Schlussbericht

Verbundprojekt: Energierückgewinnung und Grundwasserreinhaltung: Techno-ökonomische und ökologische Bewertung einer Abfallwirtschaft in Bamako, Mali (ERA-SOLMAB)

Teilprojekt: Uni Bonn

FKZ 01DG21018B

Zentrum für Entwicklungsforschung – Abteilung ZEFc

Rheinische Friedrich-Wilhelms-Universität Bonn

Berichtszeitraum: 01.06.2021 – 30.05.2024
(Kosten-neutrale Verlängerung bis 31.12.2024)

ERA-SOLMAB Energierückgewinnung und Grundwasserreinhaltung: Techno-ökonomische und ökologische Bewertung einer Abfallwirtschaft in Bamako, Mali	UNIVERSITÄT BONN zef Zentrum für Entwicklungsforschung Universität Bonn

1. ISBN oder ISSN -	2. Berichtsart (Schlussbericht oder Veröffentlichung) Schlussbericht Teilprojekt Universität Bonn /ZEF

3. Titel
Verbundprojekt: Energierückgewinnung und Grundwasserreinhaltung: Techno-ökonomische und ökologische Bewertung einer Abfallwirtschaft in Bamako, Mali (ERA-SOLMAB): Teilvorhaben ERA-SOLMAB-Grundwasser

4. Autor(en) [Name(n), Vorname(n)] Prof. Dr. Christian Borgemeister, Dr. Navneet Kumar, Dr. Bernhard Tischbein	5. Abschlussdatum des Vorhabens 31.12.2024
	6. Veröffentlichungsdatum 30.06.2025
	7. Form der Publikation Schlussbericht
8. Durchführende Institution(en) (Name, Adresse) Universität Bonn Zentrum für Entwicklungsforschung Genscherallee 3 53113 Bonn	9. Ber. Nr. Durchführende Institution PSP:
	10. Förderkennzeichen *) 01DG21018B
	11. Seitenzahl 21 (mit Erfolgskontrollbericht)
12. Fördernde Institution (Name, Adresse) Bundesministerium für Bildung und Forschung (BMBF) 53170 Bonn	13. Literaturangaben Siehe Anlage
	14. Tabellen -
	15. Abbildungen -

16. Zusätzliche Angabe
Unter Bezugnahme auf frühere Zwischenberichte.

17. Vorgelegt bei (Titel, Ort, Datum)

18. Kurzfassung.

Die ständige Ausdehnung und Verdichtung von Städten und deren Umfeld in Westafrika (auch global in vielen ‚Megacities') verursacht die dramatische Herausforderung, steigende Abfallmengen ohne bzw. mit minimal möglicher Belastung für Umwelt und Bevölkerung zu entsorgen. Mit Bamako als typischer Untersuchungsraum, zielt der ERA-SOLMAB-Verbund auf die Erarbeitung von Strategien für eine geordnete Abfallbewirtschaftung. Das vom ZEF bearbeitete Teilvorhaben ist auf die Erfassung der Wirkungen von Deponien/Altlasten auf das Grundwasser und die Konzeption von Schutzmaßnahmen ausgerichtet und erzielt dabei wesentliche Ergebnisse: (i) räumliche Erfassung von Deponien, (ii) Identifizierung von Messtellen für Grundwasserstand sowie -qualität und Erfassung von Auswirkungen Deponie - Grundwasserqualität (Methodik, Test mit Messkampagnen), (iv) Aufbau einer GIS-gestützten Datenbank zur Unterstützung der Analysen von Deponie-Grundwasser-Wechselwirkungen. Die intensive Zusammenarbeit mit Partnern in Mali trägt (junge Wissenschaftler) fördert Kapazitätsentwicklung und Verstetigung der Projektwirkungen über das Vorhabenende hinaus.

19. Schlagwörter

Abfallmanagement, Kartierung von Deponien und Altlasten, Grundwasserfließrichtung und -qualität, nachhaltige Grundwasserbewirtschaftung, Vulnerabilität, Bamako

20. Verlag -	21. Preis -

Inhalt
Schlussbericht

I. Kurze Darstellung 1

1. Ursprüngliche Aufgabenstellung sowie der wissenschaftliche und technische Stand an den angeknüpft wurde 1

2. Ablauf des Vorhabens 1

3. Wesentliche Ergebnisse sowie ggf. Zusammenarbeit mit anderen Stellen Error! Bookmark not defined.

II. Eingehende Darstellung 3

1. Im Rahmen des Vorhabens durchgeführten Arbeiten, insbesondere im Vergleich zur ursprünglichen Vorhabenbeschreibung 3

2. Wichtige Positionen des zahlenmäßigen Nachweises 22

3. Notwendigkeit und Angemessenheit der geleisteten Projektarbeit 22

4. Voraussichtlichen Nutzens, insbesondere der Verwertbarkeit des Ergebnisses – auch konkrete Planungen für die nähere Zukunft – im Sinne des fortgeschriebenen Verwertungsplans 23

5. Während der Durchführung des Vorhabens dem ZE bekannt gewordenen Fortschritts auf dem Gebiet des Vorhabens bei anderen Stellen 25

6. Erfolgten oder geplanten Veröffentlichungen des Ergebnisses nach Nr. 5 der NABF. 25

Anlage 1: Erfolgskontrollbericht .....

Schlussbericht

I. Kurze Darstellung zu:

1. Ursprüngliche Aufgabenstellung sowie der wissenschaftliche und technische Stand an den angeknüpft wurde

ERA-SOLMAB ist ein Verbundprojekt im Rahmen der BMBF-Ausschreibung ‚Resilienzstärkung und Strukturaufbau in afrikanischen Städten und Ballungsgebieten" (AfResi-Bekanntmachung) und zielt auf die Erarbeitung von Möglichkeiten einer geordneten Abfallbewirtschaftung (einschließlich der Rückgewinnung von Energie), um somit einen Beitrag zur Erhaltung von natürlichen Ressource (Fokus: Grundwasser), Verbesserung der Energieversorgung und damit insgesamt zur Steigerung der Lebensbedingungen (Reduzierung der Belastung mit Schadstoffen, Gesundheit der Bevölkerung) zu leisten. Insbesondere in den ständig wachsenden urbanen Zentren Westafrikas (aber auch darüber hinaus in vielen ‚Megacities') ist diese Aufgabe besonders drängend und wird vor dem Hintergrund fortschreitender Ausdehnung sowie Verdichtung von Städten (Bevölkerungswachstum, Land-Stadt-Migration, Umstellung von Lebensgewohnheiten in Richtung auf höheren Konsum, Klimawandel, Industrialisierung) zukünftig weiter an Dringlichkeit gewinnen.

Das ZEF-Teilprojekt steht unter der wesentlichen Zielsetzung, Maßnahmen zur Vermeidung/Verminderung der potenziell nachteiligen Auswirkungen von Deponien und Altlasten auf die Grundwasserressourcen in Bamako zu entwickeln. Dies umfasst die (i) räumliche Erfassung, Abgrenzung und Charakterisierung von Deponien/Altlasten, (ii) Identifizierung von Messstellen zur Erfassung des Grundwasserstandes und der -qualität (Fokus: in der Nähe von Deponien), (iii) Untersuchung der Wirkung von Deponien auf die Grundwasserqualität (Methodik und Test im Rahmen einer Messkampagne (Grundwasserstand und -qualität), (iv) Aufbau einer GIS-gestützten Datenbank zur Unterstützung der Analysen von Wechselwirkungen Deponie - Grundwasser und darauf aufbauende Entwicklung von Maßnahmen zum Grundwasserschutz. Bei der Bearbeitung des Teilvorhabens wurde großen Wert auf die Einbeziehung von (Nachwuchs-)Wissenschaftlern des Projektpartners USTT-B gelegt, um die Projektwirkungen über das Vorhabenende hinaus zu verstetigen (institutionell durch Eingang der Ergebnisse in die akademische Lehre und personell durch die Einbeziehung von vier Masterstudenten).

2. Ablauf des Vorhabens,

Das Projekt startete am 1. Juni 2021 in Übereinstimmung mit der Förderentscheidung des Projektträgers. Die im Antrag vorgeschlagene Vorgehensweise wurde grundsätzlich umgesetzt. Allerdings konnten aufgrund der Corona-Zeit und der komplizierten politischen Situation in Mali keine Feldaufenthalte durchgeführt werden. In Abstimmung mit dem Projektpartner

USTT-B wurden insofern Modifikationen im Ablauf konzipiert, dass die Feldarbeiten von Kollegen/Kolleginnen in Bamako unter Einbeziehung von Masterstudenten vorgenommen wurden. Im Rahmen von intensiven virtuellen Treffen zwischen Mitarbeitern von USTT-B und ZEF wurden die Messkampagnen auf der Grundlage einer gemeinsam erarbeiteten methodischen Vorgehensweise ausgewertet und eine Synthese der Ergebnisse vorgenommen.

3. Wesentliche Ergebnisse sowie ggf. Zusammenarbeit mit anderen Stellen.

Wesentliche Ergebnisse:

- Lokalisierung und Abgrenzung von Deponien und Altlastenflächen im Stadtgebiet von Bamako
- Entwicklung eines räumlich expliziten Datenbanksystems zur Erfassung der Deponieflächen und der Qualitätsparameter des Grundwassers
- Test der Datenbank mit den Ergebnissen von Messkampagnen zu Grundwaserstand und -qualität (vor und nach der Regenzeit)
- Untersuchung der Auswirkungen von Deponien auf die Grundwasserqualität zur Unterstützung von Konzepten und Maßnahmen des Grundwasserschutzes
- Erstellung von vier Masterarbeiten beim Projektpartner USTT-B

Im ERA-SOLMAB Projekt kooperieren folgende Konsortialpartner:

- Institute for Technology and Resources Management in Tropics and Subtropics (ITT) / TH Köln
- University of Sciences, Techniques and Technologies of Bamako (USTT-B) (Mali)
- Abou Bakr Belkaid University of Tlemcen (UoT), Algeria
- Metabolon, Bergisches Energiekompetenzzentrum (Lindlar, Germany)
- Zentrum für Entwicklungsforschung (ZEF), Universität Bonn;

Darüber hinaus erfolgte eine regelmäßige Abstimmung mit dem Projektträger.

II. Eingehende Darstellung

1. Im Rahmen des Vorhabens durchgeführten Arbeiten, insbesondere im Vergleich zur ursprünglichen Vorhabenbeschreibung.

1. Hintergrund und Problemstellung

Der starke Anstieg des weltweiten Konsums und seine weitreichende Diversifizierung, hat zu einem dramatischen Anstieg des erzeugten Abfalls sowohl im Hinblick auf die Menge als auch in Bezug auf die Beschaffenheit geführt. Diese Entwicklung stellt somit ein erhebliches Risiko für die Umwelt und die öffentliche Gesundheit dar (Afilal et al., 2014). Die rasanten Fortschritte im Lebensstil, gepaart mit den in allen Ländern zu beobachtenden demografischen Veränderungen, haben zusammen mit einer weitgehend unkontrollierten Konsumkultur zur Anhäufung großer Abfallmengen geführt. Diese Beobachtung deckt sich mit den Ergebnissen des Weltbankberichts (2018), der das weltweite Abfallaufkommen auf etwa 2,01 Milliarden Tonnen jährlich schätzt. Dieser ansteigende Trend wird durch die wachsende Bevölkerung und die Verdichtung urbaner Räume und die dadurch verursachte Zunahme von Haushaltsabfällen in Zukunft weiter verschärft (Linda S. et al., 2010).

Eine wirksame Hausmüllentsorgung stellt für städtische Zentren in Entwicklungsländern eine gewaltige Herausforderung dar. Die Kommunen sind mit einem erheblichen Aufkommen an festen Abfällen konfrontiert und haben gleichzeitig mit unzureichenden materiellen und finanziellen Ressourcen zu kämpfen (Naquin et al., 2008). Die bedeutenden Urbanisierungstrends (‚Megacities‘) und die verbesserten Lebensbedingungen, die mit dem Wirtschaftswachstum einhergehen, führen zu verschiedenen und problematischen Formen der Verschmutzung, darunter Industrie-, Gewerbe-, Krankenhaus-, Landwirtschafts- und Haushaltsabfälle. Die unsachgemäße Entsorgung dieser Abfallarten stellt eine ernsthafte Bedrohung für die Umwelt und die Gesundheit der Bevölkerung dar (Mayster et al., 1994). In vielen Entwicklungsländern handelt es sich bei den Abfallablagerungen häufig um Mülldeponien im Freien, die von den lokalen Behörden oft irreführend als „temporäre Standorte“ bezeichnet werden, was unweigerlich zu negativen Auswirkungen auf die natürliche Umwelt und die umliegenden Gebiete und die Bevölkerung führt (Ngnikam E. et al., 2012). Deponien haben das Potenzial, die Grundwasserqualität negativ zu beeinflussen, indem sie das Eindringen von Sickerwasser in den Aquifer, das mit Verschmutzungen (aus der Zersetzung von Abfällen) belastet ist, die in Verbindung mit starken Niederschlägen der Regenzeit entstehen. Dieser Prozess kann zur Verunreinigung des Grundwassers mit schädlichen Chemikalien und Schadstoffen führen.

