

Hochschule für Angewandte Wissenschaften Hamburg  
Fakultät Life Sciences

# **Energiewirtschaftliches Optimierungspotential eines Brunnenfeldes unter Berücksichtigung der Brunnenalterung am Beispiel des Wasserwerkes Boursberg**

Bachelorarbeit

im Studiengang Umwelttechnik

**Marc Lüdtke**

**Matrikelnummer: 1949129**

Hamburg, Juni 2012

erster Gutachter:

**Prof. Dr. Armin Gregorzewski**

HAW Hamburg  
Campus Bergedorf  
Fakultät Life Sciences  
Lohbrügger Kirchstraße 65  
21033 Hamburg

zweiter Gutachter:

**Dipl. Ing. Lars Kosyna**

CONSULAQUA Hamburg  
Beratungsgesellschaft mbH  
Ausschläger Elbdeich 2  
20539 Hamburg

# Inhaltsverzeichnis

Tabellenverzeichnis.....	4
Abbildungsverzeichnis.....	5
<b>1. Einleitung.....</b>	<b>6</b>
1.1 Aufgabenstellung und Zielsetzung.....	6
<b>2. Grundlagen.....</b>	<b>7</b>
2.1 Grundwasser.....	7
2.2 Brunnentechnik.....	8
2.3 Unterwassermotorpumpen.....	9
2.3.1 Bestandteile und Aufbau.....	9
2.3.2 Förderleistung.....	10
2.3.3 Pumpenkennlinie.....	10
2.3.4 Leistungsbedarf und Wirkungsgrad.....	12
2.4 Rohrnetz und Anlagenkennlinie.....	13
2.4.1 Betriebspunkt.....	16
2.5 Brunnenalterung.....	17
2.5.1 Ursachen der Brunnenalterung.....	19
2.5.2 Brunnenregenerierung.....	21
<b>3. Ist-Zustand Wasserwerk Boursberg.....</b>	<b>23</b>
3.1 Datengrundlage.....	25
3.2 Rohrnetzhydraulik.....	26
3.3 Ist-Zustand der Wasserförderung des Wasserwerkes Boursberg.....	29
3.3.1 Ist-Zustand Brunnen 10.....	31
3.3.2 Ist-Zustand Brunnen 20.....	33
3.3.3 Zusammenfassung Ist-Zustand.....	34
3.4 Fazit Ist-Zustand.....	37
<b>4. Szenarien für ein zukünftiges Förderkonzept.....</b>	<b>39</b>

4.1	Vorgehensweise und Zielsetzung.....	39
4.2	Szenario 1: Weiterführung des Ist-Zustandes .....	41
4.2.1	Brunnen 10 .....	41
4.2.2	Brunnen 15 .....	44
4.2.3	Brunnen 20 .....	46
4.2.4	Brunnen 16 .....	48
4.2.5	Szenario 1, Zusammenfassung .....	48
4.3	Szenario 2: Variation der Pumpenzyklen.....	53
4.3.1	Szenario 2, Einsparpotential der einzelnen Brunnen.....	53
4.3.2	Szenario 2.1, Einsparpotential der gesamten Brunnenfassung.....	59
4.4	Szenario 3, Optimierung durch Frequenzumrichter .....	60
4.5	Szenarienvergleich .....	64
<b>5.</b>	<b>Optimierungsvorschläge.....</b>	<b>66</b>
5.1	Generelle Handlungsempfehlungen .....	67
<b>6.</b>	<b>Diskussion und Bewertung der Ergebnisse.....</b>	<b>70</b>
<b>7.</b>	<b>Zusammenfassung.....</b>	<b>71</b>
<b>Anhang</b>	<b>.....</b>	<b>75</b>

## **Tabellenverzeichnis**

<i>Tabelle 1: Entnahmesituation des WW Boursberg im Februar 2012 .....</i>	<i>29</i>
<i>Tabelle 2: Verlusthöhen der einzelnen Brunnen, Fördersituation ähnlich Februar 2012, berechnet mit EPAnet .....</i>	<i>30</i>
<i>Tabelle 3: spezifische Ergiebigkeit, Wirkungsgrade und Förderkosten aller Brunnen .....</i>	<i>35</i>
<i>Tabelle 4: Szenario1, 10-Jahres-Prognose Brunnen 10 .....</i>	<i>42</i>
<i>Tabelle 5: Szenario 1, Jahreskosten Brunnen 10 .....</i>	<i>43</i>
<i>Tabelle 6: Szenario1, 10-Jahres-Prognose Brunnen 15 mit Pumpenwechsel im 2. Jahr .....</i>	<i>45</i>
<i>Tabelle 7: Szenario 1, Jahreskosten Brunnen 15 .....</i>	<i>46</i>
<i>Tabelle 8: Szenario1, 10-Jahres-Prognose Brunnen 20 .....</i>	<i>47</i>
<i>Tabelle 9: Szenario 1, Jahreskosten Brunnen 20 .....</i>	<i>47</i>
<i>Tabelle 10: Zusammenfassung Szenario 1: <math>k_w</math> und <math>k_s</math> gemittelt, Fördermenge und Kosten über 10 Jahre.....</i>	<i>48</i>
<i>Tabelle 11: Szenario 2, verschiedene Pumpenaustauschintervalle Brunnen 19.....</i>	<i>54</i>
<i>Tabelle 12: Szenario 2, verschiedene Pumpenaustauschintervalle Brunnen 17.....</i>	<i>55</i>
<i>Tabelle 13: Szenario 2, <math>k_w</math> und <math>k_s</math> gemittelt, Fördermenge und Kosten über 10 Jahre.....</i>	<i>56</i>
<i>Tabelle 14: Szenario 3, Zusammenfassung .....</i>	<i>61</i>
<i>Tabelle 15: Szenarienvergleich (inklusive Spitzenlastzeiten) .....</i>	<i>64</i>

## Abbildungsverzeichnis

<i>Abbildung 1: Querschnitt eines Bohrbrunnens (Bayrisches Landesamt für Umwelt)</i> .....	8
<i>Abbildung 2: Unterwassermotorpumpe (Pleuger)</i> .....	9
<i>Abbildung 3: Pumpenkennliniendiagramm</i> .....	10
<i>Abbildung 4: Änderung der Pumpenkennlinie durch Einsatz eines Frequenzumrichters (Herborner Pumpentechnik, 2012)</i> .....	11
<i>Abbildung 5: Lage der Wasserspiegel und Förderhöhen einer U-Pumpe (Ostermann, 1991)</i> .....	13
<i>Abbildung 6: Schnittpunkt der Pumpen- und Anlagenkennlinie (Betriebspunkt B), vgl.: (edur)</i> .....	17
<i>Abbildung 7: Betriebswasserspiegel eines ungespannten Grundwasserleiters (hgt-geotech)</i> .....	17
<i>Abbildung 8: Auswertung eines Pumpversuches, Brunnen 20, 09/2008</i> .....	18
<i>Abbildung 9: Wasserwerk Boursberg (HW)</i> .....	23
<i>Abbildung 10: Anlagenschema des Wasserwerkes Boursberg (HAMBURG WASSER, 2012)</i> .....	24
<i>Abbildung 11: Skizze der Grundwasserfassung des Wasserwerkes Boursberg</i> .....	24
<i>Abbildung 12: EPAnet Rohrnetzmodell, Entnahmesituation Februar 2012</i> .....	28
<i>Abbildung 13: Fördermengen, Absenkungen und spezifische Ergiebigkeit von Brunnen 10</i> .....	31
<i>Abbildung 14: Fördermengen, Absenkungen und spezifische Ergiebigkeit von Brunnen 20</i> .....	34
<i>Abbildung 15: spezifische Ergiebigkeiten der Brunnen 12, 15, 17, 23, 26</i> .....	36
<i>Abbildung 16: spezifische Ergiebigkeiten der Brunnen 16 und 19</i> .....	36
<i>Abbildung 17: Szenario1, 10-Jahres-Prognose Brunnen 10 ohne Pumpenwechsel</i> .....	43
<i>Abbildung 18: Szenario1, 10-Jahres-Prognose Brunnen 15</i> .....	45
<i>Abbildung 19: Szenario 1, neue Pumpe Brunnen 15</i> .....	46
<i>Abbildung 20: Szenario1, 10-Jahres-Prognose Brunnen 20</i> .....	47
<i>Abbildung 21: Zusammenfassung Szenario 1, mittlere kWh/m<sup>3</sup> und mittlere Fördermengen</i> .....	49
<i>Abbildung 22: Szenario 1, mittlere stündliche Fördermengen</i> .....	51
<i>Abbildung 23: Zusammenfassung Szenario 2, mittlere kWh/m<sup>3</sup> und mittlere Fördermengen</i> .....	56
<i>Abbildung 24: Szenario1 und 2, Vergleich von Stromverbräuchen</i> .....	57
<i>Abbildung 25: Szenario 2, mittlere stündliche Fördermengen</i> .....	58
<i>Abbildung 26: Gesamtbetrachtung, Br. 17 statt Br. 26, mittlere stündliche Fördermengen</i> .....	59
<i>Abbildung 27: Zusammenfassung Szenario 3, mittlere kWh/m<sup>3</sup> und mittlere Fördermengen</i> .....	62
<i>Abbildung 28: Szenario 3, mittlere stündliche Fördermengen</i> .....	63
<i>Abbildung 29: Vergleich der mittleren stündlichen Fördermengen bei Normallast, Szenario 1-3</i> .	65
<i>Abbildung 30: Szenarienvergleich, Stromverbräuche</i> .....	65

## **1. Einleitung**

„» Jeden Tag nutzt der Durchschnittsdeutsche 130 Liter Wasser, die Zahl ist rückläufig und liegt unter dem Weltdurchschnitt. Sie weiter zu senken ist ökologisch nicht besonders sinnvoll. Im regenreichen Deutschland Wasser zu sparen ist Unsinn«, sagt der Ingenieur und Umweltforscher Hans-Jürgen Leist von der Uni Hannover.“ (Zeit.de, 2012).

Was jedoch immer kostbarer wird ist Energie in Form von Strom und Wärme. In Zeiten der globalen Rohstoffknappheit und der daraus resultierenden steigenden Energiepreise besteht sowohl ökonomisch, als auch ökologisch die Notwendigkeit den globalen Energieverbrauch zu reduzieren. Die ständige Bereitstellung von Trinkwasser beansprucht eine große Menge an elektrischer Energie und es wird daher immer wichtiger die Rohwasserförderung und Trinkwasseraufbereitung so energieeffizient wie möglich zu gestalten. Aus diesen Gründen arbeitet auch HAMBURG WASSER seit mehreren Jahren an einer Optimierung der Energieeffizienz seiner Wasserwerke.

### **1.1 Aufgabenstellung und Zielsetzung**

HAMBURG WASSER (HW) besitzt und betreibt 17 Wasserwerke im Bundesland Hamburg und seiner unmittelbaren Umgebung. Im 1960 grundsanitierten Wasserwerk Bursberg im Stadtteil Blankenese wird Grundwasser mittels Unterwassermotorpumpen aus derzeit zehn Brunnen in die Filtrationsanlagen des Werkes gefördert. Viele der Brunnen und verwendeten Pumpen weisen starke Alterungserscheinungen auf. Hierdurch resultieren unwirtschaftliche Betriebszustände und hohe Energiekosten, sowie eine Verringerung der geförderten Rohwassermenge. Ziel der Arbeit ist es ein optimiertes Förderkonzept im Bereich der Grundwasserförderung im Wasserwerk Bursberg zu erstellen, um den Betrieb den zukünftigen Anforderungen anzupassen und energieeffizienter zu gestalten.

Zum Verständnis des komplexen Systems Brunnen, Unterwassermotorpumpe und Rohwassernetz werden zunächst die Grundlagen erklärt, welche für das weitere Verständnis notwendig sind. Anschließend werden der aktuelle Betriebszustand der Rohwasserförderung des Wasserwerkes Bursberg und sein jetziges Betriebskonzept anhand vorliegender Daten sowie einer hydraulischen Simulation des Rohrnetzes analysiert und bewertet. Basierend darauf werden die Brunnenzustände für einen Zeitraum von wenigen Jahren prognostiziert und verschiedene Betriebsszenarien entwickelt, die Empfehlungen zu Neuinvestitionen und veränderten Brunnenbetrieben beinhalten. Unter Berücksichtigung von Alterungserscheinungen, sowie Investitions-, Zins- und Energiekosten wird die potentielle Kosteneinsparung ermittelt und mit dem jetzigen Betriebskonzept verglichen. Alle zu Grunde liegenden Daten wurden vom Wasserwerk oder einer entsprechenden Abteilung von HAMBURG WASSER zu Verfügung gestellt.

## 2. Grundlagen

Allgemein kann in der Trinkwassergewinnung zwischen unterirdischem Wasser (Grund- und Quellwasser), Oberflächenwasser (Fluss-, See-, Talsperren-, Meerwasser, etc.) und Niederschlagswasser unterschieden werden. In der Bundesrepublik Deutschland macht das Grundwasser mit 65% den größten Anteil an der Trinkwasserversorgung aus (Merkl, 2008). Die Trinkwassergewinnung aus Grundwasser erfolgt durch verschiedene Brunnentechiken. Im folgenden Kapitel werden daher die Grundlagen beschrieben, welche für den weiteren Verlauf der Arbeit von Bedeutung sind.

### 2.1 Grundwasser

Grundwasser entsteht vor allem aus Niederschlagswasser, das in den Boden versickert und aus Wasser, das aus oberirdischen Gewässern in den Untergrund gelangt. Voraussetzung für eine nachhaltige Grundwasserförderung ist ein geeigneter Grundwasserleiter, auch Aquifer genannt. Ein Aquifer ist ein Gesteinskörper mit Hohlräumen zur Möglichkeit der Wasserführung, der je nach Zusammensetzung unterschiedliche Porositäten aufweisen kann, aus denen wiederum unterschiedliche Fließgeschwindigkeiten des Grundwassers resultieren. Ein Maß für die maximale Fließgeschwindigkeit des Grundwassers im Aquifer sind der Gefällegradient sowie der Durchlässigkeitsbeiwert  $k_f$  [m/s]. Der  $k_f$ -Wert reicht von  $10^{-6}$  m/s bei schluffigen Feinsanden bis zu 4 oder  $5 \cdot 10^{-3}$  m/s bei groben Kies- oder Geröllvorkommen. Weist ein Grundwasserleiter eine sehr geringe Durchlässigkeit auf kann dies unter Umständen der limitierende Faktor für die zu fördernde Wassermenge sein, da nicht genug Wasser vom umliegenden Gestein zur Förderstelle nachfließen kann (Merkl, 2008). Es wird außerdem zwischen gespannten und ungespannten Grundwasserleitern unterschieden. Bei gespannten Grundwasserleitern steht das Wasser in der Gesteinsschicht unter Druck, weil ihm die Ausdehnungsmöglichkeit in horizontaler Richtung genommen wird, z.B. durch eine nicht wasserleitende Gesteinsschicht. Im Brunnen hat dies ohne Förderung einen Wasserpegel zur Folge, der höher als der umliegende Grundwasserstand liegt. Das Wasser in ungespannten Grundwasserleitern hingegen steht nicht unter Druck.

## 2.2 Brunnentechnik

Bei der Grundwasserförderung wird zwischen horizontalen und vertikalen Brunnen unterschieden. Die Bezeichnung bezieht sich hierbei auf die geometrische Ausrichtung des Filterrohres. Horizontalbrunnen dienen dazu flach liegende Grundwasservorkommen zu erschließen, vertikale Brunnen hingegen können Grundwasserleiter in nahezu beliebiger Tiefe nutzen. Die heutzutage gebräuchlichste Art der Grundwasserbrunnen ist der Vertikalfilterbrunnen, auch Bohrbrunnen genannt. In Abbildung 1 ist eine beispielhafte Darstellung eines Bohrbrunnens zu sehen, in Anhang 2 (S. 78 ff.) befinden sich detailgetreue Ausbauprofile der untersuchten Bohrbrunnen. Nach der Bohrung eines Brunnenschachtes wird im Bereich des Grundwasserleiters ein Filterrohr eingebaut. Unterhalb des Filterrohres befindet sich in der Regel ein Sumpfrohr, in dem sich durch das Filterrohr eingespülte Feststoffe absetzen können. Oberhalb des Filterrohres befindet sich ein Vollrohr (Sperrrohr) und das Aufsatzrohr. Die Wahl des Filterrohres hängt u.a. von den geologischen und wasserchemischen Gegebenheiten des jeweiligen Aquifers ab. Der Filterwiderstand sollte möglichst gering sein. Gleichzeitig darf der Filter auch nicht zu große Öffnungen aufweisen, um seine Funktion als Feststoffrückhalter zu erfüllen. Außerdem muss das Filterrohr dem Druck der darüber liegenden Rohre und des anstehenden Gebirges standhalten. Heutzutage werden vor Allem Filterrohre aus Stahl (DIN 4922) und Kunststoff (PVC-U DIN 4925) eingesetzt und zunehmend auch die teureren Wickeldrahtfilterrohre aus rostfreiem Stahl (DIN 4935), welche größere Filtereintrittsflächen und somit einen geringeren Widerstand besitzen. Für die Aufsatzrohre wird nach Möglichkeit das gleiche Material wie das der Filterrohre gewählt, unter anderem um wasserchemische Gefährdungspotentiale wie die Korrosion zu vermeiden. Sofern der Grundwasserleiter in seiner ganzen Mächtigkeit durchteuft wird spricht man von einem vollkommenen Brunnen, taucht die Filterstrecke nur teilweise in den Grundwasserleiter ein von einem unvollkommenen Brunnen. Um den Aquifer optimal auszunutzen und ggf. Leistungsreserven bei fortschreitender Alterung (siehe Kapitel 2.5) zu schaffen sollte ein Wasserleiter möglichst vollkommen ausgebaut sein (Erich Bieske, 1992). Optional wird der Bereich zwischen Filterrohr und Bohrwand mit Filterkies gefüllt. Das Grundwasser fließt durch den Filter in das Brunneninnere und wird von dort mittels Pumpentechnik gefördert. Diese wird detailliert im folgenden Kapitel beschrieben.

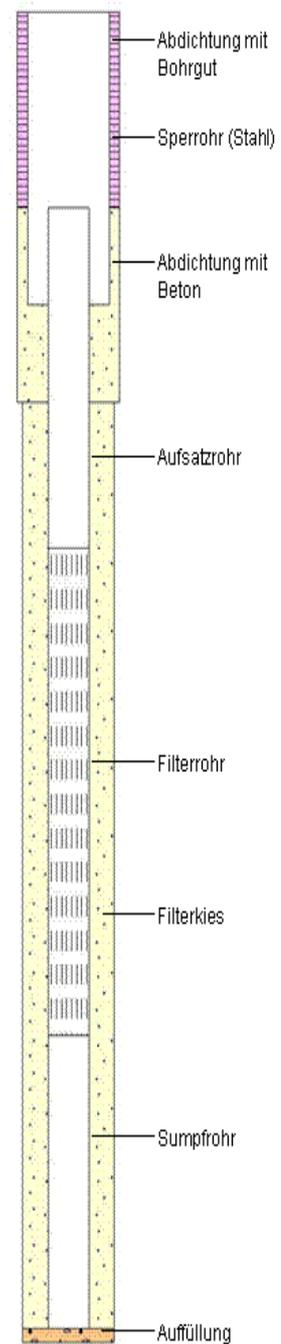


Abbildung 1: Querschnitt eines Bohrbrunnens (Bayrisches Landesamt für Umwelt)

### 2.3 Unterwassermotorpumpen

#### 2.3.1 Bestandteile und Aufbau

Unterwassermotorpumpen, umgangssprachlich auch U-Pumpen genannt, sind ein- oder mehrstufige Kreiselpumpen, die komplett in das zu fördernde Fluid getaucht werden (siehe Abbildung 2). Unterschiedliche Laufradgrößen sind für unterschiedliche Förderströme ausgelegt. Je mehr Laufräder die U-Pumpe besitzt, umso mehr Druck kann sie aufbauen und das Wasser entsprechend höher befördern. Um Reibungsverluste unter den engen Platzverhältnissen gering zu halten werden besonders glatte Laufräder verwendet. Unterhalb der Pumpenhydraulik befindet sich ein vom geförderten Fluid umgebener Elektromotor, dessen Rotor und der entsprechende Stator gestreckt im Gehäuse platziert sind. Das Wasser wird zwischen Motor und Pumpenhydraulik durch ein Sieb, das ein Eindringen von Sand und anderen Schwebstoffen verhindert, angesaugt. Durch die Rotation der Laufräder wird Druck aufgebaut und das Wasser durch eine Öffnung am oberen Ende der Pumpe gedrückt. Unter dieser Öffnung ist ein Rückschlagventil angebracht, welches nach einem Abschalten der Pumpe verhindert, dass Wasser aus dem Leitungssystem zurück in das Bohrloch strömt. Die Wasserfüllung des Motorraumes wird bei Bedarf mit einem geringen Anteil an Propylenglykol angereichert, um eine innere Korrosion zu vermeiden. Während des Pumpenbetriebes erwärmt sich der Motor. Die entstehende Wärme wird über die Wicklung des Motors an die innere Wasserfüllung, anschließend an das Statorrohr und an das vorbeifließende Brunnenwasser übertragen. Die Unterwassermotorpumpe ist heutzutage die gängigste Pumpenart für den Einsatz im Bohrbrunnen und vor allem bei größeren Einbautiefen ohne Alternativen (Hellmann, 2009).

