Technologiezentrum
Wasser

DVGW

Machbarkeitsstudie zur Teilenthärtung des Trinkwassers der Stadt Münzenberg

Auftraggeber: Stadt Münzenberg

Auftragnehmer: TZW: DVGW-Technologiezentrum Wasser, Karlsruhe

Bearbeiter: Dr.-Ing. Sebastian Hesse
Dr.-Ing. Marcel Riegel

Karlsruhe, August 2021

INHALTSVERZEICHNIS

1 Veranlassung und Aufgabenstellung 3

2 Ausgangsituation 4

3 Zielvorgaben der zentralen Enthärtung 9

4 Gründe für und gegen eine zentrale Enthärtung 11

5 Optionen der Härteverringerung 15

6 Konzeptoptionen 22

6.1 Teilenthärtung Gambach/Ober Hörgern 22

6.2 Zusammenführung der Rohwässer und zentrale Enthärtung 32

6.4 Konzeptvergleich 39

6.5 Kostenannahme 40

7 Zusammenfassung 43

8 Anlage 46

1 Veranlassung und Aufgabenstellung

Die Stadt Münzenberg stellt derzeit Überlegungen zur Verringerung der Härte im Trinkwasser von Teilbereichen bzw. ihres gesamten Versorgungsgebietes an. Im Zuge dieser Maßnahmen soll die Trinkwasserversorgung der Stadt Münzenberg hinsichtlich der erwarteten Klimaveränderung zukunftsträchtig sicherstellt werden.

Das TZW: DVGW-Technologiezentrum Wasser in Karlsruhe wurde mit der Erstellung einer Machbarkeitsstudie beauftragt, die neben der Ausarbeitung eines Verfahrenskonzepts zur zentralen Enthärtung auch die technischen Möglichkeiten zur Sicherstellung der Trinkwasserversorgung des gesamten Versorgungsgebietes beinhaltet. Die Ausarbeitung schließt eine ökologische und ökonomische Bewertung ein.

Als Grundlage der Machbarkeitsstudie wurde die vorhandene Aufbereitungstechnik bestandsmäßig erfasst und die Rohwasserbeschaffenheit jeweiligen Einzelwässer auf die für die Ausarbeitung der Studie relevanten Parameter analysiert. Die Auslegung der Anlagentechnik und die Kostenannahmen erfolgten anhand der langjährigen Erfahrungen des TZW.

2 Ausgangsituation

Die Stadt Münzenberg versorgt Münzenberg mit den Stadtteilen Gambach, Ober Hörgern und Trais mit Trinkwasser. Wie aus dem Versorgungsschema in Abbildung 1 hervorgeht, werden die Stadtteile Gambach und Ober Hörgern sowie Münzenberg und Trais jeweils getrennt mit unterschiedlich hartem Trinkwasser versorgt. Auffällig ist die relativ hohe Härte von 35 °dH des Trinkwassers des Versorgungsbereichs Gambach und Ober Hörgern. Das Trinkwasser der Versorgung Münzenberg und Trais weist hingegen mit 16 bis 17 °dH eine deutlich geringere Härte auf.

Aufgrund dieser unterschiedlichen Beschaffenheit sind die Trinkwässer der beiden Versorgungsbereiche entsprechend den Vorgaben des DVGW Arbeitsblattes W 216 nicht in beliebigen Anteilen mischbar. Aus diesem Grund wurde bislang keine Netzverbindung zwischen den beiden Versorgungen realisiert. Da auch keine Netzanbindungen zu benachbarten Versorgungen vorhanden sind, sind die Versorgungen somit ausschließlich von ihren eigenen Ressourcen abhängig.

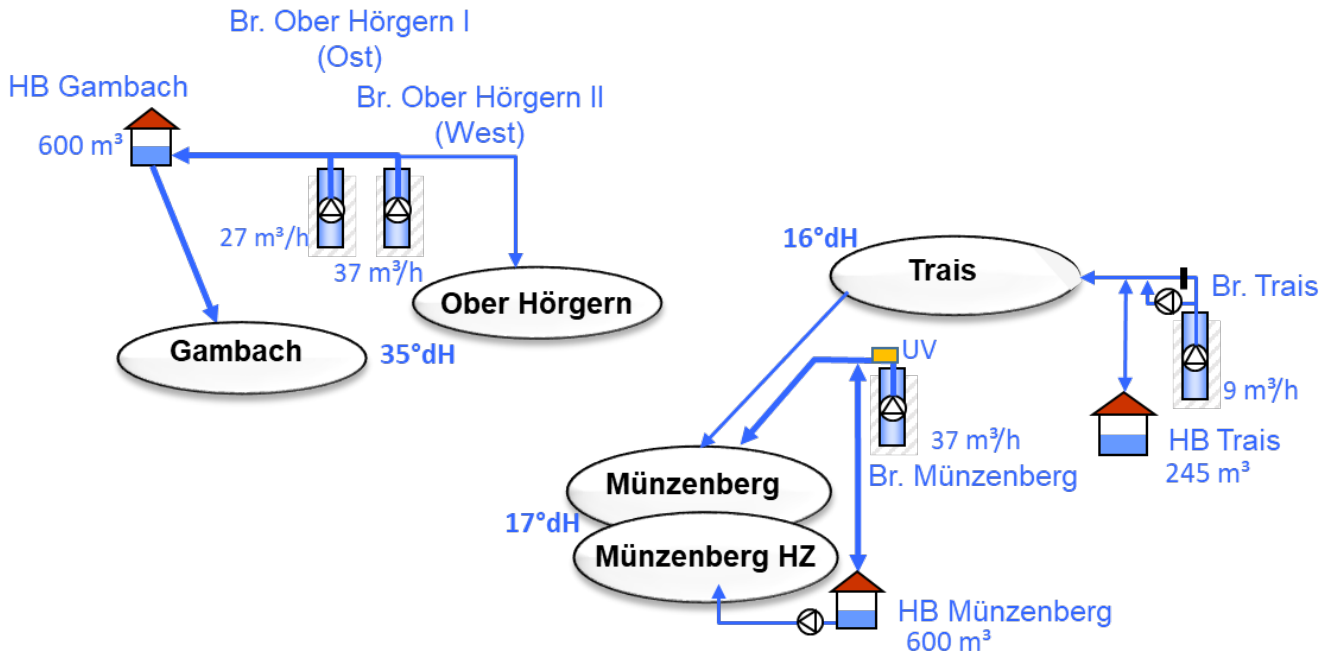

Abbildung 1: Vereinfachtes Versorgungsschema der Stadt Münzenberg

Die Trinkwassergewinnung des gesamten Versorgungsbereiches Münzenberg erfolgt durch die stadteigenen vier Grundwasserbrunnen aus drei räumlich getrennten Fassungsgebieten. Die geförderten sauerstoffhaltigen sowie eisen- und manganfreien Grundwässer werden ohne Aufbereitung in das jeweilige Versorgungsnetz eingespeist. Lediglich am Standort Brunnen Münzenberg wird das Trinkwasser vorsorglich mittels UV desinfiziert.

Der Trinkwasserbedarf des gesamten Versorgungsbereichs der Stadt Münzenberg liegt, wie aus Tabelle 1 hervorgeht, aktuell bei ca. 240.000 m³/a. Der Tagesspitzenbedarf des Versorgungsbereichs Gambach und Ober Hörgern wird mit 650 m³/d bzw. für den Versorgungsbereich Münzenberg/Trais mit 350 m³/d angegeben. Die Netzverluste im gesamten Versorgungsbereich sind mit < 5 % vergleichsweise gering.

Tabelle 1: Wasserbedarf und Bevorratung Münzenberg (2019/2020)

gerundet		**Gambach/Ober Hörgern**	**Münzenberg/Trais**
Zu versorgende Einwohner		3.850	2.000
Trinkwasserjahresbedarf	m³/a	150.000	90.000
Max. Tagesbedarf	m³/d	650	350
Bevorratungsmenge	m³	600	845
Personenspezif. Bedarf	m³/a/Pers	39	45
	L/Pers/d	107	123

Dem Versorgungsgebiet Münzenberg stehen entsprechend Tabelle 2 nach aktuellem Wasserrecht eine Entnahmemenge von insgesamt 325.000 m³ pro Jahr zur Trinkwassergewinnung zur Verfügung. Die Rohwasserreserve der Stadt Münzenberg liegt bezogen auf den aktuellen Jahresbedarf bei 85.000 m³/h, folglich bei 26 %. Die Wasserschutzgebiete sind aktuell behördlich langfristig sichergestellt.

Tabelle 2: Wasserrechte Stadt Münzenberg

Brunnen		**Ober Hörgern (I+II)**	**Münzenberg**	**Trais**
Erlaubte Stundenentnahme	m³/h	-	-	20
Installierte Entnahme	m³/h	27 / 37	37	12 (nutzbar 9)
Erlaubte Tagesentnahme	m³/d	-	-	480
Erlaubte Jahresentnahme	m³/a	196.000	99.000	30.000
Reserven (2019/2020)	m³/a	36.000 (24 %)	39.000 (30 %)	

Nach den Angaben des statistischen Landesamtes Hessen wird für den Kreis Wetterau bezogen auf das Jahr 2019 ein Bevölkerungswachstum im Jahr 2040 von ca. 3,7 % prognostiziert. Unter Berücksichtigung der weitergehenden Verringerung des personenbezogenen Trinkwasserbedarfs durch den Einsatz von wassereinsparenden Technologien im Haushalt und in der Industrie ist davon auszugehen, dass sich der Trinkwasserbedarf zukünftig ins-

gesamt nicht wesentlich erhöhen wird. Infolge des Klimawandels sind jedoch höhere Extremwerte hinsichtlich des Trinkwassertagesbedarfs zu erwarten, die bei der Auslegung der zentralen Anlagentechnik zu berücksichtigen sind.

Die Diagramme in Abbildung 3 zeigen den theoretischen Behälterstand bei einem Tagesspitzenbedarf der jeweiligen Versorgungsbereiche Gambach/Ober Hörgern mit 650 m³/d (linke Grafik) und Münzenberg/Trais mit 350 m³/d (rechte Grafik) von zwei aufeinanderfolgenden Tagen. Das Bewertungsbeispiel bezieht sich auf die im Juni 2020 aufgezeichneten Tagesbedarfsmengen, die eine aktuelle, extreme Versorgungssituation dargestellt.

Bei einer Einspeisung von 27 m³/h und 37 m³/h seitens der beiden Brunnen Ober Hörgern bzw. 37 und 9 m/h durch die Brunnen Münzenberg und Trais kann bei einen 22-stündigen Förderbetrieb die Füllstandsmenge der jeweiligen Behälter weitestgehend konstant gehalten werden. Somit sind im Normalbetrieb hinreichende Reserven zur Sicherstellung der Trinkwasserversorgung bei einem Spitzenbedarfsfall gegeben.

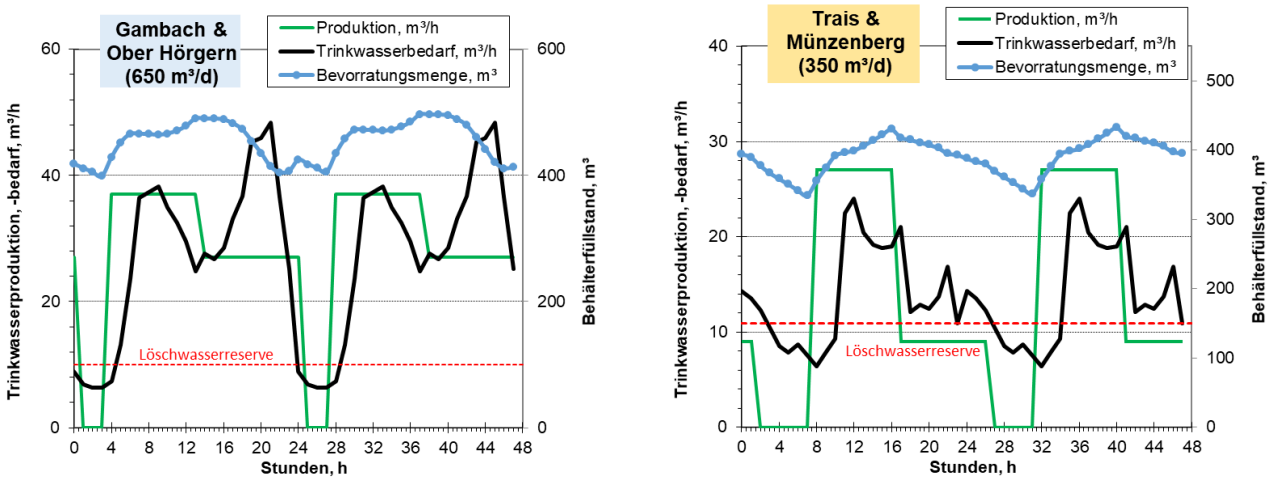

Abbildung 3: Behältersituation bei einem Spitzenbedarfsfall (2019/20)

Abbildung 4 zeigt die Versorgunssituation für die beiden Netzbereiche bei einem Ausfall eines Brunnens (Br. Ober Hörgern I bzw. Br. Münzenberg). Bei diesem dargestellten kritischen Szenario würde die Trinkwasserversorgung vom Netzbereich Gambach/Ober Hörgern mit dem Brunnen mit der geringeren Fördermenge weiterhin gewährleistet sein.

Bei Ausfall des Brunnens Münzenberg kann bei diesem Szenario der Trinkwasserbedarf des dazugehörigen Netzbereichs bei einem 24 Stundenbetrieb des Brunnens Trais nicht gedeckt werden. Für diesen Fall ist zur Absicherung die Erweiterung des Speichervolumens

anzuraten. Alternativ würde sich die Absicherung der Trinkwasserversorgung Münzenberg/Trais ein Zusammenschluss der beiden Versorgungsbereiche anbieten, sofern die wasserchemischen und leitungstechnischen Voraussetzungen gegeben sind.

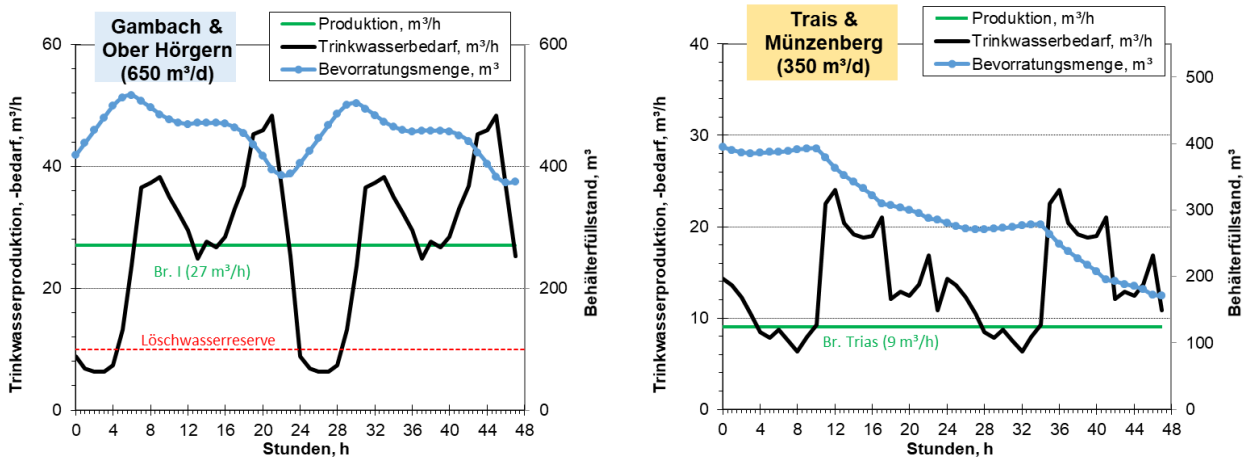

Abbildung 4: Versorgungssituation bei Ausfall der Trinkwasserbereitstellung bei einem Brunnen des jeweiligen Versorgungsbereichs bei einem Spitzenbedarfsfall

Zur weiteren Bewertung und Ausarbeitung von Konzeptvorschlägen wurden physikalisch-chemischen Vollanalysen durch das TZW durchgeführt und einer Plausibilitätsbetrachtung unterzogen. In Tabelle 3 sind die Messwerte von den relevanten Parametern aufgelistet. Sämtliche Messwerte gehen aus Anlage 1 hervor.

Tabelle 3: Rohwasserbeschaffenheit (Analysenauszug, gerundete Werte)

TZW-Labor, 29.07.2020		O.-Hörgern I (Ost)	O.-Hörgern II (West)	Münzen-berg	Trais
Calcium	mg/L	166	170	78	68
Magnesium	mg/L	49	50	28	26
Härte	**°dH**	**35**	**35**	**17**	**16**
Säurekapazität bis pH 4,3	mmol/L	6,3	6,3	5,5	3,8
Calcitabscheidekapazität bei FT	mg/L_{CaCO3}	38	37	13	1
Chlorid	mg/L	174	180	30	48
Sulfat	mg/L	75	73	13	49
Nitrat	mg/L	30	28	19	45
Korrosionsindex, S_1	soll < 0,5	1,1	1,1	0,3	0,8

FT…Fassungstemperatur

Die geförderten Grundwässer sind mit einer Härte von 35 °dH bzw. 16/17 °dH in den Härtebereich ‚*hart*' gemäß Wasch- und Reinigungsmittelgesetz einzuordnen. Die aus der Fassung Ober Hörgern geförderten Grundwässer sind bei Fassungstemperatur auffällig stark calcitabscheidend.

Gemäß dem Beurteilungskriterium zur Korrosionswahrscheinlichkeit bei Werkstoffen aus feuerverzinktem Stahl nach DIN EN 12502-3 weist der Korrosionsindex S_1 als Quotient aus Neutralsalzgehalt (Chlorid, Sulfat, Nitrat) und Hydrogencarbonatgehalt (Säurekapazität bis pH 4,3) auf eine tendenziell korrosionschemisch ungünstigere Beschaffenheit insbesondere des Grundwassers der Fassung Ober Hördern hin.

