die gemessenen PCE-Signaturen lassen auf keinen intensiven anaeroben Abbau schließen.

Als Fazit der CSIA-/BMT-Untersuchungen bleibt festzuhalten, dass im Untersuchungsgebiet verbreitet aerobe, bereichsweise auch anaerobe mikrobielle Abbauprozesse ablaufen. Die anaeroben Abbauprozesse vollziehen sich, bis auf wenige anaerobe Bereiche, meist aber in relativ geringer Intensität. Intensiver anaerober Abbau konnte nur in der durch den Teerölschaden beeinflussten Messstelle B 72 festgestellt werden.

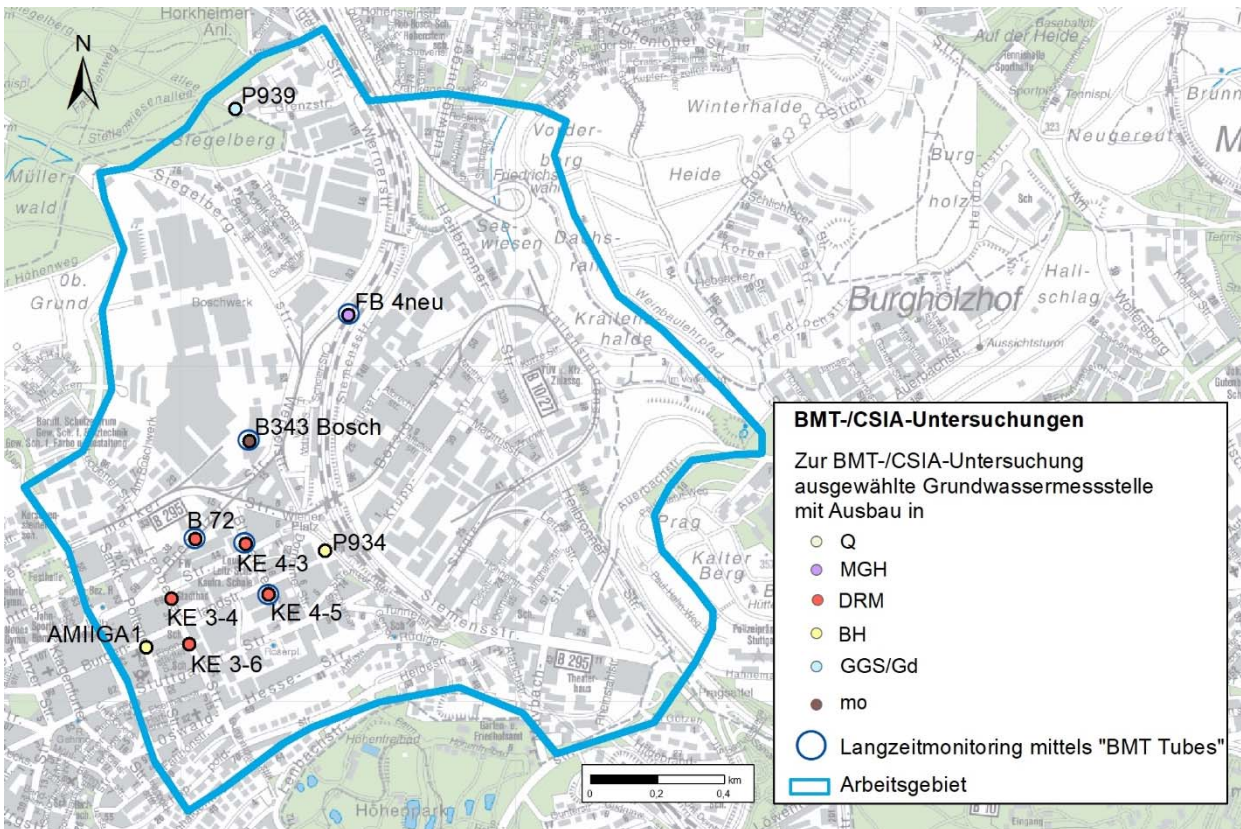


Abbildung 27 Lage der für die BMT-/CSIA-Untersuchungen an acht ausgewählten GWM und an AMIIGA 1, eigene Darstellung.

Bei der numerischen Modellierung wurde eine Abbaurrate von 20 % angesetzt, die erforderlich ist, um die in den im weiteren Abstrom des Arbeitsgebiets gelegenen Grundwassermessstellen gemessenen LCKW-Konzentrationen (PCE-Äquivalente) nachbilden zu können.

4. Qualitätsziele

Die Qualitätsanforderungen an Grundwässer sind in Deutschland in zwei unterschiedlichen Vorschriften geregelt:

- × Die Bundes-Bodenschutz- und Altlastenverordnung vom 12. Juli 1999 (BBodSchV) enthält Regelungen zum nachsorgenden Bodenschutz mit Vorsorge-, Prüf- und Maßnahmenwerten. Auf Basis der BBodSchV wird in Baden-Württemberg für LCKW-verunreinigte Standorte grundsätzlich die Einhaltung eines Prüfwertes von 10 µg/l angestrebt, die beim Eintrag von Sickerwasser ins Grundwasser einzuhalten sind. Alternativ ist in Baden-Württemberg im Abstrom eines Schadstoffherdes eine Konzentration von 10 µg/l bei einer maximalen Fracht von 20 g/d einzuhalten.
- × Die Grundwasserverordnung (GrwV) vom 16. November 2010 definiert in Anlage 2 einen Schwellenwert von 10 µg/l für die Summe aus Tri- und Tetrachlorethen (Perchlorethen) für Grundwasserkörper. Werden die Schwellenwerte überschritten, so sind nach § 13 GrwV Maßnahmen zur Verhinderung oder Begrenzung von Schadstoffeinträgen in das Grundwasser zu ergreifen.

4.1. Allgemeine Qualitätsziele

Aus den Vorschriften können allgemeine Qualitätsziele für das Grundwasser abgeleitet werden:

Priorität 1: Vermeidung von Schadstoffeinträgen von mehr als 10 µg/l aus dem Oberen ins Untere Aquifersystem (Hauptaquifer: Oberer Muschelkalk).

Priorität 2: Verringerung der Schadstofffrachten von LCKW-Fahnen in den Quartär- und Gipskeuperschichten außerhalb der Schadstoffherde und Altstandorte, so dass eine Konzentration von 10 µg/l nicht überschritten wird. Diese Anforderung sollte vorrangig auf den Hauptaquifer des Oberen Aquifersystems, den Bochinger Horizonts (BH) angewendet werden.

Priorität 3: Verringerung der Emissionen aus den Schadensherden (Ziele: Abstromkonzentration kleiner 10 µg/l, Abstromfracht kleiner 20 g/d).

Standorte, deren LCKW-Kontamination sich auf den Aquifer des Oberen Muschelkalks auswirken, sind mit einer höheren Priorität zu behandeln als Standorte, deren LCKW-Einträge sich nur lokal auswirken.

Die Zielerreichung soll durch ein geeignetes „integrales“ Monitoringmessnetz überwacht werden.

4.2. Erreichbare Ziele

4.2.1. Praktische Erfahrungen

Seit 1983/84 wurden in Feuerbach zahlreiche Standortsanierungen durchgeführt. 2018 wurden immer noch 86 Sanierungsbrunnen betrieben. Die Sanierungsstandorte unterscheiden sich erheblich: Großen Standorten mit geschätzt rund 100 Sanierungseinrichtungen (einschließlich Bodenluftabsauganlagen) stehen kleine Standorte mit einer einzigen Sanierungseinrichtung gegenüber. Häufig eingesetzte Sanierungsverfahren zur Entfernung von LCKW sind Pump & Treat im Grundwasser und Bodenluftabsaugung in der ungesättigten Bodenzone. Darüber finden ggf. im Rahmen von Baumaßnahmen Aushubsanierungen statt.

Bei den hydraulischen Sanierungsmaßnahmen werden Sanierungsziele vereinbart, die sich an den Prüfwerten der BBodSchV orientieren. Der Konzentrations-Zielwert im Abstrom für LCKW von 10 µg/l konnte bisher in keinem bekannten Fall durch Sanierungsmaßnahmen erreicht werden. Selbst eine LCKW-Konzentration von 100 µg/l im Abstrom stellt in manchen Fällen eine hohe Hürde dar. Zeigt sich im Verlauf der Sanierung, dass der Konzentrations-Zielwert nicht erreicht werden, so werden höchstzulässige Schadstofffrachten (E_{\max} -W) zur Abwägung hinzugezogen.

