



TECHNISCHE UNIVERSITÄT MÜNCHEN  
TUM School of Engineering and Design

**Advancing water resources management in arid regions  
through stakeholder engagement, digitalization, and  
policy integration: Jordan as a case study.**

Mohammad Munther Mohammad Al-Qadi

Vollständiger Abdruck der von der TUM School of Engineering and Design der  
Technischen Universität München zur Erlangung des akademischen Grades eines

**Doktors der Ingenieurwissenschaften (Dr.-Ing.)**

genehmigten Dissertation.

Vorsitz: Prof. Dr.-Ing. Markus Disse

Prüfer\*innen der Dissertation

1. Priv.-Doz.Dr.rer. nat. habil. Gabriele Chiogna
2. Assistant Prof. Dr. Rudy Rossetto

Die Dissertation wurde am 16.05.2023 bei der Technischen Universität München  
eingereicht und durch die TUM School of Engineering and Design am 14.08.2023 angenommen.

# Abstract

Applying integrated water resources management (IWRM) is complex, especially in arid regions where groundwater is the primary water source, recharge occurs very slowly, and surface water is barely available. In such a scenario, the government does not have many options for water management besides overexploiting the groundwater aquifer to cover the water demand. The increasing gap between supply and demand further complicates the effective application of IWRM. This dissertation demonstrates the potential for improving the existing water management practices in arid regions by bringing together science, policy, and digitalization, focusing on Jordan as a case study. The implemented approach includes technical, institutional, and economic components and targets three levels: national, river basin, and wellfield.

At the national level, a comprehensive groundwater resources assessment for Jordan was carried out. The assessment results identified areas that are highly impacted by over-abstraction and specified the consequences of the abstraction on the groundwater system. The basalt plateau and Wadi Al Arab area are determined as the most affected areas in Jordan. At the basalt plateau, the over-abstraction reversed the groundwater flow regime towards the northwest of the Azraq basin instead of the original flow toward the basin's center. In contrast, the over-abstraction in the Wadi Al Arab wellfield shifted the confinement limit northward and changed the hydraulic conditions of the southern wells of Wadi Al Arab from confined to unconfined. As an outcome, heavy metal concentration increased in these wells. To meet the increased demand, the Jordanian government opted to drill deep wells for drinking water purposes in the northern part of the Azraq Basin. Given that the hydraulic condition is confined in that area, it is assumed, due to the over-abstraction, that a shift of the confinement limit eastward would change the confinement condition in the western part of the planned wellfield, potentially deteriorating the water quality, similar to the case of the Wadi Al Arab.

Governmental strategic decisions at the national level, such as the plan to drill deep drinking water wells in the Azraq Basin must be evidence-based. Therefore, at the river basin level, a methodology for assessing the relationship between the decision-makers and researchers was developed. The methodology defined the water-decision research gaps as the inability to decide on governmental water strategy goals through conducting a systematic peer and grey literature review at the basin level, and it was tested at the Azraq basin. The impact of the national water strategy (2008-2022) on the conducted research in the basin was also examined. The results show that the number of published water-related research documents increased from 37 between 1985 and 2007 to 62 between 2008 and 2018. However, this increase may not necessarily demonstrate a positive influence from the water strategy, as it aligns with the overall trend of increasing research production in Jordan. The methodology then introduces a matrix that links specific research focus areas with the government's water strategy topics, aiming to encourage the creation of innovative and demand-driven research in the future; it also enables researchers to identify and address research gaps,

strengthen the connection between the focus areas and the water strategy goals, and contribute to solving societal challenges.