Die Nitratgehalte liegen mit Ausnahme des Brunnenwassers Trais deutlich unter dem gesetzlichen Grenzwert von 50 mg/L. Der Nitratgehalt des Brunnenwasser Trais hingegen liegt nur geringfügig unterhalb des Trinkwassergrenzwertes. Jedoch verringert er sich nach einer Förderung von ca. 15 min infolge des höheren Uferfiltratanteil auf einen Wert von aktuell ca. 35 mg/L.

Nach den vorliegenden Ergebnissen der jährlichen Rohwasseruntersuchungen liegen in allen Wässern keine Hinweise auf Pflanzenschutzmittel und -metabolite vor. Die zur Trinkwassergewinnung genutzten Wässer der vier Brunnen entsprechen den Vorgaben der Trinkwasserverordnung und weisen eine gute Beschaffenheit auf.

3 Zielvorgaben der zentralen Enthärtung

Aufgrund des nicht unerheblichen Hydrogencarbonat-Anteils (Parameterwert: Säurekapazität bis pH 4,3) kann es insbesondere beim hier vorliegenden harten Trinkwasser des Versorgungsbereichs Gambach/Ober Hörgern beim Erhitzen zu merklichen Kalkausfallerscheinungen kommen. Die rechnerisch ermittelte Calcitabscheidekapazität bei einer Wassertemperatur von 90 °C liegt nach Tabelle 4 bei ca. 140 mg/L $CaCO_3$ und damit deutlich über dem Wert von 70 mg/L $CaCO_3$, ab dem eine Enthärtung zur Vermeidung von Verkalkungsproblemen im Warmwasserbereich in Erwägung gezogen werden sollte (DVGW-Arbeitsblatt W 235-1, Oktober 2009).

Die Calcitabscheidekapazität bei 90°C der zur Trinkwassergewinnung genutzten Grundwässer Münzenberg und Trais weisen aufgrund der geringeren Härte bzw. des geringeren Hydrogencarbonat-Anteils eine geringere Calcitabscheidekapazität auf, die in der Mischung im Bereich des genannten Bewertungswertes des DVGW-Arbeitsblatt W 235 bzw. darunterliegen.

Tabelle 4: Calcitabscheidekapazität der Trinkwässer der Stadt Münzenberg

Berechnet mit CAS-Programm (K.H. Johannsen)		O.-Hörgern I (Ost)	O.-Hörgern II (West)	Münzenberg	Trais
Calcitabscheidekapazität bei **FT**	mg/L_{CaCO3}	38	37	13	1
Calcitabscheidekap. bei **90°C**	mg/L_{CaCO3}	140	140	84	47

FT: Fassungstemperatur

Eine Prüfung von Möglichkeiten zur Verringerung der Härte, auch im Hinblick einer Vereinheitlichung der Trinkwasserbeschaffenheit im gesamten Versorgungsbereich der Stadt Münzenberg, erscheint speziell aus Verbrauchersicht gerechtfertigt, da der gleiche Wasserpreis für den gesamten Versorgungsbereich hoben wird.

Sofern zentrale Maßnahmen zur Verringerung der Härte im Trinkwasser realisiert werden, sollten die Vorteile von weichem Trinkwasser durch den Verbraucher wahrgenommen werden können. Dies ist bei der Auswahl des Verfahrens sowie bei der Wahl der Zielhärte von wesentlicher Bedeutung.

In Abbildung 5 sind Ergebnisse von mehreren Kochtests dargestellt, bei denen die ausgefallene Kalkmenge von unterschiedlich harten und hydrogencarbonathaltigen Trinkwässern nach dem Sieden ermittelt wurde. Erfahrungsgemäß wird beim Verbraucher ein Trinkwasser hinsichtlich des Kalkausfalls als zufriedenstellend empfunden, wenn beim Kochtest eine Calcitabscheidekapazität von < 30 mg/L $CaCO_3$ vorliegt. Dieser Zufriedenheitsbereich ist in

Abbildung 5 grün dargestellt und wird je nach Beschaffenheit des vorliegenden Wassers erfahrungsgemäß bei einer Zielhärte von 8° bis 10° dH und einem Hydrogencarbonatgehalt von < 3 mmol/L erreicht.

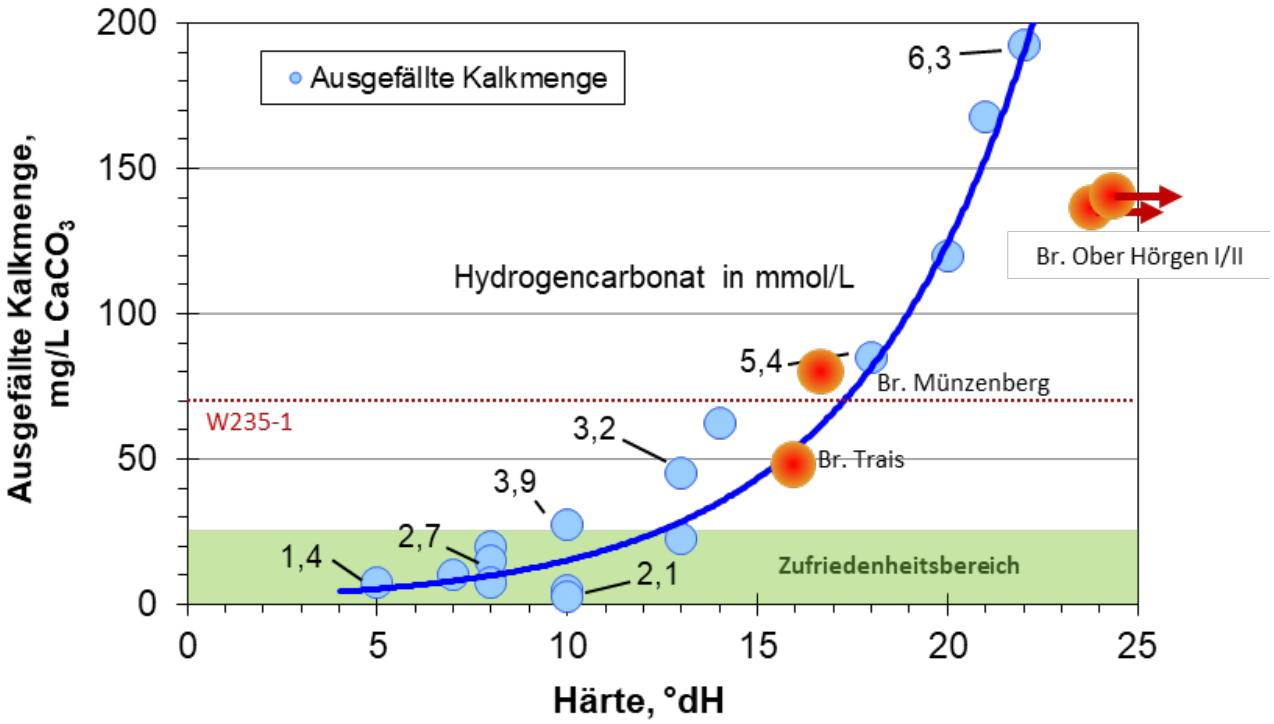

Abbildung 5: Calcitabscheidekapazität vor und nach einer zentralen Enthärtung bei 90 °C

Aus korrosionschemischer Sicht kann bei einer zentralen Enthärtung neben der damit verbundenen pH-Wert-Anhebung die korrosionschemische Beschaffenheit des Trinkwassers verbessert werden. Ferner ist beim Einsatz von Entsalzungsverfahren eine Teilentfernung von Nitrat (Ionenaustausch/CARIX bzw. Membranverfahren) und Spurenstoffen (Membranverfahren) möglich. Dies ist insbesondere hinsichtlich der möglichen Belastung durch den Tageabbau für den Standort Ober Hörgern von Bedeutung.

Alle Anforderungen der aktuellen TrinkwV sind allerdings im vorliegenden Fall in dem verteilten Trinkwasser erfüllt. Ein dringender Handlungsbedarf beispielsweise durch eine zentrale Enthärtung ist daher nicht abzuleiten.

4 Gründe für und gegen eine zentrale Enthärtung

Aufgrund der vorliegenden Härte und Wasserzusammensetzung besteht keine Notwendigkeit das Trinkwasser zu enthärten, um seine Qualität als Lebensmittel zu verbessern. Die Trinkwässer im gesamten Versorgungsbereich der Stadt Münzenberg zeichnen sich durch eine sehr gute Wasserbeschaffenheit aus. Sie entsprechen den Qualitätsanforderungen der TrinkwV und den Leitsätzen der DIN 2000.

Unter gesundheitlichen Aspekten kann keine „optimale Trinkwasserhärte“ festgelegt werden[1]. Der normale Trinkwasserkonsum ist zur Deckung des erforderlichen Tagesbedarfs an den lebenswichtigen Mineralstoffen Calcium und Magnesium allerdings bei weitem nicht ausreichend[2].

Der Wunsch nach weicherem Wasser ist aus Sicht des Kunden durchaus nachvollziehbar, da der überwiegende Teil des Trinkwassers (> 96 %) nicht als Lebensmittel, sondern als Brauchwasser für verschiedenste Aufgaben im Haushalt verwendet wird. Hier erweist sich die relativ hohe Karbonathärte durch unerwünschte Kalkablagerungen beim Erwärmen des Wassers als Nachteil.

Auch Kalkrückstände, die nach Verdunsten des Wassers insbesondere auf Sanitärarmaturen zu beobachten sind, führen zu Beanstandungen durch den Verbraucher. In diesem Zusammenhang sei auf die Empfehlungen der DIN 1988-200 und des DVGW-Arbeitsblattes W 235-1 hingewiesen. In dem DVGW-Arbeitsblatt werden explizit Werte angegeben, ab der eine Enthärtung in Erwägung gezogen werden sollte.

Kalkablagerungen in Warmwassergeräten und Leitungen werden bei Betrieb mit enthärtetem Wasser minimiert, so dass geringere Kosten für Energie und Entkalkungsmaßnahmen resultieren. Außerdem verlängert sich die Lebensdauer von Geräten und Armaturen im Warmwasserbereich. Es ergeben sich demnach durch eine Enthärtung merkliche Kosteneinsparungen. Zudem wird der Komfort durch die verbesserten Gebrauchseigenschaften von enthärtetem Trinkwasser erhöht.

---

[1] Hardness in Drinking-water - Background document for development of WHO Guidelines for Drinking-water Quality http://www.who.int/water_sanitation_health/dwq/chemicals/hardness.pdf

[2] Sinclair, M.I. und Schlosser, O. (2006): Evaluating the epidemiological evidence on the effects of calcium and magnesium in drinking water on cardiovascular disease rates. A Review for the Global Water Research Coalition, CRC for Water Quality and Treatment & Department of Epidemiology and Preventive Medicine, Monash University, Melbourne, Australia

Eine hohe Wasserhärte bedingt darüber hinaus einen erhöhten Verbrauch an Wasch- und Reinigungsmitteln. Dies führt mit steigender Wasserhärte einerseits zu erhöhten Kosten für den Verbraucher, andererseits resultiert eine zunehmende Belastung des Abwassers mit Verbrauchsstoffen. Durch eine zentrale Enthärtung verringert sich der Eintrag von Wasch- und Reinigungsmitteln (Phosphate, Detergenzien usw.) in das Abwasser und damit in die Umwelt.

Zur Vermeidung von nachteiligen Auswirkungen der Wasserhärte werden in privaten Haushalten, in öffentlichen Einrichtungen sowie bei Handwerk und Industrie in verschiedenen Fällen dezentrale Enthärtungsanlagen oder Anlagen zur Härtestabilisierung betrieben. Häufig finden sich als fest installierte Geräte in Haushalten Ionenaustauscher, bei denen die Härtebildner Calcium und Magnesium gegen Natrium ausgetauscht werden. Die Gefahr der Verkeimung ist hier groß, so dass die Geräte sich aus hygienischen Gründen mit Chlor desinfizieren und regelmäßig zu warten sind.

Die dezentralen Anlagen (Kationenaustauscher) müssen mit Kochsalz (Natriumchlorid) regeneriert werden und führen damit zu erhöhten Salzfrachten im Abwasser. Der jährliche Bedarf an Regeneriersalz bei dem betrachteten Versorgungsgebiet (Trinkwasserbedarf: 0,24 Mio. m³/a, 5.850 Verbraucher) wird auf die Größenordnung von 26,6 t/a (21 t/a aus dezentralen Anlagen[3] und ca. 5,6 t/a aus Spülmaschinen[4]) geschätzt. Bei der Bedarfsabschätzung wird angenommen, dass 90 % der Haushalte eine Spülmaschine benutzen (Spülwasserbedarf: 5 L/d/Person), 25 % der Haushalte eine dezentrale Ionenaustauscheranlage im Vollstrom betreiben sowie bei den meisten Anwendungen ein zweifacher Salzüberschuss für die Regenerierung des Ionenaustauschers erforderlich ist.

Bei Einsatz von Tischgeräten zur Wasserbehandlung kommt es zudem zu hohen Abfallbelastungen, da die beladenen Filterpatronen in der Regel nicht regeneriert bzw. recycelt werden. Auch aus ökologischer Sicht sind daher Gründe für eine zentrale Enthärtung des Trinkwassers durch den Wasserversorger gegeben.

Einrichtungen zur zentralen Enthärtung erfordern allerdings Investitionen und einen technischen und personellen Aufwand. Dadurch erhöht sich i. d. R. der Bezugspreis für das Trinkwasser. Dieser Preiserhöhung stehen Ersparnisse in den Haushalten aufgrund des geringeren Verbrauchs an Energie, Wasch- und Reinigungsmitteln sowie durch Einsparungen

---

[3] Dezentrale Enthärtungsanlagen (Ionenaustauscher): 25 % der Haushalte =60.000 m³/a Aufbereitungsmenge à 3 mol/m³ NaCl, 2-facher Salzüberschutz für die Regeneration = 21 t/a NaCl

[4] Spülmaschinen: 90 % der Haushalte, 5L/Person/d = 9.600 m³/a Spülwasserbedarf à 5 mol/m³ NaCl, 2-facher Salzüberschutz für die Regeneration = 5,6 t/a NaCl

beim Betrieb von Warmwasserbereitungsgeräten, speziell deren Wartung und gegebenenfalls dezentralen Enthärtungsanlagen gegenüber.

Bei angepasstem Verbraucherverhalten können sich nach den Ergebnissen einer Studie durch das Fraunhofer-Institut im Jahr 2004 bei einer zentralen Enthärtung gemäß Tabelle 5 Kosteneinsparungen bei einem Jahresbedarf im vorliegenden Fall von rund 41 m³/Person im Größenbereich von 0,66 €/m³ ergeben. Es ist davon auszugehen, dass sich die Kosten seitdem tendenziell erhöht haben und daher höhere Mindesteinsparungen bei Bezug von weicherem Trinkwasser zu erwarten sind. Aktuellere Daten hierzu von weiteren Studien sind derzeit leider nicht verfügbar.

Die Kosten für dezentrale Maßnahmen im Haushalt werden bei der genannten Studie mit mindestens 2 €/m³ enthärtetes Trinkwasser angegeben. Bei der Stilllegung dezentraler Enthärtungsanlagen im Privatbereich lassen sich Betriebskosten von etwa 1 €/m³ je nach Einstellung und Gerätetyp einsparen. Die Kosteneinsparungen sind allerdings individuell sehr unterschiedlich. In der Bilanz kann sich eine finanzielle Entlastung des Verbrauchers ergeben.

Tabelle 5: Kosteneinsparungen für den Verbraucher bei Bezug von weicherem Trinkwasser[5]

Härteverringerung von hart auf weich	
gerundete Angaben	in € pro Person und Jahr
Wasch- und Reinigungsmittel	8,00
Regeneriersalz (Spülmaschine)	0,50
Energie-/Wasserverbrauch	3,00
Zusätzliche Wartung (Warmwasser)	15,50
Gesamteinsparung p.a.	**27,00**
Einsparung pro m³ (Wasserbedarf: 41 m³/a/Person)	**~0,66 (€/m³)**
Einsparung pro Person bei Außerbetriebnahme einer dezentralen Enthärtung (Ionenaustauscher*)	40,00 **~1 (€/m³)**

* Regeneriersalz, Strom, Wasser, Wartung

[5] ISI Fraunhofer-Studie (2004): Ökologische und ökonomische Bewertung der zentralen Enthärtung von Trinkwasser, ISBN 3-8167-6477-0.

Als Nachteile einer zentralen Enthärtung, insbesondere für das Wasserversorgungsunternehmen, sind folgende Punkte zu nennen:

- Die Einrichtungen zur zentralen Enthärtung erfordern entsprechende Investitionen und einen zusätzlichen technischen Aufwand.
- Der Betrieb von Enthärtungsanlagen ist mit einem personellen Aufwand verbunden. Für den Betrieb der Enthärtungsanlagen muss qualifiziertes Personal vorhanden sein, das die Anlagen regelmäßig überwacht und wartet. Diese zusätzlichen Maßnahmen bedingen höhere Personalkosten.
- Bei der zentralen Enthärtung fallen flüssige oder feste Rückstände an, die entsorgt oder verwertet werden müssen. Das flüssige Konzentrat bzw. Eluat wird üblicherweise in ein Gewässer abgeleitet, wofür eine entsprechende Genehmigung erforderlich ist.
- Je nach eingesetztem Verfahren werden gemäß § 11 TrinkwV zugelassene Hilfsstoffe (Säure, Laugen, Antiscalants) zur Fällung oder zur Stabilisierung des Anlagenbetriebes eingesetzt.
- Der ggf. bei Betrieb einer Enthärtungsanlage erforderliche Zusatzwasserbedarf muss jederzeit verfügbar sein. Dieser beträgt je nach eingesetztem Verfahren bis zu ca. 20 %.
- Der Energiebedarf und die Kosten für die Aufbereitung steigen. Zusammenfassend ist jedoch festzuhalten, dass eine zentrale Enthärtung bei Vorliegen entsprechend harter Wässer sowohl aus ökonomischen als auch aus ökologischen Gründen sinnvoll sein kann.

