



44. IWASA

Internationales Wasserbau-Symposium
Aachen 2014

**Wasserbauliches Versuchswesen –
Aus Anlass der Neuen Wasserbauhalle
des IWW**

9. und 10. Januar 2014

Hydronumerische Untersuchungen zur Effektivität von Sohlschwellen zur Grundwasseranreicherung in ariden Gebieten

Constantin Schweiger und Holger Schüttrumpf

Abstract

Mit Hilfe der Modellierungssoftware FEFLOW wurde der Einfluss einer Sohlschwelle auf die Grundwasseranreicherung in ariden Gebieten untersucht, um die Folgen von Sedimentablagerungen, der Bildung einer Kolmationsschicht sowie dem Einsatz von Bohrungen im Stauraum hinter den Sohlschwellen auf die Grundwasseranreicherung zu bewerten. Die vorgestellten Ergebnisse zeigen, dass lediglich eine Sohlschwelle ohne Sedimentation zu einer Anhebung des Grundwasseranstiegs führt. Sobald es zu Sedimentation kommt, ist der Grundwasseranstieg im Vergleich zur Situation ohne Sohlschwelle geringer.

1 Einleitung

Der steigende Bedarf an Süßwasser ist ein weltweites Problem. Gerade in semi-ariden oder ariden Regionen stellt die Süßwasserversorgung eine große Herausforderung dar. Die Landwirtschaft hat mit rd. 70 Prozent den größten Anteil am Süßwasserbedarf. Hinzu kommen die Industrie mit rd. 20 Prozent und Haushalte mit einem Anteil von rd. 10 Prozent (Struckmeier, 2003).

Wird ein Großteil des Süßwasserbedarfs mit Grundwasser gedeckt, bedeutet ein steigender Bedarf an Süßwasser zugleich einen steigenden Bedarf an Grundwasser. Ist das Grundwasser zudem die Haupttrinkwasserquelle wie beispielsweise für ca. 75 Prozent der Bevölkerung Afrikas, so wird sich die Situation aufgrund des Wachstums der Weltbevölkerung in den nächsten Jahrzehnten verschärfen (UNESCO, 2012).

Wie im Großteil Nordafrikas ist in vielen semi-ariden und ariden Regionen auf der Erde die Grundwasserneubildung sehr gering. Von der Jahresniederschlagsmenge beträgt sie oft nur wenige Prozent. Wird aber bei einer geringen Grundwasserneubildung vermehrt Grundwasser entnommen, ist eine Absenkung des Grundwasserspiegels die Folge. Die künstliche Grundwasseranreicherung stellt eine häufig diskutierte Möglichkeit dar, dem Absenken des Grundwasserspiegels entgegen zu wirken.

Als Fallbeispiel für die vorliegenden Untersuchungen dient das im Nordwesten Afrikas liegende Marokko. Dort wird in so genannten Wadis (ausgetrocknete Flussläufe, die nur zu Regenereignissen Wasser führen) mit Hilfe von Sohlschwellen der Abfluss von Niederschlägen aufgestaut, um ihn anschließend im Boden zu versickern.

Aufgrund der geringen Fließgeschwindigkeiten im Bereich des Stauraums hinter der Sohlschwelle kommt es u. U. zu erheblichen Sedimentablagerungen, sodass oft nach wenigen Niederschlagsereignissen nahezu der gesamte Stauraum einer Sohlschwelle mit Sedimenten gefüllt ist. Daraus ergab sich die Fragestellung, ob Sohlschwellen bei erheblicher Sedimentation als Maßnahme zur Grundwasseranreicherung in ariden Gebieten überhaupt geeignet sind.

