

Nachweis einer Grundwasserabsenkung – noch ein Lehrbuchbeispiel

Man erbringt den Nachweis dafür, dass eine Grundwasserabsenkung ausreichend dimensioniert ist, indem man die Wassermenge berechnet, die für das Erreichen des Absenkziels in "ungünstigen Punkten" benötigt wird und dann überprüft, ob das Leistungsvermögen der Brunnen dafür ausreicht.

In diesem Text möchte ich zeigen, dass diese gängige Praxis nicht immer erfolgreich ist. Es kann nämlich durchaus sein, dass das Absenkziel in allen ausgewählten Punkten erreicht wird und es trotzdem Bereiche am Grubenrand gibt, in denen es verfehlt wird.

Ich verwende ein in der Literatur dargestelltes Berechnungsbeispiel¹. Solche Beispiele sind für mich aus dem einfachen Grund wichtig, weil sich daran überprüfen lässt, inwieweit die Ergebnisse mit ProAqua übereinstimmen und wie sich eventuelle Abweichungen erklären lassen.

Es handelt sich um eine L-förmige Baugrube mit zwei verschiedenen Absenktiefen; die größere Grube hat die Maße 60 m × 25 m bei einer Absenktiefe von 2,5 m. Die kleinere, anliegende Grube, hat die Maße 20 m × 15 m; die Absenktiefe beträgt 3 m. Die Tiefe des Wasserstauers ist nicht bekannt, Tiefen sind auf den Ruhewasserspiegel bezogen. Es wird ein Zuschlag von 10 % für das Leerpumpen des Absenktrichters und pauschal von 25 % für unvollkommene Brunnen angesetzt.

Oberfläche		frei
Absenktiefe	s	2,5 m / 3 m
Baugrube (rechteckig)		60 m x 40 m
Abstand Brunnen-Grube		0 m
k-Wert	k	0,001 m/s
Eintauchtiefe der Brunnen	H	6,6 m
Brunnendurchmesser	d	0,60 m

Die Koordinaten der 8 Brunnen werden mitgeteilt, so dass ein exakter Nachvollzug der Berechnung mit ProAqua möglich ist.

Exkurs: Koordinatengenau zeichnen

Während das Fadenkreuz über die Zeichenfläche geführt wird, werden in der Statusleiste die aktuellen Koordinaten eingeblendet. Häufig reicht die dadurch erreichbare Genauigkeit für eine Zeichnung aus. Wenn nicht, so gibt es mehrere Möglichkeiten, koordinatengenaue Zeichnungen anzufertigen: Wird während des Zeichnens die Eingabe-Taste gedrückt, so öffnet sich ein Dialog mit Objekt-

¹ S. Stelzig, Wasserhaltung. In: Handbuch Geotechnik. Grundlagen – Anwendungen – Praxiserfahrungen, in: Conrad Boley (Hrsg.), Springer Vieweg (eBook) 2019), 261-327. <https://link.springer.com/book/10.1007/978-3-8348-8272-1>

Daten, in dem die Koordinaten und andere Daten eingegeben werden können. Eine nachträgliche Korrektur der Koordinaten ist auf drei Weisen möglich:

- Der Dialog "Objekt-Daten" wird durch einen Rechtsklick über einem Objekt geöffnet. Sind mehrere Objekte betroffen, so erscheint zuvor noch ein Auswahldialog.
- Der Dialog "Koordinatenlisten" im Menü "Einstellungen" listet alle Objekte einer Zeichnung auf. Hier öffnet ein Doppelklick den Dialog mit Objekt-Daten. Auch eine Neueingabe ist möglich.
- Der "Eckpunkt Editor" im Menü "Einstellungen" listet die Koordinaten der Eckpunkte der Baugruben auf. Auch hier sind Neueingaben möglich.