Hohe verbleibende LCKW-Konzentrationen können dadurch bedingt sein, dass

- × die Durchlässigkeit des Untergrundes, insbesondere der Schichten des Quartärs und des Gipskeupers, generell sehr gering ist (k_f -Werte kleiner 10^{-5} m/s). Die LCKW reichern sich in kleinsten Klüften und Poren an und sind von dort nur sehr schwer mobilisierbar, verteilen sich jedoch langfristig diffusiv;
- × sich die LCKW mit dem Grundwasser bewegt haben (migriert sind) und sich dadurch Sekundärschadstoffherde ausgebildet haben, die praktisch nicht lokalisiert werden können.

4.2.2. Zieldefinition für den Maßnahmenplan

Angesichts der Gefährdung der tieferen Grundwasserleiter, insbesondere des Mineralwasserträgers Oberer Muschelkalk, durch lokale Stockwerksverbindungen und unter Berücksichtigung der gegenüber 2007 deutlich zurückgegangenen Schadstoffpotenzial werden im Managementplan für Feuerbach die Bereiche näher betrachtet, in denen im Abstrom eine LCKW-Konzentration von 100 µg/l überschritten wird. Aufgrund der in Kapitel 2.2 beschriebenen Relationen der Grundwasser-Volumenströme wird damit in einem ersten Schritt erreicht, dass im Oberen Muschelkalk keine LCKW-Konzentrationen größer 10 µg/l auftreten. Ein guter Zustand wird sichergestellt, wenn auch im Bochinger Horizont, der in den Oberen Muschelkalk entwässert, 10 µg/l eingehalten werden.

5. Schlussfolgerungen

Mit Hilfe der integralen Untersuchung für das Jahr 2017 konnte nachgewiesen werden, dass die bisher im Arbeitsgebiet ergriffenen Sanierungsmaßnahmen zwingend notwendig waren. Sie sind wirksam und weiterhin notwendig, um zu verhindern, dass LCKW in das Untere Aquifersystem gelangen.

Angesichts der im Oberen Aquifersystem stark abgesunkenen Grundwasserdruckspiegel wird deutlich, dass sich die reduzierte Grundwasserneubildung, die auch als Folge des Klimawandels betrachtet werden kann, im Arbeitsgebiet Feuerbach negativ auf den Grundwasserhaushalt auswirkt. Auch beim Einsatz von Pump & Treat Maßnahmen ist eine Grenze erreicht. Eine weitere Erhöhung der Entnahmemengen ist angesichts der bereichsweise bereits erfolgten Trockenlegung der oberen Aquifere und einer Absenkung der Druckhöhen im Hauptaquifer Bochinger Horizont nur begrenzt möglich und sinnvoll.

Die integrale Untersuchung zeigt aber auch, dass in einigen Bereichen des Arbeitsgebiets Feuerbach immer noch unerkannte Schadstoffherde vorliegen, die in einigen Grundwassermessstellen zu einer Erhöhung der LCKW-Grundwasserkonzentration im Vergleich zu 2007 führen. Hier besteht Untersuchungs- und ggf. Sanierungsbedarf. Dabei ist auch zu klären, ob die Konzentrationserhöhungen durch das geringere Grundwasserdargebot bedingt sind.

Der Aufbau eines integralen Monitoring-Netzes im Bochinger Horizont als Hauptaquifer des Oberen Systems hat sich angesichts seiner dränierenden und damit integrierenden Wirkung als technisch und wirtschaftlich sinnvoll erwiesen.

Die durchgeführten Untersuchungen, die hydrogeologischen und die numerischen Modellierungen (insbesondere Lang et al. 2018) führen im Einzelnen zu folgenden Erkenntnissen:

- × Im Oberen Aquifersystem waren 2017 auffällige Grundwasser-Tiefstände festzustellen. Diese sind auf eine verringerte Grundwasserneubildung, aber auch auf zahlreiche Grundwasserentnahmen und auf Sanierungsmaßnahmen durch Pump & Treat zurückzuführen.
- × Quartär und Mittlerer Gipshorizont sind in manchen Bereichen trockengefallen, die Wasserführung der Aquifere im Oberen Aquifersystem hat allgemein stark abgenommen.
- × Die extremsten Tiefstände des Grundwasserdruckspiegels wurden im Bochinger Horizont festgestellt.
- × Die veränderlichen Grundwasserstände beeinflussen erheblich die Grundwasserströmung im Oberen Aquifersystem. Die Grundwasserfließrichtungen können sich lokal vollständig umkehren.



- × Die zeitliche Entwicklung der Druckspiegel-im Unteren Aquifersystem weicht signifikant von der des Oberen Systems ab. Im Unteren System ist - im Gegensatz zum Oberen Aquifersystem - großräumig eine Erhöhung der Druckspiegel zu beobachten.
- × Die großräumige Modellierung der Grundwasserströmung im Oberen Muschelkalk liefert weitere Argumente dafür, dass das Arbeitsgebiet Feuerbach nicht in die Mineral- und Heilquellen, sondern in den Neckar entwässert.
- × Die durchgeführten Maßnahmen zur Sanierung der Hauptemittenten sind erfolgreich: Insgesamt ist 2017 ein deutlicher Rückgang der LCKW-Emissionen aus Schadstoffherden ins Grundwasser um mehr als 60 % gegenüber 2007 festzustellen. (Lang et al. 2018).
- × 75 % der an den Schadensherden ins Grundwasser eingetragenen LCKW-Frachten werden durch die bestehenden Sanierungsmaßnahmen (Grundwasserentnahmen) bei den Hauptemittenten entzogen. Insofern ist die Aufrechterhaltung dieser Maßnahmen für die räumliche Sicherung und Verbesserung der Grundwasserqualität von großer Bedeutung. Eine Beendigung würde zu einem erkennbaren LCKW-Konzentrationsanstieg im Abstrom und einer neuerlichen Fahnausbreitung führen.
- × Entsprechend gelangen 25 % der an den Schadensherden ins Grundwasser eingetragenen LCKW-Frachten in die Aquifere und können entlang tektonischer Strukturen bei entsprechenden Druckverhältnissen in die Tiefe verlagert werden.
- × In den Schadensherden, aber auch im weiteren Abstrom in der Fläche spielt der mikrobiologische Schadstoffabbau eine Rolle. Die in die Aquifere gelangten LCKW-Frachten verringern sich dadurch im weiteren Abstrom um 20 %.
- × Im Arbeitsgebiet bzw. in dessen unmittelbarem südlichen Zustrom bestehen bisher unerkannte LCKW-Schadensherde, die erhebliche Mengen insbesondere von PCE bis in den Bochinger Horizont als Hauptaquifer des Oberen Aquifersystems emittieren.
- × Die integralen Untersuchungen belegen, dass im Arbeitsgebiet Feuerbach eine Vertikalverlagerung von Schadstoffen bis in den Oberen Muschelkalk erfolgt. Sind die LCKW in den Bochinger Horizont gelangt, so ist davon auszugehen, dass ein großer Teil auch den Oberen Muschelkalk erreicht. Die LCKW-Verunreinigungen im Arbeitsgebiet gefährden damit grundsätzlich die Grundwasserqualität des Oberen Muschelkalks.
- × Die Kontamination des Oberen Muschelkalks durch LCKW-Befrachtung aus höheren Stockwerken ist gering, solange der Großteil der Schadstoffe weiterhin durch Sanierungen entnommen oder reduziert wird.
- × Angesichts der durch Sanierungen und mikrobiologischen Abbau bedingten geringen Befrachtung mit akzeptablen 4 g LCKW/d (Lang et al. 2018) und der Verdünnung durch die 10-fach mächtigeren Grundwasserflüsse ist die Grundwasserqualität im Oberen Muschelkalk gut.
- × Die für die Verlagerung von LCKW in den Oberen Muschelkalk verantwortlichen Wirkungsräume und die dort herrschenden Mechanismen können als Ergebnis der integralen Untersuchung besser beurteilt und beschrieben werden.

In Tabelle 11 und Abbildung 28 sind Grundwassermessstellen in Quartär, Mittlerem Gipshorizont und Dunkelroten Mergeln mit Konzentrationen über 100 µg/l und Grundwassermessstellen in Bochinger Horizont und Grundgipsschichten/Grenzdolomit mit über 10 µg/l zusammengestellt.



Soweit Daten verfügbar sind, zeigt Tabelle 11 auch auf, ob sich in diesen Messstellen im Vergleich zu 2007 eine Konzentrationsabnahme oder eine Konzentrationserhöhung abzeichnet. Daraus wird für diese Bereiche Untersuchungs- und ggf. Sanierungsbedarf abgeleitet. Hohe Konzentrationen in Verbindung mit einer Schadstoffzunahme deuten auf einen prioritären Handlungsbedarf hin.