Um diese Fragestellung zu untersuchen, wurden mit Hilfe der Modellierungssoftware FEFLOW (DHI-Wasy, 2014) zur Simulation von Fließ- und Transportvorgängen im Boden verschiedene numerische Modelle aufgebaut, um die Grundwasseranreicherung zu untersuchen. Für folgende Szenarien wurde der Grundwasseranstieg systematisch untersucht:

- Wadi ohne Sohlschwelle
- Wadi mit Sohlschwelle
- Wadi mit Sohlschwelle und Sedimentation
- Wadi mit Sohlschwelle, Sedimentation und Kolmation
- Wadi mit Sohlschwelle, Sedimentation, Kolmation und Bohrung bis zur Gewässersohle
- Wadi mit Sohlschwelle Sedimentation, Kolmation und Bohrung bis zwei Meter unter Gewässersohle

2 Hintergrundinformationen

In diesem Kapitel werden zunächst einige Informationen zur Situation der Süßwasserversorgung in Marokko vorgestellt. Anschließend wird das Prinzip der künstlichen Grundwasseranreicherung kurz erläutert sowie auf einige einsatzbedingte Probleme eingegangen.

2.1 Situation in Marokko

Das Königreich Marokko liegt im Nordwesten Afrikas und hat eine Fläche von rd. 450 000 Quadratkilometern, auf der ca. 32,4 Millionen Menschen leben (DIHK, 2012). Durch die Gebirgszüge des Atlas wird das Land in zwei Klimazonen geteilt. Im Norden des Landes herrscht mediterranes Klima und im Süden ist das Klima arid. So beträgt beispielsweise die Jahresniederschlagsmenge in Tanger (Nordwesten) 753 Millimeter und in Marrakesch (Zentrum) nur 247 Millimeter (Klimadiagramme, 2013). Somit hat das unterschiedliche regionale Klima einen erheblichen Einfluss auf die Süßwasserversorgung des Landes.

Laut einer Studie der DIHK (2012) wird der Bedarf an Süßwasser in Marokko im Jahr 2020 rd. 14 500 Millionen Kubikmeter betragen. Dabei werden 90 Prozent für die

landwirtschaftliche Bewässerung benötigt und die übrigen 10 Prozent verteilen sich auf die Trinkwasserversorgung, den Tourismus und industriell benötigtes Wasser. Für die jährlich benötigte Trinkwassermenge von rd. 2280 Millionen Kubikmetern werden beispielsweise mit 700 Millionen Kubikmetern rd. 30 Prozent den Grundwasserspeichern des Landes entnommen (DIHK, 2012).

Die Folgen einer steigenden Grundwasserentnahme bei einer gleichzeitig geringen Grundwasserneubildung können Tabelle 1.1 entnommen werden, wo exemplarisch die Verläufe der Grundwasserspiegel einiger Regionen in Marokko zu sehen sind. Ein Beispiel ist die Region Marrakesch-Tensift-El Haouz, wo ein Großteil des Grundwassers für die Bewässerung von rd. 136 000 Hektar Agrarland verwendet wird (WYSS, 2012). Die Folge der hohen Grundwasserentnahme war eine Absenkung des Grundwasserspiegels von rd. 18 Metern innerhalb von 24 Jahren (Tabelle 1.1).

Tab. 1.1: Beispiele für die Senkung des Grundwasserspiegels (WYSS, 2012)

	Souss – Chtouka (bei Agadir)	Fès Meknes (östlich von Rabat)	Haouz (bei Marrakesch)
Funktion	Bewässerung	Trinkwasserversorgung	Bewässerung
Zeitraum	34 Jahre	25 Jahre	24 Jahre
Absenkung	24 Meter	64 Meter	18 Meter

Um dem steigenden Bedarf an Süßwasser gerecht zu werden und einer gleichzeitigen Absenkung des Grundwasserspiegels entgegen zu wirken, kann das Prinzip der künstlichen Grundwasseranreicherung verwendet werden, das im Folgenden vorgestellt wird.

2.2 Methodik der künstlichen Grundwasseranreicherung

Eine Methode der künstlichen Grundwasseranreicherung ist die Oberflächeninfiltration wie in Abbildung 2.1 dargestellt. Dabei wird Oberflächen- oder Niederschlagswasser an der Erdoberfläche aufgestaut, um es anschließend im Boden versickern zu lassen. Die Folge ist eine Anhebung des Grundwasserspiegels.