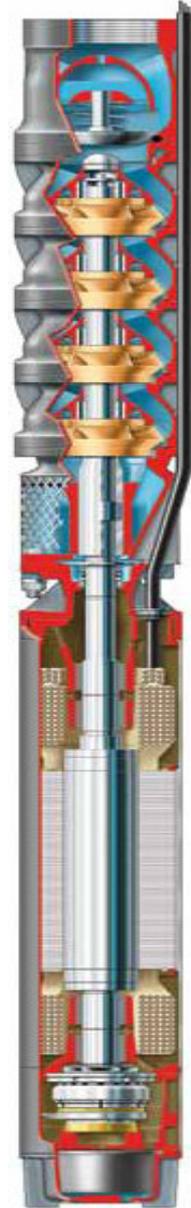


Abbildung 2:  
Unterwassermotorpumpe (Pleuger)

### 2.3.2 Förderleistung

Die Förderleistung  $P_Q$  ist die von der Pumpe auf das zu fördernde Fluid übertragene Leistung. Sie ergibt sich wie folgt (Hellmann, 2009):

$$P_Q = \rho * g * Q * H \quad [W] \quad [1]$$

$P_Q$	Leistung [W]
$\rho$	Dichte des Fördermediums [ $kg/m^3$ ]
$g$	Erdbeschleunigung [ $m/s^2$ ]
$Q$	Förderstrom [ $m^3/s$ ]
$H$	Förderhöhe [m]

### 2.3.3 Pumpenkennlinie

Kreiselpumpen haben ein bestimmtes Leistungsverhältnis zwischen Förderhöhe  $H$  und Förderstrom  $Q$ , welches in der **Pumpenkennlinie** dargestellt ist. Zu jedem möglichen Förderstrom stellt sich eine bestimmte Förderhöhe ein. Dieses bauartbedingte Verhältnis ist bei jeder Pumpe unterschiedlich und kann ohne Umbau nur durch Änderung der Laufraddrehzahl verändert werden. Es wird vom Hersteller angegeben oder in sogenannten Pumpentests ermittelt. Wie in Abbildung 3 zu erkennen ist auch der Wirkungsgrad  $\eta$  vom Förderstrom abhängig. Ziel der Auslegung ist es eine Pumpe für ihren Einsatz im Brunnen unter den gegebenen Voraussetzungen hin dahingehend auszuwählen, dass sie im Leistungsbereich ihres optimalen Wirkungsgrades betrieben wird. Je nach Leistung liegt der optimale Wirkungsgrad einer U-Pumpe heutzutage ungefähr zwischen 70 und 85 %. Der Betriebspunkt einer Pumpe ist immer abhängig von ihrer Pumpenkennlinie und der Kennlinie der Anlage (siehe Kapitel 2.4.1).

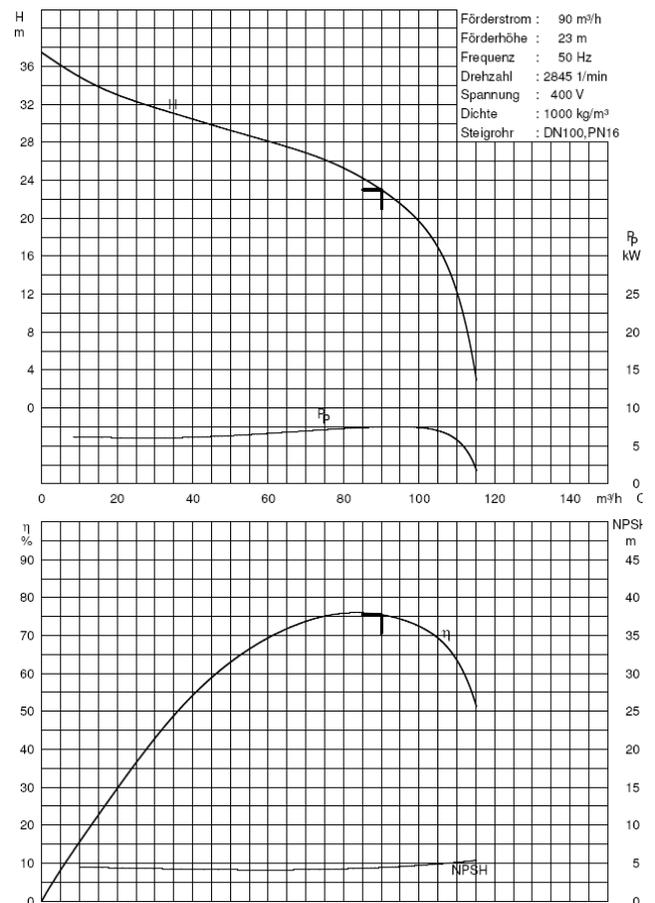


Abbildung 3: Pumpenkennliniendiagramm

## 2. Grundlagen

Im Zuge dieser Arbeit wird außerdem der Einsatz von Frequenzumrichtern (FU) zur Leistungssteuerung untersucht. Frequenzumrichter sind elektronische Bauteile, welche aus einem Dreh- oder Wechselstrom eine Spannung mit veränderter Frequenz und Amplitude generieren. In der Pumpentechnik kann so die Motordrehzahl und damit die Förderleistung und –höhe variiert werden. Es kommt dabei jedoch zu bauartbedingten Wärmeverlusten, die ca. 3 % des Gesamtwirkungsgrades des Pumpenaggregates betragen (Tholen, 2006; Hellmann, 2009). In Abbildung 4 ist die Auswirkung einer Frequenzsteuerung auf die Pumpenkennlinie dargestellt. Je nach Drehzahl verschiebt sich die Pumpenkennlinie und somit der optimale Betriebspunkt, bezogen auf Fördermenge und –höhe.

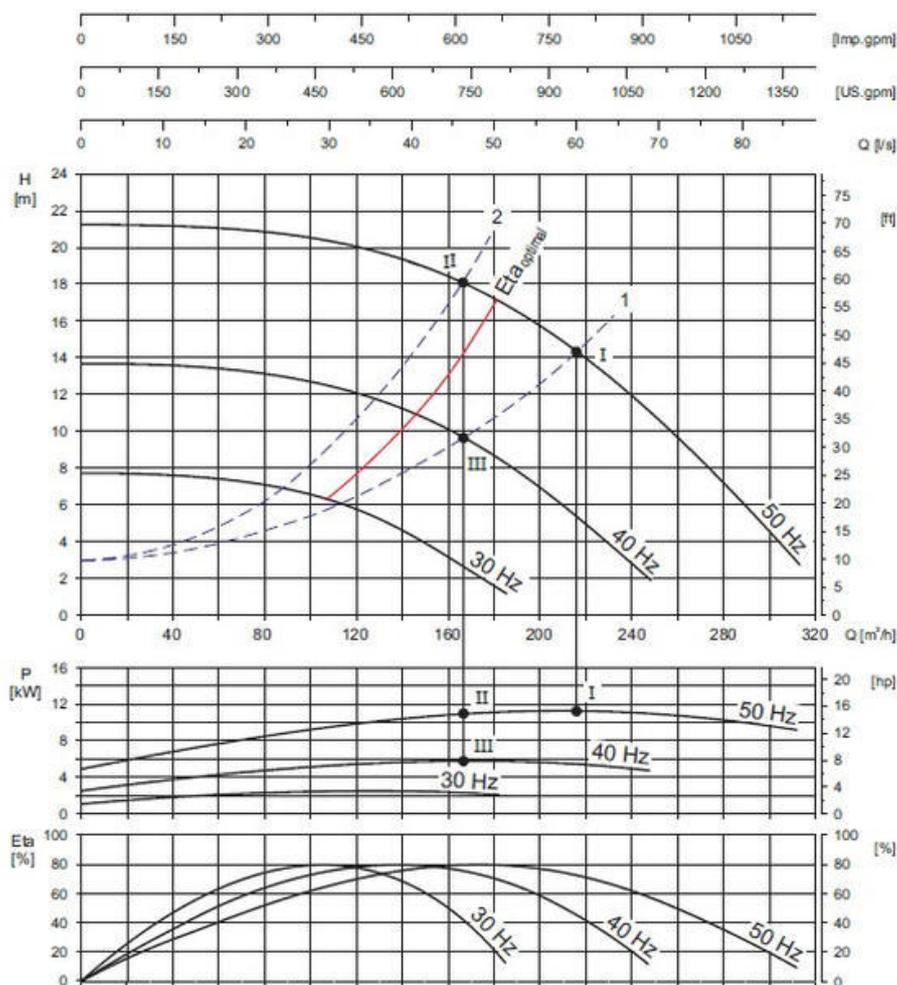


Abbildung 4: Änderung der Pumpenkennlinie durch Einsatz eines Frequenzumrichters (Herborner Pumpentechnik, 2012)

### 2.3.4 Leistungsbedarf und Wirkungsgrad

Der Leistungsbedarf  $P_p$  einer Pumpe ist die bezogene mechanische Leistung, welche nötig ist um einen bestimmten Förderstrom zu erreichen. Der Pumpenleistungsbedarf  $P_p$  bezieht sich nur auf den hydraulischen Pumpenteil, d.h. der Motorwirkungsgrad wird in dem Fall nicht berücksichtigt. Er ergibt sich wie folgt (Hellmann, 2009):

$$P_p = \frac{\rho \cdot g \cdot Q \cdot H}{\eta_p} = \frac{P_Q}{\eta_p} \quad [\text{W}] \quad [2]$$

$\eta_p$       Pumpenwirkungsgrad

Werden die Verluste des Antriebsmotors mit einbezogen erhält man  $P_{\text{Aufn.}}$  als Leistungsbedarf des Pumpenantriebssystems.  $P_{\text{Aufn.}}$  errechnet sich z.B. aus der Förderleistung und dem Gesamtwirkungsgrad  $\eta_{\text{ges}} = \eta_p \cdot \eta_M$ , mit  $\eta_M$  als Motorwirkungsgrad.

$$P_{\text{Aufn.}} = \frac{P_Q}{\eta_{\text{ges}}} \quad [\text{W}] \quad [3]$$

oder auch

$$P_{\text{Aufn.}} = \frac{P_p}{\eta_M} \quad [\text{W}] \quad [4]$$

Der Wirkungsgrad  $\eta_p$  einer Pumpe ist immer abhängig von ihrem Betriebspunkt (siehe Abbildung 3). Ein optimaler Wirkungsgrad kann nur erreicht werden, sofern die Pumpe in ihrem optimalen Betriebsbereich betrieben wird.

*Pumpenwirkungsgrad:* 
$$\eta_p = \frac{P_Q}{P_p} \quad [5]$$

## 2.4 Rohrnetz und Anlagenkennlinie

Neben den pumpenspezifischen Förderdaten ist auch das Rohrnetz für die Auslegung des Pumpenbetriebspunktes heranzuziehen. Je nach Wasserpegeln, Druckunterschied zwischen der Ein- und Auslaufseite und Strömungsgeschwindigkeit verändert sich die zu überwindende Förderhöhe  $H_A$ . Die Anlagenkennlinie, auch Rohrnetzkenlinie genannt, gibt den Zusammenhang an zwischen der erforderlichen Förderhöhe der Anlage ( $H_A$ ), die die Pumpe überwinden muss, und dem Förderstrom  $Q$ .

Die Förderhöhe der Anlage ( $H_A$ ) setzt sich aus einem statischen und einem dynamischen Energieanteil zusammen. Die statische Höhe  $H_{\text{stat}}$  ist die Summe der Vordruckhöhe der Ein- und Ausläufe der Anlage und der geodätischen Höhendifferenz (Ostermann, 1991).

$$H_{\text{stat}} = \frac{p_a - p_e}{\rho \cdot g} + z_a - z_e \quad [\text{m}] \quad [6]$$

$p_a$	statischer Druck auf den Austrittsquerschnitt [Pa]
$p_e$	statischer Druck auf den Eintrittsquerschnitt [Pa]
$z_a$	geodätische Höhe des Austrittsquerschnitts [m]
$z_e$	geodätische Höhe des Eintrittsquerschnitts [m]

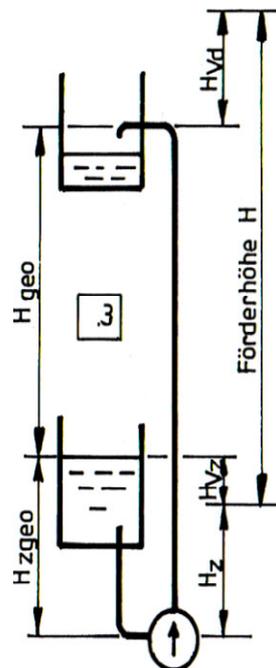


Abbildung 5: Lage der Wasserspiegel und Förderhöhen einer U-Pumpe (Ostermann, 1991)

Die geodätische Höhe  $H_{\text{geo}}$  ist die Höhendifferenz zwischen dem saug- und druckseitigem Flüssigkeitsspiegel ( $z_a - z_e$ ). Wird ein Brunnen im laufenden Betrieb betrachtet ist der Wasserspiegel der „Saugseite“ der Betriebswasserspiegel (vgl. Kapitel 2.4).

Der senkrechte Abstand zwischen dem Ruhe-, bzw. Betriebswasserspiegel und der Pumpe ist die geodätische Zulaufhöhe  $H_{\text{Zgeo}}$ . Diese ist aufgeteilt in Zulaufdruckhöhe  $H_Z$  und Zulaufverlusthöhe  $H_{\text{VZ}}$ . Die Verlusthöhe der Druckleitung  $H_{\text{Vd}}$  ergibt sich wie die Zulaufverlusthöhe  $H_{\text{VZ}}$  aus den dynamischen Anteilen.

Sobald der Wasseraustritt unter Druck stattfindet schlägt zusätzlich die Differenz der Behälter-, oder Vordruckhöhe ins Gewicht. Dies kann z.B. der Fall sein, falls das Wasser in einen geschlossenen Filter gepumpt oder in einer Verdüskammer versprüht wird (Ostermann, 1991).

Der dynamische Anteil der Förderhöhe  $H_{\text{dyn}}$  setzt sich aus der Differenz der Geschwindigkeitshöhen zwischen den Ein- und Auslaufpunkten der Anlage sowie den Rohrreibungsverlusten zusammen. Sie ändern sich im Gegensatz zu den statischen Anteilen mit dem Förderstrom. Nach Ostermann (1991) und Hellmann (2009) sind die dynamischen Verluste bezüglich der Fließgeschwindigkeitsdifferenz verschwindend gering, werden der Vollständigkeit halber jedoch erwähnt:

$$H_{\text{dyn}} = \frac{v_a^2 - v_e^2}{2 \cdot g} \quad [\text{m}] \quad [7]$$

$v_a$       Fließgeschwindigkeit am Auslauf [m/s]

$v_e$       Fließgeschwindigkeit am Einlauf [m/s]

Die Reibungsverluste in den Rohrleitungen sowie die örtlichen Verluste der einzelnen Armaturen von der Pumpe bis zum Auslass werden als totale Verlusthöhe  $H_V$  angegeben. Diese sind nach Tholen (2006) abhängig von der Fördermenge, den Leitungslängen- und Querschnitten, der Rauigkeit der Rohrleitung und den eingebauten Formstücken und Armaturen. Die Verlusthöhe  $H_V$  setzt sich aus der Summe der einzelnen örtlichen Verluste ( $h_{\text{vr}}$ ) und der Reibungsverluste ( $h_{\text{vö}}$ ) der Rohrnetzteile zusammen.

$$H_V = \sum h_{\text{vr}} + \sum h_{\text{vö}} \quad [\text{m}] \quad [8]$$

Dabei sind  $h_{\text{vr}}$  die Reibungsverluste der einzelnen Rohrnetzabschnitte und ergeben sich nach Schneider (Schneider, 2004) wie folgt:

$$h_{\text{vr}} = \lambda \cdot \frac{l}{d} \cdot \frac{v^2}{2g} \quad [\text{m}] \quad [9]$$

$\lambda$	Widerstandsbeiwert [-]
$l$	Rohrlänge
$d$	Rohrdurchmesser
$v$	durchschnittliche Fließgeschwindigkeit [m/s]

Der Widerstandsbeiwert  $\lambda$  ist bei laminarer Strömung ( $Re < 2300$ ) ausschließlich von der Reynolds-Zahl  $Re$  abhängig:

$$\lambda = \frac{64}{Re} \quad [-] \quad [10]$$

Bei turbulenter Strömung ( $Re > 2300$ ) kann  $\lambda$  iterativ mit Hilfe der Reynolds-Zahl, der Absoluten Rauigkeit  $k$  und dem Rohrdurchmesser bestimmt werden. Dabei wird zwischen glatten und rauen Bereichen unterschieden, den genauesten Wert erhält man durch die Verknüpfung beider Berechnungsvarianten:

$$\frac{1}{\sqrt{\lambda}} = -2 * \lg \left( \frac{2,51}{Re\sqrt{\lambda}} + \frac{k}{3,71d} \right) \quad [-] \quad [11]$$

$k$  absolute Rauheit [m]

Die obige Gleichung kann in guter Näherung ersetzt werden durch (Schneider, 2004):

$$\frac{1}{\sqrt{\lambda}} = -2 * \left[ 2,7 * \frac{(\log Re)^{1,2}}{Re} + \frac{k/d}{3,71} \right] \quad [-] \quad [12]$$

Die Örtlichen Verluste  $h_{v\ddot{o}}$  sind die Verlusthöhen, welche durch bestimmte geometrische Armatureneigenschaften hervorgerufen werden. Dazu zählen z.B. Rohrkrümmungen, Ein- und Ausläufe, Flanschverbindungen, etc. Für die Berechnung der Örtlichen Verluste ist in der Literatur für fast alle Ausführungen der Verlustbeiwert  $\zeta$  (Zeta) angegeben.

$$h_{v\ddot{o}} = \zeta * \frac{v^2}{2g} \quad [m] \quad [13]$$

Zusammengefasst ergibt sich die Anlagenförderhöhe  $H_A$  als Summe der verschiedenen Energiehöhen.

$$H_A = \frac{p_a - p_e}{\rho * g} + Z_a - Z_e + \frac{v_a^2 - v_e^2}{2 * g} + H_V \quad [m] \quad [14]$$

Diese Gleichung lässt sich weiter vereinfachen, denn der Wert der dynamischen Geschwindigkeitsverluste liegt „im Bereich weniger cm und kann in der Praxis vernachlässigt werden (Ostermann, 1991).

Daraus ergibt sich als vereinfachte Formel für die Anlagenförderhöhe  $H_A$  bei

$$\text{geschlossenen Behältern} \quad H_A \approx \frac{p_a - p_e}{\rho \cdot g} + Z_a - Z_e + H_V \quad [\text{m}] \quad [15]$$

$$\text{bei offenen Behältern} \quad H_A \approx Z_a - Z_e + H_V \quad [\text{m}] \quad [16]$$

### 2.4.1 Betriebspunkt

Der Betriebspunkt einer Kreiselpumpe ist der Schnittpunkt der Pumpenkennlinie mit der Anlagenkennlinie. Die Lage des Betriebspunktes ändert sich, wenn die Pumpenkennlinie oder die Anlagenkennlinie einen anderen Verlauf annehmen. Die Pumpenkennlinie kann durch eine Änderung der Pumpendrehzahl oder des Pumpen-Laufraddurchmessers gezielt verändert werden. Die Anlagenkennlinie kann z.B. durch Veränderung der Rohrdurchmesser und Armaturen oder durch Schließen bzw. Öffnen eines Drosselorgans (Schieber) modifiziert werden (Merkl, 2008). Außerdem tragen besonders die Brunnenalterung (siehe 2.5) sowie Abnutzungserscheinungen der verwendeten Materialien und Verkrustungen des Rohrnetzes zu einer altersbedingten Verschiebung der beiden Kennlinien bei. Die Anlagenkennlinie kann durch einen Anstieg des Rohrwiderstandes sowohl steiler werden, als auch eine Verschiebung auf der Y-Achse beschreiben, wenn sich die geodätische Höhendifferenz ändert (siehe 2.5). Die Pumpenkennlinie kann sich durch Alterungserscheinungen wie Materialverschleiß oder Ablagerungen parallel oder nichtparallel verschieben. Auf Grundlage von anlagenspezifischen Parametern (geodätische Höhendifferenz Betriebswasserspiegel, Druckunterschiede, Rohrreibungsverluste) kann die Anlagenkennlinie relativ genau beschrieben werden, wohingegen die Pumpenkennlinie nur durch Pumpenprüftests ermittelt werden kann.

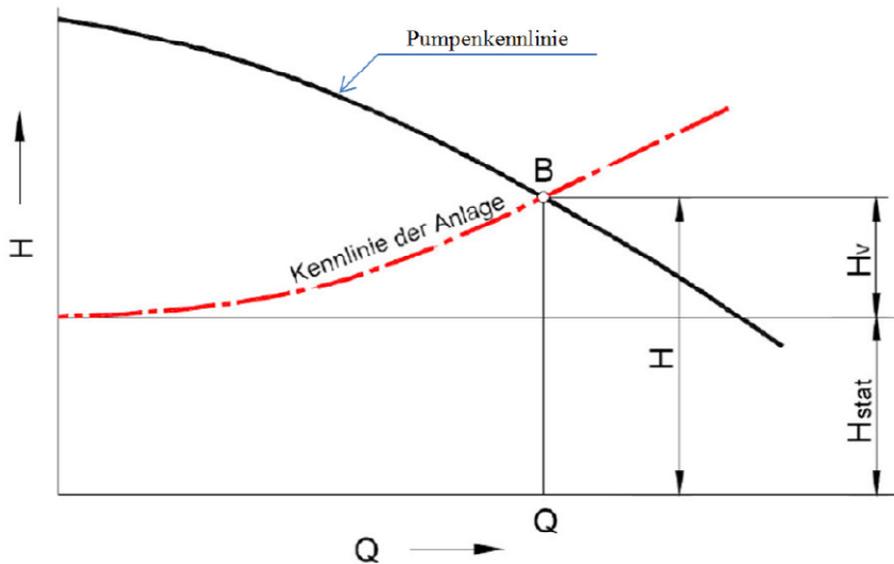


Abbildung 6: Schnittpunkt der Pumpen- und Anlagenkennlinie (Betriebspunkt B), vgl.: (edur)

## 2.5 Brunnenalterung

Zum besseren Verständnis der Brunnenalterung wird zunächst der Begriff „Betriebswasserspiegel“ erklärt. In der Brunnenwirtschaft ist der Betriebswasserspiegel der Wasserstand, welcher sich während der Wasserförderung im Brunnen einstellt. Dieser ist um die Höhe  $s$  geringer als der jeweilige Ruhewasserspiegel und abhängig von der Fördermenge ( $Q$ ). Je mehr Wasser gefördert wird, umso höher muss die Fließgeschwindigkeit durch das Filtermaterial sein. Die Fließgeschwindigkeit wiederum ist abhängig von der Differenz der auf das Grundwasser inner- und außerhalb des Brunnenrohres wirkenden Drücke. Daher stellt sich mit zunehmendem Förderstrom ein tieferer Betriebswasserspiegel ein – auf dem Niveau, bei dem sich ein Gleichgewicht zwischen dem ab- und zufließenden Wasser bildet.