5 Optionen der Härteverringerung

Weichwasserbezug

Prinzipiell besteht die Möglichkeit, eine Härteverringerung durch Zumischen von weicherem Trinkwasser zu erreichen. Hierzu muss die Zumischung zentral und bei gleichbleibendem Mischungsverhältnis erfolgen, um korrosionschemische Probleme bei einer wechselnden Zusammensetzung zu vermeiden. Ggf. ist eine Nachbehandlung und Stabilisierung des Mischwassers (Entsäuerung) erforderlich.

Bei Bezug und Zumischung von weichem Trinkwasser beispielsweise vom benachbarten Zweckverband Mittelhessische Wasserwerke (ZVM) mit der Härte von 6 °dH wäre beim Netzbereich Gambach/Ober Hörgern aufgrund der dort hohen Härte eine weitestgehende Vollversorgung mit dem Bezugswasser erforderlich. Bei einem Zumischungsanteil des ZVM-Wassers von ca. 75 bis 80 % würde sich beispielsweise für den Netzbereich Gambach/Ober Hörgern ein ca. 12-grädiges Trinkwasser im Härtebereich „mittel“ ergeben. Bei diesem Mischungsverhältnis würde die Härteverringerung für den Verbraucher spürbar werden und zu einer wesentlichen Komfortverbesserung führen.

Allerdings muss die erforderliche Bezugsmenge durch den benachbarten Zweckverband zur Verfügung stehen und eine Leitungsanbindung vorhanden sein. Aufgrund des erforderlichen relativ großen Zumischanteils des ZVM-Wassers und der damit verbundenen zusätzlichen Betriebskosten erscheint es aus betriebswirtschaftlicher Sicht sinnvoll, die Enthärtung des Eigenwassers in vorliegenden Fall zentral in Eigenregie zu realisieren.

Zentrale Enthärtung

Großtechnisch besteht die Möglichkeit einer Härteverringerung mittels folgender Verfahren:

- Kalkfällungsverfahren
- Ionenaustauschverfahren
- Membranverfahren

Die Verfahren unterscheiden sich unter anderem hinsichtlich der resultierenden Zusammensetzung des Trinkwassers und seinen korrosionschemischen Parametern, der hydraulischen Flexibilität sowie in der Menge und Zusammensetzung des anfallenden Abwassers bzw. der Reststoffe. Darüber hinaus sind der erforderliche zusätzliche Wasserbedarf, die Kosten für den Kapitaldienst und den Anlagenbetrieb sowie der erforderliche zusätzliche Personaleinsatz von wesentlicher Bedeutung.

In der Regel wird großtechnisch, wie in Abbildung 6 dargestellt, nur eine Teilstrommenge enthärtet und die gewünschte Trinkwasserhärte durch Verschnitt mit unbehandeltem, nicht enthärtetem Wasser eingestellt (Teilstromverfahren).

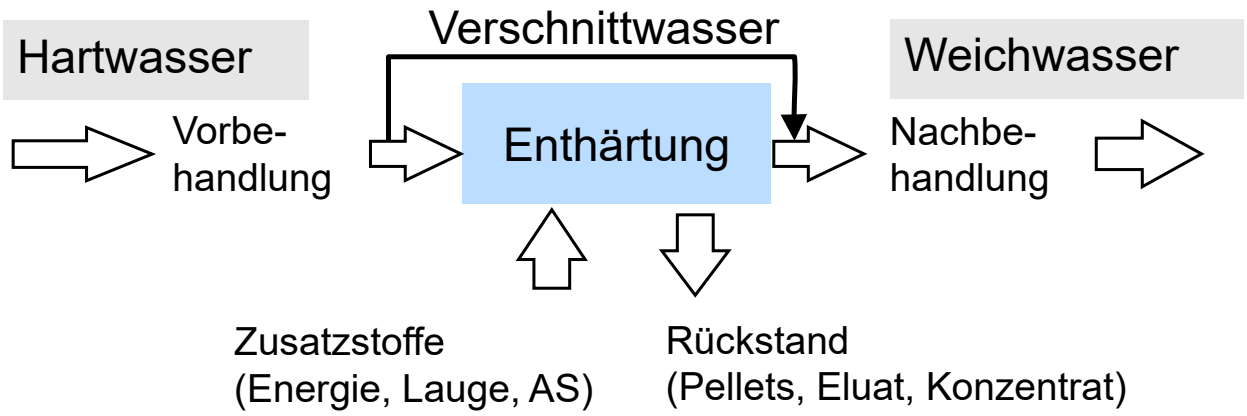

Abbildung 6: Verfahrensprinzip der zentralen Enthärtung (Teilstromverfahren), AS: Antiscalant

Bei allen Verfahren ist eine Nachbehandlung des enthärteten Wassers zur Einstellung des Kalkkohlensäuregleichgewichtes erforderlich. Dadurch wird der pH-Wert angehoben und damit die aus korrosionschemischen Gründen erwünschte Minimierung der Löslichkeit von Metallwerkstoffen aus Rohren und Armaturen erreicht.

Kalkfällungsverfahren

Bei den Kalkfällungsverfahren entsteht unter Zugabe von Calcium- oder Natriumhydroxid unlösliches Calciumcarbonat (Kalk) in Form von Schlamm (Langsamentcarbonisierung, LEC) bzw. Pellets (Schnellentcarbonisierung, SEC). Der anfallende Kalkschlamm bzw. die Pellets werden in regelmäßigen Zeitabständen abgezogen. Eine Verringerung der Magnesiumhärte erfolgt bei diesem Verfahren in der Regel nicht, da dies hohe Dosiermengen erfordert.

Verfahrensbedingt werden bei Fällungsverfahren keine Neutralsalze (Nitrat, Sulfat) entfernt. Gemäß DIN EN 12502-3 wird infolgedessen das enthärtete Trinkwasser hinsichtlich des Korrosionsparameters S_1 im Hinblick auf die Korrosion von verzinkten Eisenwerkstoffen ungünstiger als das nicht enthärtete Wasser.

Der Investitionsbedarf für den Bau einer SEC-Anlage, ihre gebäudetechnische Unterbringung und der personelle Aufwand für den Anlagenbetrieb sind vergleichsweise hoch. Letzteres betrifft auch die Anforderungen für die der SEC-Anlage nachzuschaltenden Filterstufen zur Nachbehandlung des entcarbonisierten Wassers.

Für den vorliegenden Fall ist das Kalkfällungsverfahren daher nicht zu empfehlen.

Ionenaustauschverfahren

Bei Ionenaustauschern, wie sie auch im Haushalt zur dezentralen Enthärtung eingesetzt werden, erfolgt ein Austausch der Härtebildner Calcium und Magnesium gegen Natrium. Die Regeneration wird mittels einer Sole (gesättigte Kochsalzlösung) durchgeführt, wobei zum weitestgehend vollständigen Verdrängen der Härtebildner eine überstöchiometrische Menge an Kochsalz erforderlich ist. Dies führt zu vergleichsweise hohen Natriumgehalten im enthärteten Wasser und darüber hinaus zur Aufsalzung des Abwassers bei Gebrauch solcher Anlagen. Dieses Verfahren ist daher aus ökologischen Gründen für die zentrale Enthärtung nicht zugelassen.

Bei dem als CARIX bezeichneten Verfahren erfolgt die Regeneration des Ionenaustauscherharzes mit Kohlendioxid (CO_2). Dabei ergibt sich keine zusätzliche Aufsalzung des Abwassers, da das entstehende Eluat lediglich die aus dem Rohwasser entfernten Salze in aufkonzentrierter Form enthält. Je nach eingesetztem Harztyp werden auch Neutralsalze (Nitrat, Sulfat) teilentfernt.

Kernstück der Anlage sind die Austauscherfilter, die mit den Austauscherharzen befüllt sind. Es werden meist drei Filter parallel eingesetzt, von denen sich zwei in der Betriebs- und ein Filter in der Regenerations- bzw. Standby-Phase befinden. Bei dem Ionenaustauscherverfahren ist prinzipiell ein der Anlage unmittelbar nachgeschalteter, hinreichend groß dimensionierter Reinwasserbehälter (vorzugsweise mindestens das Fünffache der maximalen Stundenleistung) mit entsprechender Vermischungseinrichtung vorzusehen, um die verfahrensbedingt schwankenden Ablaufwerte der Austauscherfilter zu vergleichmäßigen.

Die gesamte Ionenaustauscheranlage besteht aus mehreren Stufen, den Austauscherfiltern, den Einrichtungen zur Be- und Entgasung sowie entsprechend hinreichend groß dimensionierten Behältern zur Bevorratung von Spülwasser und zur Vergleichmässigung der Eluatableitung. Zur erforderlichen pH-Wert-Korrektur (Entsäuerung) des enthärteten Wassers ist eine Entsäuerungsanlage nachgeschaltet. Zur Rückgewinnung von eingesetztem CO_2 wird in der Regel eine Unterdruckanlage betrieben.

Der zusätzliche Rohwasserbedarf durch die Regeneration des Ionenaustauschers liegt abhängig vom gewählten Austauscherverhältnis und dem Anteil des zwischengespeicherten Regenerationswassers (Eluat) im Größenbereich von 5 bis 20 % bezogen auf die produzierte Trinkwassermenge. Insbesondere bei einer ggf. erforderlichen Mitentfernung von Chlorid und Nitrat und entsprechend hohen Anteil des Anionenaustauschers ist eine vergleichsweise häufige Regenration der Harze notwendig, wodurch ein höherer Eluatanfall resultiert.

Gegebenenfalls ist der Zusatz eines Fällungsinhibitors (Antiscalant) zur Vermeidung von Kalkablagerung in den Zwischenbehältern bzw. in der Ablaufleitung des Eluates erforderlich. Sofern wie im vorliegenden Fall keine Option für die Einleitung des Eluates in den Vorfluter besteht (Wetter), werden zusätzliche Kosten durch die Abwassergebühren anfallen.

Der technische Aufwand und der Investitionsbedarf bei dem CARIX-Verfahren sind insbesondere bei relativ kleinen Anlagen vergleichsweise hoch. Ferner ist zum Konzentrationsausgleich ein hinreichend dimensionierter Reinwasserbehälter vor der Netzeinspeisung erforderlich, so dass sich beim Verfahren CARIX ein vergleichsweise hoher Investitionsbedarf ergibt.

Membranverfahren

Bei den Membranverfahren werden durch den Einsatz von Diffusionsmembranen (Nanofiltration, NF / Umkehrosmose, UO) gelöste Salze, insbesondere die zweiwertigen Calcium-Magnesium- und Sulfat-Ionen, zurückgehalten. Die Membranen sollten über eine Zulassung für den Einsatz im Trinkwasser gemäß §17 der Trinkwasserverordnung, wie beispielsweise gemäß der KTW-Leitlinie des Umweltbundesamtes, verfügen. Derzeit stehen allerdings nur eine geringe Anzahl von Umkehrosmose-Membrantypen zur Verfügung, die dieser Anforderung genügen.

Die zu installierende Anlagentechnik besteht wie in Abbildung 7 schematisch dargestellt aus der Membrananlage und einer Belüftungsanlage zur pH-Wert-Einstellung (Entsäuerung) des enthärteten Mischwassers. Zur Einstellung der gewünschten Trinkwasserzusammensetzung bzw. des Härtegrades wird lediglich eine Teilstrommenge des Rohwassers der Membrananlage zugeführt und mit nicht enthärtetem Trinkwasser auf den gewünschten Härtegrad verschnitten.

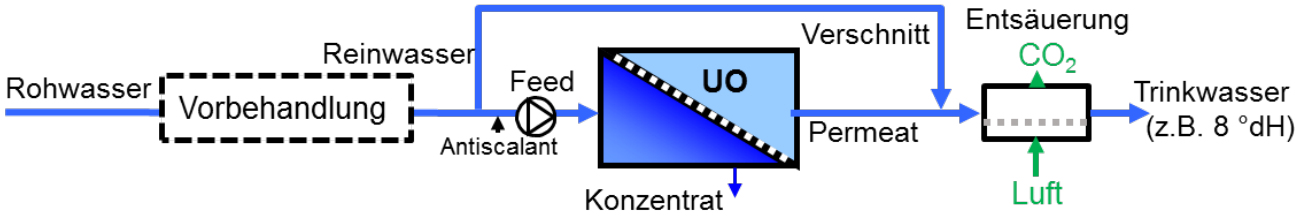

Abbildung 7: Verfahrensschema bei Einsatz der Umkehrosmosetechnik

Die Membranverfahren erfordern, wie Praxiserfahrungen seit gut drei Jahrzehnten zeigen, aufgrund der hohen Automatisierung und der aus der Meerwasserentsalzung stammenden ausgereiften Technik einen vergleichsweise geringen Überwachungs- und Personalaufwand. Ein Stop-/Go-Betrieb ist i. d. R. problemlos möglich, sollte jedoch aufgrund der erforderlichen Spülvorgänge und des damit verbundenen Zusatzwasserbedarfs minimiert werden.

Um eine Verblockung der Membranen zu vermeiden, werden sogenannte Antiscalants in den Zulauf der Membrananlage dosiert, so dass die Bildung von schwerlöslichen Salzen zeitlich verzögert wird. Derzeit stehen gemäß § 11 TrinkwV phosphorhaltige Antiscalantprodukte (Polyphosphate, Phosphonsäuren) und phosphorfreie Produkte (Polyacrylsäuren) zur Verfügung. Bei Einsatz von dichten Umkehrosmosemembranen verbleibt das Antiscalant weitestgehend im Konzentrat.

Die erzielbare Ausbeute an enthärtetem Trinkwasser bezogen auf die benötigte Rohwassermenge liegt alleine für den mittels Membran behandelten Wasserstrom in der Größenordnung von ca. 80 %. Hier werden die aus dem Rohwasser zurückgehaltenen Ionen im Konzentrat um etwa das Fünffache aufkonzentriert. Die anfallende Konzentratmenge und entsprechend der zusätzliche Rohwasserbedarf liegen je nach behandeltem Teilstromanteil (Zielhärte) etwa bei 10 bis 15 % bezogen auf die Trinkwassermenge.

In etwa jährlichen Zeitabständen müssen anhaftende Ablagerungen auf den Membranen durch eine chemische Reinigung (CIP: cleaning in place) entfernt werden. Dies kann im Rahmen eines Wartungsvertrages durch den Anlagenbauer oder durch Serviceunternehmen erfolgen. Nach Neutralisierung fällt ein gut gepuffertes, salzhaltiges Abwasser von wenigen m³ an, welches unbedenklich in die öffentliche Kanalisation oder gegebenenfalls mittels LKW entsorgt werden kann.

Eine Verwertung des bei den Membranverfahren anfallenden Konzentrats ist nicht möglich. Die Möglichkeiten der Konzentratableitung, beispielsweise in einen Vorfluter oder in eine Kläranlage, müssen daher mit den entsprechenden Genehmigungsbehörden abgestimmt

werden. Aufgrund der hohen Calcitabscheidekapazität des Konzentrats muss das Konzentrat prinzipiell auf möglichst kurzem Wege abgeleitet werden.

Die Anlagentechnik ist sehr kompakt und modular aufgebaut, so dass für die Unterbringung die gebäudetechnischen Anforderungen vergleichsweise gering sind. In der öffentlichen Trinkwasserversorgung in Deutschland sind derzeit mehr als 100 Anlagen in Betrieb. Diese zeigen i. d. R. einen störungsfreien und personalminimierten Betrieb.

Grundvoraussetzung für die Realisierung des Membranverfahrens ist wie beim CARIX-Verfahren allerdings die betriebswirtschaftlich tragbare Entsorgungsmöglichkeit des beim Anlagenbetrieb der Enthärtung anfallenden Konzentrats. Im Fall einer Einleitung in die Kanalisation sind gegebenenfalls Abwassergebühren zu entrichten, die in der Größenordnung der sonstigen Betriebskosten der Enthärtung liegen können.

Verfahrenswahl

Der Verfahrensvergleich anhand ausgewählter Auswahlkriterien geht aus Tabelle 6 hervor. Aus dem Verfahrensvergleich geht hervor, ist das Membranverfahren im vorliegenden Fall zur zentralen Enthärtung von Trinkwasser aufgrund der kompakten Bauweise und der vergleichsweise geringen Investitionsausgaben, des geringen Betriebsaufwandes zur Gewährleistung der Zielwerte sowie aus korrosionschemischer Hinsicht zu favorisieren ist.

Grundvoraussetzung für eine mögliche Realisierung ist eine hinreichende nutzbare Wasserreserve, die jedoch im vorliegenden Fall gegeben ist. Für eine betriebswirtschaftlich tragbare Lösung muss bei Einsatz der Membrantechnik die Möglichkeit einer kostengünstigen Entsorgungsmöglichkeit des beim Membranbetrieb anfallenden kalkhaltigen Konzentrats gegeben sein.

Um die bei einer zentralen Enthärtung resultierenden verringerten Pufferungskapazität des Abwassers wieder auszugleichen, ist eine direkte Ableitung des Konzentrats für die Abwasserbehandlung hilfreich, da sich die Abwasserbeschaffenheit aufgrund des durch die zentrale Enthärtung geringeren Chemikalieneinsatzes im Haushalt entsprechend ändert und durch die Konzentrat-Zuführung der derzeitige Zustand wiederhergestellt wird.

Hinsichtlich der vorliegenden Wasserbeschaffenheit sind nach den TZW-Untersuchungen in Anlehnung an das DVGW-Regelwerk W 235 keine wesentlichen Einschränkungen für den Einsatz der Umkehrosmosemembranen zu erwarten. Der ermittelte vergleichsweise geringe Kolloidindex-Wert von < 3 %/min deutet auf eine gute Filtrierbarkeit der Grundwässer mit Ausnahme Br. Münzenberg durch Membranen hin. Zur Maximierung der Ausbeute und

zur Minimierung des Zusatzwasserbedarfs sollte vorsorglich die Möglichkeit zur Dosierung von Kohlenstoffdioxid im Anlagenzulauf der Membrananlage vorgesehen werden.

