

Die Gefahren der exzessiven Grundwasserübernutzung
für den Gebietswasserhaushalt
(13.07.2006)

Dozent: Prof. Dr. Christian Leibundgut
Referent: Matthias Gassmann
Hauptseminar SS 06

I. Inhaltsverzeichnis

I. Inhaltsverzeichnis	2
II. Zusammenfassung	3
2. Einleitung	4
3. Problemstellung/Zielsetzung	4
4. Definition der Exzessiven Grundwasserübernutzung	4
5. Klima und Grundwasserneubildung	6
6. Folgen der Exzessiven Grundwasserübernutzung	7
6.1 Erniedrigter Wasserstand in Oberflächengewässern	8
6.2 Landabsenkung	10
6.3 Veränderung des Grundwasserströmungsverhaltens	11
6.4 Auswirkungen auf die Wasserentnahme	12
6.5 Positive Aspekte	12
7. Grundwasserübernutzung und Gebietswasserhaushalt	13
8. Fallbeispiele	14
8.1 Aquifer - Übernutzung im Hochland von Mexiko (ESTELLER, M. V., DIAZ- DELGADO, C., 2002)	14
8.1.1 Geographie und Klima	14
8.1.2 Hydrologie und Hydrogeologie	15
8.1.3 Historische Entwicklung der Wasserentnahme im Toluca Valley	17
8.1.4 Auswirkungen der negativen Wasserbilanz	17
8.1.5 Fazit	21
8.2 Auswirkungen der Trinkwasserentnahme auf Tümpel im Doñana Nationalpark in SW Spanien (SERRANO L. AND SERRANO L., 1995).	21
8.2.1 Geographie und Klima	21
8.2.2 Hydrogeologie und Hydrologie	22
8.2.3 Methodik	23
8.2.4 Resultate	23
8.2.4 Diskussion der Ergebnisse	27
9. Fazit	27
10. Literaturverzeichnis	28

II. Zusammenfassung

Das Grundwasser ist an vielen Orten der Welt die einzige zuverlässige Wasserressource für Trinkwasser wie für Bewässerung und Industrie. Deshalb wird aus dem Grundwasser auch entsprechend viel Wasser entnommen. Übersteigt die Entnahme die Grundwasserneubildung, sinkt der Grundwasserspiegel.

Ab wann dann aber von Exzessiver Grundwasserübernutzung gesprochen werden kann, hängt von den Auswirkungen und der Sichtweise ab. Während aus ökologischer Sicht eher die Auswirkungen eine Rolle spielen, stellt sie aus ökonomischer Sicht eine nicht – optimale Ausbeutung dar. Auch die Preisfrage kann zu einer Definition führen.

Das Klima spielt eine große Rolle bei der Entwicklung einer Grundwasserentnahme zur Übernutzung. Zwar ist dieses Phänomen nicht auf aride und semi-aride Gebiete beschränkt, jedoch begünstigen diese Klimate eine solche Entwicklung. Der Infiltrationsprozess ist in ariden und semi-ariden Gebieten oft gestört, wodurch sich die Grundwasserneubildung verringert.

Betrachtet man die Wasserhaushaltsgleichung für ein Gebiet und fügt einen Term für die anthropogene Wasserentnahme ein, so kann man feststellen, dass sich die anderen Glieder der Gleichung ändern müssen um ein Gleichgewicht zu halten.

Die meist negativen Folgen der exzessiven Grundwasserübernutzung sind vielfältig. Der Prozess der alle anderen nach sich zieht ist die Absenkung der Grundwasserdruckfläche. Dadurch kann sich in vom Grundwasser gespeisten Oberflächengewässern der Pegel erniedrigen, es kann zu Landsenkungen kommen, das Grundwasserströmungsverhalten kann sich ändern, eine Verschlechterung der Wasserqualität kann eintreten und nicht zuletzt müssen die Bohrlöcher für die Förderung immer tiefer gegraben werden.

Am Fallbeispiel einer Grundwasserentnahme in dem im Hochland von Mexico gelegenen Toluca Valley, im welchen der Lerma River entspringt, können die Folgen gut dargestellt werden. Durch die Grundwasserentnahme für die Trinkwasserversorgung für Mexico City hat sich im Stadtbereich von Toluca der Grundwasserspiegel von 1991 – 1996 um 30 m abgesenkt. Ebenso konnte eine Verkleinerung der Feuchtgebiete und eine Landabsenkung von einigen cm bis hin zu einem halben Meter festgestellt werden. Auch eine Verschlechterung der Wasserqualität und ein verringerter Abfluss im Lerma River traten ein.

Es gibt keine einfache Möglichkeit eine exzessive Grundwasserübernutzung zu identifizieren. Die einzige einigermaßen sichere Art der frühzeitigen Identifizierung ist es im Vorfeld ein Konzept auszuarbeiten und dieses mit Messungen zu überwachen. Ebenso sollten dazu das Verhalten und die Hydrogeologie des Aquifers bekannt sein.

2. Einleitung

Als meist einzige gut zugängliche, zuverlässige und billige Wasserquelle, nimmt das Grundwasser für die Versorgung der Menschen nicht nur in trockenen Gebieten eine besondere Stellung ein.

In dicht besiedelten Gebieten ist Grundwasser oft die hauptsächliche oder auch einzige Quelle für Frischwasser. Da die Bevölkerung der Städte immer mehr steigt, steigt natürlich auch der Grundwasserbedarf der Bevölkerung und es muss damit immer mehr Wasser aus den Aquiferen gepumpt werden. Zum Beispiel wird in Mexico City 1.6-mal soviel Wasser aus den Aquiferen gepumpt als neu gebildet wird oder zufließt, was in einer Absenkung des Grundwasserspiegels von ca. 1 m/a resultiert (CUSTODIO, 2002).

Doch muss die steigende Weltbevölkerung nicht nur mit Wasser sondern auch mit Nahrung versorgt werden, was eine Steigerung der Produktivität der Landwirtschaft auch in sehr trockenen Gegenden benötigt. Um dies zu erreichen muss bewässert werden. Aus Mangel an anderen Wasserquellen kommt dieses Bewässerungswasser oft ebenfalls aus dem Grundwasser. Während traditionelle Bewässerungstechniken noch nachhaltig waren, kommt es bei neuen Techniken mehr auf die Produktivität an (Malik, 2000).

So ist die Entnahme aus dem Grundwasser für die Bevölkerung zunächst positiv zu sehen, doch durch diese große Entnahmemenge ergeben sich auch negative Seiteneffekte (CUSTODIO, 2002).

3. Problemstellung/Zielsetzung

Dieses Skript soll in die Thematik der Exzessiven Grundwasserübernutzung und die daraus entstehenden Folgen einführen. Der Begriff „Exzessive Grundwasserübernutzung“ wird versucht zu definieren. Eine Betrachtung des Gebietswasserhaushalt und der Veränderungen der Glieder in der Gebietswasserhaushaltsgleichung erfolgt. Des Weiteren werden die zur Grundwasserspiegelabsenkung führenden Faktoren erläutert und die daraus resultierenden Folgen erklärt.

Zwei Fallbeispiele aus verschiedenen Regionen veranschaulichen schlussendlich die Problematik und zeigen, dass die Folgen der übermäßigen Grundwasserentnahme meist vielfältig sind, und die Identifizierung oft schwierig ist.

4. Definition der Exzessiven Grundwasserübernutzung

Oft wird von exzessiver Grundwasserübernutzung (Groundwater Overexploitation) gesprochen, wenn die gesamte Entnahmemenge vom Aquifer über einige Jahre annähernd oder größer ist als der gesamte Zustrom zum Aquifer. Diese Definition weist einige Mängel auf, denn selbst wenn die Entnahmemenge gleich dem Zufluss ist, können Quellen, Flüsse und Feuchtgebiete verschwinden und sich eine

fortschreitende Grundwasserspiegelabsenkung entwickeln. Da die momentanen Zu- und Abstromverhältnisse im Aquifer aber meist nicht bekannt sind, bedient man sich bei der Identifizierung indirekter Mittel, die sich über lange Zeit entwickelt haben und noch weiter entwickeln, wie z.B. eine fortschreitende Grundwasserspiegelabsenkung, eine verringerte Quellschüttung, eine Verschlechterung der Rohwasserqualität oder ein erniedrigter Basisabfluss (CUSTODIO, 2002).

Es ist dabei auch zu beachten, dass eine fortschreitende Grundwasserspiegelabsenkung nicht zwingend auf Aquifer - Übernutzung zurückzuführen ist. Vor allem große Aquifere mit geringer Durchlässigkeit reagieren sehr träge auf äußerliche Einflüsse. So kann es auch sein, dass das lokale Grundwassersystem sich über viele hundert bis tausend Jahre an eine neue Wasserbilanz anpasst (MAYER, J. ET AL, 1999, S.124).

Die spanische Regierung hat in ihrem Wassergesetz von 1985 die exzessive Übernutzung wie folgt definiert: „Ein Aquifer wird als übernutzt betrachtet oder ist in Gefahr übernutzt zu werden, wenn die Nachhaltigkeit der existierenden Nutzungen als eine Konsequenz einer Entnahme, die größer oder sehr nahe am mittleren jährlichen Gesamtvolumen an erneuerbaren Ressourcen ist, in direkter Bedrohung ist oder wenn die Entnahme eine ernste Verschlechterung der Wasserqualität verursachen kann“ (CUSTODIO, 2002).

Oft wird eine exzessive Grundwasserübernutzung nur als ‚gefühlte‘ wahrgenommen, da entsprechende Daten nicht vorliegen und die Folgen nicht eindeutig sind. Um diesen langsamen Prozessen der negativen Auswirkungen auf die Umwelt Beachtung zu schenken, sollten sie in eine Definition einbezogen werden. Dies könnte erfolgen, indem man Effekte berücksichtigt, „die negativ für heutige und zukünftige Generationen sind, wobei physikalische, chemische, ökonomische, ökologische und soziale Aspekte berücksichtigt werden“ (LLAMAS 1992 in CUSTODIO, 2002).

Aus ökonomischer Sicht ist die exzessive Grundwasserentnahme eine nicht-optimale Entnahme (YOUNG 1993 in CUSTODIO, 2002).

Diese drei Definitionen haben das Problem, dass sie keine Quantifizierung beinhalten und so absolute Interpretationssache sind. Was bedeutet zum Beispiel eine „ernste Verschlechterung der Wasserqualität“ oder was ist eine „nicht optimale Ausbeutung“?

Ein Ansatz aus der Betriebswirtschaft, der eine Quantifizierung beinhaltet, könnte folgendermaßen Aussehen: Die Gewinne durch die Grundwasserentnahme sind kleiner als die gesamten Kosten für den Betrieb der Anlage. So wäre eine Entnahme ökonomisch nicht mehr tragbar. Solch eine einfache Gleichung hat in der Praxis aber einige Probleme damit, alle Größen zu erfassen, da ja alle Auswirkungen der Grundwasserentnahme Folgekosten nach sich ziehen. Es sollten auch staatliche Fördermittel und Steuern sowie sozialpolitische Entscheidungen beachtet werden (ALFRANCA UND PASCUAL in CUSTODIO, 2002).

Es gibt also nicht die eine Definition für die exzessive Grundwasserübernutzung, es muss viel mehr auf die Fragestellung geachtet werden, um zu entscheiden, ob eine Grundwasserentnahme eine exzessive Übernutzung darstellt.

5. Klima und Grundwasserneubildung

Die exzessive Grundwasserentnahme beschränkt sich zwar nicht ausschließlich auf aride und semi-aride Gebiete, jedoch stellen diese klimatischen Randbedingungen ein besonderes Risiko bereit.

Menschliche Eingriffe wirken sich stärker aus als in humiden Gebieten, in denen die Grundwasserneubildung meist die Aquifere aufzufüllen vermag (SIMMERS, 2003, S. 318).

In ariden und semi-ariden Gebieten fällt nur selten Niederschlag und dieser dann oft sehr unregelmäßig. So kann es vorkommen, dass es monatelang oder auch jahrelang nicht regnet, dann aber in kurzer Zeit plötzlich sehr viel, so dass der Niederschlag die maximale Infiltrationsrate übersteigt und viel oberflächlich abfließt. In anderen semi-ariden Gebieten regnet es sehr regelmäßig im Sommer, und zwar dann wenn der Passat über dem Meer Wasser aufnehmen kann und dieses über dem Land wieder ausregnet, wie z.B. der Monsun in Indien.

Grundwasserneubildung ist der Prozess der die Aquifere auffüllt. Der Niederschlag in Verbindung mit den in semi-ariden und ariden Gebieten hohen Temperaturen spielt eine entscheidende Rolle für die Grundwasserneubildung. Niederschlagswasser infiltriert in den Boden, bewegt sich durch die ungesättigte Zone und erreicht, falls es nicht in der ungesättigten Zone verbleibt, die Grundwasseroberfläche.