At the wellfield level, a combination of bottom-up and top-down approaches was implemented to improve the monitoring, operation, and maintenance procedures in the Wadi Al Arab wellfield. The results showed that the implemented new monitoring system in 2017 has remarkably increased the data availability compared to the data collected before 2017. For instance, the total number of collected and stored dynamic groundwater level (DWL) measurements of the wellfield was 96 measurements for five years from 2012 to 2016; in contrast, the number of DWL measurements for years 2017 and 2018 was 266 and 230 measurements, respectively. Besides improving the monitoring system, a simple operational decision support toolbox that combines a wellfield information system (WFIS) in MS Access and an operational decision support tool (ODST) in MS Excel systems reduced the maintenance time of the wells from an average of 5.2 days/maintenance/well in 2012 to less than one day/maintenance/well in 2017. Such results verified the need to move toward digitalization in the water sector to improve wellfield management; therefore, the Decision Support Software and Database for Wellfield Management (DeMa) was developed. DeMa is the first software designed specifically for managing wellfields and individual wells. The software is divided into four modules (i) Database Management Tool (DbMT) to provide an organized platform to search, modify and retrieve wellfield data, (ii) Observation Based tool (OBT) to visualize the database in graphs, (iii) Research-Based tool (RBT), which is a user-friendly tool to help wellfield managers to apply novel research methodologies to the user's study area without needing technical skills in programming or mathematics, and (v) Documents Management Tool (DMT) to manage all documents related to the wells. The software is designed in modular sections, so it can be further developed by plugging in additional tools and options in subsequent versions. DeMa was tested using data and information from the Wadi Al Arab wellfield and contributed to providing an overview of wellfield management, operation, monitoring, and maintenance practices through its various tools.

The dissertation shows the vital role of multilevel stakeholder involvement in improving Jordan's groundwater monitoring system. At the same time, it emphasizes the importance of digital transformation for maintaining the communication channels between the stakeholders and helping the users visualize data and make informed decisions. Such an approach was tested on a wellfield level. It is recommended to apply this approach to other wellfields in Jordan. On the national level, it is crucial to regularly conduct water resources assessment studies for the whole country to be considered in the national water strategy and to guide other researchers to focus on the most important and critical areas. Simultaneously, researchers should support the government by considering the goals that the government aims to achieve in the strategy when conducting studies. Finally, it is recommended to establish a national water knowledge translation committee including members from research institutes and the MWI within the organizational hierarchy of the MWI that aims to use the research conducted within research institutes.

# Zusammenfassung

Die Anwendung des integrierten Wasserressourcenmanagements (IWRM) ist komplex, insbesondere in Trockengebieten, in denen das Grundwasser die wichtigste Wasserquelle ist, dessen Neubildung sehr langsam erfolgt und Oberflächenwasser kaum verfügbar ist. In einem solchen Szenario hat die Regierung nicht viele Optionen für die Wasserbewirtschaftung außer der Übernutzung des Grundwasser-Aquifers zur Deckung des Wasserbedarfs. Die zunehmende Kluft zwischen Angebot und Nachfrage erschwert die wirksame Anwendung des IWRM zusätzlich. Diese Dissertation zeigt das Potenzial für die Verbesserung der bestehenden Wassermanagementpraktiken in Trockengebieten auf, indem sie die Wissenschaft, Politik und Digitalisierung am Beispiel Jordaniens zusammenführt. Der umgesetzte Ansatz umfasst technische, institutionelle und wirtschaftliche Komponenten und zielt auf drei Ebenen ab: die nationale, die Flussgebiets- und die Brunnenebene.

Auf nationaler Ebene wurde eine umfassende Bewertung der Grundwasserressourcen in Jordanien durchgeführt. Dabei wurden Gebiete ermittelt, die in hohem Maße von übermäßiger Entnahme betroffen sind, und die Folgen der Entnahme für das Grundwassersystem beschrieben. Das Basaltplateau und das Wadi Al Arab wurden als die am stärksten betroffenen Gebiete in Jordanien ermittelt. Auf dem Basaltplateau führte die Überentnahme zu einer Umkehrung des Grundwasserflusses in Richtung Nordwesten des Azraq-Beckens anstelle des ursprünglichen Flusses in Richtung des Beckenzentrums. Im Gegensatz dazu wurde durch die Überentnahme im Wadi Al Arab die Begrenzungsgrenze nach Norden verschoben, und die hydraulischen Bedingungen der südlichen Brunnen des Wadi Al Arab wurden von gespannt zu ungespannt geändert. Infolgedessen stieg die Schwermetallkonzentration in diesen Brunnen. Um den gestiegenen Bedarf zu decken, beschloss die jordanische Regierung, im nördlichen Teil des Azraq-Beckens Tiefbrunnen für Trinkwasserzwecke zu bohren. Da die hydraulischen Bedingungen in diesem Gebiet gespannt sind, wird davon ausgegangen, dass eine Verschiebung der Grenze des artesisch gespannten Grundwassers nach Osten die Spannungsbedingungen des Grundwassers im westlichen Teil des geplanten Brunnenfeldes verändern wird, was zu einer Verschlechterung der Wasserqualität führen könnte, ähnlich wie in Wadi Al Arab.