Bei einem ungespannten Grundwasserleiter entspricht die Höhe des Ruhewasserspiegels im Brunneninneren dem Wasserspiegel des umliegenden Grundwassers. Im Betrieb bildet sich je nach Fördermenge ein mehr oder weniger stark ausgeprägter parabelförmiger Wasserspiegel in der Nähe des Brunnens, ein sogenannter Absenktrichter

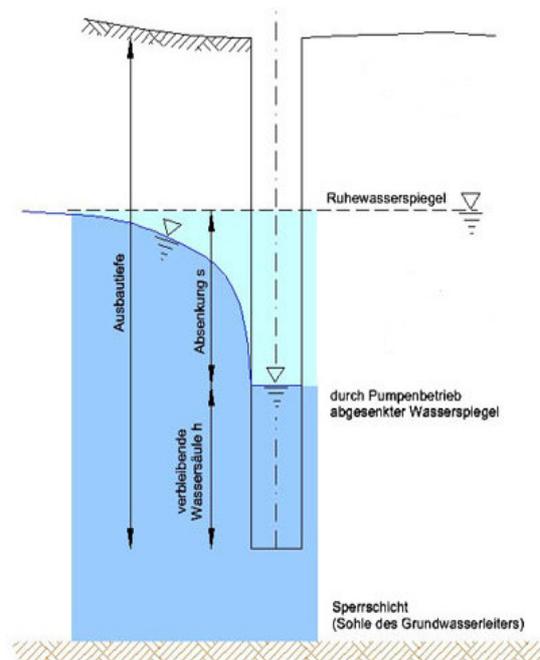


Abbildung 7: Betriebswasserspiegel eines ungespannten Grundwasserleiters (hgt-geotech)

(siehe Abbildung 7). Bei einem gespannten Grundwasserleiter erreicht der Ruhewasserspiegel im Brunnen durch den Wasserdruck einen höheren Pegelstand als der des durch die Deckschicht gespannten Grundwassers. Der umliegende Grundwasserspiegel bildet daher erst einen Absenktrichter aus, wenn der Betriebswasserspiegel unter das Niveau der Deckschicht sinkt.

Unter Brunnenalterung wird allgemein das Nachlassen der Brunnenleistung über die Zeit verstanden. Dieses Phänomen kann bei fast allen Brunnen beobachtet werden, die Geschwindigkeit und die Intensität der Alterungserscheinungen fallen je nach Rahmenbedingungen unterschiedlich aus. Als Maß für die Alterung wird meist die spezifische Ergiebigkeit, der  $Q/s$  –Wert, angegeben. Hierbei wird die Absenkung  $s$  über einen definierten Förderstrom  $Q$  gemessen (Merkl, 2008; Tholen, 2006).

$$Q_{\text{spez}} = \frac{Q}{s} \quad [\text{m}^3/\text{h} \cdot \text{m}] \quad [17]$$

Bei gespannten Grundwasserleitern ist die Absenkung des Betriebswasserspiegels proportional zur Fördermenge, solange der Betriebswasserspiegel oberhalb des umliegenden Ruhewasserspiegels liegt (Tholen, 2006). Bei ungespannten Grundwasserleitern ist das  $Q/s$ -Verhältnis normalerweise nicht linear. Im Falle der im Verlauf dieser Arbeit untersuchten Brunnen weisen jedoch auch die ungespannten Brunnen ein lineares Verhältnis von Fördermenge zu Absenkung auf. In Abbildung 8 ist die Auswertung eines Pumpversuches des Brunnen 20 dargestellt. Die Ursache für das scheinbar lineare Verhältnis ist, dass der Abknickpunkt erst bei größeren Fördermengen erreicht wird.

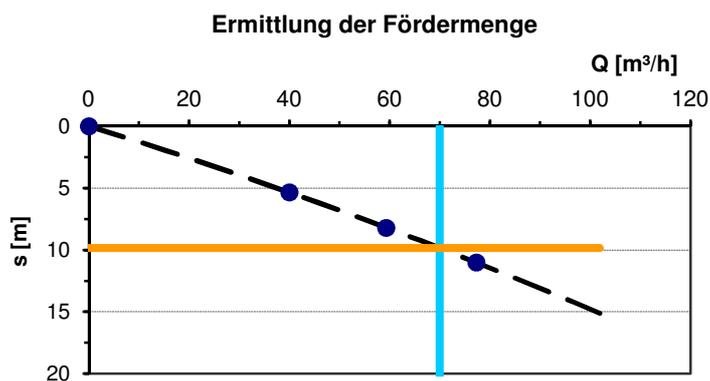


Abbildung 8: Auswertung eines Pumpversuches, Brunnen 20, 09/2008

Der Grund für den erhöhten Leistungsverlust mit zunehmender Betriebszeit ist ein Verschluss der Filterschlitz und Porenräume, wodurch die Durchlässigkeit des Filters sinkt. Der daraus resultierende höhere Widerstand der Filterstrecke führt bei gleichem Förderstrom ( $Q$ ) zu einem Anstieg der Fließgeschwindigkeit im Brunnennahbereich. Dies führt zu einer stärkeren Absenkung des Betriebswasserspiegels und resultiert in geringeren Förderraten bei gleicher Leistungsaufnahme und somit höheren Förderkosten (vgl. Gleichung [1], S. 10). Die unterschiedlichen

Alterungserscheinungen hängen hauptsächlich von der Zusammensetzung des Aquifers, der wasserchemischen Beschaffenheit des Grundwassers und dem technischen Ausbau des Brunnens ab. Durch geeignete Baumaterialien und Förderkonzepte können diese zumindest teilweise beeinflusst werden. Bei eisen- und manganhaltigem Wasser führt z.B. eine Schwankung des Wasserspiegels zur verstärkten Sauerstoffaufnahme des Grundwassers und erhöht dadurch den Verockerungseffekt. Im folgenden Kapitel werden die Ursachen für den Leistungsabfall eines Brunnens näher erläutert. Neben dem Brunnen kann auch die Pumpe von Ablagerungen (siehe 2.5.1) betroffen sein und so in ihrer Leistung zurückgehen. (Merkl, 2008)

### 2.5.1 Ursachen der Brunnenalterung

Die Deutsche Vereinigung des Gas- und Wasserfaches e.V. unterscheidet in ihrem Arbeitsblatt W 130 (DVGW, 2007) als Leistungsabfallursachen eines Brunnens zwischen Verockerung, Versandung, Korrosion, Versinterung, Verschleimung und Aluminiumausfällung.

Unter **Verockerung** wird eine Ablagerung von im Wasser schwerlöslichen Eisen- und Manganverbindungen verstanden. Die Verbindungen sind meist ockerfarben, gelegentlich auch schwarz und fallen als Niederschlag vor allem auf dem Brunnenrohr im Filtermaterial und den Pumpenteilen aus. Zum einen kann eine **chemische Verockerung** auftreten, dabei werden zweiwertige Eisen- oder Manganionen durch im Wasser gelösten Sauerstoff zu schwerlöslichen Verbindungen oxidiert und ausgefällt. Die chemische Verockerung wird vor allem durch schwankende Betriebswasserspiegel oder einer Mischung von Wässern unterschiedlicher Beschaffenheit verstärkt.

Die häufigste Art der Brunnenalterung ist die **biologische Verockerung**. Verschiedene Mikroorganismen sind in der Lage im Zuge ihres Stoffwechsels gelöste zweiwertige Eisen- oder Manganionen aufzunehmen und unter Zuhilfenahme von Sauerstoff als schwerlösliche Verbindung wieder auszuschcheiden. Typische Produkte sind Eisen- und Manganhydroxid sowie Kalzium- und Eisencarbonat. Als Voraussetzung für die biologische Verockerung müssen folgende Faktoren gleichzeitig vorhanden sein (Mutschmann & Stimmelmayer, 2007):

- zweiwertige Eisen- und Manganionen mit Konzentrationen über 1,6 mg/L im ruhenden und über 2 mg/L im bewegten Wasser, sowie gelöster Sauerstoff
- eisen- und manganoxidierende Mikroorganismen
- pH-Wert zwischen 5 und 8, sowie ein Redoxpotential von  $E_{OH} = +10\text{mV}$  bis  $+20\text{mV}$
- ausreichendes Nährstoffangebot

Im Gegensatz zu den anderen Alterungserscheinungen ist die **Versandung** ein rein physikalisches Phänomen, das auf der Schleppkraft der Grundwasserströmung beruht. Je höher die Fließgeschwindigkeit des Grundwassers ist, desto größer ist die Gefahr, dass Ton, Schluff, Sand und Kolloide aus dem Aquifer zum Brunnen transportiert werden. In Folge dessen können Filterkiesschüttungen verstopfen (Kolmation), oder die Partikel bis ins Brunnenrohr vordringen, je nach Partikel- und Filterkies Korngröße. Neben den geologischen Gegebenheiten liegen die Ursachen der Versandung meist bei falscher oder unzureichenden Planung, Baudurchführung oder unangepasstem Betrieb: falsche Kornabstufung des Filterkieses, falsche Materialauswahl, zu hohe Anströmgeschwindigkeiten, uvm.

Bei metallischen Ausbaumaterialien kann **Korrosion** sowohl mit dem Wasser auftreten, als auch untereinander, in Folge nicht fachgerechter Verbindung unterschiedlich edler Metalle (Kontaktkorrosion). Begünstigt wird die Reaktion durch hohe Chlorid- und Sulfatwerte. Dabei bilden sich Korrosionsprodukte, die eine bis zu 15fache Volumenvergrößerung zur Folge haben können. Mit zunehmender Zeit führt eine Korrosion zur Schwächung und letztendlich zum Zerfall der betroffenen Materialien. Die Ursachen für eine Korrosion sind unsachgemäße Herstellung, Beschädigung des Materials oder auch eine langfristige Diffusion des Wassers durch schützende Kunststoffbeschichtungen.

Als **Versinterung** wird die Ablagerung von Calcium- und Magnesiumcarbonaten im Brunnen oder seiner unmittelbaren Umgebung bezeichnet. Durch die Störung des Kalk-Kohlensäure-Gleichgewichtes kommt es zur Ausfällung der besagten Verbindungen. Hervorgerufen wird dies vor Allem durch eine Druckentspannung des in den Brunnen fließenden Wassers und daraus resultierender CO<sub>2</sub>-Entgasung, durch das Vermischen zweier Wasserströme mit unterschiedlichem Kalk-Kohlensäure-Gehalt oder durch Temperaturerhöhung auf Grund des Pumpenbetriebs. Als alleinige Alterungserscheinung tritt die Versinterung nur bei carbonathaltigem Felsgestein auf, meist findet sie als Mischform mit der Verockerung statt und wird häufig nicht erkannt, da die dunkle Verockerung die weiße Versinterung optisch unterdrückt.

Die **Verschleimung** in Brunnen wird durch eine hohe Dichte an heterotrophen schleimbildenden Bakterien verursacht, die sowohl auf ein reiches Nährstoffangebot (Stickstoff, Phosphor) als auch auf organischen Kohlenstoff zurückgreifen können. Mögliche Stofflieferanten sind z.B. Brunneneinzugsgebiete mit hohem Stickstoffgehalt, Uferfiltrat, nicht aufbereitetes Oberflächenwasser im Grundwasser sowie Regeneriermittel und Bohrspülzusätze mit organischen Substanzen. Bei längerem Stillstand der Pumpe ist ein Absterben der Biomasse möglich, da die Nähstoffzufuhr unterbrochen wird.

Im Gegensatz zu den bisher besprochenen Alterungserscheinungen ist die **Aluminiumausfällung** nur selten anzutreffen. Die Voraussetzungen dafür sind sehr speziell und müssen gemeinsam vorkommen: eine Versauerung des Bodens oder oberflächennahen Grundwassers, aluminiumreiche Böden mit schwacher Säurepufferkapazität sowie pH-neutrales Wasser in tieferen Schichten. In dieser Zusammensetzung löst das säurehaltige oberflächennahe Wasser Aluminium aus dem Boden, welches in tieferen Schichten als Aluminiumhydroxid ausfällt. Der so entstehende weiße Belag ist nur schwer von der Versinterung zu unterscheiden.

### 2.5.2 Brunnenregenerierung

Unter Brunnenregenerierung versteht man die Behandlung von Filterkomponenten und dem umliegenden Gestein um leistungsmindernde Ablagerungen zu entfernen und die Ergiebigkeit des Brunnens zu steigern. Gegebenenfalls wird auch das Vollrohr von Ablagerungen befreit.

Um eine wirksame Regenerierung zu gewährleisten ist ein rechtzeitiges Erkennen der Brunnenalterung eine notwendige Voraussetzung. Erst wenn eine Vielzahl von Porenkanälen durch Ablagerungen, etc. verstopft ist tritt ein merkbarer Leistungsrückgang auf. Jedoch sind ab einem gewissen Grad der Verschmutzung Alterungserscheinungen erfahrungsgemäß nur noch teilweise reversibel. Deshalb rät Tholen (2006) zu einer Regenerierung bei einem Leistungsrückgang von ca. 10%. Wichtige Hinweise für einen Leistungsrückgang geben Q/s-Diagramme, Filterwiderstandsmessungen, Wasser- und Belagsuntersuchungen sowie optische Untersuchungen (Kamerabefahrung).

Mit dem Begriff Brunnenregenerierung werden nach DVGW-Arbeitsblatt W 130 (DVGW, 2007) die Maßnahmen zur Leistungswiederherstellung bezeichnet, die ohne bauliche Veränderungen stattfinden. Ferner teilt der DVGW die Regenerierungsmaßnahmen in zwei Verfahrensarten ein: mechanisch und chemisch. Zu den mechanischen Verfahren zählen u.a.:

- Auspumpen
- Bürsten
- Intensiventnahme
- Kolben (Durchströmen des Filterkieses durch Auf- und Abwärtsbewegung eines Kolbens, Trennung der Beläge)
- Niederdruck-Innenspülung (Druckreinigung der Filterinnenwand)
- Hochdruckspülverfahren (Druckreinigung, dringt auch in Filterkies vor)
- Druckwellenimpulsverfahren (Druckimpulse bringen Beläge zum platzen)

Zur optimalen Leistungssteigerung wird oft eine Kombination aus mechanischen und chemischen Verfahren eingesetzt. Die chemische Regeneration findet dabei immer erst nach einer gründlichen mechanischen Reinigung statt. Die eingesetzten Mittel sind meist Salzsäure, Schwefelsäuregemische oder anorganische, pH-neutrale Reduktionsmittel. Diese werden mittels bestimmter Gerätschaften durch den Filter und den Filterkies gespült und lösen so die restlichen Ablagerungen. Jedoch sollte der Einsatz von Chemikalien auf ein Minimum begrenzt werden und Bedarf wegen seiner potentiell hohen Umwelteinwirkung einer wasserrechtlichen Erlaubnis nach §§2 und 7 des Wasserhaushaltsgesetzes.

### 3. Ist-Zustand Wasserwerk Bausberg



Abbildung 9: Wasserwerk Bausberg (HW)

In Hamburg und seiner unmittelbaren Umgebung befinden sich heute insgesamt 17 Wasserwerke, welche ausschließlich Grundwasserförderung betreiben. Im Jahre 2010 belief sich die Rohrnetzlänge auf 5.417 km und belieferte 658.895 Haushalte und Grundstücke, damit ist HAMBURG WASSER der größte öffentliche Wasserversorger Deutschlands. Mehrere Werke arbeiten jeweils im Verbund und können so bei Ausfällen die Versorgungsleistung eines anderen übernehmen. In Hamburg-Rothenburgsort befindet sich das Hauptpumpwerk inklusive der zentralen Leitwarte, dort laufen sämtliche Informationen über die Betriebszustände aller Wasserwerke und des Rohrnetzes zusammen. Das Hauptpumpwerk regelt außerdem die jeweiligen Wasserdrücke und damit den Transport des Trinkwassers bis hin zum Verbraucher.

Das Wasserwerk Bausberg wurde 1859 in Betrieb genommen und war das erste Wasserwerk mit eingebauter Filtrationsanlage. Bis zum Jahre 1960 wurde auf dem Bausberg neben dem Grundwasserbezug auch Elbwasser aufbereitet. Heute stehen insgesamt 10 Brunnen aus zwei Brunnenfassungen (Rohrnetzsträngen) für die Grundwassererfassung aus Tiefen zwischen 100 und 320 Metern zur Verfügung. Die Aufbereitung des Rohwassers erfolgt durch eine offene Belüftung und anschließender Filtration in 6 geschlossenen Schnellfiltern. Das aufbereitete Wasser wird danach in 5 Trinkwasserbehältern mit einem Fassungsvermögen von insgesamt 60.000 m<sup>3</sup> gespeichert. Auf Grund seiner Höhe von ca. 92m über Meeresniveau („mNN“) ist der Bausberg besonders gut als Ort für einen Speicherbehälter geeignet. Das Trinkwasser kann ohne zusätzliche Pumpenkraft im freien Gefälle zu den Verbrauchern fließen. Seit 1990 sind die Förderbrunnen von einem zehn Quadratkilometer großen Wasserschutzgebiet umgeben (HAMBURG WASSER, 2012).

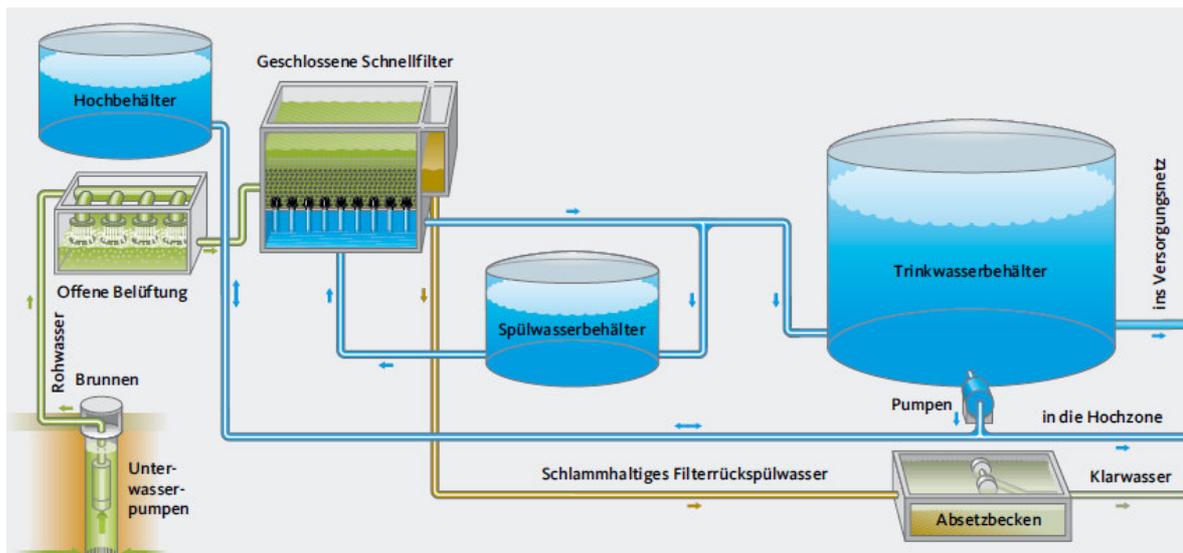


Abbildung 10: Anlagenschema des Wasserwerkes Bausberg (HAMBURG WASSER, 2012)

Die Grundwassergewinnung des Wasserwerkes Bausberg findet in zwei Brunnenfassungen statt. Die Fassung Rissen mit aktuell 8 betriebsbereiten Brunnen liegt nördlich des Werkgeländes auf dem Geesthang, die Fassung Falkenstein (Brunnen 23 und 26) mit zwei aktiven Brunnen südwestlich davon im Elbeurstromtal. Kurz vor dem Einlauf in die offene Belüftung vereinigen sich die Rohrleitungen der beiden Brunnenstränge.

In Abbildung 11 ist die Verknüpfung der einzelnen Brunnen untereinander und mit dem Wasserwerk schematisch dargestellt, zur genaueren Übersicht der exakten Lage zueinander dient die AutoCAD-Zeichnung aus Anhang 1 (S.76).