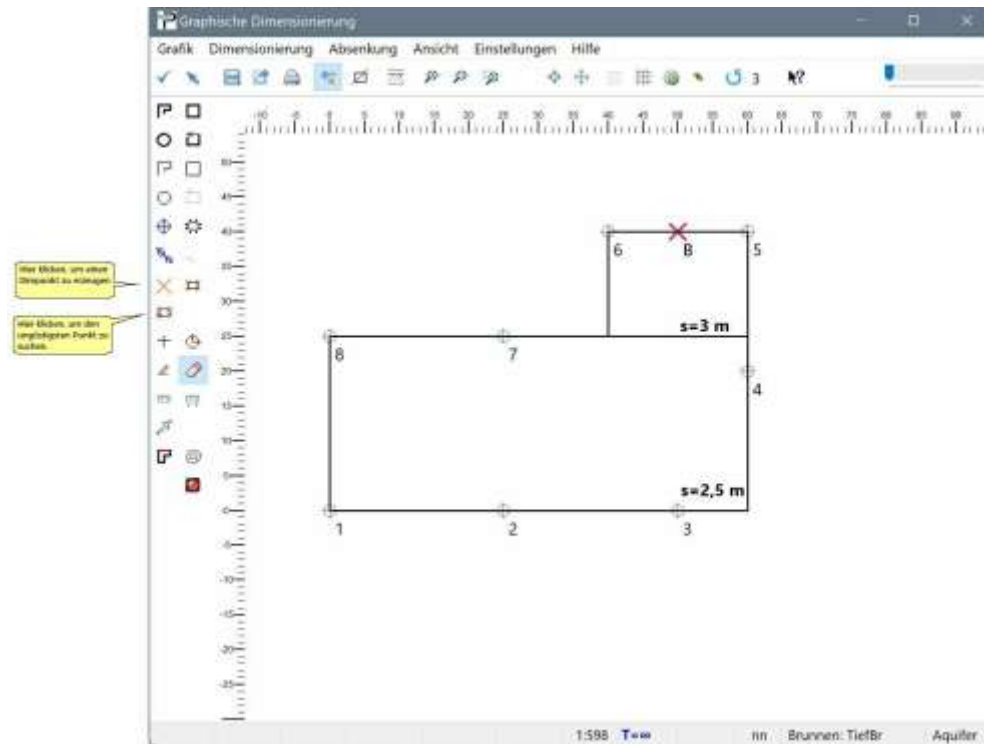


Abbildung 1

Phase 1: Ermittlung des Wasserandrangs und der benötigten Brunnenleistung

Als ungünstigster Punkt wird B(50 | 40) angenommen („dabei sollte der mittlere Abstand zu den Einzelbrunnen so groß wie möglich sein“, S. 287), dort wird ein Dimensionierungspunkt mit dem Absenkziel $s = 3 \text{ m}$ gesetzt. Daraus folgt, dass die Reichweite $R = 284,60 \text{ m}$ beträgt.

Jetzt ist der Ersatzradius A_{RE} im Punkt B zu berechnen; er ergibt sich aus den Entfernungen x_i von

B zu den Brunnen nach der Formel: $A_{RE} = e^{\frac{1}{n} \sum_{i=1}^n \ln x_i}$

Ermittlung von A_{Re} bezogen auf den gewählten Punkt B:

Brunnen Nr.	Abstand zum Punkt B (m)	lnx
1	64,03	4,16
2	47,17	3,85
3	40,00	3,69
4	22,36	3,11
5	10	2,30
6	10	2,30
7	29,15	3,37
8	52,20	3,96

Abbildung 2 (aus dem Handbuch, s.o.)

Der Mittelwert der Summe der Logarithmen beträgt $3,3425 \sim 3,343$ und damit ist $A_{Re} = 28,303... \text{ m}$.
Bei der freien Oberfläche gilt:

$$Q = \frac{\pi \cdot k \cdot (H^2 - h^2)}{\ln\left(\frac{R}{r}\right)} \quad \text{Für } r \text{ wird } A_{Re} \text{ eingesetzt:}$$

$$Q = \frac{\pi \cdot k \cdot (H^2 - h^2)}{\ln\left(\frac{R}{A_{Re}}\right)}$$

$h = H - s_{\max} = 3,6 \text{ m}$ und damit $Q_B = 0,041647... \text{ m}^3/\text{s}$. Berücksichtigt man noch die Zuschläge, so gilt: $Q_{\max B} = Q_B \cdot 1,1 \cdot 1,25 = 0,458127... \text{ m}^3/\text{s} \cdot 1,25 = 0,57265... \text{ m}^3/\text{s}^2$

Soweit die Ergebnisse der Berechnungen im Handbuch für Geotechnik. Was erhält man mit ProAqua? Durch einen Rechtsklick über B öffnet sich der in der folgenden Abbildung gezeigte Dialog mit allen relevanten Daten eines Objekts in einer ProAqua-Zeichnung. Klickt man auf das Symbol neben dem Feld mit dem Ersatzradius, so erscheint eine Tabelle der Entfernungen von B zu den Brunnen, mit der die Berechnung von A_{Re} nachvollzogen werden kann. Die betreffenden Strecken werden in der Grafik dargestellt.