Sofern eine zentrale Enthärtung realisiert wird, können während der Umstellungsphase von hartem zu deutlich weicherem Trinkwasser kurzzeitig Trübungserhöhungen im Netzwasser auftreten. Daher sollte prinzipiell der Austausch von hartem mit weichem Trinkwasser möglichst rasch erfolgen. Entsprechende Hinweise für den Verbraucher sind dringend zu empfehlen. Die Wasserumstellung kann mittels Messung der elektrischen Leitfähigkeit kontrolliert und dokumentiert werden. Im Zeitraum der Umstellung von hartem auf weiches Trinkwasser sollte die Trübung im Trinkwasser an kritischen Stellen im Netz online überwacht werden.

Tabelle 6: Verfahrensvergleich der zentralen Enthärtungsverfahren

Kriterium	Fällung	Ionenaustausch	Membran
Aufbereitungsziel	12 °dH	8 °dH	8 °dH
Verringerung der Gehalte an Nitrat, Sulfat, Chlorid (korrosionschemisch günstig)	nein	ja	ja
Verringerung der Gehalte an anthropogenen Spurenstoffen	nein	nein	ja
Rohwasservorbehandlung	nicht erforderlich	weitestgehend Trinkwasserqualität	Trinkwasserqualität
Zusatzstoffe (Trinkwasserzulassung gemäß §11-Liste TrinkwV2001)	$Ca(OH)_2$, Flockungshilfsmittel, HCl/NaOH zur Reinigung	CO_2, ggf. Fällungsinhibitor (Antiscalant) für Eluat	Antiscalant HCl/NaOH zur Reinigung
Ausbeute Trinkwasser	> 97 %	> 85 %	> 85 %
Rückstand	Pellets (fest)	Eluat (flüssig)	Konzentrat (flüssig)
Stop-/Go-Betrieb	ungünstig	möglich	möglich
Betreuungsaufwand	hoch	gering	gering
Platzbedarf	hoch (Reaktor, Kalkmilchbereitung, Filterstufe, Vorlagebehälter, Absetzbecken)	hoch (Kessel, Intensivbelüfter, Eluat-Vorlagebehälter, Verdichterstation, CO_2-Tank)	gering (Membranracks, Intensivbelüfter, Vorlagebehälter)
Relativer Investitionsbedarf (Technik + Gebäude)	hoch (Erweiterung der Filterstufe erforderlich)	hoch	mittel
Energiebedarf	gering	höher	höher

In Anlehnung an DVGW-Arbeitsblatt W235-1

6 Konzeptoptionen

Vor dem Hintergrund der langfristigen Sicherstellung der Trinkwasserversorgung des gesamten Versorgungsgebietes der Stadt Münzenberg mit der Option einer spürbaren Härteverringerung insbesondere im Teilbereich Gambach/Ober Hörgern ergeben sich folgende Konzeptoptionen:

- Teilenthärtung des Trinkwassers des Teilbereiches Gambach/Ober Hörgern zur Angleichung der Trinkwasserbeschaffenheit und korrosionschemisch zulässige Mischung mit dem Trinkwasser des Versorgungsbereichs Münzenberg / Trais gemäß des DVGW-Arbeitsblattes W 216.
- Zentrale Enthärtung der Eigenwässer und Versorgung des gesamten Versorgungsgebietes mit einheitlichem Trinkwasser.

Wesentliche Unterschiede der genannten Konzeptoptionen liegen in der Zielhärte und damit des resultierenden Komfortgewinnes für die Verbraucher, des technischen Aufwandes und des Zusatzwasserbedarfs. Im Folgenden werden die Konzeptoptionen detailliert dargestellt und bewertet.

6.1 *Teilenthärtung Gambach/Ober Hörgern*

In Abbildung 8 ist das Verfahrenskonzept zur Teilenthärtung am Standort des Fassungsbereichs der Brunnen Ober Hörgern skizziert. Hierbei ist vorgesehen, das dort entnommene Grundwasser mittels der UO-Membrantechnik derart zu enthärten, um eine aus korrosionschemischer Sicht beliebige Mischung mit dem Trinkwasser des Versorgungsgebiets von Münzenberg gemäß DVGW Arbeitsblatt W 216 zu ermöglichen.

Durch Anbindung der Trinkwasserversorgungen Ober Hörgern und Münzenberg mit einer neu zu verlegenen Leitung von ca. 3 km Länge könnten im Bedarfsfall Versorgungsengpässe gegenseitig ausgeglichen werden (Anlage 2). Demzufolge erscheint die Erweiterung des Speichervolumens im Netzbereich Münzenberg/Trais nicht erforderlich.

Um entsprechend den Vorgaben des DVGW-Arbeitsblattes W216 die Trinkwässer im beliebigen Verhältnis mischen und dezentral einspeisen zu können, sind im vorliegenden Fall die korrosionschemisch relevanten hohen Neutralsalzgehalte (Sulfat, Chlorid) und der Parameter Säurekapazität bis pH 4,3 ($K_{S4,3}$) der Trinkwässer anzugleichen. Als Zielvorgabe der Enthärtung ist die Säurekapazität bis pH 4,3 des enthärteten Wassers von Ober Hörgern auf einen Wert von 3,2 mmol/L einzustellen (Anlage 3). Bei weiterer Verringerung der Härte und

des $K_{S4,3}$-Wertes würden die betrachteten Trinkwässer von unterschiedlicher Beschaffenheit sein, wodurch eine dezentrale Einspeisung mit Problemen verbunden sein kann.

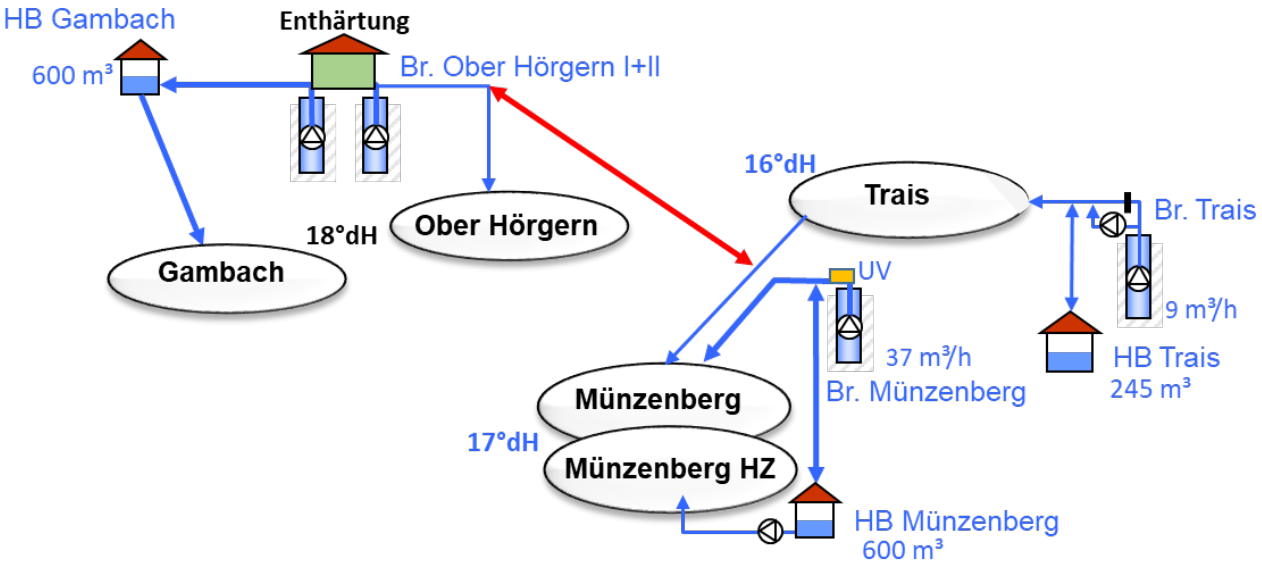

Abbildung 8: Verfahrenskonzept Teilenthärtung Gambach/Ober Hörgern zur Angleichung der Trinkwasserbeschaffenheit

Bei Einsatz der Umkehrosmosetechnik werden beim $K_{S4,3}$-Zielwert von 3,2 mmol/L und der daraus resultierenden Härte von 18 °dH die Vorgaben des DVGW-Arbeitsblattes W216 für die Neutralsalzgehalte erfüllt, womit sämtliche Wässer des gesamten Versorgungsbereichs Münzenberg im beliebigen Verhältnis mischbar sind. Tabelle 7 zeigt die erwarteten Wasserbeschaffenheiten.

Tabelle 7: Trinkwasserbeschaffenheit der Versorgungsbereiche Gambach/Ober Hörgen und Münzenberg/Trais gemäß obenstehender Konzeptoption

gerundete Werte		Gambach/ Ober Hörgern, enthärtet (UO)	Münzenberg (Trais)
Calcium	mg/L	86	77
Magnesium	mg/L	26	28
Härte	°dH	18 (hart)	17 (hart)
Säurekapazität bis pH 4,3	mmol/L	3,2	5,5
Calcitabscheidekapazität bei der Temperatur von 90 °C	mg/L_{CaCO_3}	45	47
Chlorid	mg/L	89	30
Sulfat	mg/L	37	14
Nitrat	mg/L	15	19
S_1 (DIN EN 12502-3)	< 0,5	1,1	0,3

Gegenüber der derzeitigen Situation würde für den Versorgungsbereich Gambach/Ober Hördern bei einer Härte von 18 °dH zwar eine merkliche Komfortverbesserung durch gerin-

geren Kalkausfall im Warmwasserbereich wahrgenommen werden. Jedoch wird der gewünschte Zufriedenheitsbereich bezüglich der Minimierung des bei der Wassererwärmung bedingten Kalkausfalls nicht erreicht. Abbildung 9 stellt diesen Sachverhalt dar.

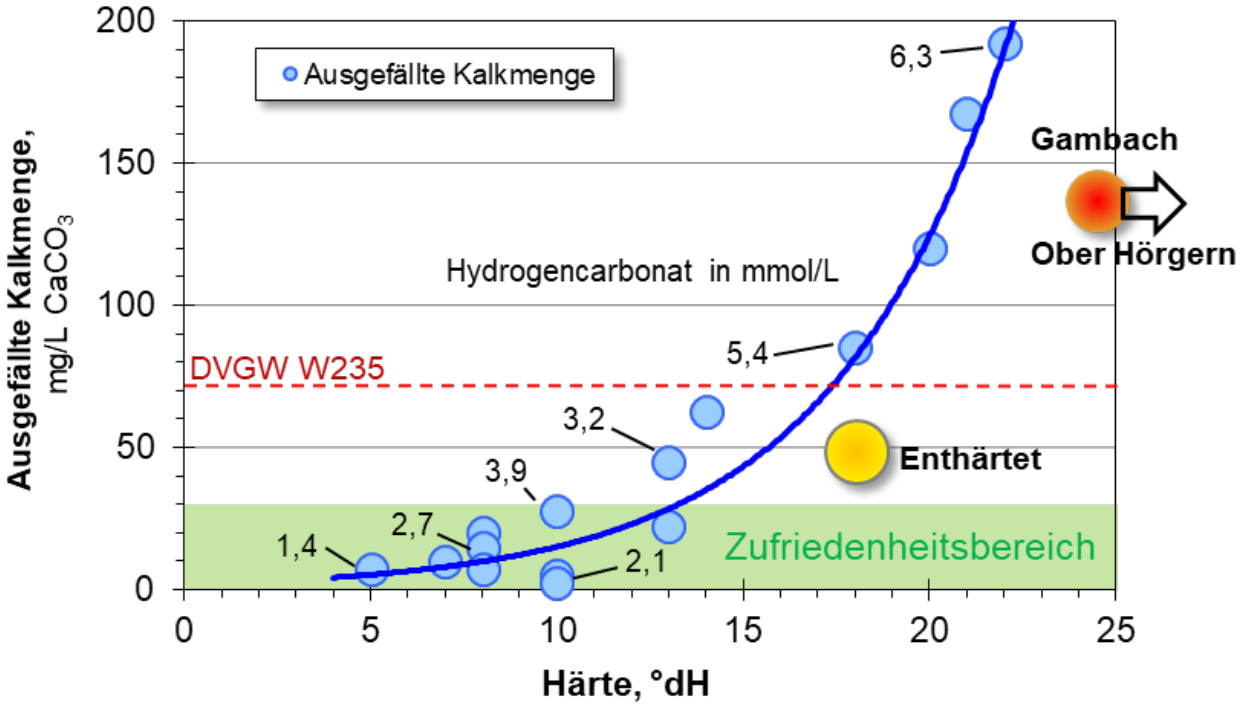

Abbildung 9: Calcitabscheidekapazität des Trinkwassers Ober Hörgern vor und nach der Enthärtung

Zudem ist das auf 18 °dH enthärtete Wasser weiterhin in den Härtebereich „hart“ einzustufen, wodurch die Kosteneinsparpotentiale bspw. bei der Wasch- und Reinigungsmitteldosierung hinsichtlich des Härtebereichs „weich“ nicht ermöglicht werden.

Aufgrund der pH-Wertanhebung ergibt sich beim enthärten Wasser prinzipiell eine korrosionschemisch günstigere Bewertung. Allerdings sind die Neutralsalzgehalte Sulfat und Chlorid im Vergleich zur Pufferung (charakterisiert durch den Parameterwert $K_{S4,3}$) weiterhin vergleichsweise hoch und damit beispielsweise für den Kontakt zwischen Wasser und eisenbasierten Werkstoffen eher ungünstig, wie der Korrosionsparameter S_1 zeigt. Dieser Wert sollte möglichst bei < 0,5 liegen.

Nach dem empirisch ermittelten Zusammenhang zwischen der Karbonathärte und den Neutralsalzen Chlorid und Sulfat gemäß TURNER wird die Korrosionswahrscheinlichkeit von Messing-Werkstoffen (Entzinkung) beim enthärteten Wasser gegenüber der derzeitigen Situation voraussichtlich zunehmen. Abbildung 10 zeigt diesen Sachverhalt im TURNER-Diagramm und den festgestellten Entzinkungserscheinungen von Messing des Typs

CW614N bzw. CW617N mit vergleichsweise hohem β-Phasen-Anteil. Die blaue Linie grenzt kritische Wasserzusammensetzungen mit hoher Wahrscheinlichkeit für Entzinkung von weniger kritischen Hydrogencarbonat zu Chlorid/Sulfat-Verhältnissen mit niedriger Wahrscheinlichkeit für Entzinkung ab.

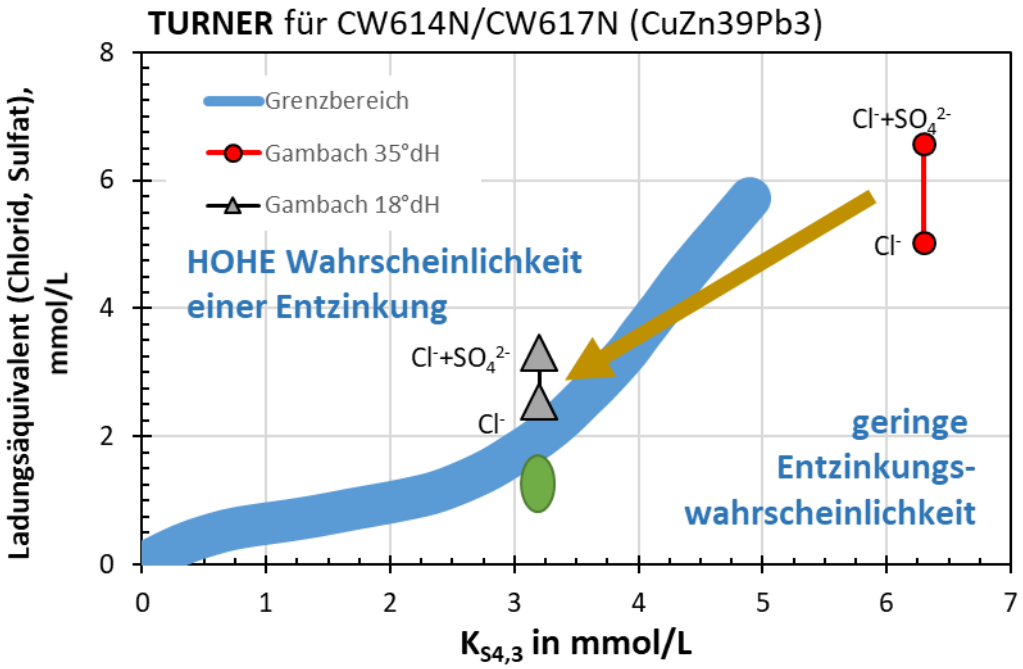

Abbildung 10: Entzinkungswahrscheinlichkeit für Messing-Werkstoffe des derzeitigen Trinkwassers und des Wassers nach Aufbereitung mittels UO (TURNER-Diagramm)

Im vorliegenden Fall werden bei der Enthärtung der Brunnenwässer Ober Hörgern auf die Härte von 18°dH die Ladungsäquivalente von Sulfat und Chlorid oberhalb des Grenzbereichs liegen. Somit ist von einer höheren Entzinkungswahrscheinlichkeit auszugehen als beim nicht enthärteten Wasser. Daher sind die korrosionschemisch relevanten hohen Neutralsalzgehalte (Sulfat, Chlorid) zugunsten der Pufferung (Parameter Säurekapazität bis pH 4,3 ($K_{S4,3}$) durch eine weitergehende Aufbereitung anzugleichen.

