

Berechnung von Grundwasserabsenkungen unter Windows

Armin Doster, Axel Christmann

Herrn em. Prof. Dr.-Ing. H. Werner, Germering, gewidmet

Es wird die Vorgehensweise für Grundwasserabsenkungen bei freiem, gespanntem und halbgespanntem Grundwasserspiegel sowie bei umschlossenen Baugruben dargestellt. Am Beispiel des Programms DC-Absenkung wird gezeigt, wie mit Hilfe graphisch-interaktiver Software die Berechnung und graphische Darstellung der Ergebnisse auf einfache Weise durchgeführt werden kann.

The procedures for the calculation of ground water lowering for free, perched and half-perched ground water level as well as for waterproof closed sheeting are described. It is shown by the example of the program DC-Absenkung how calculation and graphical display of results can be carried out in a simple manner.

1. Einleitung

Für Bauvorhaben, die dauerhaft ins Grundwasser einbinden und deren Gründungssohle damit unterhalb des Grundwasserspiegels liegt, ist eine Grundwasserabsenkung erforderlich. Mit Hilfe von Brunnen, die um die Baugrube angeordnet sind, wird das Grundwasser abgepumpt. Es entsteht eine Kombination von Absenktrichtern, die die Trockenlegung der Baugrube ermöglicht. Nach einer gewissen Vorlaufzeit beim Betrieb einer Wasserhaltung stellt sich der abgesenkte Wasserspiegel ein. Ein stationärer Zustand ist erreicht, wenn der Grundwasserspiegel in der ganzen Baugrube unterhalb der Baugrubensohle liegt. Dieser Zustand muss zumindest so lange aufrechterhalten werden, bis der unterhalb des ursprünglichen Wasserstandes liegende Teil des Bauwerks dicht ist und das Gewicht des erstellten Bauwerks den durch den ursprünglichen Wasserstand entstehenden Auftrieb überwiegt.

Die Grundwasserabsenkung stellt i.A. das wirtschaftlichste Verfahren dar, muss aber meist wasserrechtlich genehmigt werden. Große Absenkungen werden oft aus verschiedensten hydrologischen, ökologischen und bautechnischen Gesichtspunkten nicht genehmigt. Neben der Reichweite einer großen Absenkung mit möglichen Setzungen und Schäden an umgebender Bebauung liegen die Gründe oft auch bei möglichen Altlasten im Bereich des Absenktrichters mit den entsprechenden Sanierungsfolgen. Des weiteren kommt dem Schutz der tertiären Grundwasserstockwerke als Trinkwasserreservoir steigende Bedeutung zu.

Bei der Lösung der bautechnischen Fragestellungen der Grundwasserhaltungen wird daher meist auf eine Minimierung der Fördermengen und damit der Einflüsse auf den Grundwasserhaushalt Wert gelegt. Ein Softwareprodukt zur Berechnung der Absenkung und der erforderlichen Brunnen und ihrer Pumpleistung muss daher entsprechend den Erfordernissen den folgenden Umfang beinhalten:

- **Berücksichtigung mehrerer Baugruben mit unterschiedlichen Tiefen**

Die Brunnentiefen werden unter Berücksichtigung des Freibordmaßes so ausgelegt, dass sich die geringste Anzahl von Brunnen mit der entsprechenden minimalen Fördermenge ergibt. Ausgehend von der tiefsten Baugrube und der errechneten Absenktiefe werden Anzahl, Lage und Tiefe weiterer Brunnen unter Anpassung der Absenktiefe an die unterschiedlichen Baugrubentiefen so festgelegt, dass die gewünschte trockene Baugrube erreicht wird.

- **Optimierung der Brunnentiefen**

Die gegenseitige Beeinflussung der Brunnen ist zu berücksichtigen, so dass sich bei der gewählten Brunnenanzahl aufgrund der rechnerisch ermittelten Anströmhöhe individuell unterschiedliche Fördermengen der Brunnen ergeben. Bei einer gegebenen Anzahl und Lage der Brunnen wird deren Tiefe so optimiert, dass die erforderliche Absenktiefe erreicht wird.

- **Umschließung der Baugrube durch Spundwände**

Liegen die Brunnen innerhalb der Baugrube, kann durch eine Umschließung der Baugrube mit Hilfe von Spundwänden die zuströmende Wassermenge vermindert werden. Die Reduktion der Zuströmung ist abhängig von der Einschnürung des wasserführenden Querschnitts durch die Spundwand, d.h. vom Verhältnis der Einbindetiefe zu der Höhe des Grundwasserstandes über dem Stauer. Eine deutliche Reduktion der Pumpwassermenge wird jedoch erst dann erreicht, wenn dieses Verhältnis gegen 1 geht, also der durchströmte Querschnitt relativ gering ist.

- **Wasserdichte Umschließung mit Dichtsohle (Trogbauweise)**

Bei Ausführung der Baugrube als Trog mit Dichtsohle, zusammen mit der Umschließung durch eine Spundwand, ist als Zufluss nur noch eine Restwassermenge zu berücksichtigen, d.h. eine geringe Zuströmung aus Undichtigkeiten der Umschließung und einer geringen Durchlässigkeit der Dichtsohle. Zusätzlich ist ein Zufluss durch Niederschlag anzusetzen. Mit der Differenz aus dem Fassungsvermögen der Brunnen in der Baugrube zu dem Restzufluss kann die benötigte Zeit für das Leerpumpen der Baugrube bestimmt werden.