² Stelzig berechnet $Q_{\max B}$ so: $Q_{\max B} = Q \cdot 1,1 \cdot 1,25$. Zur Problematik dieses Vorgehens gibt es einen Text auf der Homepage: [Wie werden Zuschläge kumuliert?](#)

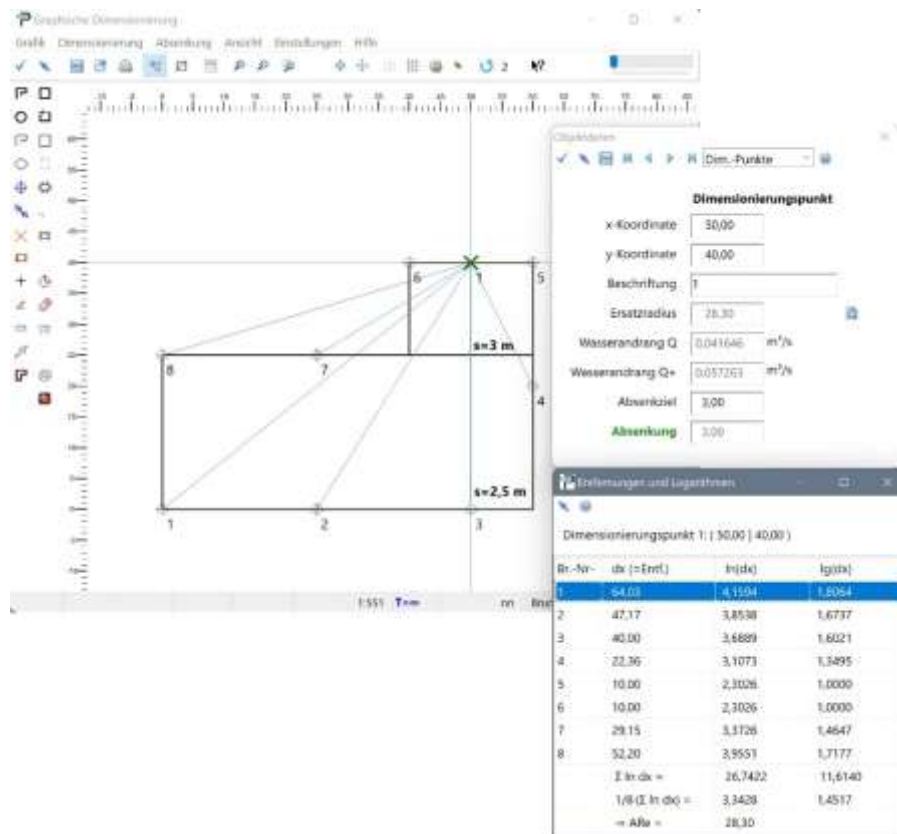


Abbildung 3

Hier eine Zusammenstellung der Ergebnisse, die eine nahezu vollständige Übereinstimmung zeigt:

		Beispiel	ProAqua
Reichweite	R	284,60 m	284,60 m
Ersatzradius in B	A_{Re}	28,30 m	28,30 m
Wasserandrang in B ohne Zuschläge	Q_B	-	0,041646 m³/s
... mit einem Zuschlag von 10 % (Leerpumpen des Absenktrichters)	Q_{z1}^+	0,046 m³/s	0,045811 m³/s
... mit einem Zuschlag von 25 % (unvollkommene Brunnen)	$Q_{max B}$	0,057 m³/s	0,057263 m³/s
Zahl der Brunnen	n	8	8
Erforderliche Brunnenleistung	q_{Br}	0,0071 m³/s	0,007158 m³/s

Phase 2: Reicht das Fassungsvermögen der Brunnen aus?

Die erste Phase der Dimensionierung ist mit der Bestimmung des Wasserandrangs in B und der erforderlichen Brunnenleistung abgeschlossen. Nun gilt es nachzuweisen, dass die Wassermenge auch gefördert werden kann; dazu wird die Brunnenergiebigkeit berechnet.

$$\text{Es gilt: } s_{EB} = h - \sqrt{h^2 - \frac{1,5 \cdot q \cdot \ln\left(\frac{b}{r}\right)}{\pi \cdot k}}$$

Bei B ist der Brunnenabstand gleich 20 m, für q wird Q_{z1} gesetzt; damit folgt für $s_{EB} = 1,76$ m. Die Höhe der benetzten Filterfläche h' berechnet sich dann zu:

$$h' = H - s_{\max} - s_{EB} = 6,60 \text{ m} - 3 \text{ m} - 1,76 \text{ m} = 1,84 \text{ m} \Rightarrow q_{\text{mögl}} = 0,0073 \text{ m}^3/\text{s}$$

In ProAqua gibt es zwei Wege, um diese Rechnung nachzuvollziehen; ich werde beide zeigen.

