

F & E-Projekt unter Förderung des  
Bundesministeriums für Bildung und Forschung (BMBF) sowie  
des serbischen Wirtschaftsministeriums  
(Förderkennzeichen: **02WT0647**)

**Neukonzeption der Trinkwasserversorgung  
unter Berücksichtigung neuartiger Verfahren zur  
Aufbereitung alkalischer, stark arsen- und  
huminstoffhaltiger Grundwässer am Beispiel der  
Städte Becej, Novi Becej, Kikinda und  
Zrenjanin in der Region Vojvodina (Serbien)**

## **Schlussbericht**

**(Projektdauer: 1.08.2005 - 30.04.2009)**

Dr.-Ing. S. Stauder  
Dipl.-Hyd. M. Geiges  
Prof. Dr. W. Kühn

Das diesem Bericht zugrunde liegende Vorhaben wurde mit Mitteln des Bundesministeriums für Bildung und Forschung unter dem Förderkennzeichen 02WT0839 gefördert. Die Verantwortung für den Inhalt dieser Veröffentlichung liegt beim Autor

## Inhaltsverzeichnis

<b>1</b>	<b>KURZDARSTELLUNG DES PROJEKTS</b>	<b>4</b>
1.1	Aufgabenstellung	4
1.2	Voraussetzungen	4
1.3	Planung und Ablauf	5
1.4	Wissenschaftlich-technischer Stand	5
1.5	Zusammenarbeit mit anderen Stellen	6
<b>2</b>	<b>EINGEHENDE DARSTELLUNG DER PROJEKTERGEBNISSE</b>	<b>7</b>
2.1	Situationsbeschreibung	8
2.1.1	Lage des Untersuchungsgebiets	8
2.1.2	Hydrogeologie	10
2.1.3	Bestehende Wasserversorgungsanlagen	12
2.1.4	Wasserbedarfsabschätzung	13
2.1.5	Wasserpreise	14
2.1.6	Gesetzliche Rahmenbedingungen	14
2.2	Grund- und Trinkwasserbeschaffenheit	15
2.2.1.	Chemisch-physikalische Grundwasserdaten	18
2.2.2.	Mikroverunreinigungen und Radioaktivität	20
2.2.3.	Arsenspeziation	21
2.2.4.	Spezifikation der natürlichen organischen Substanzen	22
2.2.5.	Trinkwässer	23
2.3	Grundwasseraufbereitung in der Vojvodina	26
2.3.1.	Becej: Arsen- und huminstoffarmes Grundwassers	27
2.3.2.	Subotica: Arsenhaltiges und huminstoffarmes Grundwasser	28
2.3.3.	Kikinda, Novi Becej und Zrenjanin: Alkalische, huminstoffreiche und z. T. stark arsenhaltige Grundwässer	30
2.3.4.	Beurteilung alternativer Aufbereitungskonzepte	36
2.3.5.	Fazit der Untersuchungen zur Grundwasseraufbereitung	38
2.4	Uferfiltratgewinnung an der Theiß	39
2.4.1	Allgemeine Angaben zur Uferfiltration	39
2.4.2	Flusswasserbeschaffenheit Theiß	43
2.4.3	Hydraulische und morphologische Angaben zur Theiß	45

2.4.4	Hydrogeologische Erkundung einer Uferfiltratgewinnung.....	46
2.4.5	Uferfiltratbeschaffenheit.....	57
2.4.6	Aufbereitungsversuche mit Uferfiltrat.....	63
2.4.7	Konzept zur Aufbereitung des Uferfiltrats .....	67
<b>2.5</b>	<b>Veröffentlichungen und Vorträge .....</b>	<b>69</b>
<b>2.6</b>	<b>Literatur .....</b>	<b>69</b>
<b>3</b>	<b>ERFOLGSKONTROLLBERICHT .....</b>	<b>71</b>
<b>3.1</b>	<b>Beitrag zu den förderpolitischen Zielen.....</b>	<b>71</b>
<b>3.2</b>	<b>Wesentliche wissenschaftlich-technische Ergebnisse .....</b>	<b>71</b>
<b>3.3</b>	<b>Verwertungsplan.....</b>	<b>73</b>
<b>3.4</b>	<b>Durchführung der Arbeiten .....</b>	<b>74</b>
<b>3.5</b>	<b>Präsentationsmöglichkeiten für mögliche Nutzer.....</b>	<b>74</b>
<b>3.6</b>	<b>Ausgaben- und Zeitplanung.....</b>	<b>74</b>
<b>4</b>	<b>KURZFASSUNG (BERICHTSBLATT).....</b>	<b>75</b>

# 1 Kurzdarstellung des Projekts

## 1.1 Aufgabenstellung

Zahlreiche Kommunen in der autonomen Provinz Vojvodina im Norden Serbiens nutzen zur Trinkwasserversorgung Grundwasser, das erhöhte Mengen an Arsen enthält (z. T. über 200 µg/L). Mit Ausnahme einer Chlorung erfolgt bislang keine Aufbereitung, sodass der EU-Trinkwassergrenzwert im Leitungswasser um das bis zu 20-fache überschritten wird. Der langfristige Konsum eines derartigen Trinkwassers kann zu Gesundheitsschäden, wie z. B. Funktionsstörungen der Leber und Niere sowie verschiedenen Krebsformen führen. Schätzungsweise sind 500.000 Einwohner in der Vojvodina von dieser Problematik betroffen [1]. Da auch im angrenzenden Ungarn und Rumänien ähnliche Grundwässer zur Trinkwasserversorgung genutzt werden, ist die Zahl der betroffenen Personen möglicherweise noch größer.

Ziel des Vorhabens war es, die technisch-wissenschaftlichen Grundlagen zur Konzeption von Wassergewinnungs-, Aufbereitungs- und Verteilungsanlagen zu erarbeiten, mit denen künftig der Bevölkerung in den Städten Becej, Novi Becej, Kikinda und Zrenjanin ein einwandfreies Trinkwasser zur Verfügung gestellt werden kann.

## 1.2 Voraussetzungen

In einigen serbischen Kommunen wurde der Konsum des Leitungswassers von den Behörden bereits vor Jahren untersagt. Trotz intensiver Bemühungen von verschiedenen Firmen bzw. Institutionen gelang es jedoch bisher nicht, geeignete Verfahrenstechniken zur Aufbereitung des zur Trinkwassergewinnung verwendeten Tiefengrundwassers zu ermitteln.

Neben der problematischen Wasserbeschaffenheit (alkalisch, stark huminstoffhaltig) ist auch die langsame Grundwasserneubildung im genutzten Aquifer zu berücksichtigen. Um die Trinkwasserversorgung in der Region langfristig sicherzustellen, sind deshalb auch alternative Rohwasserressourcen in die Betrachtungen mit einzubeziehen. Da der obere Grundwasserleiter durch die intensive landwirtschaftliche Nutzung stark belastet ist, kommt hierfür insbesondere die Gewinnung von Flusswasser bzw. Uferfiltrat in Betracht.

Die serbische Regierung hat die Lösung des „Arsenproblems“ mit höchster Priorität versehen und sich an der Finanzierung des BMBF-Vorhabens zu einem Drittel beteiligt.

### **1.3 Planung und Ablauf**

Im ersten Teil des Vorhabens wurde die Beschaffenheit und Aufbereitung des Tiefengrundwassers genauer untersucht. Der vorliegende Grundwasserchemismus stellt aus aufbereitungstechnischer Sicht eine Herausforderung dar. Insbesondere müssen für die Entfernung von Arsen und Huminstoffen aus alkalischen Wässern neue Verfahrenstechniken untersucht bzw. entwickelt werden.

Der Schwerpunkt des zweiten Projektabschnitts war die Erkundung einer Uferfiltratgewinnung an der Theiß. Die Theiß (serbisch Tisa) ist der zweit-wasserreichste Nebenfluss der Donau und durchströmt die Vojvodina mittig von Nord nach Süd. Es wurden an einem Standort Grundwassermessstellen sowie ein Versuchsbrunnen errichtet und die hydrogeologische Situation sowie die Beschaffenheit und Aufbereitung des gefassten Uferfiltrats untersucht.

Parallel hierzu erfolgte eine Bestandsaufnahme und Analyse der wesentlichen Randbedingungen bei der Wassergewinnung und –verteilung im Betrachtungsgebiet. Auf dieser Grundlage wurden von den serbischen Partnern detaillierte Konzepte zum Bau von Aufbereitungsanlagen sowie zur Erneuerung der Versorgungssysteme ausgearbeitet.

### **1.4 Wissenschaftlich-technischer Stand**

Der vorliegende Grundwasserchemismus ist typisch für ein altes Porengrundwasser und vermutlich weltweit häufiger anzutreffen. Bislang existieren noch keine Verfahren zur Behandlung derartiger alkalischer Wässer mit hohen Arsen- und Huminstoffgehalten. Global betrachtet wurde Arsen neben Fluorid von der WHO als einer der beiden problematischsten Trinkwasserinhaltsstoffe eingestuft.

Das TZW führt seit vielen Jahren Forschungs- und Entwicklungsarbeiten auf dem Gebiet der Trinkwasseraufbereitung und Wasseranalytik durch. Darüber hinaus wurden im Rahmen der praktischen Arbeit für Wasserversorger im In- und Ausland zahlreiche Anlagen zur Trinkwasseraufbereitung konzipiert und die großtechnische Umsetzung begleitet. Mehrere Arbeiten des TZW befassten sich mit der Speziation von Arsenverbindungen sowie von natürlichen organischen Wasserinhaltsstoffen. Für sämtliche Verfahren der Trinkwasseraufbereitung, unter anderem die Entarsenierung sowie die Uferfiltration, liegen umfassende Erfahrungen vor. Eine Liste der TZW-Publikationen aus den vergangenen 15 Jahren ist im Internet verfügbar (<http://www.tzw.de>).

Die im Rahmen des Vorhabens verwendete Fachliteratur ist in Kapitel 2.6 aufgelistet.

### **1.5 Zusammenarbeit mit anderen Stellen**

Die serbischen Projektpartner iK Consulting Engineers und EHTING führten folgende Arbeiten durch:

- Dokumentation der bestehenden Wasserversorgungsanlagen und Ermittlung der relevanten verwaltungstechnischen bzw. gesetzlichen Rahmenbedingungen
- Wasserbedarfsprognose und Konzeption der großtechnischen Realisierung einer Trinkwasserversorgung einschließlich Kostenbetrachtung (Basic Design)

Die hydrogeologischen Erkundungsarbeiten zur Uferfiltratgewinnung an der Theiß wurden von der Fakultät für Bergbau und Geologie der Universität Belgrad (Abteilung Hydrogeologie) wissenschaftlich begleitet.

Von der Ingenieurgesellschaft HGN Hydrogeologie GmbH, Torgau (HGN) wurden ergänzende geoelektrische sowie geophysikalische Untersuchungen durchgeführt, ein Grundwassermodell erarbeitet und Simulationsrechnungen zur Uferfiltratgewinnung am Standort Padej durchgeführt.

## 2 Eingehende Darstellung der Projektergebnisse

Im Verlauf des Projekts wurden die nachfolgend aufgelisteten 14 Berichte erstellt. Diese Detailberichte sind zusammen mit ergänzenden Unterlagen (verwendete Literatur, Karten ect.) auf einer CD enthalten, die dem Abschlussbericht beigelegt ist. Der Dateiname des jeweiligen Berichts auf der CD ist kursiv in Klammern hinter dem Berichtstitel in der folgenden Auflistung angegeben. Auf die wesentlichsten Ergebnisse aus den Detailberichten wird im vorliegenden Abschlussbericht eingegangen.

1. TZW-Zwischenbericht Nr. 1 (*01\_TZW-Zwischenbericht\_April\_2006*)
2. TZW-Teilbericht Nr. 2, Water quality and optimization of the drinking water treatment in Becej (*02\_TZW-Becej\_Nov\_2006*)
3. Pre Feasibility study with basic design for improvement of water quality and upgrading of water supply system for Becej Municipality – Draft final report (*03\_IK-BOOK\_1\_Basic\_design\_Becej* und *03b\_IK-BOOK\_1\_Becej\_Appendix 3*)
4. Pre Feasibility study with basic design for improvement of water quality and upgrading of water supply system for Kikinda, Zrenjanin and Novi Becej – Draft Final Report (*04\_IK-BOOK\_2.0\_KI\_ZR\_NB-Technical report*, *04b\_IK-Executive\_Summary\_KI\_ZR\_NB* und *04c\_IK-BOOK\_2.X\_KI\_ZR\_NB\_Zubehör*)
5. TZW-Teilbericht Nr. 3, Evaluation of the Tisza river water quality (*05\_TZW-Tisa\_Maerz\_2007*)
6. TZW-Teilbericht Nr. 4, Water quality and improvement of the drinking water supply in Kikinda, Novi Becej and Zrenjanin (*06\_TZW-KI\_NB\_ZR\_Mai\_2007*)
7. TZW-Teilbericht Nr. 5, Beurteilung der Pilotanlage zur Trinkwassergewinnung aus Grundwasser in Zrenjanin (*07\_TZW-Pilotanlage-ZR\_Jun\_2007*)
8. TZW-Teilbericht Nr. 6, Arsenspeziation (*08\_TZW-Arsen\_Nov\_2008*)
9. TZW-Teilbericht Nr. 7, Oxidationsversuche mit Grundwasser Zrenjanin und Flusswasser der Theiß (*09\_TZW-Ozon\_Nov\_2008*)
10. River engineering report Theiß (*10\_IK-River engineering report\_Theiss\_April\_2006* und *10b\_IK-River engineering report-Anhaenge*)
11. Vorerkundung Uferfiltration (serbisch) „IZVEŠTAJ O HIDROGEOLOŠKIM ISTRAŽIVANJIMA i nadzoru nad izradom ISTRAŽNIH BUŠOTINA NA LOKACIJI PADEJ ZA POTREBE VODOSNABDEVANJE KIKINDE“ (*11\_Stevanovic-RBF\_Exploration Padej\_2007- in Serb* und *11b\_Stevanovic\_RBF\_Exploration Padej\_2007\_Zubehoer*) – das Kapitel 12 des Berichtes Nr. 4 (*04\_IK-*

BOOK\_2.0\_KI\_ZR\_NB-Technical report) enthält eine Zusammenfassung dieses Berichtes in englischer Sprache)

12. Erkundung Uferfiltration Padej (serbisch und englisch) (*12\_Stevanovic-RBF\_Exploration\_Padej\_2008* und *12b\_Stevanovic-RBF\_Exploration\_Padej\_2008\_Zubehoer*)
13. Uferfiltratgewinnung an der Theiß bei Padej/Vojvodina (*13\_HGN-GW-Modell\_Aug\_2008* und *13b\_HGN-GW-Modell\_Aug\_2008\_Anlagen*)
14. Uferfiltratgewinnung an der Theiß bei Padej/Vojvodina – Ergänzungsbericht (*14\_HGN-GW-Modell-2\_Nov\_2008*)

## **2.1 Situationsbeschreibung**

Detailangaben zur Trinkwasserversorgung im Betrachtungsgebiet und den durchgeführten Untersuchungen (Wasserbedarfsprognose, gesetzliche Rahmenbedingungen usw.) sind dem TZW-Zwischenbericht-1, April 2006, dem TZW-Teilbericht-2, November 2006 sowie den Abschlussberichten der serbischen Projektpartner vom April 2007 (Book 1, Becej sowie Book 2, Kikinda, Zrenjanin und Novi Becej) zu entnehmen (vgl. Berichte 1.-4. der vorstehenden Tabelle). Nachfolgend werden wesentliche Ergebnisse daraus zusammengefasst.

### *2.1.1 Lage des Untersuchungsgebiets*

Das Untersuchungsgebiet mit den Städten Kikinda, Becej, Novi Becej und Zrenjanin befindet sich zwischen der Donau und der ungarischen Landesgrenze etwa 100 bis 150 km nördlich von Belgrad in der zu Serbien gehörenden autonomen Region Vojvodina (siehe Abbildung 1).





**Abbildung 1: Lage des Untersuchungsgebiets in Serbien bzw. im pannonischen Tiefland**

Geografisch betrachtet, befindet sich das Gebiet im südlichen Teil der pannonischen Tiefebene, welche eines der großen Sedimentbecken Europas darstellt. Das Tiefland ist hauptsächlich durch die Ablagerungen des Pannonischen Meeres in einer bis zum Pliozän andauernden Senkungsphase entstanden und wird von den Gebirgszügen der Alpen (östliche Ausläufer), der Karpaten, des Balkengebirges und der Dinari-schen Alpen umgeben. Die Hauptentwässerungsadern sind die Donau sowie die Theiß.

Mit Ausnahme der Stadt Becej, die zur Provinz Batschka gehört, liegen die genannten Städte in den östlich der Theiß gelegenen Bezirken des nördlichen und zentralen Banats. Die Lage der einzelnen Bezirke der Region Vojvodina geht aus Abbildung 2 hervor. Bei gemeinsamer Betrachtung des nördlichen und zentralen Banats beträgt die maximale Nord-Süd Ausdehnung ca. 120 km, die maximale West-Ost-Ausdehnung ca. 60 km. Die Bevölkerungszahl des Nord-Banats lag im Jahr 2002 bei ca. 166.000 Einwohnern, die des Zentral-Banats bei ca. 208.500 Einwohnern.

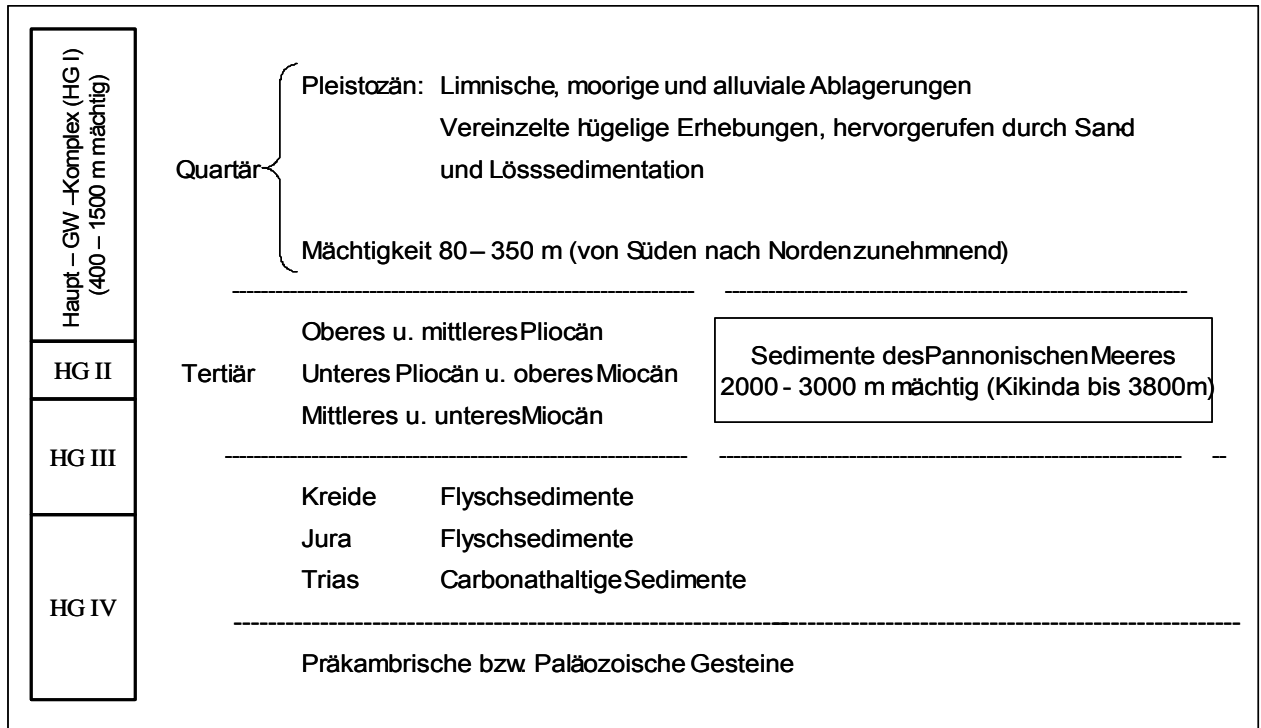


**Abbildung 2: Aufteilung der Vojvodina in einzelne Bezirke**

### 2.1.2 Hydrogeologie

Die Basis des pannonischen Beckens in der Region Vojvodina bilden präkambrische bzw. paläozoische Gesteine. Über dieser Basis haben sich carbonathaltige Sedimente der Trias sowie Flyschsedimente aus der Jura- und Kreidezeit abgelagert. In dem sich anschließenden Tertiär kam es ebenfalls zu umfangreichen Sedimentationsvorgängen, die erst mit dem Rückzug des Pannonischen Meers ihr Ende fanden. Diese Ablagerungen erreichen beispielsweise in der Gegend um Kikinda eine Mächtigkeit von bis zu 3.800 m. Für die gesamte Region kann man von einer durchschnittlichen Mächtigkeit dieser Sedimentschichten von 2.500 m ausgehen. Im Quartär erfolgte abermals die Bildung von Sedimentschichten, die im Süden der Vojvodina eine Mächtigkeit von ca. 80 m aufweisen und Richtung Norden bis auf 350 m zunehmen. Diese Ablagerungen wurden durch limnische, moorige oder entlang der Flussläufe durch alluviale Prozesse gebildet. Die wenigen hügeligen Erhebungen in der ansonsten flachen Landschaft sind die Folge äoloischer Löss- und Sandverfrachtungen.

Abbildung 3 gibt einen schematischen Überblick über den beschriebenen geologischen Aufbau und ordnet die vorhandenen hydrogeologischen Systeme diesem Aufbau zu [2].



**Abbildung 3: Geologischer Aufbau des pannonischen Tieflands in der Region Vojvodina sowie die dazugehörigen hydrogeologischen Systeme**

Von den vier in Abbildung 3 dargestellten hydrogeologischen Systemen wird das oberste Grundwassersystem (HG I) für die Wasserversorgung genutzt. Dieses System besteht aus Sedimenten des mittleren Pliocän, deren Mächtigkeit im Untersuchungsgebiet nach Osten hin von ca. 400 m auf bis zu 1.500 m zunimmt und in einen phreatischen (ungespannten) und einen artesischen (gespannten) Aquifer unterteilt werden kann.

Der durch alluviale Ablagerungen entlang der Theiß entstandene ungespannte Aquifer besteht hauptsächlich aus sandigen Sedimenten. Die Grundwasserneubildung in diesem Aquifer erfolgt neben der Infiltration des Niederschlags insbesondere durch Uferfiltration sowie durch das Eindringen von Grundwasser aus dem darunter liegenden artesischen Aquifer. Verlässliche hydraulische Aquifer-Kenndaten liegen nicht vor. Bislang wurde von serbischen Fachleuten angenommen, dass aufgrund des relativ geringen Gefälles der Theiß feinkörnige Ablagerungen vorherrschen, die keine größeren Wasserentnahmen zulassen. Für die Wasserversorgung wird dieser phreatische Aquifer bislang nicht genutzt.

Hauptquelle der Wasserversorgung in der Region Vojvodina ist der artesischer Grundwasserleiter [3]. Dieser besteht aus mehreren Wasser führenden, zumeist sandigen Schichten, die durch Aquicluden aus tonigen Sedimenten voneinander getrennt sind. In der Regel sind zwei bis vier Wasser führende Schichten bis in eine

Tiefe von 200 m anzutreffen, wobei vor allem die unteren Schichten für die Wasserversorgung genutzt werden. Die einzelnen Schichten weisen Mächtigkeiten von 10 bis 20 m auf. Die hydraulische Durchlässigkeit wird mit  $10^{-4}$  bis  $10^{-5}$  m/s angegeben, kann jedoch örtlich durch schluffige und mergelige Schichten sowie in zunehmender Tiefe durch die steigende Verdichtung des Substrats herabgesetzt sein.

Die Grundwasserneubildung dieses Systems erfolgt überwiegend durch infiltrierenden Niederschlag in weiter entfernt gelegenen Gebieten, in denen sich der Grundwasserleiter in Oberflächennähe befindet. Dies sind beispielsweise das karpatische Vorgebirge Rumäniens sowie die Bergregionen Fruska Gora, Vrsacka Mountain und Deliblato.

### 2.1.3 Bestehende Wasserversorgungsanlagen

Etwa 70 % der Bevölkerung in der Vojvodina erhalten Trinkwasser aus einem öffentlichen Versorgungsnetz (seit ca. 1990 in der Zuständigkeit der Kommunen). Daneben existieren im ländlichen Raum zahlreiche Eigengewinnungsanlagen, die keiner staatlichen Kontrolle unterliegen.

Wie bereits erwähnt, wird ausschließlich Tiefengrundwasser zur Trinkwassergewinnung genutzt, wobei in der Regel lediglich eine Chlorung erfolgt. Lediglich in Becej wird das Grundwasser weitergehend mittels Belüftung-Filtration-Chlorung behandelt.

Die Versorgungsnetze sind in einem sehr schlechten Zustand, da in den vergangenen 15 Jahren aufgrund fehlender Mittel nur die dringendsten Wartungs- und Instandsetzungsmaßnahmen möglich waren. **Die Netzverluste betragen bis zu 60 %** [1]. In einigen Bereichen muss in den Sommermonaten die Versorgung häufig unterbrochen werden. Ursache hierfür ist, neben dem begrenzten Dargebot und den hohen Netzverlusten, die Verwendung des Leitungswassers für die Bewässerung von Gärten und Feldern.

Eine Unterbrechung der Versorgung und der damit verbundene Druckabfall im Verteilungssystem sind insbesondere im Hinblick auf die zahlreichen Leckagen problematisch. Dabei kann es zu einem Zutritt von Verunreinigungen kommen (z. B. Sickerwasser aus undichten Abwasserkanälen). Trotz der Chlorung sind in **ca. 40 % aller Netzproben Fäkalindikatoren nachweisbar**. Auch Grenzwertüberschreitungen bezüglich der Parameter Arsen, Ammonium, Farbe und Geruch sind üblich [4].

