

# Die Auswirkungen der Grundwasserförderung auf die Abflussmengen von Gewässern verstehen und steuern

**G**rundwasser ist in den Vereinigten Staaten eine kritische Rohstoffquelle, die Trinkwasser liefert, landwirtschaftliche Flächen bewässert, in der Industrie Verwendung findet und nicht zuletzt der Ursprung für das Wasser in Flüssen, Bächen, Seen und aus Quellen ist. Brunnen, die Wasser aus den wasserleitenden Schichten fördern, können die Menge an Grundwasser reduzieren, die in Flüsse und Bäche austritt. Dies wiederum kann einen schädlichen Einfluss auf das limnische Ökosystem und die Verfügbarkeit von Oberflächenwasser haben. Die Einschätzung vom Umfang sowie vom örtlichen und zeitlichen Auftreten einer Abflussreduzierung als Folge einer Grundwasserförderung ist wichtig für das Grundwassermanagement und die Wassernutzer in den gesamten Vereinigten Staaten. Die Komplexität von Grundwasser- und Oberflächenwassersystemen und ihrer Interaktion stellt dabei aber eine grosse Herausforderung dar. Das Verständnis der Abflussreduzierung und die Bewertung von Praktiken des Wassermanagements haben sich in den letzten Jahren durch den Einsatz von Computermodellen, die die Bedingungen in Grundwasserleitern und die Auswirkungen der Grundwasserförderung auf Fließgewässer simulieren, verbessert.



Der Unterlauf des Colorado und angrenzende landwirtschaftliche Flächen in der Nähe von Yuma, Arizona. Gerichtsscheidungen in Bezug auf die Nutzung von Wasser des Flusses haben anerkannt, dass Wasser dem Colorado durch „unterirdische Wasserförderung“ entzogen werden kann. (Bildrechte: Andy Pernick, Bureau of Reclamation)

## Einleitung

Grundwasser ist eine wichtige Quelle für Wasser des täglichen Bedarfs, als Trinkwasser, für die landwirtschaftliche Bewässerung oder im industriellen Einsatz. Grundwasser und Oberflächengewässer sind miteinander verbunden, und Grundwasser-austritte stellen häufig die Hauptkomponente des Gesamtabflusses in Fließgewässern dar, speziell zu Zeiten ohne Regen oder Schneeschmelze (Abb. 1A). Die Grundwasserförderung durch Brunnen reduziert diese Grundwasseraustritte, und in manchen Fällen kann die Förderung sogar Wasser aus den Gewässern in den Grundwasserleiter ziehen. Eine durch Grundwasserförderung erzeugte Abflussreduzierung wird im Englischen Sprachraum auch als „Depletion“ oder „Capture“ bezeichnet. Diese Abflussreduzierung wirkt sich negativ auf aquatische Ökosysteme, die Verfügbarkeit von Oberflächenwasser und den ästhetischen Wert von Fließgewässern aus. „Abflussreduzierung“ ist deshalb zu einem wichtigen Thema im Management von Wasserressourcen geworden.

Die Steuerung der Auswirkungen der Abflussreduzierungen durch Grundwasser-

förderung ist einer der häufigsten und herausforderndsten Aspekte der gemeinsamen Bewirtschaftung von Grundwasser- und Oberflächenwassersystemen. Wissenschaftliche Forschung und praktische Anwendung dieser Forschung unter realen Bedingungen über die letzten sieben Jahrzehnte haben das Verständnis von Hydrologen über den Ableitprozess verbessert und so in Folge wertvolle Erkenntnisse für Wasserbehörden und -manager geliefert, die das Grundwasser- und Oberflächenmanagement verbessern helfen. Dieses Fact Sheet fasst einige der grundlegenden Informationen darüber zusammen, wie Grundwasserförderung Fließgewässer beeinflusst, korrigiert häufige Fehlvorstellungen im Zusammenhang mit der Abflussreduzierung und stellt Methoden für das Verständnis und das Management der Abflussreduzierung durch Grundwasserförderung vor. Eine detailliertere Beschreibung von diesen und anderen Punkten in Bezug auf die Auswirkung der Grundwasserförderung auf Gewässer findet sich in dem U.S. Geological Survey Circular 1376.