Die Bewirtschaftung fester Siedlungsabfälle stellt in Bamako, Mali, eine große Herausforderung dar, die eng mit der räumlichen Verteilung der Mülldeponien

zusammenhängt. Ein Verständnis dieser Verteilung ist für die Formulierung wirksamer Abfallbewirtschaftungsstrategien unerlässlich, die für die Gewährleistung der ökologischen Nachhaltigkeit und den Schutz der öffentlichen Gesundheit von entscheidender Bedeutung sind. Die räumliche Konzentration von Deponiestandorten kann zu erheblichen sozioökonomischen Problemen führen, einschließlich unverhältnismäßiger Auswirkungen auf die angrenzenden Wohngebiete und deren Bevölkerung und eines erhöhten und schädlichen Drucks auf die lokalen Ressourcen. Darüber hinaus hat die geografische Lage dieser Standorte erhebliche Auswirkungen auf die Effektivität der Abfallsammlung und -entsorgung und kann sich potenziell negativ auf die Grundwasserressourcen auswirken.

Die räumliche Verteilung von Mülldeponien in Bamako spiegelt allgemein Muster, die in weiten Bereich von Subsahara-Afrika zu beobachten sind und von einer Vielzahl politischer, wirtschaftlicher und technologischer Faktoren geprägt werden (Sissoko, 2020). In Bamako wird die Positionierung von Deponien häufig durch Regierungsentscheidungen, Flächennutzungsplanung und wirtschaftliche Zwänge bestimmt, was zu einer ungleichen Verteilung in städtischen und stadtnahen Regionen beiträgt. Ähnliche Tendenzen treten auch in anderen afrikanischen Großstädten auf, wo Deponien in der Regel an der Peripherie angelegt werden, um die Auswirkungen auf die städtische Bevölkerung abzumildern, was allerdings zwangsläufig – wenn auch unbeabsichtigt - zu einer stärkeren Belastung wirtschaftlich benachteiligter Gebiete führt. Darüber hinaus wird der Standort dieser Deponien auch durch internationale Vorschriften wie das Bamako-Abkommen beeinflusst, das bestimmte Abfallimport- und -exportpraktiken einschränkt und sich somit auf lokale Managementstrategien auswirkt (Zhavoronkova, 2020). Das Verständnis dieser Faktoren ist für die Bewertung der Wirksamkeit der derzeitigen Standorte im Hinblick auf die Erfüllung sowohl ökologischer als auch sozialer Anforderungen von wesentlicher Bedeutung und erleichtert somit notwendige Fortschritte bei der Bewirtschaftung fester Siedlungsabfälle. ERA-SOLMAB untersucht die Auswirkungen von Mülldeponien und Altlasten auf die Grundwasserqualität und schlägt in den folgenden Abschnitten Bewirtschaftungskonzepte vor, um die schädlichen Auswirkungen von Mülldeponien auf die Grundwasserqualität zu minimieren.

1.2 Ziele und Ansatz

Der Teil von ERA-SOLMAB, der vom ZEF und Partner in Bamako (Universität für Wissenschaften, Technik und Technologien von Bamako (USTT-B)) bearbeitet wird, steht unter folgenden Hauptzielen:

- Lokalisierung und Abgrenzen von Deponiestandorten und Erkundung von Möglichkeiten zur Grundwasserüberwachung in der Nähe dieser Standorte

- Überwachung des Grundwasserspiegels und der Grundwasserqualität (vor und nach der Regenzeit)

- Erarbeitung von Optionen für den Schutz der Grundwasserressourcen mit folgenden Schwerpunkten:

  - Einrichtung einer GIS-Datenbank, die es ermöglicht, die im Rahmen von ERA-SOLMAB durchgeführte Überwachung mit weiteren Messaktivitäten in Bamako zur Grundwasserqualität zu verknüpfen (in der Vergangenheit durchgeführte sowie geplante Messprogramme)

  - dadurch wird die die Möglichkeit eröffnet, ERA-SOLMAB-Ergebnisse langfristig für eine verbesserte künftige Raumplanung in Bezug auf Wasser- und Landnutzung in Bamako einzusetzen (die methodische Vorgehensweise kann darüber hinaus mit einigen Modifikationen in ähnlichen städtischen Umgebungen in Westafrika genutzt werden)

  - so weit wie möglich werden junge Wissenschaftler am USTT-B einbezogen, um die dauerhafte Wirksamkeit der im Rahmen von ERA-SOLMAB entwickelten Methoden und erzielten Ergebnisse zu verbessern

Wir wenden einen Ansatz an, der Techniken der Fernerkundung, Untersuchungen / Messkampagnen Überwachungsaktivitäten vor Ort am Boden, GIS-Tools und Datenbankwerkzeuge kombiniert.

2. Beispiele für Ergebnisse

Die Darstellung der Beispiele für die von ERA-SOLMAB erzielten Ergebnisse folgt den oben genannten Zielen: Lokalisierung von Deponien in Bamako und deren Probleme und Auswirkungen, räumliche Verteilung der Grundwasserqualität, Zusammenfassung der Optionen zum Schutz der Grundwasserressourcen gegen potenzielle Auswirkungen von Deponien.

2.1. Hydrogeologie in der Stadtregion Bamako

Das Gebiet von Bamako besteht aus gneisischem Granit und Schiefer, der von Sandsteinsedimenten bedeckt ist. Der Fluss Niger hat sich mehr oder weniger tief in das Schiefer- und Granitgestein und die Sedimentdecke eingeschnitten. Seine Schwemmlandablagerungen nehmen das Hauptflussbett ein; rezente Ablagerungen füllen nach jedem Hochwasser die Vertiefungen im Flussbett auf.

Die Hydrogeologie der Stadt Bamako setzt sich aus zwei Aquifersystemen zusammen, nämlich einem flachen Grundwasserleiter aus oberflächlichen-nahen Ablagerungen und einem tiefen, geklüfteten Grundwasserleitersystem aus ge- oder zerklüftetem Sandstein. Die

beiden Systeme sind durch Sickerwasser hydraulisch miteinander verbunden (TRAORE, et al., 2006).

2.2. Räumliche Analyse und Management von Mülldeponien und Siedlungsabfällen in Bamako

2.2.1. Räumliche Verteilung der Mülldeponien in Bamako

In Bamako gibt es 11 Mülldeponien, von denen nur drei genehmigt sind, während 9 Deponien als nicht genehmigt gekennzeichnet sind. Die Charakteristika der Deponien / Altlasten sind in Tabelle 1 und Abbildung 1 dargestellt.

Tabelle 1. Lage und Status der bestehenden Mülldeponien in Bamako

S. N.	Communes	Landfill Sites	Latitude	Longitude	Status
1	CI	Cimetière Nafadji	12.69522	-7.95049	Unauthorized
2	CI	Ravin de Djoumanzana	12.677467	-7.942353	Unauthorized
3	CII	CFP	12.658099	-7.992177	Authorized
4	CIII	Diesel/Darsalam	12.650457	-8.00705	Authorized
5	CIII	Koulouba	12.66908	-8.014107	Unauthorized
6	CIII	Sokonafing	12.673754	-8.016729	Unauthorized
7	CIII	Point G	12.671357	-7.9967	Unauthorized
8	CIV	Cimetière de Lafiabougou	12.622774	-8.038743	Authorized
9	CV	Ravin – Hotel Olympe	12.605834	-7.992877	Unauthorized
10	CVI	Sénou/Usine TOGUNA	12.56667	-7.93997	Unauthorized
11	Kalaban-Karo	Niamakoro Courani	12.538544	-8.006321	Unauthorized

Die Karte der Land- bzw. Flächennutzung (Abb. 1a) zeigt alle Deponien, die in städtischen Siedlungen liegen. Eine Untersuchung der einzelnen Deponien in Bamako gibt Aufschluss über ihre geografische Lage und die damit verbundenen Herausforderungen.

Von den insgesamt 11 Deponien sind nur drei (Diesel, CFP und Cimetière de Lafiabougou) von den zuständigen Behörden als sogenannte ‚Transitdeponien' zugelassen. Die übrigen Deponien sind nicht genehmigt und wurden in einer nicht-konformen Weise eingerichtet. Die Transitlager dienen der Erleichterung des Transports der Abfälle zu den Endlagerstätten, während die nicht genehmigten Deponien weitgehend ungesichert (u.a. keine Abdeckung) und somit der Witterung ausgesetzt sind und die Umweltvorschriften nicht einhalten.

In der Gemeinde III gibt es vier von insgesamt 11 Deponien. Allerdings ist nur die Deponie Diesel/Darasalam, die im Herzen einer städtischen Siedlung liegt, genehmigt. Die beiden

anderen Deponien - Sokonafing und Koulouba - befinden sich dagegen am Rande der Gemeinde III, an der Grenze zur Gemeinde Dododuman; sie sind als nicht genehmigt eingestuft.

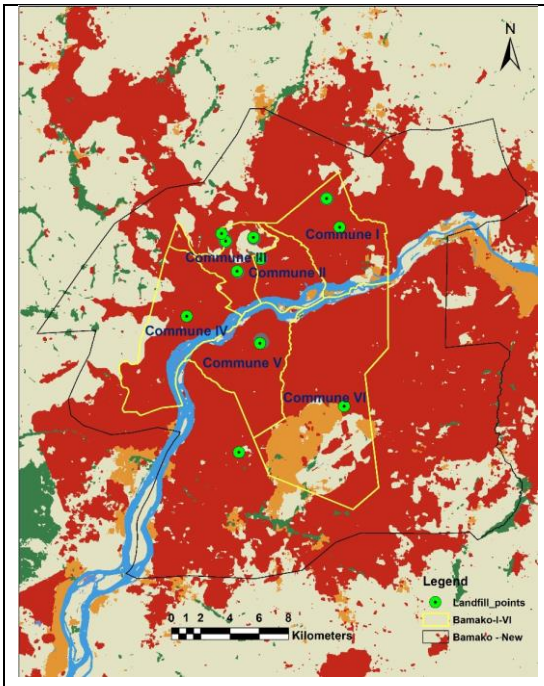


Figure 1a: Spatial distribution of landfill sites and land use in Bamako

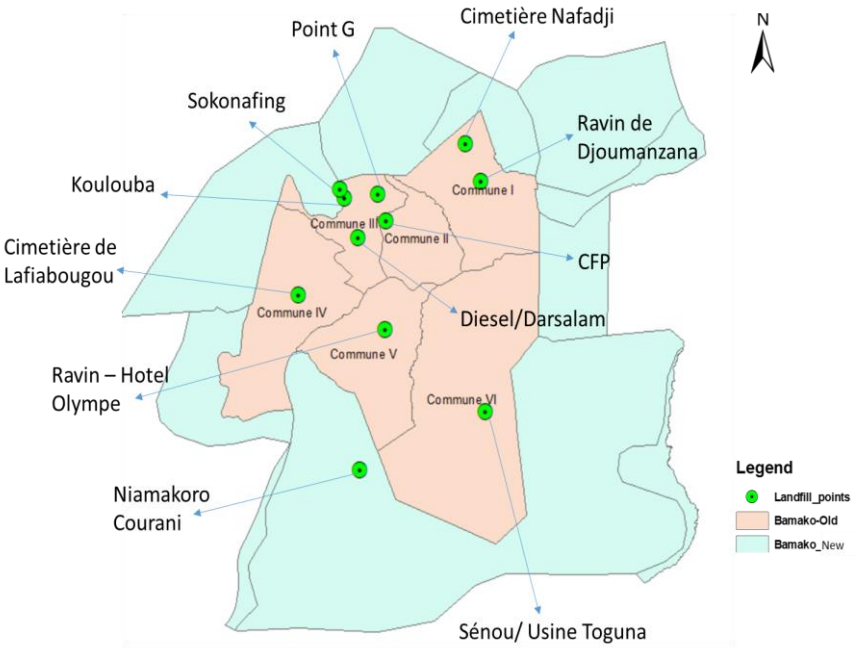


Figure 1b. Spatial distribution of Landfill sites with their names in Bamako

Die Deponien in Lafiabougou sind ein Beispiel dafür, dass die geografische Lage erhebliche Schwierigkeiten bereitet; diese Standorte liegen am Stadtrand, verfügen aber nicht über eine angemessene Transportinfrastruktur, was eine effektive Abfallentsorgung erschwert (ADAMOU et al., n.d.). Diese Einschränkung wird durch die limitierte Zugänglichkeit für Abfallentsorgungsfahrzeuge noch verschärft, insbesondere während der Regenzeit, wenn sich die Straßenverhältnisse verschlechtern. Darüber hinaus führt die Nähe dieser Deponien zu Wohngebieten zu einer erhöhten Exposition gegenüber gefährlichen Bioaerosolen und bedingt damit Gesundheitsrisiken, was die unzureichende Berücksichtigung der Umweltgesundheit in Planungsprozessen verdeutlicht (ADAMOU et al., n.d.). Durch die Analyse solcher Fälle wird deutlich, dass strategische Verbesserungen bei der Zugänglichkeit von Standorten und bei den Bewirtschaftungspraktiken zwingend erforderlich sind, was die Notwendigkeit einer Verbesserung der Planung und auch einer Mobilisierung von Investitionen in die Infrastruktur verdeutlicht.