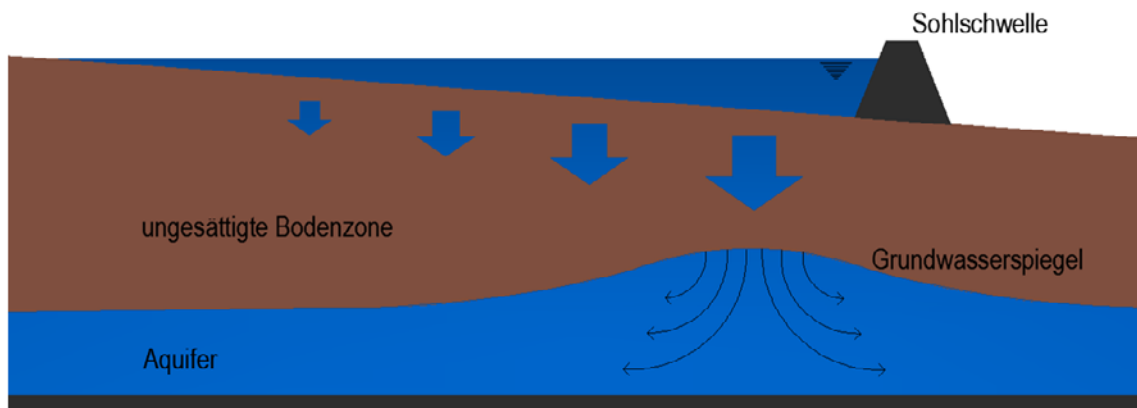


Abb. 2.1: Grundwasseranreicherung mittels Sohlswelle (eigene Darstellung)

Eine häufig angewandte Möglichkeit der Oberflächeninfiltration ist die Errichtung von Sohlswellen innerhalb eines Flusses oder eines Kanals, die senkrecht zur Strömungsrichtung angelegt werden. Ein Beispiel für ein derartiges System ist in Abbildung 2.2 für ein Gebiet in der Region Tensift/Marokko dargestellt.



Abb. 2.2: Beispiel eines aufsedimentierten Stauraums hinter einer Sohlswelle in Marokko (Schüttrumpf, 2012)

Da aufgrund der Stauung Bereiche mit niedrigen Fließgeschwindigkeiten erzeugt werden, kommt es flussaufwärts einer Sohlschwelle teilweise zu erheblichen Sedimentablagerungen. Die Folge dieser Verlängerung des Sickerweges ist eine geringere Infiltration in den Boden und somit ein reduzierter Eintrag von Oberflächenwasser in den Grundwasserleiter.

Ein weiteres Problem ist häufig die Bildung einer so genannten Kolmationsschicht. Prinzipiell handelt sich dabei um die Ablagerung feiner Partikel (Schwebstoffe) auf oder in der Gewässersohle, sodass der Porenraum und somit die Durchlässigkeit des Bodens reduziert wird. Die Gründe der Bildung einer Kolmationsschicht sind vielfältig und können neben der einfachen Ablagerung von Partikeln auch chemischen Ursprungs sein wie beispielsweise die Ausfällung von Calciumcarbonat im Boden (Bouwer, 2004).

Das einfachste Mittel, die Ablagerung von Sedimenten oder die Bildung einer Kolmationsschicht zu unterbinden, ist Prävention. So kann das Infiltrationswasser zunächst in Sedimentationsbecken oder Filteranlagen geleitet werden, damit sich die feinen Partikel ablagern können. Eine andere Möglichkeit ist die periodische Trocknung des Infiltrationssystems oder die Entfernung der durchlässigkeitsmindernden Schichten mit Hilfe von Ackerwerkzeug. Wie oft und intensiv ein System zur künstlichen Grundwasseranreicherung unterhalten werden muss, hängt von den jeweiligen hydrologischen und sedimentologischen Randbedingungen ab. Es kann jedoch vorkommen, dass eine Räumung des Stauraums schon nach wenigen Tagen notwendig ist (Bouwer, 2004).

In Marokko sind derzeit in der Region Marrakesch eine Vielzahl von Sohlschwellen zur Grundwasseranreicherung in Nebenflüssen des Oued Tensift geplant. Bestehende Sohlschwellen zeigen eine starke Sedimentation mit der Ausbildung vergleichsweise undurchlässiger Kolmationsschichten. Zahlreiche Stauräume verlanden während eines einzigen Hochwasserereignisses (s. Abb. 2.2). Bevor neue Sohlschwellen gebaut werden, muss daher deren hydraulische Wirksamkeit unter verschiedenen hydrologischen und sedimentologischen Randbedingungen untersucht und bewertet werden.