#### 2.1.4 Wasserbedarfsabschätzung

Für die Abschätzung der Bevölkerungsentwicklung sowie die Prognose des Trinkwasserbedarfs bis zum Jahr 2031 wurden u.a. Daten des Statistischen Amtes der Republik Serbien herangezogen. Die detaillierten Berechnungen sind im Book 1 - Kap. 4.2 (Becej) und im Book 2 - Kap. 9 (Novi Becej, Kikinda und Zrenjanin) enthalten (Berichte 3. und 4. nach Liste der Detailberichte). Nachfolgend werden wesentliche Ergebnisse daraus erläutert.

Tabelle 1 zeigt die Bevölkerungsentwicklung im Untersuchungsgebiet seit dem Jahr 1971 sowie eine Abschätzung bis zum Jahr 2031. In den letzten 20 Jahren ging danach die Bevölkerungszahl im Betrachtungsgebiet leicht zurück. Dies erfolgte überwiegend in den kleineren Ortschaften, während die Bevölkerungszahlen in den Städten Becej, Novi Becej, Zrenjanin und Kikinda relativ konstant blieben. Wesentliche Änderungen in der Bevölkerungszahl werden für die nächsten 20 Jahre nicht erwartet.

**Tabelle 1: Bevölkerungsentwicklung und –abschätzung für die Gemeinden Kikinda, Becej, Novi-Becej und Zrenjanin für die Jahre 1971 - 2031**

Kommune	1971	1981	1991	2002	2011 (Schätzung)	2031 (Schätzung)
Becej	44.976	44.243	42.111	41.387	40.455	42.104
Novi Becej	31.729	30.312	28.420	26.924	26.216	27.285
Zrenjanin	129.837	139.300	134.252	132.051	131.244	136.594
Kikinda	68.915	69.864	69.112	67.106	65.995	68.686
<b>TOTAL</b>	<b>275.457</b>	<b>283.719</b>	<b>273.895</b>	<b>267.468</b>	<b>263.910</b>	<b>274.669</b>

In Tabelle 2 sind die von den serbischen Projektpartnern abgeschätzten jährlichen Wasserverbrauchsmengen sowie die maximalen Volumenströme an Reinwasser (L/s) in den einzelnen Kommunen des Untersuchungsgebiets (Stadtgebiete sowie zusätzlich Stadtgebiete einschließlich umliegender Gemeinden) für das Jahr 2031 dargestellt. Für die Prognosejahre 2011 und 2021 ergaben die Berechnungen ähnliche Werte wie für 2031, da stabile Wasserverbräuche angenommen wurden.

**Tabelle 2: Wasserbedarf in Kikinda, Becej, Novi-Becej und Zrenjanin in 2031**

	<i>Stadtgebiet</i>		<b>Gesamt</b>	
	<i>Jahresbedarf Mio m<sup>3</sup>/a</i>	<i>Max. Vol. strom L/s</i>	<i>Jahresbedarf Mio m<sup>3</sup>/a</i>	<i>Max. Vol. strom L/s</i>
Becej	2,3	106	3,3	165
Novi Becej	1,2	53	2,1	109
Kikinda	3,2	205	5,3	328
Zrenjanin	6,2	283	9,8	500
<b>TOTAL</b>			<b>20,5</b>	<b>1.102</b>

Der gesamte Wasserbedarf setzt sich im Wesentlichen zu rd. 12,5 Mio. m<sup>3</sup>/a Verbrauch im häuslichen Bereich sowie zusätzlich jeweils ca. 2,7 Mio. m<sup>3</sup>/a für die Tierhaltung und die Industrie zusammen. Weiterhin sind Netzverluste sowie der Eigenverbrauch (z. B. Rohrnetzspülungen) berücksichtigt (2011; 20 %, 2031: 15 %).

Eine Abschätzung des Wasserbedarfs nach DVGW-Arbeitsblatt W 410 (Wasserbedarfszahlen) durch das TZW ergab ähnliche Resultate. In Abhängigkeit von der Gesamtkonzeption (Art der Verbundlösung, Trinkwasserspeichervolumen ect.) können neue Anlagen zur Trinkwasseraufbereitung ggf. mit geringeren Nennleistungen als den in Tabelle 2 angegebenen maximalen Reinwasservolumenströmen ausgelegt werden.

#### *2.1.5 Wasserpreise*

Der Wasserpreis liegt für private Haushalte derzeit zwischen 10 Dinar/m<sup>3</sup> (ca. 0,11 Euro) in der Ortschaft Kumane und 20 Dinar/m<sup>3</sup> (ca. 0,22 €/m<sup>3</sup>) im Stadtgebiet von Becej. Industrieunternehmen müssen höhere Wasserpreise von zum Teil bis zu 0,75 €/m<sup>3</sup> entrichten. Diese niedrigen Wasserpreise sind politisch gewollt, erschweren jedoch Investitionen zur Errichtung von Aufbereitungsanlagen bzw. der Erneuerung des Versorgungsnetzes, die für eine sichere Verteilung von Wasser mit Trinkwasserqualität erforderlich wären.

#### *2.1.6 Gesetzliche Rahmenbedingungen*

Die wichtigsten Verordnungen und Gesetze, die den Umgang mit der Ressource Wasser in der Republik Serbien/Montenegro regeln, wurden von den serbischen Projektpartnern im Book 2.2 (Appendix 1) erläutert (Bericht 4., nach Liste der Detailberichte). Nachfolgend sind wesentliche Fakten zusammengefasst.

Tabelle 3 zeigt für ausgewählte Parameter die serbischen Trinkwassergrenzwerte. Ein Vergleich mit den ebenfalls aufgelisteten Grenzwerten von Deutschland bzw. der EU macht wesentliche Unterschiede deutlich. Für die Parameter Ammonium, Bor und Natrium sind in Serbien niedrigere Werte einzuhalten, dagegen liegen die Grenzwerte für Arsen und Blei um das 5-fache über den deutschen bzw. EU-Standards.

**Tabelle 3: Vergleich der Trinkwassergrenzwerte von Deutschland und Serbien sowie der EU für ausgewählte Parameter**

Parameter	Maßeinheit	Serbien	EU	Deutschland
<b>Färbung</b>	mg/L Pt-Co	5	Keine	-
	SAK 436nm [m <sup>-1</sup> ]	-	Anomalie	0,5
<b>Elektr. Leitf.</b>	mS/m bei 20°C	100	250	250
<b>Ammonium</b>	mg/L	0,1	0,5	0,5
<b>Arsen</b>	mg/L	0,05	0,01	0,01
<b>Bor</b>	mg/L	0,3	1,0	1,0
<b>Eisen</b>	mg/L	0,3	0,2	0,2
<b>Mangan</b>	mg/L	0,05	0,05	0,05
<b>Natrium</b>	mg/L	150	200	200
<b>Colibakterien</b>	n/100ml	0	0	0

Informationen zu den Anforderungen an die Beschaffenheit von zur Trinkwassergewinnung genutzten Fließgewässern sind in den Anlagen des TZW-Teilberichts zur Beschaffenheit des Flusswassers der Theiß vom März 2007 enthalten (vgl. Bericht 5., nach Liste der Detailberichte). Die serbische Gesetzgebung bezieht sich im Wesentlichen auf die „biologische Gewässergüte“. Dagegen richten sich die Anforderungen der Europäischen Union (EU-Richtlinie 75/440/EEC) sowie der Bundesrepublik Deutschland (DVGW Arbeitsblatt W 251) auch nach der chemischen Beschaffenheit des Fließgewässers. Zudem bestehen hier für die einzelnen Wasserinhaltsstoffe je nach Aufbereitungsverfahren (naturnah oder physikalisch-chemisch) verschiedene Richtwerte. Dabei ist anzumerken, dass zeitlich begrenzte Überschreitungen dieser Richtwerte toleriert werden können.

## **2.2 Grund- und Trinkwasserbeschaffenheit**

In der Zeit September 2005 bis Juni 2007 führte das Technologiezentrum Wasser, Karlsruhe (TZW) mehrere Messkampagnen durch, wobei insgesamt 20 verschiedene **Grundwässer** aus Tiefbrunnen untersucht wurden. Ergänzend erfolgten zu mehreren Zeitpunkten Analysen an verschiedenen **Trinkwässern** im Untersuchungsgebiet sowie am **Flusswasser der Theiß**. Auch die Aufbereitungswirksamkeit im Wasser-



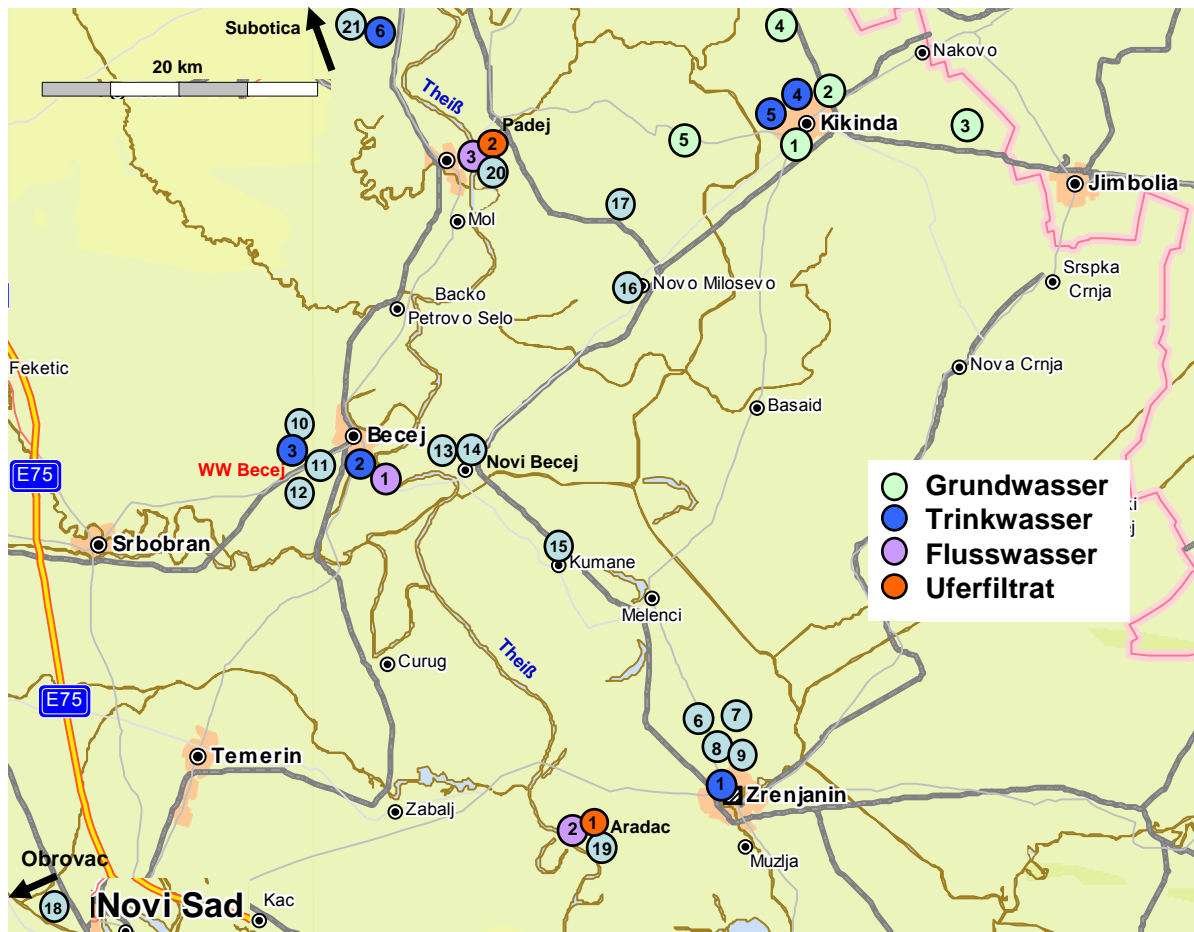
werk Becej sowie der in 2006/07 vom Wasserversorger in Zrenjanin betriebenen Pilotanlage zur Grundwasseraufbereitung wurde untersucht.

Abbildung 4 zeigt eine Probenahme an einem Tiefbrunnen und Abbildung 5 eine Übersicht des Untersuchungsgebiets mit allen Probenahmestellen.



**Abbildung 4: Grundwasserbeprobung in der Vojvodina September 2005**





**Abbildung 5: Übersicht des Untersuchungsgebiets mit den Probenahmestellen**

Exemplarisch sind in Anlage 2 die bei den Probenahmen vor Ort ermittelten Daten der Messkampagne im September 2005 aufgelistet (Entnahmestellennummern Abbildung 5 entsprechen den Bezeichnungen in Anlage 2). Im TZW-Labor wurden die Grundwasserproben auf die physikalisch-chemische Beschaffenheit zuzüglich verschiedener anthropogener Mikroverunreinigungen (u. a. Pestizidwirkstoffe) und Spurenelemente analysiert. Weiterhin erfolgten Arsenspeziationen und in drei Proben wurden auch radioaktive Kenngrößen (Gesamt-Alpha- und Gesamt-Beta-Aktivität) bestimmt. Der Analysenumfang der Trinkwässer und des Flusswassers der Theiß richtete sich nach den Vorgaben der deutschen Trinkwasserverordnung, wobei auch aus fachlicher Sicht wesentliche Messgrößen, beispielsweise die anthropogene Belastung erfasst wurden.

Sämtliche Analysenergebnisse aus der Zeit September 2005 bis Juni 2007 sind in den Anlagen der TZW-Teil- bzw. Zwischenberichte 1-5 dokumentiert. Book 1 (Appendix 1) und Book 2.2 (Appendix 2) der serbischen Projektpartner enthalten ältere Daten zur Grundwasserbeschaffenheit, die von dritter Seite erhoben wurden (Berichte 1-7, nach Liste der Detailberichte).

### 2.2.1 Chemisch-physikalische Grundwasserdaten

#### Kikinda, Zrenjanin und Novi Becej

Wie aus den kompletten Analysenberichten in den Anlagen der TZW-Berichte 1-5 bzw. aus der Zusammenstellung ausgewählter Analysenergebnisse in Tabelle 4 hervorgeht, weisen die Grundwässer östlich der Theiß (Kikinda, Zrenjanin und Novi Becej) untereinander einen ähnlichen Chemismus auf, der geprägt ist von:

- stark reduktiven Eigenschaften (anaerob-methanogen)
- hohem Gehalt an Natriumhydrogencarbonat (hohe Säurekapazität, hoher pH-Wert, hohe elektrische Leitfähigkeit)
- hohem Huminstoffgehalt (Gelbfärbung, Chlorzehrung)

Weiterhin führten die im anaeroben Untergrundmilieu ablaufenden mikrobiellen Prozesse zu erhöhten Gehalten an den reduzierten Verbindungen Hydrogensulfid, Methan, Ammonium, Eisen(II) und Mangan(II) und es liegen darüber hinaus erhöhte Borkonzentrationen vor.

Auch der **Arsengehalt ist z. T. stark erhöht** und liegt in den Grundwässern aus Novi Becej bei rd. 200 µg/L. In Zrenjanin schwanken die Arsenkonzentrationen zwischen 4 und 220 µg/L sehr stark. Dies ist darauf zurückzuführen, dass einige Brunnen nur in einem der beiden genutzten Aquifere verfiltert sind, andere jedoch auch aus beiden fördern. Im unteren Aquifer (> ca. 80 m u. GOK) wird Wasser erschlossen, das kaum Calciumionen und viel Natriumionen sowie sehr hohe Mengen an Arsen von bis zu 220 µg/L enthält. Der obere Aquiferbereich (ca. 40 - 80 m u. GOK) liefert dagegen relativ hartes, eisen- und manganhaltiges Wasser, das kaum Arsen enthält. In den Grundwässern aus dem Bereich Kikinda sind geringere Arsenkonzentrationen von ca. 10 bis 50 µg/L festzustellen. Arsen liegt in allen Wässern überwiegend als toxisches Arsenat(III) vor (= arsenige Säure; Ergebnisse der Arsenspeziationen vgl. Kapitel 3.1.4).

Organoleptisch fallen in den Grundwässern, neben der erwähnten Gelbfärbung, eine starke Ausgasung (Stickstoff) sowie ein leichter Schwefelwasserstoff-Geruch auf.

Tabelle 4: Ausgewählte chemisch-physikalische Untersuchungsergebnisse der Grundwasser-Probenahmen in der Vojvodina

Probenahmestelle	Datum	Temp. °C	Nitrat mg/L	Leitf. 25°C mS/m	Farbe [m-1]	TOC mg/L	pH -	K <sub>S</sub> 4,3 mmol/L	Calcium mg/L	Natrium mg/L	Eisen mg/L	Arsen mg/L	Bor mg/L	NH <sub>4</sub> <sup>+</sup> mg/L	Methan mg/L
Kikinda, Br. 1	29.09.2005	21,9	< BG	107	2,2	6,2	8,02	12	7,1	252	0,09	0,014	1,08	3	< BG
	15.03.2006	21,7	< BG	106	2,2	6,7	8,09	12	7,2	270	0,09	0,014	1,08	2,8	6,6
Kikinda, Br. "Handpumpe"	29.09.2005	16	< BG	64,4	1,6	4,1	8,03	7,18	9,3	140	0,2	0,012	0,44	1,5	-
Kikinda, Br. Banatsko	29.09.2005	21	< BG	75,7	2,1	6,1	7,92	8,49	15,1	163	0,21	0,007	0,71	1,5	< BG
Kikinda, Br. Mokrin	29.09.2005	22,7	< BG	54,9	0,6	2,6	7,89	6,07	16,1	107	0,12	0,036	0,21	1,8	< BG
Kikinda, Br. Idos	29.09.2005	21,3	< BG	60,3	0,8	3,5	7,96	6,69	11,4	124	0,1	0,052	0,37	1,4	< BG
Zrenjanin, Br. 22	29.09.2005	17,5	< BG	104	1,8	7,6	8,07	11,9	7,4	247	0,07	0,217	1,11	0,7	0,2
	16.03.2006	17	< BG	104	2	8	8,16	11,8	7,6	252	0,07	0,211	1,06	0,49	4,9
Zrenjanin, Br. 37	29.09.2005	-	-	-	-	-	-	-	9,5	245	0,14	0,171	1,08	-	-
Zrenjanin, Br.15	29.09.2005	14,7	< BG	150	1,6	12	7,47	16,1	60,4	273	1,31	0,012	1,02	2,5	2,2
	16.03.2006	11,9	< BG	129	1,9	10	7,68	14,3	36,2	278	0,75	0,087	0,95	1,6	8,6
Zrenjanin, Br. 7-11	29.09.2005	17,8	< BG	129	2,3	11	7,72	14,7	23,9	277	0,45	0,092	1,14	1,6	21
	16.03.2006	7,9	< BG	129	1,9	11	7,86	14,7	23,9	291	0,29	0,083	1,1	1,5	12
Zrenjanin, Br. 1	18.10.2006	12,7	< BG	92,1	0,4	4,8	7,06	9,3	140	23,6	3,42	0,016	0,4	2,9	2,9
Zrenjanin, Br. 4	18.10.2006	13,4	< BG	55,4	0,4	2,8	7,9	4,26	39,6	31,4	0,12	0,029	0,05	9,1	0,8
Zrenjanin, Br. 5	18.10.2006	13,2	< BG	129	1,1	8,4	6,99	14	168	70,5	9	0,004	0,06	6,7	6,6
Novi Becej, Br.1-6	15.03.2006	15,8	< BG	101	1,6	8,1	7,87	11,5	13,3	237	0,17	0,195	0,76	0,53	8
	29.09.2005	-	-	-	-	7,4	-	-	13,5	227	0,24	0,21	0,89	-	1,8
Novi Becej, Br .8	29.09.2005	16,2	< BG	101	1,6	7,1	7,9	11,2	13,1	215	0,16	0,197	0,76	0,52	1,4
Novi Becej, Br .2-Kumane	15.03.2006	15,1	< BG	104	2,5	9,6	8,05	12	9,1	258	0,26	0,168	1,35	0,49	10
	29.09.2005	16,3	< BG	102	2,5	7,8	7,95	11,6	8,9	233	0,16	0,18	1,32	0,47	3,8
Novi Becej, Br .2-Novo Milosovo	29.09.2005	18	< BG	80	-	5,5	-	8,91	7,7	180	-	0,061	0,86	-	0,05
Novi Becej, Br .2-Bocar	29.09.2005	18	< BG	120	1,9	5,6	8,08	13,5	5,1	307	0,06	0,067	2,07	0,46	0,7
Becej, Br. 0/1	29.09.2005	17,4	< BG	80	0,1	1,9	7,62	21,3	36,7	96	0,42	0,032	0,11	2,4	1,4
Becej, WW Rohwasser	16.03.2006	16,7	< BG	79,1	<BG	2	7,53	9,09	47,5	71,9	0,45	-	-	2,3	3,8
	18.10.2006	17,3	< BG	79,6	-	-	7,55	9,07	48,8	72,5	0,64	-	-	2,2	3,9
Becej, Br.III/6	29.09.2005	18,2	< BG	78,6	<BG	1,9	7,51	8,96	47,4	67,9	<BG	0,006	0,1	2,4	1,6
Obrovac Br.3	29.09.2005	21,8	< BG	80,2	0,2	1,9	8,17	8,25	6,8	172	0,06	0,071	0,41	1,6	1

Rot: 1te Priorität orange: 2te Priorität gelb: 3te Priorität

### Becej und Obrovac

Die in Becej und Obrovac, d. h. westlich der Theiß angetroffenen Grundwässer enthalten zwar ebenfalls relativ hohe Mengen an Natriumhydrogencarbonat und sind anaerob (erhöhte Konzentrationen an reduzierten Verbindungen wie z. B. Ammonium und Methan). Sie unterscheiden sich jedoch von den Grundwässern östlich der Theiß deshalb deutlich, da lediglich geringe Mengen an Huminstoffen und Bor vorliegen. Die Arsengehalte sind auf einem vergleichsweise niedrigen Niveau, überschreiten jedoch den EU-Trinkwasserstandard.

#### *2.2.2 Mikroverunreinigungen und Radioaktivität*

Neben der chemisch-physikalischen Beschaffenheit wurden auch die Gehalte an Schwermetallen, anthropogenen Mikroverunreinigungen und an Radioaktivität untersucht. Die Parameterliste der organischen Substanzen umfasste dabei insbesondere in der Umwelt persistente Substanzen wie leichtflüchtige halogenierte Kohlenwasserstoffe, Pestizidwirkstoffe, Komplexbildner, den Kraftstoffbestandteil MTBE sowie die Summenparameter AOX und AOS (adsorbierbare Halogen bzw. Schwefelverbindungen).

Wie die entsprechenden Analysenberichte in den Anlagen zu den TZW-Berichten 1 bis 5 zeigen, sind in keinem der Grundwässer aus dem Untersuchungsgebiet **relevante Mengen an Schwermetallen** (inklusive Uran) enthalten.

Mit Ausnahmen von Spuren an MTBE (Kraftstoffbestandteil) im Wasser aus den beiden Messstellen Brunnen 1 - 6 (Mischwasser) und Brunnen 2, Novo Milosevo (Kommune Novi Becej) waren **sämtliche Grundwässer auch frei von in der Umwelt persistenten organischen Mikroverunreinigungen**. Die in einigen Brunnenwässern ermittelten geringen Gehalte an Trihalogenmethanen (THM) sind darauf zurückzuführen, dass diese Wässer unmittelbar am Brunnenkopf durch Zugabe von Natriumhypochlorit desinfiziert werden (THM sind Chlorungsnebenprodukte). Leicht erhöhte Konzentrationen an adsorbierbaren organischen Schwefelverbindungen (AOS) sind im vorliegenden Fall vermutlich auf natürliche organische Substanzen zurückzuführen.

Die Radioaktivitätsmessungen ergaben in den drei im September 2005 untersuchten Grundwässern Kikinda Br. Mokrin, Zrenjanin Br.22 und Becej Br. B0/1 **unauffällig niedrige Werte** (< 0,03 Bq/L für die Gesamt-Alpha sowie < 0,3 Bq/L für die Gesamt-Beta-Aktivität).

### 2.2.3 Arsenspeziation

Zur Beurteilung der Toxizität des derzeit verteilten Trinkwassers (Grundwasser ohne Aufbereitung) sowie zur Festlegung geeigneter Aufbereitungsmaßnahmen muss die Bindungsform von Arsen bekannt sein.

Nach Messungen eines serbischen Labors liegt Arsen in einer organischen Bindungsform in den Grundwässern der Vojvodina vor. Unter Berufung darauf vertreten einige lokale Fachleute die Meinung, dass die hohen Arsenkonzentrationen keine Gesundheitsgefährdung der Verbraucher darstellen. Organische Arsenspezies kommen jedoch hauptsächlich in Oberflächenwässern vor, da sie durch aerobe Stoffwechselforgänge gebildet werden. Lediglich in seltenen Fällen, bei denen eine Kontamination mit arsenmethylhaltigen PSM-Wirkstoffen erfolgte, wurden bislang organische Arsenspezies auch in Grundwässern gefunden.

Zur Klärung des Sachverhalts wurden in den Jahren 2005 bis 2008 zu vier verschiedenen Zeitpunkten Arsenspeziationen mittels IC-ICP/MS-Analytik d.h. durch ionenchromatographische Trennung und nachfolgender Quantifizierung der Arsenspezies durch Massenspektrometrie mit induktiv gekoppelter Plasmaanregung durchgeführt. Untersucht wurden zehn zur Trinkwasserversorgung in der Region Vojvodina genutzte Grundwässer sowie das am Standort Padej erschlossene Uferfiltrat der Theiß. Ergänzend wurden am Uferfiltrat sowie an einem Grundwasser (Novi Becej) verfahrenstechnische Analysen zur Arsenspeziation vor Ort durchgeführt. Die Untersuchungen sind im TZW-Teilbericht 6 „Arsenspeziation“ vom November 2008 (Bericht 8, nach Liste der Detailberichte) beschrieben und ergaben als wichtigste Ergebnisse:

1. Arsen ist in allen Grundwässern überwiegend als **arsenige Säure** (Arsenat(III),  $\text{H}_3\text{AsO}_3$ ) enthalten. Daneben sind geringe Mengen an Oxothioarsenaten nachweisbar.
2. Der Vergleich der Summe an den detektierten Arsenspezies mit dem unabhängig davon ermittelten Arsengesamtgehalt zeigt, dass bei den Arsenspeziationen sämtliche in den Grundwässern vorhandenen Arsenverbindungen erfasst wurden. Organische Arsenspezies spielen demnach keine Rolle.
3. Selbst durch umfangreiche Vorkehrungen, die einen Sauerstoffzutritt bei Probenahme- und transport verhindern, kommt es nach der Probenahme zu

einer relativ schnellen Arsenat(III)-Oxidation. Möglicherweise sind hierfür organische Peroxide verantwortlich.