Nur wenn der Niederschlag in einem Gebiet größer ist als oberflächlicher Abfluss, Verdunstung und Bodenfeuchtedefizit addiert, setzt die Grundwasserneubildung ein. Dabei ist nicht das langjährige Mittel gemeint. Die Grundwasserneubildung setzt auch und vor allem in kleinen zeitlichen Auflösungen ein. So kann auch ein Gebiet, das über das ganze Jahr betrachtet eine negative Grundwasserbilanz aufweist, in feuchten Wochen und Monaten Grundwasserneubildung haben.

In ariden und semi – ariden Gebieten kommen noch erschwerende Faktoren für die Grundwasserneubildung hinzu. Vor allem wenn wenig oder gar keine Vegetation vorhanden ist, kann es zu Krustenbildung im Oberboden kommen, wodurch die Infiltration verringert wird. Dabei werden die größeren Poren bei einem Niederschlagsereignis mit Feinmaterial, das durch Splash – Effekte oder oberirdischen Abfluss bewegt wurde, verfüllt. Beim Austrocknen nach dem Niederschlag verfestigt sich dann diese Sedimentschicht im Oberboden und bildet eine feste Kruste. Dadurch kann die Permeabilität des Oberbodens stark abnehmen. Das heißt dass es dadurch zu erniedrigter Infiltration und einem erhöhten Oberflächenabfluss und bzw. oder erhöhter Evaporation kommen kann. Diese Krusten können durch Vegetationswachstum, Frostsprengung, Tiere im Boden, landwirtschaftlichen Anbau oder Erosion aufgebrochen werden, nicht aber durch Niederschläge (BULL AND KIRKBY, 2002, S. 65).

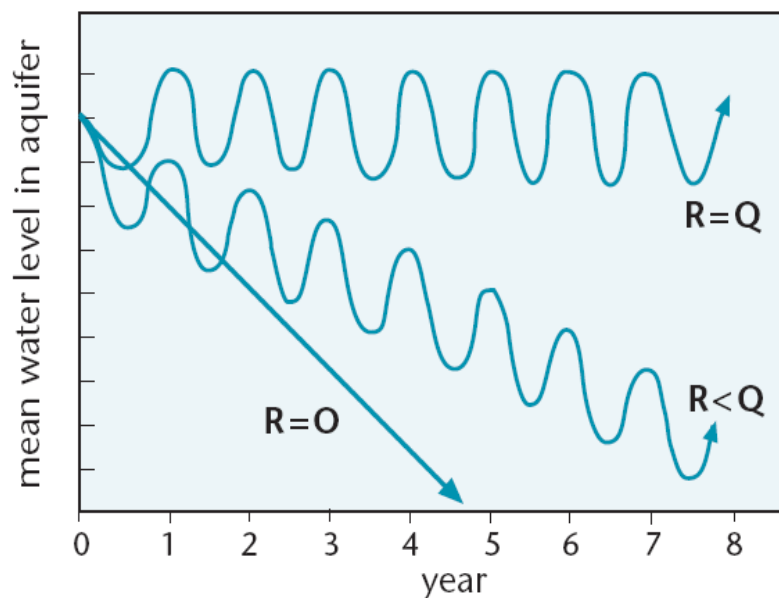
Dazu kommt noch, dass durch die hohen Temperaturen und oft langen Trockenzeiten der Boden vor einem Niederschlagsereignis meist ausgetrocknet ist, wodurch das Bodenfeuchtedefizit sehr groß ist. Erst nachdem das Bodenfeuchtedefizit ausgeglichen ist, setzt die Grundwasserneubildung ein. Dadurch gibt es in diesen Gebieten nur bei länger anhaltendem Niederschlag ein Auffüllen der Aquifere.

Dadurch dass die Grundwasserneubildung in ariden Gebieten sehr gering ist, setzt bei Wasserentnahme aus dem Aquifer sehr schnell ein Abfallen des Grundwasserspiegels ein.

6. Folgen der Exzessiven Grundwasserübernutzung

Die primäre Folge der übermäßigen Grundwasserentnahme ist natürlich ein Absinken des Grundwasserspiegels bzw. der Grundwasserdruckfläche. Die weiteren Folgen resultieren aus dieser Absenkung. Abbildung 6.1 zeigt das schematische Abfallen des Grundwasserspiegels unter verschiedenen Bedingungen der Grundwasserneubildung.

Dieses Abfallen wird jedoch auch, wenn es keine oder nur sehr wenig Grundwasserneubildung gibt, wie es in ariden Gebieten oft der Fall ist, normalerweise keine vollständige Entleerung des Aquifers mit sich bringen (UNEP 2003).



$R=Q$ Net recharge = natural discharge and/or abstraction
 $R<Q$ Natural discharge and abstraction exceed net recharge
 $R=O$ Abstraction in absence of recharge (arid zone situation)

Abb. 6.1: Schema der Grundwasserhöhenabnahme unter verschiedenen Grundwasserneubildungsbedingungen (aus UNEP 2003).

Die hydraulische Situation im Aquifer ändert sich durch die meist punktuelle Wasserentnahme derart, dass das hydraulische Potential zur Entnahmestelle hin so stark abnimmt, dass das Grundwasser schneller fließt und der Absenkung so entgegenwirkt. Jede Veränderung im Zu- oder Abstrom eines Aquifers zieht eine Übergangssituation nach sich bis ein neues Druckgleichgewicht erreicht ist und sich die Grundwasserhöhe im Mittel nicht mehr ändert. Die Zeit bis das Gleichgewicht erreicht ist, ist abhängig von der Transmissivität T , dem Speicherkoeffizient S und der Länge vom Brunnen zum Rand des Aquifers L und kann nach CUSTODIO (2002) abgeschätzt werden durch

$$(7.1) \quad t = \alpha \cdot L^2 \cdot \frac{S}{T}$$

wobei α ein problemabhängiger, dimensionsloser Faktor ist der zwischen 0.5 und 2.5 variiert. Abbildung 6.2 zeigt die Abhängigkeit der Zeit bis zur Stabilisierung des

Grundwasserstandes von der Länge L . Es ist zu erkennen dass es durchaus große Zeiträume sind, bis sich ein Gleichgewicht eingestellt hat. Die Kurven für Ton und Kies stellen sicherlich die beiden Extrema nach oben und unten dar. So wird sich in der Realität mit Sicherheit kein Aquifer mit einer Ausdehnung von 100 km innerhalb eines Tages eingestellt haben. Des Weiteren ist zu beachten, dass ein Aquifer fast nie ein abgeschlossenes homogenes System darstellt, d.h. dass die Länge L sich enorm verändern kann wenn man die Verbindungen mit anderen Aquiferen beachtet (CUSTODIO 2002).

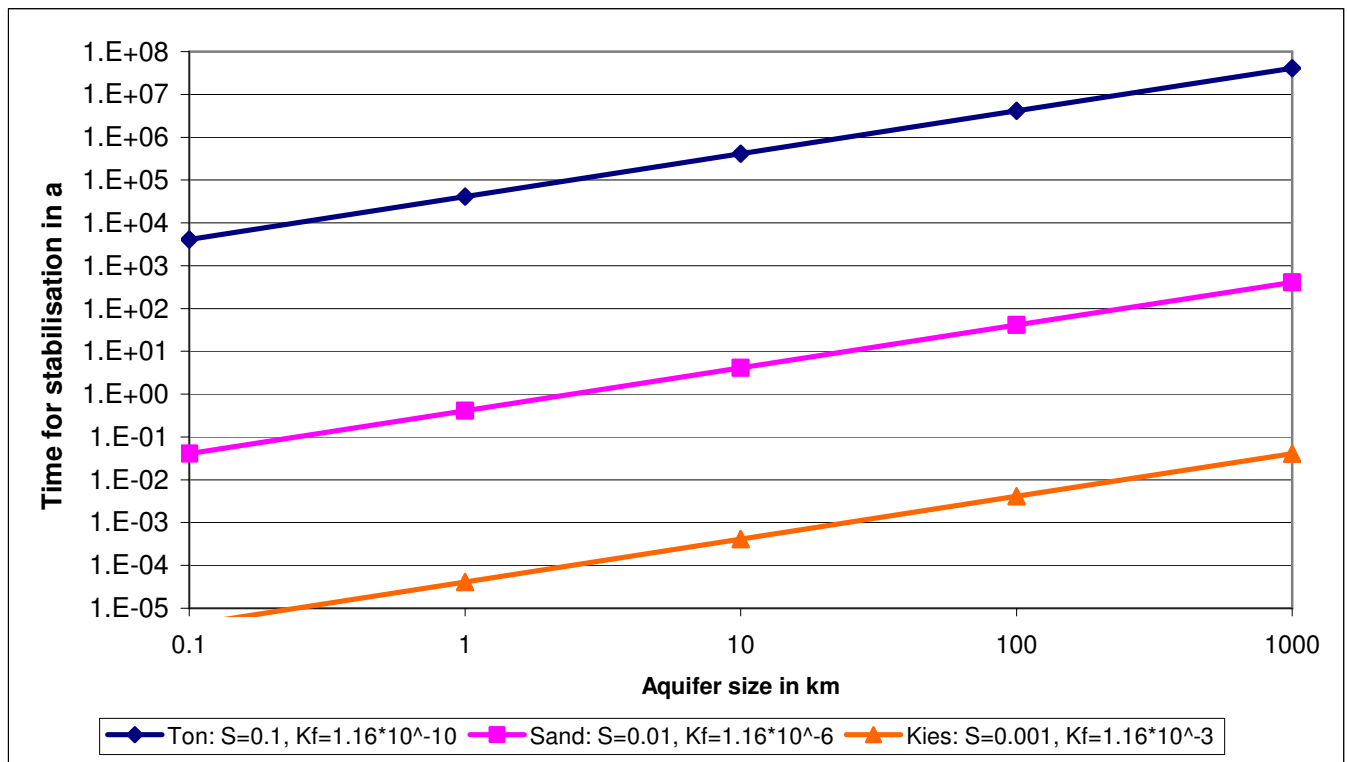


Abb. 6.2 : Abhängigkeit der Zeit bis zur Stabilisierung des Grundwasserstandes von der Aquiferlänge für eine Aquifermächtigkeit von 100 m und $\alpha=1.5$ bei verschiedenen Aquifertypen (benötigte Werte aus MAIDMENT 1993, Grafik angelehnt an SIMMERS 2003)

6.1 Erniedrigter Wasserstand in Oberflächengewässern

Viele Oberflächengewässer werden in Trockenzeiten ausschließlich vom Grundwasser gespeist. So z.B. Flüsse mit Basisabfluss, Seen, Tümpel und Feuchtgebiete in denen das Grundwasser ganzjährlich ansteht und Quellen. Sinkt nun der Grundwasserspiegel, ändert sich dementsprechend auch der Wasserstand in den Gewässern. Die Voraussetzung dafür ist immer ein hydraulischer Gradient weg vom Gewässer, was bei der Grundwasserentnahme durch den Absenkrichter gegeben ist.

Ehemals vom Grundwasser gespeiste Flüsse können unter dem Einfluss der Grundwasserspiegelabsenkung beginnen, wie in Abbildung 6.3 dargestellt, Wasser zu infiltrieren und im Extremfall trocken zu fallen (CUSTODIO, E., 2002).

So verkürzte sich in der Dürreperiode von 1998 – 1992 im Süden und Osten Großbritanniens das Fließgewässernetz erheblich. In den Oberläufen von Gegenden in denen die Grundwasserentnahme die Basisabflüsse stark beeinflusste fielen Teile des Gewässers trocken (BGS, 1995 in MAYER, J. ET AL, 1999).

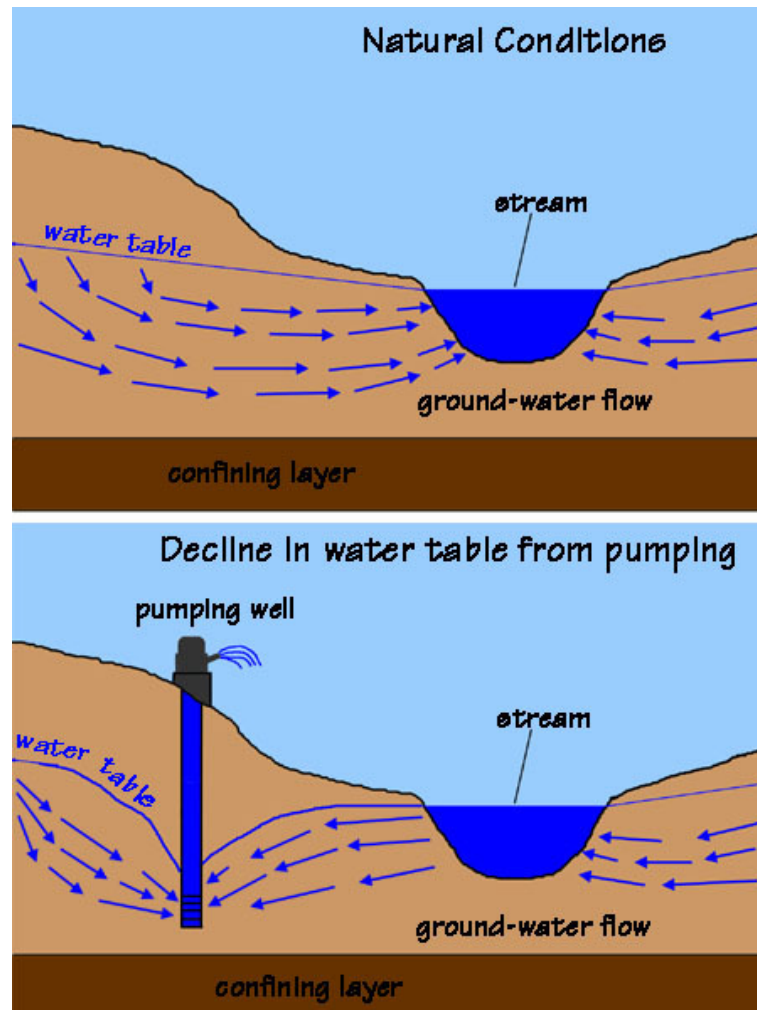


Abb. 6.3 Auswirkungen einer Grundwasserentnahme auf einen Fluss (<http://coastgis.marsci.uga.edu/summit/k12groundwater.htm>)

Auch vom Grundwasser gespeiste Seen können beginnen zu infiltrieren. Jedoch sind viele Seen durch eine Sedimentschicht fast vollständig vom Grundwasser abgetrennt und reagieren deshalb kaum oder äußerst verzögert auf eine Änderung des Grundwasserspiegels (BAUMGARTNER & LIEBSCHER 1996).