Um dies zu erreichen, werden im Folgenden die verschiedenen Szenarien und deren Einfluss auf den Grundwasseranstieg mit Hilfe der Modellierungssoftware FEFLOW systematisch am Beispiel eines Prinzipmodells simuliert und bewertet. Die hydrologischen und sedimentologischen Randbedingungen in der Region Tensift wurden beim Aufbau des numerischen Modells sowie dessen Steuerung berücksichtigt.

3 Modellaufbau und Vorstellung der Ergebnisse

Nach einer kurzen Einführung in FEFLOW werden der Aufbau der verschiedenen Modelle sowie die wesentlichen Parametereinstellungen vorgestellt.

3.1 Modellaufbau

Bei FEFLOW handelt es sich um eine Software für Fließ- und Transportvorgänge im porösen Medium. Die Simulationen können sowohl für 2D- als auch für 3D-Modelle durchgeführt werden. Für die zu untersuchenden Situationen wurden mit der Version FEFLOW 6.1 verschiedene 3D-Modelle aufgebaut und die Fließvorgänge simuliert.

Bei allen Modellen handelt es sich um so genannte Prinzipmodelle. Sie entsprechen weniger der realen Situation als dass sie vielmehr dazu dienen, den unterschiedlichen Einfluss der verschiedenen Situationen auf den Grundwasseranstieg beispielhaft zu untersuchen und miteinander zu vergleichen.

Als Grundlage für alle Modelle dient ein hydronumerisches 3D-Modell, das aus drei Sedimentschichten besteht. Die geometrischen Daten sowie die modellspezifischen Eingangsgrößen sind im Folgenden aufgelistet:

- Alle Modelle sind 50 Meter breit und 160 Meter lang.
- Die drei Sedimentschichten unterhalb der Geländeoberkante haben eine Schichtdicke von jeweils zwei Metern.
- Bei den drei Sedimentschichten handelt es sich um verschiedene Sande, deren Durchlässigkeit im Bereich von $0,9 \cdot 10^{-5}$ bis $3,2 \cdot 10^{-5}$ Metern pro Sekunde liegt.
- Das Gefälle des Geländes beträgt 1,33 Prozent.
- In allen Modellen verläuft der Grundwasserspiegel in acht Metern Tiefe parallel zur Geländeoberkante.
- Die vertikale Durchlässigkeit ist um den Faktor zehn kleiner als die horizontale Durchlässigkeit.

Das erste Modell stellt den Ist-Zustand dar, also den Fall ohne Sohlschwelle. Im zweiten Modell wurde eine Sohlschwelle senkrecht zur Fließrichtung eingebaut. Ihre Höhe beträgt 1,2 Meter. Das dritte Modell berücksichtigt die Ablagerung von Sedimenten im Stauraum der Sohlschwelle. Dabei wurde vorausgesetzt, dass der gesamte Stauraum mit Sedimenten der gleichen Durchlässigkeit wie der des Untergrunds gefüllt ist.

Im vierten Modell wurde zu den Sedimentablagerungen noch eine zehn Zentimeter dicke Kolmationsschicht ergänzt. Berücksichtigt wurde diese zusätzliche Schicht durch die Abminderung des Leakage-Parameters auf $c = 6 \cdot 10^{-4}$ 1/s.

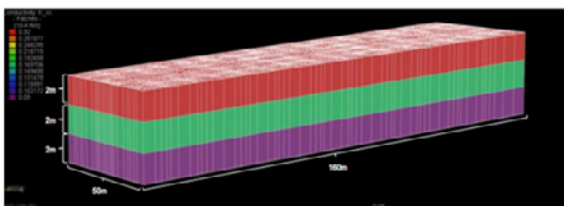
Im fünften Modell wurden fünf Bohrungen durch die vorhandene Sediment- und Kolmationsschicht bis zur ursprünglichen Gewässersohle angelegt, die im sechsten Modell um weitere zwei Meter vertieft wurde.