- **Graphische Darstellung der Ergebnisse**

Neben der Isohypsendarstellung als Farbflächen oder Höhenlinien sollten auch Schnitte durch die Baugruben mit Darstellung des abgesenkten Grundwasserspiegels möglich sein.

Dies sind nur die wichtigsten Anforderungen an ein Programm, die anhand des Programmes DC-Absenkung gezeigt werden.

2. Grundlagen der Berechnung

2.1 Zufluß zu einem Brunnen

Grundlage der Flüssigkeitsströmung in durchlässigen Stoffen ist das Gesetz von *Darcy*

$$Q = k * A * i \quad (1)$$

mit

Q	=	Wassermenge	[m ³ /s]
k	=	Durchlässigkeitsbeiwert	[m/s]
A	=	durchströmter Querschnitt	[m ²]
i	=	Druckgefälle = h/l	[-]
h	=	Druckhöhe	[m]
l	=	durchflossene Länge	[m]

Für die Berechnung der Grundwasserabsenkung werden meist die *Dupuit-Thiemschen* Brunnenformeln verwendet. Es sind je nach Baugrundsituation vier Arten von Grundwasserleitern zu unterscheiden:

- **Grundwasserspiegel mit freier Oberfläche:**
oberhalb einer undurchlässigen Schicht (Stauer) steht das Grundwasser in einer durchlässigen Schicht an. Sowohl der ursprüngliche ruhende Wasserspiegel als auch das Absenkziel, d.h. der entstehende abgesenkte Wasserspiegel liegen innerhalb der durchlässigen Schicht.
- **Grundwasser mit gespannter Oberfläche:**
die durchlässige Schicht ist von unten und oben durch undurchlässige Schichten begrenzt. Das Wasser in der durchlässigen Schicht steht unter Druck und steigt in einem Meßpegel bis oberhalb der Schicht an. Der abgesenkte Wasserspiegel liegt innerhalb der durchlässigen Schicht.

Diese beiden Arten stellen die Grenzfälle dar, zwischen denen die folgenden Übergangsformen möglich sind:

- **Grundwasser mit halbgespannter Oberfläche:**
oberhalb der durchlässigen Schicht befindet sich eine Schicht geringerer Durchlässigkeit. Wird die durchlässige Schicht entwässert, so fließt aus der darüberliegenden Schicht Grundwasser nach. In letzterer entsteht eine Fließbewegung in senkrechter Richtung. Der waagerechte Anteil der Bewegung ist so gering, dass er vernachlässigt werden kann.
- **Grundwasser mit halbfreier Oberfläche:**
wie c), jedoch mit so großer Durchlässigkeit der halbdurchlässigen Schicht, dass der waagerechte Strömungsanteil nicht vernachlässigt werden kann. Es ist die Zuströmung in mehreren Schichten zu bestimmen.

a) Freie Oberfläche

In einem Absenktrichter in einer Entfernung x von der Brunnenachse ergibt sich bei einer Wasserstandshöhe y der durchströmte Querschnitt A zu

$$A = 2 * \pi * x * y \quad (2)$$

Mit Hilfe des *Darcyschen* Strömungsgesetzes läßt sich damit für freie Oberfläche die Strömungsmenge bestimmen (s. /1/) zu

$$Q = \frac{\pi * k * (H^2 - h^2)}{\ln R - \ln r} \quad (3)$$

wobei

H = Höhe des ruhenden Grundwasserstandes

h = benetzte Filterhöhe des Brunnens

R = Reichweite des Brunnens = $3000 * s * \sqrt{k}$

s = Absenktiefe

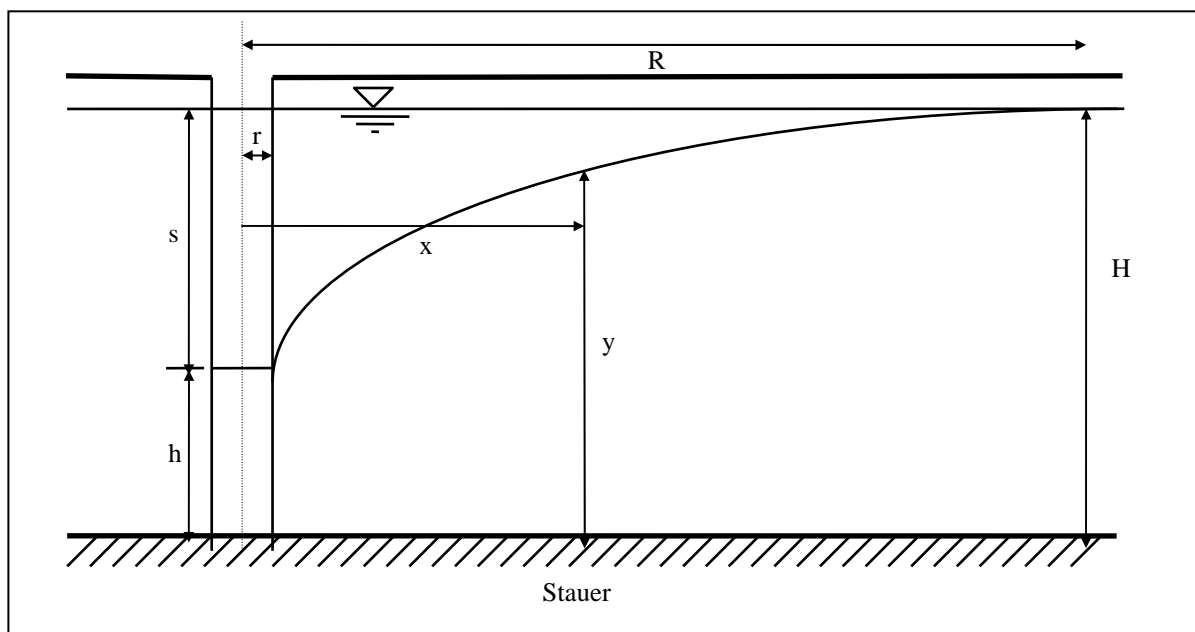
r = Radius des Brunnens

(siehe auch Bild 1).