Da Feuchtgebiete und ihre Flora und Fauna in hohem Maße vom oberflächennahen Grundwasser abhängen ergeben sich schon bei einer geringen Absenkung der Grundwasseroberfläche erhebliche Probleme für ihr empfindliches Ökosystem (MAYER, J. ET AL, 1999).

Für grundwassergespeiste Quellen gilt ähnliches wie für Flüsse, jedoch kommt es auf die Art der Quelle bzw. die hydrogeologische Gegebenheiten an.

6.2 Landabsenkung

Ein aus Sedimenten bestehender Aquifer müsste eigentlich bereits bei der Entstehung durch die darüber liegenden Schichten stark komprimiert werden. Dieser Komprimierung wirken die Scherkräfte zwischen den Bodenpartikeln und der durch das Grundwasser herrschende Porendruck entgegen. Es stellt sich ein Druckgleichgewicht zwischen dem durch den auflastenden Boden herrschenden Druck P_N (auch geostatische Spannung oder Normalspannung genannt) und der Summe aus Scherkräften pro Flächeneinheit P_S und Porendruck P_p ein:

$$(6.1) \quad P_N = P_S + P_p$$

Sinkt nun der Porendruck P_p , stellt sich der Aquifer auf die neuen Druckverhältnisse ein, indem der Boden verdichtet wird und damit die Scherspannung steigt. Dies geschieht so lange bis das Gleichgewicht wieder hergestellt ist. Diese Verdichtung des Aquifers ist im Allgemeinen reversibel, aber nur solange sie einen kritischen Wert nicht überschreitet (UNEP, 2003; MATTHEß, G. UND UBELL, K., 2003 S. 90). Bei der exzessiven Grundwasserübernutzung wird jedoch meistens kein Grundwasser wieder zugeführt, so dass die Landabsenkungen oft den kritischen Wert überschreiten und irreversibel sind. Dann ist die Speicherfähigkeit des Aquifers nachhaltig verringert.

Verschiedene Aquifertypen reagieren verschieden auf die Grundwasserspiegelabsenkung. In grobkörnigen Aquiferen kommt es sehr schnell zum Druckausgleich, jedoch widerstehen sie einer größeren Wasserspiegelabsenkung. Dagegen ist in feinkörnigen Grundwasserleitern die Systemantwort eher langsam ist, wobei sie eher zur Kompaktion neigen (UNEP, 2003).

Abbildung 6.4 zeigt Beispiele von Landabsenkungen die auf Grundwasserentnahme basieren. Der Koeffizient Landabsenkung durch Grundwasserspiegelabsenkung liegt nach WOLKERSDORFER & THIEM (1999) meist zwischen 0.003 und 0.09 m/m.

Während des Prozesses der Kompaktion kann ein Punkt erreicht werden, an dem die Porosität so weit verringert wurde, dass es keine bedeutsame Verdichtung des Materials mehr gibt. Dieser Zustand wird „Stabile Tiefe“ genannt (UNEP, 2003).

Landabsenkungen können dann natürlich eine Veränderung der Hydraulik an der Erdoberfläche bewirken und so die Überflutungsgefahr des Gebietes erhöhen. Ebenso kann die Anfälligkeit für Erosionen zunehmen (CUSTODIO, E., 2002).

In löslichen Festgesteinen wie Evaporiten oder Carbonaten kann die Verringerung des Porendrucks zu spontanen Einstürzen führen, es bilden sich Einsturzdolinen. Solche Einstürze kann es aber auch im Porengrundwasser in der Nähe von Bohrlöchern geben, wenn Sand mit heraus gepumpt wurde (CUSTODIO, E., 2002).

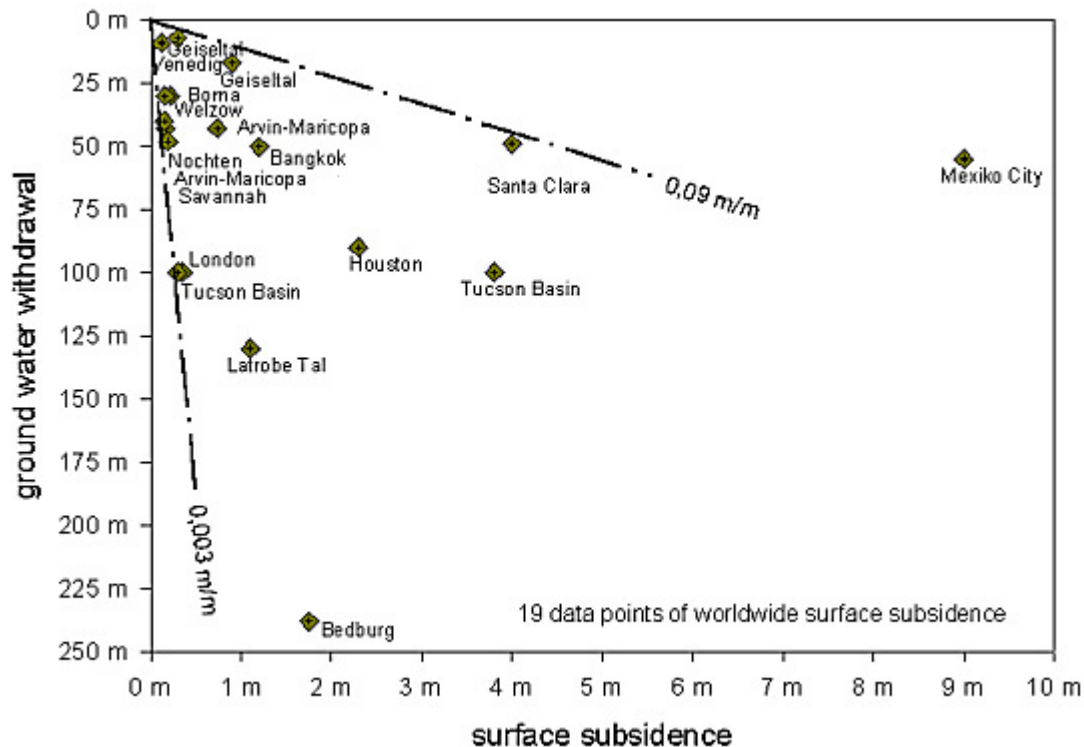


Abb. 6.4: Grundwasserspiegelabsenkung gegenüber der daraus resultierenden Landabsenkung an verschiedenen Beispielen weltweit (modifiziert nach WOLKERSDORFER, CH. & THIEM, G., 1999).

6.3 Veränderung des Grundwasserströmungsverhaltens

Wenn die Grundwasserdruckfläche lokal gesenkt wird, wie es bei der Entnahme durch Pumpwerke der Fall ist, bildet sich ein Potentialgefälle zur Entnahmestelle hin. Dadurch wird die Fließrichtung des Grundwassers lokal geändert, im Extremfall auch regional.

Dies kann zur Folge haben, dass sich nun die Wasserqualität des geförderten Wassers durch Mischung des Grundwassers mit anderem Wasser, das nun auch in Richtung der Entnahmestelle fließt, ändert. Dies kann auch Wasser aus tieferen Aquiferstockwerken sein (CUSTODIO, E., 2002).

Am deutlichsten wird das am Beispiel der Meerwasserintrusion. Abbildung 6.5 zeigt eine solche Situation schematisch. Die Situation A zeigt eine moderate Wasserentnahme. Das Grundwasserfließverhalten ist nicht maßgeblich gestört. Der gespannte Aquifer entwässert, wie es normalen Umständen entspricht, ins Meer (MAYER, J. ET AL, 1999). Die Grundwasserdruckfläche steigt vom Meer aus leicht an, liegt immer über dem Meeresspiegel. Die Situation B zeigt den Fall der übermäßigen Grundwasserentnahme. Hier liegt die Grundwasserdruckfläche eine Strecke lang gerade noch über dem Meeresspiegel, sinkt dann aber zum Entnahmetrichter hin deutlich darunter. Die Folge davon ist ein Potentialgefälle zur Entnahmestelle hin und eine Grundwasserströmung, die deshalb nicht mehr zum Meer hin, sondern vom Meer weg zeigt. Meerwasser dringt in den Grundwasserkörper ein. Ist ein Aquifer einmal mit Meerwasser kontaminiert, dauert es auch bei aktiver Sanierung sehr lange bis er sich regeneriert hat (MAYER, J. ET AL, 1999).

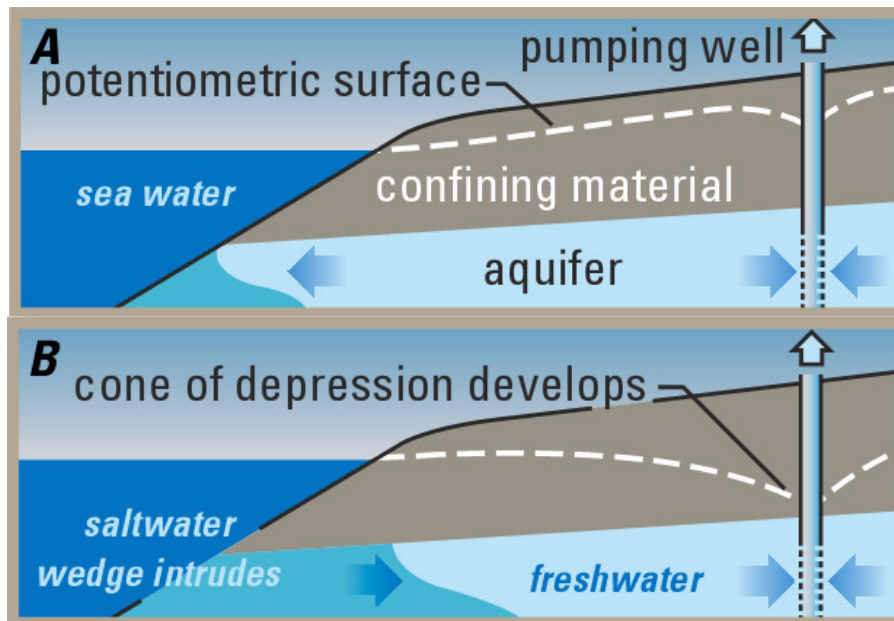


Abb. 6.5 Schematische Darstellung einer Meerwasserintrusion (EDWARDS, B. AND EVANS, R., 2002)

6.4 Auswirkungen auf die Wasserentnahme

Auch für Wasserentnehmer stellen sich Probleme bei übermäßiger Entnahme aus dem Grundwasser ein. Durch einen immer tiefer liegenden Grundwasserspiegel muss zur Wasserentnahme auch immer tiefer gebohrt werden und das Wasser muss aus immer größeren Tiefen an die Oberfläche befördert werden. Die andere Möglichkeit ist, dass nach nur kurzer Nutzungsdauer bereits neue Wasserentnahmestellen erschlossen werden müssen (CUSTODIO, E., 2002).

Durch die in Kapitel 6.3 erwähnte eventuelle Verschlechterung der Wasserqualität müssen Wasseraufbereitungsanlagen gebaut oder erweitert werden (MAYER, J. ET AL, 1999). Dies alles zieht einen immer größeren Energiebedarf nach sich und die Kosten für die Wasserentnahme steigen an (CUSTODIO, E., 2002).

6.5 Positive Aspekte

Das, was an mancher Stelle hauptsächlich negative Folgen nach sich zieht, nämlich die Grundwasserspiegelabsenkung, kann an anderer Stelle durchaus positiv bewertet werden.