Strategische Entscheidungen der Regierung auf nationaler Ebene, wie z. B. der Plan, tiefe Trinkwasserbrunnen im Azraq-Becken zu bohren, müssen auf Fakten beruhen. Daher wurde auf der Flusseinzugsgebietsebene eine Methode zur Bewertung der Beziehungen zwischen den Entscheidungsträgern und den Forschern entwickelt. Die Methode definierte die Forschungslücken im Bereich Wasserentscheidungen als die Unfähigkeit, über die Ziele der staatlichen Wasserstrategie zu entscheiden, indem eine systematische Überprüfung der Peer- und grauen Literatur auf der Ebene des Einzugsgebiets durchgeführt wurde, und wurde im Azraq-Becken getestet. Die Auswirkungen der

nationalen Wasserstrategie (2008-2022) auf die im Einzugsgebiet durchgeführte Forschung wurden ebenfalls untersucht. Die Ergebnisse zeigen, dass die Zahl der veröffentlichten wasserbezogenen Forschungsdokumente von 37 zwischen 1985 und 2007 auf 62 zwischen 2008 und 2018 gestiegen ist. Dieser Anstieg ist jedoch nicht unbedingt ein Beweis für einen positiven Einfluss der Wasserstrategie, da er mit dem allgemeinen Trend einer steigenden Forschungsproduktion in Jordanien übereinstimmt. Die Methodik führt dann eine Matrix ein, die spezifische Forschungsschwerpunkte mit den Themen der Wasserstrategie der Regierung verknüpft und darauf abzielt, die Schaffung innovativer und bedarfsorientierter Forschung in der Zukunft zu fördern; sie ermöglicht es den Forschern auch, Forschungslücken zu identifizieren und anzugehen, die Verbindung zwischen den Schwerpunktbereichen und den Zielen der Wasserstrategie zu stärken und zur Lösung gesellschaftlicher Herausforderungen beizutragen.

Auf der Ebene des Brunnenfeldmanagements wurde eine Kombination aus Bottom-up- und Top-down-Ansätzen umgesetzt, um die Überwachungs-, Betriebs- und Wartungsverfahren im Brunnenfeld Wadi Al Arab zu verbessern. Die Ergebnisse zeigten, dass das 2017 eingeführte neue Überwachungssystem die Datenverfügbarkeit im Vergleich zu den vor 2017 gesammelten Daten deutlich erhöht hat. So betrug beispielsweise die Gesamtzahl der gesammelten und gespeicherten dynamischen Grundwasserstandsmessungen (DWL) des Brunnenfelds 96 Messungen in den fünf Jahren von 2012 bis 2016; im Gegensatz dazu betrug die Anzahl der DWL-Messungen in den Jahren 2017 und 2018 266 bzw. 230 Messungen. Neben der Verbesserung des Überwachungssystems konnte durch eine einfache Toolbox zur Unterstützung operativer Entscheidungen, die ein Brunnenfeld-Informationssystem (WFIS) in MS Access und ein Tool zur Unterstützung operativer Entscheidungen (ODST) in MS Excel kombiniert, die Wartungszeit der Brunnen von durchschnittlich 5,2 Tagen pro Brunnen im Jahr 2012 auf weniger als einen Tag/Wartung/Brunnen im Jahr 2017 reduziert werden. Diese Ergebnisse bestätigten die Notwendigkeit, die Digitalisierung im Wassersektor voranzutreiben, um die Verwaltung der Brunnenfelder zu verbessern; daher wurde die Software zur Entscheidungsunterstützung und Datenbank für die Verwaltung von Brunnenfeldern (DeMa) entwickelt. DeMa ist die erste Software, die speziell für die Verwaltung von Brunnenfeldern und einzelnen Brunnen entwickelt wurde. Die Software ist in vier Module unterteilt: (i) Database Management Tool (DbMT) zur Bereitstellung einer organisierten Plattform für die Suche, Änderung und den Abruf von Brunnenfelddaten, (ii) Observation Based Tool (OBT) zur grafischen Darstellung der Datenbank, (iii) Research-Based Tool (RBT), ein benutzerfreundliches Tool, das Brunnenfeldmanagern hilft, neue Forschungsmethoden auf das Untersuchungsgebiet des Benutzers anzuwenden, ohne dass technische Kenntnisse in Programmierung oder Mathematik erforderlich sind, und (v) Documents Management Tool (DMT) zur Verwaltung aller Dokumente im Zusammenhang mit den Brunnen. Die Software ist in modularen Abschnitten aufgebaut, so dass sie in späteren Versionen durch zusätzliche Werkzeuge und Optionen weiterentwickelt werden kann. DeMa wurde