Tabelle 11 Grundwassermessstellen mit LCKW-Konzentrationen im Jahr 2017 von mehr als 100 µg/l in Quartär (Q), Mittleren Gipshorizont (MGH) oder Dunkelroten Mergeln (DRM) und mehr als 10 µg/l in Bochinger Horizont (BH) und Grundgipsschichten/Grenzdolomit (GGs/GD).

Nr.	GWM	Aquifer	2007	2017	Lage
1	P 954	Q	3.755 µg/l	9.440 µg/l	Öffentlicher Raum, Bludenzer Str.
2	P 959	Q	27 µg/l	105 µg/l	Öffentlicher Raum, Leobener Str.
3	B 907	Q	k.A.	3.776 µg/l	Öffentlicher Raum, Leobener Str.
4	FB 6	Q	4.712 µg/l*	2.966 µg/l	Öffentlicher Raum, Bludenzer Str.
5	Br 4	MGH	68 µg/l	122 µg/l	Öffentlicher Raum, Kruppstraße
6	B 111	MGH	33 µg/l	1.051 µg/l	Abstrom Standort 4508
7	GWM 52	MGH	k.A.	137 µg/l	Öffentlicher Raum, Kruppstraße
8	KE 5-3	MGH	262 µg/l	137 µg/l	Öffentlicher Raum, Siemensstraße
9	P 9130	DRM	185 µg/l	547 µg/l	Öffentlicher Raum, Wiener Platz
10	B 9120	DRM	90 µg/l	119 µg/l	Öffentlicher Raum, Wiener Platz
11	B 1	DRM	678 µg/l	1.895 µg/l	Öffentlicher Raum, Bludenzer Str.
12	DRM 1	DRM	k.A.	112 µg/l	Öffentlicher Raum, Bludenzer Str.
13	KE 3-4	DRM	450 µg/l	110 µg/l	Öffentlicher Raum, Leobener Str.
14	KE 3-6	DRM	497 µg/l	346 µg/l	Öffentlicher Raum, Leobener Str.
15	KE 4-3	DRM	366 µg/l	148 µg/l	Öffentlicher Raum, Bludenzer Str.
16	KE 4-5	DRM	400 µg/l	210 µg/l	Öffentlicher Raum, Bludenzer Str.
17	AMIIGA 1	BH	k.A.	210 µg/l	Öffentlicher Raum, St. Pöltener Str.
	AMIIGA 1	GGs/GD	k.A.	79 µg/l	Öffentlicher Raum, St. Pöltener Str.
18	AMIIGA 3	BH	k.A.	20 bis 87 µg/l	Öffentlicher Raum, Wiener Str.
19	P 934	BH	54 µg/l	118 µg/l***	Abstrom Standort 2430
20	GWM 8/GWM 2	BH	128 µg/l**	33 µg/l***	Abstrom Standort 4567
21	BBH 3/BBH 4	BH	22/140 µg/l	23 µg/l /k.A.***	Abstrom Standort 4567
22	GWM 9	GGs/GD	178 µg/l**	140 µg/l	Tiefenverlagerung oder Eintrag durch Standort 4567

k.A. = keine Angabe, da keine Daten verfügbar

* 2011

**2010

***2019

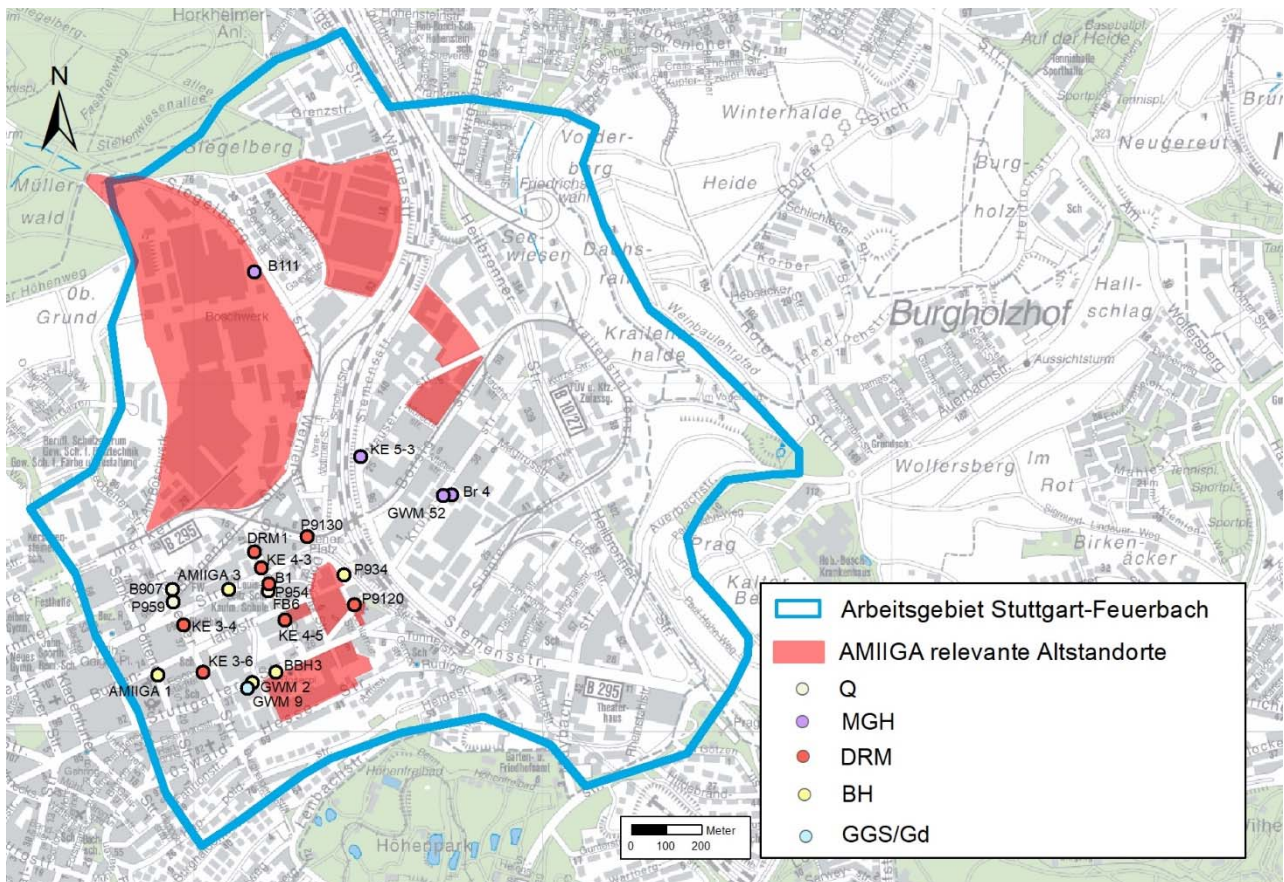


Abbildung 28 Grundwassermessstellen mit LCKW-Konzentrationen im Jahr 2017 von mehr als 100 µg/l in Q, MGH und DRM und mehr als 10 µg/l in BH und GGS/GD, eigene Darstellung.

Bei der Ableitung des Handlungsbedarfs werden unterschieden:

- a. Die oberen Aquifere Quartär, Mittlerer Giphshorizont (MGH) und Dunkelrote Mergel (DRM). Diese werden hauptsächlich durch Grundwasserneubildung gespeist (siehe Kapitel 2.1). Es gibt kaum Hinweise auf seitliche LCKW-Zuflüsse (Ausnahme: evtl. südlicher Zustrom). Lokal erhöhte LCKW-Gehalte gelangen durch Tiefenverlagerung in den unterlagernden Bochinger Horizont. Hohe LCKW-Konzentrationen zeigen, dass die Sanierungsmaßnahmen bislang Tiefenverlagerungen nicht vollständig verhindern.
- b. Die mittleren Aquifere Bochinger Horizont (BH) und Grundgipsschichten/Grenzdolomit (GGS/GD). Im Bochinger Horizont als Hauptaquifer des Oberen Aquifersystems sammeln sich LCKW-Einträge des Arbeitsgebiets aus den überlagernden Dunkelroten Mergeln, die nicht durch Sanierungsmaßnahmen entnommen werden. Eine hydraulische Sanierung ist im BH und GGS/GD aufgrund der Verdünnung durch die von den Talhängen zuströmenden, LCKW-freien Randzuflüsse wenig effizient, für ein integrales Monitoring degegen ist der Bochinger Horizont sehr gut geeignet.
- c. Das untere Aquifersystem mit Unterkeuper und Oberem Muschelkalk.

Erforderliche Maßnahmen werden in Kapitel 6 als Maßnahmenplan beschrieben.