Die Gleichung der Spiegelfläche für zwei beliebige Punkte (x_1, y_1) und (x_2, y_2) bestimmt sich zu

$$y_1^2 - y_2^2 = \frac{Q}{\pi * k} * (\ln x_1 - \ln x_2) \quad (4)$$

Mit den Werten $x_1 = r$ und $y_1 = h$ läßt sich die Wasserstandshöhe y_2 in einer Entfernung x_2 bestimmen.



(Bild 1. Maße des Absenkungstrichters)

b) Gespannte Oberfläche

Für gespannten Grundwasserspiegel gelten die Formeln

$$Q = \frac{2 * \pi * k * m * s}{\ln R - \ln r} \quad (5)$$

und

$$y_1 - y_2 = \frac{Q}{2 * \pi * k * m} * (\ln x_1 - \ln x_2) \quad (6)$$

mit den Maßen

s = Absenkung = H-h

m = Mächtigkeit der durchlässigen Schicht.

c) Halbgespannte Oberfläche

Bei halbgespannter Oberfläche gehen die Parameter der halbdurchlässigen Schicht über den Sickerfaktor λ mit ein:

$$\lambda = \sqrt{\frac{k}{k'} * m * m'} \quad (7)$$

mit

k' = Durchlässigkeit der halbgespannten Schicht

m' = Mächtigkeit der halbgespannten Schicht.

Hier ergibt sich die Fördermenge zu

$$Q = \frac{2 * \pi * k * m * s * r}{\lambda} * \frac{K_1\left(\frac{r}{\lambda}\right)}{K_0\left(\frac{R}{\lambda}\right)} \quad (8)$$

und die Absenkkurve zu

$$y = H - \frac{Q}{2 * \pi * k * m} * \frac{\lambda}{r} * \frac{K_0\left(\frac{x}{\lambda}\right)}{K_1\left(\frac{r}{\lambda}\right)} \quad (9)$$

Die Besselfunktionen K_0 und K_1 zweiter Art nullter und erster Ordnung sind in /1/ angegeben.

d) Halbfreie Oberfläche

Es stehen mehrere Schichten an, in denen jeweils eine waagerechte Strömung herrscht. Die Fördermenge wird daher für jede Schicht anteilig bestimmt. Hierbei kann für jede Schicht eine andere Situation vorliegen:

- In der obersten Schicht steht ein freier Grundwasserspiegel an. Die Fördermenge in dieser Schicht wird nach Formel (3) bestimmt.
- In Schichten, deren Oberkante unterhalb des ruhenden Grundwasserspiegels, jedoch oberhalb des Absenckziels liegen, bildet sich ein Übergang zwischen gespanntem und freiem Grundwasserspiegel aus. Zur Bestimmung der Fördermenge in einer solchen Schicht siehe Abschnitt e).
- In Schichten, die unterhalb des Absenckziels liegen, wird die Fördermenge nach Formel (5) für gespannten Grundwasserspiegel berechnet.

Die Fördermengen der einzelnen Schichten werden zur Gesamt-Fördermenge summiert.

Für das Fassungsvermögen der Brunnen darf nicht eine mittlere Durchlässigkeit aller Schichten verwendet werden. Vielmehr sind hier nur die Schichten maßgebend, in denen die benetzte Filterhöhe h' liegt. Für diese Schichten kann der durchschnittliche Durchlässigkeitsbeiwert bestimmt werden zu

$$k = \frac{\sum_i k_i * d_i}{\sum_i d_i} \quad (10)$$

e) Übergang zwischen gespanntem und freiem Grundwasserspiegel

Liegt gespanntes Grundwasser vor, d.h. die Druckhöhe des ruhenden Grundwasserspiegels befindet sich in einer undurchlässigen Schicht, das Absenkziel liegt jedoch in einer durchlässigen Schicht, so bildet sich ein Übergang zwischen den beiden Grenzzuständen aus: in dem Bereich mit Wasserspiegel unterhalb der undurchlässigen Schicht liegt ein freier Grundwasserspiegel vor, während außerhalb dieses Bereiches der Wasserspiegel gespannt ist.

An der Übergangsstelle zwischen freiem und gespanntem Grundwasserspiegel muss aus Kontinuitätsgründen die Zuflußmenge Q im freien und im gespannten Bereich gleich groß sein. Durch Gleichsetzen der beiden Gleichungen für Q ergibt sich für den Abstand a des Übergangspunktes von der Brunnenachse

$$\ln a = \frac{(m^2 - h^2) * \ln R + 2 * m * (H - m) * \ln r}{2 * m * (H - m) + m^2 - h^2} \quad (11)$$

Daraus berechnet sich die Fördermenge Q zu

$$Q = \frac{\pi * k * [(H^2 - h^2) - (H - m)^2]}{\ln R - \ln r} \quad (12)$$

2.2 Zufluß zu mehreren Brunnen

Sind mehrere Brunnen gleichzeitig in Betrieb, so überlagern sich deren Absenktrichter so, dass an jeder Stelle die Absenkungen jedes einzelnen Brunnens zu der Gesamtabenkung addiert werden können. Die abgesenkte Grundwasseroberfläche hat eine Form, die anhand des Membrananalog beschrieben werden kann, sich also wie eine Gummimembran verhält, die bei den einzelnen Brunnen um die Absenkung im Brunnen verformt wird.