So kann in einer Region durch die Entwässerung von Feuchtgebieten als Nebeneffekt der übermäßigen Grundwasserentnahme landwirtschaftliche Nutzfläche geschaffen werden um die Bevölkerung zu ernähren (UNEP 2003). Wenn die Grundwasserentnahme zur Entwicklung der Gegend und dadurch zukünftig zur besseren und effektiveren Nutzung der Grundwasserressourcen führt, kann sie positiv beurteilt werden (CUSTODIO, E., 2002).

Weiterhin kann die durch die Grundwasserspiegelabsenkung verursachte Veränderung im Gebietswasserhaushalt, nämlich der verringerte Basisabfluss in Flüssen und die Verringerung der Verdunstung aus dem Grundwasser Vorteile für die Bevölkerung haben (UNEP 2003). So ist die Verweilzeit des Grundwassers vor allem in Trockenzeiten größer.

7. Grundwasserübernutzung und Gebietswasserhaushalt

Die Wasserhaushaltsgleichung für ein Gebiet ist in folgender Form gegeben (BAUMGARTNER & LIEBSCHER 1996):

$$(6.1) \quad P = ET + R + \Delta S$$

wobei P der Niederschlag, ET die Evapotranspiration, R der ober- und unterirdische Abfluss aus dem Gebiet und ΔS die Speicheränderung ist.

Die Wasserhaushaltsgleichung kann nun für die Diskussion erweitert. Der Abfluss wird in oberirdischen R_{O-} und unterirdischen R_{U-} aufgeteilt. Ebenso werden oberirdische (R_{O+}) und unterirdische (R_{U+}) Zuflüsse beachtet. Die Speicheränderung wird in Grundwasserspeicheränderung ΔS_U , Bodenwasserspeicheränderung in der ungesättigten Zone ΔS_B und oberirdischer Speicheränderung ΔS_O unterteilt. Setzt man diese Terme in Gleichung 6.1 ein, erhält man:

$$(6.2) \quad P + R_{O+} + R_{U+} = ET + R_{O-} + R_{U-} + (\Delta S_U + \Delta S_B + \Delta S_O)$$

Um eine mögliche Grundwasserentnahme zu berücksichtigen wird noch der Term Grundwasserentnahme GWE eingeführt:

$$(6.3) \quad P + R_{O+} + R_{U+} = ET + R_{O-} + R_{U-} + (\Delta S_U + \Delta S_B + \Delta S_O) + GWE$$

Wird nun der Term GWE vergrößert müssen sich die anderen Glieder der Gleichung verändern um das Gleichgewicht zu halten.

Auf der linken Seite der Gleichung stehen die den Aquifer auffüllenden Prozesse. Beim Niederschlag ist eventuell eine Verringerung des Nebelniederschlags in Feuchtgebieten durch eine Verkleinerung dieser und einer Verringerung der Evapotranspiration zu erwarten. ET verringert sich stark, wenn sich der Grundwasserspiegel absenkt (UNEP 2003).

Stark verändern kann sich auch der Grundwasserzustrom R_{U+} zum Gebiet durch ein verändertes Grundwassergefälle und so eine veränderte hydraulische Situation im Aquifer. Im Allgemeinen ist mit einer Vergrößerung zu rechnen. Der oberirdische Zustrom R_{O+} verändert sich nicht, da er aus einem Gebiet kommt, das von der Wasserentnahme unabhängig ist.

Auf der rechten Seite der Gleichung stehen die Speicherglieder und die Glieder die einen Wasserverlust für das Gebiet darstellen. Diese Glieder verändern sich gemeinhin alle bei starker Grundwasserförderung. Der oberirdische Abfluss R_{O-} verringert sich durch erniedrigten Basisabfluss. Der Grundwasserabstrom R_{U-} wird geringer, da das Grundwasservolumen kleiner geworden ist und sich die hydraulischen Verhältnisse eventuell geändert haben. Die Speicheränderungen ΔS_U und ΔS_O werden negativ durch die große Grundwasserentnahme. ΔS_U kann vom Grundwasserzustrom und der Grundwasserneubildung nicht mehr im positiven Bereich gehalten werden. Die Speicheränderung ΔS_B kann jedoch durch eine bei Grundwasserspiegelabsenkung vergrößerte ungesättigte Zone durchaus positiv sein, erreicht aber quantitativ sicherlich nicht die Summe von $\Delta S_U + \Delta S_O$.

Somit zeigt sich, dass nicht nur der Grundwasserspeicher von der übermäßigen Grundwasserentnahme betroffen ist. Vielmehr sind beinahe alle Glieder der Gebietswasserhaushaltsgleichung betroffen und verändern sich.

8. Fallbeispiele

8.1 Aquifer - Übernutzung im Hochland von Mexiko (ESTELLER, M. V., DIAZ-DELGADO, C., 2002)

Das Tal von Toluca ist ein typisches Fallbeispiel einer exzessiven Aquifer – Übernutzung. Im Folgenden wird beschrieben wie es dazu kam und welche Auswirkungen die Übernutzung mit sich brachte.

8.1.1 Geographie und Klima

Das Tal von Toluca ist im Hochland von Mexico gelegen und weist eine mittlere Höhe von 2570 m auf (Abb. 8.1). In ihm entspringt der Fluss Lerma in einem Feuchtgebiet namens Almoloya. Etwas flussabwärts befinden sich noch zwei weitere Feuchtgebiete die die Namen Tlaltizapan und San Bartolo tragen. Am Ursprung des Flusses liegt die Stadt Almoloya del Rio, dem Flusslauf folgend die Städte Lerma, auf gleicher Höhe weiter westlich Toluca und etwas abseits rechts des Flusses Temoaya, wie in Abbildung 8.1 zu sehen ist. Am Ende des Tal befindet sich der Antonio Alzate Stausee.

Der Oberlauf des Flusses Lerma ist in tropischen Breiten gelegen (19°05' bis 19°50' N), doch die große Höhe und die umgebenden Berge sowie die fehlende kontinentale Charakteristik verursachen ein gemäßigteres Klima. Die durchschnittlichen Monatstemperaturen liegen zwischen 5°C auf über 3000m und 20°C im Tal. Die Regenzeit beginnt Mitte Mai und endet Mitte Oktober. Die jährliche Niederschlagssumme liegt zwischen 1200 mm in den Bergen und 900 mm im Tal. Der regenreichste Monat ist der Juni, im August herrscht dagegen meist Trockenheit. Die Klimaklassifikation nach Köppen ergibt ein C(w2)(w)bi(g) – Klima: Warmgemäßigtes Klima mit einem langen Sommer, Winterregen weniger als 5%, und die größten Temperaturen vor dem Sommersolstitium.

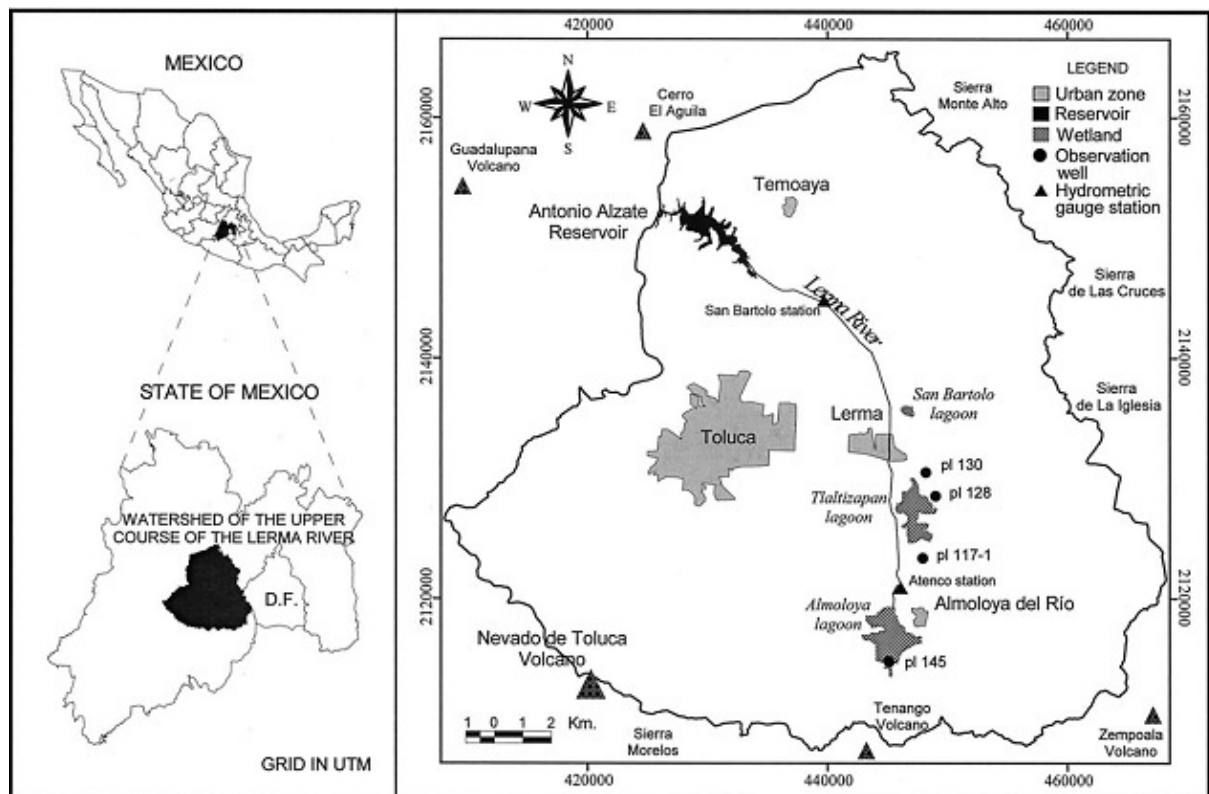


Abb. 8.1: Lage des Tals von Toluca (ESTELLER, M. V., DIAZ-DELGADO, C., 2002)

8.1.2 Hydrologie und Hydrogeologie

Im Beobachtungszeitraum von 1974 – 1990 war das jährliche Abflussvolumen des Lerma River in einem trockenen Jahr (1982-83) 98 hm³/a und in einem feuchten Jahr 267 hm³/a, im Durchschnitt flossen 171 hm³/a ab.

Berechnet man aus den mittleren monatlichen Abflusswerten von 1974 - 1990 für den Oberlauf des Lerma die Parde – Koeffizienten und stellt das Regime auf, wie in Abb. 8.2 zu sehen, so sieht man dass der September der Abflussreichste Monat ist. Beachtet man, dass die Regenzeit von Mitte Mai bis Mitte Oktober geht, sieht man deutlich ein pluviales Regime.

Im Tal von Toluca können zwei Aquifere unterschieden werden: Der Randaquifer, der aus gebrochenem vulkanischen Gestein besteht, aus dem die umliegenden Berge gebildet wurden und der für die Trinkwasserentnahme genutzte Aquifer des Toluca – Tals, der überwiegend aus Kies, Sanden und Konglomeraten, also Sedimenten besteht. Die Aufgabe des Randaquifers ist es den Talaquifer zu speisen.

Die Feuchtgebiete werden hauptsächlich von 262 Quellen gespeist, jedoch gibt es auch kleine Bäche, die in das Feuchtgebiet entwässern.

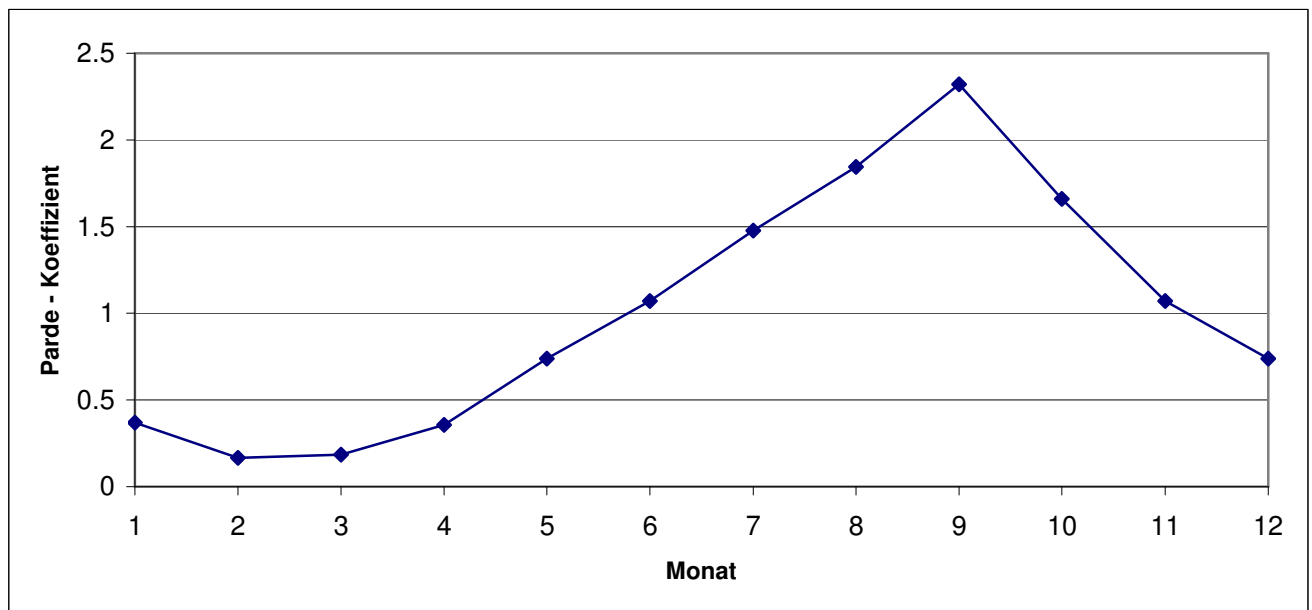


Abb. 8.2: Abflussregime nach Parde für den Oberlauf des Lerma River

Die Wasserbilanz des Tals, in Abbildung 8.3 dargestellt, zeigt im Wesentlichen zwei Prozesse, die den Aquifer speisen: Der laterale Zufluss aus dem Randaquifer mit 299 Hm^3/a und die Infiltration bzw. die Perkolation aus dem Niederschlag mit 81 Hm^3/a . Der laterale Abfluss aus dem Aquifer schlägt mit nur 2 Hm^3/a kaum zu buche, wenn man die anthropogenen Entnahmen betrachtet. 13 Hm^3/a werden für die Landwirtschaft, 21 Hm^3/a für die Industrie und 349 Hm^3/a für die Wasserversorgung entnommen. Von der gesamten Entnahme werden nur 163 Hm^3/a , also 43%, im Tal von Toluca verwendet, der größere Teil, 220 Hm^3/a oder 57 % werden nach Mexico City geleitet um dort einen Teil der Trinkwasserversorgung zu decken. So entsteht eine negative Wasserbilanz von -5 Hm^3/a .