In Abbildung 3.1 sind die verschiedenen Modelle dargestellt. Die unterschiedliche Farbgebung resultiert aus den unterschiedlichen Durchlässigkeitswerten der verschiede-

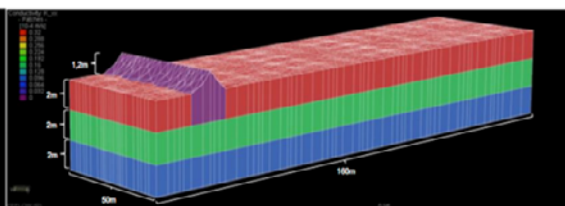
nen Schichten. Dem Bereich der Sohlschwelle wurde eine Durchlässigkeit von 0 m/s zugewiesen.

Ebenfalls zu erkennen sind die Bohrungen der Modelle fünf und sechs. Im fünften Modell gehen die Bohrungen bis in eine Tiefe von 1,1 Metern und im sechsten Modell bis auf 3,1 Meter Tiefe unter Geländeoberkante.

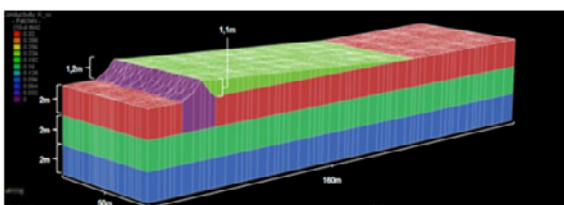
Modell 1: Ist-Zustand



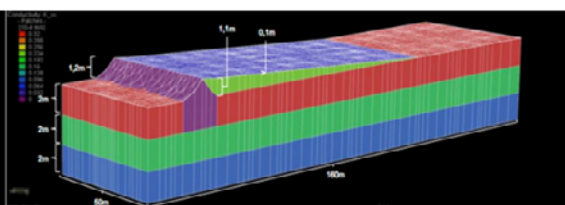
Modell 2: mit Sohlschwelle



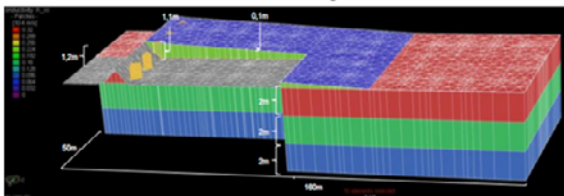
Modell 3: mit Sohlschwelle und Sedimentation



Modell 4: mit Sohlschwelle, Sedimentation und Kolmationsschicht



Modell 5: mit Sohlschwelle, Sedimentation, Kolmationsschicht und Bohrungen



Modell 6: mit Sohlschwelle, Sedimentation, Kolmationsschicht und tiefen Bohrungen

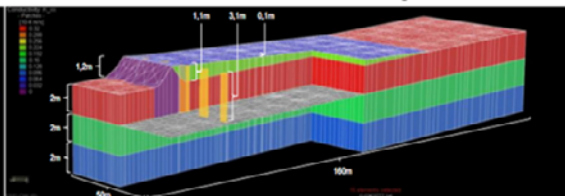


Abb. 3.1: Aufbau und Bemaßung der sechs Modelle

Als Input dient in allen Modellen ein neunstündiges Regenereignis, bei dem der Durchfluss zwischen 0 Kubikmetern und 60 Kubikmetern pro Sekunde schwankt. Simuliert wurde das Regenereignis mit Hilfe der Cauchy-Randbedingung, bei der in FEFLOW als Eingangswert eine Wasserstandsdimension zwischen Flusswasser- und Grundwasserspiegel vorgegeben wird. Um das Regenereignis realitätsnah abzubilden, wurde die verwendete Randbedingung mit einer Zeitreihe verknüpft. Als Eingangswert dient so die Summe aus der jeweiligen Geländehöhe und der stundenspezifischen Abflusshöhe, die mittels der Gauckler/Manning/Strickler-Formel aus dem Abfluss hergeleitet wurde. Das dynamische Voll- und Leerlaufen des Stauraums wurde nicht berücksichtigt. Die Abflusskurve des Regenereignisses ist in Abbildung 3.2 dargestellt.