Ein zinnroter Fliegenfänger im Uferbereich des San Pedro in Arizona (Bildrechte: Bob Hermann, Copyright 2011)

## Die Herkunft geförderten Grundwassers

Wenn ein Grundwasserbrunnen mit der Förderung aus einem Aquifer beginnt, entzieht er zuerst das dem Brunnenfilter nächste Wasser aus dem Aquifer. Es bildet sich ein Absenkungstrichter um den Brunnen im Grundwasserspiegel des Aquifers (Abb. 1B). Diese

Absenkung des Wasserspiegels ist am größten am Brunnen und schwächt sich mit dem Abstand vom Brunnen ab. Mit der Zeit wird der Absenkungstrichter tiefer und breitet sich seitlich vom Brunnen ausgehend aus.

Die Abgabe von Grundwasser aus dem Speichervorrat des Aquifers als einzigem Herkunftsort des geförderten Brunnenwassers hält an, bis der Absenkungstrichter einen oder meh-

rere Orte erreicht, von denen Wasser abgeleitet werden kann - im allgemeinen Gewässer, die hydraulisch mit dem Aquifer verbunden sind.

Abgeleiteter Gewässerabfluss besteht aus zwei möglichen Komponenten: Grundwasser, das ansonsten in das Fließgewässer ausgetreten wäre („Abgeleitete Grundwasserabgabe“) und Abfluss des Fließgewässers, der aufgrund der Förderung dem Aquifer zufließt („Induzierte Infiltration“ von Gewässerabfluss, Abb. 1C). Die Abflussreduzierung ist somit die Summe aus abgeleiteter Grundwasserabgabe und induzierter Infiltration.

Abgeleitete Grundwasserabgabe ist häufig die Hauptkomponente der Abflussreduzierung. Aber wenn die Förderraten vergleichsweise hoch sind oder der Förderstandort sich relativ nah an einem Gewässer befindet, dann kann induzierte Infiltration einen wesentlichen Anteil an der Abflussreduzierung annehmen.

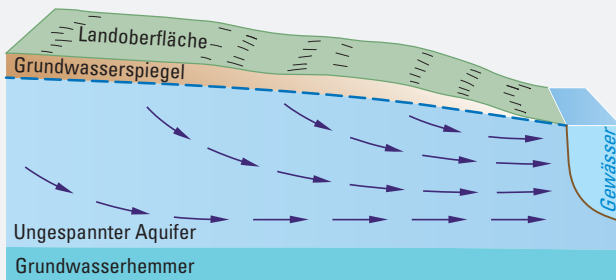
Andere hydrologische Merkmale können durch die Grundwasserförderung ebenfalls beeinflusst werden. Grundwasserentnahmen können den Grundwasseraustritt in Seen und durch Quellen sowie die verfügbare Menge an Wasser, die ansonsten grundwasserabhängigen Pflanzengemeinschaften in Ufernähe zur Verfügung stehen würde, reduzieren.

## Reaktionszeiten der Abflussreduzierung

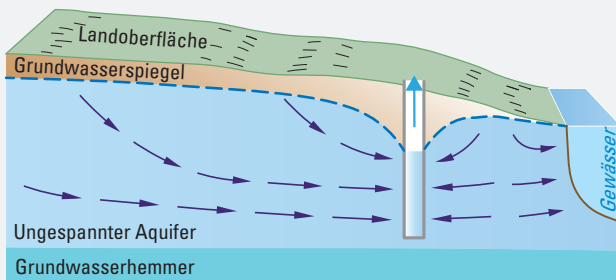
Die Reaktionszeit der Abflussreduzierung auf die aus einem bestimmten Brunnen erfolgende Grundwasserförderung ist abhängig von vielen Faktoren, so z.B. geologischen Strukturen, Größe und hydraulischen Eigenschaften des Grundwassersystems und des Flussbetts sowie - sehr wichtig - dem Abstand des Förderbrunnens von dem Fließgewässer, das mit dem Grundwasserleiter verbunden ist. Substanzielle Abflussreduzierungen durch einen Förderbrunnen, der wenige Dutzend Meter von einem Fließgewässer entfernt ist, können in wenigen Tagen auftreten, während die Abflussreduzierung, die durch einen Brunnen, der viele Kilometer entfernt vom nächsten Gewässer ist, verursacht wird, über Jahrzehnte oder Jahrhunderte verzögert auftreten kann.