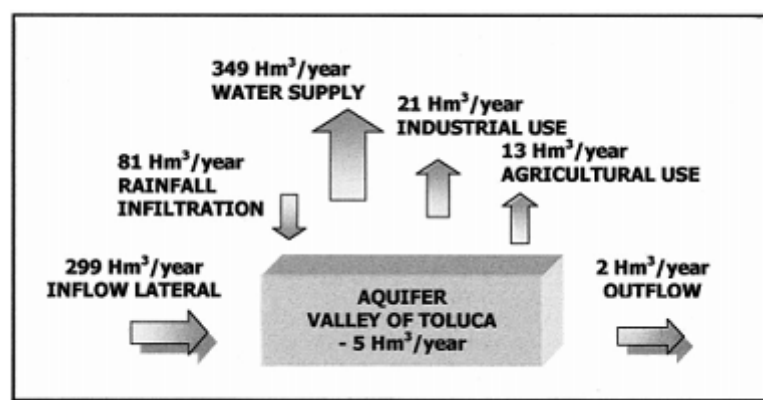


Abb. 8.3 Wasserbilanz des Tal von Toluca – Aquifers (ESTELLER, M. V., DIAZ-DELGADO, C., 2002)

8.1.3 Historische Entwicklung der Wasserentnahme im Toluca Valley

Schon im 18. Jahrhundert wurde damit begonnen die Feuchtgebiete zu entwässern, um die Überflutungsgefahr zu reduzieren und um landwirtschaftliche Nutzfläche zu gewinnen.

1940 ging die Industrialisierung im Tal los und verursachte eine Grundwasserentnahme durch die Industrie.

Jedoch erst 1953 gingen die ersten Pumpen in Betrieb, die am Ostrand der Feuchtgebiete 3.5 – 4 m³/s Wasser förderten, das dann nach Mexico City weitergeleitet wurde. Nachdem eine Studie 1958 beschrieb, dass bei einer Grundwasserspiegelabsenkung die Verdunstungsverluste deutlich reduziert würden, wurde das Ziel gesetzt den Grundwasserspiegel um 5 – 6 m zu senken.

Diese kritische Entwicklung der Ausbeutung des Aquifers mündete dann 1965 in einem Erlass des Präsidenten für eine begrenzte Nutzung des Aquifers. Da aber im gleichen Jahr der Wasserbedarfs von Mexico City nicht gedeckt werden konnte, wurde ein Abkommen getroffen, das den vorherigen Erlass außer Kraft setzte. Auf diesem Abkommen basierend wurden dann 1970 100 weitere Brunnen gegraben und ein Aquädukt von 170 km Länge nach Mexico City gebaut.

1975 wurde dann im Feuchtgebiet Almoloya ein Reservoirs gebaut, um das überflutete Gebiet zu verkleinern und um Regenwasser für die Bewässerung aufzufangen. 1991 wurde dieses Reservoir von einem größeren umbaut.

8.1.4 Auswirkungen der negativen Wasserbilanz

Betrachtet man die Karte der Grundwassergleichen von 1996 (Abb. 8.4) kann man drei hauptsächliche Fließrichtungen erkennen. Eine in südöstlicher Richtung zum Feuchtgebiet Almoloya, eine in Richtung NNW zum Gebietsauslass und eine in Richtung der Sierra de las Cruces. Dort wird Grundwasser für die Trinkwasserversorgung Mexico Citys entnommen, was den gesamten Zufluss aus dem Randaquifer verhindert.

Durch die Ausbeutung des Aquifers sank der Grundwasserspiegel von 1971 - 1996, wie in Abbildung 8.5 zu sehen ist, bis zu 30m im Stadtbereich von Toluca ab. Dort gab es eine maximale Absenkrate von 3.5 m/a. Die durchschnittliche Absenkrate lag bei 1.4 m/a. Im Bereich der Feuchtgebiete scheint die Absenkung nicht so stark gewesen zu sein, hatte aber bedeutende ökologische Auswirkungen.

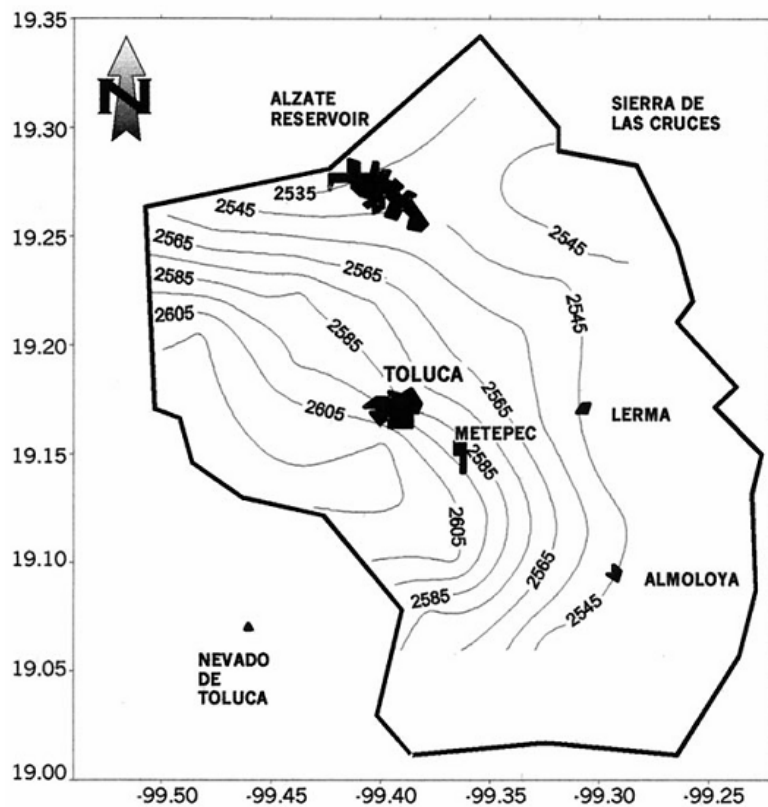


Abb. 8.4: Grundwassergleichen des Tals von Toluca Oktober-November 1996 (ESTELLER, M. V., DIAZ-DELGADO, C., 2002)

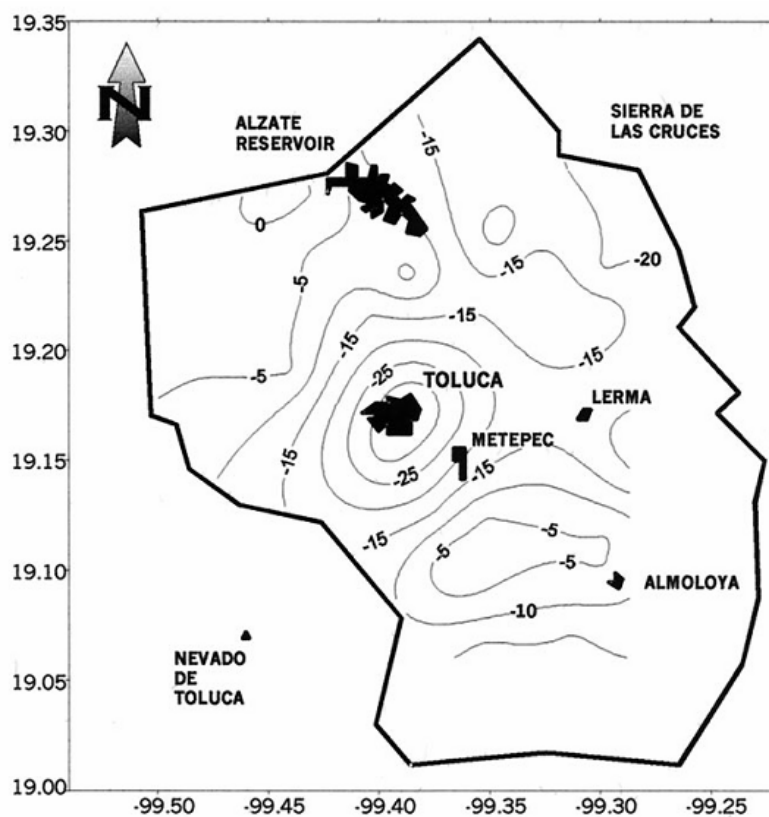


Abb. 8.5: Grundwasserabsenkung von 1971 bis 1996 in Metern (ESTELLER, M. V., DIAZ-DELGADO, C., 2002)

Abbildung 8.6 zeigt die Hydrographen einiger ausgewählter Grundwassermessstellen, die in Abbildung 8.1 dargestellt sind. Es zeigt sich dass bei drei von vier Messstellen ein andauernder Abfall des Grundwasserstandes vorliegt, obwohl die Jahresniederschläge im Mittel etwa gleich bleiben. Die Messstelle pl 145 dagegen zeigt eine Stabilisierung des Grundwasserstandes seit den 80ern. Dies ist auf den Bau des Reservoirs im Feuchtgebiet Almoloya zurückzuführen.

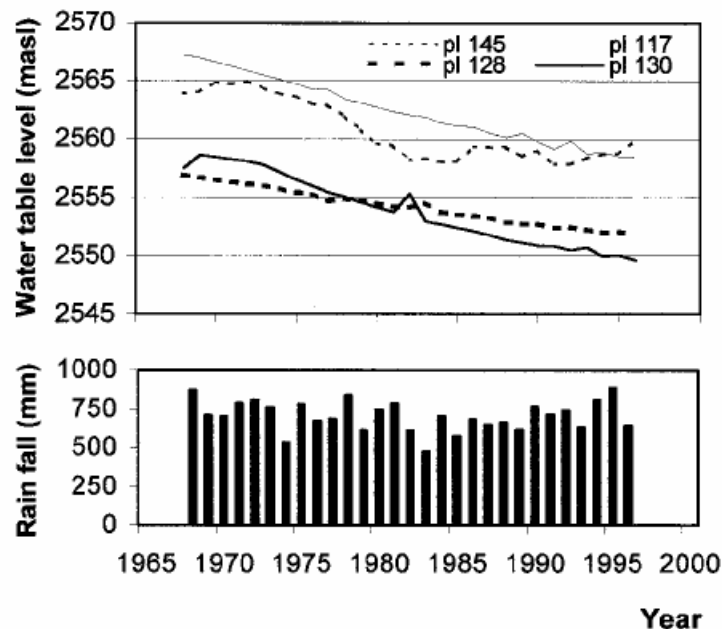


Abb. 8.6 Hydrographen ausgewählter Grundwassermessstellen und Niederschlagsjahressummen im Toluca Valley. (ESTELLER, M. V., DIAZ-DELGADO, C., 2002)

Durch diese Absenkung des Grundwasserspiegels gab es bereits Landabsenkungen zwischen wenigen Zentimetern und einem halben Meter. Diese Senkungen halten auch immer noch an. Ebenso konnten Risse und verschiedene Einbrüche gefunden werden, die Häuser und Straßen beschädigten. Jedoch ist die Rate der Landabsenkung meist nur im Bereich von wenigen Millimetern pro Jahr.

Wie in Abb. 8.1 zu sehen gibt es zwei Pegel am Lerma River in Toluca Valley. Abbildung 8.7 zeigt die Aufzeichnungen der Pegel. Leider sind die Daten lückenhaft. Jedoch ist deutlich zu sehen, dass das Feuchtgebiet von Almoloya nach Beginn des Pumpbetriebs Anfang der 50er Jahre so gut wie keinen Oberflächenabfluss aufweist. Dies liegt aber nicht nur an der Trinkwasserentnahme, sondern auch daran, dass 1951 oberhalb der Station ein Damm gebaut wurde.