2.2.2 Wirksamkeit der Abfallbewirtschaftungsstrategien in Bamako

Bamako steht vor erheblichen Herausforderungen in der Abfallwirtschaft, die gesteigerte Aufmerksamkeit und erheblichen Handlungsbedarf erfordern. Die derzeitigen Strategien sind

aufgrund einer unzureichenden Infrastruktur und begrenzter finanzieller Mittel (beides ist für eine ordnungsgemäße Abfallsammlung und -entsorgung unerlässlich), nicht ausreichend effektiv (Sissoko, 2020). Die lokalen Behörden haben Schwierigkeiten, Abfälle regelmäßig zu sammeln und zu verarbeiten, da es ihnen an ausreichender Ausrüstung mangelt und sie nur eingeschränkt Zugang zu Mülldeponien besitzen. Darüber hinaus verlangsamen politische und wirtschaftliche Faktoren die Bemühungen um die Umsetzung der erforderlichen Flächennutzungspläne und Bewirtschaftungsstrategien, was zu ständigen Problemen bei der Abfallbewirtschaftung führt (Sissoko, 2020). Die Beseitigung von Hindernissen in der erfolgreichen Umsetzung der Planungen (u.a. unzureichende Infrastruktur, fehlende Geräte, knappe Finanzmittel, …) ist eine notwendige Voraussetzung für eine gezielte und dauerhafte Verbesserungen der Abfallwirtschaft in Bamako.

Um die Abfallwirtschaft in Bamako zu verbessern, ist es wichtig, technologische, ökologische und politische Innovationen in Betracht zu ziehen. Die Einführung fortschrittlicher Systeme, wie z. B. die Energiegewinnung aus Abfällen, könnte die Effektivität der Abfallentsorgung erheblich verbessern, die Menge der auf Deponien entsorgten Abfälle verringern und zu einer nachhaltigen Energieerzeugung beitragen (Zhavoronkova, 2020). Darüber hinaus würde die verstärkte Einhaltung internationaler Abkommen (wie z. B. des Bamako-Abkommens) dazu beitragen, das Aufkommen und den Transport von Abfällen aus benachbarten Bereichen zu begrenzen und lokale Lösungen für die Abfallbewirtschaftung zu fördern. Diese Strategie steht im Einklang mit den regionalen Nachhaltigkeitszielen und verringert den Druck auf Deponien, indem Recycling und Kompostierung auf lokaler Ebene gefördert werden. Durch die Integration dieser technologischen Fortschritte und politischen Veränderungen kann Bamako sein Abfallmanagementsystem stärken und die ökologischen, sozialen und wirtschaftlichen Herausforderungen besser bewältigen.

2.2.3 Ökologische, soziale und wirtschaftliche Auswirkungen von Mülldeponien in Bamako

Die räumliche Verteilung von Mülldeponien und die derzeitigen Strategien der Abfallbewirtschaftung in Bamako machen deutlich, dass erhebliche Herausforderungen bestehen, die eine baldmögliche Reform erfordern. Die ineffektive und unkontrollierte Anlage von Mülldeponien verschärft Umwelt- und Gesundheitsrisiken sowie soziale Ungerechtigkeiten und belastet marginalisierte Gemeindeteile / Gemeinschaften, denen es an angemessener Infrastruktur fehlt. Die Bewertung der ökologischen, sozialen und wirtschaftlichen Auswirkungen der Deponiestandorte in Bamako offenbart ein komplexes Spektrum von Herausforderungen. Aus ökologischer Sicht stellt die Anhäufung unbehandelter Abfälle auf und in der Umgebung der Deponien ein erhebliches Gesundheitsrisiko dar, insbesondere durch die Verunreinigung des Grundwassers, was durch ungünstige Standortauswahl sowie

ein unzureichendes Standortmanagement noch verstärkt wird. In sozialer Hinsicht führt die Nähe dieser Deponien zu Wohngebieten dazu, dass die lokale Bevölkerung unangenehmen Gerüchen und unsicheren Bedingungen ausgesetzt ist, was zu einem Rückgang der Immobilienwerte und einer verminderten Lebensqualität sowie zu Gesundheitsrisiken führt. Aus wirtschaftlicher Sicht belasten die steigenden Betriebskosten, die mit der Bewirtschaftung dieser ungünstig gelegenen Deponien verbunden sind, die ohnehin schon begrenzten kommunalen Haushalte stark und behindern wesentliche infrastrukturelle Entwicklungen, die zur Verbesserung der Abfallbewirtschaftung erforderlich sind. Deponien können die Qualität des Grundwassers beeinträchtigen (aus zersetzenden Abfällen belastetes Sickerwasser), was zu einer Verunreinigung von Aquiferen mit schädlichen Chemikalien und Schadstoffen führt. Eine umfassende Bewertung der Auswirkungen von Mülldeponien auf die Grundwasserressourcen ist dringend erforderlich, um wirksame Bewirtschaftungspläne zu entwickeln und die Auswirkungen auf die Anwohner zu mildern. Diese umfassende Analyse unterstreicht die dringende Notwendigkeit einer strategischen Planung und gezielter politisch-planerischer Reformen, um diese Auswirkungen abzumildern, und belegt die die Bedeutung einer umsichtig / vorausschauenden Standortwahl und verbesserten Bewirtschaftungskonzepten sowie vor allem -praktiken im Rahmen des Abfallwirtschaftssystems von Bamako.

2.3 Räumliche Analyse des Grundwasserspiegels und der Grundwasserqualität in Bamako

In Bamako führt die rasche Urbanisierung in Verbindung mit einer unzureichenden Infrastruktur der Abfallbewirtschaftung zu einem zunehmenden Druck auf die Wasserressourcen und trägt zur Grundwasserverschmutzung bei. In diesem Zusammenhang ist die räumliche Kartierung der Grundwasserqualität ein wertvolles Instrument für die Bewertung und Bewirtschaftung des Grundwassers sowie für das Verständnis der räumlichen Auswirkungen von Mülldeponien.

Zur wirksamen Überwachung der Wasserqualität wurden sieben einschlägige physikalisch-chemische Parameter ermittelt. Zu diesen Parametern gehören die der Grundwasserstand, pH-Wert, Summe der gelösten Feststoffe (TDS), Salzgehalt, elektrische Leitfähigkeit, Temperatur und die Nitratkonzentration.

Mit den für die Überwachung der Wasserqualität in Betracht kommenden Grundwasserbrunnen (räumliche Verteilung der 119 Brunnen gemäß Abbildung 2) wurden in ERA-SOLMAB zwei Messkampagnen durchgeführt (Wasserstand und -qualitätsproben): die erste Phase fand im November-Dezember 2023 statt und spiegelte die Bedingungen nach der Regenzeit, wohingegen die zweite Phase im März-April 2024 während der Trockenzeit

stattfand und somit der Situation vor der Regenzeit charakterisiert. Dieser Ansatz wurde gewählt, um mögliche saisonale Schwankungen der Wasserqualität zu erfassen. Vor Ort wurden unter anderem der Grundwasserspiegel unter der Erdoberfläche, die Temperatur, der pH-Wert und die Nitratkonzentration gemessen, während die Gesamtmenge der gelösten Feststoffe (TDS), der Salzgehalt und die elektrische Leitfähigkeit im Labor in Bamako bestimmt wurden. Darüber hinaus wurden im gleichen Zeitraum 17 zusätzliche Proben aus den Brunnen in der Nähe der Deponien entnommen.

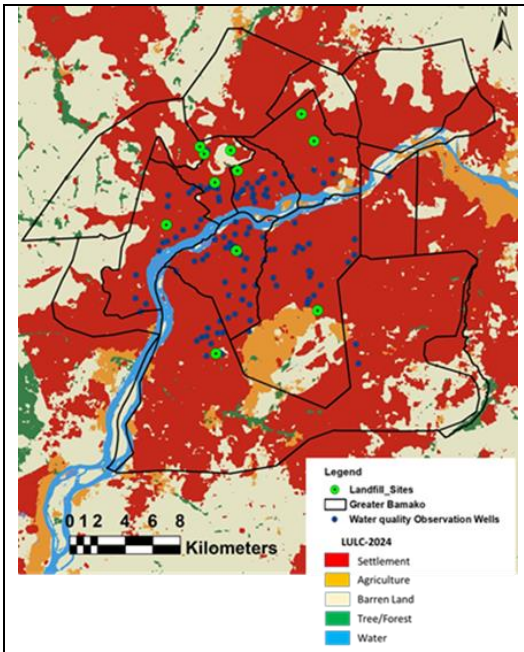


Abbildung 2: Räumliche Verteilung der Grundwasserbrunnen

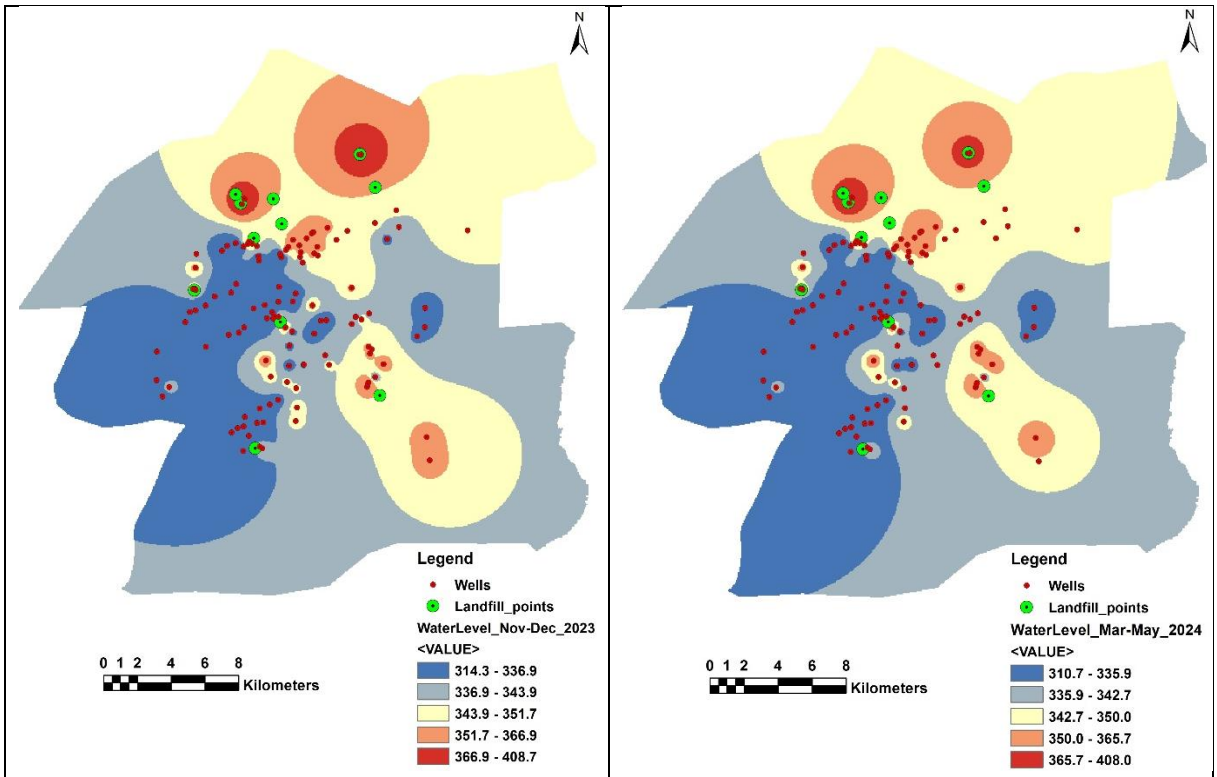
Tabelle 2. WHO-Normen für Trinkwasser

Parameter	World Health Organisation (WHO, 2004)
pH	6.5-8.5
TDS	< 1000
Conductivity(µs /cm)	< 2500
Nitrates (mg/L)	50
Temperature (°C)	20–50
Salinity (mg/L)	<1000