Ein Beispiel für den Übergang vom Grundwasserspeicher zur Abflussreduzierung als jeweilige Quelle des geförderten Grundwassers ist in Abbildung 2 dargestellt. Zu jedem Zeitpunkt entspricht die Summe des Anteils von Aquiferspeicheränderung und Abflussreduzierung 100 Prozent der Förderrate des Brunnens. Dies mit einem Trend hin zu einem Zustand, in dem die Abflussreduzierung der alleinige Lieferant für das geförderte Grundwasser ist. Der Zeitpunkt, zu dem die Förderanteile zu 50 Prozent aus Abflussreduzierung bestehen, wird als die „Zeit bis zur abflussdominierten Förderung“ bezeichnet.

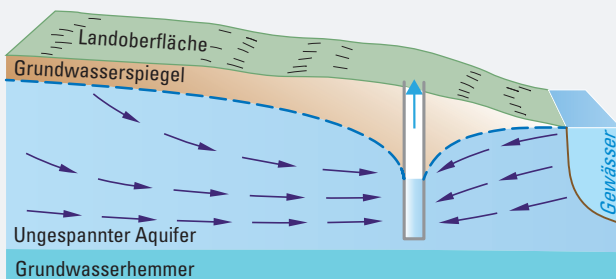
**Abbildung 1.** Die fortschreitenden Änderungen an Grundwasser- und Oberflächenabfluss vor, während und nach dem Beginn der Grundwasserförderung, dargestellt an einem Model.



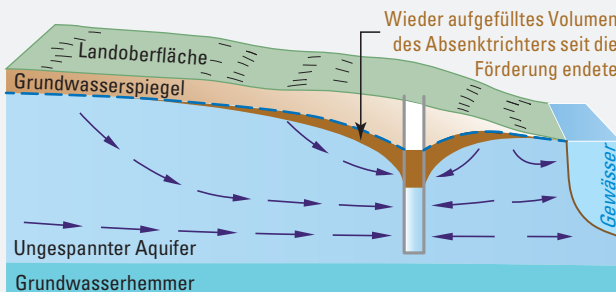
A. Unter unbeeinflussten Bedingungen entspricht die Grundwasserneugildungsrate der Exfiltrationsrate in Gewässern.



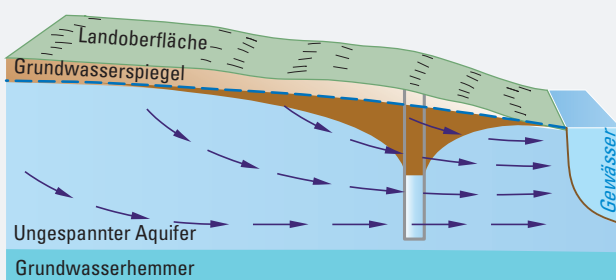
B. Mit Aufnahme der Grundwasserförderung wird Wasser aus dem Grundwasserspeicher entnommen. Es bildet sich ein Absenkungstrichter, und die Exfiltrationsrate in den Bach wird reduziert.



C. In einigen Fällen kann die Förderrate so hoch sein, dass in Folge Wasser aus dem Bach in den Aquifer fließt, ein Prozess, den man als induzierte Infiltration von Oberflächenwasser bezeichnet.