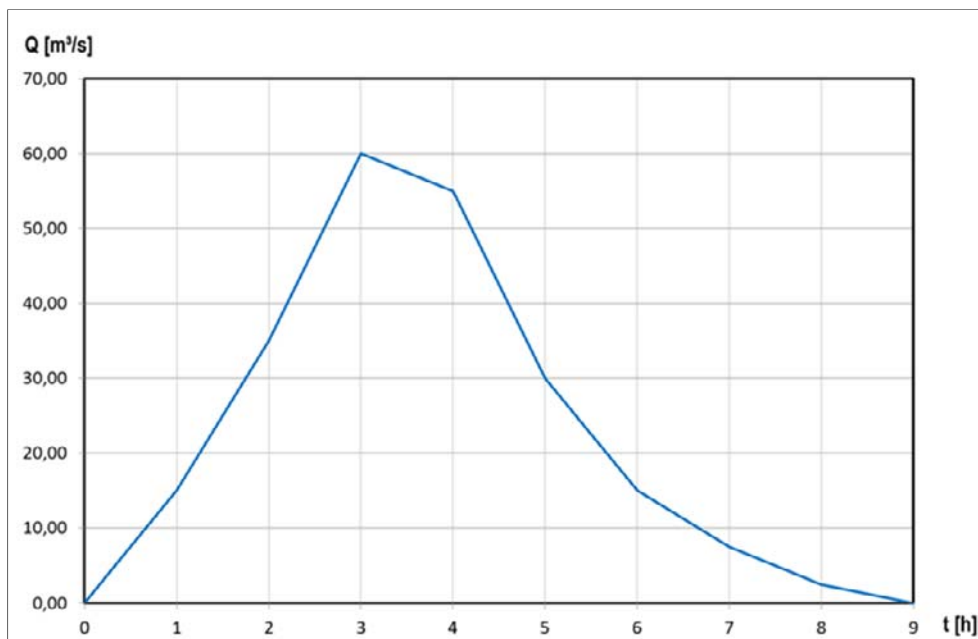


Abb. 3.2: Abflusskurve des Regenereignisses

Um die verschiedenen Modelle miteinander vergleichen zu können, muss jedes Modell mit Beobachtungspunkten versehen werden, die sich in allen Modellen an den gleichen Positionen im unteren Bereich in der Nähe der Sohlschwelle befinden. An diesen Punkten werden während der Simulation verschiedene Daten ermittelt, die anschließend exportiert und beispielsweise mit Hilfe von Excel visualisiert werden können.

Im Folgenden werden nun die verschiedenen Modelle miteinander verglichen. Als Vergleichsparameter dient dabei der zeitliche Verlauf des Grundwasserspiegels. Die Simulationszeit beträgt 40 Tage.

3.2 Vergleich und Gegenüberstellung der Modelle

In Abbildung 3.2 sind die zeitlichen Verläufe des Grundwasserspiegels der sechs Modelle dargestellt.

Im ersten Modell bewirkt das neunstündige Regenereignis einen Anstieg des Grundwassers von rd. 1,90 Metern in 12,5 Tagen. Bis zum Ende der Simulation nach 40 Tagen steigt der Grundwasserspiegel um insgesamt 2,1 Meter.

Das zweite Modell simuliert den Fall, wenn mit Hilfe einer Sohlschwelle der Abfluss des Niederschlagsereignisses aufgestaut wird. Die Folge dieser Steigerung der Druckhöhe ist eine höhere Infiltration in den Boden, sodass bereits nach zwei Tagen ein Grundwasseranstieg von 2,2 Metern erzielt wird. Das zwischenzeitliche Maximum und die anschließende Abnahme sind dadurch begründet, dass das Infiltrationswasser zunächst den unmittelbaren Bereich des Beobachtungspunktes erreicht (Maximum) und sich anschließend im unteren Bereich des Modells verteilt (Abnahme). Strömt nun im

weiteren Verlauf der Simulation das Wasser aus dem höher liegenden Teil des Modells in den Bereich des Beobachtungspunktes, steigt der Grundwasserspiegel wieder an. So wird nach 40 Tagen Simulation ein Anstieg von rd. 2,6 Metern erreicht.