Abbildung 6 zeigt beispielhaft das IC-ICP/MS-Chromatogramm einer Probe aus dem Brunnen 8 in Novi Becej vom 11.04.2007, die am 13.04.2007 analysiert wurde. Bei längerer Standzeit der Proben nimmt die Konzentration an Arsenat(III) ab und die Arsenat(V)-Konzentration zu.

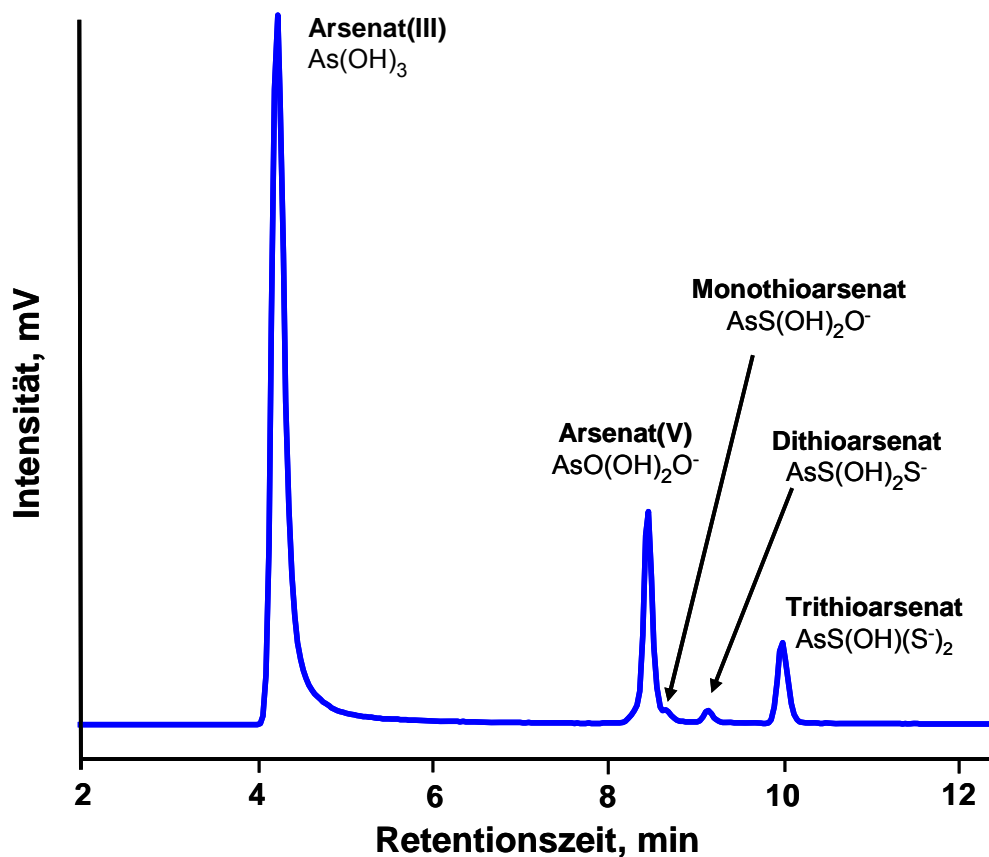


Abbildung 6: Ergebnisse der IC-ICP/MS-Arsenspezifikation Grundwasser Brunnen 8, Novi Becej

#### 2.2.4 Spezifikation der natürlichen organischen Substanzen

Zur näheren Charakterisierung der natürlichen organischen Wasserinhaltsstoffe (natural organic matter = NOM) wurden insgesamt zehn Grundwässer mittels LC-TOCD und LC-UVD (Liquidchromatography – Total Organic-Carbon/UV254 - Detection) analysiert. Die Ergebnisse sind in tabellarischer Zusammenstellung als Anlage 3 beigefügt. Abbildung 7 zeigt eine Graphik mit den LC-OCD Messsignalen von vier ausgewählten Grundwässern.

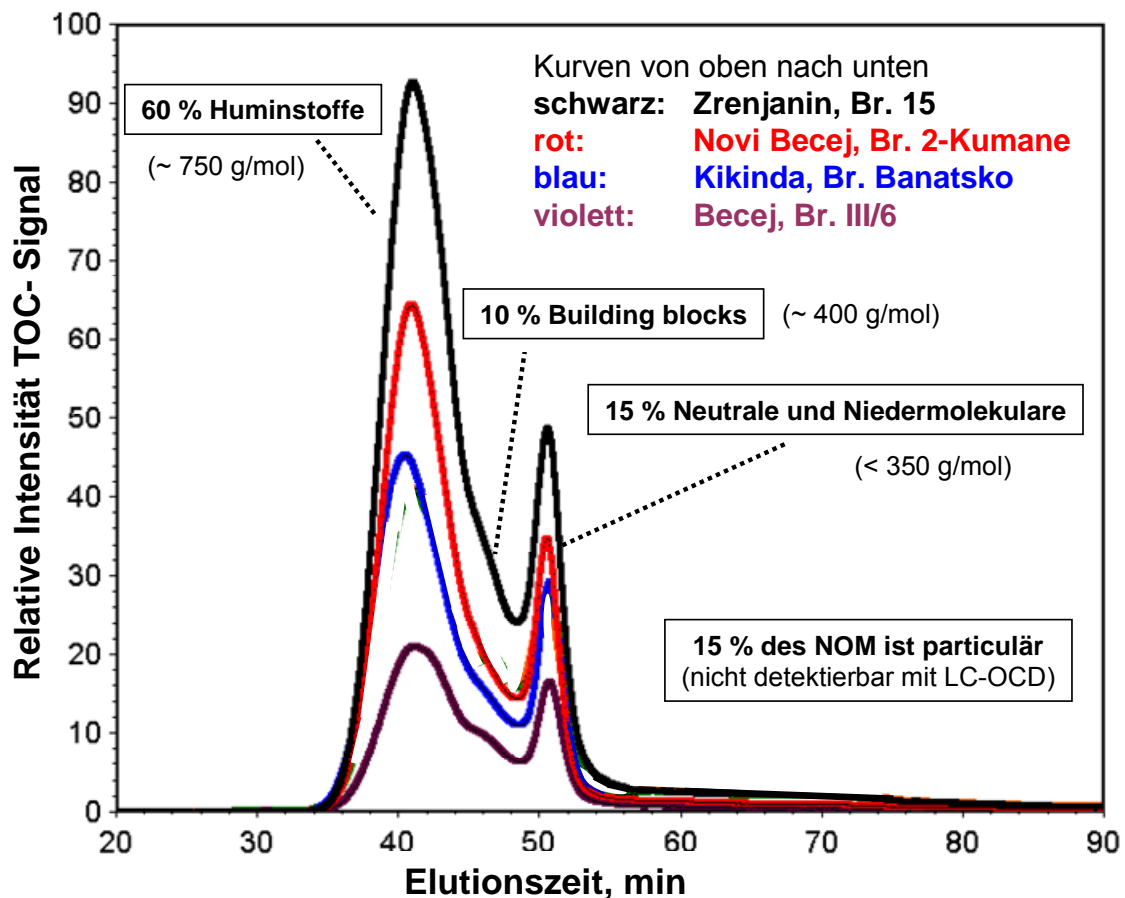


Abbildung 7: LC-OCD-Charakterisierung der natürlichen organischen Inhaltsstoffe

Die Grundwässer unterscheiden sich danach deutlich hinsichtlich der Absolutgehalte an NOM (Becej 1,4 mg/L, Zrenjanin ca. 9 mg/L), haben jedoch ähnliche prozentuale Gehalte an den einzelnen NOM-Komponenten. Biologisch abbaubare Verbindungen, wie beispielsweise Polysaccharide oder niedermolekulare Säuren fehlen jeweils völlig. Den Hauptanteil am NOM von etwa 60 % stellen Huminstoffe, die eine relativ niedrige Molmasse von 680 bis 820 g/mol haben. Bei den Proben aus dem Gebiet östlich der Theiß (Kikinda, Novi Becej und Zrenjanin) fällt bei diesen Huminstoffen zudem ein hoher Anteil an aromatischen Gruppen (SAK/DOC= 4 - 6 L/(mg\*m)) sowie an partikulären organischen Stoffen (10 - 20 %) auf.

### 2.2.5 Trinkwässer

Das Reinwasser aus dem Wasserwerk Becej sowie Leitungswasserproben aus den Hotels Marvik (Kikinda), Vojvodina (Zrenjanin) und Bela Lada (Becej) wurden umfassend, d.h. entsprechend dem Parameterumfang der deutschen Trinkwasserverordnung zuzüglich weiterer Messgrößen untersucht. Weiterhin erfolgten Messungen auf ausgewählte Parameter am Wasser einer öffentlichen Zapfstelle in Ki-

kinda, das mittels Umkehrosiose behandelt wird. Sämtliche Ergebnisse sind in den Anlagen der TZW-Berichte 1, 2 und 4 enthalten. Die Tabelle 5 sowie die Tabelle 6 zeigen ausgewählte Messdaten.

Das Trinkwasser in **Becej** hat danach eine einwandfreie Beschaffenheit. Es ist farb- und geruchlos, gering sauerstoffhaltig und mittelhart. Die Arsenkonzentration liegt unter dem EU-Trinkwassergrenzwert von 10 µg/L. Geogene Störstoffe wie z. B. Eisen, Mangan und Ammonium sind nicht in relevanten Konzentrationen enthalten. Von den serbischen Überwachungsbehörden wurden mehrmals erhöhte Ammoniumgehalte des Trinkwassers beanstandet. Dies ist vermutlich darauf zurückzuführen, dass irrtümlich Monochloramin, das bei der Chlorung des ammoniumhaltigen Reinwassers entsteht, als Ammonium erfasst wurde.

Aus der Gruppe der anthropogenen Mikroverunreinigungen sind lediglich geringe Mengen an Trihalogenmethanen (Chlorungsnebenprodukte) vorhanden. Dabei liegt die maximale THM-Summenkonzentration mit 27 µg/L noch deutlich unter dem serbischen Grenzwert von 100 µg/L.

Die Beschaffenheit des Trinkwassers in **Kikinda und Zrenjanin** entspricht erwartungsgemäß weitgehend der zugehörigen Grundwasserbeschaffenheit (keine Aufbereitung). Die beiden Trinkwässer sind deutlich mineralisiert (elektr. Leitfähigkeit bei 25°C: 90 - 130 mS/m), jedoch sehr weich und neutralsalzarm. Sie enthalten sehr hohe Mengen an gelösten organischen Wasserinhaltsstoffen, was unter anderem aus der deutlichen Färbung von bis zu 2,5 m<sup>-1</sup> bzw. dem TOC-Wert von 10 mg/L hervorgeht. Die serbischen bzw. auch die entsprechenden EU-Trinkwasservorgaben für die Färbung und den Natriumgehalt werden nicht eingehalten. Beide Wässer enthalten weiterhin leicht erhöhte Konzentrationen an Bor im Bereich des EU-Trinkwassergrenzwertes von 1 mg/L. Der serbische Grenzwert von 0,3 mg/L wird damit deutlich überschritten. Hinzuweisen ist auch auf erhöhte Werte für die elektrische Leitfähigkeit, die im Fall des Trinkwassers Zrenjanin den serbischen Grenzwert überschreitet, sowie auf einen zeitweise auffälligen Geruch des Leitungswassers (Schwefelwasserstoff).



Tabelle 5: Ausgewählte chemisch-physikalische Trinkwasserergebnisse

	Datum	Temp.	Nitrat	El. Leitf. 25°C	Farbe	TOC	pH	K <sub>S</sub> 4,3	Calcium	Natrium	Eisen	Arsen	Bor	NH <sub>4</sub> <sup>+</sup>	Methan
Probenahmestelle		°C	mg/L	mS/m	[m-1]	mg/L	-	mmol/L	mg/L	mg/L	mg/L	mg/L	mg/L	mg/L	mg/L
Becej, WW Reinwasser	29.09.2005	17,5	7,8	78,5	-	1,9	7,76	8,82	46,3	78,4	-	0,009	0,11	<BG	< BG
	16.03.2006	16,9	7,9	78,3	<BG	2	7,71	8,8	45,8	75,9	0,01	0,008	0,1	<BG	< BG
Becej, Hotel Bela Lada	16.03.2006	9,4	8	78,2	<BG	2,1	7,78	8,83	45,4	75,1	0,02	0,008	0,09	< BG	< BG
	29.09.2005	18	7,8	78,4	0,2	2,1	7,74	8,83	45,8	76,5	< BG	0,008	0,11	< BG	-
Kikinda, Hotel Marvic	29.09.2005	-	< BG	-	-	5,4	-	-	5,4	214	0,08	0,017	0,84	2,7	0,2
	15.03.2006	-	3,1	91,1	2	5,5	8,17	10,3	5,2	227	0,07	0,017	0,89	2,4	3,2
Kikinda, UO Anlage	29.09.2005	-	-	4,7	-	-	-	-	-	13	-	0,011	1,04	-	-
Kikinda, Leitungswasser	31.01.2008	-	< BG	89,4	2	4,7	7,33	10,1	5,1	211	-	0,019	-	-	-
Zrenjanin, Hotel Vojvodina	17.03.2006	14,8	< BG	109	2,5	10	7,68	13,7	26,3	276	0,47	0,092	1,03	1,3	9,9
	29.09.2005	20	< BG	127	2,5	10	7,6	14,1	31	272	0,5	0,091	1,06	1,5	14

Tabelle 6: Desinfektionsnebenprodukten in den Trinkwässern

Probenahmestelle	Datum	Trihalogenmethane (THM)				Nitrosamine		Dichlorphenole		Trichlorphenole
		Trichlormethan	Bromdichlormethan	Dibromchlormeth	Tribrommethan	NDMA	NPIP	2,4 + 2,5	3,4	3,4
		µg/L	µg/L	µg/L	µg/L	ng/L	ng/L	µg/L	µg/L	µg/L
Becej, WW Reinwasser	16.03.2006	6	3,9	1,8	0,1	/	/	/	/	/
	29.09.2005	4,3	3,1	1,6	0,2	/	/	/	/	/
Becej, Hotel Bela Lada	16.03.2006	12	9,7	4,5	0,4	/	/	/	/	/
	29.09.2005	3,7	2,5	1,4	0,1	< BG	< BG	< BG	< BG	< BG
Kikinda, Hotel Marvic	15.03.2006	< BG	< BG	< BG	< BG	< BG	< BG	/	/	/
	15.03.2006*	< BG	< BG	< BG	< BG	< BG	< BG	/	/	/
	29.09.2005	< BG	< BG	< BG	< BG	/	/	/	/	/
Zrenjanin, Hotel Vojvodina	17.03.2006	6,7	0,2	< BG	< BG	< BG	< BG	/	/	/
	17.03.2006*	6,1	0,2	< BG	< BG	< BG	< BG	/	/	/
	29.09.2005	10	0,6	< BG	< BG	1,6	1,9	0,2	0,3	0,1

Im Trinkwasser Kikinda wird der serbische Trinkwassergrenzwert für Arsen von 50 µg/L mit einem Wert von 17 µg/L eingehalten und der EU-Grenzwert von 10 µg/L nur leicht überschritten. Dagegen liegt im **Trinkwasser Zrenjanin eine deutliche Grenzwertüberschreitung vor (90 µg As/L)** vor. Auch die Ammonium- und Methangehalte beider Trinkwässer sind stark erhöht.

Die Konzentrationen an Trihalogenmethanen sind in beiden Trinkwässern, in Anbetracht der hohen TOC-Werte, erstaunlich niedrig. Dies deutet auf eine schnelle Zehrung des zugesetzten Chlors durch Reaktion mit Ammonium hin (Chloraminbildung). Hinzuweisen ist auf das Vorhandensein weiterer Desinfektionsnebenprodukte wie chlorierten Phenolen und Nitrosaminen im Spurenbereich.

Bemerkenswert ist das Ergebnis der Untersuchung des Wassers aus einer öffentlichen Zapfstelle in Kikinda, das mittels Umkehrosmose behandelt wurde (in Tabelle 5 blau unterlegt). Wie der Wert für die elektrische Leitfähigkeit zeigt, gelang zwar erwartungsgemäß eine weitestgehende Entsalzung, allerdings wurden Arsen und Bor nicht bzw. lediglich mit geringem Wirkungsgrad entfernt. Offensichtlich sind die beiden genannten Elemente in Form von relativ kleinen und unpolaren Sauerstoffkomplexen im Wasser gelöst ( $B(OH)_3$ ,  $As(OH)_3$ ).

Das Trinkwasser in **Novi Becej** wurde nicht untersucht. Nach den entsprechenden Grundwasserbefunden bzw. der fehlenden Wasseraufbereitung ist davon auszugehen, dass das Trinkwasser in Novi Becej einen ähnlichen Chemismus wie das in Zrenjanin, jedoch deutlich höhere **Arsenkonzentrationen von bis zu 210 µg/L** aufweist.

### **2.3 Grundwasseraufbereitung in der Vojvodina**

Nach den in Kapitel 2.2.1 erläuterten Analyseergebnissen sind bei einer Konzeption von Anlagen zur Grundwasseraufbereitung im Betrachtungsgebiet insbesondere folgende Problemstoffe bzw. Parameter zu berücksichtigen:

- **Arsen** (toxisch)
- **Huminstoffe** (Farbe, toxische Chlorungsnebenprodukte)
- **Ammonium** (Chlorzehrung, Bildung von toxischem Nitrit)
- **Methan** (Biomassebildung, Aufkeimung)
- **Bor/elektr. Leitfähigkeit/Natrium** (Grenzwertüberschreitung)

Im Detail unterscheiden sich die Grundwässer der Vojvodina regional jedoch deutlich. Sie sind in drei Gruppen von Wässern einzuteilen, deren Aufbereitung in den drei Folgeabschnitten erläutert wird:

1. In den Grundwässern aus **Becej** sind die Gehalte an Huminstoffen sowie auch an Arsen und Bor gering. Die Aufbereitung ist deshalb relativ einfach und kann mittels Belüftung, Quarzsandfiltration und Chlorung erfolgen.
2. Am Beispiel **Subotica** wird die Aufbereitung eines ähnlich unproblematischen Grundwassers wie in Becej (wenig organische Inhaltsstoffe und wenig Bor, geringe Alkalinität) erläutert, das allerdings erhöhte Mengen an Arsen enthält. Die Aufbereitungstechnik besteht aus Chlorung (Oxidation), Filtration und Flockungsfiltration.
3. Am problematischsten ist die Aufbereitung der huminstoffreichen, alkalischen Grundwässer in **Kikinda, Zrenjanin und Novi Becej** einzuschätzen. Für derartige Wässer existiert noch kein Aufbereitungsverfahren.

### *2.3.1 Becej: Arsen- und huminstoffarmes Grundwassers*

Das in Becej geförderte Grundwasser ist, wie bereits erwähnt, nahezu sauerstofffrei und enthält erhöhte Mengen an den reduzierten Verbindungen Ammonium, Eisen, Mangan und Methan. Weitere Problemstoffe wie z.B. Arsen und Huminstoffe oder anthropogene Verunreinigungen (z. B. Pflanzenschutzmittel) spielen in Becej keine Rolle. Es wird im Wasserwerk des Kommunalunternehmens „Vodokanal Becej“ mit folgender Technik erfolgreich aufbereitet:

- 2 Riesler (Höhe 4 m; Durchmesser: 3 m)
- 4 Sandfilter-Becken (L X B: jeweils 4,4 m x 9,3 m)
- Chlorung: Die Chlorgas-Zugabe vor dem Einlauf in den Reinwasserbehälter (2.500 m<sup>3</sup>) ist so ausgelegt, dass im Auslauf nach einer Verweilzeit von 2 bis 6 Stunden eine Chlorkonzentration von 0,3 mg/L resultiert

Eine ausführliche Beschreibung der Aufbereitungstechnik sowie die durchgeführten Analysen zu deren Wirksamkeit sind dem TZW-Teilbericht 2 (Bericht 2 nach Liste der Detailberichte) zu entnehmen. Wesentliche Analyseergebnisse zeigt Tabelle 7. Danach findet in der Belüftungsstufe ein ausreichender Gasaustausch statt, wobei Methan nahezu vollständig entfernt, der CO<sub>2</sub>-Gehalt deutlich verringert und das Wasser mit ca. 10 mg/L Sauerstoff angereichert wird. Die nachgeschalte-

ten Sandfilter erzeugen Trinkwasser, das sowohl die serbischen als auch die auf europäischer Ebene geltenden Grenzwerte einhält.

**Tabelle 7: Aufbereitungsleistung des Wasserwerks in Becej am 18.10.2006**

		Roh- wasser	Nach Be- lüftung	Ablauf Fi 1	Ablauf Fi 2	Rein- wasser
O <sub>2</sub>	mg/L	< 0,5	9,6	2,3	3,1	3,1
CO <sub>2</sub>	mmol/L	0,57	0,15	-	-	0,33
pH	-	7,55	-	-	-	7,78
Härte	°dH	17	-	-	-	17
Calcitabscheidekap.	mg/L	29	58	-	-	40
NH <sub>4</sub> <sup>+</sup>	mg/L	2,2	2,1	< 0,01	0,05	0,08
CH <sub>4</sub>	mg/L	3,9	0,02	< 0,01	0,01	< 0,01
Fe <sub>tot</sub>	mg/L	0,64	-	0,02	0,05	0,03
Mn <sub>tot</sub>	mg/L	0,042	-	< 0,005	< 0,005	< 0,005

Zur Optimierung des Aufbereitungsprozesses wurden im oben genannten Projektbericht verschiedene Maßnahmen vorgeschlagen. Wesentlich für die Trinkwasserversorgung in Becej sind eine Instandsetzung des Versorgungsnetzes (u. a. zur Minimierung der sehr hohen Wasserverluste), eine bauliche bzw. technische Modernisierung des Wasserwerkes sowie der Bau zusätzlicher Brunnen.

### 2.3.2 Subotica: Arsenhaltiges und huminstoffarmes Grundwasser

Zur Versorgung der ca. 100.000 Einwohner von Subotica werden jährlich aus 30 Brunnen (Tiefe: 120 – 180 m, Förderraten: 10 – 15 L/s) ca. 5 Mio. m<sup>3</sup> arsenhaltiges Grundwasser entnommen und aufbereitet. Um die dortigen Erfahrungen mit berücksichtigen zu können, wurden die Gewinnungs- und Aufbereitungsanlagen am 15.03.2008 besichtigt. Dabei fanden vor Ort Messungen statt und es wurden Proben für eine chemisch-physikalische Vollanalyse im TZW-Labor entnommen.

Nach den Befunden in den Anlagen 4a, b weist das in Subotica genutzte **Rohmischwasser** einen von den Grundwässern in Kikinda, Novi Becej und Zrenjanin deutlich abweichenden Chemismus auf. Es ist zwar ebenfalls anaerob und enthält deshalb erhöhte Mengen an den reduzierten Verbindungen Ammonium, Eisen und Mangan sowie auch an Arsen. Allerdings sind weder erhöhte Mengen an natürlichen organischen Wasserinhaltsstoffen noch an Natriumhydrogencarbonat oder Bor vorhanden. Es entspricht somit weitestgehend dem in Becej angetroffenen Grundwasser. Im Vergleich zum Rohwasser des Werkes in Becej ist die Ammoni-

umkonzentration des Rohwassers Subotica jedoch deutlich niedriger und es sind vermutlich auch keine erhöhten Mengen an Methan im Wasser gelöst.

Die Arsenkonzentration im Grundwasser Subotica beträgt ca. 100 µg/L, wobei Arsen, ebenso wie Eisen und Mangan, vollständig in gelöster Form (nicht über Membranfilter 0,45 µm abfiltrierbar) vorliegt. Das Wasser ist darüber hinaus mittelhart, neutralsalzarm und weist eine leicht calcitabscheidende Tendenz auf.

Die **Aufbereitungs**anlage hat eine Nennleistung von 360 L/sec und besteht aus zwei baugleichen Filterstufen. Vor der ersten Stufe wird eine Chlorgaslösung (ca. 0,6 mg Chlor/L) und vor der zweiten Filterstufe eine Eisensulfatlösung (ca. 1,5 mg/L Fe) zugesetzt. Ob es sich um eine Eisen(II) oder Eisen(III)-Salzlösung handelt war dem Betriebspersonal nicht bekannt. Jede Filterstufe besteht aus vier Gruppen mit jeweils vier Filtern, die einen Durchmesser von 2,5 m aufweisen und mit einer 1,2 m hohen wirksamen Schicht eines relativ feinkörnigen silikatischen Materials befüllt sind. Bei Volllast errechnet sich eine relativ hohe Filtergeschwindigkeit von ca. 17 m/h. Die Filter der ersten Stufe werden nach 48 Stunden Laufzeit, die der zweiten Stufe alle zwölf Stunden gespült. Eine abschließende Chlorung erfolgt nicht, da das Filtrat der Anlage noch ausreichende Gehalte an dem im Zulauf zudosierten Desinfektionsmittel aufweist.

Ausgewählte Messergebnisse aus den einzelnen Stufen des Aufbereitungsprozesses gehen aus Tabelle 8 hervor. Danach wird Arsen in der ersten Stufe zu etwa 50 % und in der zweiten Stufe zu insgesamt rd. 94 % auf einen Restgehalt von 0,006 mg/L entfernt. Weiterhin gelingt eine praktisch vollständige Eisen- und Manganelimination.

**Tabelle 8: Aufbereitungswirksamkeit im Wasserwerk Subotica**

		Rohwasser	Zulauf 2. Filterstufe	Reinwasser
Sauerstoff	mg/L	< 0,2	-	0,3
pH-Wert	-	7,5	-	7,3
Eisen	mg/L	0,7	1,5	0,01
Mangan	mg/L	0,052	0,006	< 0,005
Arsen	mg/L	0,094	0,041	0,006

Bemerkenswert ist, dass die Zugabe relativ geringer Mengen an Chlor (0,6 mg/L nach Werksangabe) trotz erhöhter Ammoniumgehalte (rd. 0,9 mg/L) für eine erfolgreiche Aufbereitung ausreicht. Die THM-Gehalte (Chlorungsnebenprodukte) des Reinwassers sind vergleichsweise niedrig und betragen 24 µg/L (vgl. Anlage 4c). Dies deutet darauf hin, dass das zugesetzte Chlor zu Chloramin umgesetzt wird, was jedoch die Arsenat(III)-Oxidation nicht beeinträchtigt.