anhand von Daten und Informationen aus dem Wadi Al Arab-Brunnenfeld getestet und trug mit seinen verschiedenen Werkzeugen dazu bei, einen Überblick über das Management, den Betrieb, die Überwachung und die Wartungspraktiken des Brunnenfelds zu geben.

Die Dissertation zeigt, wie wichtig die Beteiligung der verschiedenen Interessengruppen bei der Verbesserung des jordanischen Grundwasserüberwachungssystems ist. Gleichzeitig wird die Bedeutung der digitalen Transformation für die Aufrechterhaltung der Kommunikationskanäle zwischen den Interessengruppen und die Unterstützung der Nutzer bei der Visualisierung von Daten und der Entscheidungsfindung hervorgehoben. Ein solcher Ansatz wurde auf der Ebene eines Brunnenfeldes getestet. Es wird empfohlen, diesen Ansatz auf andere Brunnenfelder in Jordanien anzuwenden. Auf nationaler Ebene ist es von entscheidender Bedeutung, regelmäßig Studien zur Bewertung der Wasserressourcen im ganzen Land durchzuführen, die in die nationale Wasserstrategie einfließen und anderen Forschern die Möglichkeit geben, sich auf die wichtigsten und kritischsten Bereiche zu konzentrieren. Gleichzeitig sollten die Forscher die Regierung unterstützen, indem sie bei der Durchführung von Studien die Ziele berücksichtigen, die die Regierung mit der Strategie erreichen will. Schließlich wird empfohlen, innerhalb der Organisationshierarchie des MWI ein nationales Komitee für die Umsetzung von Wasserwissen einzurichten, das sich aus Mitgliedern von Forschungsinstituten und des MWI zusammensetzt und welches darauf abzielt, die in den Forschungsinstituten durchgeführte Forschung zu nutzen.

# Scientific contributions

## Research article

---

**Title:** Causes and consequences of long-term groundwater overabstraction in Jordan

**Authors:** Brückner,F., Bahls, R., **Alqadi, M.**, Lindenmaier, F., Hamdan,I., Alhiyari, M., Atieh, A.

**Journal:** Hydrogeology Journal (published, 2021, <https://doi.org/10.1007/s10040-021-02404-1>)

**Contributions:** Conceptualization, F.B. and R.B.; methodology, F.B., M.ALQ and R.B.; software, F.B., M.ALQ and R.B.; formal analysis, F.B., M.ALQ and R.B.; investigation, F.L., M.ALH, I.H. and A.A.; resources, F.L. and R.B.; data curation, F.B., M.ALH, I.H. and M.ALQ.; writing—original draft preparation, F.B., and R.B. ; writing—review and editing, F.B., R.B.,F.L., M.ALH, I.H. and M.ALQ; visualization, R.B.,F.B., M.ALH, I.H. and M.ALQ.; supervision, F.L.. project administration, R.B. and F.L...