Die Entzinkungswahrscheinlichkeit kann durch eine Wiederanhebung des Karbonatgehaltes ($K_{S4,3}$) nach einer Enthärtung vorzugsweise mit dichtem Calciumcarbonat (Kalkstein) minimiert werden. Hinsichtlich der gewünschten Trinkwasserqualität muss allerdings die Enthärtungsleistung der UO-Anlagentechnik die Aufhärtung kompensieren. Folglich muss mehr Wasser mittels UO aufbereitet werden, wodurch ein höherer Zusatzwasserbedarf (Konzentrat) resultiert. Abbildung 11 zeigt das Verfahrenskonzept der Teilstromaufhärtung für den Standort der Brunnen Ober Hörgern und für die Härte von 18 °dH. Demnach wird ein Grundwasseranteil mittels der Umkehrosmoseanlage enthärtet, anschließend mit vorzugsweise dichtem $CaCO_3$ (Kalkstein) aufgehärtet und rekarbonisiert. Nach Zumischung

des nicht enthärteten Grundwassers (Verschnitt) auf die gewünschte Zielhärte erfolgt die Entsäuerung und pH-Wertstabilisierung, um damit die gesetzlichen Anforderungen an den pH-Wert bzw. an der Calcitlösekapazität zu erfüllen und ein korrosionschemisch günstiges Trinkwasser einzuspeisen.

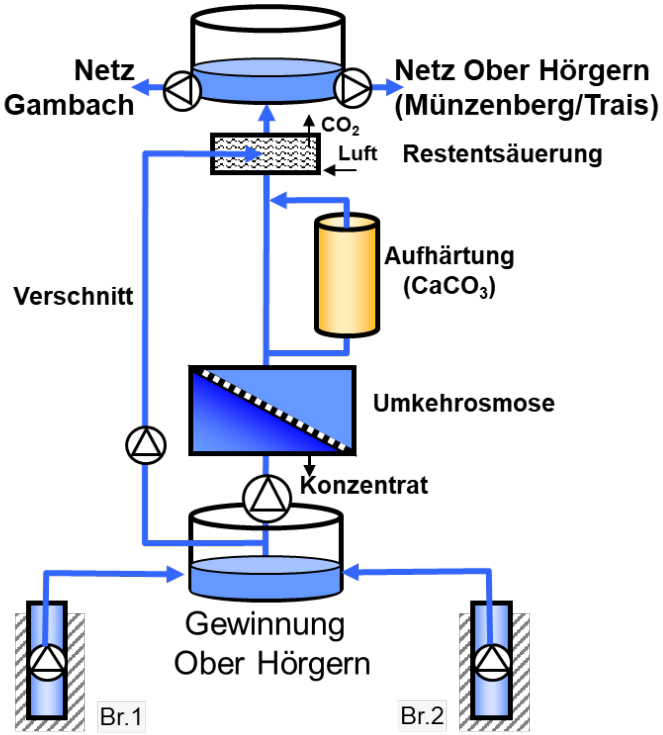

Abbildung 11: Verfahrenstechnik Enthärtung mit Teilaufhärtung am Standort Ober Hörgern

Um die Grenzlinie des TUNERs hinsichtlich der Entzinkung zu unterschreiten, müssen die Ladungsäquivalente von Sulfat und Chlorid bezogen auf den Karbonatgehalt von 3,2 mmol/L um 1,8 mmol/L auf 1,5 mmol/L (grün markierter Zielbereich) verringern werden.

Die anhand der Prognoseprogramme zu erwartende Trinkwasserbeschaffenheit bei der Karbonathärte von 3,2 mmol/L zeigt Tabelle 8. Sofern das Permeat aus der Umkehrosmoseanlage auf einen Calciumgehalt von 93 mg/L (13 °dH) aufgehärtet wird, werden nach Verschnitt (22 %) die korrosionsrelevanten Zielvorgaben hinsichtlich des S_1-Wertes von 0,5 und der Ladungsäquivalente (Sulfat, Chlorid) von 1,5 mmol/L eingehalten. Die Calcitabscheidekapazität bei der Bewertungstemperatur von 90 °C (Kochverhalten) liegt rechnerisch bei 52 mg/L$CaCO_3$.

Tabelle 8: Trinkwasserbeschaffenheit bei einer zentralen Enthärtung Ober Hörgen mit Teilaufhärtung

gerundete Werte		Rohmisch-wasser	Permeat	Permeat (aufgehärtet)	Trinkwasser
Calcium	mg/L	170	3	93	110
Härte	°dH	35 (hart)	< 1	13	18
Säurekapazität bis pH 4,3	mmol/L	6,3	0,1	2,4	3,2
Basekapazität bis pH 8,2	mmol/L	0,8	0,8 (+0,5)*	0,25	0,35
Calcitabscheidekapazität bei der Temperatur von 90 °C	mg/L_{CaCO_3}	140	-	-	52
S_1 (DIN EN 12502)	< 0,5	1,1	-	-	0,5
Ladungsäquivalent (SO_4+Cl)	mmol/L	6,6	-	-	1,5

*) CO_2-Dosierung

Entsprechend des künftig zu erwartenden Trinkwasserbedarfs von Gambach und Ober Hörgern sollte die Anlagentechnik auf die maximale Stundenleistung von 32 m³/h bzw. auf die Tagesmenge von 700 m³/d (22 h/d) ausgelegt sein. Die Leistungsreserve von 2 Stunden kann zur bedarfsweise Unterstützung des Versorgungsbereichs Münzenberg und Trais eingesetzt werden.

Bei einer Trinkwasserproduktion von 32 m³/h mit einer Zielhärte von 18 °dH entsprechend Abbildung 12 und Tabelle 9 ist die Permeatleistung der Membrananlage auf 25 m³/h zu dimensionieren. Die Grundwasserförderung sollte jeweils mit einer Drehzahlregelung ausgestattet sein, um die Bedarfsmenge der Anlage reglungstechnisch einfach bereitstellen und den Zwischenbehälter aus Kosten- und Platzgründen minimieren zu können.

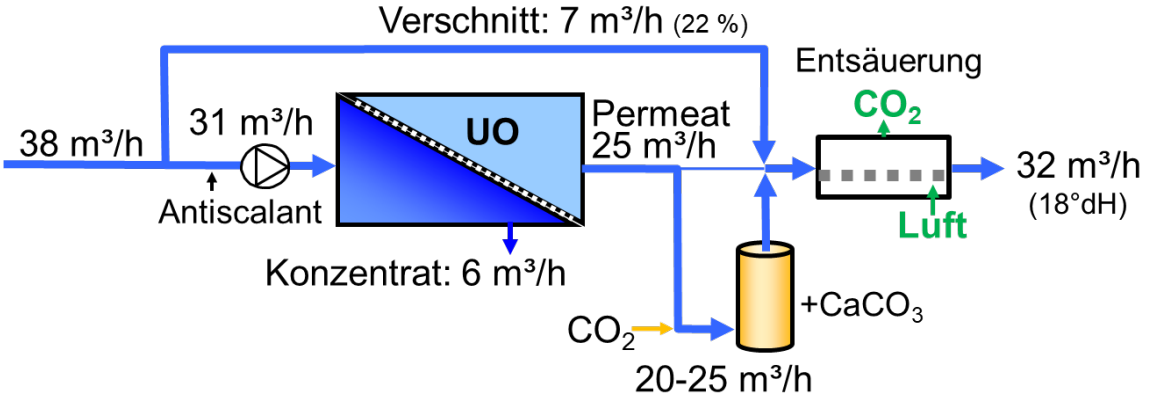

Abbildung 12: Dimensionierung der UO-Anlage am Standort Ober Hörgern

Es wird eine zweistufige Dimensionierung der UO-Anlage vorgeschlagen. Bei diesem Auslegungsvorschlag erhält die erste Stufe drei Druckrohe mit jeweils sechs UO-Elementen der

Dimension 8 Zoll und einer Membranfläche von 40,4 m². Die zweite Stufe ist mit zwei Druckrohren und je fünf UO-Elementen der Dimension 8 Zoll und einer Membranfläche von 40,4 m² bestückt. Bei einer Permeatproduktion von rund 25 m³/h stellt sich über die zwei Membranstufen ein mittlerer Flux von ca. 22 L/m²/h in der bewährten Größenordnung ein.

Der benötigte Zulaufdruck wird bei einer Wassertemperatur von 10 °C bei ca. 7-8 bar liegen. Der spezifische Energiebedarf der Membrananlage einschließlich der Entsäuerung wird lt. Berechnungsprogramm des Membranherstellers auf ca. 0,3 kWh/m³ Trinkwasser, die Anschlussleistung der primären Hochdruckpumpe auf ca. 8 kW geschätzt. Zum Schutz der Membran ist der Umkehrosmose-Anlage ein Vorfilter vorgeschaltet. Es ist ein Vorfiltersystem mit möglichst geringem Vordruck anzuraten, um den Energieaufwand zu minimieren.

Die Teilstrommenge der Aufhärtung sollte von ca. 20 bis 25 m³/h regelbar sein. Die Dosierung von Kohlenstoffdioxid (CO_2) von ca. 0,5 mmol/L (0,55 kg/h bzgl. 25 m³/h) ist erforderlich, um die gewünschte Aufhärtung bei einer praktikablen Filtergröße mit der $CaCO_3$-Füllmenge von beispielsweise 10 m³ zuzüglich 2,5 m³ Verbrauchsvolumen realisieren zu können. Hinsichtlich der Aufbereitung von rund 170.000 m³ Trinkwasser/a wird der $CaCO_3$-Bedarf bei rund 25 m³ liegen.

Tabelle 9: Auslegungsdaten für die UO-Anlage inkl. Aufhärtung Ober Hörgern

Position	Auslegung
max. Trinkwassermenge (Härte 18 °dH)	32 m³/h, 168.000 m³/a
max. Grundwasserförderung	36 m³/h, 189.000 m³/a
Permeatleistung der gesamten UO-Anlage	25 m³/h (Ausbeute 80 %) aus 1 Straße mit 3:2-Druckrohre (6 bzw. 5 Elemente), 2x8 kW Feed-Pumpen (Redundanz)
Dosiereinrichtung (Antiscalant)	
CIP-Reinigungsstation	
Aufhärtung	CO_2-Dosierung (ca. 0,6 kg CO_2/h, ca. 3,8 t/a) 1 Kessel (Ø 2,5 m, 2,5 m Füllhöhe) für Teilstrombetrieb (max 25 m³/h) inkl. Spülluft/-wasserbereitstellung, Absetzbecken (30 m³)
Intensivbelüftung	32 m³/h, pH-Zielwert: 7,4 / 18°dH
Konzentratanfall (Zusatzwasserbedarf)	6 m³/h, 31.000 m³/a (19,5 % bzgl. Trinkwasser)

Zur abschließenden Restentsäuerung wird im vorliegenden Fall eine relativ geringe Entsäuerungsleistung benötigt, wodurch betriebswirtschaftlich günstig eine einstufige Füllkörperkolonne (Ø 0,5 m) mit regelbaren Luftgegenstrom eingesetzt werden kann.

Für die Netzeinspeisung dient eine zweikammrige Pumpenvorlage. Das Fassungsvolumen ist auf die vorzugsweise drehzahlgeregelten Netzpumpen auszulegen. Im Fall eines höheren Trinkwasserbedarfs kann die Enthärtungsanlage kurzzeitig überfahren werden. Zudem

ist durch den höheren Verschnittanteil eine höhere Abgabemenge zeitweise möglich, wobei sich allerdings entsprechend des Verschnittanteils eine höhere Härte und Neutralsalzkonzentration im enthärteten Wasser ergibt.

Die Anlagentechnik benötigt eine Gebäudefläche von ca. 100 m², um einen betriebstechnisch günstigen Zugang zu den jeweiligen Anlagenteilen zu gewährleisten. Die übereinander angeordneten Druckrohre zur Aufnahme der Membranen inkl. des Montageplatzbedarfs für den Wechsel der Membranelemente benötigen Fläche von ca. 2 x 10 m². Ferner sind im Gebäude Förder-, Dosier- und Spüleinrichtungen sowie ggf. Behälter für eine Permeat-Spülung und eine CIP-Station zur chemischen Reinigung unterzubringen. Ferner bedarf es Platz für die CO_2- und $CaCO_3$-Bevorratung sowie für das Absetzbecken für die $CaCO_3$-Filterspülung.

Der Raumbedarf für die Enthärtungsanlage (UO, Feed-Pumpen, Dosiereinrichtung, Spül- und Reinigungsstation, Aufhärtungsfilter, MSR und Flachbettbelüftung) wird auf insgesamt ca. 360 m³ geschätzt. Abbildung 13 zeigt den geschätzte Platzbedarf der jeweiligen Anlagenmodule.

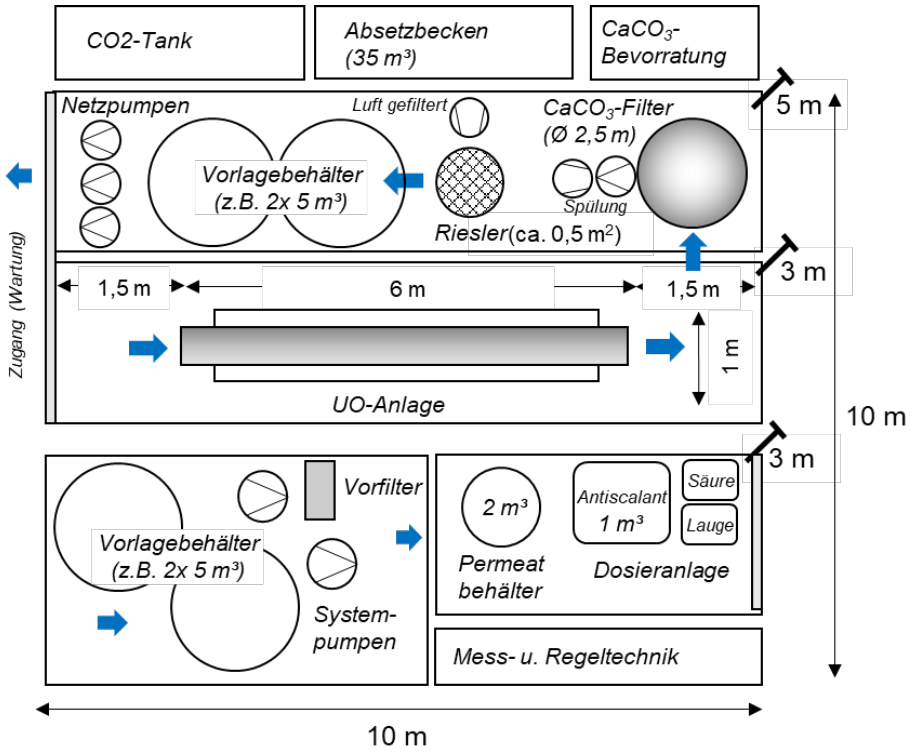

Abbildung 13: Aufstellungsbeispiel und Platzbedarf des Anlagenteils Enthärtung

Es fällt beim Betrieb der Membrananlage und der Ausbeute von 80 % eine Konzentratmenge von ca. 6 m³/h an, die beispielsweise in einen Vorfluter abgeleitet werden muss. Bezogen auf die Trinkwassertagesproduktion von 700 m³/d ist eine Konzentratmenge von

maximal 140 m³/d zu erwarten. Im Jahresmittel liegt die Konzentratmenge ausgehend von der zukünftig gelieferten Trinkwassermenge von 158.000 m³/a folglich bei ca. 31.000 m³/a bzw. knapp 20 %. Die maximale Tagesmenge an Konzentrat fällt i. d. R. bei längeren warmen Trockenwetterperioden und entsprechend hohem Trinkwasserbedarf an.

Am Standort der Gewinnung Ober Hörgern bietet sich die relativ nahe Einleitungsmöglichkeit (ca. 800 m) in die Wetter an. Allerdings ist eine Unterführung der L3053 erforderlich, wie aus Abbildung 14 hervorgeht.

Abbildung 14: Konzentratableitung Gewinnung Ober Hörgern in die Wetter

Die Ablaufleitung beispielsweise der Nennweite von DN 80 und entsprechend einer mittleren Verweilzeit des Konzentrates von ca. 1 Sunde sollte aus Kunststoff ausgeführt und möglichst unter Druck betrieben werden, um Ausfällungen infolge von Ausgasungen zu vermeiden. Es sind Vorrichtungen zur Kontrolle des Leitungszustandes und ggf. zum Molchen in entsprechend kurzen Abständen vorzusehen. Praxiserfahrungen zeigen, dass durch das Ausspülen der Membrananlage während einer mehrstündigen Außerbetriebnahme keine Probleme durch Kalkausfall zu erwarten sind. Durch diese Leitung kann ggf. auch das Klarwasser aus dem Absetzbecken des Aufhärtungsfilters abgeleitet werden.

Auf Grund des Verfahrensprinzips der geplanten Membrananlage werden mit Ausnahme eines Antiscalantwirkstoffs keine weiteren Zusatzstoffe eingesetzt. Zusammensetzung und Konzentration der Wasserinhaltsstoffe im Konzentrat werden damit im Wesentlichen durch die Zusammensetzung des geförderten Grundwassers und die Ausbeute der Membrananlage bestimmt.

Als Antiscalantwirkstoffe sind Handelsprodukte auf Basis von Phosphonsäure, Polyacrylsäure oder Mischungen von Phosphon- und Polyacrylsäure vorgesehen. Die erwartete Zusammensetzung des in der Regel trübstofffreien Konzentrats geht aus Tabelle 10 hervor. Das sauerstoffhaltige und weitgehend trübstofffreie Konzentrat beinhaltet im Wesentlichen die entfernten Härtebildner sowie Neutralsalze (Chlorid, Sulfat, Nitrat).

Tabelle 10: Konzentratbeschaffenheit (erwartet)

Konzentrat, Ausbeute 80 %		**Ober Hörgern**
Konzentratanfall (bei Anlagenbetrieb)	m^3/h m^3/d_{max} m^3/a	6 140 31.000
Calcium	mg/L	830
Magnesium	mg/L	250
pH-Wert	-	7,4 ± 0,5
Chlorid	mg/L	880
Sulfat	mg/L	370
Nitrat	mg/L N	140
Nitrit	mg/L-N	< 0,02
Ammonium	mg/L-N	< 0,04
TOC	mg/L	< 5
Eisen	mg/L	< 0,05
o-Phosphat	mg/L	0,1 (1)
P-gesamt	mg/L (P)	0,2 (1) (0,5 (2))

(1)Antiscalantmittel: phosphorfrei (Polyacrylsäure); (2)Antiscalantmittel: phosphorhaltiges Mischprodukt aus Phosphon- und Polyacrylsäure

Das in längeren Zeitabständen anfallende Abwasser aus der chemischen Reinigung der Membran- bzw. Entsäuerungsanlage von wenigen m³ kann üblicherweise nach Neutralisation über die Kläranlage entsorgt werden.