D. Nach der Beendigung der Grundwasserförderung beginnt sich der Grundwasserspiegel wieder zu regenerieren, und Wasser fließt in den Speicher des Aquifers, um den Absenkungstrichter, der durch die vorhergehende Förderung entstanden ist, wieder aufzufüllen.



E. Irgendwann kann das System wieder zum Ursprungszustand zurückkehren, ohne dass Änderungen im Grundwasserspeicher oder der Abflussreduzierung vorliegen.

## Verbreitete Missverständnisse in Bezug auf Abflussreduzierung durch Grundwasserförderung

Obwohl sich unser Verständnis der Abläufe, die bei einer Grundwasserförderung zu einer Abflussreduzierung führen, weiterentwickelt hat, haben sich über die Jahre hinweg einige falsche Vorstellungen über die Auswirkungen entwickelt und verfestigt. Diese umfassen unter anderem die folgenden:

**Missverständnis 1:** Die gesamte Erschließung des Grundwassers eines Grundwasserleiters ist „nachhaltig“ oder „sicher“, wenn die gesamte Grundwasserfördermenge nicht das langjährige Mittel der Grundwasserneubildungsrate übersteigt.

Das Niveau der Grundwassernutzung vieler Aquifere wird jedoch eher durch das für eine Kommune oder Aufsichtsbehörde akzeptierbare Ausmaß der Abflussreduzierung begrenzt.

**Missverständnis 2:** Die Abflussreduzierung ist abhängig von der Geschwindigkeit oder Richtung der Grundwasserbewegung im Grundwasserleiter.

Tatsächlich sind außer bei extremen Grundwasserentnahmen die Menge, der Ort oder der Zeitpunkt einer Abflussreduzierung, die durch Grundwasserentnahmen ausgelöst wird, unabhängig von der Grundwasserneubildungsrate oder der Geschwindigkeit oder Richtung des Grundwassers im Grundwasserleiter vor der Aufnahme der Grundwasserförderung.

Ferner ist die Abflussreduzierung weitestgehend unabhängig von vorübergehenden Ereignissen wie Änderung der Grundwasserneubildungsrate oder Variationen des Pegelstandes von Gewässern durch Überflutungsereignisse.

**Missverständnis 3:** Die Basisabflussreduzierung stoppt sofort nach Beendigung der Grundwasserförderung.

Die Abflussreduzierung hält auch nach dem Beenden der Grundwasserförderung an, weil es Zeit braucht, bis sich der Absenkungstrichter aufgefüllt hat (Abb. 1D). Während dieser Zeit, in der der Grundwasserleiter wieder aufgefüllt wird, fließt Grundwasser, das sonst zu einem Fließgewässer geflossen wäre, in den freien Aquiferspeicher. Somit hält die Abflussreduzierung an, auch wenn die Förderung beendet wurde. In vielen Fällen tritt die maximale Abflussreduzierung sogar erst nach Beendigung der Förderung auf. Irgendwann erreichen Grundwasserspeicher und Oberflächengewässer wieder den Zustand von vor Aufnahme der Grundwasserförderung (Abb. 1E), aber der Zeitraum bis zu einer vollständigen Regenerierung kann sehr lang sein, möglicherweise sehr viel länger als der Zeitraum, während dessen Grundwasser gefördert wurde. Für das Zei-

terintervall vom Beginn der Grundwasserförderung bis zu dem Zeitpunkt, da das System sich wieder vollständig regeneriert hat, entspricht die Gesamtabflussreduzierung der gesamten geförderten Grundwassermenge.

**Missverständnis 4:** Die ausschließliche Grundwasserförderung unter einer Tonschicht oder einer anderen abschließenden Schicht beseitigt die Möglichkeit einer Abflussreduzierung mit Grundwasser aus den darüber liegenden Schichten.