---

**Title:** Implementation of Simple Strategies to Improve Wellfield Management in Arid Regions: The Case Study of Wadi Al Arab Wellfield, Jordan

**Authors:** **Alqadi, M.**, Margane, A., Marwan Al Raggad, Subah, A., Disse, M., Hamdan, I. and Chiogna, G.

**Journal:** Sustainability (published, 2019, <https://doi.org/10.3390/su11215903>)

**Contributions:** Conceptualization, M.A. and A.M.; methodology, M.A.; software, M.A.; formal analysis, M.A.; investigation, M.A. and A.M.; resources, A.M. and H.A.S.; data curation, M.A. and I.H.; writing—original draft preparation, M.A. and G.C.; writing—review and editing, M.A., A.M., M.A.R., M.D., I.H., G.C.; visualization, M.A. and G.C.; supervision, G.C., A.M., H.A.S. and M.D.; project administration, A.M.

---

**Title:** A Novel Method to Assess the Impact of a Government’s Water Strategy on Research: A Case Study of Azraq Basin, Jordan.

**Authors:** **Alqadi, M.**, Al Dwairi, A., Dehnavi, S., Margane, A., Al Raggad, M., Al Wreikat, M., & Chiogna, G.

**Journal:** Water (published, 2021, <https://doi.org/10.3390/w13152138>)

**Contributions:** Conceptualization, M.A. and G.C.; methodology, M.A. and G.C.; investigation, M.A., A.M. and M.A.W.; resources, M.A.W.; data curation, M.A.; writing—original draft preparation, G.C., M.A., A.A.D. and S.D.; writing—review and editing, G.C., M.A., A.A.D., S.D., M.A.R. and M.A.W.; visualization, M.A.; supervision, G.C. and M.A.R.; project administration, M.A.; funding acquisition, G.C., M.A.R. and S.D.

---

**Title:** Development of a User-friendly Tool for Groundwater Wellfields Management

**Authors:** **Alqadi, M.**, Aldwairi, A., Armin Margane, A., Brueckner,F., Schneider, M., Merchán-Rivera, P., Chiogna, G.

**Journal:** IAHR congress (published, 2022, doi://10.3850/IAHR-39WC2521716X2022884)

**Contributions:** Conceptualization, M.A. and G.C.; methodology, M.A. and G.C.; investigation, M.A.; resources, M.A.W.; data curation, M.A.; writing—original draft preparation, M.A.; writing—review and editing, G.C., M.A., A.A.D., F.B, A.M and P.MR.; visualization, M.A.; supervision, G.C. and .A.M, and M.A.R.; project administration, M.A.and G.C.

---

**Title:** Presentation of DeMa (Decision Support Software and Database for Wellfield Management) and Its Application for the Wadi Al Arab Wellfield

**Authors:** **Alqadi, M.**, Al Dwairi, A., Merchán-Rivera, P., Chiogna, G.

**Journal:** Water (published, 2023, <https://doi.org/10.3390/w15020331> )

**Contributions:** Conceptualization, M.A. and G.C.; methodology, M.A. investigation, M.A.; resources, M.A.; data curation, M.A.; writing—original draft preparation, G.C., M.A. and A.A.D.; writing—review and editing, G.C., M.A., A.A.D. and P.M.-R.; visualization, M.A.; supervision, G.C.; project administration, M.A.; funding acquisition, G.C. All authors have read and agreed to the published version of the manuscript.

---

## Technical Reports

---

**Title:** Wadi Al Arab Well Field Management- Description of Hydrogeological Conditions

**Authors:** Dorsch, T., **Alqadi, M.**, Hamdan, I., Hiasat, T., Al-Subeh, A., Margane, A.

**Year:** 2020

---

**Title:** Wadi Al Arab Well Field Management - Well Field Management Plan- Wadi Al Arab wellfield,

**Authors:** **Alqadi, M.**, Margane, A., Hamdan, I., Al Kordi, R., Hiasat, T., Al Wriekat, M., Maharmeh, H., Bali, A., Taha, W., Mrayyan, K., Abu Alhaj, R., Karasneh, B., Melhem, S.

**Year:** 2018

---

**Title:** Aqib Well Field Management - Well Field Management Plan- corridor wellfield.

**Authors:** Hamdan, I., Margane A., Subah A, **Alqadi, M.**, Hiasat, T., Al Kordi O., Taha, W., Karasneh, B., G, Selawi.