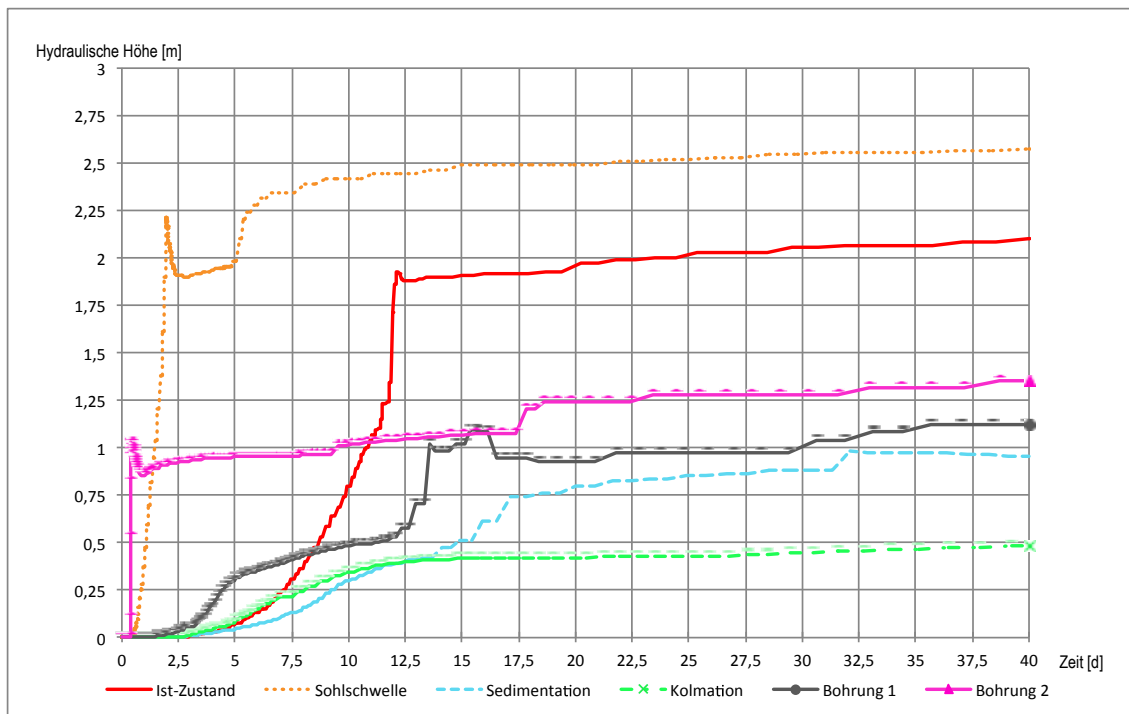


Abb. 3.3: Zeitlicher Verlauf des Grundwasserspiegels aller Modelle

Im dritten Modell ist der Stauraum der Sohlschwelle komplett mit Sediment gefüllt. Dieser längere Sickerweg verursacht eine Abnahme der Infiltration in den Boden. Die Folge ist ein Grundwasseranstieg von einem Meter in 40 Tagen.

Bildet sich auf der vorhandenen Sedimentschicht eine durchlässigkeitsmindernde Kolmationsschicht wie im vierten Modell, wird die Infiltration in den Boden nochmals reduziert. Nach 40 Tagen steigt der Grundwasserspiegel so lediglich um einen halben Meter.

Das fünfte Modell simuliert den Versuch, bei Vorhandensein einer Sediment- und Kolmationsschicht mit Hilfe von Bohrungen den Anstieg des Grundwassers wieder zu verbessern. Nach 15 Tagen Simulation steigt der Grundwasserspiegel um rd. 1,1 Meter. Das kurzzeitige Maximum und die anschließend leichte Abnahme haben die gleichen Gründe wie beim zweiten Modell. Nach 40 Tagen steigt der Grundwasserspiegel insgesamt um 1,15 Meter. Dies stellt zwar gegenüber den Fällen mit Sedimentschicht und mit Sediment- und Kolmationsschicht eine Verbesserung dar, jedoch nicht gegenüber dem Fall mit Sohlschwelle als auch dem Ist-Zustand. Außerdem muss berücksichtigt werden, dass auch die Bohrungen über die Zeit u. U. wieder mit Sedimenten gefüllt werden und damit an Effektivität verlieren.