5.1. Obere Aquifere (Quartär, Mittlerer Gipshorizont und Dunkelrote Mergel)

In den oberen Aquiferen des oberen Aquifersystems (Quartär, Mittlerer Gipshorizont und Dunkelrote Mergel) bedürfen im Arbeitsgebiet folgende vier Bereiche einer näheren Untersuchung:

- × P 954 und FB 6 (Nrn. 1 und 4 in Tabelle 11): Bereits im Projekt FOKS wurde die Herkunft der hohen LCKW-Verunreinigung mit ausgeprägter PCE-Dominanz in der Quartär-Messstelle P 954 untersucht. Wegen der Lage im Straßenraum ist die Untersuchung des Schadens stark erschwert. Die Herkunft der Verunreinigung blieb ungeklärt. Trotz langjähriger Pump & Treat Maßnahmen wurde 2017 mit 9.440 µg/l eine gegenüber 2007 um Faktor 2,5 erhöhte LCKW-Summenkonzentration gemessen. Die Konzentrationserhöhung kann zwar teilweise Folge der geringen Grundwasserführung sein. Dennoch ist die weiterhin ungeklärte Herkunft der Schadstoffe unbefriedigend, eine Trendumkehr ist ohne Ermittlung und Sanierung des Schadstoffherdes nicht zu erreichen. Auch für die benachbarte FB 6 besteht wegen des hohen LCKW-Gehalts von rund 3.000 µg/l (ebenfalls vorrangig PCE) Untersuchungsbedarf.
- × B 907 (Nr. 3 in Tabelle 11) ist mit 3.776 µg/l vorrangig PCE stark auffällig. Die Herkunft der Verunreinigungen bedarf einer Untersuchung. Dagegen besteht in der benachbarten P 959 wegen der geringfügigen Überschreitung von 100 µg/l trotz ansteigender LCKW-Konzentration zunächst kein Handlungsbedarf.
- × B 111 (Nr. 6 in Tabelle 11): Die zuletzt gemessene LCKW-Konzentration von 1.051 µg/l im Mittleren Gipshorizont (vorwiegend TCE) zeigt an, dass an dieser Stelle LCKW vom Standort 4508 abströmen. Die Abstromsicherung des Standorts ist in diesem Bereich zu überprüfen.
- × B 1 (Nr. 11 in Tabelle 11): In dieser Grundwassermessstelle dominiert das Abbauprodukt DCE. Wegen der hohen Konzentration von 1.895 µg/l und angesichts der deutlichen Konzentrationszunahme um Faktor 2,8 gegenüber 2007 sollte untersucht werden, auf welchen Schadensherd die festgestellte Verunreinigung zurückzuführen ist, um dann geeignete Schadensherd-Sanierungsmaßnahmen ergreifen zu können.

In KE 3-6 und KE 4-5 (Nrn. 14 und 16 in Tabelle 11) zeichnet sich eine abnehmende LCKW-Konzentration ab. Angesichts des positiven Trends sind weitere Maßnahmen vorläufig nicht erforderlich.

Br. 4 und GWM 52 (MGH, Nrn. 5 und 7 in Tabelle 11) liegen im Abstrom eines bekannten, wegen geringfügiger Emissionen jedoch nicht gekennzeichneten Schadensherdes. Bei von 68 auf 122 µg/l zunehmender Konzentrationen bzw. bei 137 µg/l im Jahr 2017 besteht derzeit kein akuter Handlungsbedarf.

P 9130 (Nr. 9 in Tabelle 11) im Bereich Wiener Platz wird im Rahmen des Monitoringprogramms für Standort 2430 regelmäßig untersucht. Das Monitoringprogramm dient der Überprüfung des Sanierungserfolgs der unmittelbar an den Wiener Platz angrenzenden, in den Jahren 2013 bis 2018 durchgeführten Sanierungsmaßnahmen. Dabei wurden zwei große LCKW-Schadstoffherde durch Aushub (Standort 2430) bzw. durch thermische In-situ-Sanierung (Standort 2497) behandelt. Auch wenn es Hinweise auf bestehende Restschäden gibt, ist davon auszugehen, dass sich die abströmenden LCKW-Konzentrationen und Frachten in den kommenden Jahren erheblich verringern werden. Damit wird sich auch die Gefahr eines Schadstoffeintrags in tiefere Aquifere vermindern. In Grundwassermessstelle KE 5-3 (MGH, Nr. 8 in Tabelle 11) deutet sich mit von 262 auf 137 µg/l abnehmender LCKW-Konzentration bereits eine Verbesserung der Grundwassergüte an. In den genannten Grundwassermessstellen einschließlich P 9120 mit geringfügiger Überschreitung der

100 µg/l besteht bei Fortsetzung des Monitoringprogramms kein zusätzlicher Untersuchungsbedarf.

Auch bei den Grundwassermessstellen DRM 1, KE 3-4 und KE 4-3 (Nrn. 12, 13 und 15 in Tabelle 11) wird aufgrund der abnehmenden Schadstoffkonzentrationen trotz der immer noch über 100 µg/l liegenden LCKW-Konzentrationen derzeit kein akuter Untersuchungsbedarf gesehen.

5.2. Mittlere Aquifere (Bochinger Horizont und Grundgipsschichten/Grenzdolomit)

Im Bochinger Horizont zeichnet sich im Bereich Leobener/St. Pölterner Straße die in Kapitel 2.1 (Abbildung 9) beschriebene Depression ab. In der zur Untersuchung des beobachteten Grundwassertiefstands erstellten Grundwassermessstelle AMIIGA 1 wurden 2017 im Bochinger Horizont mit 210 µg/l nahezu ausschließlich PCE festgestellt. In den Grundgipsschichten/Grenzdolomit wurden im offenen Bohrloch noch 79 µg/l PCE gemessen (siehe Tabelle 11 Nr. 17). Im Bereich der Messstelle AMIIGA 1 kommt es zu einer Tiefenverlagerung von LCKW, die aufgrund der Druckverhältnisse und einer bestehenden Störung bis in den Oberen Muschelkalk reichen kann.

Aufgrund der Untersuchungsergebnisse in den mittleren Aquiferen des Arbeitsgebiets (Bochinger Horizont, Grundgipsschichten/Grenzdolomit) ergibt sich in einem Bereich zusätzlicher Handlungsbedarf:

- × Das LCKW-Spektrum im Bereich der GWM AMIIGA 1 weist eine PCE-Dominanz auf, die nur durch einen bisher unbekanntem PCE-Schadensherd im Umfeld entstanden sein kann. Aufgrund der hohen LCKW-Konzentration im Bochinger Horizont besteht dringender Untersuchungsbedarf.

Eine PCE-Dominanz mit 77 µg/l PCE und 8 µg/l TCE im Jahre 2016 wird im Bochinger Horizont des Arbeitsgebiets auch in Grundwassermessstellen P 934 im Bereich Wiener Platz festgestellt. Diese Verunreinigung ist auf den sanierten PCE-Schaden beim Standort 2430 zurückzuführen, der sich in größerer Tiefe ausgewirkt hatte. Wegen der abgeschlossenen Sanierung ist mit einer Verbesserung der Situation zu rechnen.

Die südlich der Depression gelegenen Bochinger Horizont Grundwassermessstellen BBH3 und BBH4 sowie GWM 2 und GWM 8 (Tabelle 11 Nrn. 20 und 21) liegen im Bereich von Standort 4567 (vgl. Abbildung 9). Die Messstellengruppe weist ebenfalls eine Tiefenverlagerung von LCKW nach. Im LCKW-Spektrum dominiert das Abbauprodukt DCE, es handelt sich um einen eigenständigen Schaden, der auf Standort 4567 zurückzuführen ist. Mit zuletzt 140 µg/l in den unterlagernden Grundgipsschichten / im Grenzdolomit erschließt GWM 9 (Nr. 19 in Tabelle 11) den tiefsten Aquifer im Oberen System. Hier liegt trotz abnehmender Tendenz mit 140 µg/l (davon 110 µg/l DCE) eine erhöhte LCKW-Konzentration vor. Angesichts der Tiefenlage, der immer noch ungeklärten Genese des Schadens und der sehr geringen Ergiebigkeit des Aquifers werden an dieser Stelle keine weiteren Untersuchungen empfohlen.

Ein hoher TCE-Anteil wird auch in der zur nördlichen Abgrenzung der Depression 2019 erstellten Messstelle AMIIGA 3 gemessen. Damit wird auch deutlich, dass zwischen der PCE-Verunreinigung am Wiener Platz (P 934) und derjenigen in AMIIGA 1 kein Zusammenhang besteht.