Weg 1: Nachweis in der Vordimensionierung

Wir öffnen die Vordimensionierung und überschreiben die berechneten Werte durch eine Eingabe. Ein Rechtsklick öffnet das Kontextmenü, in dem sich die Befehle zur Eingabe eigentlich berechneter Werte befinden. Wir ersetzen:

- den Wert für A_{Re} durch den für B gültigen Wert ($A_{Re} = 28,30$ m)
- den Wert für den mittleren Brunnenabstand durch den für die Umgebung von B angenommen Abstand ($d = 20$ m)
- den Wasserandrang Q durch den für B ermittelten Wert ($Q = 0,057263$ m³/s).

ProAqua markiert diese Ersetzungen durch das Label „Eingabe“ vor dem jeweiligen Eingabefeld. Durch die Auswahl von „Wasserandrang berechnen“ (entsprechend für die anderen Größen) ist eine Rückkehr zu den berechneten Werten möglich.

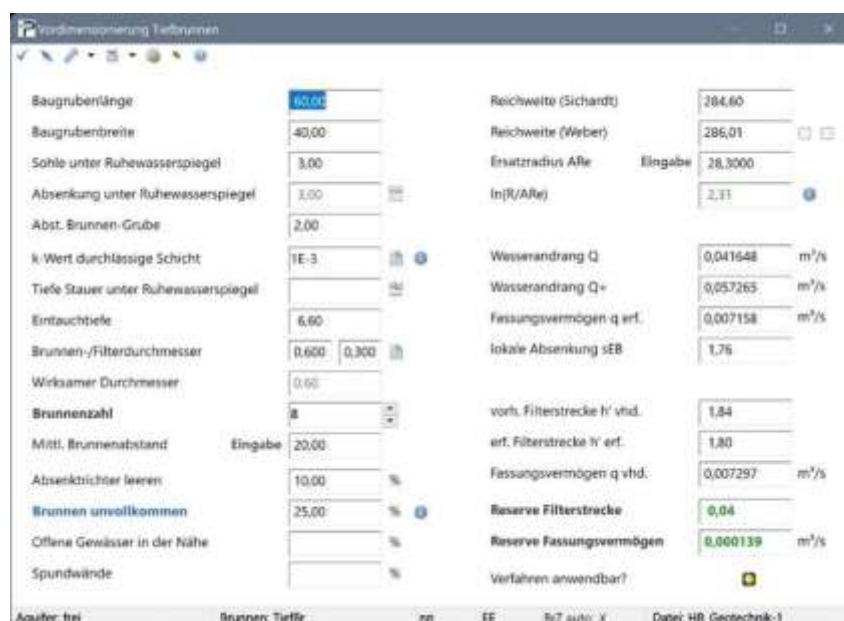


Abbildung 4

Als Ergebnis liest man ab:

		Beispiel	ProAqua
Lokale Absenkung	s_{EB}	1,76 m	1,76 m
Benetzte Filterfläche	h'	1,84 m	1,84 m
Leistungsvermögen der Brunnen	$q_{mögl}$	0,0073 m³/s	0,007297 m³/s

Da $q_{mögl} > q_{Br}$, wenn der Unterschied auch minimal ist, gilt der Nachweis erbracht, dass die Absenkung mit 8 Brunnen erfolgreich durchgeführt werden kann.

Weg 2: Nachweis in der Grafik

Der gleiche Nachweis kann auch direkt in der Grafik geführt werden. Im Menü Dimensionierung gibt es seit ProAqua 4.0 (15.09.22) den Menüpunkt „sEB und Brunnenleistung“. Es öffnet sich ein Dialog, in dem die in der Grafik mit der Mehrbrunnenformel ermittelten Werte schon eingetragen sind – abhängig von der Wahl, die in der Dimensionierung getroffen wurde.

Parameter	Value	Unit
Wasserandrang incl. Zuschläge	Q' 1: 0,007263	m³/s
Wasserandrang ohne Zusch. unvik.	Q' 2: 0,045811	
mittlerer Brunnenabstand	2+b: 20,00	
lokale Absenkung	sEB: 1,7635	
H - s - sEB	h': 1,84	
Erforderliche Brunnenleistung (Q'/n)	q erf: 0,007158	
Vorhandene Brunnenleistung	q vhd: 0,007298	

Abbildung 5

Fazit

Die Übereinstimmung der Berechnungen ist sehr gut. Systematische Abweichungen ergeben sich z. B. dadurch, dass in vielen in der Literatur zu findenden Beispielen Werte auf zwei Stellen gerundet werden und mit diesen gerundeten Werten weiter gerechnet wird, während ein Computerprogramm in der Regel nur für die Anzeige rundet, aber intern mit allen verfügbaren Stellen rechnet.