**Year:** 2017

---

**Title:** Aqeb Well Field Management - Well Field Management Plan- Aqeb wellfield,

---



**Authors:** Hiasat T., Margane A., Subah A., Hamdan, I., **Alqadi, M.**, Al Kordi O., Taha W., Karasneh B., G Selawi.,

**Year:** 2017

---

**Title:** Wadi Al Arab Well Field Management - WellField Assessment Report

**Authors:** Dorsch, T., **Alqadi, M.**, Hamdan, I., Hiasat, T., Al-Subeh, A., Margane, A.

**Year:** 2017

---

## Posters

---

**Title:** Developing Decision Support Software and Database for Wellfield Management

**Authors:** **Alqadi, M.**, Chiogna, G.

**Event:** Doctoral Candidates' Day 2022

**Place and date:** Munich (Germany), 14.07.2022

---

**Title:** Innovative Engineering Injection Extraction systems for in-situ groundwater remediation (INE2)

**Authors:** Chiogna, G., Rolle, M., Singh, T., **Alqadi, M.**, Ziliotto, F., Wienkenjohann H., Cogorno J.

**Event:** IGSSE Forum 2022

**Place and date:** Online (Germany), 24.05.2022

---

**Title:** Impact of climate change on groundwater recharge in north of Jordan.

**Authors:** **Alqadi, M.**

**Event:** Annual Doctoral Seminar - Karlsruher Institut für Technologie, TU Dresden, Universität Stuttgart, TU München

**Place and date:** Stuttgart (Germany), 18.05.2018

---

## Conferences and talks

---

**Title:** Development of a User-friendly Tool for Groundwater Wellfields Management

**Authors:** **Alqadi, M.**, Aldwairi, A., Armin Margane, A., Brueckner, F., Schneider, M., Merchán-Rivera, P., Chiogna, G.

**Event:** IAHR congress

**Place and date:** Granada (Spain) 23.06.2022

---

**Title:** Interdisciplinary approach for enhancing water security: Jordan as a case study

**Authors:** **Alqadi, M.**

---

<b>Event:</b>	Technical University of Denmark (DTU) research visit
<b>Place and date:</b>	Copenhagen (Denmark) 07.04.2022
<b>Title:</b>	Implementation of simple strategies and tools to improve water management in arid regions: the case study of Wadi Al Arab wellfield
<b>Authors:</b>	<b>Alqadi, M.</b> , Chiogna G., Margane, A., Disse, M., Alraggad, M., Wraikat M.
<b>Event:</b>	European Geosciences Union (EGU) General Assembly 2019
<b>Place and date:</b>	Vienna (Austra), 10.04.2019
<b>Title:</b>	Operational Aspects in Wellfield Management – case studies in Northern Jordan.
<b>Authors:</b>	<b>Alqadi, M.</b> , Al Wriekat, M.
<b>Event:</b>	The Eighth Environmental Symposium of German-Arab Scientific Forum For Environmental Studies
<b>Place and date:</b>	Amman (Jordan), 11.03.2019
<b>Title:</b>	Implications of projected climate change for groundwater recharge in North Jordan.
<b>Authors:</b>	Al Raggad M., Salameh, E., <b>Alqadi, M.</b> , Magri F., Disse M., Chiogna G.
<b>Event:</b>	European Geosciences Union (EGU) General Assembly 2018
<b>Place and date:</b>	Vienna (Austra), 09.04.2018
<b>Title:</b>	Groundwater recharge variation under climatic variability in Ajlun area and the recharge zone of Wadi Arab well field – Jordan.
<b>Authors:</b>	Al Raggad M., <b>Alqadi, M.</b> , Magri F., Disse M., Chiogna G
<b>Event:</b>	European Geosciences Union (EGU) General Assembly 2017
<b>Place and date:</b>	Vienna (Austra), 27.04.2017

## Others

- *BBC interview* (can be found [here](#))
- *Bridge to innovation grant (2023)*: 50k Euro grant from TUMForte to bring DeMa (Decision Support Software and Database for Wellfield Management) from Technology Readiness Level TRL3/4 to TRL 5/6. The grant will be used towards the development and deployment of DeMa 1.0. The next version of DeMa will be launched in phases, over the next twelve months, with the final version available in early 2024.