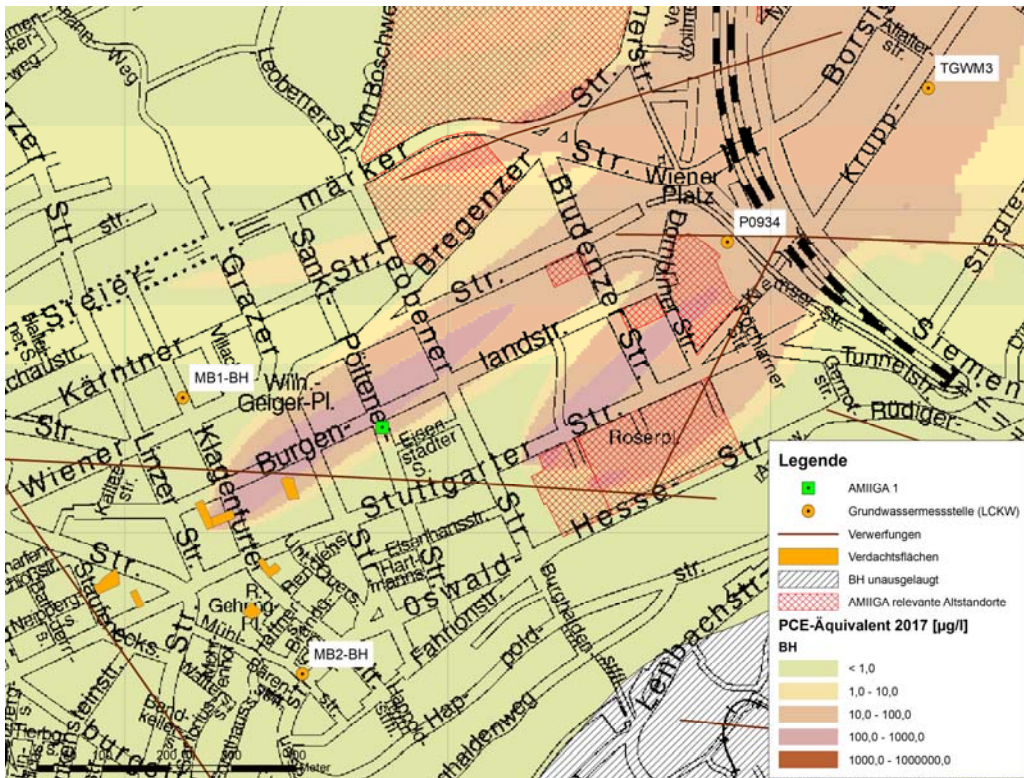


Abbildung 29 LCKW-Konzentration 2017 im Bereich AMIIGA 1 im BH bei Simulation eines möglichen Eintrags, Lang et al. 2018.

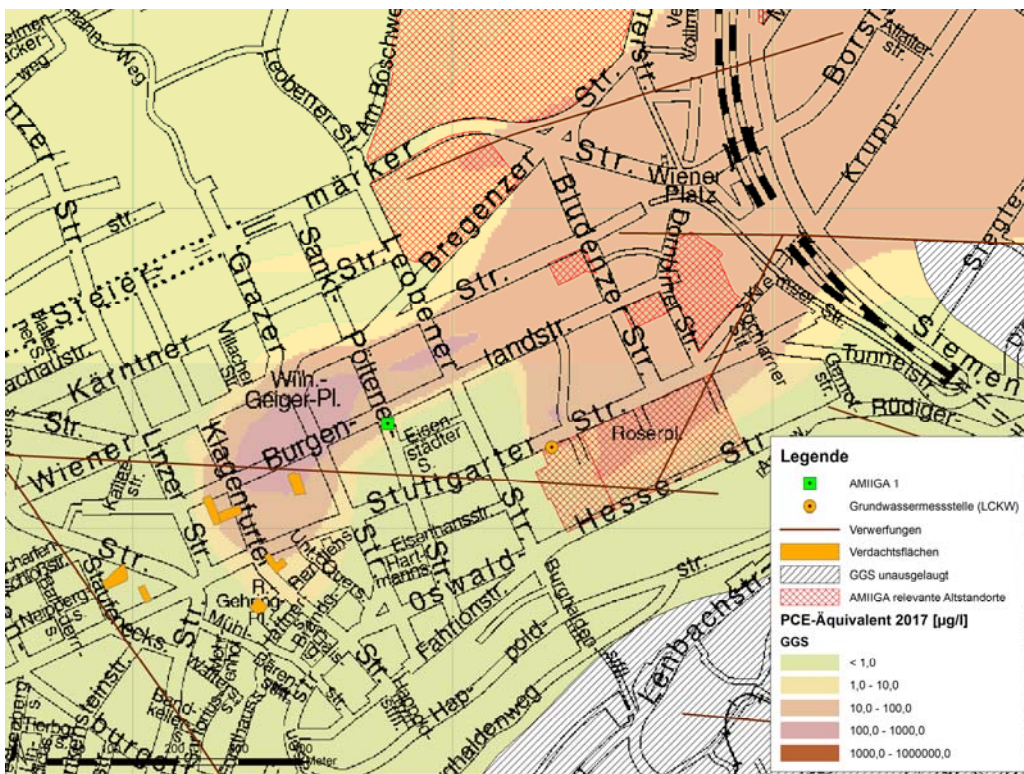


Abbildung 30 LCKW-Konzentration 2017 im Bereich AMIIGA 1 in GGS/GD bei Simulation eines möglichen Eintrags, Lang et al. 2018.

Alle anderen BH- und GGS/GD-Grundwassermessstellen im Arbeitsgebiet sind deutlich unter 10 µg/l belastet.

Die Genese und Wirkung der LCKW-Verunreinigung in AMIIGA 1 im Bereich der Depression wurde mit Hilfe des numerischen Modells untersucht. Dabei zeigte sich, dass die Tiefenverlagerung von LCKW im Modell plausibel nachgebildet werden kann. Abbildung 29 (BH) und Abbildung 30 (GGS/GD) zeigen das Ergebnis der Simulation eines Schadstoffeintrags im Umfeld der Klagenfurter Straße. Danach ist ein LCKW-Eintrag (Schadensherd) westlich von AMIIGA 1 wahrscheinlich.

5.3. Unteres Aquifersystem (Unterkeuper, Oberer Muschelkalk)

Beim Unteren Aquifersystem bestehend aus Unterkeuper (ku) und Oberem Muschelkalk (mo) handelt es sich um ein zusammenhängendes System. Mit der numerischen Strömungsmodellierung kann die im hydrogeologischen Modell postulierte Verbindung zwischen dem Bochinger Horizont als Hauptaquifer des Oberen Aquifersystems und dem Oberen Muschelkalk nachgebildet werden. An den Stellen im Arbeitsgebiet, an denen Störungen die flächige Stockwerkstrennung aufheben, ist eine Vertikalverlagerung von Schadstoffen plausibel.

Trotz dieser Vertikalverlagerung ergeben die durchgeführten Untersuchungen im Oberen Muschelkalk keinen Hinweis auf erhebliche Einträge von LCKW aus dem Arbeitsgebiet Feuerbach. Dies wird durch die LCKW-Messungen in den unterstromig gelegenen Grundwassermessstellen, auch in AMIIGA 2, bestätigt. Die Worst-Case-Betrachtung für AMIIGA 2 erfordert wegen der geringen Eintrittswahrscheinlichkeit keine weiteren Maßnahmen.

Die Untersuchungen ergeben damit keine Hinweise auf bestehende Konflikte mit den allgemeinen Qualitätszielen Priorität 1 (LCKW-Höchstkonzentration von 10 µg/l, siehe Kapitel 4.1) im Arbeitsgebiet Feuerbach. Die LCKW-Einträge bei AMIIGA 1 sind von lokaler Relevanz und beeinträchtigen nicht die Wasserqualität im Stadt-Umland-Gebiet (FUA).

Ein Hinweis auf eine Prüfwertverletzung ergibt sich außerhalb des Arbeitsgebiets: Der Notwasserbrunnen 121 (Ausbau im ku/mo, Abbildung 23) ist mit zuletzt gemessenen 23 µg/l PCE seit mehreren Jahren auffällig. Die numerische Strömungs- und Transportmodellierung hat gezeigt, dass die dortigen Schadstoffe aufgrund der Grundwasser-Strömungsverhältnisse nicht aus Feuerbach stammen. Vielmehr ist die Herkunft dieser Verunreinigung in Zuffenhausen zu suchen.

6. Maßnahmenplan für Stuttgart-Feuerbach

Im Maßnahmenplan für Stuttgart Feuerbach werden alle notwendigen Maßnahmen zusammengefasst. Der Maßnahmenplan ist auch in tabellarischer Form verfügbar, siehe Anlage 1. Die Maßnahmen dienen folgenden Entwicklungszielen des Managementplans:

- × Entwicklungsziel 1: Minimierung des LCKW-Eintrags in die obersten Aquifere
- × Entwicklungsziel 2: Integrales Monitoring von Grundwasserdargebot und Grundwasserqualität
- × Entwicklungsziel 3: Sicherstellung der Durchführung erforderlicher Maßnahmen.