Die Absenkung mit mehreren Brunnen kann anhand der *Forchheimerschen* Mehrbrunnenformeln berechnet werden.

Die Pumpmenge Q berechnet sich danach zu

$$Q = \frac{\pi * k * (H^2 - h^2)}{\ln R - \ln A_{RE}} \quad (13)$$

für freie Oberfläche und

$$Q = \frac{2 * \pi * k * m * s}{\ln R - \ln A_{RE}} \quad (14)$$

für gespannte Oberfläche.

A_{RE} ist hierbei der Radius eines Ersatzbrunnens mit gleicher Fläche wie die des von den Brunnen umschlossenen Baugrubenbereichs.

Der Wasserstand y_2 an einer beliebigen Stelle mit Abständen $x_{2,i}$ zu den Brunnen i kann dann in Abhängigkeit von einem bekannten Wasserstand y_1 an einer Stelle mit Abständen $x_{1,i}$ bestimmt werden zu

$$y_1^2 - y_2^2 = \frac{Q}{\pi * k} \left(\frac{1}{\sum_i q_i} \sum_i \ln x_{1,i}^{q_i} - \frac{1}{\sum_i q_i} \sum_i \ln x_{2,i}^{q_i} \right) \quad (15)$$

für freie Oberfläche und

$$y_1 - y_2 = \frac{Q}{2 * \pi * k * m} \left(\frac{1}{\sum_i q_i} \sum_i \ln x_{1,i}^{q_i} - \frac{1}{\sum_i q_i} \sum_i \ln x_{2,i}^{q_i} \right) \quad (16)$$

für gespannte Oberfläche.

Diese Formeln gelten für n Brunnen mit beliebigen Fördermengen q_i . Bei Brunnen mit gleicher Fördermenge q vereinfacht sich $\frac{1}{\sum_i q_i} \sum_i \ln x_i^{q_i}$ zu $\frac{1}{n} \sum_i \ln x_i$.

2.3 Fassungsvermögen des Brunnens

Reicht ein Brunnen mit seiner Unterkante bis in die undurchlässige Schicht, so dass das Wasser nur seitlich in den Filter zuströmen kann, so spricht man von einem vollkommenen Brunnen. Liegt die Unterkante des Brunnens noch in der durchlässigen Schicht, so kann Wasser auch von unten zuströmen. Es liegt dann ein unvollkommener Brunnen vor. Dieser Fall wird durch einen Zuschlag ΔQ zu der Pumpmenge Q von z.B. 25% berücksichtigt. Da das Leerpumpen des erforderlichen Trichters eine gewisse Zeit benötigt, das Erreichen des gewünschten Absenkziels jedoch evtl. früher erforderlich ist, muss hierfür je nach Baugrundsituation ebenfalls ein Zuschlag zu der Pumpmenge berücksichtigt werden.

Nach Berechnung der gesamten Pumpmenge $\max.Q = Q + \Delta Q$ unter Einrechnung der Zuschläge ist zu bestimmen, wie die Wassermenge durch die Brunnen aufgenommen werden kann. Bei Wahl eines Brunnens mit dem Radius r hat dieser ein Fassungsvermögen q von

$$q = 2 * \pi * r * h' * \frac{\sqrt{k}}{15} \quad (17)$$

h' stellt hier die Höhe der benetzten Filterfläche dar.

Daraus bestimmt sich die Anzahl der benötigten Brunnen zu

$$n = \frac{\max.Q}{q} \quad (18)$$

Der lokale Absenktrichter an einem Brunnen ergibt sich zu

$$s_{EB} = h - \sqrt{h^2 - \frac{15 * q (\ln b - \ln r)}{\pi * k}} \quad (19)$$

mit b als Reichweite des Einzelbrunnens. Diese wird bei mehreren sich gegenseitig beeinflussenden Brunnen gleich dem halben Abstand zum nächstliegenden Brunnen angesetzt.

Um zu prüfen, ob der Brunnen die erforderliche Wassermenge auch aufnehmen kann, d.h. ob die erforderliche benetzte Filterfläche h' vorhanden ist, ist anschließend zu prüfen, ob

$$h' = \frac{15 * q}{2 * \pi * r * \sqrt{k}} \leq h - s_{EB} \quad (20)$$

- h = Höhe des abgesenkten Wasserstandes unter der Baugrube
 h' = Höhe der benetzten Filterfläche, d.h. des Wasserstandes im Brunnen.

2.4 Maßgebender Punkt

Ein bestimmter Punkt der gesamten Baugrube ist für die Gesamtabenkung maßgebend, da sich hier die minimale Absenkung ergibt. Bei Baugrubenabschnitten mit gleicher Tiefe und Brunnen mit gleichem Durchmesser und gleicher Tiefe ist dies der Punkt am Rand der Baugrube, der von den Brunnen den größten Abstand hat. Für den allgemeinen Fall unterschiedlicher Brunnen gilt für diesen Punkt die Bedingung, dass der Wert

$$\frac{1}{\sum_i q_i} \sum_i \ln x_i^{q_i}$$

für n Brunnen mit Fassungsvermögen q_i und Abständen x_i zu dem untersuchten Punkt (siehe Kapitel 2.2) seinen Maximalwert erreicht. Für diesen Punkt ist die Einhaltung der geforderten Absenkung sicherzustellen.