Zusammenfassend ist festzustellen, dass in Subotica eine weitestgehende Arsenelimination gelingt. Allerdings ist die Oxidation mittels Chlor in Deutschland nicht mehr zulässig. Zur Behandlung der Rohwässer in Kikinda, Novi Becej und Zrenjanin ist die eingesetzte Verfahrenstechnik aufgrund der hohen Gehalte an färbenden Huminstoffen, Ammonium und Methan nicht geeignet.

### *2.3.3 Kikinda, Novi Becej und Zrenjanin: Alkalische, huminstoffreiche und z. T. stark arsenhaltige Grundwässer*

#### Pilotierungen in Zrenjanin in den Jahren 1978 bis 2007

In Anlage 5 sind die Ergebnisse einer Auswertung der verfügbaren Resultate von Versuchen, die 1978 und 1981 durch die Firmen Overhof, Österreich und Degremont, Frankreich erfolgten, sowie die Kenndaten eines darauf basierenden Design-Vorschlags zusammengestellt. Der angedachte Verfahrensprozess ist sehr komplex sowie chemikalien- und abwasserintensiv. Unter anderem aufgrund der hohen Kosten wurde von einer Realisierung abgesehen.

In den Jahren 2002 bis 2004 haben neun weitere Firmen bzw. Institutionen Versuche zur Aufbereitung des Grundwassers in Zrenjanin durchgeführt [5]. Eine Auswertung der verfügbaren Ergebnisberichte dieser Untersuchungen ist im TZW-Bericht 1 enthalten (vgl. Bericht nach Liste der Detailberichte).

Eine Kommission zur Entwicklung geeigneter Wasseraufbereitungsmaßnahmen, die im Jahr 2002 nach Verbot des Konsums von Leitungswasser in Zrenjanin gegründet worden war, zog folgende Schlüsse aus diesen Pilotierungen:

- A) Positiv werden lediglich Konzepte unter Einsatz der Membrantechnik beurteilt. Vor einer abschließenden Beurteilung müssten die Firmen, die entsprechende Pilotierungen durchgeführt haben (Zenon, Linde und Hydrofil-KFT-Purator), jedoch noch detaillierte Angaben zu den Kosten machen.

- B) Ein Vorschlag der technischen Fakultät Universität Novi Sad zur Erschließung alternativer Quellen (u. a. Uferfiltratgewinnung an der Theiß) soll weiter verfolgt werden.
- C) Weiterhin wurde beschlossen nochmals eine Pilotierung zur Grundwasseraufbereitung durchzuführen, bei der sämtliche Erfahrungen der vorangegangenen elf Pilotprojekte Berücksichtigung finden sollen.

#### *Zu B) Uferfiltraterkundung bei Zrenjanin*

Im September 2006 wurden unter fachlicher Betreuung der Firma GEOTEC, Belgrad in der Nähe der Ortschaft Aradac fünf Grundwassermessstellen zur Erkundung einer Uferfiltratgewinnung an der Theiß errichtet. TZW-Empfehlungen zur Vorgehensweise dabei blieben unberücksichtigt. Die vom Wasserversorger Zrenjanin zur Verfügung gestellten Unterlagen bzw. Resultate zeigen, dass die Grundwassermessstellen zu weit entfernt von der Theiß niedergebracht (150 – 1.500 m) und relativ tief abgeteuft (35 - 45 m) wurden [6]. Für die Bearbeitung der vorliegenden Aufgabenstellung sind sie somit nur bedingt geeignet. Diese Einschätzung wird durch die Befunde der Wasseranalysen bestätigt, die am 18.10.2006 an drei der neuen Messstellen erfolgten (vgl. TZW-Teilbericht 4, Bericht Nr. 6 in Anlage 1).

#### *Zu C) 12. Pilotierung zur Grundwasseraufbereitung*

Die Pilotanlage wurde Mitte 2006 im Wasserwerk Zrenjanin errichtet und über mehrere Monate mit einem Rohwasservolumenstrom von 2 m<sup>3</sup>/h betrieben:

Eine detaillierte Beschreibung der Verfahrenstechnik der Anlage sowie deren Aufbereitungswirksamkeit enthält der TZW-Teilbericht 5 (Bericht Nr. 7 nach Liste der Detailberichte). Wesentliche Ergebnisse daraus sind:

- Der Aufbereitungsprozess der Pilotanlage entspricht weitestgehend demjenigen der Degremont-Pilotierung 1981. Dementsprechend wurden auch sehr ähnliche Resultate erzielt.
- In der neunstufigen Anlage konnten Arsen weitestgehend und Huminstoffe ausreichend (ca. 70 %-ige Elimination) entfernt werden. Ammonium wird bis auf Restkonzentrationen im Bereich des serbischen Trinkwassergrenzwertes eliminiert.

- Das Reinwasser erfüllt hinsichtlich der elektrischen Leitfähigkeit sowie der Gehalte an Eisen, Natrium, Bor und Sauerstoff nicht die serbischen bzw. internationalen Standards.
- Inwieweit das Produktwasser eine erhöhte Korrosions- und Aufkeimungsneigung bei der Verteilung hat, wurde nicht untersucht. Auch die Bildung unerwünschter Oxidations- bzw. Desinfektionsnebenprodukte blieb unberücksichtigt.
- Der Pilotbetrieb hat zudem bestätigt, dass die eingesetzte, sehr komplexe Verfahrenstechnik nicht nur einen hohen Wartungs- und Überwachungsaufwand sondern auch einen sehr hohen Chemikalienverbrauch verursacht.

Überzeugende Konzepte für eine großtechnische Anlage zur Grundwasseraufbereitung wurden in den zahlreichen von dritter Seite durchgeführten Untersuchungen nicht ermittelt. Die angedachten Verfahrenstechniken sind komplex und überwachungsintensiv und verursachen einen sehr hohen Verbrauch an verschiedenen Chemikalien. Verschiedene wichtige Fragen bzw. Probleme blieben ungeklärt.

### Aufbereitungsversuche des TZW

#### 1) *Flockungstests*

Zu Beginn des Projekts erfolgten orientierende Aufbereitungsversuche im Labor des TZW mit Modellwässern, deren Ergebnisse im September 2005 durch vor Ort durchgeführte Becherglasversuche mit den Grundwässern aus Kikinda und Zrenjanin abgesichert wurden. Ziel dieser Untersuchungen war es, die negativen Pilotierungsergebnisse aus den Jahren 1978 und 1981 (vgl. vorangegangener Abschnitt) zu überprüfen und gegebenenfalls Möglichkeiten zur Optimierung des Flockungsprozesses als wesentlichem Aufbereitungsschritt zu testen. Abhängig von den Ergebnissen dieser Laborversuche war zu entscheiden, ob durch das TZW eine halbtechnische Pilotierung erfolgt bzw. wie diese zu konzipieren wäre.

Folgende Einflussgrößen wurden untersucht:

1. Art und Menge des Flockungsmittels
2. Säurezugabe (pH-Wertabsenkung)
3. Voroxidation mit Ozon, Wasserstoffperoxid sowie mit Kaliumpermanganat
4. Konzentration an Härtebildnern
5. Flockungshilfsmittel (Polyelektrolyt)



Sämtliche Ergebnisse dieser Untersuchungen sind im TZW-Zwischenbericht 1, enthalten (Bericht Nr. 1 nach Liste der Detailberichte). Die wichtigsten Resultate werden nachfolgend beschrieben.

Den *starken negativen Einfluss der natürlichen organischen Wasserinhaltsstoffe (Huminstoffe) auf den Flockungsprozess* verdeutlichen die Fotos in Anlage 6. In dem Modellwasser, das eine ähnliche Zusammensetzung wie das Grundwasser im Untersuchungsgebiet hatte (TOC:10 mg/L, SAK<sub>254</sub>: 40 m<sup>-1</sup>, pH: 8,2), trat selbst bei Zugabe relativ hoher Mengen von 40 mg/L Fe<sup>3+</sup> keine Flockenbildung ein. Erkennbar ist dies im zweiten Becherglas von links, dessen Wasser auch nach 20-minütiger Sedimentation (unteres Bild) noch intensiv gelb gefärbt war und keine Flocken enthielt. Durch Zugabe von Ca<sup>2+</sup> (linkes Becherglas) oder einer Erhöhung der Flockungsmittelzugabe auf 60 mg/L Fe<sup>3+</sup> (beide rechten Bechergläser) kann eine Flockung bewirkt werden.

Anlage 7 zeigt graphische Auswertungen ausgewählter Untersuchungsreihen, die vor Ort mit Grundwasser aus Kikinda sowie im TZW-Labor mit Grundwasser aus Zrenjanin durchgeführt wurden.

Aus der oberen Graphik ist zu erkennen, dass die eingesetzten Flockungsmittel (Polyaluminiumchlorid (PACl) und Eisen-III-Chlorid) hinsichtlich der Huminstoffelimination (gemessen am Parameter SAK<sub>360</sub>) ähnliche Resultate erzielen. Für eine 70- bis 80 %-ige SAK<sub>360</sub>-Elimination müssen ca. 2 mmol/L Fe bzw. Al zudosiert werden. Die tendenziell bessere Wirksamkeit von Eisen-III-Chlorid ist dabei vermutlich auf eine höhere pH-Wertabsenkung durch dieses Flockungsmittel zurückzuführen. Der ermittelte *Flockungsmittelbedarf (ca. 100 mg/L Fe bzw. 60 mg/L Al) ist um einen Faktor 10 höher als in der Trinkwasseraufbereitung üblich*. Neben den hohen Verbrauchsmittelkosten wären auch Folgeprobleme durch die damit verbundene Aufsalzung (Chlorid) und die pH-Wertabsenkung zu berücksichtigen.

Die untere Graphik in Anlage 7 zeigt eine Auswertung der Ozonungsversuche mit Mischrohwasser aus den Brunnen 7 bis 11 des Wasserwerks Zrenjanin im Labor des TZW. Daraus geht hervor, dass die *Wirksamkeit beider Flockungsmittel durch eine vorherige Behandlung mit 5 mg/L Ozon nicht wesentlich verbessert wird*. Dies wird auch durch die Ergebnisse der kleintechnischen Versuche im Wasserwerk Zrenjanin im Jahr 2006 bestätigt.

## 2) Ozonung bzw. Bildung von Ozonungsnebenprodukten

Erwartungsgemäß verursachen die stark huminstoffhaltigen Wässer eine schnelle und hohe *Ozonzehrung*. Zur Quantifizierung wurden Ozonzehrungskurven mit den zwei Grundwässern Brunnen 7 - 11, Zrenjanin und Brunnen 2 Kumane (Novi Becej) aufgenommen. Die Ergebnisse in der Graphik von Anlage 8 zeigen, dass rd. 10 mg Ozon/L dosiert werden müssen, um nach einer Reaktionszeit von 2 bis 3 Minuten noch Ozonrestmengen von ca. 0,1 mg/L zu erzielen.

Die schnelle Ozonzehrung ist eine Folge der Reaktion des Ozons mit den Huminstoffen, wobei niedermolekulare organische Säuren gebildet werden. Diese sind biologisch gut abbaubar und können somit zu einer starken Bakterienvermehrung bei der Verteilung des Wassers im Netz führen. Zur Quantifizierung dieser Zusammenhänge wurde eine Analysenmethode für organische Säuren entwickelt (Ionenausschluss-Chromatographie-HPICE). Anschließend erfolgten Messreihen zur Behandlung von Grundwasser (Brunnen 7-11, Zrenjanin) und von Flusswasser der Theiß mit den Aufbereitungsprozessen Ozon und Ozon/H<sub>2</sub>O<sub>2</sub> (Peroxonverfahren) sowohl mit als auch ohne vorherige Flockung/Filtration. Die Ergebnisse sind im TZW-Teilbericht 7 (Bericht Nr. 9 nach Liste der Detailberichte) enthalten. Wesentliche Resultate sind:

- Bei der Behandlung des Grundwassers mit Ozon bzw. Ozon/H<sub>2</sub>O<sub>2</sub> entstehen größere Mengen an verschiedenen organischen Säuren (ca. 1 mg/L).
- Durch biologische Behandlung („Testfilter“) konnten diese niedermolekularen Säuren vollständig entfernt werden.
- Erwartungsgemäß wird auch Bromat gebildet, wobei die gemessenen Konzentrationen in Anbetracht der hohen Bromidkonzentration des untersuchten Grundwassers von 0,15 mg/L unerwartet niedrig waren. Dies deutet auf eine bevorzugte Reaktion des Ozons mit den Huminstoffen hin. Insbesondere bei Verwendung des Peroxonprozesses könnte der Bromatgehalt des Trinkwassers voraussichtlich auf unter 10 µg/L begrenzt werden.

## 3) Desinfektion und Bildung von Desinfektionsnebenprodukten

Aufgrund der hydrogeologischen und hydrochemischen Randbedingungen ist zwar davon auszugehen, dass die Tiefengrundwässer eine einwandfreie hygienisch-bakteriologische Beschaffenheit aufweisen. Im Hinblick auf den Zustand der Verteilungsnetze ist jedoch eine sichere Desinfektion des abgegebenen Trinkwassers

erforderlich. Hierzu müssen im gesamten Versorgungsnetz Mindestgehalte an dem zugesetzten Desinfektionsmittel aufrechterhalten werden.

Durch die hohen Huminstoffgehalte zehren die Wässer jedoch nicht nur, wie gezeigt, hohe Mengen an Ozon sondern auch die *Chlorzehrung ist stark erhöht*. Dies geht aus den hierzu durchgeführten Analysen mit Grundwasser aus den Brunnen 7 - 11, Zrenjanin in der Tabelle in Anlage 8 hervor. Danach werden Zugabemengen von ca. 1 mg/L Cl<sub>2</sub> bereits nach weniger als 30 Minuten vollständig gezehrt. Um nach einer Verweilzeit von 24 Stunden noch signifikante Chlorkonzentrationen von 0,1 mg/L aufrechtzuerhalten, müssten ca. 10 mg/L Chlor zugesetzt werden. Dies ist aus verschiedenen Gründen in der Praxis nicht realisierbar. Unter anderem würden dabei vergleichsweise hohe Mengen an chlorierten Nebenprodukten entstehen (lt. Anlage 11 z. B. 154 µg/L Chloroform nach 24 h).

Auch Chlordioxid als alternatives Desinfektionsmittel unterliegt einer schnellen Zehrung. Nach den Messergebnissen in Anlage 8 kann es ebenfalls nicht ohne weiteres eingesetzt werden. Insbesondere wäre die Chloritbildung zu beachten.

Die wesentliche Konsequenz dieser Untersuchungen ist, dass eine Verringerung der Huminstoffgehalte im Rahmen der Aufbereitung auch zur Gewährleistung einer entsprechenden Netzdesinfektion unabdingbar ist.

Zusammenfassend ergaben die TZW-Aufbereitungsversuche mit Grundwässern aus den Kommunen Kikinda, Novi Becej und Zrenjanin folgende Ergebnisse:

- Flockungsverfahren sind aufgrund der hohen Huminstoffgehalte erschwert. Um eine Flockung zu bewirken, müssen deshalb sehr hohe Flockungsmittelmengen zudosiert werden (100 mg/L Fe<sup>3+</sup>, bzw. 60 mg/L Al<sup>3+</sup>). Die Folgen sind erhöhte Verbrauchsmittelkosten, ein erhöhter Schlammanfall sowie eine Aufsalzung des Produktwassers (Korrosion).
- Eine Ozonung verringert den Flockungsmittelbedarf nicht signifikant. Unter Umständen ist eine Ozon zur Entfärbung sinnvoll, wobei jedoch die Bildung von Bromat und biologisch abbaubarer Substanzen zu beachten wäre.
- Bei zusätzlicher Dosierung von Flockungshilfsmittel (organische Polyelektrolyte) sedimentieren zwar die gebildeten Flocken besser, der Flockungsmittelbedarf kann damit allerdings nicht verringert werden.

- Die Dosierung von Calciumionen verbessert die Flockungswirksamkeit (Neutralisation negativer Oberflächenladung). Für einen positiven Effekt sind allerdings relativ hohe Zugabemengen erforderlich.
- Erwartungsgemäß verringert eine Säurezugabe den Flockungsmittelbedarf deutlich. Im vorliegenden Fall sind jedoch sehr hohe Säurezugabemengen erforderlich (hoher Gehalt des Grundwassers an Hydrogencarbonat), was zu Folgeproblemen führt (Kosten, Aufsalzung).
- Neben Huminstoffen kann durch eine adäquate Flockung (hohe Zugabemengen) auch Arsen entfernt werden. Mit Aluminiumsalzen gelingt dabei jedoch keine Entfernung des im Grundwasser vorliegenden Arsenat(III) sondern nur von Arsenat(V). Mit Eisen(III)-Salz können dagegen rd. 80 % As(III) und über 95 % Arsenat(V) entfernt werden.
- Eine vorherige Oxidation (z. B. mit Ozon, Kaliumpermanganat) verbessert somit die Arsenelimination deutlich.
- Bor kann erwartungsgemäß selbst bei sehr hohen Flockungsmittelzugaben nicht mittels Flockung/Fällung entfernt werden.

#### *2.3.4 Beurteilung alternativer Aufbereitungskonzepte*

Zu den bislang im Rahmen von Pilotierung untersuchten Varianten der Aufbereitung der alkalischen, huminstoffreichen und z. T. stark arsenhaltigen Grundwässer bestehen prinzipiell auch alternative Konzepte. Hierbei sind drei Varianten zu unterscheiden:

- 1) Prozess unter Verwendung von arsenspezifischen Adsorbentien
- 2) Verfahrenskombination mit anaerober Membranfiltration (NF/UO)
- 3) Prozess mit optimierter Flockung (u.a. Einsatz von Kieselsäure) einschließlich pH-Wertabsenkung und Teilentsalzung mit Kationenaustauschern (H<sup>+</sup>-Form).

##### 1) Arsenspezifische Adsorbentien

Insbesondere für kleinere, dezentrale Anlagen ist eine spezifische Entfernung von Arsenat(III), mit arsenspezifischen Adsorbentien durchaus in Betracht zu ziehen. Allerdings sind in den Grundwässern mehrere weitere Problemstoffe (Methan, Huminstoffe, Bor ect.) enthalten, die dabei nicht beherrscht werden können. Vor der Einspeisung in ein öffentliches Netz wären deshalb zusätzlich umfangreiche Aufbereitungsmaßnahmen erforderlich.

Das im Grundwasser gelöste Arsenat(III) ist deutlich schlechter adsorptiv entfernbar als Arsenat(V). Somit wäre eine Oxidation von Arsenat(III) anzustreben, um die Austauschintervalle für das Adsorbens zu verlängern und damit die Kosten zu senken. Nachteilig ist auch der erhöhte pH-Wert der Grundwässer im Untersuchungsgebiet, der im Bereich von 8 liegt.

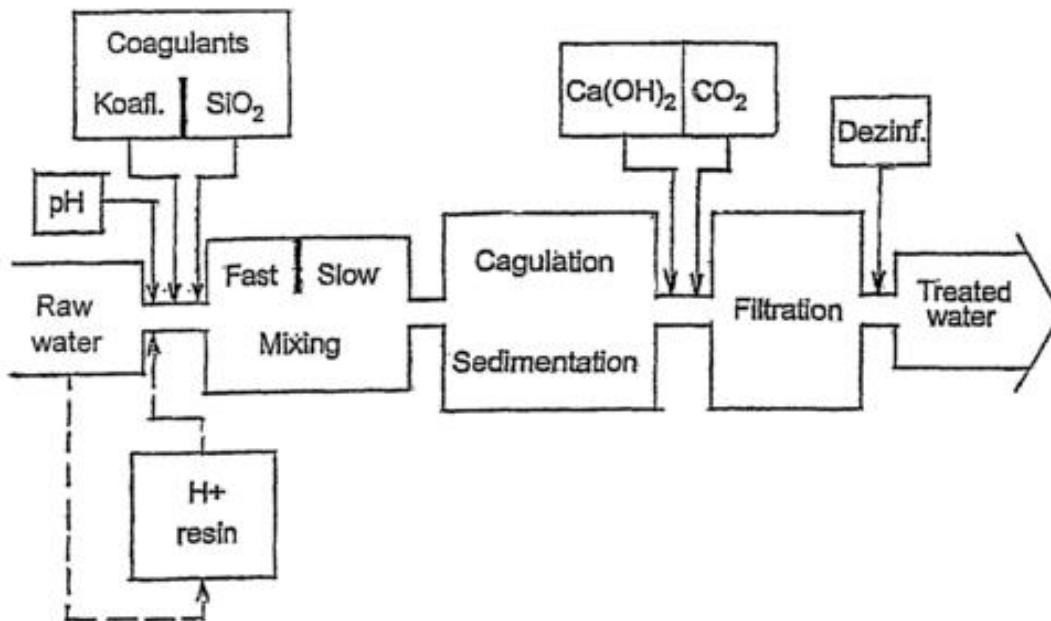
### 2) Anaerobe Nanofiltration/UO-Behandlung

Diese Technik wird in den Niederlanden erfolgreich bei der Aufbereitung huminstoffreicher Grundwässer eingesetzt. Denkbar wäre im vorliegenden Fall eine Verfahrenskombination mit nachgeschalteter Belüftungs-, Oxidations- und Flockungsfilterstufe. Dieser Prozess hätte als Vorteil gegenüber der Aufbereitung mittels Flockung/Fällung einen geringen Chemikalienbedarf sowie einen relativ einfachen Betrieb mit geringem Wartungs- und Überwachungsaufwand. Orientierende Messungen ergaben, dass dabei auch eine gewisse Borentfernung in der Membrananlage möglich wäre (vgl. TZW-Teilbericht 6). Allerdings ist der Laugenverbrauch für eine entsprechende pH-Wertanhebung sehr hoch. Vor einer großtechnischen Realisierung wären Langzeituntersuchungen zum Verhalten der Membranen bei dem hohen Kolloidindex der Grundwässer erforderlich (z. B. SDI Br. 1, Kikinda = 5,1 %/min).

### 3) Optimierte Flockung mit Teilentsalzung durch Kationenaustauscher (H<sup>+</sup>-Form)

In einem patentierten Verfahren wird vorgeschlagen, den Chemikalienverbrauch bei der Flockung durch kombinierten Einsatz von Polyaluminiumchlorid und aktivierter Kieselsäure sowie von Kationenaustauscherharzen (H<sup>+</sup>-Form) zu senken [7, 8]. Der Prozess ist in Abbildung 8 schematisch dargestellt.

Bei der Behandlung des Wassers über ein Kationenaustauscherharz in der H<sup>+</sup>-Form werden sowohl der pH-Wert gesenkt als auch Natriumionen entfernt. Um die Umweltbelastung durch das bei der Regenerierung der Kationenaustauscherharze anfallende Abwasser zu minimieren, wird eine Behandlung des Abwassers mittels Elektrodialyse vorgeschlagen.



**Abbildung 8: Prozess der optimierten Flockung mit Teilentsalzung durch H<sup>+</sup>-Kationenaustauscher**

Der Einsatz von aktivierter Kieselsäure als Flockungshilfsmittel sowie von Kationenaustauscherharzen in der H<sup>+</sup>-Form stellen interessante Möglichkeiten für eine optimierte Grundwasseraufbereitung dar. Allerdings liegen noch keine großtechnischen Erfahrungen mit diesem Prozess und auch keine Angaben zu den dabei anfallenden Kosten vor. Problematisch wäre in jedem Fall, dass keine Elimination von Bor gelingt. Inwieweit bzw. mit welchen Prozessmodifikationen Methan und Ammonium ausreichend entfernt werden könnten, wäre zu prüfen. Vermutlich müsste auch eine Oxidationsstufe integriert werden. Nach den im Abschnitt „Aufbereitungsversuche des TZW“ beschriebenen Ergebnissen gelingt mit Flockungsmitteln auf Aluminiumbasis (z. B. „Koafloc“) keine Entfernung von Arsenat(III). Vermutlich wurde die in [7] beschriebene hohe Arsenelimination bei Behandlung von Grundwasser aus Zrenjanin nach längerer Standzeit der Wasserproben in Laborversuchen ermittelt, wobei es zur Oxidation des im Grundwasser enthaltenen Arsenats(III) zu Arsenat(V) kam (vgl. entsprechende Ergebnisse im TZW-Teilbericht 6). Somit besteht vor Einsatz dieser Variante noch erheblicher Untersuchungsbedarf.

### 2.3.5 Fazit der Untersuchungen zur Grundwasseraufbereitung

Eine Trinkwassergewinnung aus dem alkalischen, ammonium-, bor-, huminstoff- und z. T. auch stark arsenhaltigen Grundwasser, wie es in Kikinda, Novi Becej und Zrenjanin angetroffen wird, erfordert einen vergleichsweise sehr hohen Aufwand.

Das Hauptproblem ist die Huminstoffentfernung, die jedoch zwingend erforderlich ist, um das Wasser sicher desinfizieren zu können.

Denkbar wäre eine mehrstufige Aufbereitung, bestehend aus Belüftung, Oxidation, Flockung, Sedimentation, Filtration und Desinfektion. Zusätzlich wäre eine Entsalzung z. B. mittels Umkehrosmose erforderlich, wobei selbst damit der serbische Grenzwert für Bor nicht bzw. nur mit einem extremen Aufwand (spezielle Membranen, Vollstrombehandlung, 20 – 30 % Abwasser) eingehalten werden könnte.

Investitionen in eine derart komplexe und relativ teure Aufbereitungstechnik, die zum Teil mit sehr geringen Durchsatzleistungen an mehreren Standorten erreicht werden müsste, sind kritisch zu prüfen. Dies insbesondere vor dem Hintergrund eines hohen Abwasserabfalls bei gleichzeitig geringer Grundwasserneubildungsrate. Die Grundwasserstände in den genutzten Aquiferen sinken zum Teil bereits heute kontinuierlich. Zu berücksichtigen sind auch die zu erwartenden hohen laufenden Kosten, die durch einen hohen Chemikalienbedarf sowie den resultierenden Wartungs- und Überwachungsaufwand für die komplexe Verfahrenstechnik verursacht werden.