6.1. Minimierung der LCKW-Einträge in die obersten Aquifere

Zur Erreichung von Entwicklungsziel 1 „Minimierung des LCKW-Eintrags in die obersten Aquifere“ sind drei Maßnahmen erforderlich. Alle genannten Maßnahmen sind unter Nummern 1.1.a bis 1.1.c im Maßnahmenplan (Anlage 1) zusammengestellt.

6.1.1. Weiterführung laufender Sanierungsmaßnahmen

Weiterführung der laufenden Sanierungsmaßnahmen. Mit Hilfe der integralen Untersuchung wurde nachgewiesen, dass die laufenden Sanierungsmaßnahmen notwendig und wirkungsvoll sind. Durch die Weiterführung der Maßnahmen wird verhindert, dass LCKW in tiefere Aquifere vordringen und das Untere Aquifersystem bedrohen. Ggf. geplante standortspezifische Maßnahmen zur Effizienzsteigerung von Sanierungsmaßnahmen müssen sicherstellen, dass die Wirkung zum Schutz des Unteren Aquifersystems erhalten bleibt.

6.1.2. Optimierung der Gefahrenabwehr

Untersuchung der Situation im Bereich der Grundwassermessstelle B 111 und ggf. Umsetzung von Maßnahmen zur Optimierung der Gefahrenabwehr durch den für Standort 4508 Zuständigen.

6.1.3. Gefahrerforschung für vier Bereiche

Gefahrerforschung für die in Kapitel 5.1 und 5.2 aufgelisteten vier Bereiche, in denen signifikant erhöhte Schadstoffbelastungen auftreten, die Herkunft der Schäden jedoch ungeklärt ist.

- × P 954 und FB 6
- × P 907
- × B 1
- × AMIIGA 1.

Ziel der Gefahrerforschung in den vier genannten Bereichen ist die Identifizierung der für die festgestellten erheblichen Grundwasserverunreinigungen jeweils verantwortlichen Schadensherde als LCKW-Emittenten. Die dazu notwendigen Untersuchungen sollen sich, ausgehend von den angegebenen Grundwassermessstellen, auf den Schadstoffeintrag in den jeweils obersten Grundwasserleiter konzentrieren. Dazu sind jeweils Grundwasseruntersuchungen durchzuführen. Bodenluftuntersuchung haben sich bei den komplexen Schadensherden als ungeeignet erwiesen. Es ist damit zu rechnen, dass die Schadstoffeintragsbereiche im Zuge von Neu- oder Umbaumaßnahmen entfernt wurden, in größerer Tiefe jedoch Restschäden verblieben sind, die unerkannt LCKW emittieren (z.B. bei Standorten ehem. Chemischer Reinigungen an verschiedenen Standorten in Stuttgart-Mitte oder -West, siehe ISAS-Nrn. 1318, 4483 und 4781).

Die notwendigen Untersuchungen müssen als Gefahrerforschungsmaßnahmen von der Wasserbehörde in Auftrag gegeben werden. Der Aufwand ist erheblich. Es sind jeweils rund fünf Grundwassermessstellen im öffentlichen Straßenraum einzuplanen, in denen Pumpversuche und chemische Untersuchungen durchgeführt und ausgewertet werden müssen.

Sobald ein Verantwortlicher in Anspruch genommen werden kann, muss dieser Detailuntersuchungen und Sanierungen der Schadensherden übernehmen.

6.2. Integrales Monitoring von Grundwasserdargebot und Grundwasserqualität

6.2.1. Integrales Monitoring im Oberen Aquifersystem

Die durch die integrale Untersuchung erkannte Dynamik von Grundwasserströmung und Schadstofftransport birgt erhebliche Risiken für den Grundwasserhaushalt. Durch die eingetretenen Veränderungen hat sich das Fließgeschehen und damit der LCKW-Transport in Teilbereichen grundlegend geändert: In Bereichen, in denen früher (2007) eine nordöstliche Fließrichtung vorherrschte, strömte das Grundwasser 2017 nach Südwesten.

Um die weitere Entwicklung qualifiziert beobachten und ggf. auf Veränderungen reagieren zu können, ist aus diesem Grunde der Betrieb eines integralen Monitoring-Messnetzes für Feuerbach erforderlich, das auch als Frühwarnsystem für LCKW-Einträge in tiefere Aquifere dienen kann.

Dazu wird empfohlen, ein integrales Monitoring-Messnetz im Hauptaquifer Bochinger Horizont (BH) einzurichten und zu betreiben. Mit AMIIGA 1 und 3 wurden dazu geeignete Monitoring-Grundwassermessstellen eingerichtet. Im Verbund mit den bestehenden Bochinger-Horizont-Messstellen GWM 2, P 934, B 125, P 9124, MB 6 und P 9 (siehe Abbildung 31) ermöglicht das Monitoring-Messnetz eine integrale Überwachung der Entwicklung auch für Quartär und Gipskeuper, da der BH als Hauptaquifer des oberen Systems eine integrierende Wirkung besitzt. Außerdem ist der Bochinger Horizont von besonderer Vulnerabilität, weil Schadstoffe, die diesen Horizont erreichen, nahezu vollständig in den Oberen Muschelkalk gelangen können. Eine jährliche Untersuchung von Grundwasserständen und LCKW-Konzentrationen ist ausreichend.

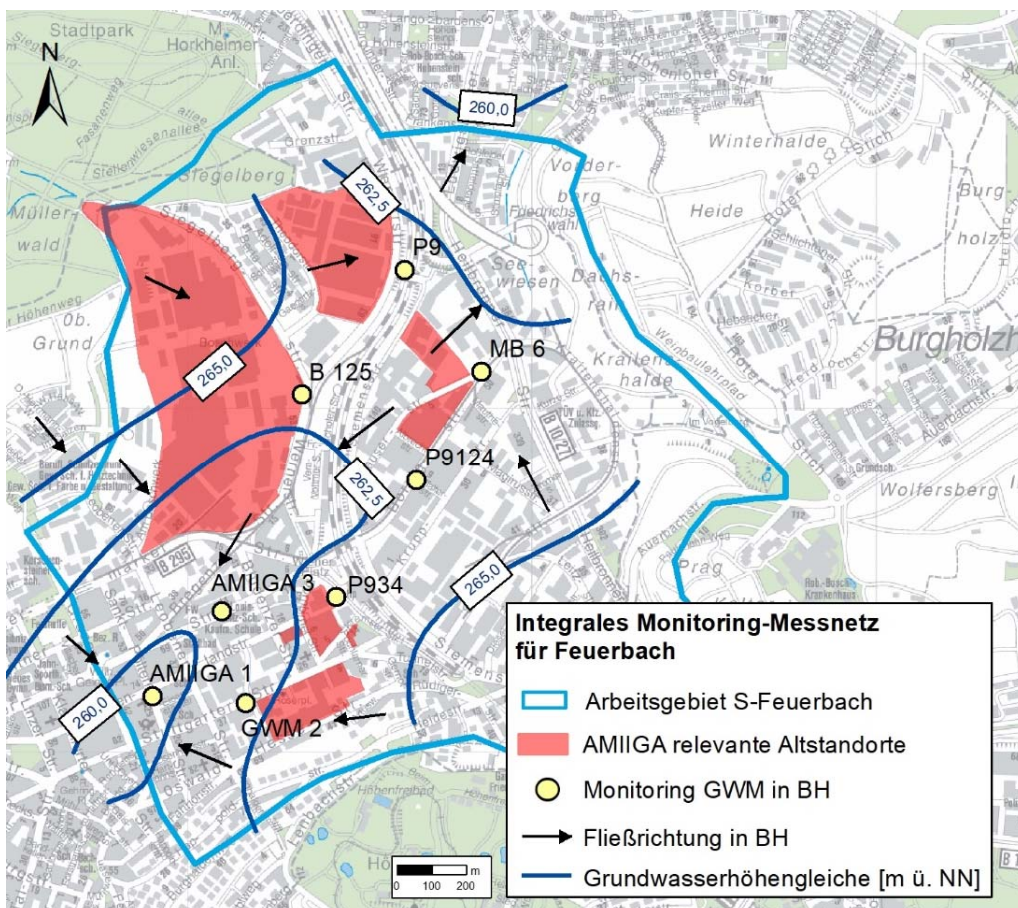


Abbildung 31 Integrales Monitoring-Messnetz für Feuerbach, eigene Darstellung.