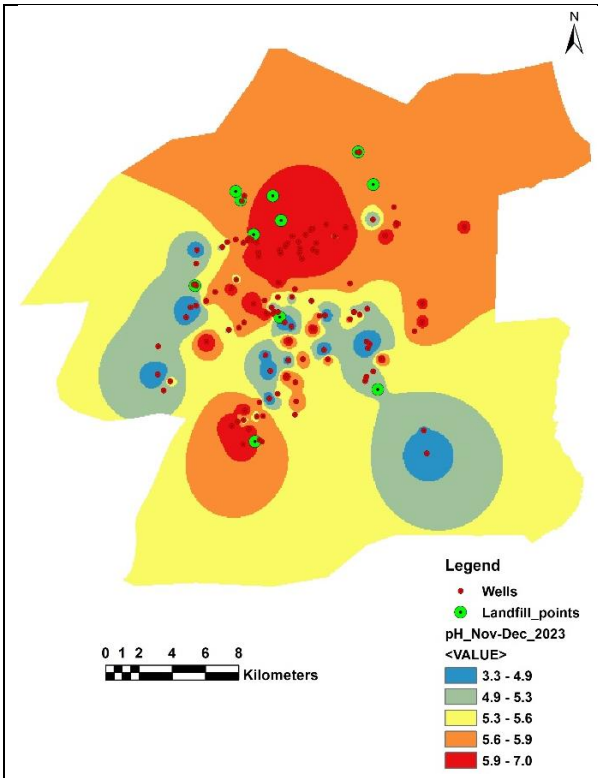
Die Interpolationsmethode IDW (Inverse Distance Weighting) wurde aufgrund ihrer weiten Verbreitung und Eignung für die Bedingungen in Bamako ausgewählt. Insgesamt wurden 119 Datenpunkte für den Interpolationsprozess verwendet, während weitere 17 Proben zur Überprüfung der Grundwasserqualität in der Nähe der Deponien herangezogen wurden. Die Karten des Wasserqualitätsindex (WQI) wurden aus dem Wasserqualitätsindex (WQI) abgeleitet, der auf der Grundlage der folgenden Wasserqualitätsparameter berechnet wurde: pH-Wert, Temperatur, Gesamtmenge der gelösten Feststoffe (TDS), elektrische Leitfähigkeit und Nitrat. Für jeden der fünf Wasserqualitätsparameter wird ein Indexwert auf der Grundlage der WHO-Richtwerte für verschiedene chemische und mikrobielle Parameter im Trinkwasser berechnet. Jeder Wert reicht von 0 bis 100, wobei ein höherer Indexwert auf eine bessere Wasserqualität hinweist. Der WQI wird berechnet, indem die einzelnen Indexwerte aller Parameter unter Berücksichtigung ihrer jeweiligen Gewichtung gemittelt werden. Die auf dem WQI basierenden Karten mit Deponiestandorten helfen bei der Umsetzung geeigneter Abfallbewirtschaftungsvorschriften und der Begrenzung von Grundwasserverunreinigungen,

was eine notwendige Voraussetzung für die wirksame Grundwasserbewirtschaftung ist. Die Standardqualität des Trinkwassers wurde von der Weltgesundheitsorganisation festgelegt. In Tabelle 2 sind die chemischen Standardzusammensetzungen der WHO für Trinkwasser aufgeführt.

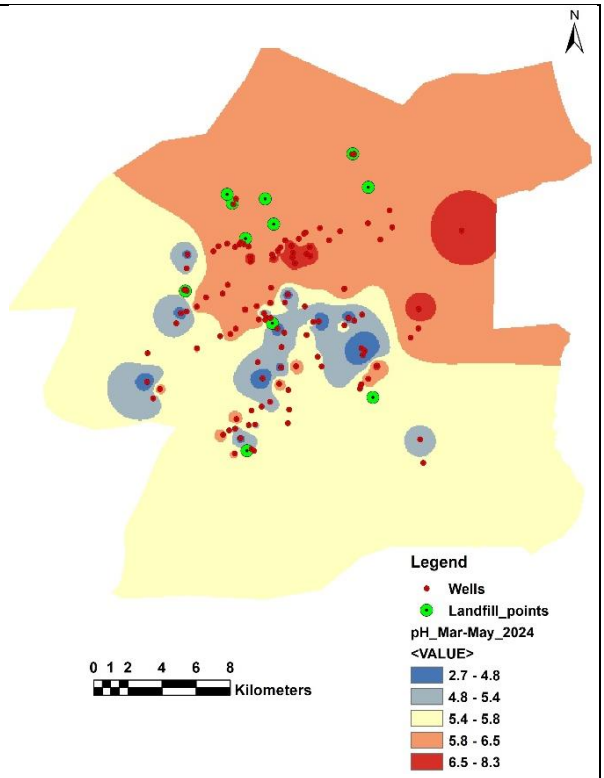
2.3.1 Räumliche Interpolation der Grundwasserqualität



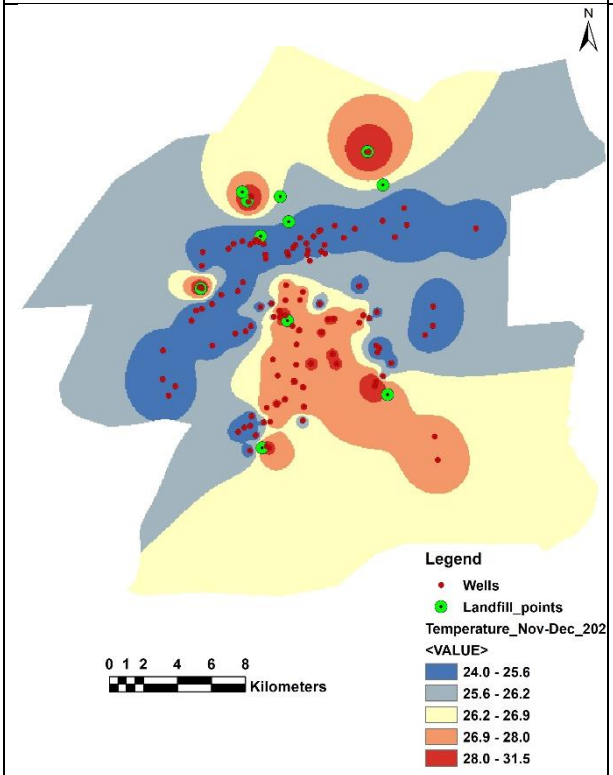
(a) Groundwater level (Nov-Dec 2023) (b) Groundwater level (Mar-May 2024)



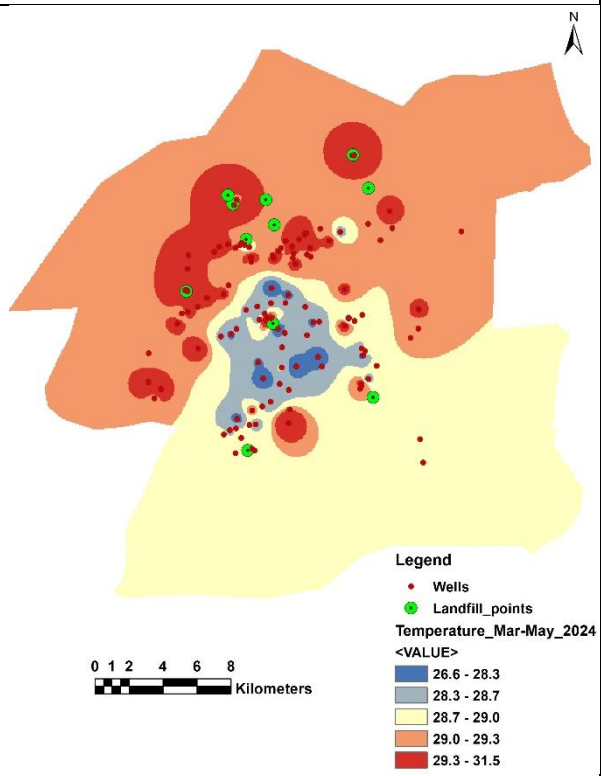
(c) pH (Nov – Dec 2023)



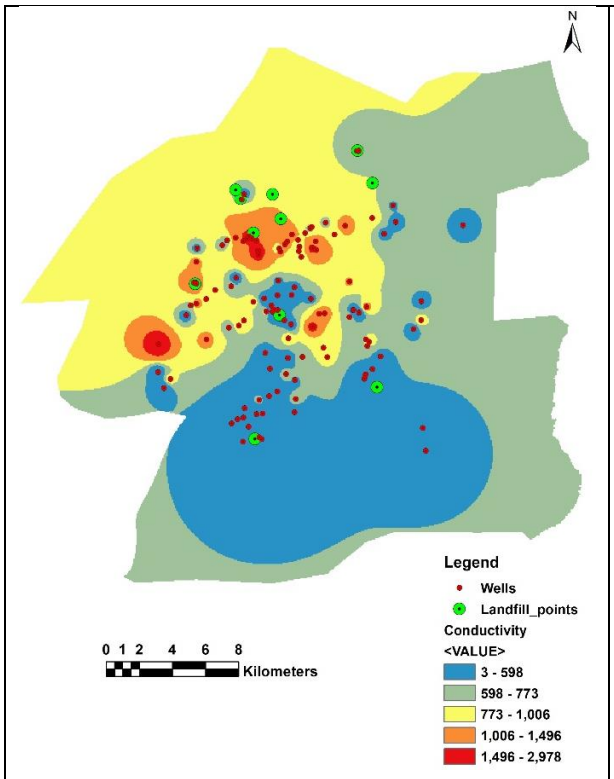
(d) pH (Mar-May 2024)



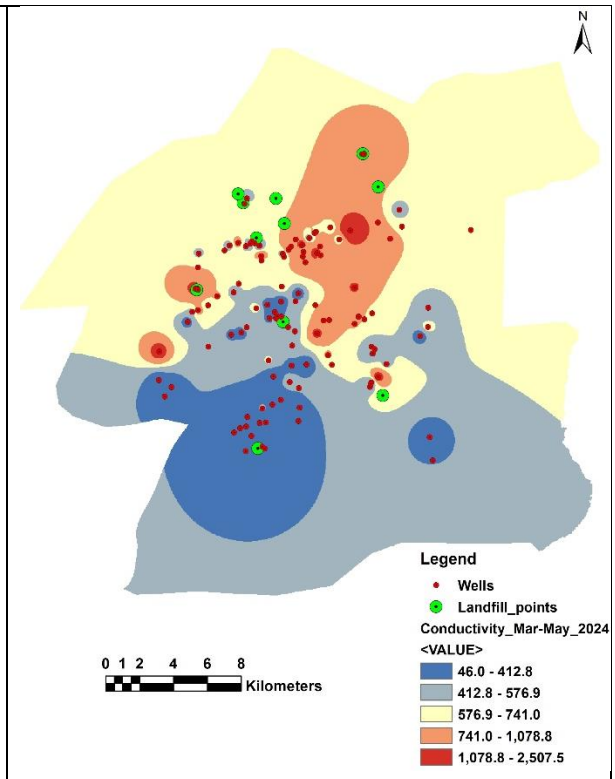
(e) Temperature (Nov – Dec 2023)



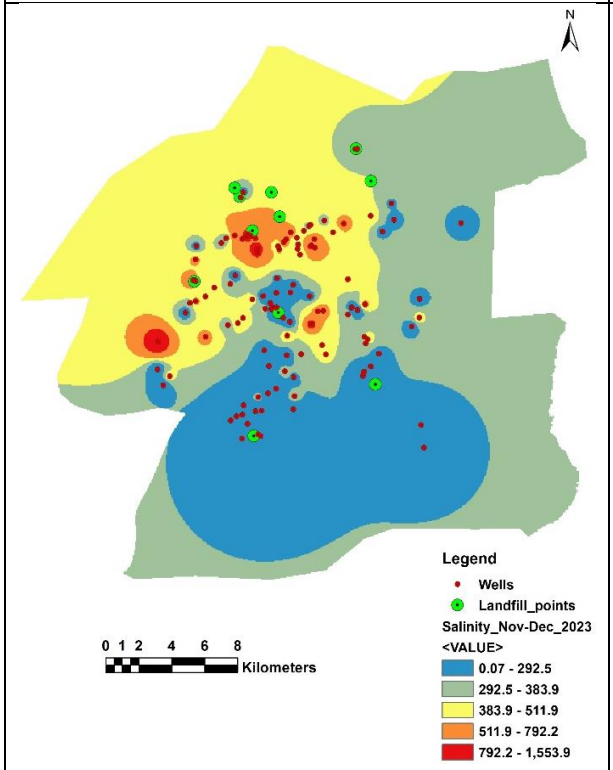
(f) Temperature (Mar – May 2024)