Eine Alternative zur Nutzung und dezentralen Aufbereitung des Tiefengrundwassers besteht in Verbundlösungen mit einer Trinkwassergewinnung aus Uferfiltrat der Theiß. Bei der Uferfiltration handelt es sich um ein einfaches, naturnahes Verfahren, das die biologisch-adsorptiven Reinigungskräfte des Aquifers nutzt. In Deutschland liegen für diese Technik seit über 100 Jahren sehr gute Erfahrungen vor. Ob bzw. unter welchen Randbedingungen eine Uferfiltratgewinnung möglich ist, hängt unter anderem von den speziellen hydrogeologischen Randbedingungen am jeweiligen Standort ab. Im nachfolgenden Kapitel werden die Ergebnisse von Untersuchungen vorgestellt, die hierzu an einem Standort an der Theiß durchgeführt wurden.

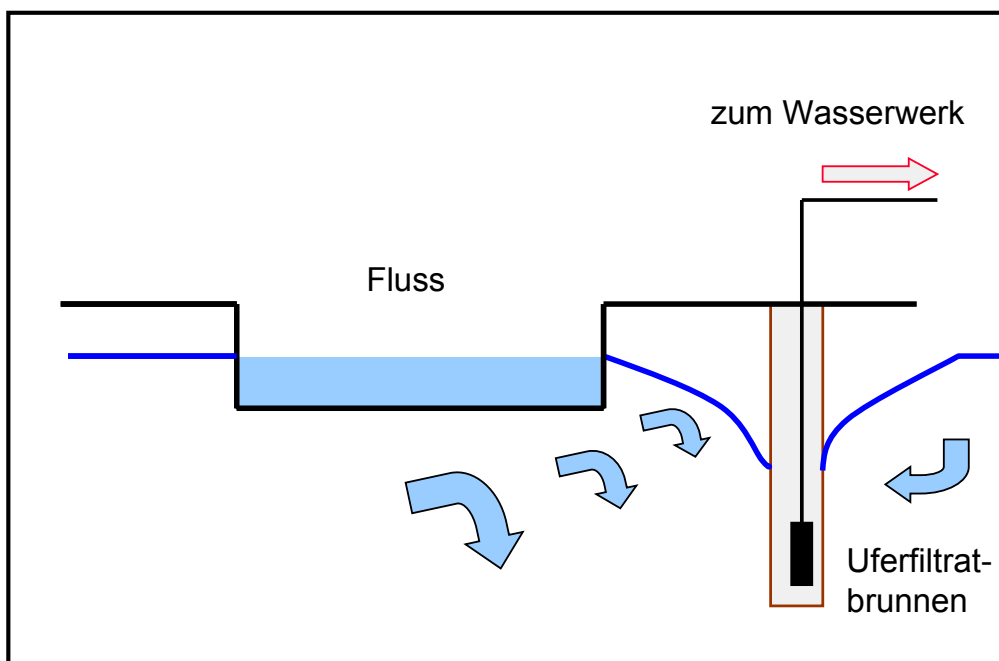
## **2.4 Uferfiltratgewinnung an der Theiß**

### *2.4.1 Allgemeine Angaben zur Uferfiltration*

Von Uferfiltration wird dann gesprochen, wenn Oberflächenwasser durch die Sohle oder das Ufer eines Gewässers in den Untergrund infiltriert und nach einer Bodenpassage in Brunnen gefasst wird. Die Infiltration des Oberflächenwassers wird durch den Potentialgradienten zwischen dem Wasserspiegel des Oberflächengewässers und des Grundwassers bestimmt. Der Potentialgradient kann künstlich,

z. B. durch Anlagen für eine künstliche Versickerung von Oberflächenwasser erhöht werden. Neben der Höhe des Potentialgradienten ist die erreichbare Infiltrationsmenge, insbesondere von den physikalischen und hydraulischen Eigenschaften der Gewässersohle und des Grundwasserleiters (Mächtigkeit und Durchlässigkeit der Sedimente) sowie der Gestaltung der Brunnenfassungen abhängig.

Die Gewinnung des Uferfiltrats erfolgt gewöhnlich mittels parallel zum Gewässer angeordneten Brunnen, wobei zumeist eine Mischung aus Uferfiltrat und landseitig zu fließendem Grundwasser gefördert wird (s. Abbildung 9).



**Abbildung 9: Schematische Darstellung der Uferfiltration**

Die Beschaffenheit des geförderten Wassers wird von der Flusswasserqualität, dem Abstand zwischen infiltrierendem Oberflächengewässer und Brunnenfassung sowie von den ortsspezifischen Reinigungsprozessen während der Untergrundpassage bestimmt. Diese setzen sich aus Filtrations-, Sorptions- und biologischen Abbauprozessen zusammen. Weiterhin ist ggf. eine stoffliche Verminderung durch die Mischung mit echtem Grundwasser zu berücksichtigen.

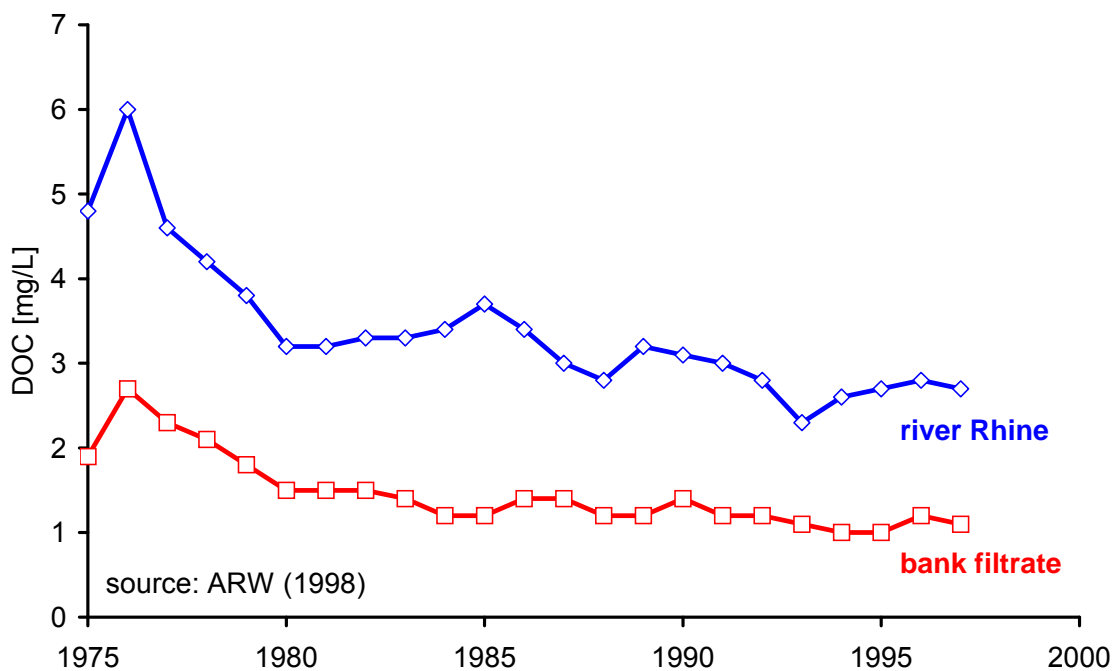
Besondere Bedeutung kommt der biologischen Reinigung in der Infiltrationszone an der Gewässersohle bzw. im Uferbereich zu. Hier liegen feine Sedimente vor und es herrscht eine sehr hohe biologische Aktivität („Filterkuchen“, bzw. ständige Zufuhr von Sauerstoff und Nährstoffen). Bereits beim Durchtritt des Oberflächenwassers durch diese nur wenige Zentimeter dicke Schicht erfolgt eine intensive



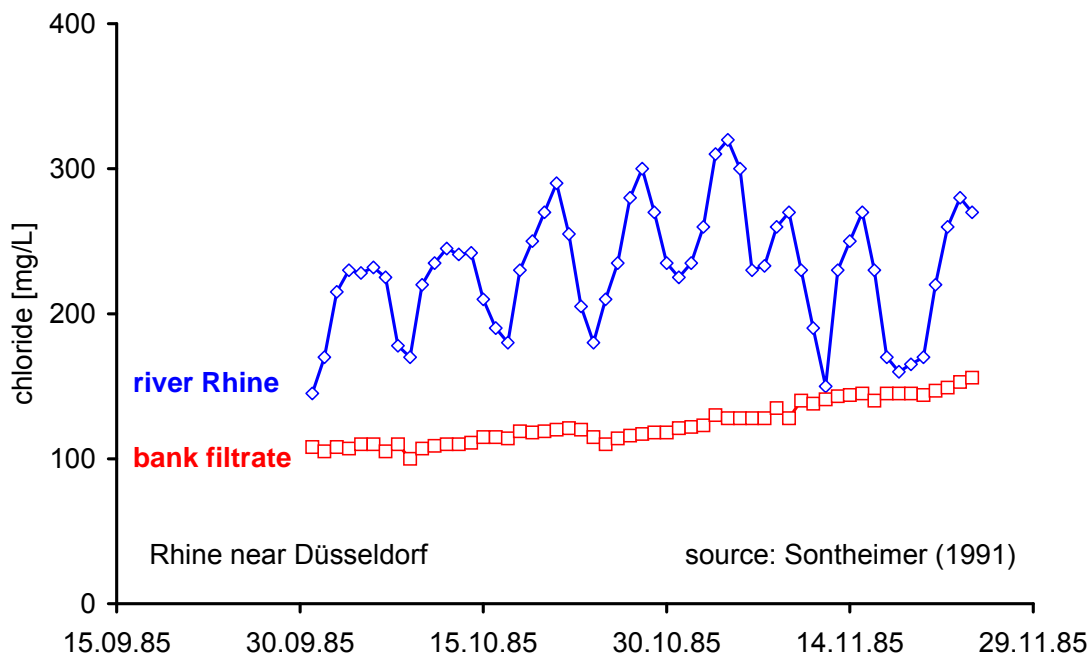
Reinigung des Wassers, die sich bei der anschließenden Passage durch die Sedimente des Grundwasserleiters zur Brunnenfassung hin fortsetzt.

Im Vergleich zur direkten Entnahme und Aufbereitung von Oberflächenwasser besitzt die Uferfiltration als Voraufbereitungsstufe in der Trinkwassergewinnung erhebliche Vorteile, da Mikroorganismen sowie anorganische Stoffe wie z. B. Schwermetalle und natürliche bzw. anthropogene organische Stoffe effektiv zurückgehalten werden. Weiterhin erhöht sich durch Verdünnungs- bzw. Konzentrationsausgleichsprozesse die Sicherheit bei Stoßbelastungen im Flusswasser.

Die Abbildung 10 und die Abbildung 11 verdeutlichen diese Zusammenhänge am Beispiel der DOC-Elimination sowie des Ausgleichs der Chloridkonzentration bei der Uferfiltration am Niederrhein.



**Abbildung 10: DOC-Gehalt im Rhein und im Rohwasser eines Uferfiltrats im Zeitraum 1975 - 1997 [9]**



**Abbildung 11: Chlorid-Gehalt im Rhein und im Rohwasser eines Uferfiltrats während des Jahres 1985 [10]**

Bei der Planung einer Uferfiltratgewinnung ist eine sorgfältige Erkundung der lokalen Gegebenheiten, insbesondere der hydrogeologischen, hydraulischen und hydrogeochemischen Bedingungen erforderlich. Dabei sind nach [11] u. a. folgende grundlegende Standortvoraussetzungen vorteilhaft:

- Lage an einem dauerhaft Wasser führenden Oberflächengewässer, das Sauerstoffgehalte von im Mittel größer 5 mg/L bzw. Redoxspannungen oberhalb von 650 mV aufweisen sollte
- Geringe Belastung des Gewässers mit organischen Substanzen
- Kontakt des Oberflächengewässers mit einem vertikal und lateral ausgedehnten Lockergesteinsaquifer, der in der Regel nicht weniger als 5 m mächtig ist und über eine mindestens gute Durchlässigkeit ( $k_f$ -Wert  $> 10^{-4}$  m/s) verfügt

Vor der Auswahl eines möglichen Standorts für die Errichtung einer Uferfiltratgewinnung sollte in einem ersten Schritt die hydrochemische Eignung des Oberflächengewässers geprüft werden. Das dazu vorliegende Datenmaterial ist auszuwerten bzw. über mehrere Probenahmen zu erheben (Ergebnisse entsprechender Untersuchungen an der Theiß sind in Kapitel 2.4.2 bzw. im TZW-Teilbericht 3 zusammengestellt).

Zur Bemessung von Brunnenanlagen sowie zur Erfassung der im Aquifer ablaufenden Prozesse sind Pumpversuche mit hydraulischen und wasserchemischen Begleituntersuchungen erforderlich. Dabei ist auch auf eine eventuelle anteilige Förderung landseitigen Grundwassers zu achten (Ergebnisse entsprechender Untersuchungen an der Theiß sind Gegenstand der Kapitel 2.4.4 und 2.4.5).

Durch die Uferfiltratgewinnung initiierte Veränderungen der Milieuverhältnisse im Untergrund, z. B. eines absinkenden Redoxpotenzials und damit einhergehende Freisetzung von gelöstem Eisen und Mangan sowie etwaige Kolmatationsprozesse können lediglich in mehrjährigen Pumpversuchen ermittelt werden.

#### *2.4.2 Flusswasserbeschaffenheit Theiß*

Der TZW-Bericht 3 „Evaluation of the Tisza river water quality regarding Drinking water supply“ vom März 2007 beinhaltet eine eingehende Beurteilung der Beschaffenheit des Flusswassers der Theiß. Dabei wurden auch Daten von verschiedenen serbischen und internationalen Institutionen ausgewertet. Nach Fertigstellung des TZW-Berichts 3 erfolgten zu vier weiteren Zeitpunkten Analysen im TZW-Labor (Befunde in den Anlagen 9 - 13), sodass das Flusswasser insgesamt elfmal untersucht wurde. Der Untersuchungsumfang richtete sich dabei nach den EU-Trinkwasservorgaben zuzüglich Messgrößen, die eine bessere fachlich Beurteilung, u a. auch hinsichtlich anthropogener Belastungstoffe ermöglichen.

Die Probennahmen fanden an drei Stellen (Höhe Padej, Becej und Zrenjanin) und zu unterschiedlichen Jahreszeiten statt. Damit sollten die Eignung des Flusswassers zur Trinkwassergewinnung beurteilt sowie jahreszeitliche Schwankungen erfasst werden. Bei der Beprobung am 29.09.2005 lagen Niedrigwasser- und am 16.03.2006 sowie am 19.03.2008 Hochwasserverhältnisse vor. Tabelle 9 zeigt ausgewählte Daten der sechs Untersuchungen im Vergleich.

Tabelle 9: Beschaffenheit des Flusswassers der Theiß

Parameter		29.09.05 (Becej)	16.03.06 (Becej)	18.10.06 (Zrenjanin)	11.04.07 (Padej)	30.01.08 (Padej)	19.03.08 (Padej)
Temperatur	°C	19,6	2,5	14,8	14,9	5,2	7,1
Trübung	FNU	26	447	11	31	75	-
Sauerstoff	mg/L	7,7	11,4	10,0	9,2	12,8	-
Elektr. Leitf.(b.20°C)	mS/m	58	36	39	42	42	31
pH-Wert	-	7,7	7,8	7,8	8,1	7,8	7,7
Säurekap. pH 4,3	mmol/L	3,5	2,3	2,9	2,5	2,4	2,1
Härte	°dH	12,2	8,0	9,1	9,1	8,8	7,5
Chlorid	mg/L	62	24	28	39	42	24
TOC	mg/L	3,9	13	8,3	2,8	4,4	5,8
Bor	mg/L	0,09	0,04	0,05	0,05	0,03	0,03
Ammonium	mg/L	0,4	0,2	0,02	0,2	0,3	0,06
Eisen	mg/L	0,5	3,7	0,4	0,5	1,3	3,0
Eisen gelöst	mg/L	-	-	-	-	0,06	0,13
Blei	mg/L	0,002	0,024	0,001	0,001	0,003	0,011
Blei gelöst	mg/L	-	-	-	-	< 0,001	-
Arsen	mg/L	0,004	0,005	0,003	0,003	0,002	0,003
PBSM	µg/L	0,03	0,03	< 0,01	< 0,01	-	-
Arzneimittel/RKM	µg/L	0,011	0,014	< 0,01	0,019	0,063	0,084
EDTA	µg/L	2,2	0,7	< 0,1	-	1,5	2,3
MTBE	µg/L	0,17	-	-	0,32	-	-

Im Hinblick auf eine Nutzung der Theiß zur Trinkwassergewinnung sind folgende Ergebnisse der Bestandsaufnahme wesentlich:

1. Die Temperatur des **Flusswassers aus der Theiß** variiert saisonal sehr stark (0,5 – 30 °C) und bei Hochwasser ist der Trübstoffgehalt sehr hoch (450 FNU am 16.03.2006).
2. Neutralsalzgehalt und Härte liegen meist auf einem mittleren Niveau, steigen jedoch bei Niedrigwasser deutlich an (elektrische Leitfähigkeit: 30 – 65 mS/m, Härte 7 – 12 °dH)
3. Hinzuweisen ist auf eine relativ hohe Belastung mit Bakterien und organischen Stoffen (TOC: 3 - 13 mg/L), die vermutlich auf die Einleitung von unzureichend behandelten Abwässern zurückzuführen ist [12]. Nach Fremdanalysedaten liegen zeitweise auch erhöhte Werte für Ammonium (max. 1,0 mg/L), Phosphat (max. 0,4 mg/L) sowie niedrige Sauerstoffgehalte vor.

4. Erwartungsgemäß sind Spuren an organischen Mikroverunreinigungen (z. B. der Komplexbildner EDTA und der Kraftstoffbestandteil MTBE) nachweisbar. Die Konzentrationen liegen auf einem niedrigen Niveau (geringer als z. B. im Rhein).
5. Schwermetalle sowie die Spurenelemente Arsen und Bor sind nicht in relevanten Konzentrationen enthalten. Bei Hochwässern treten Schwermetalle in leicht erhöhten Mengen auf (z. B. Eisen: max. 3 mg/L, Kupfer: max. 0,2 mg/L), die jedoch partikulär, d. h. an Schwebstoffen gebunden sind.

Die Theiß kann somit prinzipiell zur Trinkwassergewinnung genutzt werden. Bei einer Aufbereitung von Wasser aus der fließenden Welle wären jedoch eine deutliche organische sowie bakteriologische Belastung sowie insbesondere die starken zeitlichen Schwankungen in der Wasserbeschaffenheit (u. a. Temperatur, Feststoffgehalt) zu berücksichtigen. Dagegen ist dies bei einer Uferfiltratgewinnung von untergeordneter Bedeutung und somit ein wesentlicher Vorteil dieser Technik. Mittelfristig ist von einer Verbesserung der Flusswasserbeschaffenheit auszugehen, da Missstände bei der Abwassereinleitung bestehen, die behoben werden müssen.

#### *2.4.3 Hydraulische und morphologische Angaben zur Theiß*

Detaillierte Informationen zu den hydraulischen, hydrologischen und morphologischen Randbedingungen der Theiß im Untersuchungsgebiet gibt der im Rahmen des Projektes erstellte „River engineering report“ (Bericht Nr. 10 nach Liste der Detailberichte).

Die Theiß ist danach mit einer Länge von 966 km und einer Einzugsgebietsgröße von 157.186 m<sup>2</sup> der längste Nebenfluss der Donau und nach der Save (noch vor dem Inn) der zweit wasserreichste. Von ihrer Quelle in den Karpaten durchfließt die Theiß die Ukraine, Ungarn und Serbien, bevor sie östlich von Novi Sad in die Donau mündet. Das serbische Teilstück der Theiß ist 160 km lang.

Auf serbischem Gebiet ist die Theiß durch Stauhaltungen geprägt, die eine natürliche Flusssdynamik verhindern. Vom Aufstau der Donau durch den Staudamm am Eisernen Tor (Djerdap I) wird die Theiß bei Niedrigwasserführung bis 60 km oberhalb ihrer Mündung in die Donau beeinflusst. Somit reicht der Rückstau der Donau bei Niedrigwasser annähernd bis zum Stauwehr bei Becej, das wiederum die Flusssdynamik des nördlich gelegenen Flussabschnitts prägt.

Die durchschnittliche jährliche Abflussmenge beträgt nördlich des Stauwehrs von Becej ca. 800 m<sup>3</sup>/s, wobei eine große Differenz zwischen Niedrigwasserabfluss (< 100 m<sup>3</sup>/s) und vor allem in den Monaten März bis Juni auftretendem Hochwasserabfluss (> 3.500 m<sup>3</sup>/s) besteht. Damit verbunden sind durchschnittliche Fließgeschwindigkeiten von 0,5 m/s die bei Niedrigwasser im Bereich von 0,2 m/s und bei Hochwasser im Bereich > 1,0 m/s liegen. Diese relativ niedrigen Geschwindigkeiten resultieren aus dem geringen Gefälle der Theiß. Dabei hat sie sich jedoch relativ tief in den Untergrund eingeschnitten (durchschnittliche Wassertiefe ca. 10 m).

Ursache für die hohe Sedimentfracht der Theiß bei Hochwasser ist vor allem eine Erosion im Bereich des Flussbetts sowie an den Uferabschnitten. Eine Kolmation dieser Infiltrationszonen, die sich hinsichtlich der Gewinnung von Uferfiltrat negativ auswirken würde, muss somit nicht befürchtet werden.

Verlässliche Angaben, inwieweit die Anbindung des Flusses an den landseitigen, oberflächennahen Grundwasserkörper gegeben ist, liegen bislang nicht vor. Auch die bei Zrenjanin im Auftrag des lokalen Wasserversorgers durchgeführte Uferfiltraterkundung erbrachte keine verwertbaren Ergebnisse (vgl. Kapitel 0). Entsprechende Untersuchungen waren deshalb Bestandteil der im Folgekapitel beschriebenen Uferfiltraterkundung bei Padej.

#### *2.4.4 Hydrogeologische Erkundung einer Uferfiltratgewinnung*

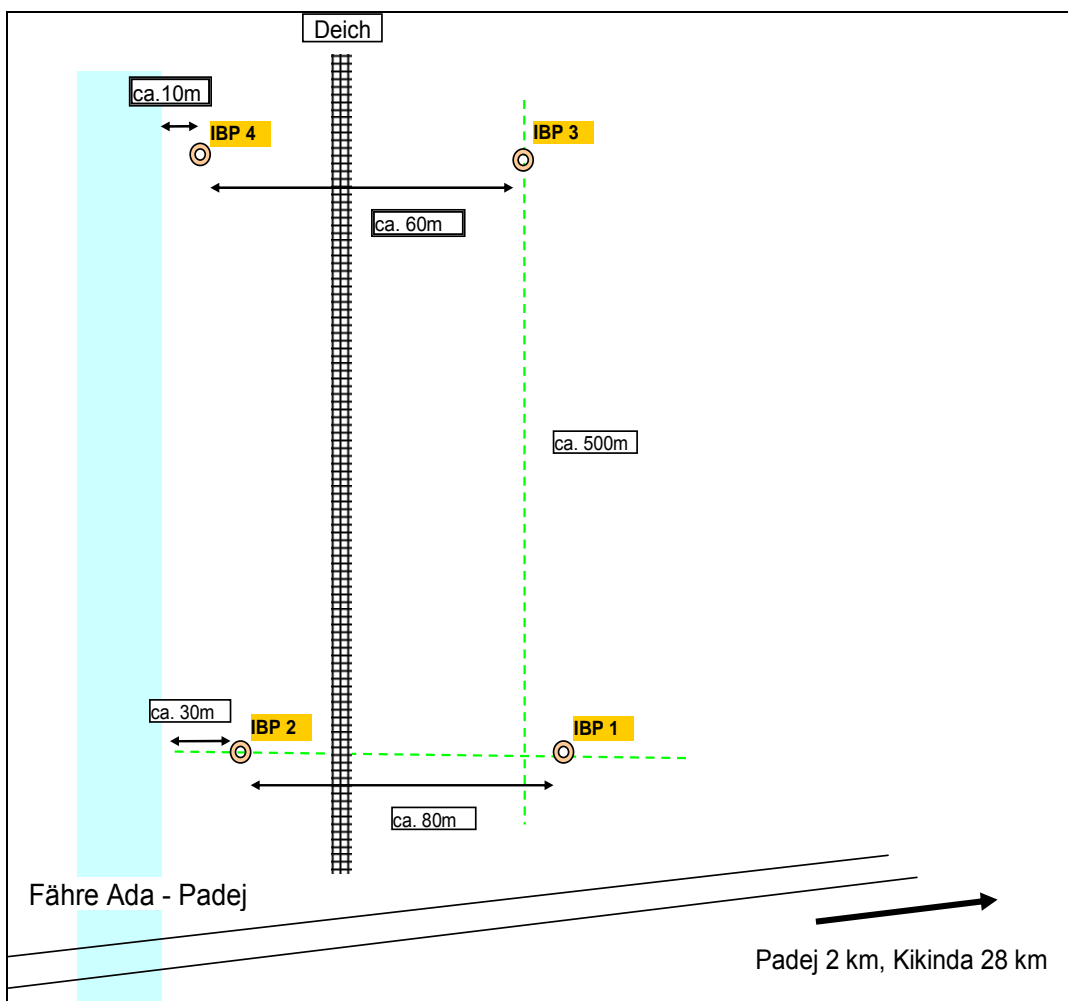
Als Standort für die Erkundung einer Uferfiltratgewinnung an der Theiß wurde auf Empfehlung von Professor Stefanovic, Universität Belgrad, der die hydrogeologischen Erkundungen auch technisch-wissenschaftlich begleitete, ein Uferbereich in der Nähe der Kleinstadt Padej, etwa 28 km westlich von Kikinda ausgewählt.