Phase 3: Nachweis in weiteren Punkten und Erstellung der „Wasserkarte“

Damit ist die zweite Phase der Dimensionierung abgeschlossen. Üblicherweise schließt sich in einer dritten Phase die Überprüfung in weiteren Punkten an. Im Beispiel wird die Absenkung im Punkt P1(40 | 25) nachgerechnet.

Als lokaler Ersatzradius wird $A_{Re} = 25,28$ m mitgeteilt, ProAqua berechnet $A_{Re} = 25,37$ m. Damit lässt sich die Absenkung in P1 berechnen, der Autor gibt an: $s_P = 3,21$ m. Trotz der kleinen Abweichung bei A_{Re} , auch hier stimmt die berechnete Absenkung genau überein.

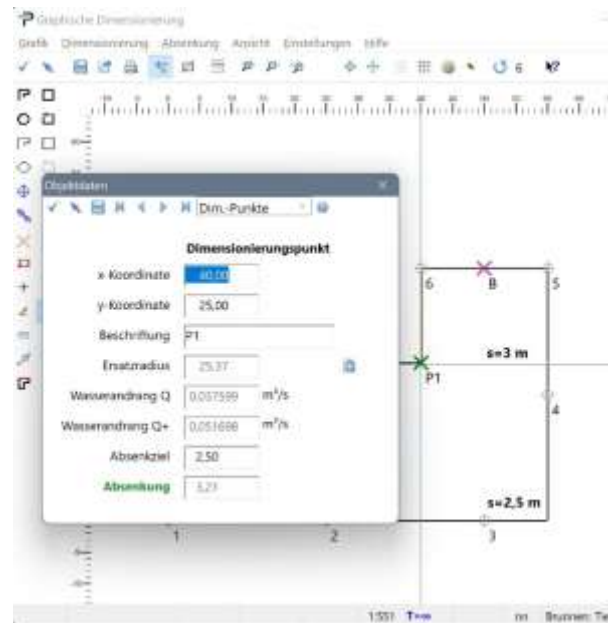


Abbildung 6

Die Karte der Isolinien der Wasserstände kann durch einen Klick auf das Symbol angezeigt werden – konfiguriert wird die Karte im Dialog „Dimensionierung“.

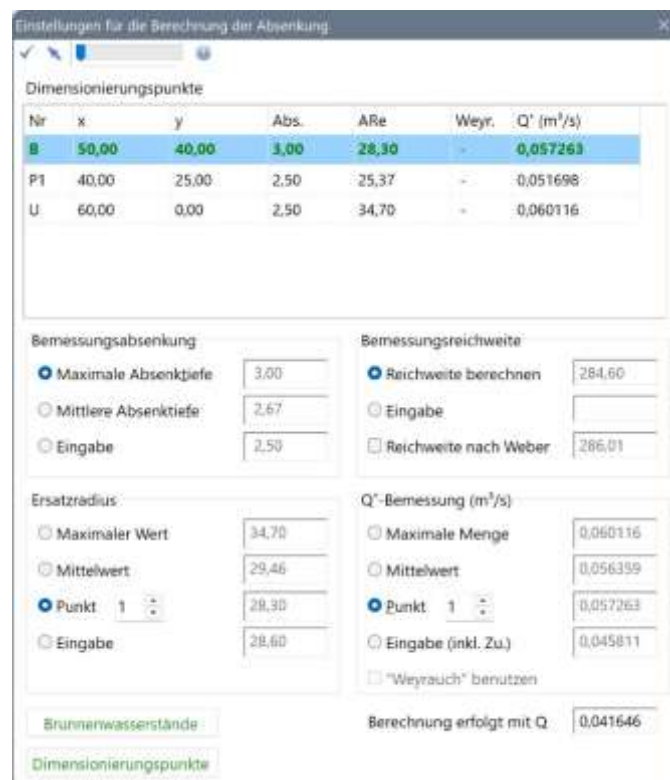


Abbildung 7

Dieser Dialog ist vor allem wichtig, wenn es verschiedene Absenktiefen gibt. In der Regel wird man mehrere Dimensionierungspunkte setzen und die Maximalwerte wählen. Um das Beispiel nachzuvollziehen, müssen jedoch der Wasserandrang in B und der Ersatzradius in B für die Berechnung zugrunde gelegt werden.