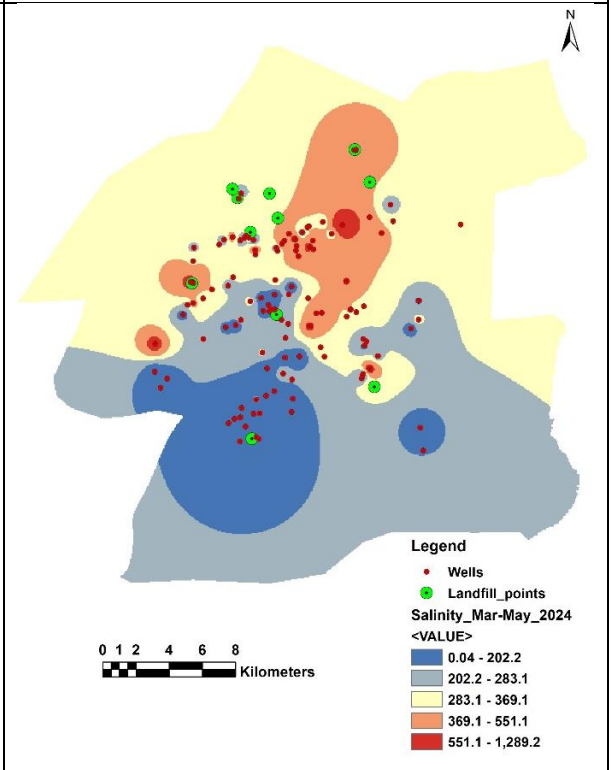
(g) Conductivity (Nov-Dec 2023)



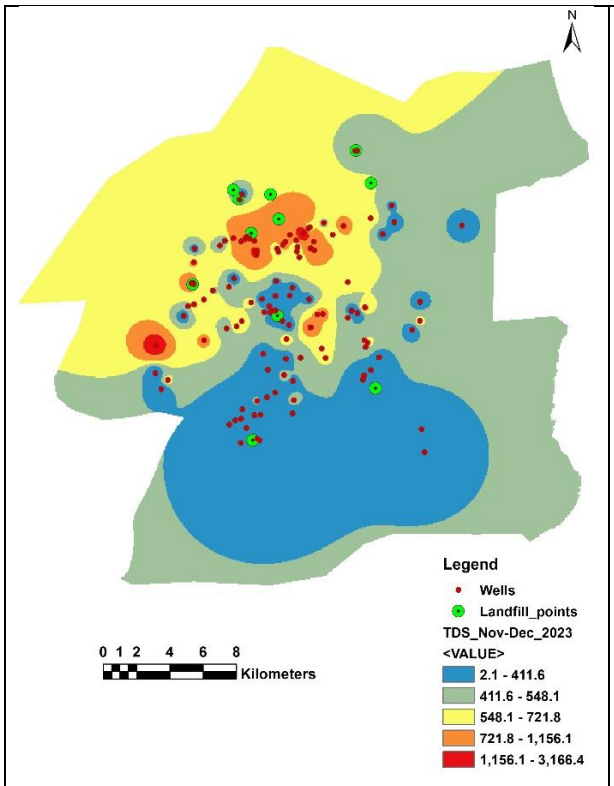
(h) Conductivity (Mar-Apr 2024)



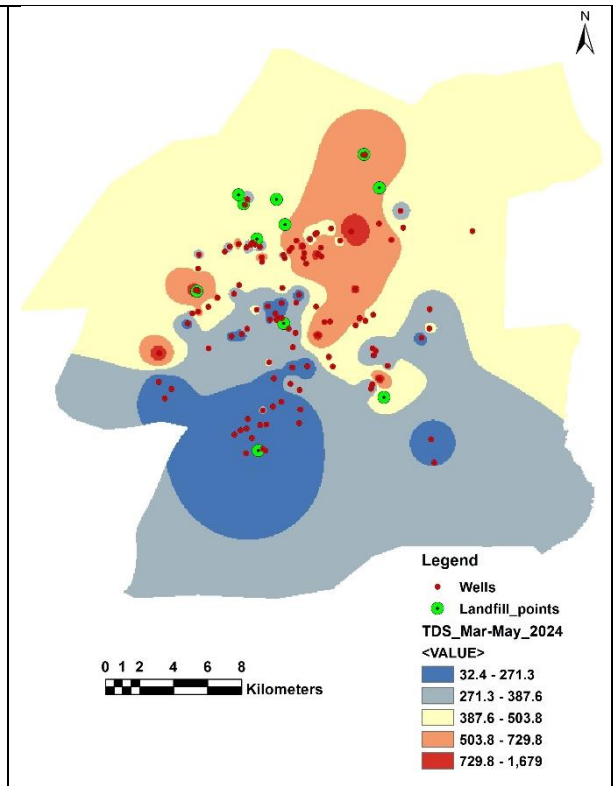
(i) Salinity (Nov-Dec 2023)



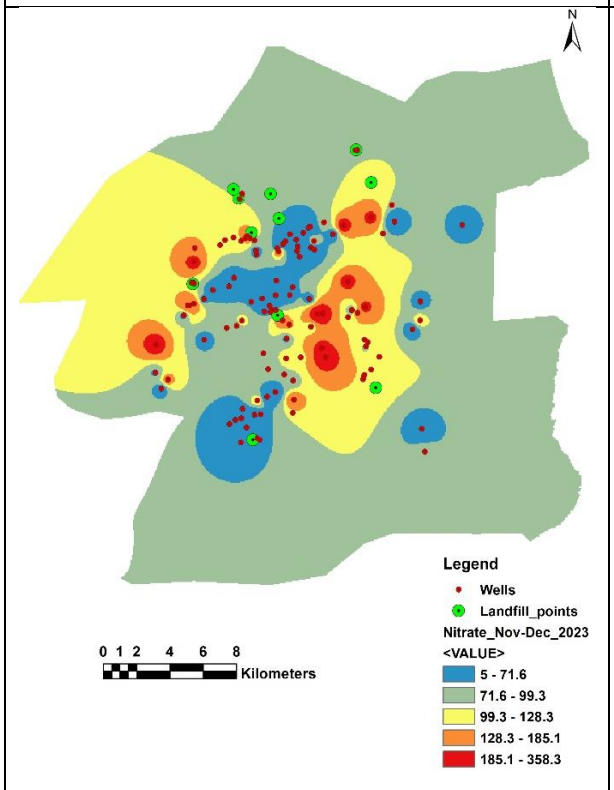
(j) Salinity (Mar-May 2024)



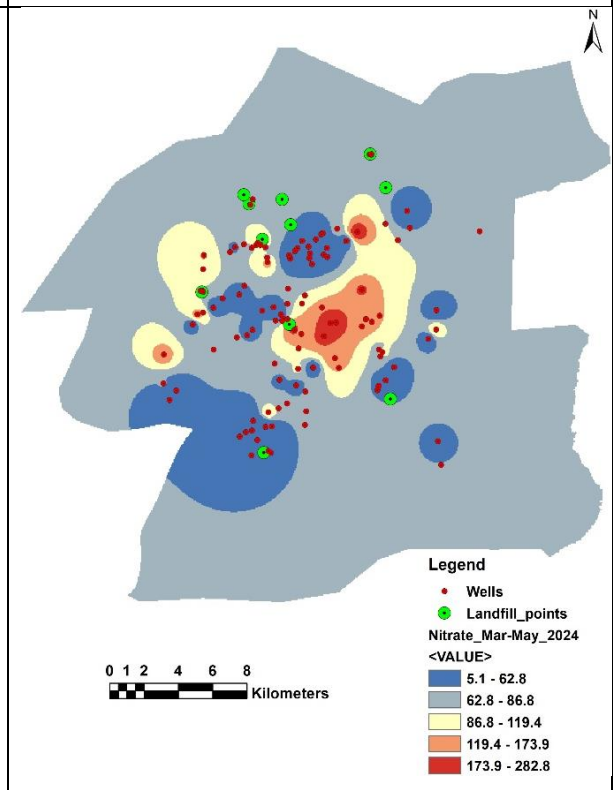
(k) TDS (Nov-Dec 2023)



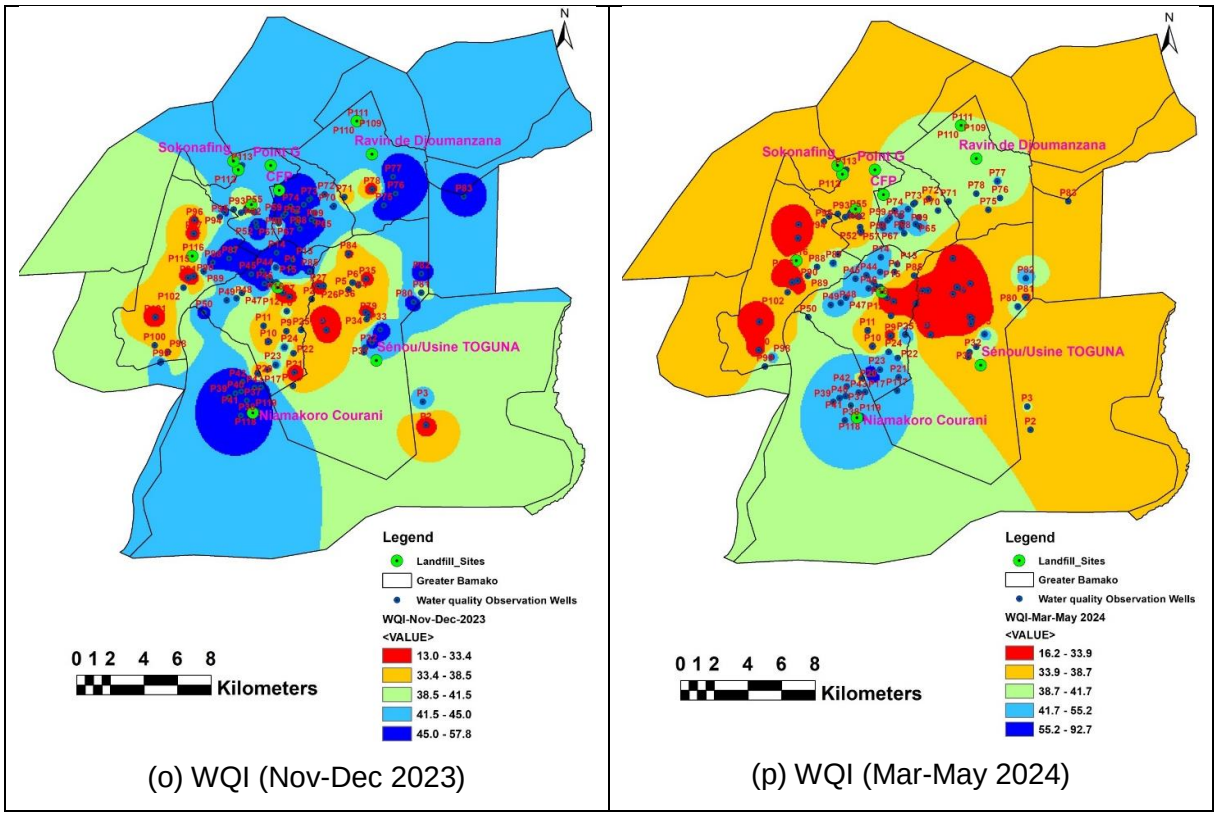
(l) TDS (Mar-May 2024)



(m) Nitrate (Nov-Dec 2023)



(n) Nitrate (Mar-May 2024)



(o) WQI (Nov-Dec 2023) (p) WQI (Mar-May 2024)

Abbildung 3 (a-p) Räumlich interpolierte Karten der Grundwasserqualitätsparameter

Tabelle 3. Statistische K der physikalisch-chemischen Zusammensetzung der Grundwasserqualität aus 119 Brunnen (Nov-Dez 2023)

Statistics	GW level (m)	pH	Temperature (°C)	Conductivity (µs/cm)	Salinity	TDS (mg/L)	Nitrate (mg/L)	WQI
Min	314.3	3.3	24	3	0	2	5	13.04
Max	408.7	7.02	31.7	4760	2590	3190	361	57.8
Average	361.5	5	27.8	381.9	183.1	254.9	71.2	

Tabelle 4. Statistische Kenngrößen der physikalisch-chemischen Zusammensetzung der Grundwasserqualität aus 119 Brunnen (Mar-May 2024)

Statistics	GW level (m)	pH	Temperature (°C)	Conductivity (µS/cm)	Salinity	TDS (mg/L)	Nitrate (mg/L)	WQI
Min	310.7	4	28	45.6	0	31.4	5	16.2
Max	408.0	7	31.6	2510	1290	1680	283	92.7
Average	359.35	5.3	28.5	395.1	189.2	263.6	108.8	

Die Analyse der Karten des räumlichen Grundwasserstands zeigt den offensichtlichen Einfluss der Regenzeit auf die Grundwasserneubildung. Der Grundwasserspiegel wird eindeutig von den saisonalen Niederschlägen bestimmt, wobei nach der Regenzeit (November-Dezember)

ein wesentlich höherer Pegel zu beobachten ist (**Abb. 3.a**), während der Pegel in der Trockenzeit vor der Regenzeit (März-Mai) erheblich sinkt (**Abb. 3.b**).