Sofern in den Ausgangswässern Spurenstoffe enthalten sind, werden diese i. d. R. durch die UO zurückgehalten und befinden sich maximal um Faktor 5 angereichert im Konzentrat. Nach den vorliegenden Analysen sind die relevanten Rohwässer weitestgehend frei von Spurenstoffen, sodass in dem Konzentrat keine relevante Spurenstoffbelastung zu erwarten ist.

Es ist anzumerken, dass bei der Realisierung einer Härteverringerung des Trinkwassers sich bei entsprechendem Verhalten der Verbraucher der Salzgehalt im Abwasser der zugehörigen Kläranlage insbesondere durch den geringeren Wasch- und Reinigungsmittelgebrauch und durch den geringeren Bedarf an Regeneriersalzen bei dezentralen Enthärtungsanlagen signifikant verringern wird.

Durch die Rückführung des Konzentrates der UO in die Wetter wird sich entsprechend der geänderten Salzgehalt im Abwasser durch den Wegfall der dezentralen Maßnahmen insgesamt die Salzfracht in die Wetter verringern. Zudem wird eine Abnahme des Schwermetallgehaltes im Klärschlamm der Kläranlage durch die geringere Korrosion der Hausinstallationen erwartet, wie die Kläranlage am Modellstandort Heppenheim aufzeigen konnte.

6.2 *Zusammenführung der Rohwässer und zentrale Enthärtung*

Sofern sämtliche Brunnenwässer der Stadt Münzenberg zusammengeführt, enthärtet und in die jeweiligen Versorgungsbereiche eingespeist werden, kann in dem gesamten Versorgungsgebiet ein einheitlich weicheres, neutralsalzärmeres und entsprechend korrosionschemisch günstigeres Trinkwasser bereitgestellt werden.

Das Verfahrenskonzept sieht gemäß Abbildung 15 vor, lediglich die sehr harten und salzhaltigen Grundwässer aus der Gewinnung Ober Hörgern mittels der UO-Technik im Vollstrom zu enthärten und mit den unbehandelten Brunnenwässern aus Münzenberg/Trias auf die Härte von 8 °dH zu verschneiden. Dadurch kann die Aufhärtung zur Nachbehandlung aus korrosionschemischer Sicht entfallen.

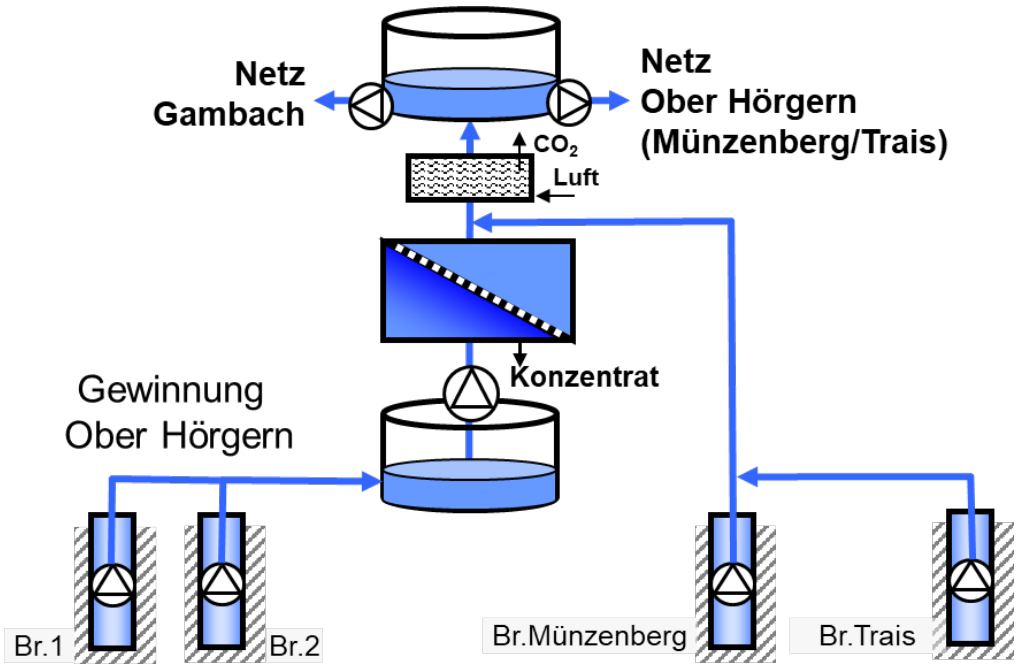

Abbildung 15: Zentrale Enthärtung der vorhandenen Eigenwässer der Stadt Münzenberg

Die anhand der Prognoseprogramme zu erwartende Trinkwasserbeschaffenheit bei der Zielhärte von 8 °dH zeigt Tabelle 11. Durch die getrennte Aufbereitung der Einzelwässer ergibt sich bei der Härte von 8 °dH eine Karbonathärte von 2,3 mmol/L (Säurekapazität bis 4,3). Die Calcitabscheidekapazität bei der Bewertungstemperatur von 90 °C (Kochverhalten) liegt rechnerisch bei 24 mg/L$CaCO_3$ und damit im Zufriedenheitsbereichs des Verbrauchers, der im Fall einer Enthärtung erwartet wird (Abbildung 16).

Tabelle 11: Trinkwasserbeschaffenheit bei einer zentralen Enthärtung sämtlicher Eigenwässer

gerundete Werte		**Enthärtung: Br. Ober Hörgern, Verschnitt: Br. Münzenberg/Trais**
pH-Wert	-	7,8
Calcium	mg/L	36
Magnesium	mg/L	13
Härte	°dH	8 (weich)
Säurekapazität bis pH 4,3	mmol/L	2,3
Calcitabscheidekapazität bei der Temperatur von 90 °C	mg/L$_{CaCO_3}$	24
Chlorid	mg/L	17
Sulfat	mg/L	12
Nitrat	mg/L	14
S_1 (DIN EN 12502)	< 0,5	0,4

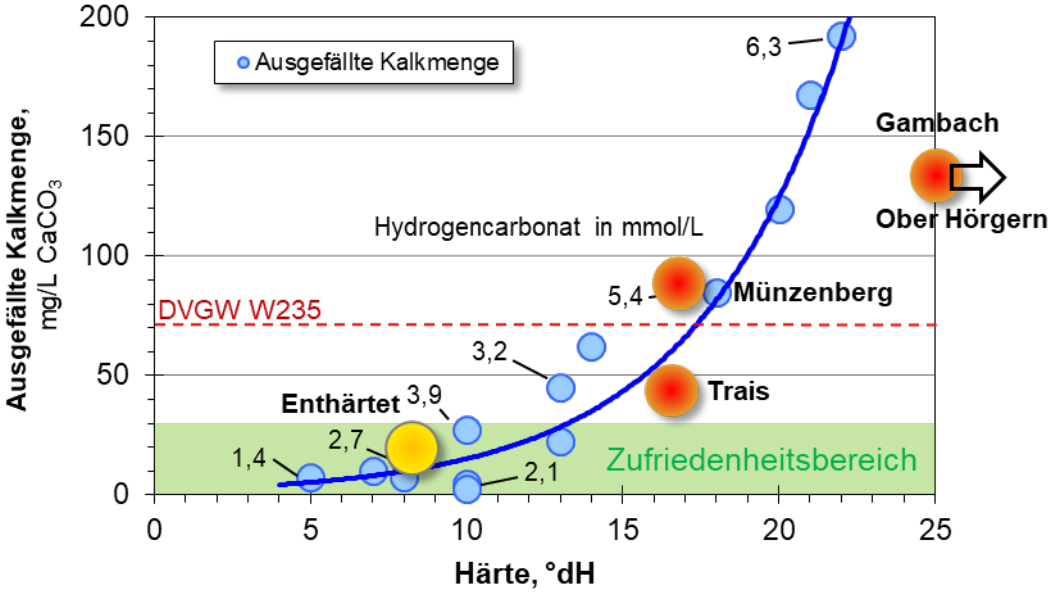

Abbildung 16: Calcitabscheidekapazität vor und nach der zentralen Enthärtung

Zur Abschätzung der Korrosionswahrscheinlichkeit bei Messing-Werkstoffen vor und nach der zentralen Enthärtung wurden Praxiserfahrungen von TURNER hinzugezogen. Aus dem Diagramm in Abbildung 17 ist ersichtlich, dass bei einer gezielten Enthärtung der salzhaltigen Grundwässer im enthärteten Wasser von einer geringen Entzinkungswahrscheinlichkeit auszugehen ist. Auch hinsichtlich des nach DIN EN 12502 berechneten Korrosionsindexes S_1 von 0,4 (Tabelle 10) und dem pH von 7,7 zeigt das enthärtete Trinkwasser eine korrosionschemisch günstige Eigenschaft.

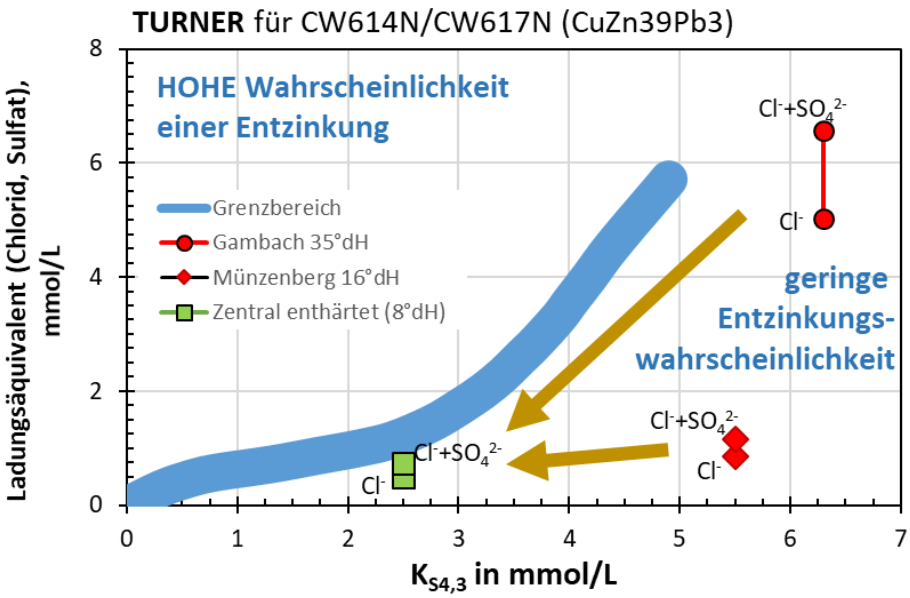

Abbildung 17: Entzinkungswahrscheinlichkeit für Messing-Werkstoffe des derzeitigen Trinkwassers und des auf 8 °dH enthärteten Wassers (TURNER-Diagramm)

Als Standort der Zusammenführung der Brunnenwässer, der zentralen Enthärtung und Verteilung bietet es sich an, die Anlagentechnik am Standort der Kläranlage Würtzberg zu errichten, wie in Abbildung 18 gezeigt.

Wesentliche Vorteile am Standort Würtzberg sind die vergleichsweise gute Anbindung und die vorhandene Infrastruktur, insbesondere auch hinsichtlich der Konzentratableitung. Üblicherweise ist bei der biologischen Abwasserbehandlung eine Erhöhung der Pufferung des Abwassers erwünscht, was durch die Einbringung von Konzentrat erreicht wird. Somit wäre dort die Einleitung des Konzentrates nutzbringend.

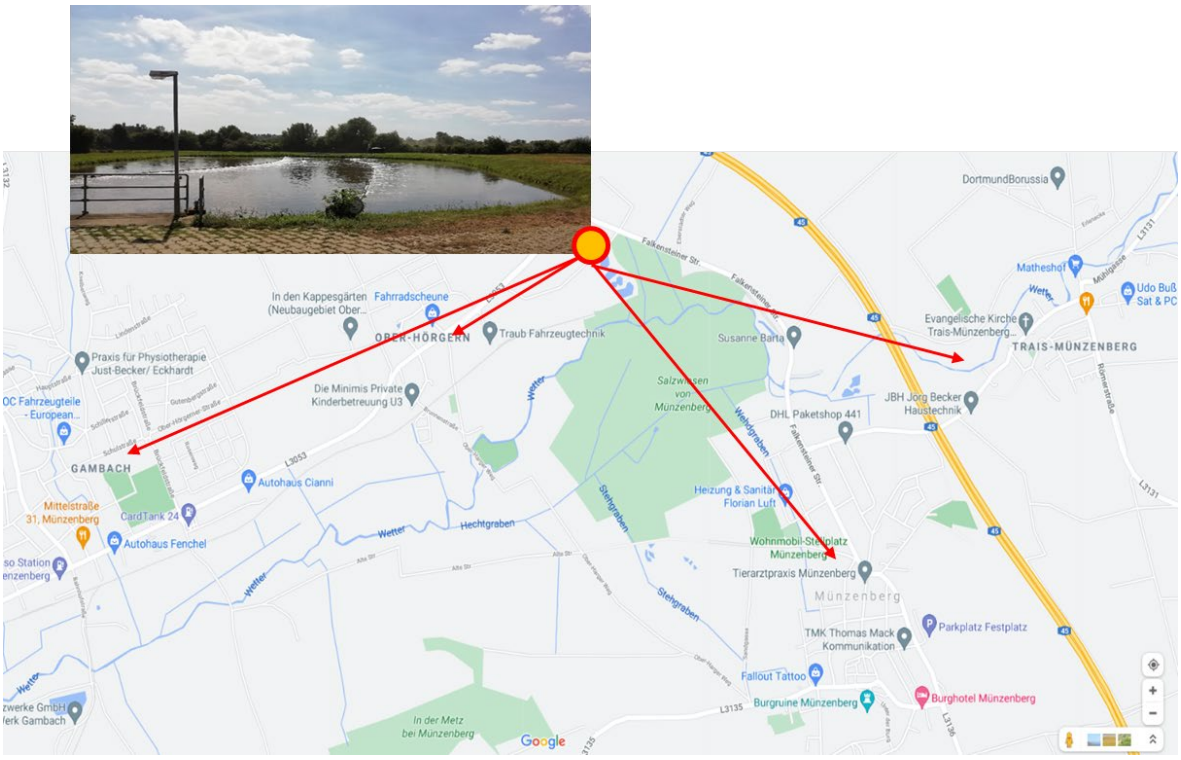

Abbildung 18: **Empfohlener Standort für die zentrale Enthärtung / Kläranlage Würtzberg**
(Foto TZW, googlemap)

Abbildung 19 zeigt die erforderlichen leitungstechnischen Maßnahmen für die Netzanbindung der Enthärtung und der zentralen Verteilung mit den für die Auslegung der Anlagentechnik relevanten Kennzahlen. Es handelt sich hierbei um weitestgehend freie Trassenführungen mit Roh- und Trinkwasserleitungen als Doppelleitung.

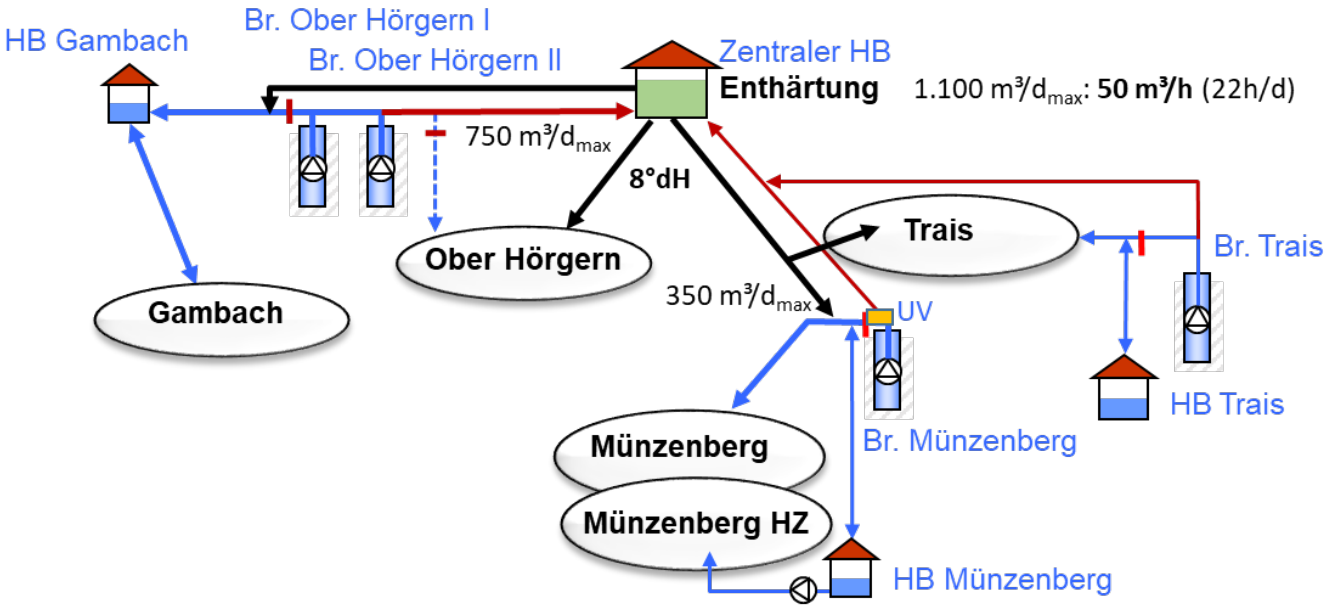

Abbildung 19: Konzeptschema Zentrale Enthärtung am Standort Würtzberg. Die neu zu verlegende Leitung sind rot bzw. schwarz markiert.