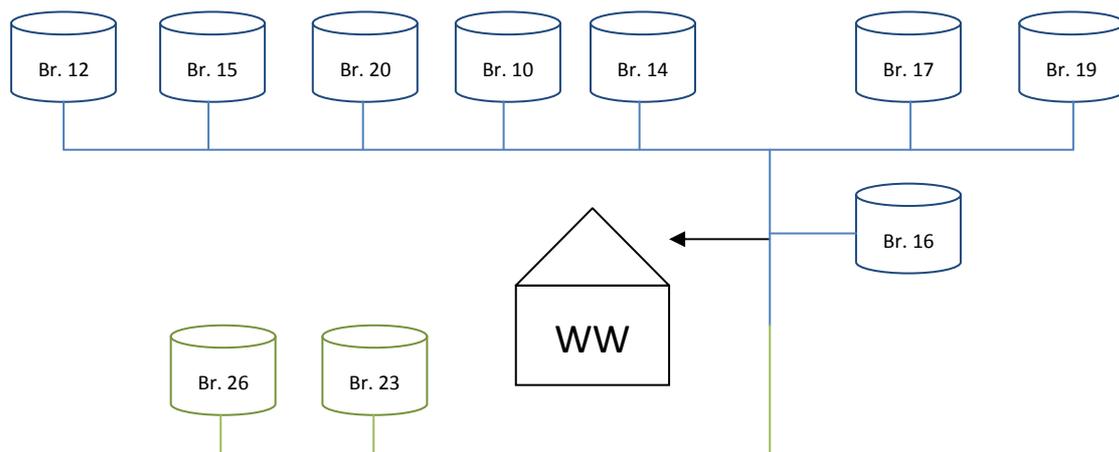


Abbildung 11: Skizze der Grundwasserfassung des Wasserwerkes Bausberg

### 3.1 Datengrundlage

Sämtliche Berechnungen in Kapitel 3 und 4 finden auf Grundlage folgender Daten statt:

- Pumpenprüfprotokolle und Hersteller-Kennlinien der einzelnen Pumpen
- Betriebszeit (Tageswerte, seit 03.2010) in h
- Fördermenge (Tageswerte seit 03.2010) m<sup>3</sup>
- Energieverbrauch der verwendeten U-Pumpen (Tageswerte seit 03.2010) in kWh
- Wasserstand im Brunnen (minimale und maximale Tageswerte seit 03.2010) in mNN
- weitere Dokumente von HAMBURG WASSER

Alle im Zuge dieser Arbeit verwerteten Daten sind durch elektronische Messtechnik aufgenommen und im Datenbanksystem von HAMBURG WASSER erfasst worden. Die Fördermengen der einzelnen Brunnen werden mittels magnetisch-induktiver Durchflussmesser kontinuierlich registriert. Die notwendigen Förderhöhen setzen sich aus folgenden Werten zusammen:

- geodätische Höhendifferenz Ein- und Auslauf (m)
- Wasserspiegel (mNN)
- Reibungsverluste der Leitung ( $k= 1$  mm)
- Armaturverluste ( $\zeta$ -Werte)

Die Absenkungen der Wasserpegel der einzelnen Brunnen werden über Drucksonden erfasst.

Das Rohwassernetz besteht aus Graugussrohren mit einer Innenauskleidung aus Zementmörtel. Über den Zustand der Rohrleitung kann keine genauere Aussage gemacht werden. Eine genaue Bestimmung der Rohrrauigkeiten wäre nur möglich, wenn die Rauigkeit eines jeden Rohres mechanisch nachgemessen, oder eine Druckmessungen in mehreren Knotenpunkten bei verschiedenen hohen Fließgeschwindigkeiten durchgeführt würde (Kalibrierung). Beide Möglichkeiten werden auf Grund der kurzen Bearbeitungszeit der Arbeit nicht in Betracht gezogen. Stattdessen wird von einem pauschalen Rauigkeitswert von  $k= 1$  mm für das gesamte Rohrnetz ausgegangen. Dieser Wert hat sich als realistischer Erfahrungswert bei HAMBURG WASSER erwiesen.

In den nachfolgenden Grafiken der Q-, s- und Q/s-Werte sind nur die Zeitabschnitte der jeweiligen Kurven dargestellt, in denen die jeweiligen Brunnen mehrere Tage durchgehend betrieben wurden. Zum einen erleichtert dies die Übersicht der Grafik, zum Anderen würde der Betriebswasserspiegel bei Kurzbetrieb keinen repräsentativen Pegel erreichen.

### 3.2 Rohrnetzhydraulik

Wie in Kapitel 2.4 beschrieben ist die Rohrnetzhydraulik ein wichtiger Parameter zur Auslegung eines Pumpenbetriebspunktes. Je nach Fördermenge steigt oder sinkt die Fließgeschwindigkeit und damit der Widerstand in den einzelnen Rohrnetzabschnitten. Analog dazu steigt oder sinkt die Verlusthöhe und damit die gesamte zu überwindende Förderhöhe der jeweiligen Pumpen. Da es sich um ein nicht proportionales Verhältnis handelt und für jeden Rohrnetzabschnitt aufwendig einzeln berechnet werden muss (vgl. Gleichung [8] bis [13], S. 14 f.) ist eine Simulation des Rohrnetzes wichtig. Das frei erhältliche Programm EPANet ist eine Simulationssoftware zur hydraulischen Analyse von Wasserversorgungsnetzen. Im Zuge dieser Arbeit wird mit EPANet ein Modell des Trinkwasserverteilungsnetzes in Baurberg konzipiert und den Ansprüchen entsprechend umgeformt. Aufgebaut ist das virtuelle Netz aus Leitungsabschnitten und Knotenpunkten, welche die Abschnitte verbinden oder beenden, sowie einem Wassertank. Die vom Programm als Rohrnetzenden oder -ausläufe vorgesehenen Punkte stellen die Brunnen dar und der Wassertank fungiert als Auslauf des Rohrnetzes. An den Brunnenpunkten werden negative Wasserbedarfswerte angegeben, welche so den Wassertank füllen. Für jeden Rohrnetzabschnitt werden seine Länge, Durchmesser, Rohrrauigkeit und die  $\zeta$ -Werte der enthaltenen Armaturen angegeben. Jeder Knotenpunkt bekommt eine geodätische Höhe zugewiesen. Bei den Brunnenpunkten entspricht die geodätische Höhe dem Betriebswasserspiegel. Als Temperatur werden konstante 10 °C angenommen, die dynamische Viskosität des zu fördernden Fluides wird daher auf 1,297 mPa\*s gesetzt. In Abbildung 12 ist das unter EPANet entworfene Rohrnetzmodell zu sehen. Die Nummern stehen für die jeweiligen Brunnen, die Farbe der Leitungsstränge stellt den berechneten Durchfluss in m<sup>3</sup>/h dar, die Farbe der einzelnen Knotenpunkte steht für die jeweilige Druckhöhe (siehe Legende).

### Hydraulische Beispielrechnung der Steigleitung des Brunnen 10 (vgl. Formel 8 – 13)

Parameter:  $Q = 83 \text{ m}^3/\text{h}$ ; DN125;  $l = 78 \text{ m}$ ;  $k_i = 1,0 \text{ mm}$ ; Armaturen: 1 Rückschlagkappe mit  $\zeta_R = 1,75$   
Absperriklappe mit  $\zeta_A = 0,18$

$$\text{Fließgeschwindigkeit } v = \frac{Q \left[ \frac{\text{m}^3}{\text{s}} \right]}{\text{Rohrfläche } [\text{m}^2]}$$

$$v = \frac{0,023 \frac{\text{m}}{\text{s}}}{0,012 \text{ m}^2} = 1,88 \frac{\text{m}}{\text{s}}$$

$$\text{Reynolds-Zahl } Re = \frac{v \cdot d}{\nu} = 1,81 \cdot 10^5$$

$$\frac{k}{d} = 0,008$$

$$\frac{1}{\lambda} = 5,29$$

$$\lambda = 0,0357$$

$$h_{vr} = \lambda \cdot \frac{l}{d} \cdot \frac{v^2}{2g} = \frac{0,0357 \cdot 78 \cdot 1,88^2}{0,125 \cdot 2 \cdot 9,81} = 4,0130 \text{ m}$$

$$h_{v\ddot{o}} = \zeta \cdot \frac{v^2}{2g} = 1,93 \cdot \frac{1,88^2}{2 \cdot 9,81} = 0,3477 \text{ m}$$

$$H_v = \sum h_{vr} + \sum h_{v\ddot{o}} = 4,3607 \text{ m}$$

Die in EPAnet berechnete Verlusthöhe für diesen Abschnitt der Steigleitung beträgt 4,3602 m. Das entspricht einer Differenz von 0,01 %. Da die im Zuge der Arbeit simulierten Gesamtverlusthöhen der einzelnen Pumpen niemals größer als 10 m sind, ist die Abweichung zwischen einer manuellen und der simulierten Berechnung vernachlässigbar gering. Die Rohrnetzhydraulik kann daher durch eine Simulation ausreichend gut beschrieben werden.

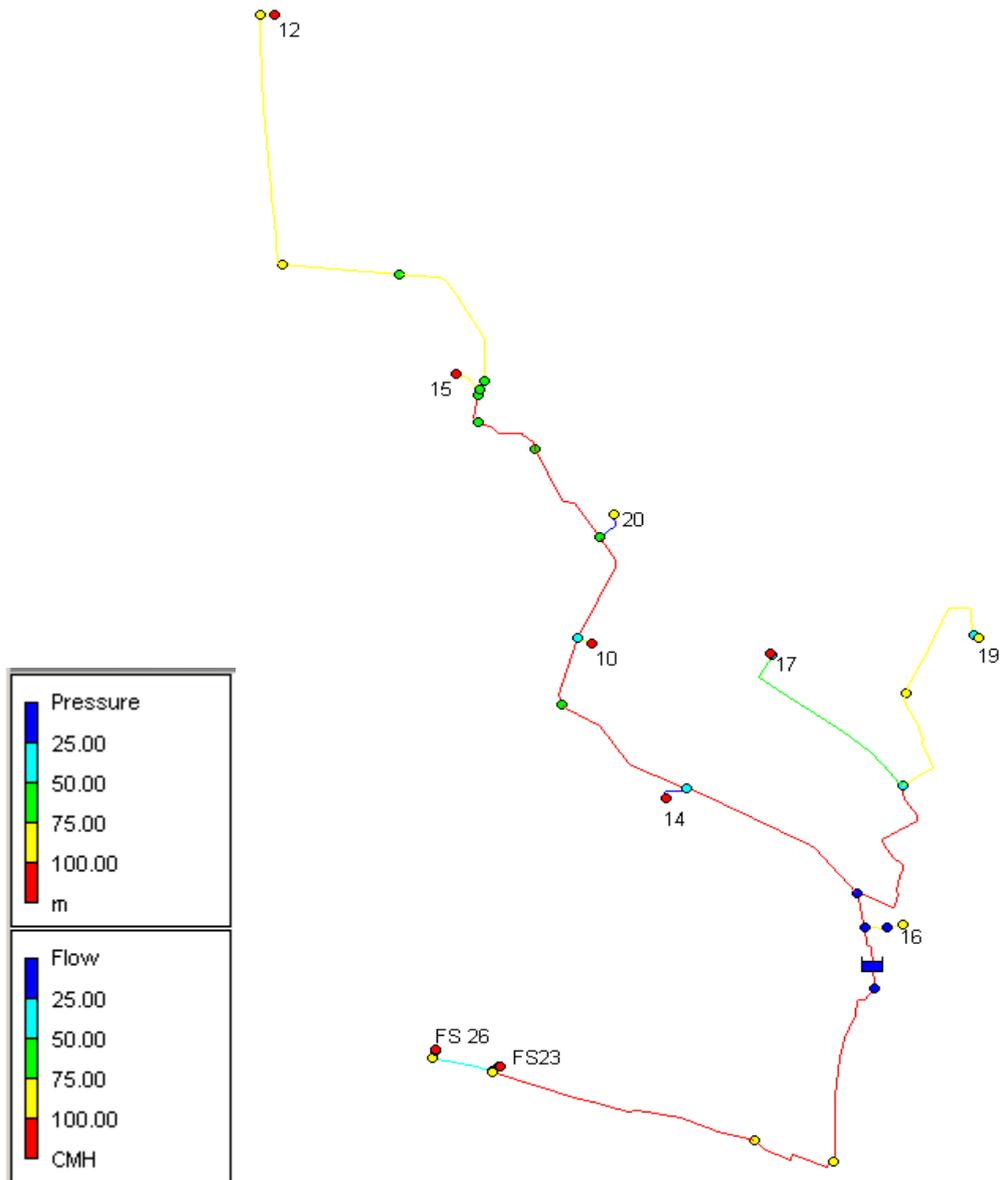


Abbildung 12: EPAnet Rohrnetzmodell, Entnahmesituation Februar 2012

### 3.3 Ist-Zustand der Wasserförderung des Wasserwerkes Boursberg

Insgesamt verfügt das WW Boursberg über eine wasserrechtliche Bewilligung von 740 m<sup>3</sup>/h, dies entspricht einer Entnahmemenge von ca. 6,5 Mio. m<sup>3</sup>/a. Da die Brunnen aus zwei verschiedenen Gesteinsschichten fördern ist das Wasserrecht zweigeteilt: Die Brunnen 10, 15, 16, 17, 19, 20, 23 und 26 sind im Quartär angesiedelt und auf insgesamt 650 m<sup>3</sup>/h beschränkt. Dabei ist der Brunnen 17 ein Reservebrunnen und darf nur als Ersatz für einen der übrigen Quartärbrunnen betrieben werden. Die Brunnen 12 und 14 ziehen Grundwasser aus der sogenannten oberen Braunkohlensande (OBKS), was dem Tertiär entspricht. Die beiden Gesteinsschichten sind durch eine nicht-wasserleitende Schicht von einander getrennt. Die wasserrechtliche Bewilligung beläuft sich hierbei auf 90 m<sup>3</sup>/h, wobei auch der Brunnen 14 als Reservebrunnen ausgelegt ist und daher nur einer der beiden Brunnen betrieben werden darf. Die wasserrechtliche Bewilligung und die aktuellen Entnahmemengen sind in Tabelle 1 dargestellt.

Tabelle 1: Entnahmesituation des WW Boursberg im Februar 2012

Brunnen	Genehmigung [m <sup>3</sup> /h]	Leistung [m <sup>3</sup> /h]	Tagesleistung [m <sup>3</sup> /d]	theoretische Jahresleistung [m <sup>3</sup> /a]
10	90	83	1.992	727.080
15	90	85	2.040	744.600
16	120	87	2.088	762.120
17	(80)	72,5	1.740	635.100
19	90	81	1.944	709.560
20	70	keine Förderung wegen Regenerierung		
23	90	81	1.944	709.560
26	90	48	1.152	420.480
12	90	78	1.872	683.280
14	(90)	0	0	0
Rohwasser ges.:	740	615,5	14.772	5.391.780

Die aktuellen Fließverluste und Förderhöhen werden aus den Fördermengen aus Tabelle 1 mittels EPAnet berechnet. Für den Brunnen 20 wurde zusätzlich eine Fördermenge von 68 m<sup>3</sup>/h angenommen. Dies entspricht seiner durchschnittlichen Förderleistung im März 2012. Die Auswirkungen der dadurch erhöhten Fließgeschwindigkeiten in den Sammelleitungen auf andere Brunnenpumpen sind so klein, dass sie in dem Beispiel vernachlässigt werden. Für den Brunnen 14 werden 88 m<sup>3</sup>/h Förderleistung angenommen, was der durchschnittlichen Förderleistung im Betrieb seit März 2010 entspricht. Die Berechnung für den Brunnen 14 wird ohne Förderleistung beim

Brunnen 12 durchgeführt. Die Fließverluste der einzelnen Rohwasserverbindungen sind in Tabelle 2 zusammengefasst. Im Rohwassernetz Bursberg entstehen die größten Reibungsverluste in den Steigleitungen der Brunnen. Diese sind verhältnismäßig klein (Innendurchmesser = 125 mm, vgl. Sammelleitungen: 600-800 mm) und lang (vgl. Tabelle 2), was nach Gleichung [9] (S. 14) zu hohen Reibungsverlusten führt.

Tabelle 2: Verlusthöhen der einzelnen Brunnen, Fördersituation ähnlich Februar 2012, berechnet mit EPAnet

Brunnen	Leistung Q [m³/h]	Förderhöhe H [m]	Reibungsverluste $H_v$ [m]	Länge der Steigleitung [m]	Verluste Steigleitung [m]	Anteil der Steigleitung an Verlusten [%]
10	83	111,3	6,0	78	4,4	79
15	85	118,7	3,7	60	3,2	86
16	87	95,6	5,7	64	4,3	75
17	72,5	112,5	6,2	72	3,1	50
19	81	95,0	7,4	51	2,8	38
20	(68)	102,0	3,2	42	1,7	43
23	81	120,3	3,3	33	1,9	58
26	48	122	1,8	36	0,8	44
12	78	105	3,0	24	1,5	50
14	(88)	108,8	5,5	75	4,8	87

Im Folgenden werden exemplarisch zwei Brunnen beschrieben, die Vorgehensweise zur Berechnung des aktuellen Wirkungsgrades der Pumpen erläutert und spezifische Förderkosten bestimmt. Die Auswahl der exemplarischen Brunnen erfolgt anhand folgender Kriterien:

Brunnen 10 ist im Gegensatz zu anderen Brunnen in letzter Zeit durchgehend betrieben worden und weist zudem starke Alterungserscheinungen auf. Im Brunnen 20 wurde in letzter Zeit ebenfalls kontinuierlich betrieben, an ihm wurde auf Grund der Alterungserscheinungen kürzlich eine Regenerierung vorgenommen. Eine tabellarische Auflistung der Eckdaten der restlichen acht Brunnen aggregiert in Kapitel 3.3.3.

Als derzeitiger Strompreis werden im Verlaufe dieser Arbeit 0,12 €/kWh angenommen (aktueller Strombezugspreis bei HAMBURG WASSER). Die Erdbeschleunigung  $g$  beträgt 9,81 m/s<sup>2</sup> und die spezifische Dichte von Wasser wird auf 1000 kg/m<sup>3</sup> gerundet.

### 3.3.1 Ist-Zustand Brunnen 10

Brunnen 10 wurde im Jahre 1967 gebaut und 1996 regeneriert. Die Geländeoberkante (GOK) liegt auf 55,0 mNN, das Filterrohr beginnt bei 103 m unter der Geländeoberkante (uGOK) und ist 36 m lang. Es handelt sich um einen gespannten Grundwasserleiter. Das Bohr- und Ausbauprofil von Brunnen 10 befindet sich in Anhang 2 (S. 79). Der Ruhewasserspiegel lag bei der letzten Messung im Jahr 1996 bei ca. 52,2 m uGOK, auf Grund der Entwicklung der Pegelstände der letzten Jahre wird er aktuell auf 47,2 m uGOK geschätzt. Die Einbautiefe der Pumpe beträgt 78 m uGOK. Im Januar 2003 wurde die Unterwassermotorpumpe Grundfos MMS8000 installiert. Der Auslegungspunkt weist 95 m<sup>3</sup>/h Fördermenge bei 97 m Förderhöhe aus. Der Gesamtwirkungsgrad von Pumpe und Motor für den Auslegungspunkt beträgt laut Pumpenkennlinie (vgl. Anhang 2, S. 90)  $\eta_{10} = 0,652$  bei einer Motorenleistungsaufnahme von 38,5 kW.

Seit März 2010 wurde ein Rückgang der Entnahmemenge um ca. 7 m<sup>3</sup>/h und ein Absinken des Betriebswasserstandes von ca. 5 m gemessen. Die spezifische Ergiebigkeit ist seit der Regenerierung 1996 von 9,3 m<sup>3</sup>/h/m auf 4,9 m<sup>3</sup>/h/m (Mittelwert März 2012) zurückgegangen. In Abbildung 13 ist eine starke Absenkung des Betriebswasserspiegels innerhalb kurzer Zeit zu erkennen. Nach längeren Ruhephasen steigt er kurzfristig wieder auf ein höheres Niveau.