##### 1) April 2007: Bau von vier Grundwassermessstellen

Die Firma Hydrosond, Belgrad errichtete an diesem Standort zunächst vier Grundwassermessstellen mit folgenden Kenndaten:

- Ausbautiefe: 27,5 m u. GOK
- Bohrdurchmesser: 0,27 m
- Durchmesser Filterrohr: 0,125 m
- Filterstrecke: 17 - 26 m u. GOK (IBP 2: 20 - 26 m u. GOK)
- Schlitzweite 0,4 mm
- Filterkies: 1 - 3 mm

Die Anordnung bzw. Lage der Messstellen ist der Abbildung 12 zu entnehmen. Die Fotos in den Anlagen 14a, b vermitteln einen Eindruck vom Bau der Messstellen und dem Einzugsgebiet. Der Abstand zwischen den beiden Messstellenpaaren IBP 1/2 bzw. IBP 3/4 beträgt 500 m (parallel zum Flussufer). Die Messstellen IBP 1 und IBP 3 wurden dabei etwa 100 bzw. 70 m vom Flussufer entfernt, d.h. hinter dem Hochwasserdeich, und die Messstellen IBP 2 bzw. 4 vor dem Deich niedergebracht (Abstand zum Flussufers 30 bzw. 10 m).



**Abbildung 12: Lage der Grundwassermessstellen am Standort Padej**

Eine detaillierte Beschreibung der Vorgehensweise beim Bau der Grundwassermessstellen sowie der hydrogeologischen Ergebnisse sind dem Abschlussbericht von Prof. Stevanovic vom April 2007 zu entnehmen (Bericht Nr. 11 nach Liste der Detailberichte, in serbischer Sprache; Kapitel 12 des Berichts Nr. 4 ist eine Zusammenfassung dieses Berichts in englischer Sprache). Die wesentlichen Ergebnisse dieser Vorerkundung sind:

- Die Bohrtiefe wurde von 25 auf 30 m erhöht, ohne einen Grundwasserstauer anzutreffen.
- Der Aquifer besteht über die gesamte Bohrtiefe in allen vier Messstellen überwiegend aus Feinsanden (ca. 0,05 - 0,2 mm), mit zwischengeschaltetem schluffigem Material.
- Kurzpumpversuche mit Förderraten von rd. 5 L/s ergaben jeweils eine Absenkung von rd. 5 m.
- Nach Pumpende stieg der Grundwasserstand zunächst sehr schnell (3 m innerhalb weniger Minuten) an und erreichte nach einigen Stunden den Ausgangszustand.
- Die Transmissivität beträgt rd.  $10^{-3}$  m<sup>2</sup>/s ( $k_f$ -Wert: ca.  $4 \cdot 10^{-5}$  m/s)
- Organoleptisch war in den Grundwässern ein leichter H<sub>2</sub>S-Geruch sowie zum Teil eine schwache Gelbfärbung festzustellen.
- Vor-Ort-Messungen ergaben eine mittlere Mineralisierung (elektr. Leitfähigkeit bei 25°C: rd. 60 mS/m) einen pH-Wert von rd. 7,9 sowie einen reduktiven Chemismus des Grundwassers (Sauerstoff < 0,3 mg/L).

Am 11.04.2007 wurden das Flusswasser sowie, jeweils nach mehrstündiger Förderung, die Wässer aus drei der neuen Grundwassermessstellen beprobt. Ausgewählte Analyseergebnisse sind, vergleichend mit den entsprechenden Flusswasserdaten, in der nachfolgenden Tabelle 10 zusammengestellt. Die kompletten Analysenbefunde sind den Anlagen 15 bis 17 bzw. der Anlage 9 (Theiß) zu entnehmen.



Tabelle 10: Ausgewählte Analysedaten, Padej 11/12.04.2007

Parameter		Flusswasser Theiß	IBP 1	IBP 3	IBP 4
Temperatur	°C	14,9	13,3	13,3	13,2
Elektr. Leitf. (25°C)	mS/m	47	63	55	57
Färbung (UV <sub>436</sub> )	m <sup>-1</sup>	0,3	0,8	0,4	0,4
TOC	mg/L	2,8	3,7	3,3	3,2
Sauerstoff	mg/L	9,2	< 0,3	< 0,3	< 0,3
pH	-	8,1	8,1	7,9	7,8
Säurekap. pH 4,3	mmol/L	2,5	5,2	4,9	5,0
Härte	°dH	9,1	3,1	7,5	1,8
Natrium	mg/L	29	122	71	55
Sulfat	mg/L	40	13	10	< 1
Ammonium	mg/L	0,2	0,5	0,5	0,6
Eisen gel.	mg/L	0,01	0,09	0,2	0,6
Mangan gel.	mg/L	< 0,01	0,05	0,05	0,09
Methan	mg/L	< 0,01	0,8	3,8	7,1
Bor	mg/L	0,05	0,5	0,4	0,2
Arsen	mg/L	0,003	0,100	0,072	0,084

Danach ist das ufernahe Grundwasser anaerob-methanogen und enthält erhöhte Mengen an Arsen. Hinsichtlich der Problemstoffe Bor, Huminstoffe und Natriumhydrogencarbonat ist es günstiger beschaffen als das Tiefengrundwasser.

Zur Abklärung offener Fragen z. B. hinsichtlich des Wasserchemismus, der sich nach längerer Förderzeit einstellt, und der notwendigen Brunnenabstände bei einer großtechnischen Uferfiltratgewinnung wurde im nächsten Schritt ein Versuchsbrunnen niedergebracht. Weiterhin wurden eingehende geophysikalische Untersuchungen durchgeführt und anhand der Messdaten eines mehrwöchigen Pumpversuchs ein Grundwassermodell ausgearbeitet. Die Vorgehensweise dabei bzw. wesentliche Ergebnisse sind nachfolgend beschrieben.

## 2) Januar 2008: Errichtung eines Uferfiltratbrunnens und Langzeitpumpversuch

Ende Januar 2008 errichtete die Firma Nik D.O.O, Belgrad unter fachtechnischer Begleitung von Prof. Stevanovic den Versuchsbrunnen IEBP 1 unmittelbar neben der Messstelle IBP 4. Die Abbildung 13 zeigt ein Foto, das während der Brunnenentwicklung beim Ausbau des Brunnens aufgenommen wurde.



**Abbildung 13: Bau des Versuchsbrunnens IEBP 1 an der Theiß bei Padej**

Die wichtigsten Kenndaten des Brunnens sind:

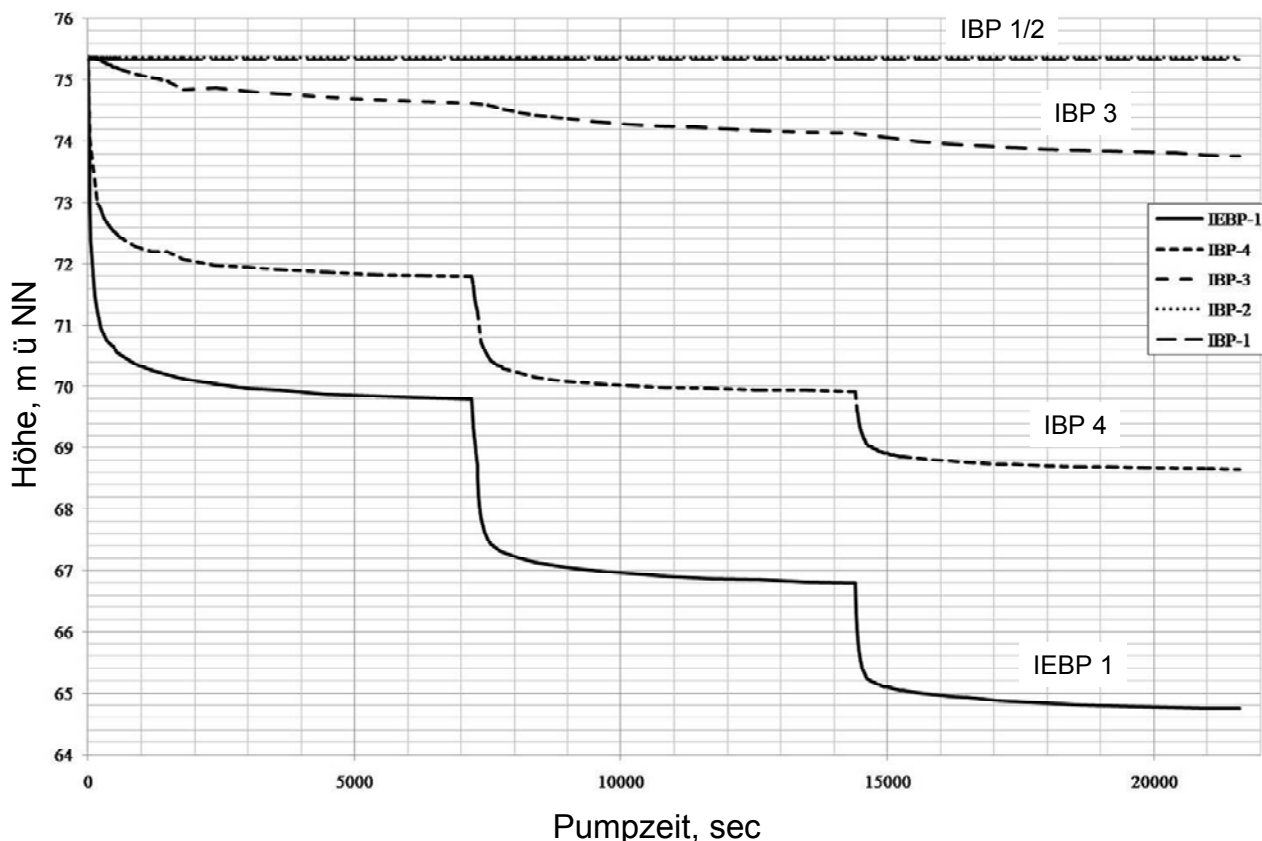
- Ausbautiefe: 28 m u. GOK
- Bohrdurchmesser: 0,8 m
- Durchmesser Filterrohr: 0,3 m
- Filterstrecke: 16 bis 25 m u. GOK (PVC-Rohr mit Bohrungen umhüllt mit einem Kunststofffließ der Maschenweite 0,26 mm)
- Filterkies: 0,3 bis 1,2 mm
- Förderpumpe: Grundfos SP 30-4 (Einbautiefe: 18 m u. GOK)

In der Zeit 30.01.2008 bis 31.03.2008 erfolgte ein Pumpversuch, wobei die Entnahmemenge schrittweise auf die maximal mögliche Förderleistung der U-Pumpe von 12 L/s gesteigert und parallel die Grundwasserstände im Brunnen sowie in den Messstellen IBP1-4 und der Wasserstand der Theiß in regelmäßigen Abständen dokumentiert wurde. Eine detaillierte Beschreibung der Bohrarbeiten, hydrogeolo-

gischen Untersuchungen sind dem Bericht von Prof. Stevanovic vom März 2008 zu entnehmen (Bericht Nr. 12 nach Liste der Detailberichte).

Für den Dauerbetrieb der Förderpumpe wurde u. a. ein ca. 600 m langes Stromversorgungskabel zur nächstgelegenen Übergabestation (Schleuse Zlatica river) verlegt. Dies erfolgte durch die Firma COPROING d.o.o., Belgrad, die während des gesamten Pumpversuchs auch zwei Mitarbeiter zur Überwachung der Anlagen und zur Messung der Grundwasserstände (4-mal täglich) stellte. Die Versuchsbetreuung und Erfassung weiterer hydrogeologischer Daten erfolgte durch Angehörige des Instituts für Hydrogeologie der Universität Belgrad.

Die Grundwasserstandsganglinien für die ersten drei Pumpphasen am 30.01.2008 (4,75 L/s; 7,15 L/s; 10 L/s) mit jeweils zweistündiger Dauer sind in Abbildung 14 dargestellt.

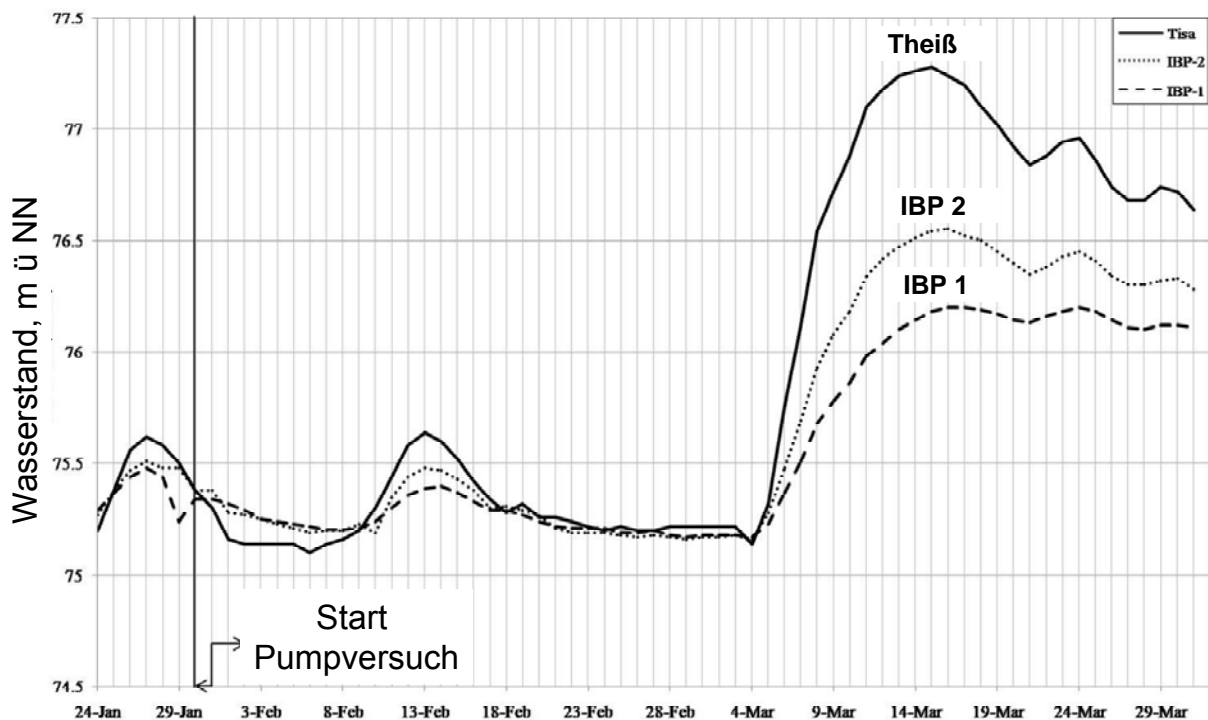


**Abbildung 14: Wasserstände der vier Grundwassermessstellen und des Versuchsbrunnens während des Stufen-Pumpversuchs am 30.01.2008**

Es ist zu erkennen, dass die Förderung aus dem Versuchsbrunnen IEBP 1 den Grundwasserstand um maximal 11 m absenkte (1,1 m pro 1 L/s Entnahme). Hinzuweisen ist auf die deutlich geringere Absenkung von maximal 7 m in der unmittelbaren Umgebung des Versuchsbrunnens (IBP 1).

telbar neben dem Brunnen gelegenen Messstelle IBP 4 (ca. 1 m entfernt). Dies zeigt einen vergleichsweise hohen hydraulischen Widerstand des Brunnenfilters an. In der etwa 60 m landeinwärts zum IEBP 1 gelegenen Messstelle IBP 3 sank der Grundwasserstand bei 10 L/s Entnahme aus dem Brunnen IEBP 1 um rd. 2 m.

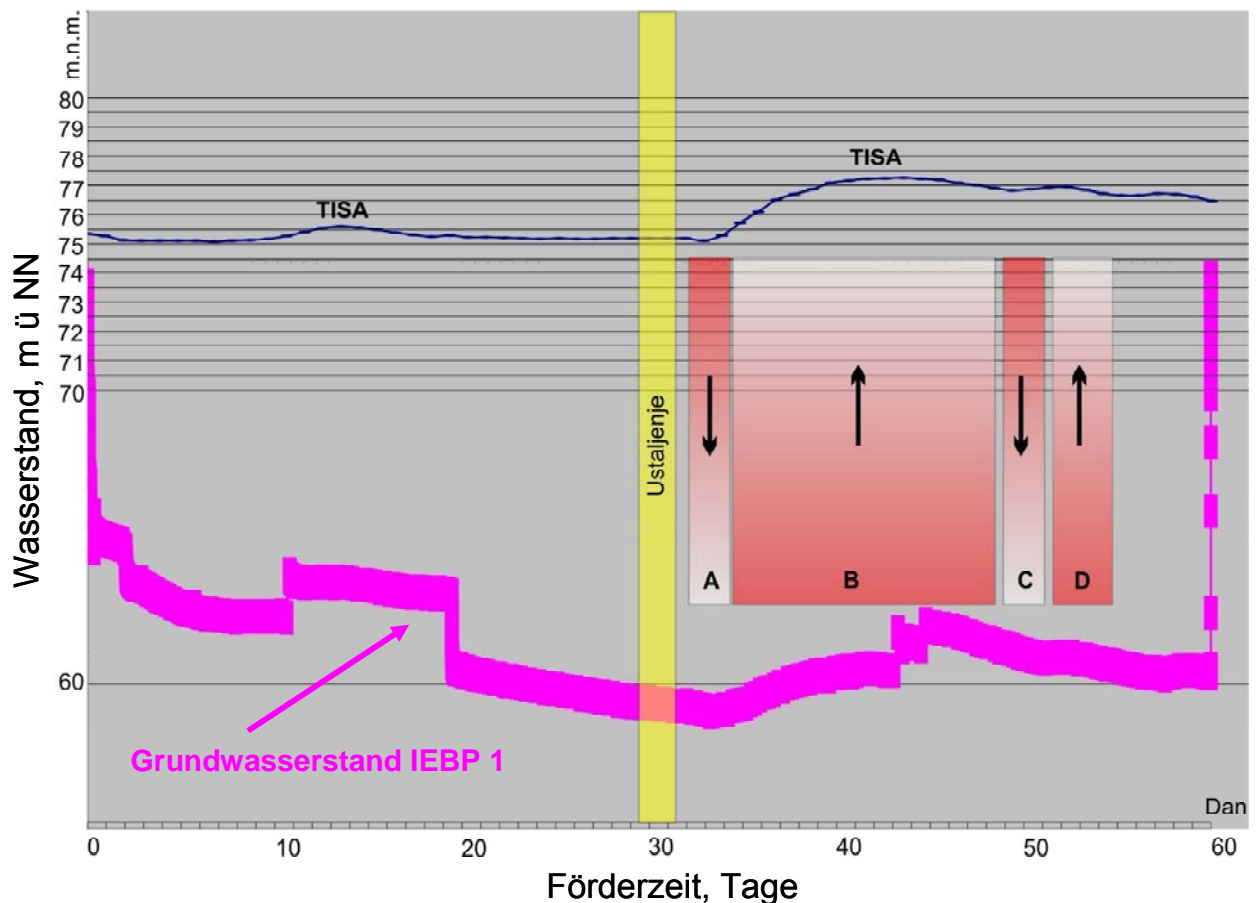
Die Grundwasserstände in den ca. 500 m flussabwärts gelegenen Messstellen IBP 1 und 2 wurden weder während des Stufen-Pumpversuchs am 30.01.2008 noch durch die nachfolgende 2-monatige Förderung aus dem IEBP 1 (Gesamtentnahme rd. 50.000 m<sup>3</sup>) beeinflusst. Dagegen reagierten die Grundwasserstände in diesen beiden Messstellen unmittelbar auf fallende bzw. steigende Wasserstände der Theiß. Dies geht aus den in der Zeit 24.01. bis 31.03.2008 aufgezeichneten Grundwasserständen sowie dem Wasserstand der Theiß in Abbildung 15 hervor. Die wichtigste Voraussetzung für eine Uferfiltratgewinnung, der Anschluss der Theiß an den alluvialen Grundwasserkörper, ist somit erfüllt.



**Abbildung 15: Vergleich des Grundwasserstände in den Messstellen IBP-1 und IBP-2 mit dem Wasserstand der Theiß Januar bis März 2008**

Aus einem Vergleich der Wasserstände in der Theiß und im Brunnen IEBP 1 während des 2-monatigen Pumpversuchs in Abbildung 16 geht hervor, dass nach ca. 30 Tagen Pumpzeit ein stationärer Zustand hinsichtlich der Brunnenabsenkung erreicht war. Die maximale Grundwasserabsenkung betrug 16,2 m (10 L/s Ent-

nahme) erreicht war. Als A-D sind in Abbildung 16 vier Perioden eingetragen, in denen der Wasserstand in der Theiß und im Brunnen IEBP 1 praktisch gleichzeitig stieg bzw. fiel. Dies bestätigt die gute Anbindung des Grundwasserleiters an die Theiß, die sich bereits aus den Änderungen der Wasserstände in den IBP 1 und IBP 2 ergaben (Abbildung 15).



**Abbildung 16: Wasserstand der Theiß und Grundwasserstand im Versuchsbrunnen IEBP-1 im Januar bis März 2008**

Die Siebanalysen des erbohrten Bodenmaterials im Bereich des Brunnens IEBP 1 bestätigen im Wesentlichen die beim Bau der Grundwassermessstellen ermittelten Daten. Danach liegen über den gesamten erfassten Aquiferbereich feinsandige Sedimente mit schluffigen Zwischenlagen vor. Die höchsten hydraulischen Durchlässigkeiten weisen etwas gröbere Sande (0,1 - 0,3 mm) auf, die in Tiefen von 9 bis 12 m sowie 18 bis 24 m angetroffen werden. Die nach Hazen berechneten Durchlässigkeitsbeiwerte ( $k_f$  Wert) liegen in diesen Bereichen bei  $3 \cdot 10^{-4}$  m/s. Die Transmissivität des alluvialen Grundwasserleiters wurde zu  $1,6 \cdot 10^{-3}$  m<sup>2</sup>/s bestimmt. Dies entspricht einem mittleren  $k_f$ -Wert von  $5 \cdot 10^{-5}$  m/s.



### 3) Geophysikalische Detail-Erkundungen

Zur besseren Einschätzung der Eignung des Uferbereichs am Standort des Versuchsbrunnens bei Padej zur Uferfiltratgewinnung wurden von der Ingenieurgesellschaft HGN Hydrogeologie GmbH, Torgau (HGN) am 29.01. und 30.01.2008 folgende ergänzende Untersuchungen durchgeführt:

- Geoelektrische Untersuchung eines 1,5 km langen Uferabschnitts (500 m nördlich / 1.000 m südlich des IEBP 1, vgl. Abb. 17))



**Abbildung 17: Nördlicher Messabschnitt in der Nähe des Versuchsbrunnens mit Messauslage (links) und Messwertaufnahmesystem (rechts)**

- Geophysikalische Vermessung des Gewässerbodens der Theiß auf einer Länge von ca. 2,2 km (1.600 m südlich / 600 m nördlich IEBP 1, vgl. Abb. 18)



**Abbildung 18: Gewässer-geophysikalische Messung in der Theiß Höhe IEBP 1**

Die Ergebnisse sind im HGN-Bericht vom September 2008 (Bericht Nr. 13 nach Liste der Detailberichte) enthalten und lassen sich wie folgt zusammenfassen:

- Im südlichen Bereich (bis ca. Fähre) einheitliche Wassertiefe der Theiß von rd. 10 m. Im nördlichen Bereich, d. h. auf Höhe des IEBP 1, extremes Bodenrelief mit Wassertiefen zwischen 15 und 30 m.
- Der Gewässerboden (bis 10 m unter Gewässersohle) wird im südlichen Abschnitt durch Sande mit bindiger Matrix und Schluffe dominiert, während im nördlichen Abschnitt vorwiegend Sande anzutreffen sind.
- Eine ausgeprägte Weichsedimentschicht ist im gesamten Untersuchungsabschnitt nicht zu erkennen, sodass von ausreichenden Sickerraten des Oberflächenwassers ins Grundwasser auszugehen ist.
- Die geoelektrischen Messungen ergaben im gesamten untersuchten Uferbereich den folgenden Aufbau des Untergrunds:
  - Schluffig bis toniger Deckstauer (6 - 12 m mächtig)
  - Darunter befindet sich feinkörniger Grundwasserleiter
  - Liegend (Tiefe > 30 m) bindige Schichten

#### 4) Modellierung und Simulationsrechnungen zur Uferfiltratgewinnung

Mit dem Ziel, den an der Theiß bei Padej gewinnbaren Uferfiltratanteil zu ermitteln, wurde von der HGN ein numerisches Grundwasserströmungsmodell erstellt und die Auswirkungen verschiedener Parameter (Leakage-Faktor der Anbindung der Theiß an den Grundwasserleiter, Abstand der Brunnen zur Theiß, Abstand zwischen den Brunnen) auf den gewinnbaren Uferfiltratanteil bewertet. Die Ergebnisse sind im oben genannten Bericht vom September 2008 detailliert beschrieben. In einer ergänzenden Untersuchung wurde auch eine von 200 auf 330 L/s erhöhte Entnahme betrachtet (Bericht Nr. 13 und 14 nach Liste der Detailberichte).

Die Simulationen zeigten, dass der **Uferfiltratanteil bei einer Fördermenge von insgesamt 200 L/s (24 Brunnen) im Mittel 84 %** beträgt. Die Grundwasserdynamik dieser Variante, die auf Grundlage folgender Parameter berechnet wurde, ist in Abbildung 19 dargestellt:

- kf-Wert =  $8.0E - 05$  m/s,
- Leakage =  $1.0E - 06$  1/m,
- GW-Gefälle =  $5.0E - 04$  m/m,
- Entfernung Brunnen-Tisa = 50 m,





40 Brunnen, verteilt auf eine Länge von 4 km errichtet werden. Die Brunnen sollten mit doppelter Kiesschüttung und Wickeldrahtfiltern (ca. 18 – 24 m u. GOK) ausgerüstet werden. Wesentlich ist auch ein Hochwasser sicherer Ausbau der Brunnen, da diese vor dem Deich abgeteuft werden sollten (elektrische Vorrichtungen > 81,5 m über NN). Es wird ein stufenweises Vorgehen empfohlen, um weitere Optimierungen vornehmen zu können. Dem Ausbau der Brunnen kommt dabei eine besondere Bedeutung zu. Um einer Kolmatation vorzubeugen, müssen zumindest zeitweise erosive Bedingungen im Flussbett bestehen (Hochwasser).