6.2.2. Monitoring Oberer Muschelkalk

Zur Erreichung von Entwicklungsziel 2 (Integrales Monitoring von Grundwasserdargebot und Grundwasserqualität) wird zur Überwachung der Auswirkung von LCKW-Einträgen ein ergänzendes Monitoring im FUA-Maßstab vorgeschlagen. Dazu sind die 27 in Kapitel 3.2 erwähnten Grundwassermessstellen geeignet (siehe Abbildung 23), auch wenn diese teilweise im Unterkeuper oder stockwerksübergreifend ausgebaut sind.

Beprobungen und analytische Untersuchungen werden von unterschiedlichen Institutionen (z.B. Netze BW oder ortsansässigen Betrieben) oder im Rahmen laufender Monitoring-Programme (z.B. im Heilquellen-Monitoring) durchgeführt, so dass für das Monitoring des Oberen Muschelkalks keine zusätzlichen Untersuchungen erforderlich werden, vielmehr eine jährliche Abfrage der Messwerte sowie eine jährliche Zusammenstellung und Auswertung der Daten ausreicht.

6.3. Berichtswesen zur Sicherung der Durchführung erforderlicher Maßnahmen

Zur Sicherstellung der Implementierung und Fortführung der erforderlichen Maßnahmen wird eine jährliche Erfassung und Dokumentation der Entwicklung der LCKW-Konzentrationen und -Frachten an ausgewählten Grundwassermessstellen vorgeschlagen. Zur Dokumentation sollte eine graphische Aufbereitung mit Lageplan, Ausbauprofil und Konzentrationsganglinien erfolgen. Zur Trenderkennung und zur Abfassung fachlicher Handlungserfordernisse zum weiteren Vorgehen sind turnusmäßig alle fünf-Jahre Berichte zu erstellen. Diese werden jeweils z.B. dem Umweltbeirat vorgestellt. Sie können ferner als Datengrundlage für mögliche künftige Projekte dienen.

7. Umsetzung

Die Weiterführung laufender grundwasserbezogener Sanierungsmaßnahmen und die Optimierung der Gefahrenabwehr (Maßnahmen 6.1.1 und 6.1.2) werden durch die Wasser- und Bodenschutzbehörde im Rahmen der Allgemeinen Gewässeraufsicht überwacht. Die zur Gefahrerforschung der vier in Kapitel 6 genannten Bereiche notwendigen Untersuchungen (Maßnahme 6.1.3) werden von der Wasser- und Bodenschutzbehörde entsprechend der personellen und finanziellen Ressourcen in Auftrag gegeben, sofern die Einzelfallprüfung ergibt, dass die dazu notwendigen Voraussetzungen vorliegen.

Das integrale Monitoring (Maßnahmen 6.2.1 und 6.2.2) und das Berichtswesen (Maßnahme 6.3) sind keine originären polizeilichen Aufgaben der Wasser- und Bodenschutzbehörde. Daher wird die Stadtverwaltung einen Vorschlag zur Umsetzung erarbeiten und mit den zuständigen Stellen abstimmen.

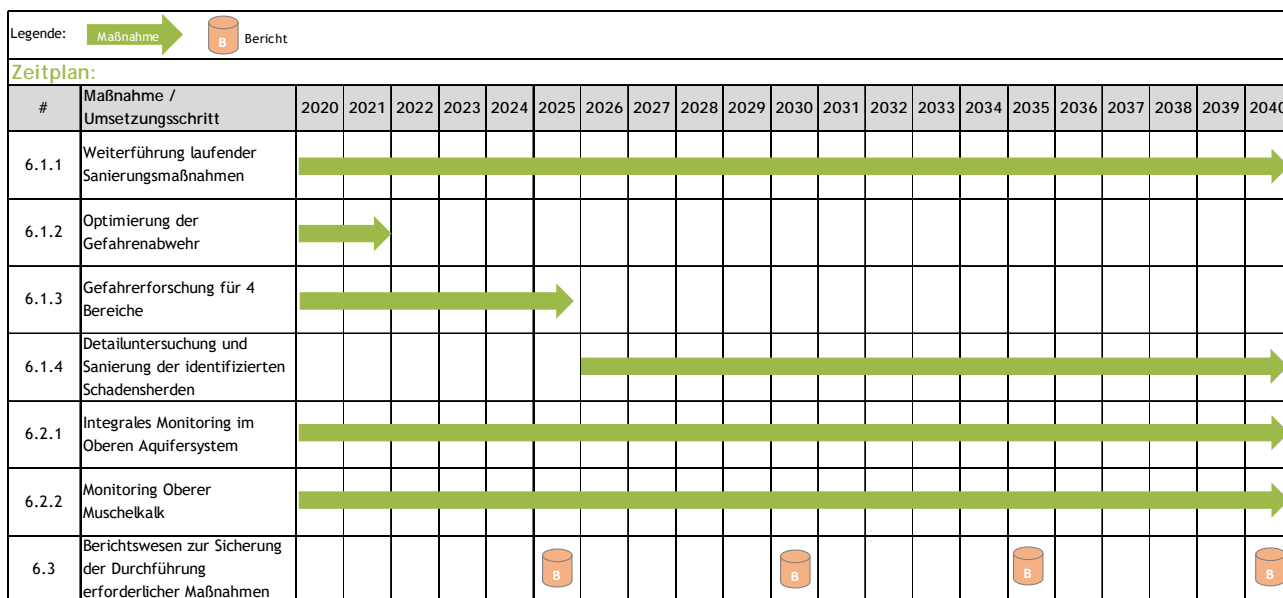


Abbildung 32 Zeitplan für die Umsetzung erforderlicher Maßnahmen.

Die auf die Landeshauptstadt entfallenden Kosten für die zuvor beschriebenen und in Anlage 1 aufgelisteten notwendigen Maßnahmen sind in zusammengefasst. Insgesamt ergeben sich - zusätzlich zu Störerverpflichtungen (Untersuchungen und Sanierungen durch die jeweils polizeirechtlich Zuständigen) - für Gefahrerforschung und Monitoring für einen Zeitraum von 20 Jahren (2021 bis 2040) Kosten für die Landeshauptstadt in Höhe von rund 1.000.000 EUR, d.h. jährliche Kosten in Höhe von 50.000 EUR.

Tabelle 12 Kosten für die Landeshauptstadt zur Untersuchung erheblicher LCKW-Einträge und zum Grundwassermonitoring in den Jahren 2020 bis 2040

Kosten:		
#	Maßnahme / Umsetzungsschritt	Zusätzliche Kosten [€]
6.1.1	Weiterführung laufender Sanierungsmaßnahmen	0,00
6.1.2	Optimierung der Gefahrenabwehr	0,00
6.1.3	Gefahrerforschung für 4 Bereiche	754.478,00
6.1.4	Detailuntersuchung und Sanierung der identifizierten Schadensherden	0,00
6.2.1	Integrales Monitoring im Oberen Aquifersystem	238.400,00
6.2.2	Monitoring Oberer Muschelkalk	0,00
6.3	Berichtswesen zur Sicherung der Durchführung erforderlicher Maßnahmen	0,00

Summe 992.878,00 €

8. Literatur

Die topographische Kartengrundlage: Stadtmessungsamt der Landeshauptstadt Stuttgart (digitale Stadtgrundkarte Stuttgart).

Goldscheider, N., Hötzl, H., Käss, W., Kottke, K. und Ufrecht, W. (2001): Kombinierte Markierungsversuche im Stuttgarter Talkessel zur Klärung der hydrogeologischen Verhältnisse und Abschätzung des Gefährdungspotenzials im Mineralwasseraquifer Oberer Muschelkalk, Stadtgebiet Stuttgart. - Schriftenreihe des Amtes für Umweltschutz Stuttgart, Heft 1/2001: 5-80; Stuttgart.

Guthke A. und Schollenberger U. (2017a): Kurzbericht zur großräumigen Stichtagsmessung in Stuttgart-Feuerbach im Rahmen des Projekts AMIIGA. AMIIGA Bericht.

Guthke A. und Schollenberger U. (2017b): Bericht über die Ergebnisse der Beprobung von Grundwassermessstellen in Stuttgart-Feuerbach im Rahmen des Projekts AMIIGA - Flache Aquifere. AMIIGA Bericht.

Guthke A. und Schollenberger U. (2017c): Report on hydrogeological model update. AMIIGA Bericht.

Guthke A., Spitzberg S. und Schollenberger U. (2018a): Auswahl eines integralen Monitoringnetzes für die tiefen Aquifere der FUA Stuttgart-Feuerbach. AMIIGA Bericht.

Guthke A., Kiffer C. und Spitzberg S. (2018b): Auswahl eines integralen Monitoringnetzes für die flachen Aquifere des Arbeitsgebiets Stuttgart-Feuerbach. AMIIGA Bericht.