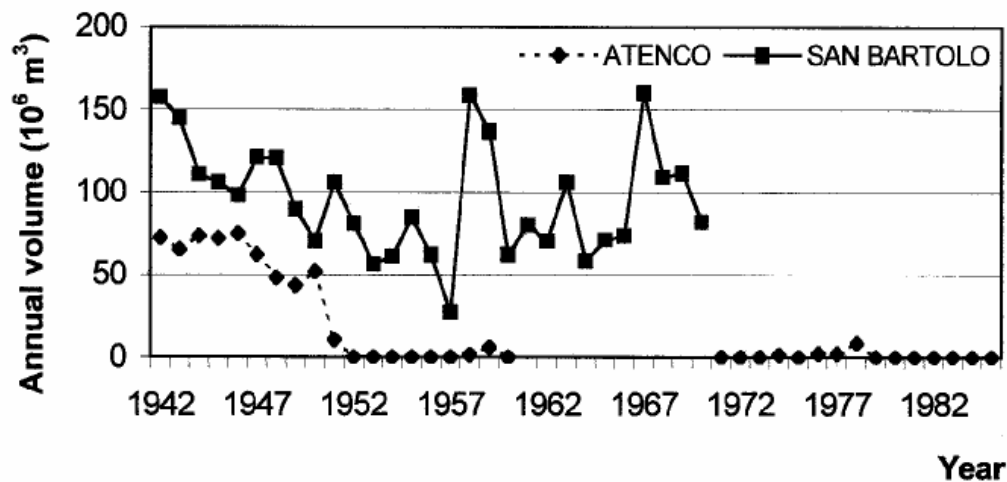


Abb. 8.7: Aufzeichnungen der Pegel Atenco und San Bartolo. (ESTELLER, M. V., DIAZ-DELGADO, C., 2002)

Durch die erniedrigten Grundwasserstände und die daraus resultierenden verringerten Zuflüsse zu den Feuchtgebieten, haben sich die Flächen der Feuchtgebiete verringert. Abbildung 8.8 zeigt das Beispiel des Gebiets bei Almoloya. Hier verringerte sich die permanent geflutete Fläche zunächst ständig, bis dann 1991 das größere Reservoir gebaut wurde und damit die Überflutung der Flächen gesteuert werden konnte. Die episodisch gefluteten Flächen sind ganz verschwunden.

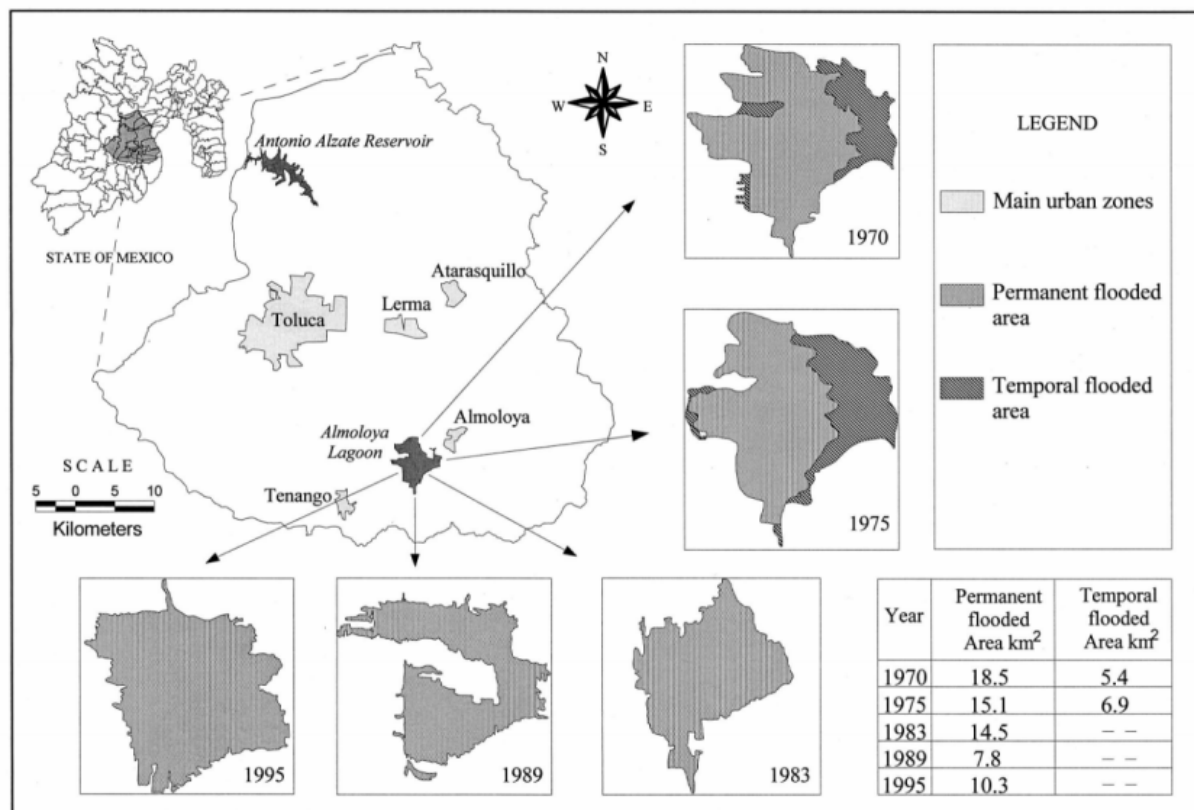


Abb. 8.8: Entwicklung des Feuchtgebietes Almoloya. (ESTELLER, M. V., DIAZ-DELGADO, C., 2002)

Auch die Qualität des Oberflächenwassers verringerte sich. So fielen Schmutzwassereinleitungen in den Lerma River nach dessen verringertem Abfluss stärker ins Gewicht und beeinträchtigten das Leben in Flüssen, Seen und Uferregionen. Die Grundwasserqualität änderte sich ebenfalls durch die Wasserentnahme. Wurde 1993 noch eine Leitfähigkeit von 297 $\mu\text{S}/\text{cm}$ gemessen, betrug diese 1998 schon 978 $\mu\text{S}/\text{cm}$. Dies ist auf eine Durchmischung des oberflächennahen, relativ jungen Grundwassers mit älterem tieferem Grundwasser zurückzuführen.

8.1.5 Fazit

Die Grundwasserübernutzung im Toluca Valley hat zu einer Absenkung des Grundwasserspiegels, Landesenkung und Trockenrisse im Boden, Verringerung des Abflussvolumens im Lerma River und in einer Verringerung der Fläche der Feuchtgebiete geführt. Diese Verkleinerung der Feuchtgebiete ist direkt auf die Ausbeutung der Quellen und des Grundwassers zurückzuführen, die für die Versorgung Mexico Citys vorgenommen wurde. Die Auswirkungen auf die Feuchtgebiete haben bedeutende Folgen für die Flora und Fauna mit sich gebracht.

Alle Schritte die bis jetzt unternommen wurden um die Folgen abzuschwächen, brachten keine Wiederauffüllung des Aquifers mit sich, so dass andere Möglichkeiten gefunden werden müssen, wie z.B. eine Reduzierung der Fördermenge.

8.2 Auswirkungen der Trinkwasserentnahme auf Tümpel im Doñana Nationalpark in SW Spanien (SERRANO L. AND SERRANO L., 1995).

Der Doñana Nationalpark im Südwesten Spaniens ist ein UNESCO Weltkulturerbe und umfasst 50720 ha. Mit seinen riesigen Feuchtgebieten stellt er eine Durchgangsstation für Zugvögel dar und ist eine Art letzte Festung für bedrohte Tierarten. In dieser Studie wurde überprüft, ob die Trinkwasserentnahme für das Touristenzentrum Matalascañas im Norden des Nationalparks Auswirkungen auf den Wasserstand in nahe gelegenen Tümpeln hat.

8.2.1 Geographie und Klima

Wie in Abbildung 8.9 zu sehen liegt der Doñana Nationalpark im Südwesten von Spanien nördlich der Mündung des Guadalquivir. Gegenstand der Untersuchungen sind die episodischen Tümpel Brezo, Charo del Toro, Zahillo, Taraje, Dulce und Las Verdes. Santa Olalla wurde nicht einbezogen, da es ein permanentes Gewässer ist und viel größer als die anderen. Am Strand nördlich des Untersuchungsgebietes ist das Touristenzentrum Matalascañas gelegen.

Das Gebiet liegt in einem subhumiden Mittelmeerklima mit milden Wintern (durchschnittlich 9°C von Dezember bis Januar) und sehr trockenen heißen Sommern (durchschnittlich 24°C von Juli bis August). Der mittlere jährliche Niederschlag beträgt 580 mm, konzentriert sich auf Frühling und Herbst und unterliegt einer großen Variabilität. Die Potentielle Verdunstung liegt bei 80 - 90 cm/a und die aktuelle bei 40 – 45 cm/a.

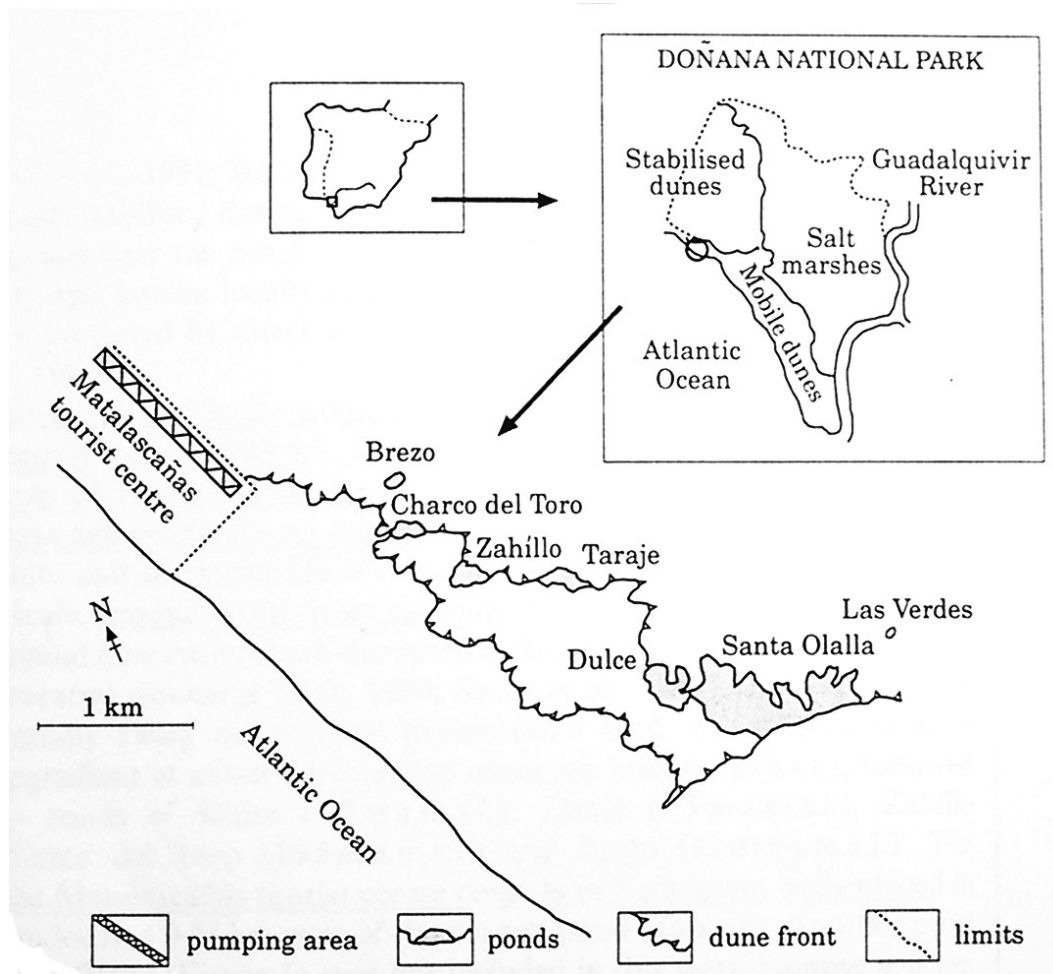


Abb. 8.9 Lage des Untersuchungsgebietes im Doñana Nationalpark in Spanien (SERRANO L. AND SERRANO L., 1995)

8.2.2 Hydrogeologie und Hydrologie

Der Nationalpark ist in zwei geologische Einheiten aufgeteilt: eine alte tektonische Depressionszone, die von schluffigem Sediment des Guadalquivir überdeckt wurde und das Marschland bildete (Abb. 8.9) und eine große Küstenebene die teilweise mit einer sich bewegenden und einer festen Sandschicht überdeckt ist.

Das Untersuchungsgebiet mit den Dünen-Tümpeln liegt wie in Abbildung 8.9 gezeigt an der Grenzfläche zwischen den stabilen und den sich bewegenden Dünen. Diese Frischwassertümpel sind 0.3 – 100 ha groß, seicht (< 3 m) und werden vom dicht unter der Oberfläche anstehenden Grundwasser und dem Niederschlag gespeist. Außer einigen intermittierenden Flüssen, die während Feuchtzeiten Wasser führen, haben sie keinen oberirdischen Abfluss.