#### *2.4.5 Uferfiltratbeschaffenheit*

Während des Pumpversuchs in der Zeit 30.01. bis 31.03.2008 wurde das Wasser aus dem Versuchsbrunnen IEBP 1 mehrmals untersucht. Dabei erfolgten in kürzeren Abständen Analysen auf ausgewählte physikalisch-chemische Parameter (Ergebnisse in Anlage 18) und zu vier Zeitpunkten wurde das Brunnenwasser umfassend u. a. auf anthropogene Mikroverunreinigungen analysiert (Ergebnisse in Anlagen 19 - 22). Zusätzlich wurde das Flusswasser der Theiß während des Pumpversuchs dreimalig (Ergebnisse in Anlagen 10 - 12) und die Grundwässer aus den Messstellen IBP 1 - 3 sowie auch eine Probe aus einem in der Nähe gelegener Tiefbrunnen („deep well, Anwesen Mr. Potloka“, Tiefe 90 m) einmalig sowohl auf physikalisch-chemische Parameter als auch zum Teil auf anthropogene Mikroverunreinigungen untersucht. Sämtliche Befunde sind in den Anlagen 23 bis 26 beigelegt.

##### 1) Vergleich Flusswasser- und Grundwasserbeschaffenheit

Beispielhaft sind in der Tabelle 11 ausgewählte Daten aus diesen Messungen aufgelistet (Werte gerundet). Die Messstelle IBP 1 ist dabei nicht berücksichtigt, da deren Wasser einen mit dem Wasser aus der Messstelle IBP 2 praktisch identischen Chemismus hatte.

Wie bereits bei den Voruntersuchungen (vgl. Kapitel 2.4.2), war das Flusswasser der Theiß während des Pumpversuchs nahezu sauerstoffgesättigt, gering bis mittel mineralisiert und enthielt erhöhte Mengen an Trübstoffen. Auch der Gehalt an natürlichen organischen Stoffen, der über die Summenparameter Färbung und TOC erfasst wird, ist als erhöht einzustufen. Arsen und Bor waren dagegen im Flusswasser erwartungsgemäß lediglich in Spuren vorhanden.

Die vier Grundwässer sind trübstoffarm, frei von Sauerstoff (sowie z. T. auch sulfat- und nitratfrei) und weisen eine mittlere bis leicht erhöhte Mineralisierung auf. Erwartungsgemäß (vgl. Kapitel 2.2.1) enthält das Tiefengrundwasser aus dem Hausbrunnen Potloka erhöhte Mengen an natürlichen organischen Verbindungen (Huminstoffe), die reich an chromophoren Gruppen sind. Infolgedessen ist das Tiefbrunnenwasser deutlich gelb gefärbt (Färbung:  $1,8 \text{ m}^{-1}$ ).

**Tabelle 11 Beschaffenheit des Flusswassers sowie verschiedener Grundwässer aus dem Untersuchungsgebiet Padej**

		Theiß	IBP 2	Versuchsbr. IEBP 1	IBP 3	Tiefbr. Patloka
Trübung vor Ort	FNU	75	< 0,1	< 0,1	< 0,1	< 0,1
Färbung, 436 nm	$\text{m}^{-1}$	0,8	0,7	0,4	0,4	1,8
TOC	mg/L	5,8	3,4	2,8	3,6	5,2
Elektr. Leitf. (25°C)	mS/m	35	60	60	80	95
Sauerstoff	mg/L	10	< 0,2	< 0,2	< 0,2	< 0,2
pH-Wert	-	7,7	8,1	7,8	7,8	8,2
Säurekap. pH 4,3	mmol/L	2,1	5,2	5,4	8,9	10,6
Härte	° dH	7,5	3,0	9,6	8,6	2,1
Natrium	mg/L	19	123	60	141	238
Chlorid	mg/L	42	30	34	11	6
Sulfat	mg/L	33	8	10	< 1	<1
Ammonium	mg/L	0,2	0,4	1,1	0,9	-
Eisen gel.	mg/L	0,1	0,1	1,0	0,06	0,1
Arsen	mg/L	0,003	0,091	0,070	0,074	0,133
Bor	mg/L	0,03	0,39	0,22	0,52	1,4

Die flussnahen Grundwässer aus dem Versuchsbrunnen IEBP 1 bzw. den Grundwassermessstellen IBP 2 und IBP 3 sind demgegenüber ärmer an färbenden Huminstoffen. Auch hinsichtlich der Konzentrationen an Natrium, Hydrogencarbonat, Bor und Arsen liegen im alluvialen Grundwasser deutlich günstigere Verhältnisse als im Tiefengrundwasser vor.

Da die Werte für Natrium, Hydrogencarbonat, Bor und Arsen im Tiefengrundwasser (Hausbrunnen Potloka) vergleichsweise hoch sind, können diese Substanzen als Tracer für den Anteil an Tiefengrundwasser im flussnahen Grundwasser angesehen werden. Demgegenüber ist das Tiefbrunnenwasser arm an Chlorid, sodass

dieser Inhaltsstoff Hinweise auf den Flusswasseranteil in den Uferfiltratmessstellen gibt.

## 2) Charakterisierung des Wassers aus dem Versuchsbrunnen IEBP 1

Nach den Befunden in den Anlagen 18 bis 22 ist das Wasser aus dem Versuchsbrunnen IEBP 1 wie folgt zu charakterisieren:

- Mittlere Mineralisierung und niedrige Härte (60 mS/m, 10 °dH)
- Calcitgesättigt und gut gepuffert (pH 7,8,  $K_{S4,3}$ : 5,5 mmol/L)
- Anaerob mit der Folge erhöhter Gehalte an den reduzierten Verbindungen  $Fe^{2+}$ ,  $Mn^{2+}$ ,  $NH_4^+$  und  $CH_4$
- Arsenkonzentration rd. 0,07 mg/L
- Arsen liegt überwiegend als Arsenat(III) vor
- Gehalt an natürlichen organischen Inhaltsstoffen ist leicht erhöht (SAK<sub>436</sub>: 0,4 m<sup>-1</sup>, TOC: 3 mg/L)

Die TOC/DOC-Charakterisierung mittels LC-OCD ergab einen Anteil der Biopolymer-Fraktion (Polysaccharide, Proteine, etc.) am DOC von weniger als 1 %. Dabei weist das Fehlen eines Signals für organisch-gebundenen Stickstoff (OND) darauf hin, dass es sich hierbei ausschließlich um Polysaccharide handelt. Der Anteil der Huminstofffraktion beträgt 66 bis 70 %, Building Blocks 17 bis 19 % und Neutralstoffe 12 bis 14 %.

Die Untersuchung nach den Parameterlisten der deutschen bzw. der EU-Trinkwasserstandards ergab, dass das Wasser aus dem Versuchsbrunnen IEBP 1 frei von Schwermetallen und organischen Mikroverunreinigungen ist. Neben Benzol, polycyclischen aromatischen sowie leichtflüchtigen halogenierten Kohlenwasserstoffen (PAK bzw. LHKW) wurden dabei auch Pestizidwirkstoffe umfassend untersucht.

Ergänzend erfolgten auch Messungen auf für Flusswässer typische Störstoffe wie z. B. synthetische Komplexbildner und Arzneimittelrückstände. Erwartungsgemäß wurden dabei Spuren an dem Komplexbildner EDTA gefunden. Unerwartet ist dagegen der Befund von Spuren an Amidotrizoesäure im Wasser aus dem Brunnen IEBP 1 am 19.03.2008. Hierbei handelt es sich um ein in Oberflächengewässern häufig anzutreffendes Röntgenkontrastmittel, das jedoch bei den vorliegenden a-

noxischen Bedingungen bei der Bodenpassage gut entfernt werden sollte [13]. Kontrollanalysen zur Klärung des Sachverhalts waren nicht mehr möglich.

Insgesamt geht aus diesen Messungen (ausgewählte Ergebnisse in Tabelle 12) eine effektive Reinigungswirkung durch mikrobiologische Abbauvorgänge und Fällungsprozesse bei der Uferfiltration am Standort Padej hervor.

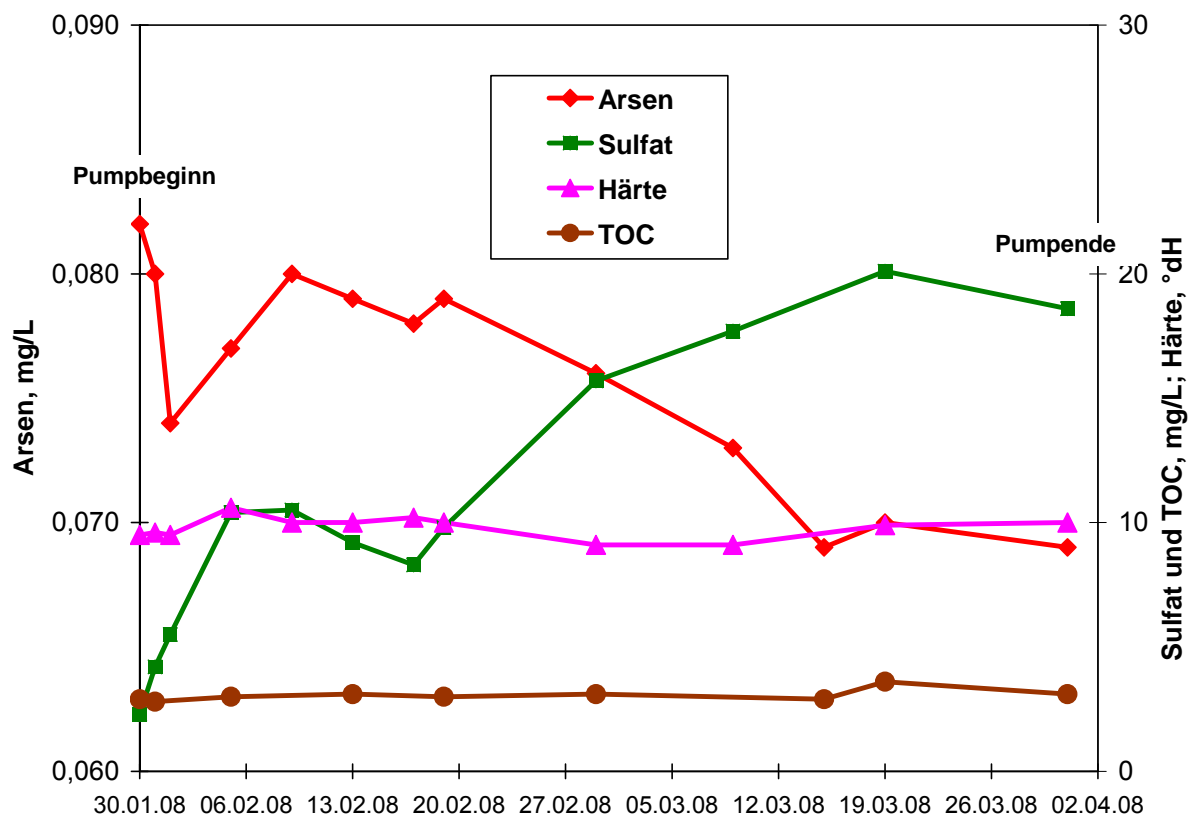
**Tabelle 12: Anthropogene Mikroverunreinigungen und Schwermetalle im Wasser aus der Theiß und dem Versuchsbrunnen IEBP 1 (Max-Werte in µg/L)**

	Flusswasser Theiß	IEBP 1
EDTA	2,3	1,1
<b>Arzneimittelrückstände</b>		
Carbamazepin	0,028	< BG
Diclofenac	0,027	< BG
Ibuprofen	0,022	< BG
Amidotrizoesäure	0,015	0,024
Iohexol	0,044	< BG
Iopromid	0,049	< BG
<b>Schwermetalle</b>		
Blei	11	< BG
Cadmium	0,5	< BG
Chrom	4	< BG
Kupfer	20	< BG
Nickel	7	< BG

### 3) Veränderung des Wassers aus dem Versuchsbrunnen IEBP 1

Nach der tabellarischen Zusammenstellung ausgewählter Analysedaten in Anlage 18 hat sich die Beschaffenheit des Wassers aus dem Versuchsbrunnen IEBP 1 während des Pumpversuchs lediglich geringfügig verändert. Hinsichtlich der elektrischen Leitfähigkeit als Maß für die Mineralisierung des Wassers sowie für die Konzentrationen an Natrium und Hydrogencarbonat (entspricht der Säurekapazität bis pH 4,3), ist bis zum Ende des Pumpversuchs kontinuierlich eine leichte Zunahme um ca. 10 % des Ausgangswertes (gemessen am 30.01.2008) festzustellen. Dies deutet auf einen Anstieg des Anteils an Tiefengrundwasser im geförderten Grundwasser hin.

Wie aus der grafischen Darstellung des Konzentrationsverlaufs in Abbildung 20 hervorgeht, blieb der Gehalt an den Härtebildnern Calcium und Magnesium sowie auch an natürlichen organischen Substanzen (Huminstoffe) über die gesamte zweimonatige Entnahme praktisch konstant. Auffallend ist jedoch ein deutlicher Anstieg der Sulfatkonzentration mit der Förderzeit. Dies ist ein Hinweis auf einen zunehmenden Einfluss von aerobem Oberflächenwasser (Infiltration aus der Theiß) auf die Sulfat reduzierenden Prozesse in der Uferzone. Parallel zum Anstieg der Sulfatkonzentration geht der Arsengehalt im flussnahen Grundwasser mit der Förderzeit tendenziell zurück. Dies ist deshalb überraschend, da der Anteil an Tiefgrundwasser nach dem Verlauf der Konzentrationen an Natrium und Hydrogencarbonat zugenommen hat.



**Abbildung 20: Verlauf ausgewählter Parameter während des Pumpversuchs IEBP 1**

#### 4) Veränderungen der Wässer aus den Messstellen IBP 1 und IBP 3

Die Beschaffenheit des Wassers aus der Messstelle IBP 1, die 500 m flussabwärts zum Versuchsbrunnen IEBP 1 gelegen ist, veränderte sich durch die mehrwöchige Förderung erwartungsgemäß nicht. Dies zeigt ein Vergleich der Analysen, die am 11.04.2007 bzw. 31.03.2008 am IBP 1 durchgeführt wurden (Anlagen 15 und 23).

Wie die Zusammenstellung ausgewählter Messdaten in Tabelle 13 zeigt, trat dagegen eine deutliche Veränderung der Beschaffenheit des Grundwassers aus der Messstelle IBP 3 auf (ca. 60 m landseitig zum Versuchsbrunnen IEBP 1).

**Tabelle 13** Ausgewählte Analysedaten des Grundwassers aus der Messstelle IBP 3 vor und während des Pumpversuchs am IEBP 1

		<b>IBP 3 11.04.2007</b>	<b>IBP 3 18.03.2008</b>
Elektr. Leitf. (25°C)	mS/m	55	80,2
Färbung (UV <sub>436</sub> )	m <sup>-1</sup>	0,4	0,5
TOC	mg/L	3,3	3,6
Säurekap. pH 4,3	mmol/L	4,9	8,9
Härte	°dH	7,5	8,6
Natrium	mg/L	71	141
Sulfat	mg/L	10	< BG
Ammonium	mg/L	0,5	0,9
Eisen gel.	mg/L	0,2	0,4
Methan	mg/L	3,8	6,1
Bor	mg/L	0,4	0,5
Arsen	mg/L	0,072	0,074

Aus dem Anstieg der Messwerte für Natrium und die Säurekapazität bis pH 4,3 (entspricht in guter Näherung der Konzentration an Hydrogencarbonat) kann abgeleitet werden, dass durch die ca. sechswöchige Förderung aus dem IEBP 1 der Anteil an Tiefengrundwasser im Bereich der Messstelle IBP 3 zugenommen hat. Dies war aufgrund der hydrogeologischen Randbedingungen auch zu erwarten (zunehmende Erfassung von landseitigem Grundwasser durch Absenkung im Brunnen IEBP 1). Überraschend ist dagegen der Befund, dass die Arsenkonzentration im Wasser aus der Messstelle IBP 3 nicht zusammen mit den Werten für Natrium und Hydrogencarbonat angestiegen ist.

Ebenso wie der im vorangegangenen Kapitel erläuterte Rückgang der Arsenkonzentration im Wasser aus dem Versuchsbrunnen IEBP 1 während des zweimonatigen Pumpversuchs (bei gleichzeitigem Anstieg der Werte für Natrium und Hydrogencarbonat) ist dies ein Hinweis darauf, dass die erhöhten Arsenkonzentrationen im flussnahen Grundwasser nicht allein auf den Zustrom von arsenhaltigem Tiefengrundwasser zurückzuführen sind. Vermutlich wird ein Teil des im flussnahen

Grundwasser gelösten Arsens durch die besonderen Redoxverhältnisse in der Uferzone (Sulfat reduzierender Chemismus) freigesetzt.

#### *2.4.6 Aufbereitungsversuche mit Uferfiltrat*

Am 14.03.2008 wurde unmittelbar neben dem Versuchsbrunnen IEBP 1 eine kleintechnische Anlage errichtet, die in den Anlagen 27a bis d näher beschrieben ist. Damit erfolgten in der Zeit vom 15.03. bis 31.03.2008 Aufbereitungsversuche mit dem Wasser des Versuchsbrunnens. Ergänzend fanden Becherglasversuche mit dem geförderten Uferfiltrat sowohl vor Ort als auch im Labor des TZW statt.

##### 1) Ergebnisse der kleintechnischen Aufbereitungsversuche

Der Versuchsablauf mit den wesentlichen Einstellungen und Messergebnissen (Vor-Ort- und Laboranalysen) ist in den Anlagen 28a bis I in tabellarischer Form beigefügt. Daraus lassen sich folgende wesentliche Ergebnisse ableiten:

##### **Belüftungsstufe**

- Bei einer Flächenbelastung von 15 – 30 m<sup>3</sup>/m<sup>2</sup>/h (Rieselhöhe 1 m, keine Zwangsbelüftung) wurden im Riesler 9 - 10 mg/L O<sub>2</sub> und damit ausreichend hohe Mengen an Sauerstoff für die oxidativen Aufbereitungsprozesse in das Wasser eingetragen.
- Die Eliminationsraten für Methan und Kohlendioxid betragen dabei ca. 90 % bzw. 60 % (Rohwassergehalt: 4,3 mg/L CH<sub>4</sub>, 10 mg/L CO<sub>2</sub>.)
- Trotz der relativ geringen Eisengehalte des Rohwassers (0,9 mg/L Fe), verockerte die Füllkörperschüttung innerhalb des zweiwöchigen Betriebs stark.

##### **Quarzsandfilter *allgemein***

- Bereits rd. 15 Stunden nach Inbetriebnahme erfolgte eine vollständige Eisen- und Manganentfernung (eingearbeitetes Material aus WW Becej).
- Eine Ammoniumoxidation gelang dagegen innerhalb des zweiwöchigen Betriebs nicht.
- Aus der Sauerstoffzehrung im Filter kann auf einen weitgehenden Abbau der nach der Rieslerbelüftung noch vorhandenen Restmengen an Methan (ca. 0,5 mg/L) geschlossen werden.
- Weiterhin ist von einer vollständigen H<sub>2</sub>S-Elimination im Filter auszugehen. Nach ca. 3 Betriebstagen war der Filterablauf geruchlos, während das Rohwasser und auch der Ablauf des Rieslers nach H<sub>2</sub>S rochen.
- Huminstoffe wurden durch die Quarzsandfiltration kaum entfernt (vgl. Werte für SAK<sub>436</sub> und TOC)

### **Arsenelimination im Quarzsandfilter**

In Tabelle 14 sind ausgewählte Analysenbefunde zur Arsenelimination im Quarzsandfilter zusammengestellt.

**Tabelle 14: Ausgewählte Ergebnisse zur Arsenelimination in der Pilotanlage**

Filtergeschwindigkeit m/h	Oxidationsmittel mg/L	Kontaktzeit n. Belüft./Oxid. min	Flockungsmittel mg/L	Arsenelimination %
10	-	5	-	25
5	-	10	-	35
3	-	12	-	52
5	2,5 H <sub>2</sub> O <sub>2</sub>	10	-	48
5	2,0 Cl <sub>2</sub>	10	-	42
5	6,0 KMnO <sub>4</sub>	10	-	39
5	-	10	2,0 Fe <sup>2+</sup>	64
5	-	10	2,6 Fe <sup>3+</sup>	42
5	-	60	2,0 Fe <sup>3+</sup>	57
5	5,0 H <sub>2</sub> O <sub>2</sub>	10	2,0 Fe <sup>3+</sup>	60
5	4,0 H <sub>2</sub> O <sub>2</sub>	60	4,0 Fe <sup>3+</sup>	58
5	2,5 Cl <sub>2</sub>	10	3,0 Fe <sup>3+</sup>	54

Danach betrug die Arsenelimination im Quarzsandfilter ohne Chemikaliendosierung etwa 40 % und konnte durch Zugabe von Flockungs- und/oder Oxidationsmitteln lediglich tendenziell auf maximal ca. 60 % gesteigert werden. Die Ursache für diese **unzureichende Arsenelimination** ist unklar. Vermutlich ist sie auf eine Störung der katalytisch-adsorptiven Prozesse durch die H<sub>2</sub>O<sub>2</sub>-Zugabe am 16.03.2008 zurückzuführen. Als Folge dieser Dosierung traten stark erhöhte Mangankonzentrationen im Filterablauf von bis zu 1,3 mg/L auf (Rohwasser: 0,11 mg/L Mn). Selbst nach ca. zweiwöchiger Fahrweise ohne Chemikaliendosierung lag die Mangankonzentration im Filterablauf am 27.03.2008 noch bei 0,22 mg/L.

Da die Fördereinrichtungen am Versuchsbrunnen am 31.03.2008 deinstalliert werden mussten, waren keine kleintechnischen Aufbereitungsversuche zur Klärung des Sachverhalts mehr möglich. Die nachfolgend erläuterten Ergebnisse alternativ durchgeführter Becherglas-Flockungsversuche zeigen jedoch, dass eine weitestgehende Arsenentfernung mit dem Prozess Oxidation-Flockung-Filtration möglich ist.



## 2) Ergebnisse der Becherglas-Flockungsversuche mit Uferfiltrat

Vor-Ort-Messungen am 28.03. und 30.03.2008

In Tabelle 15 sind die Befunde von fünf ausgewählten Becherglasversuchen, die am 28.03. und 30.03.2008 vor Ort durchgeführt wurden, aufgeführt (sämtliche Ergebnisse der Vor-Ort-Becherglasversuche vom 28.03./30.03.2008 sind in den Anlagen 28f, g und j enthalten).

Es ist zu erkennen, dass Arsen bei einer Flockung mit 5 mg/L Fe (als Eisen(III)-Salz) praktisch vollständig aus dem belüfteten Wasser der Pilotanlage (Ablauf Quarzsandfilter) entfernt wurde. Bei Zugabe von 2,5 mg/L Fe liegt die Entfernungsrate bei ca. 70 % und kann durch vorherige Oxidation auf ca. 90 % gesteigert werden.

**Tabelle 15: Ausgewählte Ergebnisse der Vor-Ort-Flockungs-Becherglasversuche mit belüftetem Wasser aus dem Versuchsbrunnen IEBP 1**

As <sub>0</sub> mg/L	0,053	0,045	0,045	0,042	0,042
+ Oxid. mittel mg/L	-	-	6 H <sub>2</sub> O <sub>2</sub>	-	2 Cl <sub>2</sub>
+ Fe <sup>3+</sup> mg/L	5	2,5	2,5	2,5	2,5
<i>nach Flockung/Sedimentation/Filtration</i>					
As mg/L	0,003	0,011	0,003	0,0015	0,005
As-Elimination %	<b>94</b>	75	<b>93</b>	64	<b>88</b>

### Laborversuche im TZW mit Wasser aus dem Versuchsbrunnen IEBP 1

Am 31.03.2008 wurden Proben aus dem Versuchsbrunnen IEBP 1 entnommen und damit am 03.04.2008 im Labor des TZW in Karlsruhe Becherglasversuche zur Entfernung von Arsen mittels Flockung/Filtration durchgeführt (Vorgehensweise und Analysenergebnisse siehe Anlage 29).

Hierbei gelang mit Eisensalz eine effektive Arsenelimination. Allerdings sind diese Ergebnisse nur bedingt auf die Grundwasseraufbereitung übertragbar, da es beim Transport von Grundwasserproben nach Karlsruhe zu einer weitestgehenden Oxidation von Arsenat(III) zu Arsenat(V) gekommen ist. Dies haben spätere Messungen ergeben (vgl. TZW-Teilbericht 6).

### 3) Vor-Ort-Messungen am 11.09.2008

Um die Entfernbarkeit von Arsen aus dem Uferfiltrat der Theiß eindeutig nachzuweisen, erfolgten im September 2008 nochmals Versuchsreihen vor Ort mit Rohwasser aus der Grundwassermessstelle IBP 4. Diese Messstelle befindet sich ca. 1 m vom Versuchsbrunnen IEBP 1 entfernt und liefert ein Wasser, das eine mit dem Versuchsbrunnenwasser vergleichbare Beschaffenheit aufweist (Analysergebnisse in Anlage 30). Vor Beginn der Messungen wurde die Messstelle IBP 4 vier Stunden mit einem Volumenstrom von 0,9 m<sup>3</sup>/h abgepumpt und bei den Becherglasversuchen folgende Methodik angewandt:

- Befüllen der 1 L Bechergläser mit 0,5 L Grundwasser IBP 4
- 5 min Blasenbelüftung (Luft mittels Gebläse über Fritte eingetragen)
- Flockung:
  - 1) Chemikalienzugabe
  - 2) 0,5 min Rühren mit 250 U/min
  - 3) 5 min Rühren mit 50 U/min
  - 4) 10 min Rühren mit 25 U/min
- 5 min Sedimentation
- Probeentnahme aus Überstau (über 0,45 µm Membranfilter filtriert)

Die Messergebnisse sind in Anlage 31 aufgelistet und lassen sich wie folgt zusammenfassen:

- Sowohl mit Flockungsmittel auf Eisen- als auch auf Aluminiumbasis (4 mg/L Fe bzw. 1,5 mg/L Al) gelingt nur eine geringe Arsenentfernung
- Durch Ansäuern auf pH 6 oder Verdoppelung der Flockungsmittelzugabe kann die Arsenentfernung lediglich tendenziell verbessert werden
- Auch eine Erhöhung der Kontaktzeit während der Flockung (35 min statt 10 min Langsamrühren) verbessert die Arsenelimination nicht
- Nach Oxidation mit Kaliumpermanganat oder Chlor kann Arsen durch Flockung/Filtration effektiv entfernt werden
- Dabei zeigt Eisen- gegenüber Aluminiumsalz eine bessere Wirksamkeit
- Wasserstoffperoxid ist als Oxidationsmittel weniger geeignet
- Huminstoffe werden bei der Flockung effektiv entfernt (ca. 50 % Elimination des SAK<sub>436</sub>)

Im Hinblick auf eine großtechnische Umsetzung ist auch von Bedeutung, dass sich die Eisenfällungsprodukte bei Parallelversuchen sowohl über Papierfilter (20 –

30  $\mu\text{m}$ ) als auch über eine 30 cm hohe Schüttung aus Quarzsand (Körnung 0,71 - 1,25 mm) ebenso gut abscheiden ließen wie mittels Filtration über einen 0,45  $\mu\text{m}$  Membranfilter. Letzteres ergibt somit auf die Quarzsandfiltration übertragbare Ergebnisse hinsichtlich der Entfernung der arsenhaltigen Fällungsprodukte und wurde aus praktischen Gründen bei den Becherglasversuchen angewandt.