Wie aus Tabelle 12 hervorgeht, wird für die Leitungsverlege zur Anbindung des zentralen Wasserwerkes der Aufwand auf insgesamt ca. 5 km geschätzt. Aufgrund der überwiegend unbebauten Fläche sollte eine vergleichsweise kostengünstige Leitungsverlegung möglich sein.

Tabelle 12: Leitungsbau bei zentraler Enthärtung und Wasserversorgung

	Leitungslänge (Nennweite)
Roh- und Reinwasserleitung von Ober Hörgern (inkl. Anbindung Ober Hörgern)	2 x 2,2 km (DN 150)
Roh- und Reinwasserleitung von Münzenberg	2x 1,2 km (DN 150)
Rohwasserleitung Trais/Münzenberg	1,5 km (DN 100)
Konzentratleitung	-

Als Zentralwasserwerk zur Versorgung des gesamten Versorgungsbereichs der Stadt Münzenberg wird eine zweistufige Dimensionierung der UO-Anlage mit einer Permeatleistung von 27 m³/h vorgeschlagen (Abbildung 20). Nach Verschnitt mit 23 m³/h unbehandelten Brunnenwassers kann 50 m³/h Trinkwasser der Härte 8 °dH für den gesamten Versorgungsbereich der Stadt Münzenberg bereitgestellt werden. Damit steht anlagentechnisch eine Tagesabgabe von 1.100 m³/d für den Spitzenbedarf zur Verfügung.

Bei dem Auslegungsvorschlag erhält die Straße in der ersten Stufe drei Druckrohe mit je sechs Elementen und in der zweiten Stufe zwei Druckrohre mit je fünf Elementen der Dimension 8 Zoll und einer Membranfläche von 40,4 m². Bei einer Permeatproduktion von rund 27 m³/h stellt sich über die beiden Membranstufen ein mittlerer Flux von ca. 23,6 L/m²/h in der bewährten Größenordnung ein.

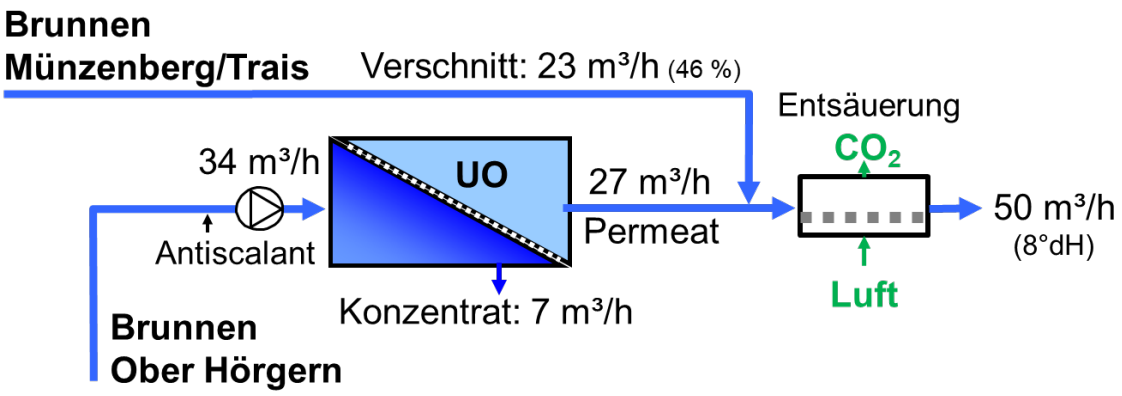

Abbildung 20 Dimensionierung der UO-Anlage am Standort Würtzberg

Abbildung 21 stellt die Versorgungssituation bei einem Tagesspitzenbedarf und mit der vorhandenen Speicherkapazität bei der vorgeschlagenen Anlagenkonstellation dar. Demnach gelingt bei der Nennleistung der Enthärtungsanlage von 50 m³/h und der Anlagenauslastung von 22 Stunden /Tag problemlos die Versorgung bei einem Spitzenbedarfsfall.

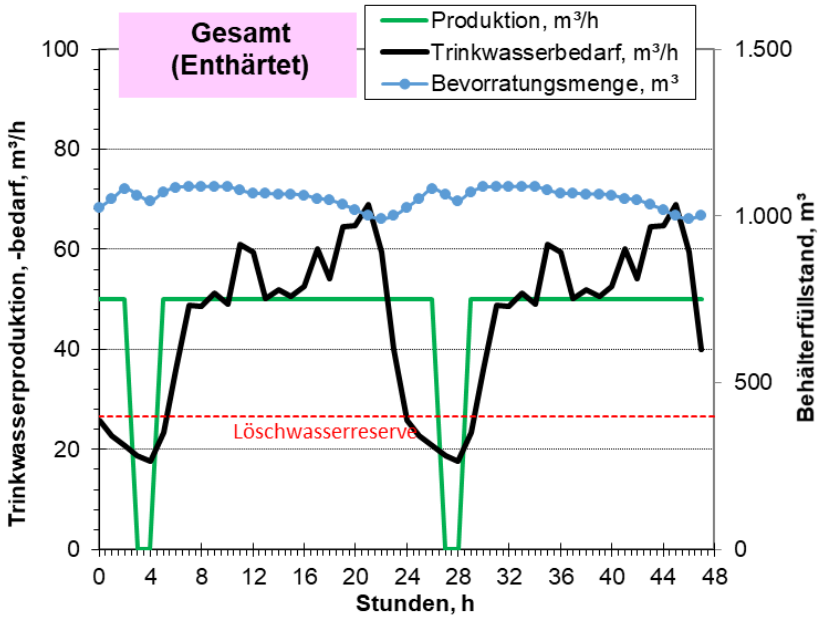

Abbildung 21: Wasserbilanz bei zentraler Enthärtung und Bereitstellung von 50 m³/h (22 h/d) enthärtetes Trinkwasser bei einem Tagesspitzenbedarf von 1.100 m³/d.

Die Erweiterung der Speicherkapazität für das Versorgungsgebiet der Stadt Münzenberg durch den Zusammenschluss der Trinkwasserversorgung ist nicht angezeigt. Neben der weiteren Auslastung des Anlagenbetriebes (24 h/d) sowie durch entsprechend höheren Anteil der Umfahrung der Enthärtungsanlage (Verschnitt) kann eine höhere Abgabemenge für den Bedarfsfall bereitgestellt werden.

Durch die Enthärtung der vergleichsweise härteren Grundwässer und Verschnitt mit den geringer salzhaltigen Grundwässern aus Münzenbach /Trais wird bei Betrieb der Membrananlage eine Konzentratmenge von max. 7 m³/h mit der in Tabelle 13 dargestellten Zusammensetzung anfallen. Da nach dem Verfahrenskonzept nur die Brunnenwässer Ober Hörgern mittels UO enthärtet werden, ist die Konzentratzusammensetzung gleich mit derjenigen Konzeptvariante gemäß Tabelle 10. Durch die Vollstrombehandlung der Grundwässer Ober Hörgern können mögliche Beeinträchtigungen beispielsweise durch den Tageabbau weitestgehend entfernt werden.

Tabelle 13: Konzentratbeschaffenheit bei der zentralen Enthärtung am Standort der Kläranlage Würtzberg (erwartet)

Konzentrat, Ausbeute 80 %		Zentrales WW
Konzentratanfall (bei Anlagenbetrieb)	m³/h m³/d_{max} m³/a	7 200 30.000
Calcium	mg/L	830
Magnesium	mg/L	250
pH-Wert	-	7,4 ± 0,5
Chlorid	mg/L	880
Sulfat	mg/L	370
Nitrat	mg/L N	140
Nitrit	mg/L-N	< 0,02
Ammonium	mg/L-N	< 0,04
TOC	mg/L	< 5
Eisen	mg/L	< 0,05
o-Phosphat	mg/L	0,1 (1)
P-gesamt	mg/L (P)	0,2 (1) (0,5 (2))

(1)Antiscalantmittel: phosphorfrei (Polyacrylsäure); (2)Antiscalantmittel: phosphorhaltiges Mischprodukt aus Phosphon- und Polyacrylsäure

Bezogen auf die maximale Trinkwassertagesproduktion von 1.100 m³/d wird eine Konzentratmenge von 200 m³/d anfallen. Im Jahresmittel liegt die Konzentratmenge bei einer zukünftig eingespeisten Trinkwassermenge von 250.000 m³/a mit 8°dH bei ca. 30.000 m³/a und bezogen auf die Trinkwasserabgabemenge bei 12 %.

Das in längeren Zeitabständen anfallende Abwasser aus der chemischen Reinigung der Membran- bzw. Entsäuerungsanlage von wenigen m³ sollte nach Neutralisation über die Kläranlage problemlos entsorgt werden können.

6.3 *Konzeptvergleich*

Tabelle 14 zeigt die bei einer Enthärtung am Standort Ober Hörgern und bei einer zentralen Enthärtung gegenüber der derzeitigen Versorgungssituation resultierenden Auswirkungen.

Sofern lediglich die harten Grundwässer der Brunnen Ober Hörgern enthärtet werden, ist eine Teilaufhärtung nach der Umkehrosmose erforderlich, um aus korrosionschemischer Sicht gemäß der Bewertungsparameter S_1 und nach Turner ein einwandfreies Trinkwasser in das Versorgungsnetz einspeisen zu können. Die Teilaufhärtung erfordert ein vergleichsweise technisch hoher Aufwand und Zusatzwasserbedarf.

Um einen Zusammenschluss der Versorgungsnetze Gambach/Ober Hörgern und Münzenberg/Trais vor dem Hintergrund der unbegrenzten Mischbarkeit der Trinkwässer zu ermöglichen, wäre die Enthärtungsanlage auf die Härte auf 18 °dH auszurichten. Damit ergibt sich zwar eine deutliche Verringerung des Kalkausfalls bei der Wassererwärmung, der Zufriedenheitsbereich des Kunden wird bei der Härte von 18 °dH jedoch nicht erreicht.

Tabelle 14: Konzeptvergleich

Trinkwasserbedarf: 250.000 m³/a *Wasserrecht: 325.000 m³/a		**Derzeit**	**Enthärtung Br. Ober Hörgern**	**Zentrale Enthärtung**
Netzverbund		Nein	ja	ja
Erweiterung der Trinkwasserbevorratung		empfohlen	-	-
Härte	°dH	35/17 (hart)	18/17 (hart)	8 (weich)
Calcitabscheidekapazität bei der Temperatur von 90 °C	mg/L_{CaCO_3}	140/40	52	24
Korrosionsindex S_1	< 0,5	1,1 / 0,4	0,5 / 0,3	0,4
Zusatzwasserbedarf	m³/a	-	31.000	30.000
Trinkwasserreserve*	m³/a	75.000 (23 %)	44.000 (14 %)	45.000 (14 %)

Alternativ kann durch die Enthärtung der salzhaltigen Grundwässer und Verschnitt mit den geringer mineralisierten Grundwässern von Münzenberg bzw. Trais ein weiches Trinkwasser für den gesamten Versorgungsbereich der Stadt Münzenberg bereitgestellt werden. In diesem Fall ist aus korrosionschemischer Sicht keine zusätzliche Aufhärtung erforderlich. Es resultiert ein Trinkwasser der Härte von 8 °dH im Härtebereich weich und eine entsprecht

geringe Calcitabscheidekapazität von < 30 mg/L $CaCO_3$. Die Mindestkosteneinsparpotentiale können in diesem Fall durch die Härteverringerung ausgeschöpft werden.

Jedoch wird auch bei dieser Konzeptvariante die Trinkwasserreserve durch den Zusatzwasserbedarf bzw. den Konzentratanfall um ca. 9 % auf 14 % bezogen auf die erlaubte Jahresentnahme verringert. Anzuraten sind daher grundlegende Maßnahmen zur Erhöhung der nutzbaren Entnahmereserven für das gesamte Versorgungsgebiet.

6.4 *Kostenannahme*

Die Kostenannahme erfolgt unter Berücksichtigung von Erfahrungen aus bestehenden Anlagen mit bewährter Grundausstattung. Der erforderliche Investitionsbedarf hängt unter anderem von der Werkstoffwahl, dem Aufwand für Mess- und Regelungstechnik sowie von der Ausstattung des Gebäudes bzw. der vorhandenen Infrastruktur ab. Somit ergibt sich eine entsprechende Schwankungsbreite bei den Investitionsausgaben. Zur genaueren Kostenabschätzung ist eine detaillierte Bewertung durch ein Ingenieurbüro bzw. einen Anlagenbauer gemäß den genannten Auslegungskenndaten und den baulichen Vorgaben erforderlich.

In Tabelle 15 sind die angenommenen Investitionskosten der Konzeptoptionen Enthärtung/Aufhärtung am Standort Ober Hörgern inkl. des Anschlusses an das Versorgungsnetz Münzenberg/Trais sowie die Kosten einer zentralen Enthärtung am Standort Würtzberg inkl. der leitungstechnischen Neuordnung aufgelistet. Die Kostenangaben sind jeweils Nettopreise.

Bei beiden Konzeptvarianten stellen die Investitionskosten für den Leitungsbau die wesentlichen Kosten dar. Gegenzurechnen sind die Kosten für die empfohlene Behältererweiterung im Versorgungsbereich Münzenberg/Trais, sofern kein Netzverbund realisiert wird. Für eine Kapazitätserweiterung von 400 m³ ist von einer Investitionssumme von etwa 0,5 Mio. € auszugehen. Für den Kapitaldienst bedeutet dies über 30 Jahre Abschreibungszeit ca. 34.000 €/a bzw. bezogen auf die verkaufte Trinkwassermenge rund 0,14 €/m³.

Der jeweils gesamte Investitionsbedarf für die Anlagentechnik inkl. Gebäude und Planungskosten beläuft sich bei beiden Varianten jeweils auf ca. 1,2 Mio. €. Durch die Vernetzung der beiden Versorgungsbereiche der Stadt Münzenberg besteht bei beiden Konzeptoptionen ggf. die Möglichkeit einer Bezuschussung der Investitionskosten seitens des Landes.

Tabelle 15: Geschätzte Investitionskosten

Angaben in €	**Enthärtung Ober Hörgern**	**Zentrale Enthärtung**	**Abschrei-bungsdauer, Zinssatz**
Trinkwasserbereitstellung, m³/h (°dH)	32 (18°dH)	50 (8°dH)	
Rohwasserförderung	30.000	50.000	15 Jahre, 3 %
Zwischenbecken vor Enthärtung	20.000	25.000	
Membrantechnik / Entsäuerung	230.000	250.000	
Aufhärtung, Absetzbecken	140.000	-	
CO_2-Dosierung	20.000	-	
MSR-Anbindung	30.000	30.000	
Energiebereitstellung	30.000	50.000	
Rohrleitungen Armaturen, Anbindung	25.000	50.000	50 Jahre, 3 %
Gebäude	150.000	200.000	30 Jahre, 3 %
Reinwasserbevorratung / Netzeinspeisung	100.000	160.000	15 Jahre, 3 %
Konzentratleitung	160.000	10.000	15 Jahre, 3 %
Netzverbindung/Leitungsbau	**700.000**	**1.290.000**	50 Jahre, 3 %
Planung und Unvorhergesehenes	336.000	423.200	15 Jahre, 3 %
SUMME Invest	**1.962.000**	**2.539.000**	**-**
Abschreibung	*120.000*	*148.000*	-

Entsprechend der Gesamtkostenübersicht in Tabelle 16 und 17 werden die Betriebskosten für die zentrale Enthärtung bezogen auf die Abgabemenge von insgesamt 250.000 m³/a auf ca. 62.000 bzw. 86.000 €/a geschätzt. Hierbei sind die Kosten für den Membranersatz nach einer Standzeit von 6 Jahren, die Kosten für Strom und die üblicherweise erforderlichen Betriebsstoffe, die Kosten für die zusätzliche Rohwasserförderung sowie für die Instandhaltung (1,5 % der Investitionsausgaben) enthalten.

Der Personalaufwand ist bei Membranverfahren durch die hohe Automatisierung vergleichsweise gering und wird für den Versorgungsbetrieb gemäß den vorliegenden Praxiserfahrungen insgesamt für alle Anlagen maximal 500 Arbeitsstunden pro Jahr betragen. Der zusätzliche Personalaufwand ist bei der Kostenannahme daher nicht berücksichtigt.

Die Gesamtkosten für die beiden vorgestellten Konzeptvarianten bei der Bereitstellung von 168.000 m³/a bzw. 250.000 m³/a enthärtetem Trinkwasser werden auf 186.000 bzw. 234.000 €/a geschätzt. Bezogen auf die verkaufte Wassermenge des gesamten Versorgungsbereichs der Stadt Münzenberg von 240.000 m³/a entspricht die Realisierung der Härteverringerung und eines Netzverbundes eine Wasserpreiserhöhung von 0,80 bis 0,98 €/m³,

sofern keine zusätzlichen Kosten für die Konzentratableitung anfallen. Bei einem angenommenen Gebührensatz von beispielsweise 2,00 €/m³ Konzentrat können zusätzlich rund 60.000 €/a für die Konzentratableitung erforderlich werden.