Die Tümpel haben sehr große Wasserstandsschwankungen und können in Trockenzeiten auch ganz trocken fallen, wenn der Grundwasserspiegel unter den Tümpelgrund fällt. Der Aquifer, aus dem die Tümpel gespeist werden besteht aus einer 10-25m mächtigen Schicht von hoch durchlässigen äolischen Sanden. Dieser Aquifer wird auch Dünen – Aquifer genannt und hat eine jährliche

Grundwasserneubildung von 200 mm/a. Der Dünenaquifer liegt auf einem Teil des Almonte - Marismas - Aquifer der sich über eine Fläche von 3400 km² erstreckt und eine geringere Durchlässigkeit bei einer Mächtigkeit von 140 m hat.

Regional betrachtet fließt das Grundwasser östlich von den verfestigten Sanden zum Marschgebiet. Die Fließrichtung ändert sich lokal aber immer wieder. Durch Evaporation in den Tümpeln strömt Wasser in Richtung dieser Tümpel nach. Die untersuchten Tümpel liegen entlang der regionalen Fließrichtung des Grundwassers.

8.2.3 Methodik

Die Beobachtungsperiode erstreckt sich von November 1989 bis September 1994. Um den Wasserstand des oberflächennahen Grundwassers zu messen wurden PVC – Rohre mit 6 cm Durchmesser in jede Tümpelvertiefung bis zu einer Tiefe von 1.5 – 2.5 m angebracht. Der Pegel des Oberflächenwassers wurde mit fest im Boden verankerten Metallstäben gemessen. Der Niederschlag wurde mit einem Niederschlagsmesser nach Hellman gemessen. Für die Messung der Entfernung der Tümpel zur Pumpstation wurden Luftbilder herangezogen.

8.2.4 Resultate

Zunächst einmal betrachten wir die in Tabelle 8.1 dargestellten Höhen und Entfernungen zur Wasserentnahme. Der am nächsten gelegene Tümpel ist der Brezo, der auch am höchsten liegt. Am weitesten entfernt sind der Dulce (3.2 km) und der Las Verdes (4.4 km), wobei der Las Verdes höher liegt als der Dulce und somit nicht dem Zusammenhang Entfernung – Höhe über NN folgt, wie die anderen Tümpel.

Tabelle 8.1 Durchschnittlicher jährlicher Grundwasserstandsabfall in m, Gesamtabfall der jährlichen Durchschnittswerte in m, Höhe und Entfernung zur Wasserentnahme der beobachteten Tümpel: Brezo (Br), Charco del Toro (Ch), Zahillo (Za), Taraje (Ta), Dulce (DU), Las Verdes (LV)

Tümpel	Höhe über NN in m	Entfernung in km	Gesamter Abfall d. durchschnittl. Werte im Beobachtungszeitraum in m	durchschnittlicher jährlicher Abfall d. GW-Spiegels in m
Br	12.0	0.73	2.16	0.54
Ch	10.5	0.74	1.95	0.49
Za	9.5	1.22	1.40	0.35
Ta	8.5	1.95	0.78	0.20
Du	4.5	3.20	0.62	0.16
LV	6.0	4.40	0.66	0.17

Betrachtet man den Zusammenhang von der Höhe der Tümpel mit der durchschnittlichen jährlichen Absenkung wie in Abbildung 8.10 geschehen, kann man einen exponentiellen Zusammenhang mit dem Bestimmtheitsmaß 0.7601 finden. Der Zusammenhang zwischen der Höhe der Tümpel über NN und dem durchschnittlichen jährlichen Abfall kann linear mit einem Bestimmtheitsmaß von 0.8379 angenähert werden (Abb. 8.11).

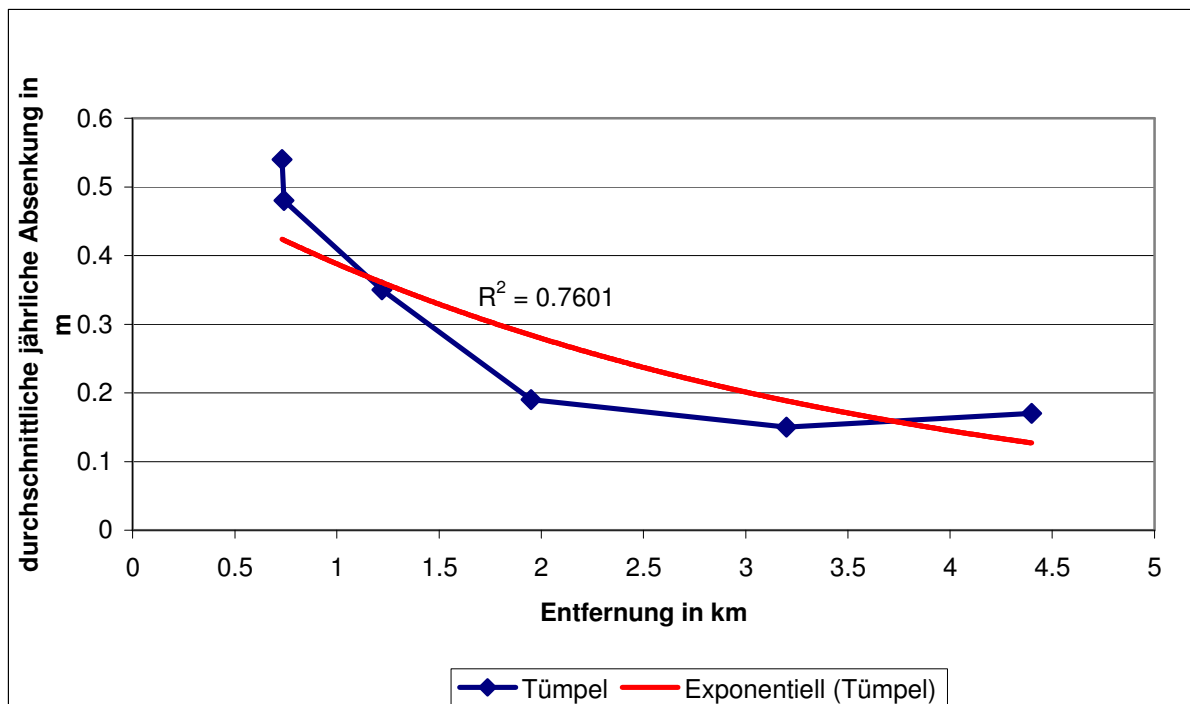


Abb. 8.10 Zusammenhang zwischen Entfernung der Tümpel zur Grundwasserentnahme und der durchschnittlichen jährlichen Grundwasserspiegelsenkung

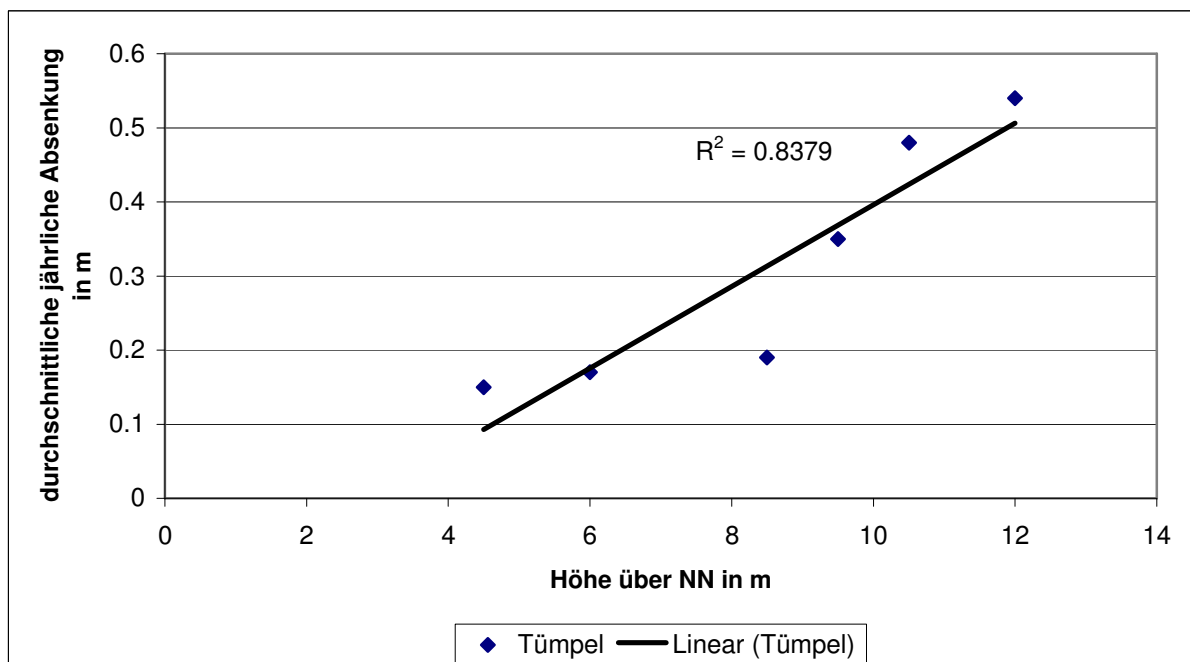


Abb. 8.11 Zusammenhang zwischen der Höhe der Tümpel über NN und der durchschnittlichen jährlichen Grundwasserspiegelsenkung

Wie in Abbildung 8.12 zu sehen ist, sank sowohl der Wasserstand in allen Tümpeln als auch die Niederschlagshöhe im betrachteten Zeitraum. Lag die erste Periode noch deutlich über dem langjährigen Jahresniederschlagsmittel, waren alle weiteren Jahre darunter. Der Tümpel Brezo verzeichnete den größten Grundwasserstandsabfall mit 2.62 m.

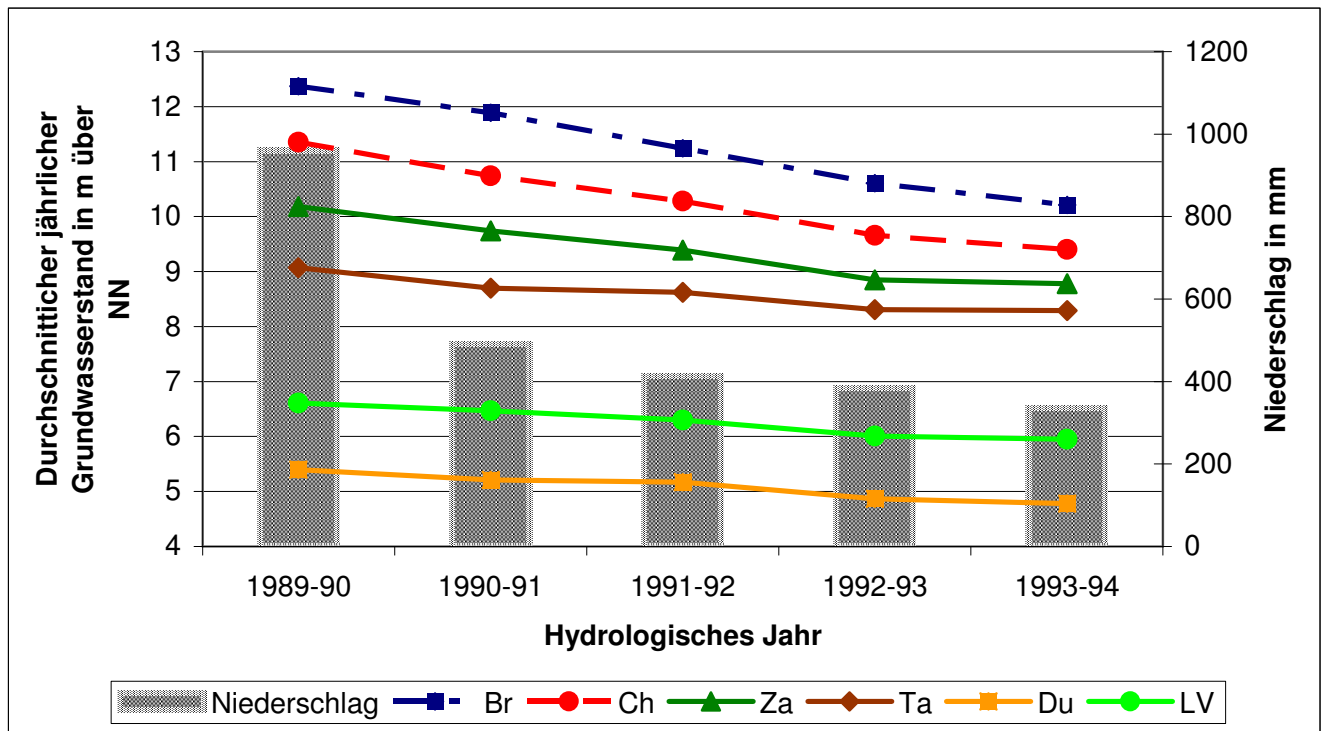


Abb. 8.12 Durchschnittliche jährliche Grundwasserstände in m über NN für die beobachteten Tümpel: Brezo (Br), Charco del Toro (Ch), Zahillo (Za), Taraje (Ta), Dulce (DU), Las Verdes (LV)

In Tabelle 8.2 sind die jährlichen Wasserstandsschwankungen der Tümpel zu sehen. Es ist zu erkennen, dass zunächst die Schwankungen in allen Tümpeln geringer werden. In der letzten Periode dann steigen die Schwankungen allerdings bei fast allen wieder. Nur der Brezo scheint von dieser Entwicklung nicht betroffen zu sein.