Die Unterschiede zwischen den Perioden nach und vor der Regenzeit finden sich auch generell in den gemessenen Werten der Wasserqualitätsparameter (**Tabellen 3 und 4**). Die Werte der Leitfähigkeit, des Salzgehalts, des TDS und des Nitrats sind nach der Regenzeit aufgrund des hohen Stoffeintrages, der durch die Versickerung nach den Regenfällen angetrieben wird, erheblich erhöht (siehe linke Felder von Abb. 3). Im Gegensatz dazu sind die Schadstoffwerte in der Trockenperiode vor der Regenzeit niedriger, wenn der Grundwasserspiegel nicht mehr unter dem Einfluss der Versickerung von Regenwasser steht (siehe rechte Tafeln in **Abb. 3**).

Die TDS-Werte zeigen, dass die Gebiete auf der linken Seite des Flusses (Kernbereiche von Bamako) stärker verschmutzt sind als die Gebiete auf der rechten Seite des Flusses (**Abb. 3.k-l**). Die TDS-Werte sind im Bereich des Stadtzentrums wie Darsalam, Medina-coura, Quinzanbougou, Sans-Fils, Niarela, N'golonina extrem hoch (z.B.: Brunnen 58, 60, 68, 69). Dieser Innenstadtbereich ist auch das kommerzielle Zentrum mit einem hohen Abfallaufkommen, und die Brunnen in diesen Gebieten stehen zusätzlich unter dem Einfluss der Mülldeponien Darsalam und CFP. Außerdem trägt die unzureichende Bewirtschaftung der Versickerung in den städtischen Bereichen erheblich zum Eintrag von Stoffen durch versickerndes Regenwasser in das Grundwasser bei.

Bereiche mit hohen TDS-Werten werden in Sebenikoro, Kalabanbougou, Hamdallaye, Sotuba und der Zone Industrielle beobachtet, was auf verschiedene Verschmutzungsquellen zurückzuführen ist.

Die hohen TDS-Werte in Lafiabougou werden an Brunnen gemessen, die stark von der Deponie Lafiabougou beeinflusst werden (z. B. Brunnen 114). In Sebenikoro und Kalabanbougou werden hohe TDS-Werte weit entfernt von der Mülldeponie gemessen (z. B. Brunnen 100 und 101), aber sie befinden sich alle in der Nähe des Flusses. Die Verunreinigung der Brunnen in diesen Vierteln wird durch Fließvorgänge mit Schadstoffen aus dem Fluss in die Brunnen verursacht. Diese Aussagen werden durch die beobachtete unterirdische Fließrichtung vom Fluss zu den Brunnen in diesen Ortschaften gestützt (**Abb. 8.f**). Im Gebiet von Sotuba und der Zone Industrielle (z. B. Brunnen 70 und 71) sind die hohen TDS-Werte auf den unterirdischen Fließvorgängen mit Schadstoffen aus Abwassersammlern in die Brunnen zurückzuführen. Die Verschmutzung des Grundwassers ist in diesen Stadtvierteln während der Trockenzeit von März bis Mai deutlich stärker ausgeprägt (**Abb. 3.l**).

2.4 Kartierung der Grundwasserfließrichtung im Grundwasserleiter (ober- und unterstrom in Bezug auf die Deponien)

Der oberflächennahe Grundwasserleiter wird in großem Umfang für die Trinkwasserversorgung genutzt, vor allem in den stadtnahen Gebieten, wo er durch Bohrungen erschlossen wird. Der Wasserstand wird an 119 Brunnen in zwei Zeiträumen gemessen, nämlich von November bis Dezember, wenn der Grundwasserleiter durch die Infiltration von Regenwasser angestiegen ist, und von März bis Mai, wenn der Pegel des Grundwasserleiters deutlich niedriger ist und die Infiltration weniger Einfluss hat. Der Wasserstand wurde mit einer piezometrischen Sonde gemessen, und die Höhe des Geländes an der Brunnenposition wurde mit dem GPS-Gerät GPSMAP66i aufgezeichnet.

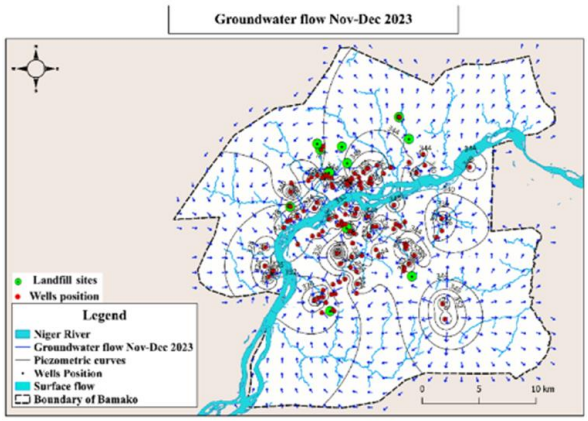


Abbildung 4. Grundwasserfließrichtung Nov- Dez 2023

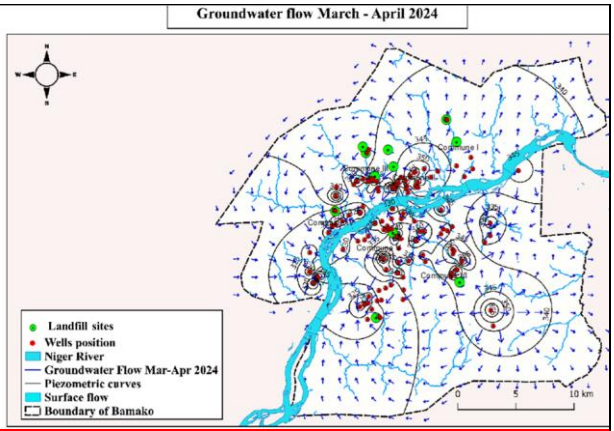
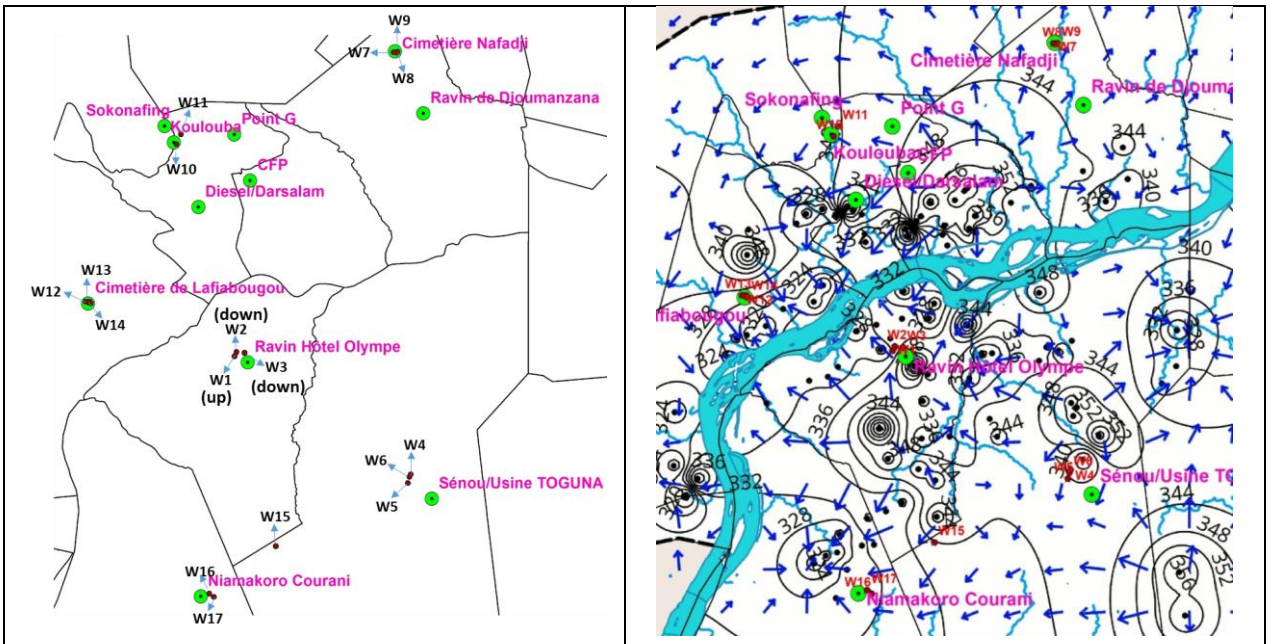


Abbildung 5. Grundwasserfließrichtung - März-Mai 2024

Die gemessenen statischen Wasserstände wurden für jeden Brunnen referenziert, indem der gemessene statische Pegel vom Höhenwert (Referenz) abgezogen wurde. Die referenzierten Wasserstände werden auf die Grenzen von Bamako interpoliert, um den Grundwasserspiegel von Bamako zu kartieren. Anschließend werden aus den Isolinien des Grundwasserstandes der interpolierten Grundwasserkarten die Fließrichtungen abgleitet.

2.5 Wasserqualitätsparameter unter dem Einfluss der Deponien

Um die potenziellen Auswirkungen von Deponien auf die Grundwasserqualität zu analysieren, wurden zunächst Brunnen in der Nähe dieser Durchgangsdeponien durch Ortsbegehungen und Befragung von Haushalten in der Nähe der Deponien ermittelt. Auf diese Weise wurden 17 Brunnen in der Nähe der Durchgangsdeponien erfasst und für die Entnahme von Wasserproben ausgewählt, um die Werte der Wasserqualitätsparameter zu messen. Für jeden Brunnen wurde die relative Entfernung vom Brunnen zur Durchgangsdeponie berechnet. Die Standorte der einzelnen Deponien und der nahegelegenen Brunnen sind in den Karten der Grundwasserfließrichtung eingezeichnet. Die Brunnen, die sich stromaufwärts oder stromabwärts von jeder Deponie befinden, werden so der Grundwasserfließrichtung folgend identifiziert (**Abb. 6.a-b**).



(a) 17 GW wells near to the Landfill sites

(b) 17 GW wells with GW flow directions

Abbildung 6. Siebzehn GW-Brunnen in der Nähe der Deponiestandorte zur Überwachung der GW-Qualitätsparameter

Hohe TDS-Werte werden in der Nähe der Deponien Lafiabougou, CFP, Darsalam und Olympe gemessen. Der vermutete Einfluss von Deponien auf die Wasserqualitätsparameter wird in Abhängigkeit von der Entfernung zwischen der Deponie und den Brunnen sowie der relativen Position der Brunnen flussabwärts oder flussaufwärts der Deponien analysiert. Die Entfernung zwischen den Deponien und ausgewählten näheren Brunnen reicht von 44 m bis 2796 m und die gemessenen TDS-Werte schwanken zwischen 25 und 1155 ppm.

Die in **Abb. 7** dargestellte Analyse der TDS-Werte in Abhängigkeit von der Entfernung zur Deponie zeigt, dass im Allgemeinen höhere TDS-Werte in Brunnen in geringerer Entfernung beobachtet werden. Die TDS-Werte sind bei Brunnen, die stromabwärts liegen, höher und bei Brunnen, die stromaufwärts liegen, im Allgemeinen niedriger. Je größer der Abstand zwischen dem Brunnen und der Deponie ist, desto höher ist der gemessene TDS-Wert des Brunnens.