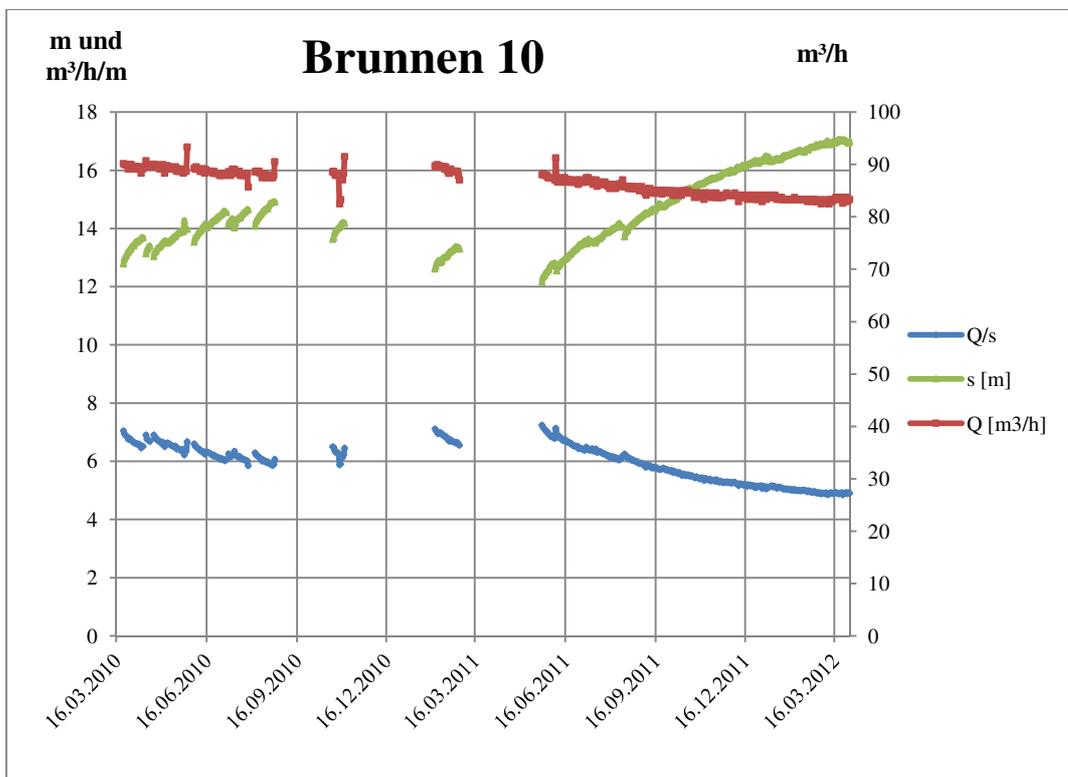


Abbildung 13: Fördermengen, Absenkungen und spezifische Ergiebigkeit von Brunnen 10

Der aktuelle Betriebspunkt (Stand Februar 2012) wurde anhand von Förderdaten (Betriebsstunden, Entnahmemengen, Wasserständen) und den in EPAnet ermittelten Rohrverlusten bestimmt. Er

weist eine Förderhöhe von 111,3 m bei einer Entnahmemenge von 83,2 m<sup>3</sup>/h auf. Laut der Kennlinie vom Pumpenprüfprotoll nach der Regenerierung würde der aktuelle Wirkungsgrad ca. 66 % betragen, was seinem Optimum entspricht. Die positive Entwicklung beruht auf einer eingeplanten Leistungsabnahme bei der Auslegung. Er wird sich jedoch mit großer Wahrscheinlichkeit über die Zeit durch Ablagerungen und Materialverschleiß verschlechtern haben. Die Pumpe weist laut Wasserwerksbetreiber Verockerungserscheinungen auf und von Materialabnutzung ist nach 9 Jahren Betrieb auszugehen. Um den derzeitigen Wirkungsgrad zu bestimmen, wird zuerst die Leistungsaufnahme P des Pumpenaggregates anhand von aktuellen, täglichen Stromverbräuchen berechnet:

$$P = \frac{W_V}{24 \text{ h}} \quad [\text{kW}] \quad [18]$$

$W_V$  Energieverbrauch der Pumpe pro Tag [kWh]

Aus Formel [1] und [3] kann der Wirkungsgrad  $\eta_{\text{ges}}$  des Aggregates inklusive seiner Leitungsverluste bestimmt werden:

$$\eta_{\text{ges}} = \frac{P_Q}{P} \quad [-] \quad [19]$$

Der Leistungsbedarf pro gefördertem Kubikmeter Wasser  $k_W$  wird entweder mittels der Stromverbräuche nach folgender Formel berechnet:

$$k_W = \frac{W_V}{Q \cdot 24 \text{ h}} \quad [\text{kWh/m}^3] \quad [20]$$

Oder theoretisch durch

$$k_W = \frac{\rho \cdot g \cdot H}{\eta_{\text{ges}} \cdot 3600 \cdot 1000} \quad [\text{kWh/m}^3] \quad [21]$$

Die spezifischen Förderkosten  $k_S$  ergeben sich aus

$$k_S = k_W \cdot k_E \quad [€/m^3] \quad [22]$$

$k_E$  Stromkosten [€/kWh]

Oder analog dazu aus

$$k_S = \frac{\rho \cdot g \cdot H}{\eta_{\text{ges}} \cdot 3600 \cdot 1000} \cdot k_E \quad [\text{€/m}^3] \quad [23]$$

Die Pumpe des Brunnens 10 verbrauchte im März 2012 durchschnittlich 932,39 kWh pro Tag. Damit ergibt sich ein aktueller Leistungsbedarf von  $P = 38,85$  kW und ein Gesamtwirkungsgrad von  $\eta_{10} = 0,650$ . Der Leistungsbedarf pro gefördertem Kubikmeter Wasser beläuft sich aktuell auf  $0,4669$  kWh/m<sup>3</sup>, damit ergeben sich bei einem Strompreis von 12 Cent/kWh spezifische Förderkosten von  $0,0560$  €/m<sup>3</sup>.

Ohne Berücksichtigung von Abschreibungskosten würde eine Fördermenge von  $2000$  m<sup>3</sup>, was der ungefähren Tagesleistung entspricht, Kosten in Höhe von  $112$  € verursachen.

### 3.3.2 Ist-Zustand Brunnen 20

Brunnen 20 wurde 2009 gebaut. Die Geländeoberkante befindet sich auf  $33,5$  mNN, das Filterrohr reicht von  $58,5$  bis auf  $68,5$  m uGOK. Die Steigleitung ist  $60$  m lang. Die Unterwasserpumpe wurde im September 2011 überholt. Es handelt sich um einen gespannten Grundwasserleiter. Das Bohr- und Ausbauprofil von Brunnen 20 befindet sich in Anhang 2 (S. 86). In Anhang 3 (S. 97 und 102) befinden sich die Pumpenkennlinie, sowie ein Pumpenprüftest vom September 2009. Der Auslegungspunkt der Pumpe weist  $70$  m<sup>3</sup>/h Fördermenge bei  $105$  m Förderhöhe aus. Die spezifische Ergiebigkeit lag damals bei  $7,1$  m<sup>3</sup>/h/m. Laut Wasserwerksbetreiber weist der Brunnen relativ starke Verockerungen auf. 2011 betrug die spezifische Ergiebigkeit im Mittel nur noch  $5,9$  m<sup>3</sup>/h/m was einer Restergiebigkeit von rund  $83\%$  entspricht. Im Jahre 2011 ist die Fördermenge von  $67$  m<sup>3</sup>/h auf  $63$  m<sup>3</sup>/h zurückgegangen. Nach ca. 14 Monaten Betrieb wurde im Januar und Februar 2012 eine Regenerierung durchgeführt. Nach der Regenerierung hatte die spezifische Ergiebigkeit den Anfangswert von  $7,1$  m<sup>3</sup>/h/m erreicht, sank jedoch innerhalb eines Monats wieder auf  $6,2$  m<sup>3</sup>/h/m ab. Nach der Regenerierung betrug die Fördermenge fast  $70$  m<sup>3</sup>/h, diese sank innerhalb eines Monats auf ca.  $68$  m<sup>3</sup>/h und es stellte sich ein Betriebswasserspiegel auf  $-2,3$  mNN (Stand März 2012) ein. Die daraus berechnete Gesamtförderhöhe beträgt  $102,0$  m. Der Pumpenwirkungsgrad beträgt für den aktuellen Betriebspunkt laut Pumpenkennlinie ca.  $77\%$ . Der Motorwirkungsgrad beträgt laut Hersteller  $83,0\%$  (Pleuger, 2008). Daraus ergäbe sich ein theoretischer Gesamtwirkungsgrad von  $\eta_{20, \text{theo}} = 0,639$ .

Da im Betriebspunkt sowohl die Förderhöhe, als auch die Förderleistung zurückgegangen sind ist davon auszugehen, dass sich der Wirkungsgrad verschlechtert hat. Der Stromverbrauch betrug nach der Regenerierung durchschnittlich  $797$  kWh/d. Laut Wasserwerksbetreiber ist jedoch ein Heizaggregat mit einer Leistung von  $2$  kW zwischen Strommesser und Pumpenmotor geschaltet,

welches bei einer Temperatur von weniger als 5°C automatisch anspringt. Auf Grund dessen wird für die Berechnung der Leistungsaufnahme der Pumpe der mittlere Verbrauch vom August 2011 verwendet (Fördermenge und –höhe stimmen in etwa mit den Werten vom März 2012 überein), der sich auf 783 kWh/d beläuft. Dies ergibt nach [19] einen Gesamtwirkungsgrad von  $\eta_{20} = 0,580$ , die spezifischen Förderkosten belaufen sich nach [23] auf 0,0580 €/m<sup>3</sup>.

Eine Fördermenge von 2000 m<sup>3</sup> würden 116 €, kosten.

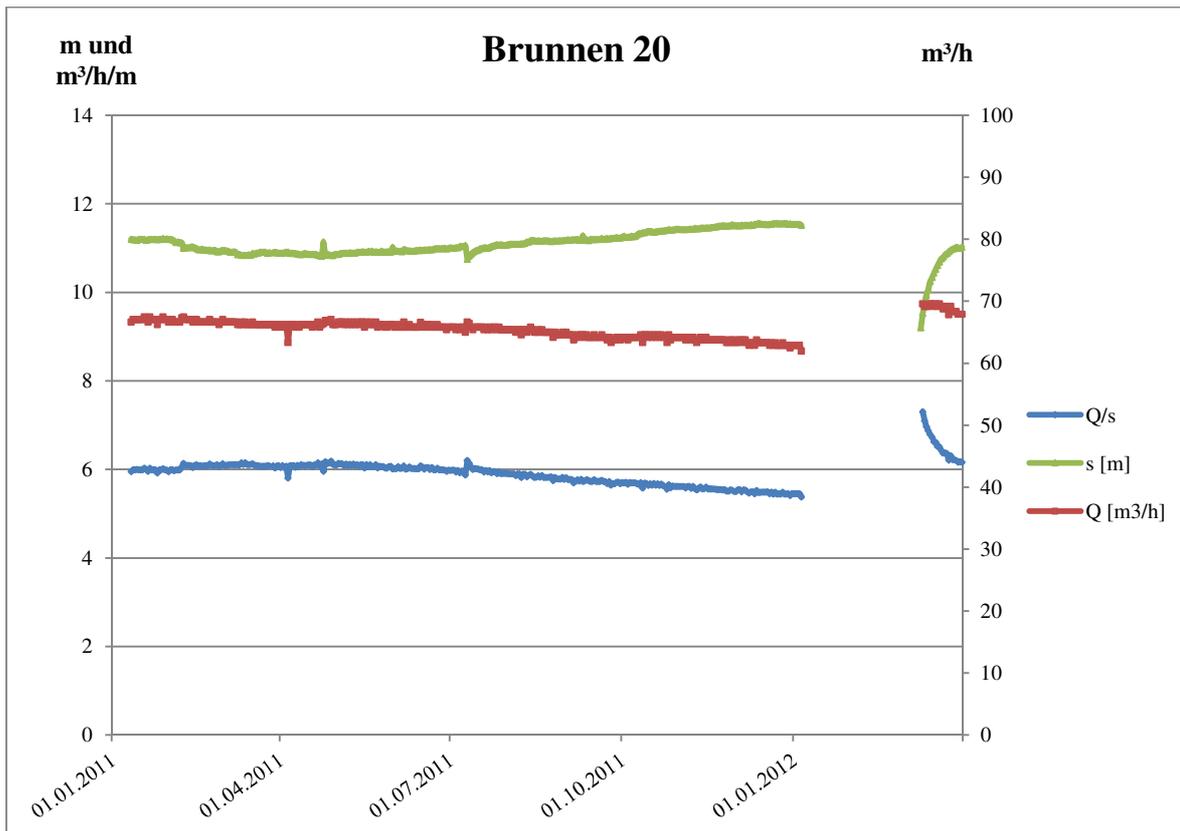


Abbildung 14: Fördermengen, Absenkungen und spezifische Ergiebigkeit von Brunnen 20

### 3.3.3 Zusammenfassung Ist-Zustand

In Tabelle 3 ist die spezifische Ergiebigkeit direkt nach Neubau angegeben, sowie die aktuell berechnete. Der aktuelle theoretische Wirkungsgrad wurde aus Hersteller-Kennlinien oder Pumpentests abgelesen und dem reellen an Hand von Energieverbräuchen berechneten Wirkungsgrad gegenübergestellt.

Brunnen 14 war im betrachteten Zeitraum nur unverhältnismäßig wenig (< 48 h/Monat) in Betrieb und wird daher nicht näher analysiert. Die Brunnen 16 und 19 befinden sich, im Gegensatz zu den anderen Brunnen, in ungespannten Grundwasserleitern und weisen einige Besonderheiten auf (vgl. Kapitel 3.4). Die Abbildung 15 und Abbildung 16 zeigen die spezifischen Ergiebigkeiten der Brunnen. Im Anhang 2 (S. 78 f.) befinden sich die Ausbauprofile der jeweiligen Brunnen. In den

Anhängen 3 und 4 befinden sich die Pumpenkennlinien und ggf. Pumpenprüfprotokolle, sowie Grafiken der Q-, s- und Q/s-Werte.

Tabelle 3: spezifische Ergiebigkeit, Wirkungsgrade und Förderkosten aller Brunnen

Br.	Bj.	Q/s [m³/h/m] Auslegung	Q/s [m³/h/m] aktuell	$\eta_{\text{gesamt}}$ nach Kennlinie	$\eta_{\text{gesamt}}$ berechnet	$k_S$ [€/m³]	Bemerkung
10	1967	9,3 (nach Regener.)	4,9	0,66	0,65	0,0560	Regenerierung 1996, Pumpe von 2003
15	1979	7,3	3,1	0,614	0,5890	0,0659	Pumpe von 2006, Werte aus 03/2012
16	2007	33,7	16,1	0,636	0,5507	0,0568	Pumpe von 2003, Werte aus 03/2012, <b>ungespannt</b>
17	1984	4,1	3,8	0,610	0,6070	0,0606	Pumpe 2003 überholt, Werte aus 03/2012
19	2008	32,8	14,5	0,653	0,6073	<b>0,0512</b>	starke Verockerung, Regenerierung nach 6 Monaten Betrieb, <b>ungespannt</b>
20	2009	7,1	6,2	0,639	0,58	0,0580	Regenerierung nach 14 Monaten Betrieb, Pumpe von 2008
23	1970	10,3	4,0	0,650	0,6228	0,0631	Pumpe von 2000, Werte aus 02/2012
26	1977	5,9	1,8	0,576	0,5606	<b>0,0712</b>	Pumpe von 12/2009, Werte aus 02/2012
12	1970	15,1	5,7	0,622	0,5966	0,0577	Q/s Auslegung von 1970, Pumpe von 2003, Verbrauchswerte aus 09/2011 wegen Heizung
14	1978	13,1	-	-	-	-	Betriebszeit < 48 h/Monat

Die spezifischen Kosten für die dargestellte Fördersituation aus Tabelle 1 belaufen sich im Mittel auf 0,0597 €/m³ bei einem spezifischen Stromverbrauch von 0,498 kWh/m³. Würde die aktuelle Fördersituation (vgl. Tabelle 1) unverändert fortgesetzt werden so betrüge die Jährliche Fördermenge 5,4 Mio. m³ zu Kosten in Höhe von 322.000 €.

Im Gegensatz zum Weiteren Verlauf der Arbeit handelt es sich hierbei ausschließlich um Energiekosten.

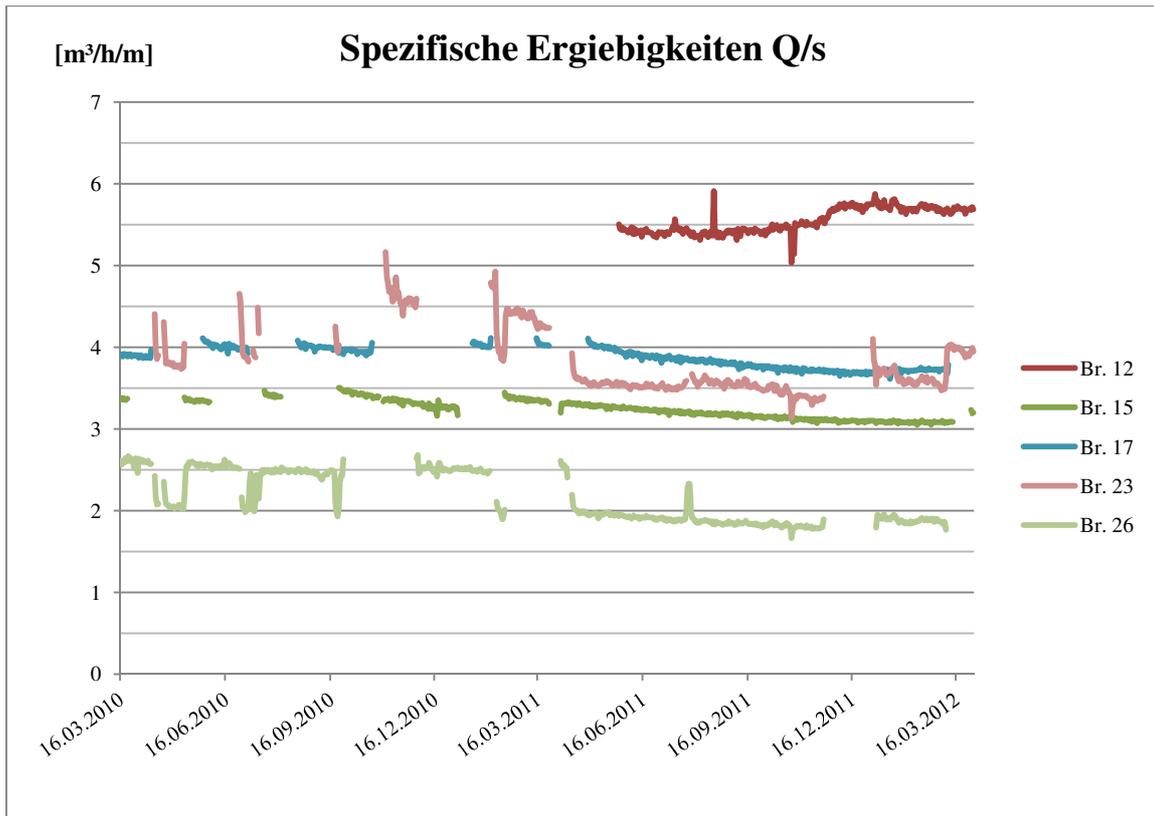


Abbildung 15: spezifische Ergiebigkeiten der Brunnen 12, 15, 17, 23, 26

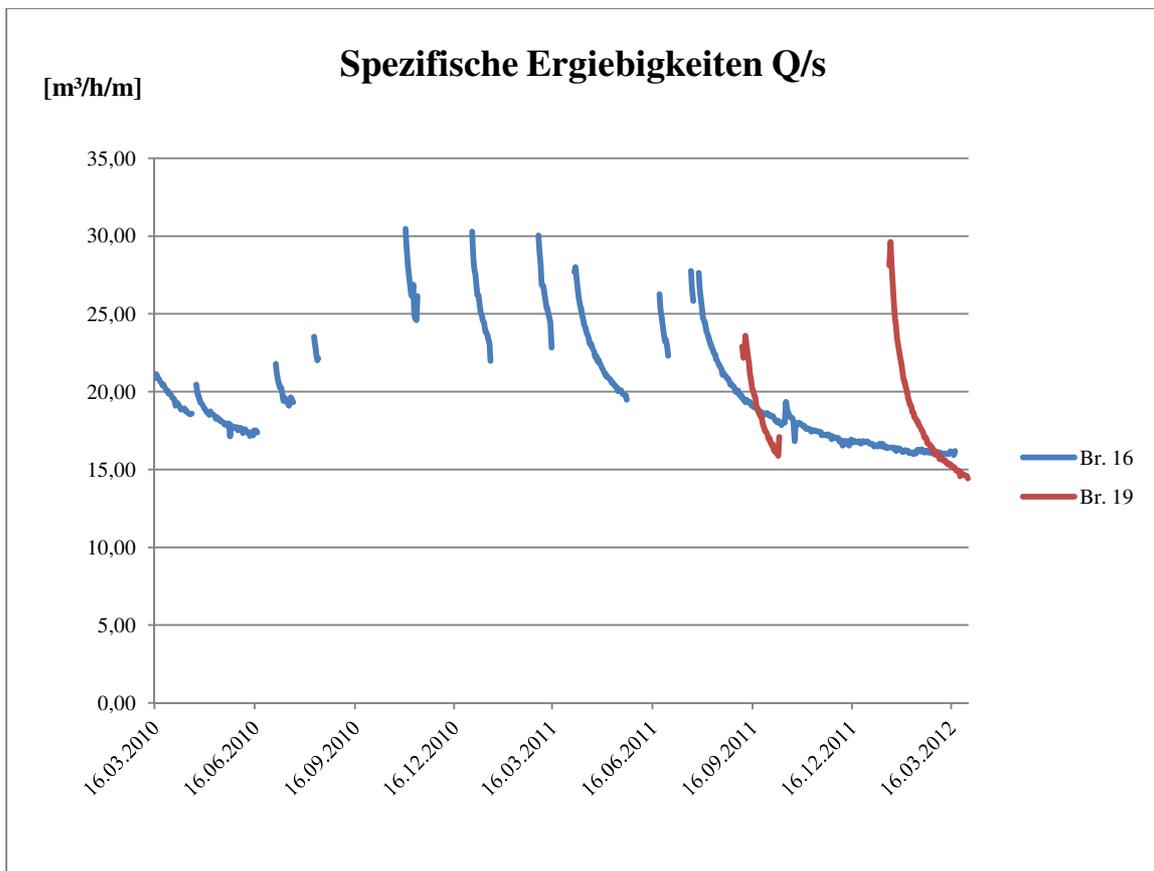


Abbildung 16: spezifische Ergiebigkeiten der Brunnen 16 und 19

Die Ergiebigkeitswerte des Brunnen 19 sind bis zum Herbst 2011 nicht korrekt erfasst wurden. Ursache hierfür ist ein Fehler in der automatischen Wasserstandserfassung mittels Drucksonden. Daher ist auch der erste Q/s-Wert des Brunnens im September 2011 nicht als repräsentativer Anfangswert einzustufen.

### 3.4 Fazit Ist-Zustand

Laut Wasserwerksbetreiber weisen alle Brunnen starke Alterungserscheinungen auf, die hauptsächlich auf Verockerung zurückzuführen sind. Die Analyse des Ist-Zustandes bestätigt diese Aussage (zumindest bezüglich der Alterungserscheinungen).

Bei allen Brunnen ist ein **deutlicher Rückgang der spezifischen Ergiebigkeit** seit ihrer Inbetriebnahme zu erkennen. Brunnen 26 erreicht nunmehr 31 % seiner ursprünglichen Ergiebigkeit, einzig Brunnen 17 und 20 weisen mit 93 % und 87 % ihrer Anfangswerte eine eher mäßig reduzierte Ergiebigkeit auf. Selbst neuere oder kürzlich regenerierte Brunnen (Brunnen 16, 19, 20) sind von deutlichen Alterungserscheinungen betroffen. Der Regeneriereffekt ist nur von kurzer Dauer (vgl. Brunnen 19 und 20). Abgesehen von Brunnen 12 ist die spezifische Ergiebigkeit bei allen Brunnen seit Anfang der Datenerhebung in den letzten zwei Jahren einem fallenden Trend unterlegen.