Abbildung 8.13 zeigt die Wasserstände der Tümpel über die beobachteten Jahre. Jeweils im Sommer zeigt sich ein starkes Abfallen der Pegel, was einerseits natürlich durch den oft fehlenden Niederschlag und die erhöhte Verdunstung, andererseits auch durch die erhöhte Wasserentnahme während der Schulerferienzeit zu erklären ist. Von Juni - August werden 80% ($2.4 - 2.5 \times 10^6 \text{ m}^3$) der gesamten Wassers entnommen.

Die horizontalen Linien in Abbildung 8.13 geben die Geländeoberkanten der jeweiligen Tümpel an. Es ist zu sehen, dass der Brezo zuletzt im Jahr 1990-1991 Oberflächenwasser aufwies, danach fiel er vollständig trocken. Dieser Effekt ist verzögert auch bei den Tümpeln Charo del Toro und Zahillo zu sehen. Die anderen Tümpel zeigen zwar wie schon in Abbildung 8.12 gesehen einen abfallenden Trend

des oberflächennahen Grundwassers, hatten aber im Beobachtungszeitraum auch immer Oberflächenwasser.

Besonders auffallend in Abbildung 8.13 ist, dass der Wasserstand im bzw. unter dem Brezo seit 1991-1992 keine signifikante Reaktion auf Niederschläge mehr zeigt.

Tabelle 8.2 Höhe, Distanz und Wasserstands - Schwankungen der beobachteten Tümpel: Brezo (Br), Charco del Toro (Ch), Zahillo (Za), Taraje (Ta), Dulce (DU), Las Verdes (LV)

Tümpel	Höhe über NN in m	Entfernung in km	Jährliche Wasserstandsschwankungen in m				
			1989-90	1990-91	1991-92	1992-93	1993-94
Br	12.0	0.73	1.02	1.07	0.81	0.48	0.41
Ch	10.5	0.74	1.54	1.15	1.16	0.96	1.14
Za	9.5	1.22	1.33	1.01	1.11	0.74	1.03
Ta	8.5	1.95	1.54	1.35	0.81	1.02	1.13
Du	4.5	3.20	1.70	1.08	0.94	0.74	0.89
LV	6.0	4.40	1.30	1.22	0.86	0.51	0.55

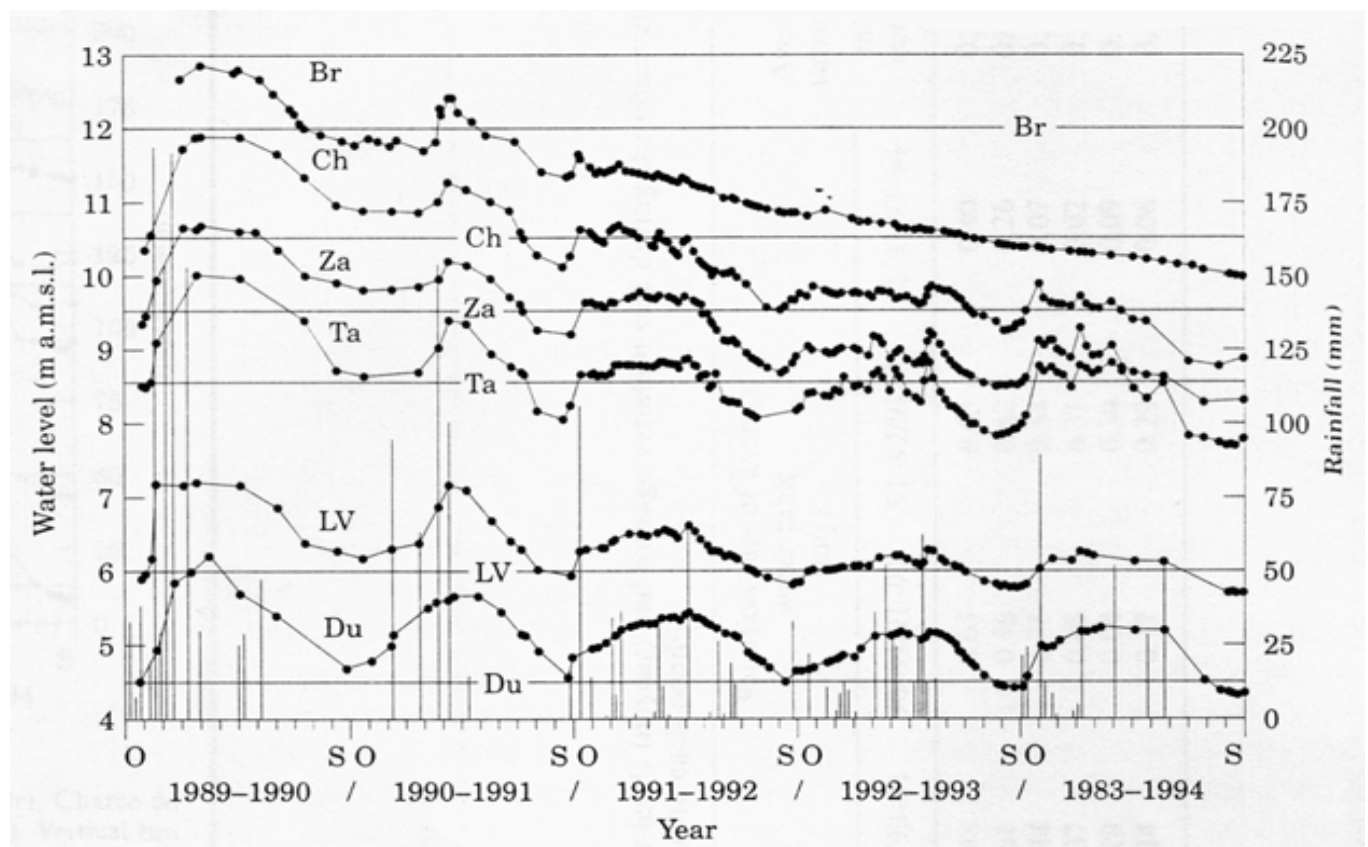


Abb. 8.13 Wasserstände der Tümpel im Beobachtungszeitraum. Die horizontalen Linien geben die Geländeoberkante an.

8.2.4 Diskussion der Ergebnisse

Einige Effekte erschweren die Interpretation der Ergebnisse. Da die Tümpel in Richtung der Wasserentnahme eine steigende Höhelage aufweisen und das Grundwasser auch in Richtung der abnehmenden Höhe fließt, haben die Tümpel nahe der Entnahme naturgemäß eine größere Schwankung des Wasserstandes.

Der Versuch eine Korrelation zwischen der Entfernung der Tümpel und der mittleren jährlichen Grundwasserspiegelabsenkung zu zeigen brachte nur mäßigen Erfolg, da der Zusammenhang zwischen der Höhenlage und der Grundwasserspiegelabsenkung ein besseres Bestimmtheitsmaß brachte.

Dazu kommt dass der Niederschlag in diesem Gebiet großen Schwankungen unterliegt, so dass eine relativ kurze Studie über nur 5 Jahre nicht ausreichend ist um Langzeittrends zu erkennen. Über den Studienzeitraum hat der Niederschlag kontinuierlich abgenommen.

Allein durch den Trend zum Abfall der mittleren jährlichen Grundwasserstände kann, da auch der Niederschlag abgenommen hat, keine Beeinflussung durch Grundwasserentnahme nachgewiesen werden. Die größte Beweislast trägt der Verlauf des Wasserstandes im Tümpel Brezo in Abbildung 8.13. Dadurch, dass der Wasserstand seit 1991-1992 gar nicht mehr auf Niederschläge reagiert, scheint eine Beschädigung des Grundwassersleiters zu bestehen. Die Nicht-Reaktion könnte sogar eine irreversible Beschädigung bedeuten. Zu beachten ist allerdings auch noch, dass sich in trocken gefallen Tümpeln Pflanzen ansiedeln, die durch Transpiration und Interzeptionsverdunstung das Bodenfeuchtedefizit erhöhen, so dass es eine größere Menge Niederschlag braucht bis die Grundwasserneubildung einsetzt.

Diese ganzen Indizien zusammengenommen, lassen die Autoren jedoch schließen, dass die Grundwasserentnahme zur Versorgung des Touristenzentrums Matalascañas den Wasserstand in einigen Tümpeln in Anhängigkeit zu ihrer Entfernung zur Wasserentnahme beschädigt hat und noch weiter beschädigt.

9. Fazit

Es bleibt festzustellen dass es oft nicht einfach ist eine übermäßige Grundwasserentnahme zu identifizieren bevor negative Auswirkungen auftreten. Schon allein weil es keine allgemeingültige Definition dafür gibt. Erst wenn ein Konzept für die Entnahme vorliegt und das Verhalten des Aquifers oder Aquifersystems gut verstanden wird, kann eine Übernutzung mit einiger Zuverlässigkeit ausgewiesen werden (CUSTODIO, E., 2002). Diese Konzepte können dann auch soziale Aspekte beinhalten, so dass zum Beispiel gewisse Folgen der Entnahme in Kauf genommen werden, um die Bevölkerung mit Trinkwasser zu versorgen.

Die negativen Auswirkungen sind vielfältig, wie im Tal von Toluca gesehen und oft nicht auf den ersten Blick direkt der Grundwasserentnahme zuzuordnen, wie am Fallbeispiel der Tümpel im Doñana Nationalpark gezeigt wurde. Die häufigsten negativen Folgen sind das Absinken der Wasserstände in Grundwasser und Oberflächengewässern, die Landabsenkung und ein verändertes Grundwasserströmungsverhalten.

10. Literaturverzeichnis

- BAUMGARTNER & LIEBSCHER 1996: „Allgemeine Hydrologie: Quantitative Hydrologie.“, Gebrüder Bornträger, Berlin, Stuttgart
- BULL, J. L. AND KIRKBY, M.J., 2002: „Dryland Rivers – Hydrology and Geomorphology of semi-arid channels. WILEY
- CUSTODIO, E., 2002 : „Aquifer overexploitation: What does it mean?“, Hydrogeology Journal 2002,2 (S. 254 – 277)
- DYCK, S. & PESCHKE, G., 1995: „Grundlagen der Hydrologie.“, Verlag für Bauwesen, Berlin.
- EDWARDS, B. AND EVANS, R., 2002: „Saltwater Intrusion in Los Angeles Area Coastal Aquifers—the Marine Connection“, U.S. Geological Survey, Fact Sheet 030-2. <http://pubs.usgs.gov/fs/2002/fs030-02/>
- ESTELLER, M. V., DIAZ-DELGADO, C., 2002: „Environmental Effects of Aquifer Overexploitation: A Case Study in the Highlands of Mexico“, Environmental Management Vol. 29, No. 2, S. 266-278
- MAIDMENT, D. R., 1993: „Handbook of Hydrology“. McGraw-Hill, INC.
- MALIK, A.H., 2000: „Integrated Urban Lei River (North Pakistan) Water Resources Management.“ Water Resources Development, Vol. 16, No. 1, 97–117, 2000
- MATTHEß, G. UND UBELL, K., 2003: „Allgemeine Hydrogeologie: Grundwasserhaushalt.“, Gebrüder Borntraeger, Berlin, Stuttgart
- MAYER, J. ET AL, 1999: „Qualität & Quantität von Grundwasser in Europa.“ Europäische Umweltagentur
- SERRANO L. AND SERRANO L., 1995: „Influence of Groundwater Exploitation for Urban Water Supply on Temporary Ponds from the Donana National Park (SWSpain)“, Journal of Environmental Management (1996) 46, S. 229-238
- SIMMERS, J., 2003: „Understanding Water in a Dry Environment“, International Association of Hydrogeologists, Chapter 8.
- UNITED NATIONS ENVIRONMENT PROGRAMME (UNEP), 2003: „Groundwater and its susceptibility to degradation.“ [http://www.unep.org/DEWA/water/groundwater/pdfs/Groundwater INC cover.pdf](http://www.unep.org/DEWA/water/groundwater/pdfs/Groundwater_INC_cover.pdf)
- WOLKERSDORFER, CH. & THIEM, G., 1999: „Ground Water Withdrawal and Land Subsidence in Northeastern Saxony (Germany).“, Mine Water and the Environment, 18 (1): S. 81-92
- ZEKTSER, S., LOAICIGA, H. A., WOLF J. T., 2005: „Environmental impacts of groundwater overdraft: Selected case studies in the southwestern United States.“, Environmental Geology (2005) 47: S. 396-404