Liegen mehrere Baugrubenabschnitte mit unterschiedlichen Tiefen vor, ist für jeden Abschnitt die Bedingung unter Berücksichtigung der dort erforderlichen Absenkung zu prüfen. Maßgebend ist der Punkt desjenigen Baugrubenabschnittes, für den sich zur Einhaltung der gewünschten Absenkung die maximale Pumpmenge ergibt.

3. Spezielle Verfahren

3.1 Verwendung mehrerer Brunnenstaffeln

Sollen die endgültigen Brunnen in einer gewissen Tiefe eingebaut werden, ist zunächst das Grundwasser um eine geringere als die Tiefe des Endaushubs abzusenken, um den Einbau zu gewährleisten. Es ist hierfür eine erste Brunnenstaffel notwendig, die eine vorläufige Absenkung ermöglicht. In deren Schutz kann die zweite - endgültige - Brunnenstaffel eingebaut und in Betrieb genommen werden.

Es sind hierfür mehrere Brunnenstaffeln unabhängig voneinander mit unterschiedlichen Absenkzielen zu berechnen.

3.2 Umschließung der Baugrube mit Spundwänden

Befinden sich die Brunnen innerhalb der Baugrube, kann durch eine Umschließung mit Spundwänden die Menge des zufließenden Grundwassers reduziert werden. Der Grad der Reduktion ist abhängig von der Einschnürung des grundwasserführenden Querschnittes zwischen Ruhewasserspiegel und Stauer. Wird mit t die Einbindung der Spundwand unterhalb des Ruhewasserspiegels bezeichnet und mit H der Abstand zwischen Ruhewasserspiegel und Stauer, ergibt sich der Reduktionsfaktor für die erforderliche Entnahmemenge nach Weber (dargestellt in /1/) aus dem Verhältnis t/H .

Eine deutliche Reduktion der zuströmenden Wassermenge ergibt sich erst bei geringem Abstand der Spundwand über dem Stauer. Bei $t/T = 0.5$ beträgt der Reduktionsfaktor 0.25 und steigt erst bei $t/T = 0.8$ auf 0.5 an. Für eine Reduktion um 75% der Wassermenge wäre eine Einbindung von 95% der freien Grundwasserhöhe erforderlich.

3.3 Ausführung in Trogbauweise mit Dichtsohle

Bei Ausführung einer Baugrube in Trogbauweise mit Dichtsohle wird die Baugrube durch innen liegende Brunnen leergesaugt. Durch die Umschließung (Schlosswasser) und durch die Dichtsohle ist ein gewisser Restzufluß anzusetzen.

Der Restzufluß durch die Dichtsohle kann über die Durchlässigkeit der Sohle bestimmt werden zu

$$q_D = k_D * A * \frac{s}{d_D} \quad (21)$$

mit

k_D = Durchlässigkeit der Dichtsohle

A = Fläche der Dichtsohle

s = Höhe des Grundwasserspiegels über Unterkante der Dichtsohle

d_D = Dicke der Dichtsohle

Der Restzufluß durch die Umschließung q_U wird i.A. in l/s pro m² Baugrubenwand angesetzt.

Zusätzlich ist ein Zufluß aus Niederschlägen q_N , meist in l/s pro 1000 m² Baugrubenfläche, anzusetzen.

Die Entnahmemenge der Brunnen q_B wird als Summe der Fördermengen der einzelnen Brunnen (siehe oben) berechnet. Die benötigte Zeit für das Leerpumpen der Baugrube berechnet sich dann zu

$$t = \frac{V_W}{q_B - q_D - q_U - q_N} \quad (22)$$

mit $V_w =$ Volumen des in der Baugrube enthaltenen Wassers:

$$V_w = A * \sum d_i * n_i$$

A = Grundfläche der Baugrube

d_i = Schichtdicken zwischen Grundwasserspiegel und Absenkziel

n_i = Porenvolumen der zugehörigen Schichten

Durch den Restzufluß in die Baugrube ergibt sich außerhalb der Umschließung eine (geringere) Absenkung des Grundwassers. Diese ist zeitabhängig, so dass hier die Berechnung über die folgenden zeitabhängigen Gleichungen erfolgen muss:

$$\frac{H^2 - h^2}{2H} = \frac{Q}{4 * \pi * k * H} \ln \left(\frac{2.25 * k * H * t}{A_{RE}^2 * p} \right) \quad (23)$$

und

$$s = H - h$$

für freien Grundwasserspiegel sowie

$$s = \frac{Q}{4 * \pi * k * m} \ln \left(\frac{2.25 * k * H * t}{A_{RE}^2 * p} \right) \quad (24)$$

für gespanntes Grundwasser

mit

s = Absenkung

H = Höhe des Grundwasserstandes über dem Stauer

h = Höhe des abgesenkten Grundwassers über dem Stauer

Q = Entnommene Wassermenge als Restzufluß in die Baugrube = $q_D + q_U$

k = Durchlässigkeit der Schicht(en)