Auffallend ist ebenfalls der bei allen Pumpen auftretende **Unterschied zwischen dem theoretischen und dem realen Pumpenwirkungsgrad**. Dieser reicht von 1,5 % bei Brunnen 10 bis zu 13,5 % bei Brunnen 16. Dies ist kann auf Verschleiß oder die Alterung der jeweiligen Pumpen hinweisen. Da das Phänomen auch bei den neueren Pumpen (Brunnen 15) auftritt ist weniger von einem Verschleiß, als mehr von alterungsbedingten Ablagerungen auszugehen.

Das aktuelle Betriebskonzept sieht Betriebsunterbrechungen bei einzelnen Brunnen vor. Der längste kontinuierliche Betrieb dauerte ca. 11 Monate (Brunnen 15). Betriebsunterbrechungen führen im Allgemeinen zu einer verstärkten Verockerung auf Grund von verstärkter Sauerstoffzufuhr bei den Ein- und Abschaltvorgängen (Tholen, 2006) und sollten nach Möglichkeit vermieden werden.

In Abbildung 15 und dem Anhang 4 (S. 105 f.) ist zu erkennen, dass die spezifische Ergiebigkeit des **Brunnen 23** im März 2012 einen **plötzlichen Anstieg** aufweist, **nachdem Brunnen 26 außer Betrieb gesetzt wurde**. Dasselbe Phänomen ist im November 2010, sowie im Februar/März 2011 zu erkennen. Der Betriebswasserspiegel steigt um ca. 1 m und die Förderleistung nimmt um mehr

als 3 m<sup>3</sup>/h zu. Die Brunnen 23 und 26 wurden in einem Abstand von 180 m zueinander erstellt und im selben Grundwasserleiter verfiltert. Bei gleichzeitigem Betrieb beider Brunnen ist von einer hydraulischen Beeinflussung untereinander auszugehen. Das gleiche Phänomen ist bei Brunnen 17 und 19, jedoch in abgeschwächter Form, zu beobachten (vgl. Anhang 4, S. 104 f.).

In Abbildung 16 sind die Q/s-Werte der beiden Brunnen im ungespannten Grundwasserleiter dargestellt. Die Fördermengen und Absenkraten sind in Anhang 2 (S. 104 f.) dargestellt. Die **Ergiebigkeit sinkt innerhalb weniger Tage stark ab, regeneriert sich** jedoch bis zu einem gewissen Level, **sobald die Förderung unterbrochen wird**. Der Betriebswasserspiegel stellt sich in Brunnen mit ungespannten Grundwasserleitern generell langsamer auf ein quasistationäres<sup>1</sup> Niveau ein als bei jenen in gespannten Grundwasserleitern. Die Ursache hierfür ist eine geringere Fließgeschwindigkeit des Grundwassers auf Grund des geringeren Wasserdruckes (Langguth & Voigt, 1980). In Abbildung 16 ist zu sehen, dass die Q/s-Kurve zu jeder spezifischen Ergiebigkeit eine ungefähr konstante Steigung aufweist. Die Anfangs- und Endpunkte der einzelnen Kurvenabschnitte hängen hauptsächlich von der Dauer der Förderung und dem vorherigen Stillstand ab.

Entweder vergeht im Falle der Brunnen 16 und 19 ungewöhnlich lange Zeit bis zur Einstellung eines quasistationären Zustandes oder der Wasserdrang aus dem tertiären Aquifer ist geringer als die Entnahmemenge. Langfristig ist hierdurch ein weiteres Absinken des Wasserstandes zu erwarten, bis sich wieder ein Gleichgewichtszustand einstellt.

Trotz der starken Alterungserscheinung (Rückgang Pumpenwirkungsgrad, etc.) und der oben genannten Auffälligkeiten, weisen die Brunnen 16 und 19 die geringsten spezifischen Stromverbräuche auf und sind somit, neben Brunnen 10, die wirtschaftlichsten Brunnen im aktuellen Betrieb. Grund hierfür sind die geringeren Förderhöhen, bzw. die hohen Betriebswasserstände.

Der Wasserstand des **Brunnen 16** lag Ende März 2012 1 m über der U-Pumpe. Falls die Pumpe trockenläuft wird sowohl die Förderung unterbrochen, als auch die Pumpe auf Grund ausbleibender Kühlwirkung beschädigt. Um zu verhindern, dass der Betriebswasserspiegel den Pumpeneinlauf erreicht wird in den folgenden Szenarien die **Pumpenleistung gedrosselt**.

---

<sup>1</sup> kurzfristig stationär, langfristig dynamisch

## 4. Szenarien für ein zukünftiges Förderkonzept

Laut Wasserwerksbetreiber soll die zukünftige Fördermenge für 90 % des Jahres 520 m<sup>3</sup>/h betragen, für die restlichen 10 % wird von einer Spitzenlast von 700 m<sup>3</sup>/h ausgegangen. Da das Rohwasser nach der Aufbereitung in die Wassertanks fließt und dort zwischengelagert wird ist ein Puffer vorhanden, der gewisse Abweichungen der stündlichen Fördermenge ausgleicht. Als Mindestfördermenge sollen 95 % des Richtwertes gelten. Eine Abweichung hin zu höheren Fördermengen kann durch das Abschalten eines oder mehrerer Brunnen korrigiert werden und wird hier nicht weiter berücksichtigt.

In den folgenden Kapiteln werden drei Förderkonzepte ausgearbeitet und miteinander verglichen, die sowohl realistisch und praktisch umsetzbar sind, als auch den Anforderungen des Förderkonzeptes genügen.

### 4.1 Vorgehensweise und Zielsetzung

Szenario 1 ist die Weiterführung des aktuellen Förderkonzeptes, wofür Förderhöhen, Fördermengen und Wirkungsgrade der einzelnen Brunnen über die nächsten 10 Jahre prognostiziert und die berücksichtigten Investitionen so gering wie möglich gehalten werden. Danach werden auf Grundlage der Ergebnisse aus Kapitel 3 und Szenario 1 optimierte Betriebsszenarien entwickelt, worin Empfehlungen zu Pumpenzyklen, technischen Ausrüstungen und einer optimierten Brunnensteuerung unter Berücksichtigung der Wirtschaftlichkeit gegeben werden. Als Bewertungs- bzw. Betrachtungszeitraum wurden 10 Jahre gewählt, weil die Abschreibungsdauer für Pumpen und andere Maschinenteile bei HAMBURG WASSER 10 Jahre beträgt. Die Bewertung der Förderkonzepte gliedert sich in zwei Betrachtungsebenen:

#### 1. Förderbrunnen

Zur Sicherstellung eines nachhaltigen und energetisch optimierten Betriebes der einzelnen Förderbrunnen erfolgt eine Einzelbetrachtung der aktiven Brunnen.

- Brunnenprognose (spez. Ergiebigkeit, Fördermenge Absenkraten, Beeinflussung benachbarter Brunnen)
- Prognose des Pumpenwirkungsgrades

## 2. Gesamtfassung

Der Szenarienvergleich erfolgt letztendlich in einer Gesamtbetrachtung der ausgearbeiteten Förderszenarien der einzelnen Brunnen. Die Gesamtbetrachtung ist notwendig um eine durch bestimmte Brunnensteuerung bewirkte Kosteneinsparung zu berücksichtigen.

- Brunnensteuerung
- Gesamtenergiekosten
- Aufteilung in unterschiedliche Förderszenarien (Standard und Spitzenlast)

Im Folgenden wird Brunnen 14 auf Grund der unzureichenden Datenerhebung und der geringen Betriebszeiten nicht weiter analysiert. Da er nur als Ersatzbrunnen betrieben wird, wird davon ausgegangen, dass sich die Energiekosten ähnlich des Brunnen 12 verhalten. Es werden einzig Investitionskosten für den Einbau einer Pumpe innerhalb der nächsten zehn Jahre angenommen.

## 4.2 Szenario 1: Weiterführung des Ist-Zustandes

Szenario 1 beschreibt die Weiterführung des Ist-Zustandes über die nächsten 10 Jahre. Der Strompreis beträgt aktuell 12 Cent/kWh, es wird von einer Strompreiserhöhung von 0,5 Cent/a ausgegangen (vgl. Erneuerbare Energien Verbraucherportal, 2012). Die durchschnittliche Pumpenlebensdauer wird entsprechend dem Abschreibungszeitraum auf 10 Jahre geschätzt, danach wird die Pumpe saniert oder ersetzt. Im Folgenden werden nur die Energie- und Investitionskosten berücksichtigt, da davon auszugehen ist, dass Wartungs- und Personalkosten in beiden Szenarien nahezu identisch sind. Die Abschreibungsdauer von Maschinenteilen beträgt bei HAMBURG WASSER 10 Jahre und wird linear bei einem Zinssatz von 5 % ( $Z = 1,05$ ) abgeschrieben. Die Jahresgesamtkosten ergeben sich aus den Energie- und Investitionskosten des betrachteten Zeitraumes, sowie dem Annuitätenfaktor  $A_F$ .

$$\text{Jahresgesamtkosten} = \text{Gesamt-Energiekosten}/10 + \text{Investitionskosten} * A_F \quad [24]$$

$$A_F = \frac{Z-1}{1-Z^\tau} \quad [1/a] \quad [25]$$

$\tau$  Abschreibungszeitraum [a]

$Z$  Zinssatz [-]

Aufgrund der schlechten Regenerierergebnisse der letzten Jahre (vgl. Kapitel 3) und der Tatsache, dass eine Regenerierung spätestens nach 10 % Rückgang der spezifischen Ergiebigkeit vorgenommen werden sollte (vgl. Kapitel 2.5.2), wird davon ausgegangen, dass in Szenario 1 keine weiteren Brunnenregenerierungen vorgenommen werden. Die mittlere jährliche Betriebszeit betrage 90 %, basierend auf langjähriger Betriebserfahrung, und schließt Wartungs- und sonstige Ausfälle mit ein. In den folgenden Kapiteln wird die prognostizierte Entwicklung der Brunnen 10, 15 und 20 ausführlich beschrieben. Diese decken die drei Möglichkeiten - Austausch, Regenerierung und Beibehaltung der Pumpe – ab und stellen die Vorgehensweise der Szenarienberechnung dar. In Kapitel 4.2.5 folgt eine Zusammenfassung der restlichen Brunnen.

### 4.2.1 Brunnen 10

In Abbildung 17 ist die 10-Jahres-Prognose der Absenkungen, Förderraten und Ergiebigkeiten des Brunnen 10 zu sehen, welche durch logarithmische Trendlinien und der dazugehörigen Formeln entwickelt wurden. Die logarithmischen Trendlinien wurden gewählt, weil sie den bisherigen Verlauf der Graphen gut abbilden und davon auszugehen ist, dass die Absenkungen und

Förderraten sich einem stationären Niveau annähern, weil ein Brunnen selten komplett „versiegelt“. Die Prognose wurde anhand der Daten ab dem 23.05.2011 erstellt, da der Brunnen seitdem ununterbrochen in Betrieb war, vorher jedoch starken Betriebsschwankungen ausgesetzt war.

Aus den Graphen der Prognose wurden mittlere Jahreswerte der Absenkungen und Fördermengen berechnet und daraus die mittlere jährliche Förderhöhe bestimmt. Der spezifische Stromverbrauch wird nach Gleichung [21] (S. 32) berechnet, die spezifischen Förderkosten nach Gleichung [22] (S. 22). Da die Pumpe für den Betriebspunkt einen guten Wirkungsgrad aufweist wird sie nach einem Jahr (insgesamt 10 Betriebsjahren) regeneriert, um ihrem natürlichen Zerfall durch den Betrieb entgegenzukommen.

Der Betriebspunkt der aktuellen Pumpe würde sich nach 10 Jahren noch immer im optimalen Wirkungsgradbereich befinden (Optimum +/- 2%) und der aktuelle reelle Wirkungsgrad ist unwesentlich geringer als der theoretische (vgl. Tabelle 3). Die Pumpe weist nur geringe Alterungserscheinungen auf, deshalb wird für die neue Pumpe von einem durch Alterung und Betriebspunktverschiebung bedingtem Wirkungsgradabfall von 0,5 %/a bei einem Anfangswirkungsgrad des Pumpenaggregates von 66 % ausgegangen. Obwohl Brunnen 10 im zweijährigen Betrachtungszeitraum aus Kapitel 3 nur ca. 60 % der Zeit betrieben wurde wird unter Anbetracht des angestrebten Förderkonzeptes von einer mittleren Betriebsdauer von 90 % ausgegangen. In Tabelle 4 sind die durchschnittlichen Jahreswerte der Fördermenge Q, Förderhöhe H, des Gesamtwirkungsgrades des Pumpenaggregates, des spezifischen Stromverbrauchs und der spezifischen Stromkosten, sowie die jährliche Fördermenge und die jährlichen Energiekosten für den Zeitraum der Prognose gelistet.

Tabelle 4: Szenario1, 10-Jahres-Prognose Brunnen 10

Jahr	Q	H	$\eta_{ges}$	kw [kWh/m³]	Strompreis [€]	ks [€/m³]	m³/a	Kosten [€/a]
1	82,9	111,9	0,6468	0,4713	0,1200	0,0566	653.631	36.966
2	82,2	112,6	0,6600	0,4648	0,1250	0,0581	647.727	37.632
3	81,7	113,0	0,6567	0,4690	0,1300	0,0610	644.041	39.266
4	81,3	113,4	0,6534	0,4727	0,1350	0,0638	641.347	40.929
5	81,1	113,6	0,6501	0,4761	0,1400	0,0667	639.226	42.609
6	80,9	113,8	0,6469	0,4795	0,1450	0,0695	637.478	44.326
7	80,7	114,0	0,6437	0,4828	0,1500	0,0724	635.989	46.061
8	80,5	114,2	0,6404	0,4858	0,1550	0,0753	634.693	47.793
9	80,4	114,3	0,6372	0,4889	0,1600	0,0782	633.546	49.563
10	80,2	114,4	0,6341	0,4918	0,1650	0,0811	632.518	51.328
						Summe:	6.400.194	436.474

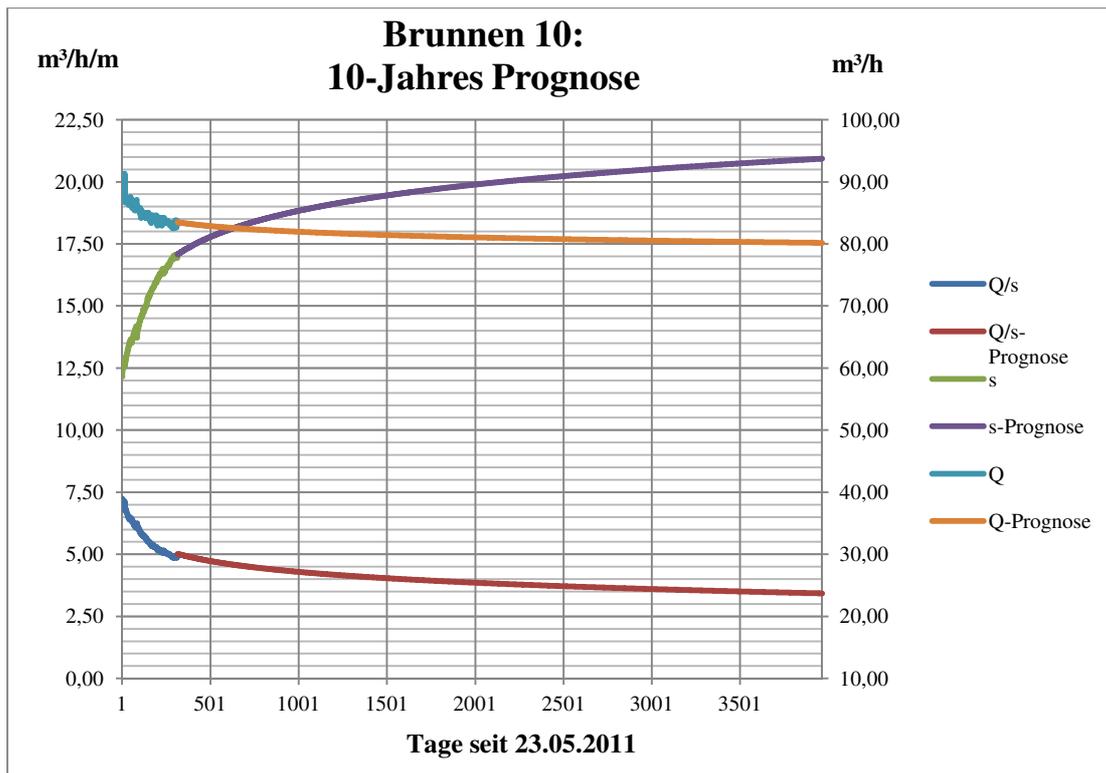


Abbildung 17: Szenario 1, 10-Jahres-Prognose Brunnen 10 ohne Pumpenwechsel

Als Investitionskosten werden für den gesamten Zeitraum 5.000 € angenommen, bestehend aus 2.000 € für die Pumpeninstandsetzung und 3.000 € für den Aus- und Wiedereinbau der Pumpe (beides Erfahrungswerte bei HAMBURG WASSER). Die Energiekosten betragen insgesamt 436.000 €. Unter der Annahme, dass sich die Betriebs-, Wartungs- und Personalkosten der verschiedenen Szenarien nur unwesentlich unterscheiden, werden keine weiteren Kosten berücksichtigt. Die Abschreibungsdauer beträgt 10 Jahre, bei einem Jahreszins von 5 %. Der Abschreibungsfaktor  $A_F$  beträgt 0,1295 1/a.

Tabelle 5: Szenario 1, Jahreskosten Brunnen 10

Kostenart	Jahreskosten [€/a]	Anteil an Gesamtkosten [%]
Jahres-Investitionskosten	650	1
Jahres-Energiekosten	43.647	99
Jahres-Gesamtkosten	44.295	100

Der durchschnittliche spezifische Stromverbrauch wird wie folgt berechnet:

$$\frac{\sum_{i=1}^{10} (Q_i * k_{w,i})}{\sum_{i=1}^{10} Q_i} \quad [\text{kWh/m}^3] \quad [26]$$

$Q_i$	Jahresfördermenge [ $\text{m}^3$ ]
$k_{w,i}$	Jahresmittel spezifischer Stromverbrauch [ $\text{kWh/m}^3$ ]
$i$	Jahr der Prognose [-]

Er beträgt im Durchschnitt **0,478 kWh/m<sup>3</sup>**. Die durchschnittlichen spezifischen Förderkosten ergeben sich aus dem Quotienten der Gesamtkosten und der gesamten Fördermenge über die 10 Jahre. Sie betragen **0,0692 €/m<sup>3</sup>**. Insgesamt werden in den zehn Jahren 6.400.000 m<sup>3</sup> Rohwasser zu Kosten in Höhe von 443.000 € gefördert.

#### 4.2.2 Brunnen 15

Der Brunnen 15 wurde vom 15.02.2011 bis zum 13.03.2012 ohne Unterbrechung betrieben. Die Daten aus dem Zeitraum dienen als Grundlage für die Prognose. Im vierten Jahr der Prognose (insgesamt 10 Pumpen-Betriebsjahre) wird eine Pumpe eingebaut, die auf den neuen Betriebspunkt angepasst ist. Abbildung 19 stellt das Pumpenkennliniendiagramm einer auf den Betriebspunkt abgestimmten Pumpe dar. Bei einer Förderhöhe von 122 m würde der Förderstrom 96 m<sup>3</sup>/h betragen, der Wirkungsgrad betrage 66,1 %. Die Fördermengen und Absenkraten der neuen Pumpe wurden wie folgt abgeschätzt:

In den bisherigen sechs Betriebsjahren der aktuellen Pumpe ist eine Differenz zwischen dem theoretischen und realen Wirkungsgrad von  $\Delta\eta=0,025$  entstanden (vgl. Tabelle 3). Daher wird pauschal von einem altersbedingten Wirkungsgradverlust von  $\Delta\eta=0,005$  pro Jahr ausgegangen. Da sich der Wirkungsgrad bis zu einer Förderleistung von ca. 90 m<sup>3</sup>/h jedoch noch verbessern würde (siehe Abbildung 19), wird erst nach drei Jahren von einem Rückgang des Wirkungsgrades ausgegangen. Vom Februar 2011 bis März 2012 ist die Fördermenge der jetzigen Pumpe um 3 m<sup>3</sup>/h zurückgegangen, bei einer weiteren Zunahme der Betriebswasserspiegelabsenkung von 1,5 m. Weil der Rückgang der Fördermenge mit der Zeit geringer wird, wird bei der neuen Pumpe von einem Förderstromrückgang von 2 m<sup>3</sup>/h im ersten Jahr, 1 m<sup>3</sup>/h im zweiten und 0,5 m<sup>3</sup>/h in den letzten Jahren ausgegangen. Aus den Q/s-Werten, die proportional zum Förderstrom sind (vgl. Kapitel 2.5), wird der Betriebswasserspiegel und daraus in EPAnet die jeweilige Förderhöhe berechnet.