Guthke A., Kiffer C. und Spitzberg S. (2018c): Report on installation of two integral monitoring wells for the deeper aquifer. AMIIGA Bericht.

Kirchholtes H.J. und Ufrecht W. *Hrsg.* (2015): Chlorierte Kohlenwasserstoffe im Grundwasser: Untersuchungsmethoden, Modelle und ein Managementplan für Stuttgart. Springer Vieweg. Wiesbaden.

Kirchholtes H.J., von Schnakenburg P., Ertel T., Schollenberger U., Spitzberg S. und Schäfer W. (2012): FOKS - Focus on Key Sources. Abschluss der Integralen Grundwasseruntersuchung Stuttgart-Feuerbach. Störerauswahl und Einbindung der Einzelfallbearbeitung in eine übergeordnete Sanierungsstrategie für den ganzen Stadtteil. *altlastenspektrum*, 3/2012; S. 108. Berlin.

Landeshauptstadt Stuttgart (2009): Integrale Grundwasseruntersuchung in Stuttgart-Feuerbach. Schriftenreihe des Amtes für Umweltschutz, 4/2009, Stuttgart.

Lang U., Justiz J. und Schäfer W. (2018): Grundwassermodell Stuttgart im Rahmen des Projektes AMIIGA Modellaufbau, Kalibrierung und LCKW-Transport. AMIIGA Bericht.

Lang, U. und Schäfer, W. (2015): Numerisches Grundwasserströmungs- und Stofftransportmodell. - In Kirchholtes H.J. und Ufrecht W. *Hrsg.* (2015): Chlorierte Kohlenwasserstoffe im Grundwasser: Untersuchungsmethoden, Modelle und ein Managementplan für Stuttgart, 159-204; Wiesbaden (Springer Vieweg).

LUBW (2014): Integrales Altlastenmanagement. Leitfaden und Handlungshilfe zur integralen Untersuchung und Sanierung von Altlasten. Landesanstalt für Umwelt, Messungen und Naturschutz Baden-Württemberg, Karlsruhe.

Plümacher J. und Ufrecht W. (1997): Organisation, Durchführung und Auswertung einer Stichtagsmessung in Grundwasseraufschlüssen des Oberen und Mittleren Muschelkalks im Zeitraum 21. bis 25. Mai 1994. - Unveröff. Bericht Amt für Umweltschutz; Stuttgart.



Schollenberger U., Guthke A., Spitzberg S. und Ebert K. (2018): Auswertung der Untersuchung ausgewählter Grundwasserproben aus Stuttgart Feuerbach mittels BMT und CSIA im Rahmen des Projekts AMIIGA. AMIIGA Bericht.

Schollenberger U. und Kiffer C. (2019a): Report on installation of a new integral Monitoring well. AMIIGA-Bericht.

Schollenberger U. und Kiffer C. (2019b): Report on groundwater sampling campaign in April 2019 („Bochinger Horizont“ Aquifer). AMIIGA-Bericht.

Spitzberg S. und Schollenberger U. (2011): Untersuchung von Fahnen-Herd-Beziehungen im Rahmen des geförderten Projekts FOKS, Fall 1, 2. Schritt. FOKS Bericht.

Spitzberg S. und Ufrecht W. (2008): Hydrogeologisches Modell Feuerbach. - Schriftenreihe des Amtes für Umweltschutz, Heft 4/2009: 31-50; Stuttgart.

Ufrecht W. (1996): Dokumentation und Bewertung der hydrogeologischen Verhältnisse im Oberen und Mittleren Muschelkalk im Raum Ditzingen-Weilimdorf-Feuerbach-Zuffenhausen. Unveröff. Bericht Amt für Umweltschutz; Stuttgart.

Ufrecht, W. (2017): Zur Hydrogeologie veränderlich fester Gesteine mit Sulfatgestein, Beispiel Gipskeuper (Trias, Grabfeld-Formation). - Grundwasser, 22(3): 197-208; Hannover.

Ufrecht, W. (2019): GIS-Kartenwerk „Geologie und Grundwasser. - Geoline pro, LH Stuttgart.

Vetter, A. (2002): Rechtsgutachten Juristische Fragen der Integralen Altlastenbearbeitung in Baden-Württemberg. Dolde & Partner Rechtsanwälte.



ANLAGEN

Anlage 1 Maßnahmenplan im Managementplan Stuttgart-Feuerbach



Anlage1: Maßnahmenplan im Managementplan Stuttgart-Feuerbach

No.	Maßnahme / Umsetzungsschritt	Skala	Beschreibung / Erklärung	Beginn in AMIIGA Projekt Laufzeit [J/N]	Geschätzter Durchführungs- zeitraum			Rechtliche / organisatorische Einschränkungen	Technische / technologische Maßnahmen	Finanzierungs- Verantwortung		Wer ist für die Implementierung verantwortlich?
					Kurzfristig (bis 2021)	Mittelfristig (bis 2025)	Langfristig (bis 2030)			Ist die Implementierung rechtlich und organisatorisch möglich?	Welche technischen bzw. technologischen Maßnahmen sind notwendig?	
Entwicklungsziel 1: Minimierung des LCKW-Eintrags in die obersten Aquifere												
1.	Identifizierung, Untersuchung und Sanierung der noch nicht in Sanierung befindlichen relevanten LCKW-Emittenten	Feuer- bach	Im AMIIGA-Projekt wurde nachgewiesen, dass die Weiterführung und Optimierung laufender Sanierungsmaßnahmen notwendig ist. Außerdem wurden vier Bereiche identifiziert, in denen signifikant erhöhte Schadstoffbelastungen auftreten. Die dafür verantwortlichen Schadensherde sind, soweit möglich, zu identifizieren und zu sanieren.									
1.1	Weiterführung laufender Sanierungsmaßnahmen		Standortspezifische Maßnahmen	N	X	X	X	Ja	Sanierungstechnologien je nach Standort	X	X	Einzelfallspezifische Zuständigkeit
1.2	Optimierung der Gefahrenabwehr		Optimierung in Fällen abströmender LCKW-Fahnen	N	X			Ja	Analyse und Ergänzung der laufenden Sanierung		X	Verursacher bzw. Eigentümer
1.3	Gefahrerforschung für 4 Bereiche		Untersuchungen zur Feststellung der Herkunft der LCKW	N	X			Ja	Grundwasseruntersuchungen	X		Wasserbehörde
1.4	Detailuntersuchung und Sanierung der identifizierten Schadensherden		Untersuchungs- und Sanierungsmaßnahmen	N		X	X	Ja	Untersuchungs- und Sanierungstechnologien je nach Standort	X	X	Einzelfallspezifische Zuständigkeit



No.	Maßnahme / Umsetzungsschritt	Skala	Beschreibung / Erklärung	Beginn in AMIIGA Projekt Laufzeit [J/N]	Geschätzter Durchführungszeitraum			Rechtliche / organisatorische Einschränkungen	Technische / technologische Maßnahmen	Finanzierungs-Verantwortung		Wer ist für die Implementierung verantwortlich?
					Kurzfristig (bis 2021)	Mittelfristig (bis 2025)	Langfristig (bis 2030)			Ist die Implementierung rechtlich und organisatorisch möglich?	Welche technischen bzw. technologischen Maßnahmen sind notwendig?	
Entwicklungsziel 2: Integrales Monitoring von Grundwasserdargebot und Grundwasserqualität												
2.	Integrales Monitoring von Grundwasserdargebot und Grundwasserqualität	Feuerbach und FUA	Im AMIIGA-Projekt wurde nachgewiesen, dass Grundwasserdargebot und Grundwasserqualität erheblichen Änderungen unterliegen. Um entsprechend reagieren zu können, ist ein Monitoring im Bochinger Horizont in einem integralen Monitoring,-Messnetz notwendig. Im Oberen Muschelkalk reicht eine Sammlung und Auswertung anfallender Daten aus.									
2.1.1	Integrales Monitoring im Oberen Aquifersystem	Feuerbach	Jährliches Monitoring in 8 Grundwassermessstellen	Ja	X	X	X	Ja	Entnahme und Untersuchung von Grundwasserproben, Installation von Datenloggern (Druckmessung)	X	-	AfU
2.1.2	Monitoring Oberer Muschelkalk	FUA	Datenabfrage bei Brunnenbetreibern	N		X	X	Ja	Datenbankeintrag	X	-	AfU
Entwicklungsziel 3: Sicherstellung der Durchführung erforderlicher Maßnahmen												
3.	Berichtswesen zur Sicherung der Durchführung erforderlicher Maßnahmen	Feuerbach und FUA	Berichtswesen	N		X	X	Ja	Keine	X	X	Stadtverwaltung