Auch wenn Tonschichten oder andere abschließende Schichten den Prozess der Abflussreduzierung im Vergleich zu freien Aquiferen verlangsamen können, so ist die Erwartung unbegründet, dass die Förderung unter ausgedehnten abschließenden Schichten eine Abflussreduzierung vollständig verhindert. Vielmehr kann eine Förderung unter nicht vollständige durchgehenden, abgeschlossenen Schichten sogar die Geschwindigkeit einer Abflussreduzierung bis zu einem Grad erhöhen, der dem ohne zwischenliegende Sperrschicht entspricht.

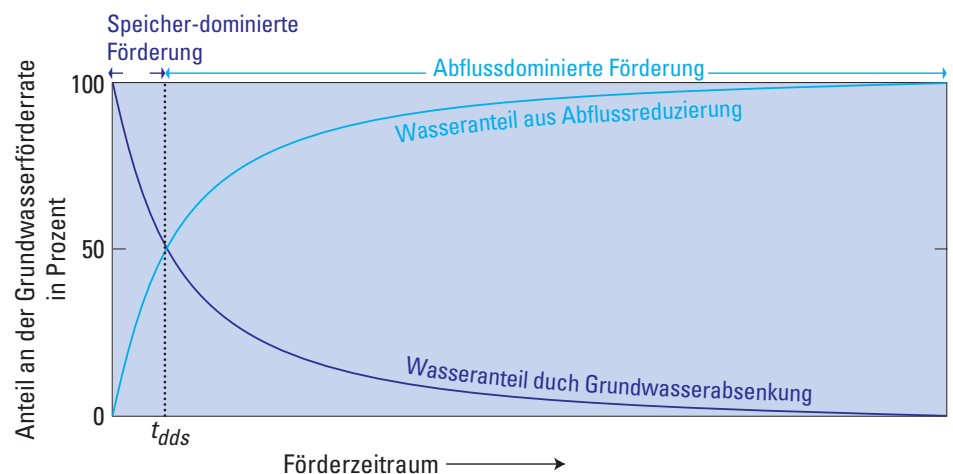
## Grundwasserförderungs-induzierte Abflussänderungen steuern

Das Management einer durch Grundwasserförderung erzeugten Abflussreduzierung ist eine Herausforderung. Gründe hierfür sind die natürliche Komplexität des Grundwassersystems, die häufig schwierige Identifizierung von Abflussreduzierungen anhand der gemessenen Messwerte von Pegelmeßstationen sowie zeitlichen Verschiebungen, welche zwischen der Aufnahme der Förderung und dem Auftreten (messbarer) Effekte in benachbarten

Gewässern liegen. Daher erfordert eine effektive Steuerung der Abflussreduzierung sowohl eine Langzeitplanungsperspektive als auch ein den gesamten Einzugsbereich betreffendes Verständnis, wie eine Abflussreduzierung auf Grundwasserförderungen von Einzelbrunnen oder Brunnenfeldern reagiert. In vielen Grundwasser-einzugsgebieten existieren hunderte oder tausende Förderbrunnen. Einzelnen haben diese Brunnen geringe Auswirkungen auf den Gewässerabfluss, aber geringe Auswirkungen vieler Brunnen innerhalb eines Einzugsgebietes können sich zu gewichtigen Auswirkungen auf Abflussmengen und auf aquatische Lebensräume aufsummieren. Zudem erstreckt sich eine einzugsgebietsweite Grundwasserentwicklung typischerweise über einen Zeitraum von Jahrzehnten. Die daraus resultierenden kumulierten Effekte der Abflussreduzierung werden unter Umständen für viele Jahre nicht in vollem Umfang erkannt.

Obwohl das Monitoring von Abflussreduzierungen über Pegelmeßstationen ein effektives Mittel zur Bestimmung von Kurz- und Langzeitänderungen im Gewässerabfluss als Folge von Grundwasserförderungen ist, so ist der sicherste Ansatz für die Bestimmung von Größe, Ort und Timing der Abflussreduzierung die numerische Modellierung.