t = Zeit (z.B. Bauzeit) in Stunden

p = Speicherkoeffizient

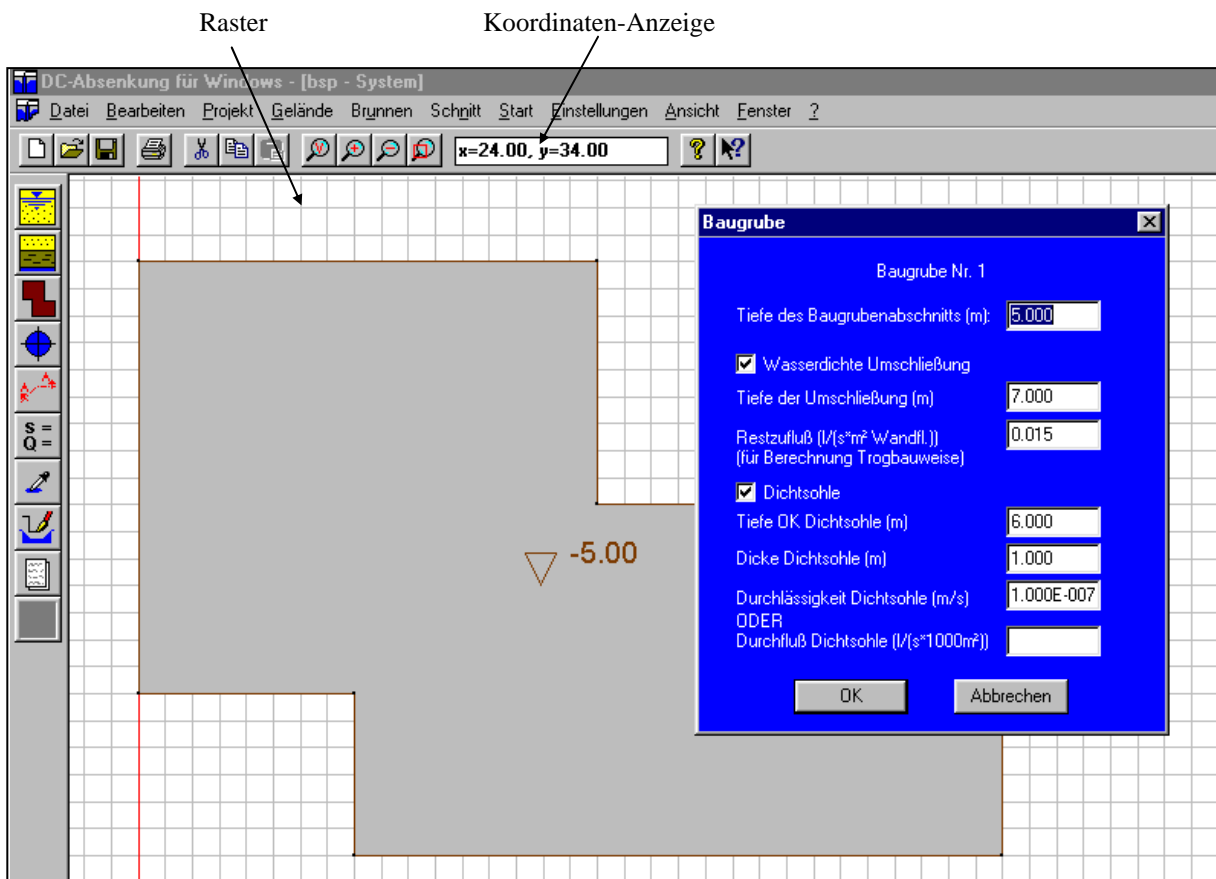
A_{RE} = Ersatzradius der Baugrube

4. Berechnung mit Hilfe graphikorientierter Software auf Windows-Basis

Anhand des Programms DC-Absenkung sollen die Möglichkeiten gezeigt werden, wie auf der Basis von Microsoft Windows (Windows 95 / 98 / NT) die Berechnung von Grundwasserabsenkungen auf einfache Art und schnell durchgeführt werden kann. Ziel ist es, mit Hilfe einer graphisch-interaktiven Benutzungsoberfläche die Bedienung des Programms so übersichtlich zu gestalten, dass der Anwender ohne großen Einarbeitungsaufwand die gewünschten Ergebnisse und Darstellungen erhält und das Programm zu einer spürbaren Arbeitserleichterung führt.

4.1 Graphisch-interaktive Oberfläche

Zu Beginn eines Projektes steht eine Arbeitsfläche zur Verfügung, in der die Baugrund- und Baugrubensituation mit Hilfe der Maus graphisch eingegeben werden kann. Der Bereich der Arbeitsfläche kann frei definiert werden, z.B. 0 - 50 m. Die Baugrube kann aus mehreren Baugrubenabschnitten bestehen, die jeweils durch beliebige Polygone dargestellt werden. Jeder Baugrubenabschnitt erhält eine Tiefe, die für jeden einzelnen Abschnitt unterschiedlich sein kann. Bei der graphischen Eingabe der Baugrubenabschnitte laufen die aktuellen Koordinaten am Bildschirm mit, so dass die Position in der Arbeitsfläche kontrolliert werden kann. Wahlweise werden die eingegebenen Punkte auf ein frei definierbares Raster gerundet, um exakte Koordinaten zu erhalten.



(Bild 2. Eingabe eines Baugruben-Abschnitts)

Der Baugrund kann in verschiedenen Schichten angegeben werden. Jede Schicht besitzt eine Dicke d und eine Durchlässigkeit k . Je nach Art der Grundwasseroberfläche (frei, gespannt, halbgespannt) wird eine oder mehrere Schichten als undurchlässig (Stauer) definiert. Für die Berechnung in Trogbauweise kann für den durch den

Einbau der Dichtsohle gestörten Boden eine andere Durchlässigkeit angegeben werden. Der Porenanteil bestimmt das Wasservolumen in der Schicht, das für das Leerpumpen der Baugrube anzusetzen ist.

Für die Berechnung (s. Kap. 4.2) ist mindestens ein Brunnen mit Tiefe und Durchmesser anzugeben. Die Brunnen können an beliebigen Stellen angeordnet werden, wahlweise über Angabe ihrer genauen Koordinaten.