Im speziellen Fall der Deponie Olympe befindet sich der Brunnen W1 stromaufwärts, während sich W2 und W3 stromabwärts befinden. Der Brunnen W1, der 470 m von der Deponie entfernt liegt, weist einen niedrigeren TDS-Wert auf, was darauf hindeutet, dass der Brunnen W1 nicht oder nur geringfügig von der Deponie beeinflusst wird. Die Brunnen W2 und W3 sind 328 m bzw. 483 m von der Deponie entfernt und weisen mit TDS-Werten von 308,8 bzw. 253,7 eine höhere Konzentration auf.

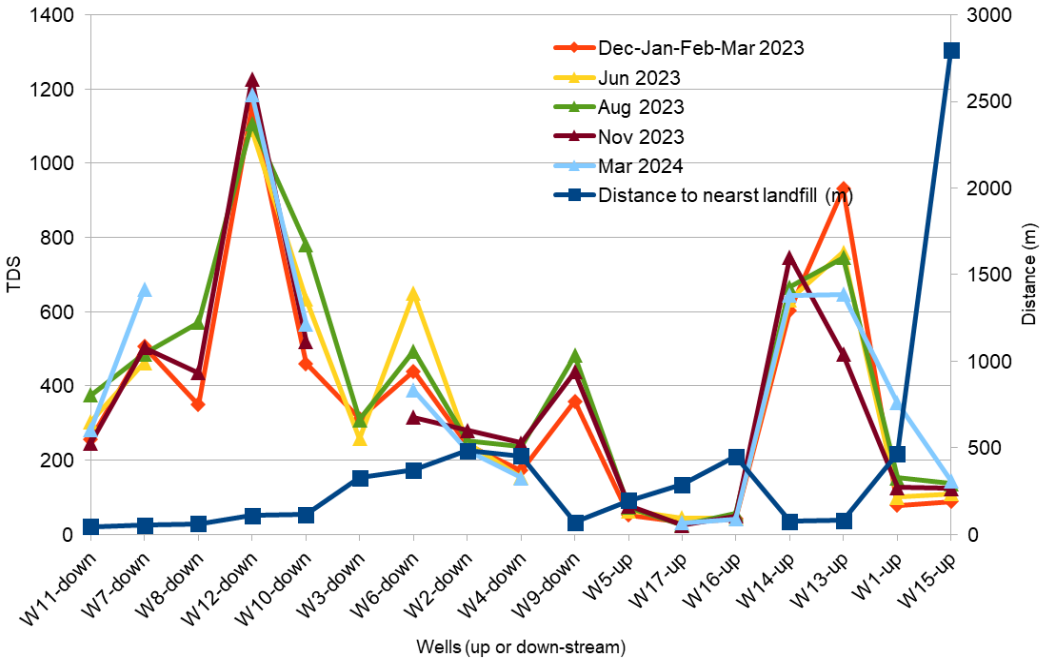
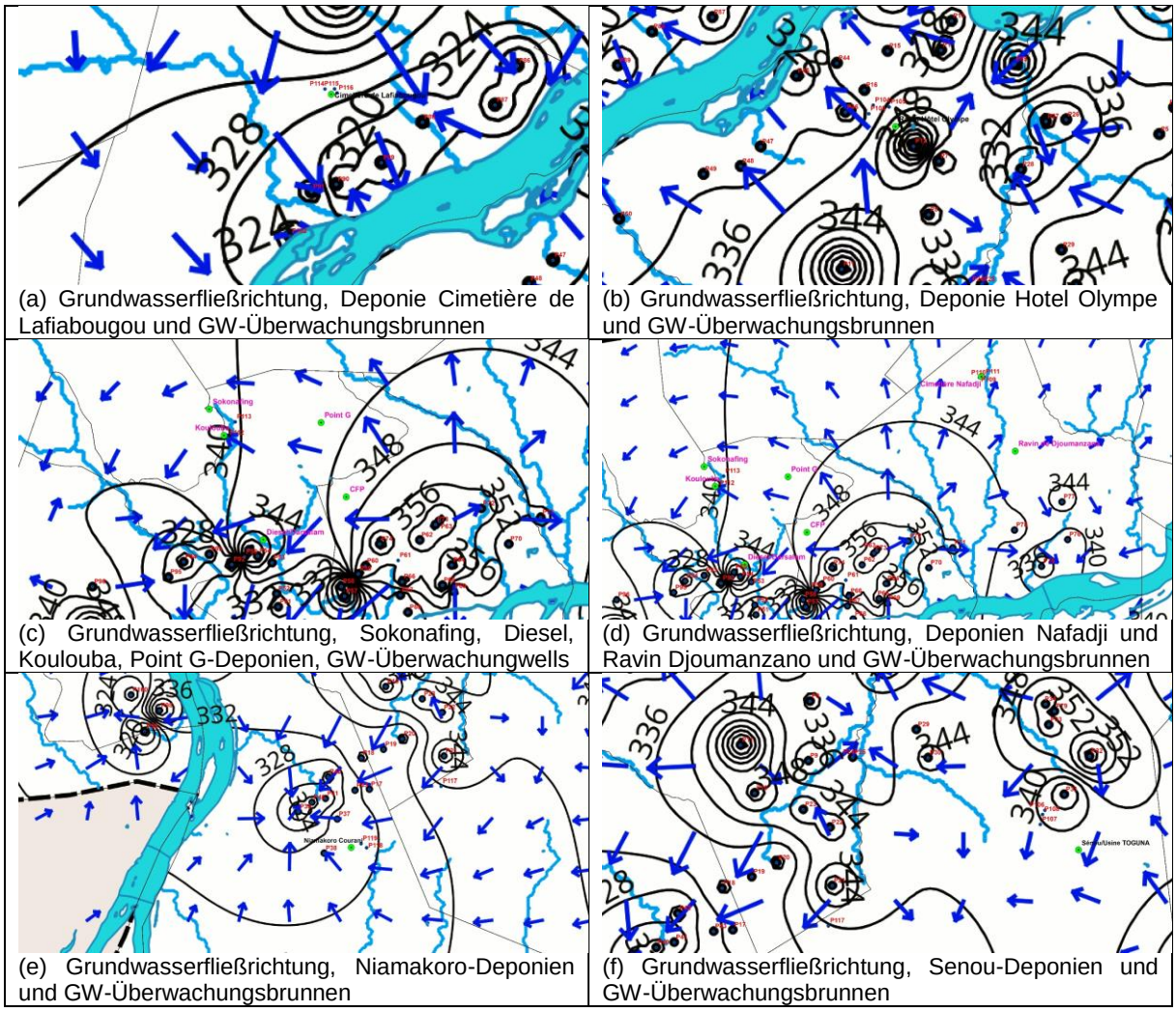


Abbildung 7: TDS der siebzehn GW-Bohrungen in der Nähe der Deponien für die verschiedenen Zeiträume (die relative Entfernung der Bohrungen zu den nächstgelegenen Deponien ist auf der rechten Achse angegeben).

Das Ausmaß der Auswirkungen der Olympe-Durchgangsdeponie auf die Grundwasserqualität ist aus **Abb. 8.a** ersichtlich. Mehrere Brunnen (z.B. P44, P54, P46, P16, P103, P104, P105) befinden sich flussabwärts des Schadstoffstroms aus dieser Deponie. Die TDS-Werte dieser Brunnen sind durchgängig hoch. Das Wasser aus einigen dieser Brunnen wird für die Gartenbewässerung verwendet, andere werden für den Hausgebrauch und als Trinkwasser genutzt.

Im Fall der Deponie Lafiabougou liegt der Brunnen W12 flussabwärts und die Brunnen W13 und W14 flussaufwärts. Der stromabwärts gelegene Brunnen W12 ist 108 m von der Deponie entfernt und weist einen hohen TDS-Wert von 1108 ppm auf. Die Brunnen W13 und W14 sind nur 76 m bzw. 82 m von der Deponie entfernt. Obwohl die Brunnen flussaufwärts liegen, sind die gemessenen TDS-Werte sehr hoch, was darauf hindeutet, dass die Brunnen in unmittelbarer Nähe der Transitablagerungen ebenfalls beeinflusst werden, auch wenn sie flussaufwärts der Deponie liegen. **Abb. 8a** zeigt Brunnen, die sich flussabwärts der Durchgangsdeponie Lafiabougou befinden und möglicherweise durch diese Deponie (z. B. Brunnen P89, P90) und den Fluss Niger verschmutzt werden. Die Lage dieses Transitlagers ist ein ‚hotspot' an dem lokalen Wasser- und Stoffflüsse kumulieren, so dass seine Auswirkungen auf das Grundwasser stark ausgeprägt sind. Die Auswirkungen dieses Standorts auf das Brunnenwasser waren für die örtliche Bevölkerung spürbar, was durch Beschwerden deutlich wird, die immer wieder durch die Anwohner geäußert werden.



(a) Grundwasserfließrichtung, Deponie Cimetière de Lafiabougou und GW-Überwachungsbrunnen

(b) Grundwasserfließrichtung, Deponie Hotel Olympe und GW-Überwachungsbrunnen

(c) Grundwasserfließrichtung, Sokonafing, Diesel, Koulouba, Point G-Deponien, GW-Überwachungwells

(d) Grundwasserfließrichtung, Deponien Nafadji und Ravin Djoumanzano und GW-Überwachungsbrunnen

(e) Grundwasserfließrichtung, Niamakoro-Deponien und GW-Überwachungsbrunnen

(f) Grundwasserfließrichtung, Senou-Deponien und GW-Überwachungsbrunnen

Abbildung 8. Verständnis der GW-Flussrichtung und des Standorts von Deponien

2.6. Diskussion zum WQI

Der WQI basiert üblicherweise auf physikalischen, chemischen und biologischen Faktoren. In dieser Studie waren Messungen biologischer Parameter nicht verfügbar, so dass der berechnete Index aus physikalischen und chemischen Faktoren bestimmt wurde. Die WQI-Werte liegen zwischen 0 und 100 (einige Systeme gehen jedoch höher). Die allgemeine Interpretation des WQI (für viele Standardskalen wie den NSFWQI oder den CCME WQI) lautet: WQI im Bereich 90 – 100 – Exzellent Wasserqualität; 70 – 90 – Gut; 50 – 70 – Medium; 25 – 50 – Arm; 0 – 25 - Sehr schlecht (stark verschmutzt).

Der in dieser Studie ermittelte WQI-Index ist für einige Brunnen extrem niedrig und liegt im Zeitraum November-Dezember bei 13,04 und im Zeitraum März-Mai bei 16,2. Ein Wasserqualitätsindex (WQI) von 13,04 ist theoretisch möglich, würde aber typischerweise auf eine extrem schlechte Wasserqualität hinweisen – im Wesentlichen ‚stark verschmutzt' und für jegliche Nutzung, einschließlich Trinken, Freizeit oder für Wasserlebewesen, ungeeignet.

Die WQI-Analyse belegt, dass in Bamako überwiegend deutlich niedrigere Werte vorliegen, was darauf hinweist, dass das Brunnenwasser erheblich verschmutzt ist. Es zeigt sich ein deutlicher Unterschied in Ausmaß und Ausmaß der Verschmutzung zwischen der Zeit nach der Regenzeit (November-Dezember) und der Trockenzeit (März-Mai) vor der Regenzeit. Tatsächlich ist die Zeit nach der Regenzeit an fast allen Orten in Bamako durch eine deutlich schlechtere Grundwasserqualität gekennzeichnet, wobei die WQI-Werte nirgends über 70 liegen. Am Ende der Trockenzeit unmittelbar vor der Regenzeit werden relativ deutlich bessere WQI-Werte beobachtet als die in der durch Versickerung (und den dadurch bedingten vertikalen Stofftransport) geprägte Regenzeit danach. Diese Analysen belegen eine erhebliche Verschmutzung des Grundwassers in Bamako durch versickerndes Regenwasser. Die Qualität ist in Gebieten am rechten Flussufer besser, da dort aufgrund der späteren Besiedlung weniger potenziell belastende Aktivitäten stattfanden. In der Nachregenzeit verschlechtert sich die Wasserqualität aller Brunnen in ganz Bamako. Die Auswirkungen der Transitdepots in Olympe, Lafiabougou, Darsala und CFP sind auf der WQI-Karte (**Abbildung 3.O**) deutlich sichtbar. Dies bedingt fürdie Behörden (und weiteren Akteuren) die zwingende Notwendigkeit, zeitnah und wirksam eine Lösung für die Bewirtschaftung der Transitdepots zu finden.