Numerische Modelle werden quer durch die Vereinigten Staaten verwendet, um Möglichkeiten und Verfahren eines Wassermanagements zu verstehen und zu verbessern, da sie die Auswirkungen komplexer Aquiferstrukturen, Gewässergeometrien und Förderhistorien einer grossen Zahl Brunnen auf alle Arten von hydrologischen Merkmalen inklusive der Oberflächengewässer beschreiben (Siehe Fallstudie auf der nächsten Seite).

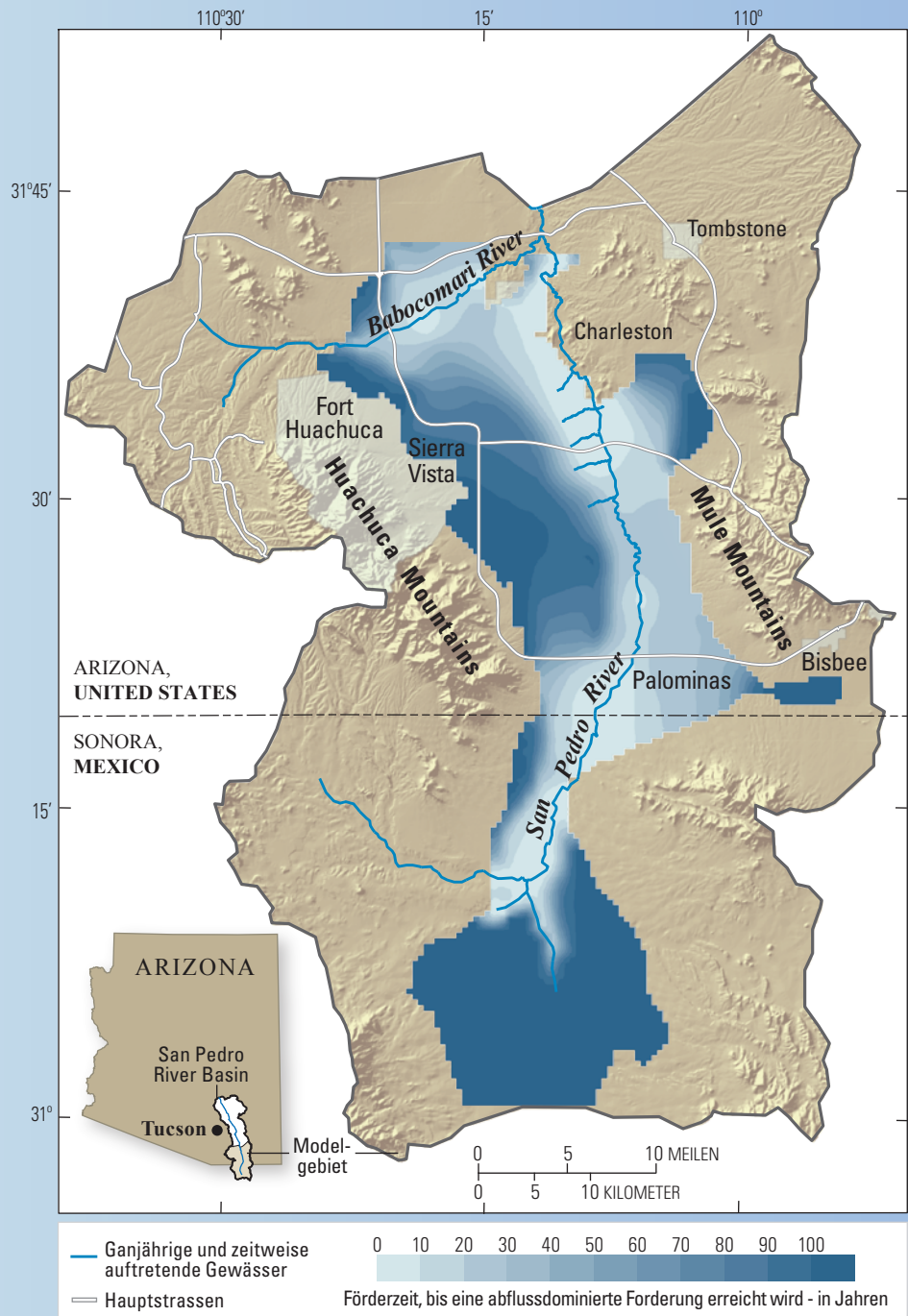


**Abbildung 2.** Das Verhältnis von Grundwasserspeicheränderung und Abflussreduzierung als Quellen des geförderten Grundwassers über einen Zeitraum für einen hypothetischen Förderbrunnen. Die Variable  $t_{dds}$  ist die Zeit, die benötigt wird, um die abflussdominierte Förderung für einen spezifischen Förderbrunnenstandort zu erreichen. In einigen Szenarien kann der Übergang von speicherdominierter Förderung zur abflussdominierten Förderung in wenigen Tagen oder Monaten auftreten, wohingegen unter anderen Umständen eine abflussdominierte Förderung eventuell erst nach Jahrzehnten auftritt.

## Fallstudie: Numerisches modellieren zur Analyse der Abflussreduzierung im oberen San Pedro-Becken

Das obere San Pedro-Becken im Grenzbereich zwischen den Vereinigten Staaten und Mexico bedeckt eine Fläche von über 4400 Quadratkilometern. Austretendes Grundwasser ermöglicht ganzjährige Fließgewässerabschnitte im Flusslauf des San Pedro und seiner Nebenflüsse sowie in den angrenzenden Uferbereichen. Die Uferbereiche bieten ganzjährig Lebensraum für wild lebende Tierarten und sind ein wichtiger Korridor für den Vogelzug zwischen Mexico und den Vereinigten Staaten.