Jeder Brunnen erhält

- eine Staffelnnummer, so dass - falls erforderlich - auch unterschiedliche Brunnenstaffeln berechnet werden können
- eine Endtiefe für die Bestimmung der verfügbaren Filterhöhe und der Einstufung als vollkommener oder unvollkommener Brunnen sowie
- einen Durchmesser zur Bestimmung des Fassungsvermögens.

4.2 Berechnung der Grundwasserabsenkung

Folgende Ergebniswerte werden bestimmt:

- Auf der Basis der Baugrund- und Baugrubensituation sowie der Abmessungen mindestens eines Brunnens kann die gesamte erforderliche Pumpmenge Q_0 für den Beharrungszustand und Q_{\max} einschließlich Zuschläge bestimmt werden.
Zuschläge, wie z.B. 0.5m Sicherheitsabstand unter der Baugrubensohle, können frei definiert werden.
- Für einzelne Brunnen kann das Fassungsvermögen bestimmt werden. Eine übersichtliche Tabelle der verwendeten Brunnen kann in Textform ausgegeben werden.
- Die Anzahl der erforderlichen Brunnen bestimmt sich, wie in Kap. 2.3 angegeben, aus der Pumpmenge und dem Fassungsvermögen. Die Anzahl wird bei Brunnen mit unterschiedlichen Abmessungen über das durchschnittliche Fassungsvermögen berechnet.
- Wurden bereits die Brunnen um die Baugrube angeordnet, wird die Gesamtanlage berechnet und mit den evtl. vorhandenen unterschiedlichen Brunnenabmessungen die vorhandene Pumpmenge der erforderlichen gegenübergestellt.

Berechnung

Absenkung um (m)

Tiefen angepaßt

Brunnen Nr.

Staffel Nr.

Pumpmenge: Q 0 : 140.875 l/s Q max: 154.962 l/s

Fassungsvermögen: q: 13.254 l/s

erf. Brunnenanzahl: 12

Gesamtanlage: Q erf = 154.962 l/s, Q vorh = 158.575 l/s *** Pumpmenge ausreichend ***

(Bild 3. Berechnung der Absenkung)

Die gewünschte Absenkung kann fest vorgegeben oder bei mehreren Baugrubenabschnitten unterschiedlicher Tiefe den jeweiligen Abschnittstiefen angepaßt werden. Einzelne Brunnen für das Fassungsvermögen oder die gewünschte Staffelnnummer können ausgewählt werden. Auf Wunsch können die Brunnentiefen so optimiert werden, dass die erforderliche Pumpmenge möglichst genau erreicht wird.

Je nach Angaben zur Baugrundsituation werden freies, gespanntes oder halbgespanntes Grundwasser, vollkommene oder unvollkommene Brunnen und die verschiedenen Abmessungen der Baugrubenabschnitte berücksichtigt.

Bei einer Handrechnung wird, wie in Kapitel 2.3 angegeben, für jeden Brunnen die Fördermenge mit einer angenommenen benetzten Filterhöhe bestimmt und daraus die Tiefe des Absenktrichters s_{EB} bestimmt. Anschließend muss kontrolliert werden, ob die sich ergebende benetzte Filterhöhe ausreichend ist und der Annahme entspricht.

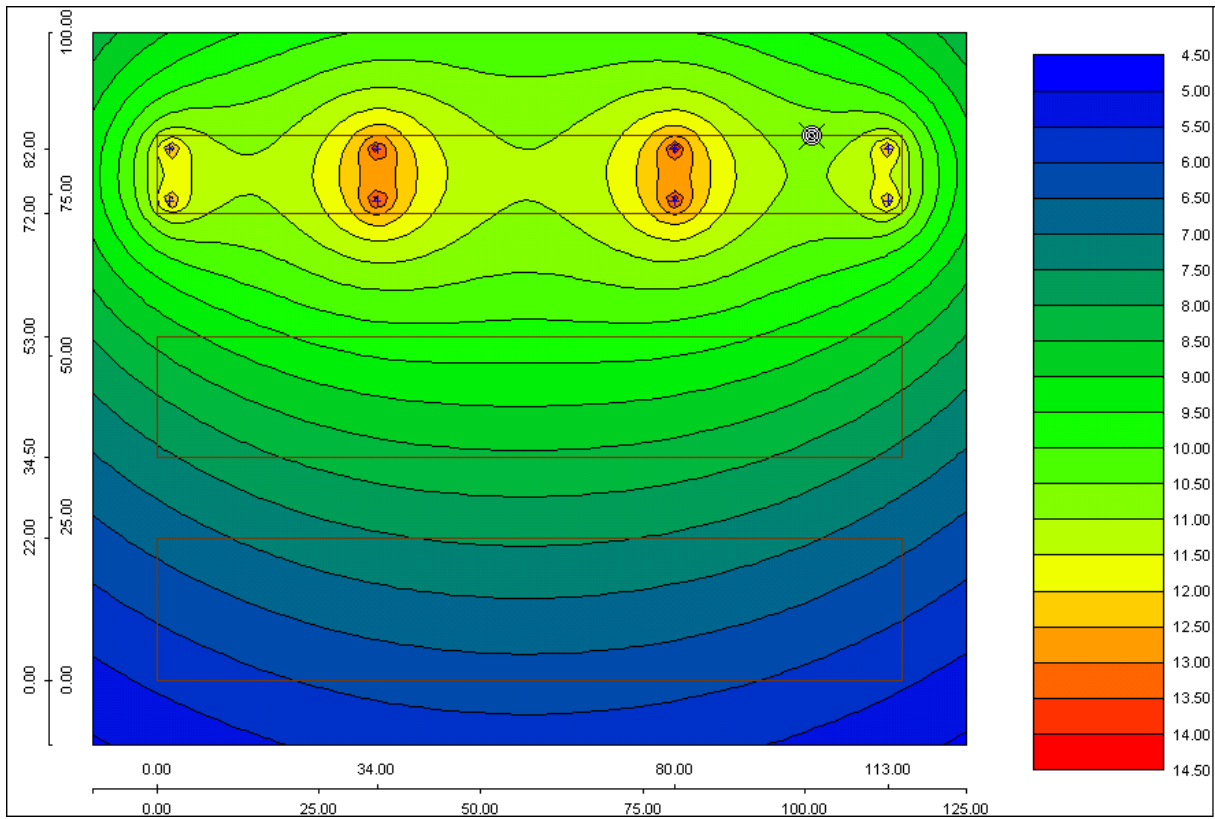
In DC-Absenkung wird ein kombiniertes Verfahren angewandt, bei dem