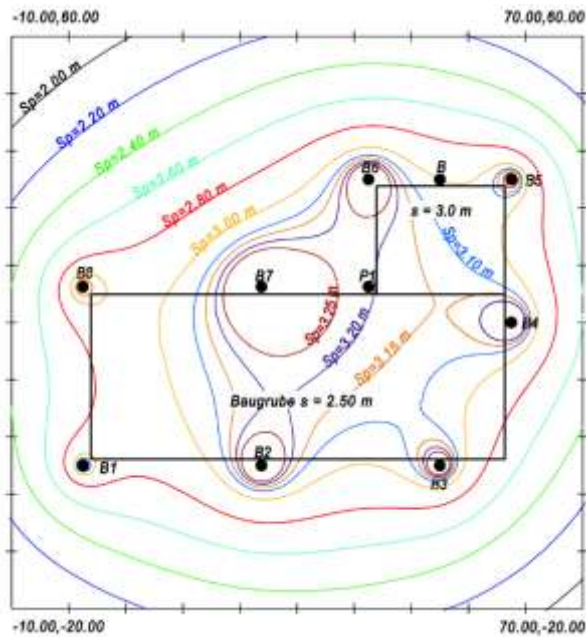


Abbildung 8 (Handbuch Geotechnik)

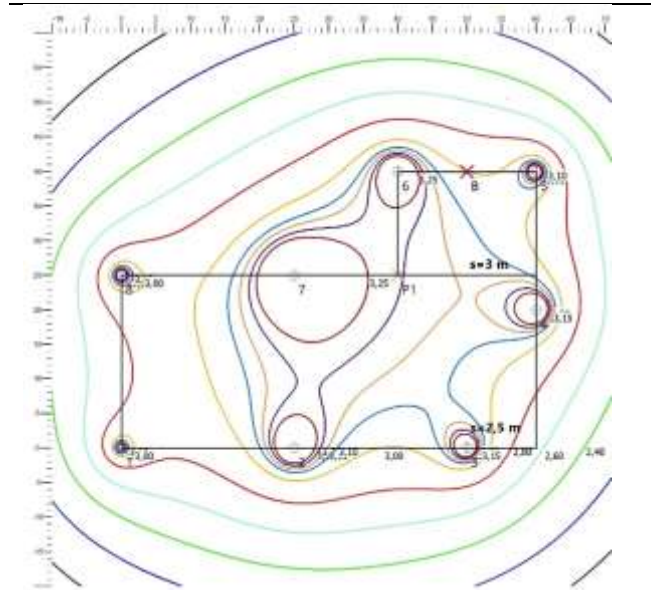


Abbildung 9 (ProAqua)

Probleme? Probleme!

Die Absenkung wurde in P1 überprüft, das Absenkziel wird erreicht, also ist alles gut?

Schaut man sich die Wasserkarte etwas genauer an, so fällt auf, dass die 3 m-Linie (das ist die Linie, die durch B verläuft) die Baugrube schneidet. Eine Ausschnittsvergrößerung zeigt das deutlicher:

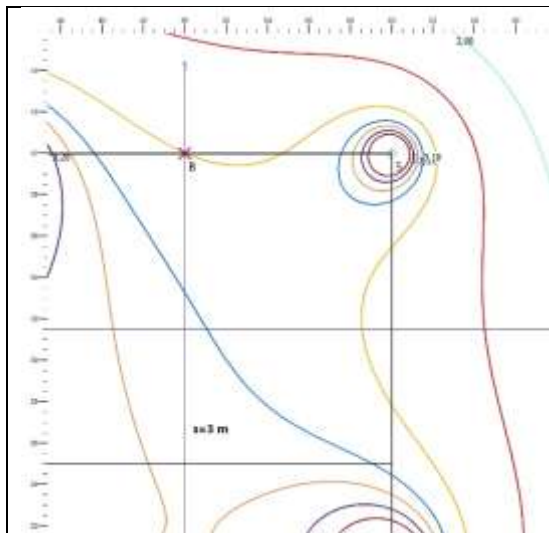


Abbildung 10

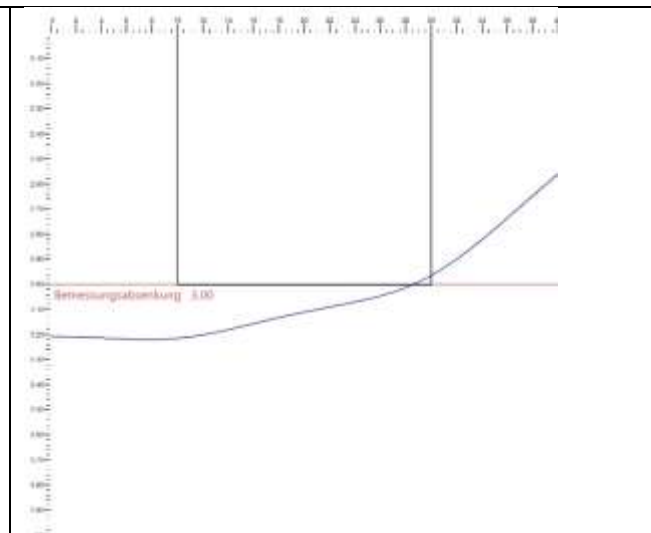


Abbildung 11

Eine Schnittlinie durch B zeigt, dass der Wasserstand geringfügig über der Baugrubensohle liegt. Seit ProAqua 4.0 kann man die Absenkung auf dem Grubenrand untersuchen. Dazu klickt man auf das Symbol, das einen Grubenriss mit einer roten Linie zeigt (es befindet sich in der linken Spalte der Werkzeugpalette und ist in der folgenden Abbildung blau hinterlegt).