Ein numerisches Grundwassermodell wurde von Hydrologen des USGS verwendet, um die zeitliche Abhängigkeit der Abflussreduzierung der Grundwasserförderung im Aquifer des oberen San Pedro Beckens zu untersuchen. Modellberechnungen für ungefähr 1500 über den ganzen Aquifer verteilte hypothetische Brunnenstandorte wurden durchgeführt. Die Zeit, die notwendig wäre, um eine abflussdominierte Förderung zu erreichen, wurde für jeden potentiellen Brunnenstandort bestimmt und das Ergebnis kartiert. Karten wie diese - die als „Capture Map“ bezeichnet werden - liefern ein visuelles Hilfsmittel für Wissenschaftler und Wassermanager zum besseren Verständnis der Auswirkungen von Grundwasserförderungen an einzelnen Standorten innerhalb einer größeren Anzahl potentieller Förderstandorte im Aquifer. In der resultierenden Karte zeigt eine helle Farbe, in der Regel benachbart zu Flüssen, an, dass eine abflussdominierte Förderung innerhalb von 10 Jahren nach Beginn der Förderung eintreten würde. Im Gegensatz dazu zeigt die dunkelste Farbe an, dass eine abflussdominierte Förderung nicht innerhalb der ersten 100 Jahre erreicht würde.



### Weitergehende Informationen

Eine ausführlichere Darstellung der Effekte einer Grundwasserförderung auf Oberflächenwasser findet sich in:

Barlow, P.M., and Leake, S.A., 2012, Streamflow depletion by wells— Understanding and managing the effects of groundwater pumping on streamflow: U.S. Geological Survey Circular 1376, 84 p. (Erhältlich unter [http://pubs.usgs.gov/circ/1376/.](http://pubs.usgs.gov/circ/1376/))

Stanley A. Leake und Paul M. Barlow

Bearbeitet durch Claire Landowski und Lara Schmitt

Grafikdesign durch Jeanne S. DiLeo

Titelphotographie durch Michael Collier

Deutsche Übersetzung durch Holger Mayer (BUND e.V.) und Wolfgang Schmid (CSIRO)

Für weitere Informationen kontaktieren Sie bitte:  
U.S. Geological Survey  
Arizona Water Science Center  
Tucson, Arizona  
(001) 520-670-6671

Dieses Fact Sheet und Aktualisierungen zu diesem sind online verfügbar unter:  
<http://pubs.usgs.gov/fs/2013/3001>