#### *2.4.7 Konzept zur Aufbereitung des Uferfiltrats*

Die hydrochemischen Untersuchungen belegen eine effektive Reinigung des infiltrierten Flusswassers bei der Bodenpassage (vgl. Kapitel 2.4.2 und 2.4.5). Dabei werden im feinsandigen Aquifer einerseits partikuläre Verunreinigungen des Flusswassers, insbesondere auch pathogene Mikroorganismen zurückgehalten. Andererseits erfolgt durch die hohe biologische Aktivität auch ein weitgehender Abbau von gelösten organischen Substanzen.

Hervorzuheben ist dabei das anaerob-sufidische/methanogene Milieu des flussnahen Grundwasserleiters. Da Schwermetallkationen schwerlösliche Sulfide bilden, besteht somit im vorliegenden Fall durch die Uferfiltration auch eine Barriere gegen Schwermetallbelastungen der Theiß, wie sie z. B. durch den Cyanidunfall in Baia Mare im Januar 2000 verursacht wurden. In Flusssedimenten der Theiß sind Schwermetalle vorhanden, die bei Hochwasser mobilisiert werden können [14, 15]. Auch bei einem nochmaligen Auftreten giftiger Cyanide im Flusswasser böte die Uferfiltration einen wirksamen Schutz. Dies zum einen durch einen Zerfall der relativ instabilen Cyanidionen bzw. der Blausäure bei der mehrtägigen Bodenpassage des Flusswassers [16]. Zum anderen ist davon auszugehen dass unter den anaeroben Milieubedingungen aus Cyanid ungiftige Hexacyanoferratkomplexe gebildet werden (Fe(II)-Gehalt im Uferfiltrat ca. 1 mg/L).

Somit stellt die Bodenpassage des Flusswassers eine äußerst effektive Aufbereitungsstufe dar. Im Rahmen einer Nachbehandlung müssen jedoch die im Untergrund freigesetzten reduzierten Verbindungen Arsen(III) sowie Methan, Ammonium, Eisen(II) und Mangan(II) aus dem Uferfiltrat entfernt werden. Zu berücksichtigen sind ferner leicht erhöhte Mengen an natürlichen organischen Inhaltsstoffen (Huminstoffe).

Nach den in Kapitel 2.4.6 beschriebenen Untersuchungsergebnissen ist für das Theiß-Uferfiltrat voraussichtlich eine konventionelle Aufbereitung geeignet bzw. ausreichend, sodass sich folgende Verfahrenskombination ergäbe:

1. Belüftung/Oxidation
2. Flockung/Sedimentation
3. Filtration
4. Desinfektion

Einschließlich Kapitaldienst betragen die spezifischen Aufbereitungskosten hierbei schätzungsweise 0,1 bis 0,2 €/m<sup>3</sup> zuzüglich etwa 0,15 €/m<sup>3</sup> für den Bau und den Erhalt der Uferfiltratbrunnen. Nach den vorliegenden Analyseergebnissen sind anthropogene Mikroverunreinigungen nicht in relevanten Konzentrationen im Uferfiltrat vorhanden. Aus Vorsorgegründen sollte bei den Planungen jedoch eine spätere Erweiterung des Prozesses um eine adsorptive und oxidative Stufe vorgesehen werden.

Hinzuweisen ist auf den Umstand, dass es sich bei der konzipierten Uferfiltratgewinnung und –aufbereitung um eine neuartige Variante handelt. Dabei stellen insbesondere die geringe hydraulische Leitfähigkeit des Aquifers ( $k_f < 10^{-4}$  m/s), das Auftreten von Arsen sowie der anaerob-methanogene Wasserchemismus erhöhte Anforderungen an die Konzeption und den Betrieb von Fassungs- und Aufbereitungsanlagen. Für die großtechnische Realisierung ist deshalb ein stufenweises Vorgehen erforderlich. Dabei sollten zunächst im Rahmen von kleintechnischen Versuchen u. a. folgende aufbereitungstechnische Details geklärt werden:

- Verzicht auf eine Sedimentationsstufe möglich? („Direktfiltration“)
- Geeignetes Oxidationsmittel (Vorzugskemikalie ist Kaliumpermanganat)
- Desinfektionsmittel (evt. Chlordioxid da u.a. relativ hoher pH)
- Korrosionschemische Stabilisierung

Der letztgenannte Punkt ist von Bedeutung, da bislang sauerstofffreie Wässer in den kommunalen Netzen verteilt wurden. Erfahrungsgemäß steigt die Korrosionsgefahr bei einer Umstellung auf die Verteilung eines sauerstoffhaltigen Wassers.

Im nächsten Schritt sollte eine Großanlage mit begrenzter Nennleistung (1. Ausbaustufe, ca. 50 L/s) errichtet werden, um Betriebserfahrungen als Grundlage für eine optimierte Konzeption weiterer Ausbaustufen zu sammeln.

## **2.5 Veröffentlichungen und Vorträge**

Vortrag S. Stauder auf der IWA-Tagung „GROUNDWATER MANAGEMENT IN-THE DANUBE RIVER BASIN AND OTHER LARGE RIVER BASINS“, Belgrade 7-9.06.2007

Stauder, S.: Chemistry and treatment of ground water in the Vojvodina, Water Science & Technology: Water Supply Vol 7 No 3 pp 93–101 (2007)

Vortrag S. Stauder auf dem International Congress on Production of Safe Water“ , Izmir (Türkei) 21.01-23.01.2009; Publikation mit dem Vortragstitel “Speciation and removal of Arsenic in an alkaline, anoxic groundwater with high NOM content–Case study Pannonian Basin“ ist in Vorbereitung

## **2.6 Literatur**

[1] Sustainable solutions to improve the quality of drinking water affected by high arsenic contents in 3 vojvodinian regions, City of Vienna MA 31, 2006

[2] Hydrogeology and prospective in groundwater supply of four selected municipalities in Vojvodina (Serbia), Z. Stevanović, 2005 (auf Projekt CD)

[3] Expert opinion: Possibilities for solving water supply problems in Zrenjanin, Kikinda and Becej, M. Milivojevic und M. Martinovic, 2005 (auf Projekt CD)

[4] Guidebook for the preparation of the water quality improvement program of the autonomous province Vojvodina, N. Ferenc et al, 2006, Published by Izdao, DKMT Kht. 6720 Szeged, HU

[5] Bericht der Kommission zur Behebung des Problems der Wasserversorgung in Zrenjanin (TZW-Übersetzung des serbischen Berichtes), JKP Wasserwerk und Kanalisation Zrenjanin, 2005 (auf Projekt CD)

[6] Unterlagen zur Uferfiltraterkundung in Aradac/Zrenjanin, GEOTEC und Geoin Group, 2006 (auf Projekt CD)

[7] NOM and Arsenic Removal from Natural Water by Enhanced Coagulation, M. Periši, 2006, [http://www.ewaonline.de/journal/2006\\_08.pdf](http://www.ewaonline.de/journal/2006_08.pdf) (auf Projekt CD)

[8] Removal of humic substances and arsenic from raw water by enhanced coagulation using inorganic polymer of Al and SiO<sub>2</sub>, M. Periši, 2005, SCG. Application No. 2005/0606. (auf Projekt CD)

[9] Die Auswirkung der Rheinsanierung auf die Qualität des geförderten Rohwassers und den Aufbereitungsaufwand am Beispiel des Wasserwerks Wittlaer. Arbeitsgemeinschaft Rhein-Wasserwerke e.V. – Jahresbericht 1998. S.71 - 89.

[10] Trinkwasser aus dem Rhein? Bericht über ein Verbundforschungsvorhaben zur Sicherheit der Trinkwassergewinnung aus Rheinuferfiltrat. Academia Verlag Sankt Augustin, H. Sontheimer, 1991

[11] Technische Konzepte und abgestimmte Betriebsweisen zur optimalen Anpassung der Uferfiltration an lokale Randbedingungen – Kernprojekt B1. In: Exportorientierte F&E auf dem Gebiet der Wasserver- und –entsorgung. Teil I: Trinkwasser, Band 2 Leitfaden. Hrsg. DVGW-Technologiezentrum Wasser (TZW), S. Lenk et al, 2005

[12] Anthropological influences of the Tisa River, M. Rodic et al, 2003, <http://www.prague2003.fsu.edu/content/pdf/607.pdf> (auf Projekt CD)

[13] Exportorientierte F&E auf dem Gebiet der Wasserver- und –entsorgung. Teil I: Trinkwasser, Band 2 Leitfaden. Hrsg. DVGW-Technologiezentrum Wasser (TZW) S. 66, 2005

[14] Schwermetallbelastungen in der Szamos und Theiss, verursacht u.a. durch den Cyanidunfall in Baia Mare, Deutsch-Ungarischer Workshop der Rheinland Pfälzischen Landesregierung und Industrie- und Handelskammer, Mai 2001, W. von Tümpling, 2001

[15] Gold kann schmutzig sein. Welche längerfristigen Auswirkungen hatte das Unglück bei Baia Mare auf die Theiss? In: Unland G, Herzig P (Hrsg) Wiss Symp „Der Bergbaubezirk Baia Mare, Rumänien. Eine komplexe Betrachtung der Lagerstätte, des Bergbaus, der Aufbereitung sowie der Umweltfolgen. 4. und 5. April 2002 in Freiberg, S. Hum, J. Matschullat, 2003

[16] Hoch giftig, aber gut abbaubar. Schäden durch Cyanide im Flusswasser, Chemie plus 15 (4), 67, W. von Tümpling, 2006

### 3 Erfolgskontrollbericht

#### 3.1 Beitrag zu den förderpolitischen Zielen

Es wurden Möglichkeiten zur Aufbereitung des Tiefengrundwassers sowie des alluvialen Grundwassers (Uferfiltrat) in der serbischen Region Vojvodina untersucht. Darauf sowie auf einer Bestandsaufnahme der bestehende Versorgungssituation basierend, wurde ein großtechnisches Konzept zur Neuordnung der Trinkwasserversorgung für etwa 270.000 Einwohner in den Kommunen Becej, Kikinda, Novi Becej und Zrenjanin unter Einbeziehung der Ressource Uferfiltrat ausgearbeitet. Das Projekt liefert somit einen Beitrag zur Entwicklung nachhaltiger Wassertechnologien.

#### 3.2 Wesentliche wissenschaftlich-technische Ergebnisse

Die **Tiefengrundwässer** der Region Vojvodina enthalten, neben den bereits bekannten Problemstoffen (Arsen, Huminstoffe u. a.), auch erhöhte Mengen an Methan und Bor. Arsen liegt als hochtoxisches Arsen(III) vor (arsenige Säure,  $\text{H}_3\text{AsO}_3$ ) und nicht in einer gering toxischen organischen Bindungsform, wie von serbischen Fachleuten postuliert wurde. Die Arsenspeziation im Labor (z. B. mittels IC-ICP/MS) ist erschwert, da Arsenat(III) beim vorliegenden Wasserchemismus relativ schnell (beim Probentransport) zu Arsenat(V) oxidiert wird. Dies ist möglicherweise auf die Bildung von organischen Peroxiden zurückzuführen. Es wurden deshalb on-site-Methoden zum Nachweis von Arsenat(III) eingesetzt bzw. entwickelt (Fällung/Flockung, Nanofiltration sowie Thioarsenatbildung). Der Grundwasserchemismus einschließlich des erhöhten Arsengehalts resultiert aus den geochemischen bzw. hydrogeologischen Verhältnissen im Aquifer und ist nicht anthropogen bedingt.

Die Aufbereitungsversuche ergaben, dass sowohl die Huminstoffe als auch Arsen prinzipiell mittels konventioneller Aufbereitung (u. a. Oxidation, Flockung) entfernt werden können. Allerdings sind sehr hohe Chemikalienzugaben erforderlich, und es müssten zusätzliche Aufbereitungsverfahren wie z. B. die Umkehrosmose eingesetzt werden, um u. a. die serbischen Trinkwassergrenzwerte für Bor, Natrium und die elektrische Leitfähigkeit einzuhalten. Die spezifischen Aufbereitungskosten betragen dann bis zu 0,9 €/m<sup>3</sup> (ohne Wasserverteilung!).

Problematisch wäre dabei auch der hohe Abwasseranfall dieser Verfahrenstechnik von 15 bis 25 % der Trinkwassermenge. Dies nicht nur unter ökologischen Ge-

sichtspunkten, sondern insbesondere im Hinblick auf die langsame Grundwasserneubildung im genutzten Aquifer.

Im zweiten Projektabschnitt wurde die **Flusswasserbeschaffenheit der Theiß** näher untersucht, um deren Eignung als alternative bzw. ergänzende Trinkwasserressource beurteilen zu können. Das Flusswasser ist danach vergleichsweise gering mit anthropogenen Mikroverunreinigungen, jedoch deutlich bakteriell sowie auch mit organischen Stoffen belastet. Zu berücksichtigen sind auch starke saisonale Schwankungen der Abflussmenge sowie der Mineralisierung und der Temperatur des Flusswassers.

Eine **Uferfiltratgewinnung** bietet somit aus wasserchemischer bzw. aufbereitungstechnischer Sicht deutliche Vorteile gegenüber einer direkten Nutzung von Flusswasser und wurde deshalb eingehend untersucht (Bau von Grundwassermessstellen und eines Uferfiltratversuchsbrunnens, Langzeitpumpversuch, geophysikalische Messungen, Grundwassermodell). Es ergaben sich folgende wesentlichen Ergebnisse:

- Guter Anschluss der Theiß an den alluvialen Grundwasserleiter
- Lehmige Deckschichten (0 - 6 m)
- Feinsandiger Aquifer (maximale Korngröße in 18 - 24 m Tiefe: 0,1 - 0,3 mm)
- Relativ geringe Ergiebigkeit ( $k_f$ : ca.  $5 \cdot 10^{-5}$  m/s)

Entgegen der bisherigen Einschätzung serbischer Experten belegen die Simulationsrechnungen mit dem erarbeiteten Grundwassermodell, dass an der Theiß ausreichende Mengen an Uferfiltrat für eine öffentliche Trinkwasserversorgung gewonnen werden können. Vorgaben für den Bau entsprechender Fassungsanlagen wurden ausgearbeitet.

Nach den umfassenden Wasseranalysen liefert der alluviale Grundwasserleiter an der Theiß ein anaerobes Uferfiltrat mit mittlerer Mineralisierung (Härte: ca. 10 °dH) und erhöhten Gehalten an Methan, Ammonium, Eisen(II), Mangan(II) und Arsen(III). Dieser Wasserchemismus ist überwiegend auf biologische Prozesse während der Bodenpassage und nur zu einem geringeren Teil auf den Zustrom von Tiefengrundwasser (10 – 20 %) in die Uferfiltratfassungen zurückzuführen.

Hervorzuheben ist die effektive mechanische und biologische Reinigung des infiltrierten Flusswassers bei der Bodenpassage. Partikuläre Inhaltsstoffe (u. a. pathogene Mikroorganismen und Schwebstoffe) werden praktisch vollständig und gelöste Verunreinigungen sehr weitgehend entfernt. Eine Besonderheit des untersuch-



ten Standorts an der Theiß ist der feinsandige Aquifer mit einem anaerob-sulfidischen Milieu. Die Uferfiltration stellt deshalb im vorliegenden Fall u. a. auch eine wirksame Barriere bei Auftreten von Schwermetallen und toxischem Cyanid dar (Fällung von Schwermetallsulfiden bzw. Bildung von untoxischem Hexacyanoferrat). Diese Verunreinigungen können aufgrund des Bergbaus in Rumänien (oberstromig an der Theiß) eine Rolle spielen.

Eine konventionelle Aufbereitung mit den Stufen Belüftung/Oxidation, Flockung, Filtration und Desinfektion ist nach den Ergebnissen der hierzu durchgeführten kleintechnischen Versuche bzw. Labormessungen zur Behandlung des Uferfiltrats ausreichend bzw. geeignet. Einschließlich dem Bau von Brunnenanlagen betragen die spezifischen Kosten für die Bereitstellung von Trinkwasser 0,25 bis 0,35 €/m<sup>3</sup> (ohne Wasserverteilung!). Vor einer großtechnischen Realisierung sind noch wichtige Fragen, z. B. die korrosionschemische Stabilisierung des produzierten Trinkwassers betreffend, zu klären

### **3.3 Verwertungsplan**

Die Uferfiltratgewinnung an der Theiß ist eine Erfolg versprechende Technik zur langfristigen Sicherstellung der Trinkwasserversorgung in der Vojvodina und weist insbesondere hinsichtlich der Nachhaltigkeit sowie auch unter Kostenaspekten gegenüber den bislang verfolgten Varianten mit Nutzung und Aufbereitung von Tiefengrundwasser Vorteile auf. Sie sollte deshalb unbedingt weiterverfolgt werden.

Es wird vorgeschlagen, zunächst für die Versorgung der rd. 15.000 Einwohner in der Stadt Novi Becej entsprechende Anlagen zu errichten. Die Investitionskosten dafür werden zu rd. 4 Mio. € abgeschätzt (ca. 6 Brunnen, Transportleitungen und Wasseraufbereitungsanlage, Nennleistung 50 L/s).

Damit können einerseits die dringendsten Qualitätsprobleme im Untersuchungsgebiet schnell gelöst werden (Arsengehalt des derzeit in Novi Becej verteilten Trinkwassers 200 µg/L!). Andererseits besteht dann die Möglichkeit, Betriebserfahrungen bei der Gewinnung und Aufbereitung von Theiß-Uferfiltrat zu sammeln. Diese wären Grundlage für eine optimierte Konzeption der weiteren Ausbaustufen (Versorgung der Kommunen Novi Becej und Zrenjanin sowie Bau einer zweiten Uferfiltratanlage für Kikinda). Aufgrund der für eine Uferfiltratgewinnung neuartigen Randbedingungen, die die Theiß bietet (feinsandiger Aquifer, anaerob-methanogenes Milieu), ist ein derartiges stufenweises Vorgehen empfehlenswert.

In Vorgesprächen mit der KfW-Bank erklärte diese ihre prinzipielle Bereitschaft zur Finanzierung der Neugestaltung der Trinkwasserversorgung Novi Becej. Daraufhin wurde ein Arbeits- und Finanzierungsplan für die weiteren Planungen ausgearbeitet (geschätzte Gesamtkosten 450.000 €, vgl. Anlage 32). Diese Planungen sollen zu ca. einem Drittel mit serbischen Mitteln finanziert werden. Hierzu fanden bereits mehrere Gespräche mit Vertretern der Provinzregierung Vojvodina statt, die seit 2008 für die Trinkwasserversorgung im Untersuchungsgebiet zuständig ist (vorher Zentralregierung in Belgrad).

Die gesamten Investitionskosten für eine Trinkwasserversorgung der Städte *Kikinda, Novi Becej und Zrenjanin* einschließlich sämtlicher umliegender Gemeinden (Endausbau für rd. 230.0000 Einwohner) mittels zweier Uferfiltratgewinnungen an der Theiß wurden zu 70 Mio. € abgeschätzt („Long Run Incremental Costs“: 0,95 €/m<sup>3</sup>). Hauptkostenfaktor sind dabei die Anlagen für die Wasserverteilung und Speicherung.

Gegenüber einer auf der Nutzung und Aufbereitung von Tiefengrundwasser beruhenden Trinkwasserversorgung ergeben sich nicht nur Kostenvorteile sondern die Uferfiltratgewinnung stellt auch eine deutlich nachhaltigere, ökologisch sinnvolle Lösung dar.

### **3.4 Durchführung der Arbeiten**

Sämtliche im Rahmen des Vorhabens ausgeführten Arbeiten waren Ziel führend für das Projekt und alle Mittel wurden sachgerecht bzw. zweckgebunden verbraucht.

### **3.5 Präsentationsmöglichkeiten für mögliche Nutzer**

Die wesentlichen Projektergebnisse sind im vorliegenden Abschlussbericht zusammengestellt, der als pdf-file zum download auf der TZW-homepage ([www.tzw.de](http://www.tzw.de)) bereitgestellt wird. Der Projektträger erhält darüber hinaus eine CD, mit sämtlichen Unterlagen und Ergebnissen, die im Projekt verwendet bzw. erzielt wurden (14 Detailberichte, Literatur, Karten ect.).

### **3.6 Ausgaben- und Zeitplanung**

Die Ausgaben und Zeitplanung wurden eingehalten. Mit den geschilderten Veröffentlichungen in wissenschaftlichen Zeitschriften, auf internationalen Tagungen und im Internet wird das Projekt als abgeschlossen angesehen.

#### 4. Kurzfassung (Berichtsblatt)

1. ISBN oder ISSN pdf-file ( <a href="http://www.tzw.de">http://www.tzw.de</a> )	2. Berichtsart (Schlussbericht oder Veröffentlichung) Schlussbericht
3. Titel Neukonzeption der Trinkwasserversorgung unter Berücksichtigung neuartiger Verfahren zur Aufbereitung alkalischer, stark arsen- und huminstoffhaltiger Grundwässer am Beispiel der Städte Becej, Novi Becej, Kikinda und Zrenjanin in der Region Vojvodina (Serbien)	
4. Autor(en) [Name(n), Vorname(n)] Stauder, Stefan Geiges, Matthias Kühn, Wolfgang	5. Abschlussdatum des Vorhabens April 2009
	6. Veröffentlichungsdatum Unterschiedliche Termine
	7. Form der Publikation Int. Zeitschriften, internet
8. Durchführende Institution(en) (Name, Adresse) Technologiezentrum Wasser Karlsruher Straße 84 D-76139 Karlsruhe, Germany	9. Ber. Nr. Durchführende Institution --
	10. Förderkennzeichen 02WT0647
	11. Seitenzahl 75 (Detailberichte: ca. 1000)
12. Fördernde Institution (Name, Adresse) Bundesministerium für Bildung und Forschung (BMBF) 53170 Bonn	13. Literaturangaben 16 (Detailberichte: ca. 50)
	14. Tabellen 15 (Detailberichte: ca. 150)
	15. Abbildungen 20 (Detailberichte: ca. 200)
16. Zusätzliche Angaben Zusätzlich zum Schlussbericht wurden 14 Detailberichte angefertigt, diese und weitere projektbezogene Informationen wurden dem Projektträger auf einer CD zur Verfügung gestellt	
17. Vorgelegt bei (Titel, Ort, Datum) --	
18. Kurzfassung Das Tiefengrundwasser in der Region Vojvodina weist in verschiedener Hinsicht eine sehr problematische Zusammensetzung auf, u.a. enthält es hohe Mengen an toxischem Arsenat(III). Eine Aufbereitung zur Trinkwassergewinnung erfordert hohe Chemikaliendosismengen und müsste z.T. auch eine Membranentsalzung beinhalten. Hieraus resultieren spezifische Aufbereitungskosten von bis zu 0,9 €/m <sup>3</sup> . Problematisch wäre dabei auch der hohe Abwasseranfall von 15-25% der Trinkwassermenge. Dies nicht nur unter ökologischen Gesichtspunkten, sondern auch im Hinblick auf die langsame Grundwasserneubildung. Die Uferfiltratgewinnung an der Theiß ist eine Erfolg versprechende Alternative zur Nutzung von Tiefengrundwasser. Das Flusswasser der Theiß ist relativ gering anthropogen belastet und die umfassenden hydrogeologischen Erkundungsarbeiten (u.a. Bau eines Versuchsbrunnens und Langzeitpumpversuch, Erstellung eines Grundwassermodells) zeigen, dass an der Theiß ausreichende Mengen an Uferfiltrat gewonnen werden können. Hervorzuheben ist eine effektive mechanische und biologische Reinigung des infiltrierten Flusswassers bei der Bodenpassage. Partikuläre Inhaltsstoffe (u.a. pathogene Mikroorganismen und Schwebstoffe) werden praktisch vollständig und gelöste Verunreinigungen weitgehend entfernt. Eine Besonderheit des untersuchten Standorts an der Theiß ist der feinsandige Aquifer mit einem anaerob-sulfidischen Milieu. Die Uferfiltration stellt deshalb im vorliegenden Fall auch eine Barriere bei Auftreten von Schwermetallen und toxischem Cyanid im Flusswasser dar. Voraussichtlich reicht eine konventionelle Aufbereitung des Uferfiltrats aus. Einschließlich Bau von Brunnenanlagen betragen die spezifischen Kosten für die Bereitstellung von Trinkwasser aus Uferfiltrat dann 0,25-0,35 €/m <sup>3</sup> . Es wird vorgeschlagen, zunächst für die Versorgung der rd. 15000 Einwohner in der Stadt Novi Becej entsprechende Anlagen zu errichten und damit großtechnische Erfahrungen zu sammeln. Entsprechende Konzepte für eine derartige, nachhaltige Trinkwasserversorgung wurden ausgearbeitet.	
19. Schlagwörter Trinkwasserversorgung, Vojvodina, Arsen, Grundwasser, Huminstoffe, Uferfiltration, Theiß	
20. Verlag verfügbar als pdf-File im Internet: <a href="http://www.tzw.de">http://www.tzw.de</a>	21. Preis gratis zum Download