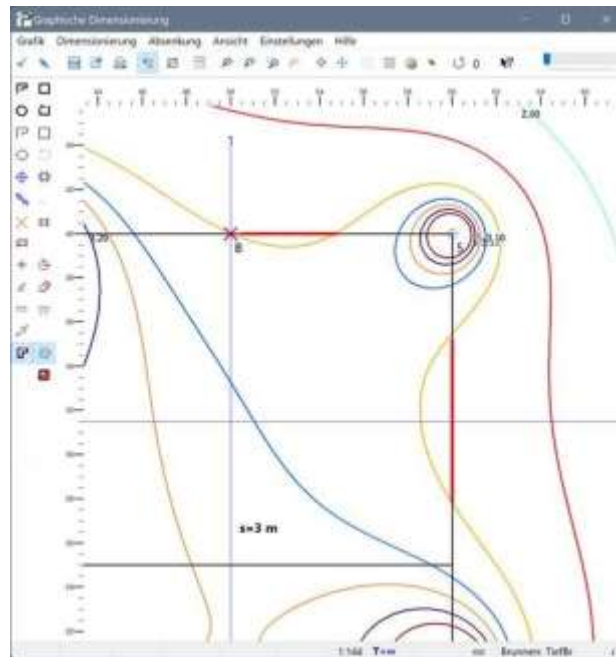


Abbildung 12

In den hier rot markierten Bereichen wird das Absenkziel auf dem Grubenrand **nicht** erreicht. Beachten Sie die rote Ampel in der Grafik (sie ist auch schon in Abbildung 1 zu sehen); sie weist auf Probleme bei der Berechnung der Absenkung hin. Klickt man darauf, so erscheint ein Dialog, der die Ergebnisse zusammenfasst.



Abbildung 13

Wie kommt es zur Unterdimensionierung?

Zur Unterdimensionierung kann es kommen, wenn der Wasserandrang zu klein ist – weil B nicht der wirklich ungünstigste Punkt ist – oder weil die Brunnen das erforderliche Wasser nicht fassen können.

ProAqua kann den ungünstigsten Punkt auf dem Grubenrand (auch von inneren Gruben) suchen. Dazu ist auf das Symbol unter dem für einen Dimensionierungspunkt (vgl. Abbildung 1) zu klicken. Bei der Suche wird die Tiefe der jeweiligen Linie beachtet.

Es zeigt sich: Der ungünstigste Punkt ist nicht B, sondern U(60 | 40) auf der Ecke unten rechts; sein Ersatzradius A_{Re} ist mit 34,7 m deutlich größer als der im Punkt B. Wählt man seinen Wasserandrang Q_U als Bemessungswassermenge, dann gelingt die Absenkung doch noch – und die Ampel ist jetzt grün.