Im sechsten Modell reichen die Bohrungen bis zwei Meter unterhalb der ursprünglichen Gewässersohle. Aufgrund der tieferen Bohrungen erreicht das Wasser sehr früh die unterste Schicht. Die Folge ist ein schneller Anstieg des Grundwasserspiegels um einen Meter nach bereits einem halben Tag. Verteilt sich das Wasser zunächst wieder im unteren Bereich des Modells, steigt der Grundwasserspiegel nach 40 Tagen Simulation insgesamt um 1,35 Meter.

Die tieferen Bohrungen stellen eine weitere Verbesserung des Grundwasseranstiegs gegenüber den Modellen mit den durchlässigkeitsmindernden Schichten dar. Die Anhebung des Grundwasserspiegels ist jedoch weiterhin geringer als in den Situationen mit und ohne Sohlschwelle.

4 Zusammenfassung

Die Simulationsergebnisse zeigen, dass durch den Bau einer Sohlschwelle der Grundwasserspiegel angehoben werden kann. Die Ablagerung von Sedimenten und die Bildung einer Kolmationsschicht führen jedoch zu einer erheblichen Verringerung der Infiltrationsrate. Die Folge ist ein geringerer Anstieg des Grundwasserspiegels verglichen mit der Situation, wenn keine Sohlschwelle vorhanden ist. Der Einsatz von Bohrungen stellt gegenüber den Fällen mit einer vorhandenen Sediment- und Kolmationsschicht zwar eine Verbesserung dar, im Vergleich zu den beiden Fällen mit und ohne Sohlschwelle ist der Grundwasseranstieg jedoch geringer.

Somit ist der Einsatz einer Sohlschwelle nur in Verbindung mit aufwendigen Unterhaltungsmaßnahmen, die aber schon nach wenigen Niederschlagsereignissen notwendig sein können, nachhaltig. Zudem muss zusätzlich beachtet werden, dass sich auch die Bohrungen mit Sedimenten füllen können und ihr zunächst verbessernder Effekt nur von kurzer Dauer ist. Daher wird in Gebieten mit starkem Sedimenttransport vom Bau von Sohlschwellen abgeraten, da die Grundwasserneubildung gegenüber dem Ist-Zustand u. U. sogar negativ beeinflusst wird.

5 Literatur

BOUWER (2002): Artificial recharge of groundwater: hydrogeology and engineering. Berlin: Springer, Hydrogeology Journal (2002), Ausgabe 10: S. 121 – 142

BOUWER (2004): Artificial recharge of groundwater: systems, design and management. Hydraulic Design Handbook, Chapter 24

DHI-Wasy (2014): FEFLOW. Informationstext auf dem Internetauftritt der DHI-Wasy GmbH. [Online] Erhältlich unter: <http://www.dhi-wasy.de/Software/Grundwasser/FEFLOW.aspx>

DIHK (2012): Zielmarktanalyse mit Profilen der Marktakteure Marokko. Marktanalyse der Deutschen Industrie- und Handelskammer, S. 12 ff.

KLIMADIAGRAMME (2013): Klimadiagramme von Tanger und Marrakesch. [Online] Erhältlich unter: http://klimadiagramme.de/pics/st_maro.html

UNESCO (2012): Managing Water under Uncertainty and Risk. The United Nations World Water Development Report 4, Volume 1 (2012), S. 178 – 190

WYSS, M. et al (2012): Nachhaltige Wassernutzung in Gebirgs- und Wüstengebieten Marokkos. Zusammenfassung des Hydrogeologischen Forschungs- und Entwicklungsprojekts, S. 3 – 13

Anschrift der Verfasser

Constantin Schweiger, B.Sc.
Univ.-Prof. Dr.-Ing. Holger Schüttrumpf,
Institut für Wasserbau und Wasserwirtschaft
RWTH Aachen University
Mies-van-der-Rohe-Straße 17
52074 Aachen