#### 4. Zukünftiges Förderkonzept, Szenario 1

Tabelle 6: Szenario1, 10-Jahres-Prognose Brunnen 15 mit Pumpenwechsel im 2. Jahr

Jahr	Q	H	$\eta_{ges}$	kw [kWh/m <sup>3</sup> ]	Strompreis [€]	ks [€/m <sup>3</sup> ]	m <sup>3</sup> /a	Kosten [€/a]
1	83,9	119,1	0,587	0,5529	0,1200	0,0663	661.813	43.909
2	83,4	119,3	0,582	0,5586	0,1250	0,0698	657.137	45.883
3	83,0	119,5	0,577	0,5644	0,1300	0,0734	654.030	47.984
4	82,7	119,8	0,572	0,5707	0,1350	0,0770	651.693	50.212
5	96,0	124,8	0,660	0,5153	0,1400	0,0721	756.864	54.599
6	94,0	124,1	0,660	0,5124	0,1450	0,0743	741.096	55.060
7	93,0	123,8	0,660	0,5111	0,1500	0,0767	733.212	56.217
8	92,5	123,8	0,655	0,5150	0,1550	0,0798	729.270	58.219
9	92,0	123,6	0,650	0,5182	0,1600	0,0829	725.328	60.135
10	91,5	123,5	0,645	0,5218	0,1650	0,0861	721.386	62.105
						Summe:	7.031.828	534.322

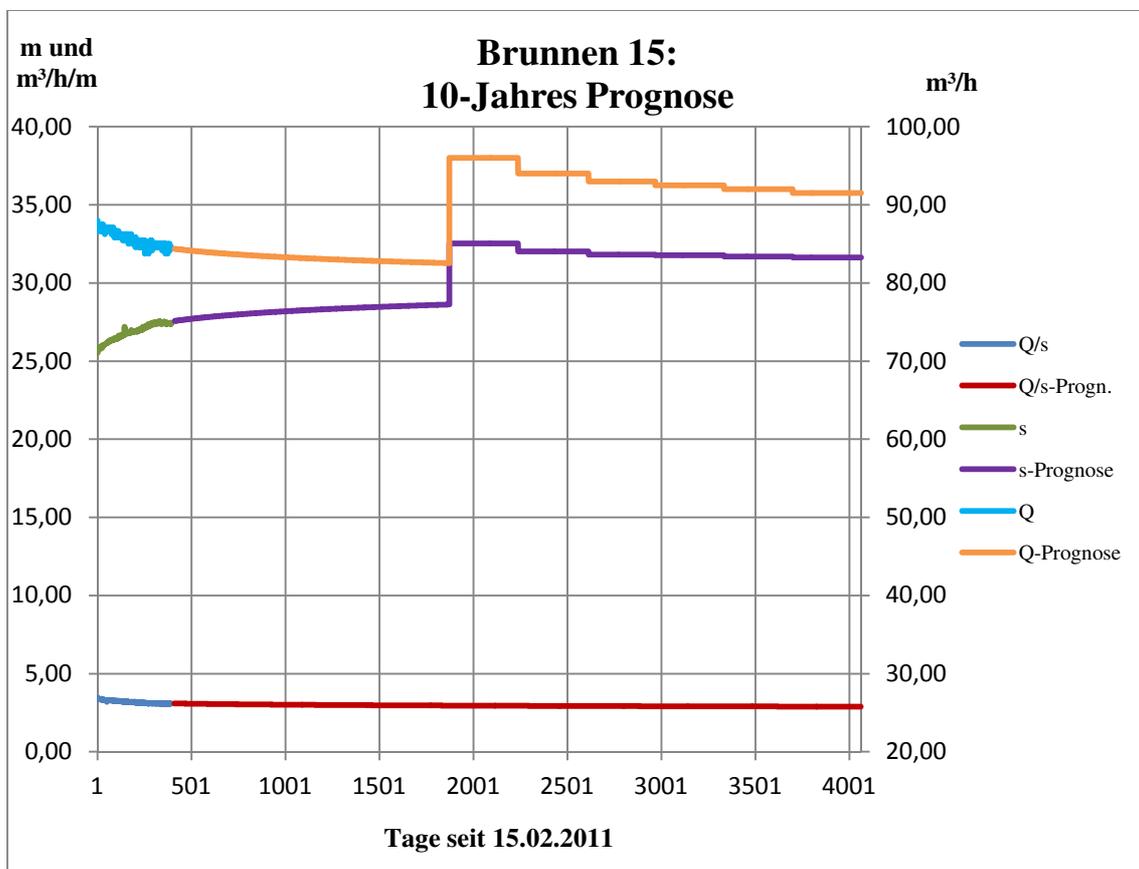


Abbildung 18: Szenario1, 10-Jahres-Prognose Brunnen 15

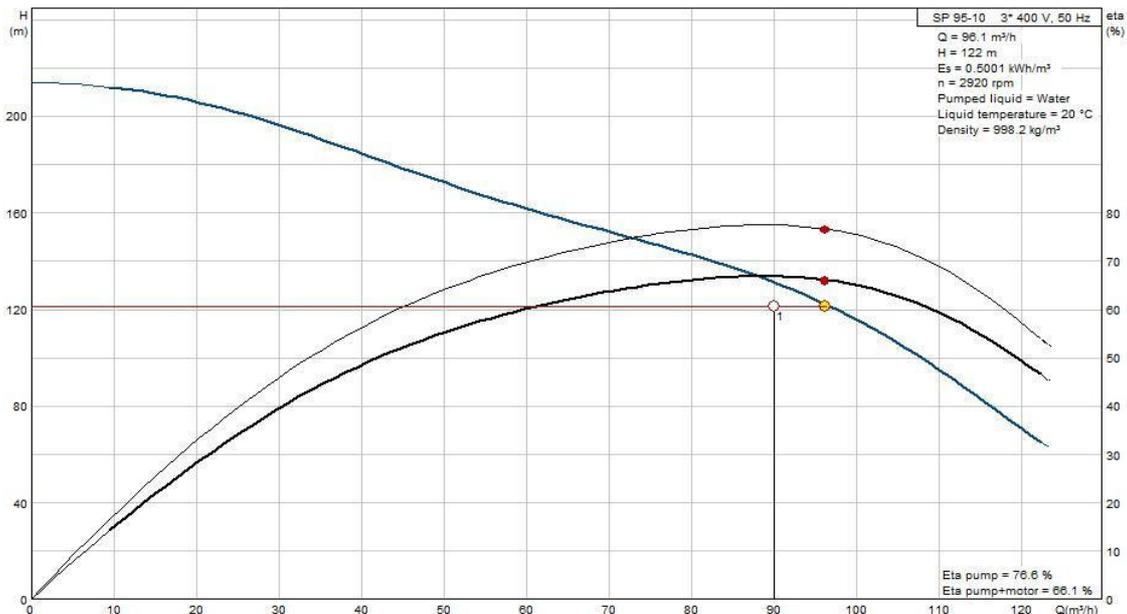


Abbildung 19: Szenario 1, neue Pumpe Brunnen 15

Die Investitionskosten belaufen sich auf 15.000 €, bestehend aus 12.000 € für die Anschaffung (Produktlistenpreis) und 3.000 € für den Einbau der neuen Pumpe.

Tabelle 7: Szenario 1, Jahreskosten Brunnen 15

Kostenart	Jahreskosten [€/a]	Anteil an Gesamtkosten [%]
Investitionskosten	1940	3
Energiekosten	53.430	97
Gesamtkosten	55.370	100

Der spezifische Stromverbrauch beträgt im Durchschnitt **0,533 kWh/m<sup>3</sup>**. Die durchschnittlichen spezifischen Förderkosten betragen **0,0787 €/m<sup>3</sup>**. Insgesamt werden in den zehn Jahren 7.032.000 m<sup>3</sup> Rohwasser für 554.000 € gefördert.

### 4.2.3 Brunnen 20

Für den Brunnen 20 liegen seit seiner Regenerierung Messwerte vom 10.03.2012 bis zum 31.03.2012 vor. Trotz des vergleichsweise kurzen Betrachtungszeitraumes ist ein deutlicher Trend zu erkennen (vgl. 3.3.2). Die Prognosen wurden analog zu Kapitel 4.2.1 und 4.2.2 berechnet. Nach drei Jahren Pumpenbetrieb, im Juni 2011, betrug der reelle Pumpenwirkungsgrad ca. 88 % vom theoretischen. Daher wird von einem Pumpenwirkungsgradverlust von 4 %/a ausgegangen. Da die Pumpe im Oktober 2011 überholt wurde, wird keine neue Pumpe eingebaut (Annahme: Lebensdauer 11 Jahre) und es fallen keine weiteren Investitionskosten an.

#### 4. Zukünftiges Förderkonzept, Szenario 1

Tabelle 8: Szenario 1, 10-Jahres-Prognose Brunnen 20

Jahr	Q	H	$\eta_{\text{ges}}$	kw [kWh/m <sup>3</sup> ]	Strompreis [€]	ks [€/m <sup>3</sup> ]	m <sup>3</sup> /a	Kosten [€/a]
1	63,7	103,8	0,5800	0,4877	0,1200	0,0585	502.291	29.395
2	61,3	104,6	0,5568	0,5119	0,1250	0,0640	483.489	30.938
3	60,3	104,9	0,5345	0,5348	0,1300	0,0695	475.520	33.059
4	59,6	105,1	0,5131	0,5581	0,1350	0,0753	470.279	35.434
5	59,2	105,3	0,4926	0,5825	0,1400	0,0815	466.360	38.030
6	58,8	105,4	0,4729	0,6073	0,1450	0,0881	463.225	40.793
7	58,4	105,5	0,4540	0,6332	0,1500	0,0950	460.613	43.751
8	58,1	105,5	0,4358	0,6596	0,1550	0,1022	458.374	46.864
9	57,9	105,6	0,4184	0,6878	0,1600	0,1100	456.414	50.224
10	57,7	105,7	0,4017	0,7171	0,1650	0,1183	454.673	53.797
						Summe:	4.691.238	402.285

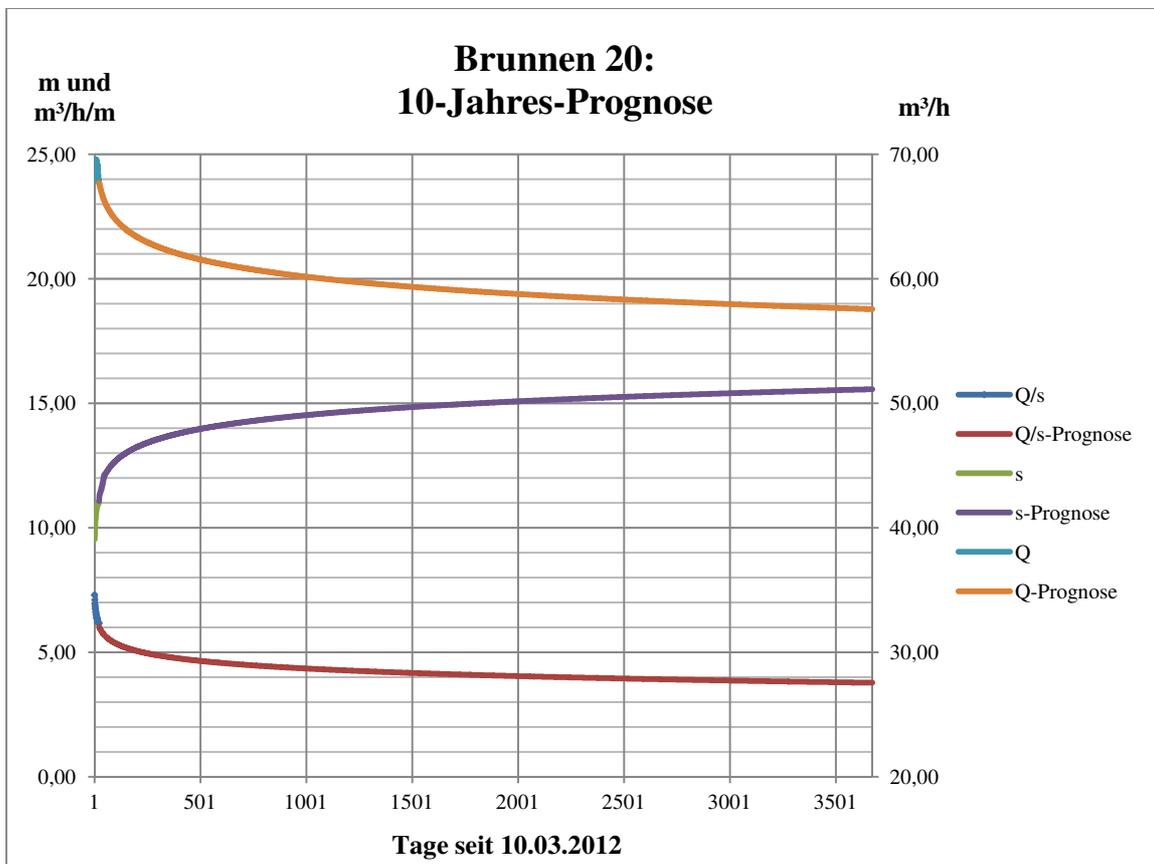


Abbildung 20: Szenario 1, 10-Jahres-Prognose Brunnen 20

Tabelle 9: Szenario 1, Jahreskosten Brunnen 20

Kostenart	Jahreskosten [€/a]	Anteil an Gesamtkosten [%]
Investitionskosten	0	0
Energiekosten	40.200	100
Gesamtkosten	40.200	100

Der spezifische Stromverbrauch beträgt im Durchschnitt **0,596 kWh/m<sup>3</sup>**. Die durchschnittlichen spezifischen Förderkosten betragen **0,0858 €/m<sup>3</sup>**. Insgesamt werden in den zehn Jahren 4.690.000 m<sup>3</sup> Rohwasser für Kosten in Höhe von 402.000 € gefördert.

#### 4.2.4 Brunnen 16

Auf Grund der starken Wasserspiegelabsenkung des Brunnen 16 würde die Pumpe spätestens im vierten Jahr der Prognose trockenfallen. Die U-Pumpe hängt bereits kurz über dem Filterrand und kann deswegen nicht tiefer eingebaut werden. Daher muss die Fördermenge reduziert werden. Die Steigleitung im Brunnen 16 ist 69 m lang, die Pumpenoberkante liegt auf einer Höhe von 5,5 mNN. Die prognostizierte spezifische Ergiebigkeit beträgt in zehn Jahren 9,30 m<sup>3</sup>/h/m, entsprechend 28 % ihrer Restergiebigkeit. Unter der Annahme von 1 m Sicherheitsabstand zwischen Betriebswasserspiegel und Pumpe darf die maximale Fördermenge zu diesem Zeitpunkt 50 m<sup>3</sup>/h nicht überschreiten.

#### 4.2.5 Szenario 1, Zusammenfassung

In der folgenden Tabelle sind die durchschnittlichen spezifischen Stromverbräuche, die durchschnittlichen spezifischen Förderkosten sowie die Gesamtkosten (Energie- und Abschreibungskosten) der einzelnen Brunnen über die zehn Jahre gelistet. Eine Szenarienbeschreibung der einzelnen Brunnen inklusive Tabellen und Grafiken befindet sich in Anhang 5 (S. 107 ff.).

Tabelle 10: Zusammenfassung Szenario 1:  $k_w$  und  $k_s$  gemittelt, Fördermenge und Kosten über 10 Jahre

Brunnen	$k_w$ [kWh/m <sup>3</sup> ]	$k_s$ [€/m <sup>3</sup> ]	Fördermenge [m <sup>3</sup> ]	Kosten [€]
10	0,478	0,0692	6.400.194	442.950
12	0,454	0,0675	6.721.397	453.392
14	-	-	nur Invest. Kost.	19.426
15	0,533	0,0787	7.031.828	553.748
16	0,420	0,0650	3.833.804	249.223
17	0,512	0,0761	6.291.080	478.601
19	0,478	0,0718	5.606.938	402.781
20	0,596	0,0858	4.691.238	402.285
23	0,537	0,0792	7.048.514	558.259
26	0,596	0,0900	3.741.618	336.654
Summe (ohne Br. 17):			45.075.531	3.438.142

Für die Berechnung der gesamten Fördermenge („Summe (ohne Br. 17)“) der Brunnenfassung werden Brunnen 14 und 17 nicht mit berücksichtigt, da sie die Ersatzbrunnen sind. Für die Berechnung der Gesamtkosten werden lediglich die Investitions- und Zinskosten der Brunnen 14 und 17, jeweils 19.426 €, mit einbezogen. Die mittlere Fördermenge  $Q_{\text{mittel}}$  (vgl. Abbildung 21) wird berechnet durch:

$$Q_{\text{mittel}} = \frac{\text{gesamte Fördermenge}}{365 \frac{\text{Tage}}{a} * 24 \frac{\text{h}}{\text{Tag}} * 10 a * 90 \frac{\%}{a}} \quad [27]$$

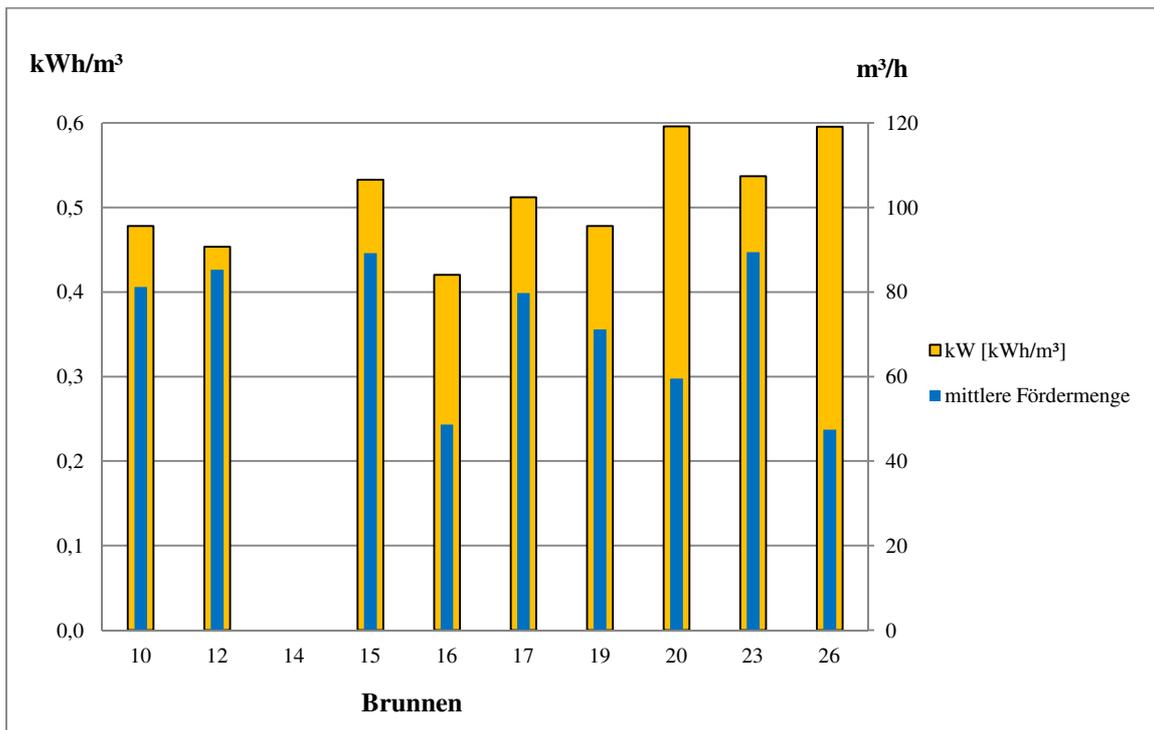


Abbildung 21: Zusammenfassung Szenario 1, mittlere kWh/m³ und mittlere Fördermengen

Obwohl **Brunnen 16** starke Alterungserscheinung und Auffälligkeiten (siehe Kapitel 3.4) aufweist ist er auch im Szenario 1 der Brunnen mit dem geringsten spezifischen Stromverbrauch. Neben seiner geringen Förderhöhe ( $90 \pm 1\text{m}$ ) liegt dies vor allem daran, dass im ersten Jahr der Prognose der Einbau einer neuen Pumpe geplant ist, die auf den stark gesunkenen Betriebswasserspiegel angepasst wird. **Brunnen 19** wird bis zum Pumpenwechsel im achten Jahr einen erheblichen Rückgang der Fördermenge (nur mehr 70% des Auslegungswertes) und des Wirkungsgrades (nur mehr 75 % des Auslegungswertes) aufweisen. Auf Grund der geringeren Förderhöhe (wie bei Brunnen 16) liegt sein spezifischer Stromverbrauch dennoch unter dem Durchschnitt.

**Brunnen 20** und **26** haben sowohl die höchsten spezifischen Stromverbräuche, als auch die kleinsten Gesamt-Fördermengen. Die hohen spezifischen Stromverbräuche resultieren bei Brunnen 26 vor allem aus seiner hohen Förderhöhe ( $> 120\text{m}$ ) sowie dem geringen Wirkungsgrad. Brunnen 20 weist einen starken Rückgang des Pumpenwirkungsgrades auf (nach zehn Jahren:  $\eta=0,40$ ).

Für **alle Brunnen** gilt, dass die theoretisch durchgeführten Pumpenwechsel und -regenerierungen zu einer Steigerung der Fördermenge führen (zwischen 5 m<sup>3</sup>/h bei Brunnen 26 bis zu 30 m<sup>3</sup>/h bei Brunnen 19) und eine Verringerung des spezifischen Stromverbrauches (zwischen 0,001 kWh/m<sup>3</sup> bei Brunnen 17 und 0,14 kWh/m<sup>3</sup> bei Brunnen 19) bewirken. Die Investitionskosten für den Einbau einer neuen Pumpe betragen zwischen minimal 2,7 % (Brunnen 23) und maximal 4,2 % (Brunnen 26) der Gesamtkosten.

Im Beispiel der Durchschnittswerte aus Tabelle 10 würde der Brunnen 16 für die gesamte Fördermenge des Brunnen 26 ca. 655.000 kWh weniger Strom verbrauchen. Bei einem mittleren Strompreis von 0,1425 €/kWh entspräche dies einem Betrag von 93.000 €, also 9.300 €/a. Brunnen 23, der nach Brunnen 20 und 26 den durchschnittlich höchsten spezifischen Stromverbrauch hat, würde bei derselben Fördermenge noch 220.000 kWh, entsprechend 31.000 €, gegenüber dem Brunnen 26 sparen. An den Beispielen ist zu erkennen, dass sowohl durch Pumpenwechsel, als auch durch eine bevorzugte Fahrweise einzelner Brunnen Energie und Kosten eingespart werden können.

Für die **gesamte Fassung** belaufen sich die durchschnittlichen spezifischen Förderkosten bei normaler Förderung auf **0,0763 €/m<sup>3</sup>** bei einer durchschnittlichen Fördermenge von 515 m<sup>3</sup>/h und einem spezifischen Stromverbrauch von **0,509 kWh/m<sup>3</sup>**.