Tabelle 16: Grobkostenabschätzung der Investitions- und Betriebskosten für die zentrale Enthärtung am Standort Ober Hörgern inkl. Netzanbindung Münzenberg

Trinkwasser 18°dH, Abgabemenge: 168.000 m³/a, Verkauf: 240.000 m³/a (Gesamtgebiet)		
	€/Jahr	**Spez. Kosten/Annahmen**
Summe Investition	**120.000**	**0,41 €/m³**
Energie	16.000	25 Cent/kWh (0,4 kWh/m³)
Membranersatz	4.500	Standzeit 6 Jahre
Chemikalien (z.B. Antiscalant, CO_2)	10.000	-
Wartung, Vorfilter, Analysen	10.000	-
Instandhaltung	25.000	1,5 % Inv.
Betriebsmittel	**66.000**	**0,28 €/m³**
Gesamtsumme (ohne Konzentrat)	**186.000**	**0,78 €/m³**
Konzentratableitung zum Klärwerk Abwassergebühr: bspw. 2,00 €/m³	62.000	0,26 €/m³ (31.000 m³/a Konzentrat)

Tabelle 17: Grobkostenabschätzung der Investitions- und Betriebskosten für die zentrale Enthärtung am Standort Würtzberg

Trinkwasser 8°dH, Abgabemenge: 250.000 m³/a, Verkauf: 240.000 m³/a (Gesamtgebiet)		
	€/Jahr	**Spez. Kosten/Annahmen**
Summe Investition	**148.000**	**0,62 €/m³**
Energie	25.000	25 Cent/kWh (0,4 kWh/m³)
Membranersatz	5.500	Standzeit 6 Jahre
Chemikalien (z.B. Antiscalant)	3.000	-
Wartung, Vorfilter, Analysen	10.000	-
Instandhaltung	32.000	1,5 % Inv.
Betriebsmittel	**86.000**	**0,36 €/m³**
Gesamtsumme (ohne Konzentrat)	**234.000**	**0,98 €/m³**
Konzentratableitung zum Klärwerk Abwassergebühr: bspw. 2,- €/m³	60.000	0,25 €/m³ (30.000 m³/a Konzentrat)

Bezogen auf einen durchschnittlichen Wasserbedarf von 45 m³/a/Person ergibt sich für den Verbraucher bei einer Realisierung einer zentralen Enthärtung eine Wasserpreiserhöhung von ca. 36 € bzw. 44 € pro Person und Jahr ohne Berücksichtigung ggf. möglicher Zuschüsse seitens des Landes.

7 Zusammenfassung

Die Stadt Münzenberg erwägt die Verringerung der Härte im Trinkwasser. Hintergrund ist die vergleichsweise sehr hohe Härte des im Teilbereich Gambach/Ober Hörgern verteilten Trinkwassers. Die Stadt Münzenberg hat das TZW: DVGW-Technologiezentrum Wasser in Karlsruhe mit der Ausarbeitung einer Machbarkeitsstudie und einer fachlichen Einschätzung beauftragt. Hierbei stand auch die Möglichkeit eines Zusammenschlusses der Versorgungsbereiche der Stadt Münzenberg im Fokus. Die konzeptionelle Ausarbeitung sollte zudem die ökologischen und ökonomischen Auswirkungen im Fall einer Härteverringerung darstellen, um diesen Sachverhalt für die Entscheidung gesamtheitlich bewerten zu können.

Das Versorgungsgebiet der Stadt Münzenberg wird derzeit mit unterschiedlich harte Grundwässern und demzufolge durch zwei voneinander getrennte Trinkwassernetze Gambach/Ober Hörgern und Münzenberg/Trais versorgt. Zum Zusammenschluss der beiden Versorgungen zur gegenseitigen Stützung im Bedarfsfall muss aus korrosionschemischer Sicht die Angleichung der Wasserbeschaffenheit erfolgen. Damit könnte die empfohlene Erweiterung der Trinkwasserbevorratungsmenge für den Netzbereich Münzenberg vor dem Hintergrund der klimatischen Veränderung entfallen.

Da im vorliegenden Fall keine quantitativ hinreichende Bezugsmöglichkeit aus benachbarten Versorgungen sowie die erforderliche Infrastruktur bestehen, muss die Härteverringerung und die Anpassung der Trinkwässer in Eigenregie durchgeführt werden.

Aus Gründen der neben der Enthärtung auch erforderlichen Minimierung der Neutralsalzgehalte und der vorhandenen Infrastruktur ist die in der Praxis bewährte kompakte und vergleichsweise gering personalintensive Membrantechnologie das vorgeschlagene Verfahren.

Sofern die Härteverringerung lediglich für den Netzbereich Gambach/Ober Hörgern erfolgen soll, sollten die Grundwässer aus der Fassung Ober Hörgern auf die Härte von 18 °dH und entsprechend einem Karbonatgehalt $K_{S4,3}$ von 3,2 mmol/L enthärtet werden. Damit können diese gemäß den Vorgaben des DVGW Arbeitsblattes W 216 dem Versorgungsnetz Münzenberg/Trais im beliebigen Verhältnis zugemischt werden. Trinkwässer des gesamten Versorgungsgebietes sind weiterhin dem Härtebereich hart zuzuordnen, wodurch mögliche Kosteneinsparungen, die sich bei einer Versorgung mit weichem Trinkwasser ergeben können, nicht voll ausgeschöpft werden.

Aus korrosionschemischer Sicht muss der hohe Neutralsalzgehalt in den Grundwässern der Fassung Ober Hörgern im Verhältnis zur Karbonathärte weiter minimiert werden. Dies kann

durch eine gezielte Aufhärtung nach der Enthärtung erzielt werden. Hinsichtlich der Zielhärte muss die Aufhärtung mittels Umkehrosmose jedoch größer dimensioniert werden. Damit resultiert neben höheren Gesamtkosten auch ein entsprechend höherer Zusatzwasserbedarf. Der Konzentratanfall bzw. der Zusatzwasserbedarf wird am Standort Ober Hörgern auf 31.000 m³/a geschätzt. Im vorliegenden Fall würde sich die nutzbare Grundwasserreserve am Standort Ober Hörgern auf 14 % verringern.

Um ein einheitlich weiches Trinkwasser der Härte 8 °dH für den gesamten Versorgungsbereich der Stadt Münzenberg bereitzustellen, wären gezielt die Grundwässer Ober Hörgern mittels der UO-Technik zu enthärten und mit den vergleichsweise weniger salzhaltigen Brunnenwässern aus Münzenberg/Trias zu verschneiden. Eine nachfolgende Aufhärtung ist in diesem Fall nicht erforderlich. Diese Konzeptoption erfordert allerdings einen umfangreichen Leitungsbau durch die Zusammenführung sämtlicher Brunnenwässer der Stadt Münzenberg an einer zentralen Stelle.

Als möglichen Standort für die Anlagentechnik bietet sich die zentrale Stellfläche neben der Kläranlage Würtzberg an. Dort wäre auch eine direkte Einleitung des beim Membranprozess anfallenden Konzentrates von ca. 30.000 m³/a und der in zeitlich längeren Abständen anfallenden üblicherweise aufbereitungstechnisch unbedenkliche Reinigungslösungen möglich. Die Rohwasserreserve für den gesamten Versorgungsbereich von derzeit 23 % würden sich auch bei einer zentralen Enthärtung insgesamt auf 14 % verringern. Allerdings wird in diesem Fall dem gesamten Versorgungsgebiet ein weiches Trinkwasser zur Verfügung gestellt. Unabhängig davon, sollte die Grundwasserreserven durch die Erhöhung der Entnahmerechte aufgestockt werden, um die Trinkwasserversorgung gegenüber den klimatischen Veränderungen langfristig sicher zu stellen.

Die Enthärtung und der damit mögliche Zusammenschluss der Versorgungen bedingt im Vergleich zur derzeitigen Situation einen höheren finanziellen Aufwand und eine entsprechende Erhöhung des Wasserpreises. Die Investitions- und Betriebskosten für die Enthärtung inkl. Gebäude, Planung und Leitungsverlegung werden in der Größenordnung von rund 2 Mio. € (Standort Ober Hörgern) bzw. Mio. 2,6 € (Standort Würtzberg) netto liegen.

Bezogen auf die verkaufte Trinkwassermenge im gesamten Versorgungsgebiet von 240.000 m³/a ergibt sich bei einer zentralen Enthärtung inkl. der Betriebsoptimierung eine Wasserpreiserhöhung von ca. 0,78 €/m³ bzw. 0,98 €/m³ ohne den ggf. zusätzlichen Personal- und Konzentratentsorgungskosten. Für den Verbraucher entspricht dies eine Wasserpreiserhöhung von 36 € bzw. 44 € pro Person und Jahr ohne Berücksichtigung ggf. möglicher Zuschüsse seitens des Landes.

Der mit der Härteverringerung verbundenen Erhöhung des Wasserpreises stehen bei angepasstem Verbraucherverhalten Kostenentlastungen auf Seiten des Verbrauchers von schätzungsweise mindestens 27 € pro Person und Jahr gegenüber, so dass sich die zentrale Enthärtung für den Verbraucher je nach Verhalten auch bei der vergleichsweise hohen Wasserpreiserhöhung von knapp einem Euro pro m³ Trinkwasser als kostenneutral darstellen kann. Durch den Netzverbund resultiert zudem eine zusätzliche Versorgungssicherheit, die positiv zu bewerten ist.

Aus ökologischer Sicht ist die Maßnahme der zentralen Enthärtung hinsichtlich der Minimierung der Salzfrachten prinzipiell zu befürworten. Eine geringere Wasserhärte bedingt einen geringeren Verbrauch an Wasch- und Reinigungsmitteln sowie von Regeneriersalzen für den Betrieb von Ionenaustauschern, beispielsweise in Spülmaschinen. Dies führt zu einer geringeren Belastung des Abwassers mit den genannten Verbrauchsstoffen sowie zu einer Verringerung der Emissionen von Kupfer aus dem Bereich der Hausinstallation.

Für die weiteren Überlegungen zur Thematik der zentralen Enthärtung für den gesamten Versorgungsbereich der Stadt Münzenberg ist folgende Vorgehensweise zu empfehlen:

- Vorplanung durch ein Ingenieurbüro (detaillierte Auslegung der Aufbereitungstechnik, Anbindungen, Variantenbetrachtung (Standort, Technik)) zur konkreten Kostenplanung anhand der vorliegenden Studienergebnisse
- Klärung der Möglichkeiten der Erhöhung der erlaubten Wasserentnahmemenge und der Konzentratableitung anhand der geschätzten Vorgaben
- Bürgerinfo zum Einholen des sachlichen Stimmungsbildes
- Entscheidung durch ein fachlich vorbereitetes Gremium

Bei der weiteren Vorgehensweise stehen wir Ihnen weiterhin als unabhängiges Fachinstitut gerne zur Verfügung.

Karlsruhe, August 2021

i. V. Dr.-Ing. Marcel Riegel

i. A. Dr.-Ing. Sebastian Hesse

8 Anlage

Anlage 1: Analysenergebnisse, TZW-Labor

Messstelle		Ober-Hörgern I	Ober-Hörgern II	Münzenberg	Trias
Datum		29.07.2020	29.07.2020	29.07.2020	29.07.2020
Fassungstemperatur	°C	11,9	12,1	12,2	12,4
Elektr. Leitfähigkeit bei 20°C, ber.	µS/cm	1170	1190	575	602
Elektr. Leitfähigkeit bei 25°C	µS/cm	1310	1330	642	672
pH-Wert bei Fassungstemperatur	-	7,21	7,18	7,36	7,44
Temperatur	°C	22,7	23,4	23,2	22,7
pH-Wert, Labor	-	7,21	7,18	7,36	7,44
Säurekapazität bis pH 4,3	mmol/L	6,32	6,28	5,49	3,79
Basekapazität bis pH 8,2	mmol/L	0,81	0,85	0,52	0,32
Gesamthärte	mmol/L	6,17	6,28	3,07	2,77
Gesamthärte °dH	° dH	34,6	35,2	17,2	15,5
Calcitabscheidekapazität (FT)	mg/L	38	37	13	1
DC90	mg/L	140	140	84	48
Calcium	mg/L	166	170	76,7	67,7
Magnesium	mg/L	49,3	49,6	28,2	26,2
Natrium	mg/L	15,5	15,7	12,8	25,4
Kalium	mg/L	4,1	4,1	2,3	3
Chlorid	mg/L	174	180	30,1	47,5
Nitrat	mg/L	29,6	27,7	18,7	45,6
Sulfat	mg/L	74,7	72,7	13,1	48,8
Fluorid	mg/L	0,25	0,29	0,21	0,12
Phosphat, gesamt	mg/L	0,13	0,13	0,11	0,09
Aluminium	mg/L	< 0,02	< 0,02	< 0,02	< 0,02
Barium	mg/L	0,01	0,02	0,03	0,07
Eisen	mg/L	< 0,01	< 0,01	< 0,01	< 0,01
Mangan	mg/L	< 0,005	< 0,005	< 0,005	< 0,005
Silicium	mg/L	12,7	13,2	16,4	15,2
Silikat	mg/L	27,2	28,2	35,1	32,5
Strontium	mg/L	0,61	0,62	0,48	0,67
TOC	mg/L	0,94	0,84	0,52	0,89
SDI, Kolloid-Index	%/min	1,08	< 1	6,09	< 1
S1		1,1	1,1	0,3	0,8

Anlage 2: Leitungsverbindung

Anlage 3: Mischwasserberechnung W 216

		Gambach / Ober Hörgern		Münzenberg		$\|P_1 - P_2\|$	$\Delta P \leq 1$
Säurekap. bis pH 4,3	mol/m³	3,20		5,50		**1,0**	ja
		mg/L	mol/m³	mg/L	mol/m³		
Chlorid Cl^-		89	2,51	30	0,85	0,76	ja
Sulfat SO_4^{2-}		37	0,39	14	0,15	0,41	ja
Anionenkoeffizient	-	1,04		0,21		0,92	ja

Trinkwässer sind von gleicher Beschaffenheit und aus korrosionschemischer Sicht im beliebigen Verhältnis untereinander mischbar, wenn der Prüfwert ΔP den Wert von 1 nicht überschreitet.

Anlage 4: Kolloidindex / Brunnen Münzenberg

Technologiezentrum Wasser Karlsruhe DVGW

Kolloidindex (SDI)

gemäß ASTM D 4189-95 (Reapproved 2002)

Auftraggeber:	Stadtwerke Münzenberg	
Anschrift:		
Datum:	29.07.2020	
Probenahmestelle:	Brunnen Münzenberg	
Membrandurchmesser:	25	mm
Membranporenweite:	0,45	µm
Messvolumen V_1:	141	mL
Druck:	2,07	bar
Messtemp. Start:	7,6	°C
Messtemp. Ende:	8,9	°C
Filtrationszeit T_1:	15	min
Messzeit t_1 (141 mL):	0,72	min
Messzeit t_2 (141 mL):	8,3	min

Berechnung SDI

$$SDI = \frac{\left(1 - \frac{t_1}{t_2}\right) * 100}{T_1}$$

SDI = 6,09 %/min

Zusätzliche Messwerte:

Trübung	0,34	FNU
SAK (254 nm)	1,74	1/m
Färbung (SAK 436 nm)	2,14	1/m
Datum:	30.07.2020	
gemessen durch:	Nordwig-Krauß	

Anlage 5: Kolloidindex / Brunnen Ober Hörgern 1

Technologiezentrum Wasser Karlsruhe DVGW

Kolloidindex (SDI)

gemäß ASTM D 4189-95 (Reapproved 2002)

Auftraggeber:	Stadtwerke Münzenberg	
Anschrift:		
Datum:	29.07.2020	
Probenahmestelle:	Brunnen Ober-Hörgern 1	
Membrandurchmesser:	25	mm
Membranporenweite:	0,45	µm
Messvolumen V_1:	141	mL
Druck:	2,07	bar
Messtemp. Start:	8	°C
Messtemp. Ende:	9,4	°C
Filtrationszeit T_1:	15	min
Messzeit t_1 (141 mL):	0,78	min
Messzeit t_2 (141 mL):	0,93	min

Berechnung SDI

$$SDI = \frac{\left(1 - \frac{t_1}{t_2}\right) * 100}{T_1}$$

SDI = 1,08 %/min

Zusätzliche Messwerte:

Trübung	0,24	FNU
SAK (254 nm)	3,56	1/m
Färbung (SAK 436 nm)	2,36	1/m
Datum:	30.07.2020	
gemessen durch:	Nordwig-Krauß	

Anlage 6: Kolloidindex / Brunnen Ober Hörgern 2

		Technologiezentrum Wasser		
			Karlsruhe	DVGW
Kolloidindex (SDI)				
gemäß ASTM D 4189-95 (Reapproved 2002)				
Auftraggeber:	Stadtwerke Münzenberg			
Anschrift:				
Datum:	29.07.2020			
Probenahmestelle:	Brunnen Ober-Hörgern 2			
Membrandurchmesser:	25	mm		
Membranporenweite:	0,45	µm		
Messvolumen V_1:	141	mL		
Druck:	2,07	bar		
Messtemp. Start:	9,4	°C		
Messtemp. Ende:	9,8	°C		
Filtrationszeit T_1:	15	min		
Messzeit t_1 (141 mL):	0,78	min		
Messzeit t_2 (141 mL):	0,78	min		
Berechnung SDI	$SDI = \frac{\left(1 - \frac{t_1}{t_2}\right) * 100}{T_1}$			
SDI =	**0,00**	**%/min**		
Zusätzliche Messwerte:				
Trübung	0,18	FNU		
SAK (254 nm)	3,74	1/m		
Färbung (SAK 436 nm)	2,94	1/m		
Datum:	30.07.2020			
gemessen durch:	Nordwig-Krauß			

Anlage 7: Kolloidindex / Brunnen Trais

		Technologiezentrum Wasser		
			Karlsruhe	DVGW
Kolloidindex (SDI)				
gemäß ASTM D 4189-95 (Reapproved 2002)				
Auftraggeber:	Stadtwerke Münzenberg			
Anschrift:				
Datum:	29.07.2020			
Probenahmestelle:	Brunnen Trias			
Membrandurchmesser:	25	mm		
Membranporenweite:	0,45	µm		
Messvolumen V_1:	141	mL		
Druck:	2,07	bar		
Messtemp. Start:	9,8	°C		
Messtemp. Ende:	11,9	°C		
Filtrationszeit T_1:	15	min		
Messzeit t_1 (141 mL):	0,57	min		
Messzeit t_2 (141 mL):	0,63	min		
Berechnung SDI	$SDI = \frac{\left(1-\frac{t_1}{t_2}\right) * 100}{T_1}$			
SDI =	**0,63**	**%/min**		
Zusätzliche Messwerte:				
Trübung	0,40	FNU		
SAK (254 nm)	2,66	1/m		
Färbung (SAK 436 nm)	2,50	1/m		
Datum:	30.07.2020			
gemessen durch:	Nordwig-Krauß			