2.7 Zusammenfassung der Schlussfolgerungen

Neben Maßnahmen an den Quellen (Haushalte: Mülltrennung; systematische Müllsammlung in der Stadt; Deponien: Oberflächen- und Sohlenversiegelung von Deponien, Sortierung verschiedener Abfallarten) ermöglichen die Erkenntnisse aus ERA-SOLMAB folgende Schlussfolgerungen zur Unterstützung des Grundwasserschutzes und zur Verringerung der nachteiligen Auswirkungen von Deponien auf die Umwelt und damit auf die Gesundheit der Bevölkerung:

- Deponien wurden lokalisiert, abgegrenzt und charakterisiert.
- Beobachtungsmöglichkeiten (hauptsächlich Brunnen) für Grundwasserstand und -qualität im Stadtgebiet, insbesondere im Umfeld der Deponien, wurden ermittelt.
- Eine GIS-Datenbank mit räumlichen Konstellationen zur Erfassung der Wirkung von Deponien auf die Grundwasserbeschaffenheit wurde eingerichtet. Mit den von USTT-B gemessenen Daten wurde die Datenbank getestet und steht für die Verbindung der in ERA-SOLMAB gemessenen -Daten mit früheren und zukünftigen Messkampagnen in Bamako zur Verfügung (Verlängerung der Messreihen, Erfassung von Trends, Einschätzung der Wirksamkeit zukünftiger Maßnahmen zum Grundwasserschutz).

- Detaillierte Überwachungskonzepte in der Nähe der Deponien wurden ausgearbeitet und stehen wissenschaftlichen Einrichtungen und der Verwaltung in Bamako zur Verfügung.
- Kritische Bereiche wurden identifiziert und insbesondere die entwickelte GIS-Datenbank kann die Planung der Land- und Wassernutzung in Bamako wirksam unterstützen (z. B. Abgrenzung von Schutzzonen oberhalb geplanter Grundwasserentnahmestellen).
- Die überwachten Grundwasserstände vor und nach der Regenzeit ermöglichen die Abschätzung der Grundwasserschwankungen und damit der Grundwasserneubildung. Dies kann dazu beitragen, geeignete Standorte für eine künstlich verstärkte natürliche Grundwasserneubildung (geeignete Standorte: hohe Neubildungsrate und geringe Verschmutzung) zu lokalisieren, um damit einen Beitrag zur nachhaltigen Grundwasserbewirtschaftung in der Region zu identifizieren. Die ist vor allem vor dem Hintergrund des zukünftig steigenden Wasserbedarfs (Urbanisierung, Industrialisierung, Ausdehnung und Intensivierung stadtnaher Kleinbewässerung, Klimawandel) besonders notwendig.

Wir sehen in der engen Zusammenarbeit mit USTT-B und der Einbeziehung junger Wissenschaftler einen wichtigen Beitrag, um die entwickelten Methoden und erzielten Erkenntnisse in der akademischen Lehre einzusetzen und die Nachhaltigkeit der Ergebnisse über das Projektende hinaus zu stärken.

2. Wichtigste Positionen des zahlenmäßigen Nachweises

Insgesamt hat die Universität Bonn im Laufe des Projekts rund 143.440,97 EUR ausgegeben (ohne die Projektpauschale), davon rund 123.725,55 EUR für Personal (akademisches Personal), 5915,86 EUR für Stipendien für Masterstudenten und 788,96 EUR für Reisekosten. Die sonstigen Projektkosten beliefen sich auf etwa 11.739,35 EUR für den Erwerb von Software und 1.991,25 EUR für Geräte. Das Projekt wurde kostenneutral verlängert, was durch COVID-19-bedingte Einsparungen bei den Reisekosten ausgeglichen wurde. Einzelheiten im Finanzbericht / Verwendungsnachweis.

3. Notwendigkeit und Angemessenheit der geleisteten Projektarbeit

Aufgrund der Corona-Situation und danach durch die zunehmend angespannte Sicherheitslage in Mali ergaben sich insofern Veränderungen, dass keine Reisen nach Bamako durchgeführt werden konnten. Dies wurde allerdings durch die Zusammenarbeit mit USTT-B aufgefangen (intensive digitale Besprechungen, Feldarbeit durch USTT-B mit Einbeziehung von Masterstudenten). Insbesondere der hohe Einsatz von USTT-B und die in vorherigen Projekten

entstandene gute Zusammenarbeit ermöglichten unter den bestehenden schwierigen Bedingungen die Durchführung der Arbeite, wenn auch mit leichten Verzögerungen (was zu der kostenneutral Verlängerung führte).

4. Voraussichtlicher Nutzen, insbesondere die Verwertbarkeit des Ergebnisses – auch konkrete Planungen für die nähere Zukunft – im Sinne des fortgeschriebenen Verwertungsplans,

Wirtschaftliche Erfolgsaussichten

Mit einer Einteilung in kurz-, mittel- sowie langfristige Wirkungen sehen wir für relevante Akteure folgende Aussichten:

(a) Kurzfristige Verwertungsaussichten:

• Kooperationspartner

Mit weiterentwickelter Kompetenz verbessern unsere Kooperationspartner die Kontakte zu Verwaltungen und können diese in Zukunft für Forschungen zu praktisch relevanten Themen nutzen. Weiterhin wird die Durchlässigkeit zwischen Wissenschaft, Verwaltung und Wirtschaft verbessert, woraus sich einerseits Vorteile für Absolventen der Universität ergeben und andererseits wertvolles sowie dringend benötigtes ‚know-how' in die Verwaltungen sowie Unternehmen übertragen werden kann.

• Trinkwasserversorger und lokale Bevölkerung

Die Verringerung von Grundwasserbelastungen (als Rohwasser für die Trinkwasserbereitstellung) erleichtert die Wasseraufbereitung, senkt damit verbundene Kosten und reduziert das gesundheitliche Risiko der Bevölkerung in Bamako.

(b) **Mittelfristige** Verwertungsaussichten entstehen durch die Einbeziehung von Konzepten zum Schutz des Grundwassers in räumliche Planungen:

• Planungsabteilungen der (Stadt-)Verwaltung in Bamako

Die in ERA-SOLMAB erarbeiteten Maßnahmen zur Verringerung der Grundwasserbelastung (‚hotspots', Wirkungen von Deponien auf die räumlich -zeitliche-Grundwassersituation) erhöhen die Wirksamkeit räumlicher Planungen im Hinblick auf eine nachhaltige Bewirtschaftung der Wasserressourcen und die Sicherstellung der Trinkwasserversorgung.

(c) **Langfristige** Verwertungsoptionen bestehen einer Verstetigung der mittel- sowie kurzfristigen Wirkungen (siehe entsprechende Hinweise: oben) und für Unternehmen – insbesondere bei der Übertragung auf weitere Städte über Bamako hinaus.

• Unternehmen in Mali und Deutschland

Bei den Arbeiten in ERA-SOLMAB zeigte sich die dringende Notwendigkeit einer Verbesserung des Monitoringsystem, was deutschen Firmen auf dem Gebiet der Mess- und Regeltechnik (in Zusammenarbeit mit lokalen Unternehmen) einen Marktzugang eröffnet (in Kooperation mit Partnern in Bamako). Dies gilt auch für Firmen / Institutionen auf dem Boden-/Grundwassersanierungen.

Wissenschaftliche und/oder technische Erfolgsaussichten

Der Grundwasserschutz hat essenzielle Bedeutung für die Trinkwasserversorgung der Bevölkerung. Die - auch in Afrika - fortschreitende Urbanisierung führt zu einer Erhöhung des (Trink-)Wasserbedarfs und steigert die potenzielle Gefährdung der Grundwasserressourcen (z.B. durch ungeordnete Abfallwirtschaft). Vor diesem Hintergrund ergeben sich vielfältige Erfolgsaussichten für Forschungen zum Grundwasserschutz mit kurz- sowie mittel-/langfristigem Zeithorizont:

die erzielten Ergebnisse verbessern die Datenlage in einem Bereich (und in einer Region), der bisher eher durch Datenknappheit gekennzeichnet war:

• die verbesserte Datenlage und leistungsfähige Analysewerkzeuge (GIS-gestützte Datenbank) ermöglichen mittelfristig die Erarbeitung von wirksamen Schutzkonzepten, die auch an zukünftige Entwicklungen (Bevölkerungswachstum, Klimawandel, gesteigerte Anforderungen an die Abfallwirtschaft) angepasst werden können.

• die erarbeiteten Werkzeuge für einen wirksamen Grundwasserschutz können (mit entsprechender Anpassung) auf vergleichbare Regionen/Aufgabenstellungen übertragen werden. Da die in Bamako untersuchte Situation typisch für viele städtische Bereiche in Afrika ist, ergeben sich erhebliche Potenziale für eine Übertragung von Lösungsansätzen (zumindest für Komponenten dieser Ansätze). Diese Wirkungen entfalten sich langfristig.

• Die intensive Kooperation insbesondere mit den Partnern in Bamako bietet gute Voraussetzungen dafür, dass die im (Grund-)Wasserbereich (ZEF-Teilvorhaben) entwickelten Ansätze in den Gesamtzusammenhang Wasser-/Abfallwirtschaft/Gesundheit eingeordnet werden können (ganzheitliche und pragmatische Lösungen für die Untersuchungsregion, Nexus-orientierte Forschungen mit langfristigem Zeithorizont).

Diese erzielten Ergebnisse sind auch deswegen interessant, weil sie in Zusammenarbeit der Partner zur Publikation in wissenschaftlichen Zeitschriften genutzt werden.

Wissenschaftliche und wirtschaftliche Anschlussfähigkeit

Die Anschlussfähigkeit der entwickelten Methoden und Ergebnisse wird durch das Projekt-Konzept bzw. entsprechende Aktivitäten folgendermaßen gefördert:

✓ die gesammelten und analysierten Daten schießen bestehende Lücken in einem Bereich, in dem zukünftig erhebliche Interventionen und Investitionen notwendig sind (Grundwasserschutz),

✓ die entwickelten Konzepte und der Übertragung auf weitere Anwendungsgebiete/-situationen bieten interessante und relevante Themen für Folgeanträge (komplementäre Stärken der Partner, mittelfristige Option bei Ausschreibungen)

✓ Die entwickelten Methoden gehen unmittelbar in die Lehre der Partner-Universitäten ein, was zum einen die Lehre bereits unmittelbar bereichert und zum anderen langfristig zur Verstetigung der Projektwirkungen über die Laufzeit hinaus beiträgt (Studenten als ‚Agents of Change').

Mit der Option für weitere Forschungsanträge und die Umsetzung in der Lehre wird ein Beitrag geleistet, dem ‚brain-drain' in Afrika wirksam zu begegnen, damit insbesondere die Chancen des wissenschaftlichen Nachwuchses zu fördern und insgesamt die wissenschaftliche Kapazitäten in der Region zu dem relevanten Thema ‚Grundwasserschutz/Trinkwasserversorgung' und ‚Wasser-Energie- Umwelt Nexus zu stärken.

In Bezug auf die wirtschaftliche Anschlussfähigkeit bestehen ebenfalls klare Vorteile:

• dringend notwendige Investitionen in die Trinkwasserversorgung werden durch einen verbesserten Grundwasserschutz in ihrer Wirkung gesteigert, was langfristig durch die Einbeziehung in räumliche Planungen noch gesteigert werden kann.

• für die Bevölkerung wird die Gesundheitssituation verbessert.

Die Argumente beziehen sich direkt auf den Wasserbereich. Im ERA-SOLMAB-Verbund ergeben sich durch die koordinierte Verbesserung der Abfall-/Energie-/Grundwasser-/Umweltsituation erhebliche Gesamt-Wirkungen, die insbesondere für die wachsenden Megastädte in Afrika dringend erforderlich sind.

Schutzrechte Dritter, die einer Verwertung der Ergebnisse entgegenstehen könnten:

Es sind für das beantragte Teilvorhaben keine Schutzrechte und Schutzrechtsanmeldungen erkennbar, die einer Verwertung der Ergebnisse des Projektes entgegenstehen könnten.

5. des Während der Durchführung des Vorhabens dem ZE bekannt gewordenen Fortschritte auf dem Gebiet des Vorhabens bei anderen Stellen

Uns keine Ergebnisse von Dritten bekannt geworden, die für das Projekt relevant wären.

6. der Erfolgte oder geplante Veröffentlichungen des Ergebnisses nach Nr. 5 der NABF

Veröffentlichungen sind in Vorbereitung und werden bei den einschlägigen Fachzeitschriften eingereicht (Spatio-temporal analysis of groundwater quality and impacts of landfill sites, a case study of Bamako in Mali).