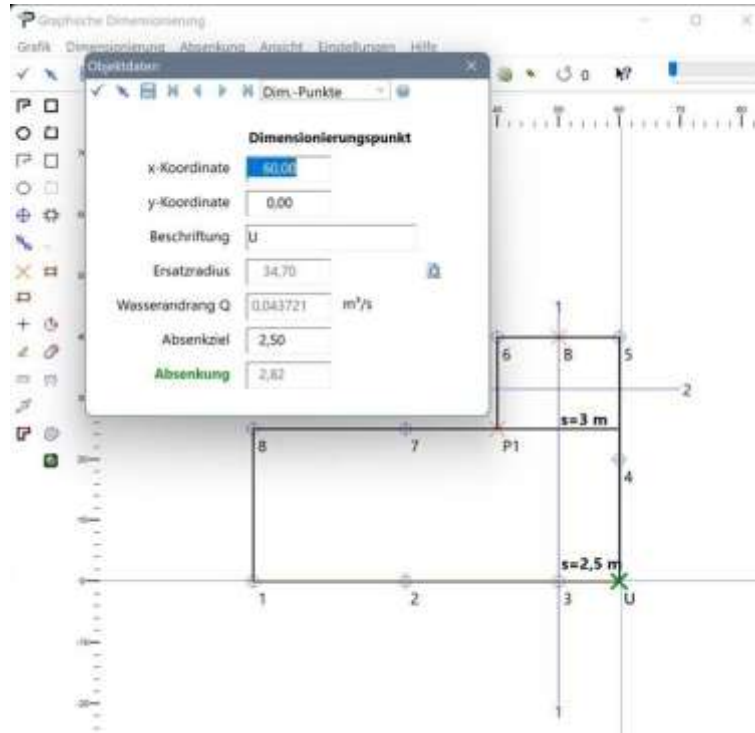


Abbildung 14

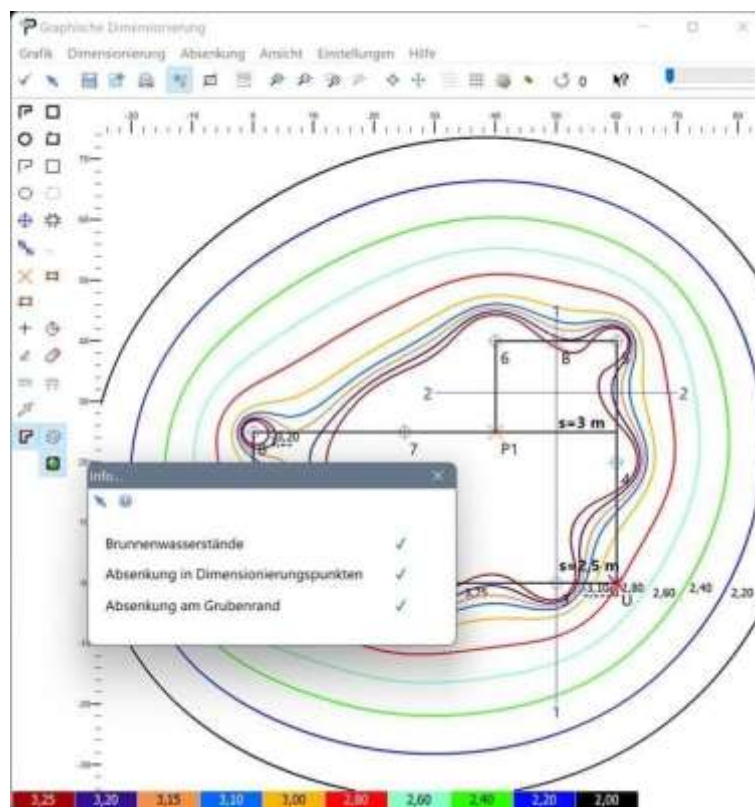


Abbildung 15

Fazit

Es reicht nicht aus, einen „ungünstigen Punkt“ nach Augenmaß festzulegen und damit eine Grundwasserabsenkung zu dimensionieren. Auch wenn man auf jeden Eckpunkt der Baugrube einen Dimensionierungspunkt setzt, kann es sein, dass der wirklich ungünstigste Punkt nicht erfasst wird³. In jedem Fall sollte dieser Punkt mit der entsprechenden Funktion in ProAqua gesucht werden. In unserem Beispiel wird das Absenkziel nur um Zentimeter verfehlt. In anderen Fällen können die Abweichungen so groß sein, dass man sie nicht tolerieren wird.

Ein Nachtrag

Nach Herth/Arndts⁴ darf bei der Berechnung der Isolinien und bei der Berechnung von s_{EB} ein Zuschlag für unvollkommene Brunnen **nicht** angesetzt werden, "da die Zuströmung von unten keinen Einfluß auf die Krümmung der Absenkkurve hat" (S. 83; vgl. S. 217). Stelzig beachtet dies (vgl. S. 289) und setzt bei der Berechnung von s_{EB} und der Absenkung in P1 den Zuschlag von 25 % für unvollkommene Brunnen nicht an.

In den Versionen bis einschließlich 4.3 von ProAqua wurden die Isolinien grundsätzlich ohne Zu- oder Abschlüge berechnet; auch ein Zuschlag von 10 % für das Leerpumpen des Absenktrichters wurde nicht angesetzt. Wie die sehr gute Übereinstimmung der "Wasserkarten" zeigt, wurde auch die im Handbuch abgedruckte Version ohne Einbeziehung der Zuschläge berechnet. Ein Verdacht stellt sich ein: Könnte es sein, dass ProAqua von mir mit sich selbst verglichen wurde?

³ Das gleiche Problem führte auch in einem Beispiel nach Knaupe zur Unterdimensionierung. Dargestellt ist das in: „Grundwasserabsenkung - Ein Lehrbuchbeispiel“.

⁴ Herth, W., Arndts, E., Theorie und Praxis der Grundwasserabsenkung, 3. Aufl. Ernst & Sohn, Berlin 1994



Isolinien mit Einbeziehung eines Zuschlags von 10% berechnet.