- zum einen über eine Iteration benetzte Filterhöhe, Fördermenge und Absenktrichter so bestimmt werden, dass sich konsistente Werte ergeben und
- zum anderen die gegenseitige Beeinflussung mehrerer Brunnen sofort über die Bestimmung ihrer Reichweite berücksichtigt wird. Damit geht der Effekt in die Berechnung ein, dass bei Ansatz von n Einzelbrunnen mit dem einzeln berechneten Fassungsvermögen q sich nicht eine Gesamtfördermenge $Q = n \cdot q$ ergibt, da bei dicht stehenden Brunnen ihre Reichweite und damit ihr Fassungsvermögen abnimmt.

4.3 Ergebnisdarstellung

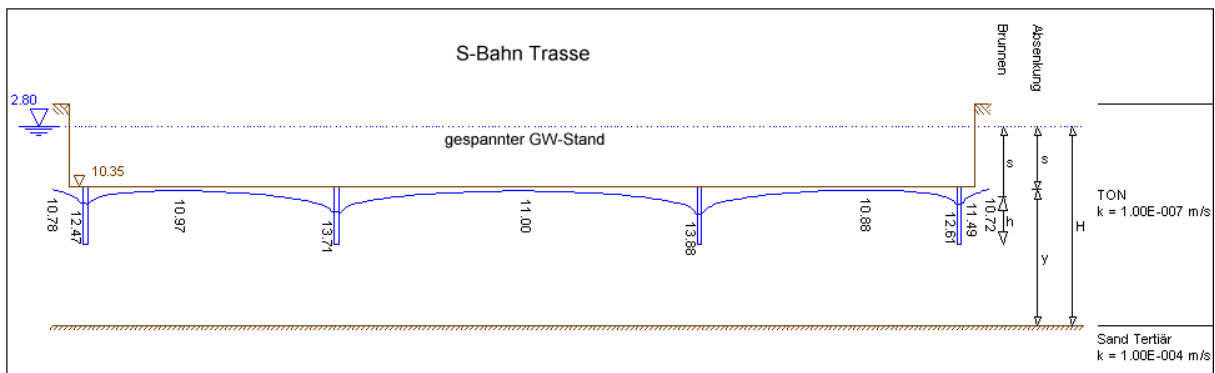
Zur Beurteilung der Grundwasserabsenkung sind verschiedene Ergebnisdarstellungen erforderlich. Deshalb stehen folgende Möglichkeiten der Ausgabe zur Verfügung:

- Listenausgabe der gegebenen Parameter (Baugrube, Brunnen, etc.) sowie der Berechnungsergebnisse, wie z.B. Fassungsvermögen der Brunnen. Die Tiefe des abgesenkten Grundwassers an den maßgebenden Punkten sowie die benetzte Filterhöhe der einzelnen Brunnen zur Bestimmung der erforderlichen Filterlänge werden angegeben.
- Darstellung des abgesenkten Grundwasserstandes über Höhenlinien oder Farbflächen. Wahlweise kann der kritische Punkt mit angegeben werden, der für die Absenkung maßgebend ist. Der Abstand der erreichten Absenkung zu der erforderlichen ist hier minimal.



(Bild 4. Darstellung des Wasserstandes mit Farbflächen am Beispiel der Erweiterung des Flughafens München MUC2 mit Verbindungstunneln)

- Darstellung der Baugruben und des Grundwasserstandes in beliebigen Schnitten durch das Gelände.



(Bild 5. Darstellung des Wasserstandes über einen Schnitt)

5. Literatur

- /1/ Herth, W.; Arndts, E.: Theorie und Praxis der Grundwasserabsenkung. Ernst & Sohn, Berlin 1994.
- /2/ Davidenkoff, R.: Angenäherte Ermittlung des Grundwasserzuflusses zu einer in einem durchlässigen Boden ausgehobenen Grube. Bundesanstalt für Wasserbau 1956, Heft 7.
- /3/ Széchy, K.: Beitrag zur Theorie der Grundwasserabsenkung. Bautechnik 36 (1959), Heft 2. Ernst & Sohn, Berlin 1959.
- /4/ Knappe, W.: Baugrubensicherung und Wasserhaltung. Verlag für Bauwesen, Berlin 1979.

Autoren: Dr.-Ing. Armin Doster und Dipl.-Ing. Axel Christmann sind Geschäftsführer der DC-Software Doster & Christmann GmbH, München.