#### Sicherstellung des Wasserbedarfes

In Abbildung 22 sind die durchschnittlichen stündlichen Fördermengen der einzelnen Jahre unter Fortführung des Ist-Zustandes dargestellt. Die Brunnen 14 und 17 sind wegen ihres Status‘ als Ersatzbrunnen nicht mit berücksichtigt. Die kleinste stündliche Fördermenge beläuft sich auf 503 m<sup>3</sup>/h, die höchste auf 526 m<sup>3</sup>/h. Die Abdeckung des Wasserbedarfes von 520 m<sup>3</sup>/h ist nur in drei Jahren gesichert, Grund hierfür ist vor allem die Reduktion des Brunnen 16. In jedem Fall ist die Abdeckung von 95 % des Standard-Wasserbedarfes gesichert (vgl. Kapitel 4). Für den erhöhten Bedarf bei Spitzenlastzeiten können kurzfristig die Ersatzbrunnen 14 und 17 zugeschaltet werden. Für verringerten Bedarf können einzelne Brunnen kurzfristig ausgeschaltet werden.

Der spezifische Stromverbrauch zur Normallastzeit berechnet sich aus

$$k_{W,NL} = \frac{\sum_i^n \sum M_{Jahr,i} * k_{W,i}}{Q_{gesamt}} \quad [\text{kWh/m}^3] \quad [28]$$

$M_{Jahr,i}$	gesamte Fördermenge eines Brunnens [m <sup>3</sup> ]
$k_{W,i}$	spez. Stromverbrauch eines Brunnens [kWh/m <sup>3</sup> ]
$i$	Brunnen [-]

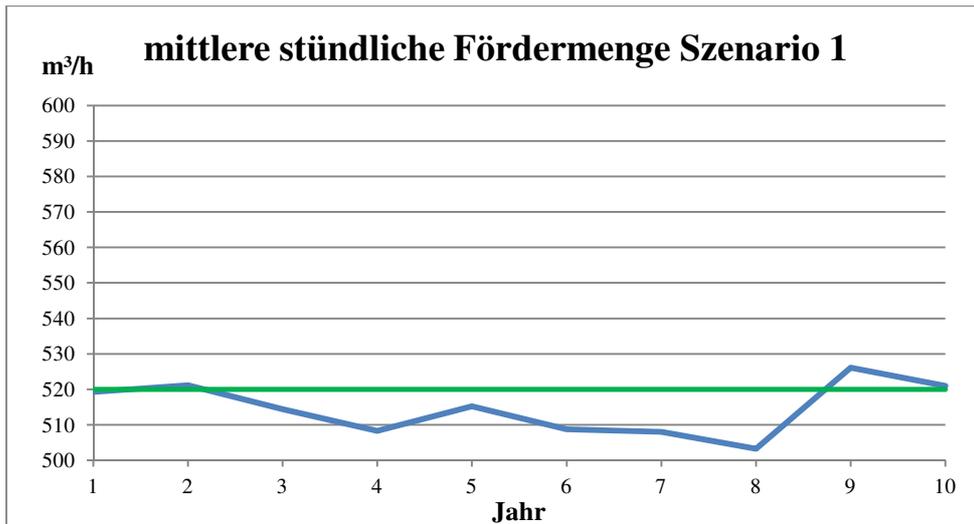


Abbildung 22: Szenario 1, mittlere stündliche Fördermengen

### Spitzenlast

Unter der Annahme, dass die spezifischen Förderkosten des Brunnen 14 im Durchschnitt 0,070 €/m³ betragen, werden bei einer **Spitzenlast** an 10 % des Jahres zusätzlich 165 m³/h (Br. 17: 80 m³/h, Br. 14: 85 m³/h) für 0,0730 €/m³ gefördert. Der finanzielle Aufwand beträgt so insgesamt 3,53 Mio. € für 46,52 Mio. m³ Rohwasser. Unter Einbeziehung der Spitzenlast von 680 m³/h an 36,5 Tagen, entsprechend 10 % der Gesamtförderzeit, betragen die durchschnittlichen spezifischen Förderkosten der gesamten Brunnenfassung **0,0762 €/m³**. Unter der Annahme, dass der spezifische Stromverbrauch des Brunnen 14 im Durchschnitt 0,5 kWh/m³ beträgt, ergibt sich für das Szenario ein mittlerer spezifischer Stromverbrauch von **0,509 kWh/m³**.

Die spezifischen Förderkosten zur Spitzenlastzeit  $k_{S,SL}$  werden wie folgt berechnet:

$$k_{S,SL} = \frac{Q_{NL} * k_{S,NL} + Q_{Zusatz,SL} * k_{S,Zusatz,SL}}{Q_{gesamt}} \quad [€/m^3] \quad [29]$$

$Q_{NL}$	mittlerer Förderstrom bei normaler Last
$k_{S,NL}$	mittlere spez. Förderkosten bei normaler Last
$Q_{Zusatz,SL}$	zusätzlicher Förderstrom bei Spitzenlast
$k_{S,Zusatz,SL}$	mittlere spez. Förderkosten des zusätzlichen Förderstromes#
$Q_{gesamt}$	gesamte Fördermenge des Szenarios

Die mittleren spezifischen Förderkosten der gesamten Prognose werden berechnet durch:

$$k_S = k_{S,SL} * 0,1 + k_{S,NL} * 0,9 \quad [€/m^3] \quad [30]$$

Der spezifische Stromverbrauch zur Spitzenlastzeit wird wie folgt bestimmt:

$$k_{W,SL} = \frac{k_{W,NL} \cdot Q_{NL} + k_{W,SL} \cdot Q_{SL}}{Q_{NL} + Q_{SL}} \quad [\text{kWh/m}^3] \quad [31]$$

$k_{W,SL}$  spez. Stromverbrauch der zusätzlichen Spitzenlast [kWh/m<sup>3</sup>]

Der mittlere spezifische Stromverbrauch des Szenarios berechnet sich aus

$$k_{W,mittel} = k_{W,NL} \cdot 0,9 + k_{W,SL} \cdot 0,1 \quad [\text{kWh/m}^3] \quad [32]$$

### 4.3 Szenario 2: Variation der Pumpenzyklen

Szenario 2 beschreibt ein mögliches optimiertes Szenario, welches auf Grundlage des Ist-Zustandes und des Szenario 1 erstellt wird. Ziel ist es, durch entsprechende Maßnahmen geringere spezifische Förderkosten und geringe Gesamtkosten zu erreichen. Zum einen werden die optimalen Pumpenaustauschintervalle der einzelnen Brunnen ermittelt, die das bestmögliche Gleichgewicht zwischen (Investitions- und Energie-) Kosten und Fördermenge darstellen. Danach wird eine Gesamtbetrachtung des Brunnenfeldes vorgenommen, die unter anderem eine Gewichtung der einzelnen Brunnen vorsieht, um bevorzugt die Brunnen mit den geringsten spezifischen Förderkosten zu betreiben. Auf Grund der starken Alterungserscheinungen in der gesamten Brunnenfassung ist sowohl ein Abweichen des Betriebspunktes der Pumpen vom optimalen Betriebspunkt, als auch ein starker Rückgang des Wirkungsgrades derselben zu beobachten. Deswegen stellt eine Veränderung der Pumpenzyklen, und dadurch eine häufigere Auslegung auf den Betriebspunkt, die wichtigste Komponente für die Optimierung dar (neben eventuellen Regenerierungen, welche hier nicht berücksichtigt werden (vgl. Kapitel 4.2)).

Am Beispiel der beiden Brunnen mit dem jeweils höchsten und geringsten theoretischen Rückgang der Fördermenge über die nächsten zehn Jahre (aus Szenario 1) wird die Auswirkung verschieden langer Pumpenzyklen bewertet und im Anschluss daran eine Abschätzung für die weiteren acht Brunnen erarbeitet.

#### 4.3.1 Szenario 2, Einsparpotential der einzelnen Brunnen

Im folgenden Kapitel wird ermittelt, welche Intervalle bei einem Pumpenwechsel die geringsten spezifischen Förderkosten erzeugen. Je öfter eine Pumpe gewechselt und auf den aktuellen Betriebspunkt angepasst wird, umso höher sind der durchschnittliche Wirkungsgrad und die durchschnittliche Förderhöhe, wodurch geringere Stromverbräuche und Förderkosten entstehen. Dem entgegen stehen die dadurch steigenden Investitionskosten. Es wird sich auf die Betrachtung von Jahresintervallen beschränkt, kürzere Abstände wären praktisch kaum umsetzbar und würden zu ständigen Bauarbeiten führen, die ihrerseits wieder unwirtschaftlich sind.

Der Brunnen 19 hätte laut der Prognose aus Szenario 1 in den nächsten zehn Jahren ohne einen Pumpenwechsel einen Rückgang der Fördermenge um 25 % und ist weist somit den höchsten Förderleistungsverlust auf. Im Gegensatz dazu würde Brunnen 17 laut Szenario 1 ohne Pumpenwechsel nach zehn Jahren noch 99 % seiner derzeitigen Fördermenge fördern. Alle Werte im folgenden Kapitel sind gemittelte Jahreswerte. Aus Szenario 1 werden die Prognosen über die Entwicklung von Fördermenge und Wirkungsgrad nach Einbau einer neuen Pumpe übernommen und ggf. erweitert. Unter der Annahme, dass die spezifische Ergiebigkeit von einer Veränderung

der Fördermenge nicht beeinflusst wird, werden aus den jeweiligen Fördermengen die Absenkungen ( $\frac{Q}{Q/s} = s$ ) und damit die Förderhöhen berechnet.

### Auswirkung des Pumpenaustauschintervalls Brunnen 19

Für den Brunnen 19 werden die Pumpenaustauschintervalle von 1, 2, 3, 5 und 6 Jahren untersucht, welche neben dem Szenario 1 in eine Optimalwertbetrachtung mit einfließen. In Tabelle 11 sind die mittleren spez. Stromverbräuche und spez. Förderkosten dargestellt, sowie die Gesamtfördermenge und –kosten über die zehn Jahre. Im Anhang 6 (S. 114 f.) befinden sich die detaillierten Berechnungstabellen. Bei der Variante mit einem Intervall von drei Jahren wurden nur drei Pumpenwechsel bedacht, weil dies im 10-Jahres Betrachtungszeitraum wirtschaftlich günstiger ist, als im letzten Jahr der Prognose einen vierten Pumpenwechsel durchzuführen. Die Variante mit den geringsten spez. Förderkosten wird gelb markiert. In der Tabelle ist zu sehen, dass sich mit zunehmender Intervallgröße die Kosten zuerst verringern, nach Erreichen eines optimalen Intervalls jedoch wieder ansteigen. Die geringsten spez. Förderkosten treten bei einem Austausch der Pumpe alle fünf Jahre auf. In dieser Variante verringert sich der spez. Stromverbrauch um 0,048 kWh/m<sup>3</sup> gegenüber der Brunnenfahrweise aus Szenario 1. Für die Fördermenge des Szenario 1 würde der Brunnen im Szenario 2 ca. 270.000 kWh weniger verbrauchen. Das sind ca. 11 % des gesamten Energieverbrauches. Die Investitionskosten für den Pumpenaustausch betragen 2\*15.000 € = 30.000 €.

Ein Pumpenwechselintervall von fünf Jahren führt daher unter der Voraussetzung des geschätzten Strompreisanstieges (siehe Kapitel 4.2) zur wirtschaftlichsten Betriebsvariante.

Tabelle 11: Szenario 2, verschiedene Pumpenaustauschintervalle Brunnen 19

Intervall [a]	kw [kWh/m <sup>3</sup> ]	ks [€/m <sup>3</sup> ]	m <sup>3</sup> gesamt	€ gesamt
1	0,415	0,0870	7.016.760	610.386
2	0,418	0,0737	6.937.920	511.488
3	0,424	0,0691	6.811.776	471.647
5	0,430	0,0672	6.701.400	450.322
6	0,431	0,0674	6.685.632	450.427
Szenario 1	0,478	0,0718	5.606.938	402.781

### Auswirkung des Pumpenaustauschintervalls Brunnen 17

Für den Brunnen 17 werden die Pumpenaustauschintervalle von 2,3,5,7 und 8 Jahren untersucht. Im Anhang 6 (S. 115 ff.) befinden sich die detaillierten Berechnungstabellen. Er weist sowohl an der Pumpe, als auch bezüglich der Betriebswasserspiegel- und Fördermengenabsenkung der letzten

2 Jahre, die geringsten Alterungserscheinungen aller untersuchter Brunnen auf. Die Fördermenge ist jedoch vom theoretischen Auslegungspunkt der Pumpe vor 9 Jahren um mehr als 12 % abgewichen. Inwiefern dies auf Alterungserscheinungen oder auf eine falsche Auslegung zurückzuführen ist kann hier nicht beantwortet werden. In Tabelle 12 sind die verschiedenen Pumpenaustauschintervalle gelistet. Das Szenario 1 weist den geringsten spezifischen Stromverbrauch und die geringsten spezifischen Förderkosten auf.

(Als Alternative käme eine Variante in Betracht, bei der die Pumpe zu Anfang des Szenarios ausgetauscht wird. Die spezifischen Förderkosten würden sich so auf 0,07608 €/m<sup>3</sup> belaufen.

Da es sich dabei jedoch nur um eine Zeitversetzte Variante des Szenario 1 handelt, wird diese nicht weiter betrachtet.)

Die durchschnittlichen stündlichen Fördermengen weichen (auch bei der nicht aufgelisteten ein-Jahres-Variante) um weniger als 5 % vom Szenario 1 ab. Demzufolge ist die Weiterführung des Ist-Zustandes die energetisch und ökonomisch beste Variante.

Tabelle 12: Szenario 2, verschiedene Pumpenaustauschintervalle Brunnen 17

Intervall [a]	k <sub>w</sub> [kWh/m <sup>3</sup> ]	k <sub>s</sub> [€/m <sup>3</sup> ]	m <sup>3</sup> gesamt	€ gesamt
2	0,515	0,0885	6.464.446	571.857
3	0,515	0,0824	6.441.861	530.654
5	0,514	0,07926	6.416.165	508.569
7	0,514	0,07930	6.403.292	507.812
8	0,514	0,07926	6.387.228	506.262
<b>Szenario 1</b>	0,512	0,0761	6.291.080	478.601

#### Auswirkung des Pumpenaustauschintervalls gesamtes Brunnenfeld

In der folgenden Tabelle sind die jeweils wirtschaftlich günstigsten Varianten der Pumpenaustauschintervalle gelistet. Beim Brunnen 14 werden wie in Szenario 1 wegen Datenmangel nur die Investitions- und deren Zinskosten berücksichtigt. Die detaillierten Variantenvergleiche der restlichen Brunnen befinden sich in Anhang 7 (S. 118 f.).

#### 4. Zukünftiges Förderkonzept, Szenario 2

Tabelle 13: Szenario 2,  $k_W$  und  $k_S$  gemittelt, Fördermenge und Kosten über 10 Jahre

Brunnen	Intervall [a]	$k_W$ [kWh/m <sup>3</sup> ]	$k_S$ [€/m <sup>3</sup> ]	Fördermenge [m <sup>3</sup> ]	Kosten [€]
10	Szenario 1	0,478	0,0692	6.400.194	442.950
12	5	0,444	0,0687	6.937.920	476.820
14	-	-	-	-	19.426
15	3	0,465	0,0737	7.422.786	547.217
16	Szenario 1	0,420	0,0650	3.833.804	249.223
17	Szenario 1	0,512	0,0761	6.291.080	478.601
19	5	0,430	0,0672	6.701.400	450.322
20	5	0,493	0,0777	5.203.440	404.512
23	Szenario 1	0,537	0,0792	7.048.514	558.259
26	5	0,559	0,0898	3.863.944	347.147
Summe (ohne Br. 17):				47.412.003	3.515.300

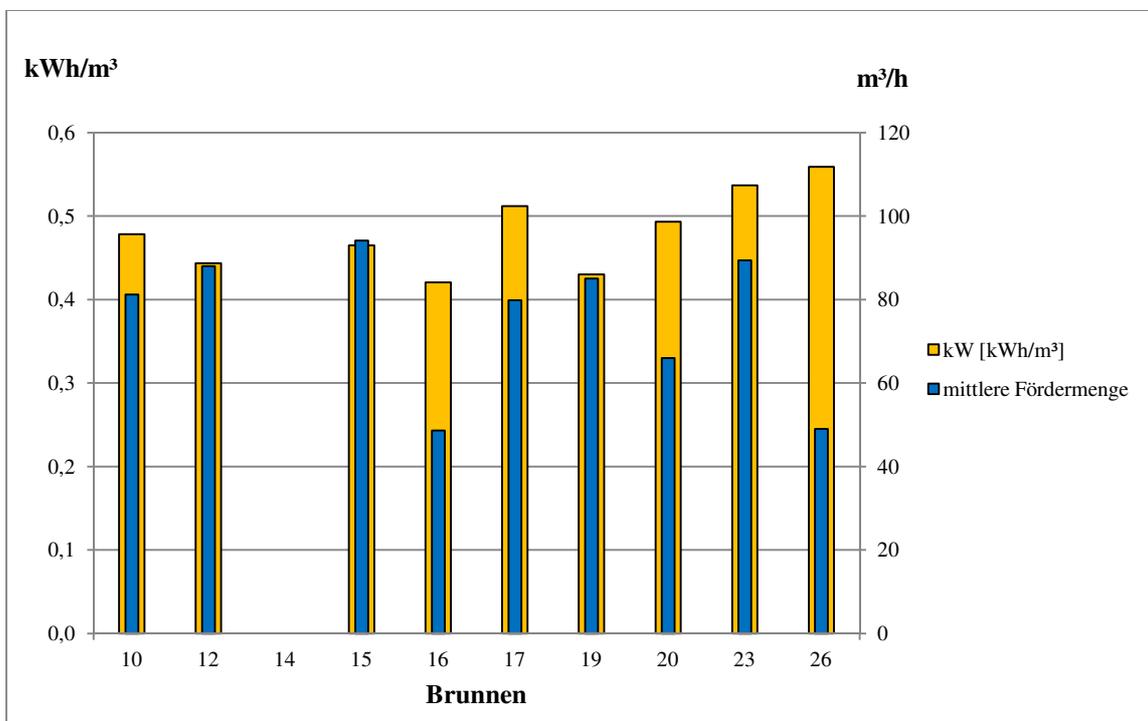


Abbildung 23: Zusammenfassung Szenario 2, mittlere kWh/m<sup>3</sup> und mittlere Fördermengen

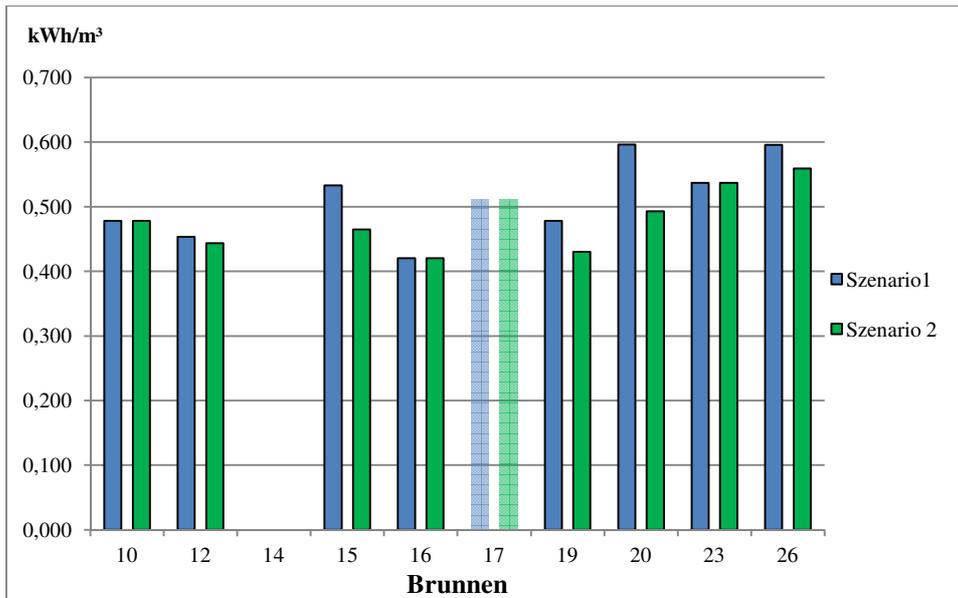


Abbildung 24: Szenario 1 und 2, Vergleich von Stromverbräuchen

Bei der Berechnung der gesamten Fördermenge („Summe (ohne Br. 17)“) der Brunnenfassung werden Brunnen 14 und 17 nicht mit einbezogen. Für die Berechnung der Gesamtkosten werden alle Kosten des Brunnen 14 und die Energiekosten des Brunnen 17 nicht mit einbezogen.

Bei vier der neun untersuchten Brunnen ist die Weiterführung des Ist-Zustandes nach Szenario 1 die wirtschaftlich beste Variante. Das bedeutet in erster Linie, dass bei ihnen zum jetzigen Zeitpunkt ein Pumpenwechselintervall von zehn Jahren ausreichend ist. Die energieeffizientesten Brunnen sind **Brunnen 16** und **Brunnen 19**, welche außerdem die geringsten spezifischen Förderkosten aufweisen. **Brunnen 26** hat wie schon in Szenario 1 die höchsten Stromverbräuche und die höchsten spezifischen Förderkosten. Für die gesamte Fördermenge des Brunnen 26 würde der Brunnen 16 ca. 537.000 kWh weniger verbrauchen. Bei einem durchschnittlichem Strompreis von 0,1425 €/kWh entspräche dies 77.000 €, also 7.700 €/a. Durch gezielte Betriebsweise könnte auch hier Strom gespart werden.

Bei einer Förderung wie in Tabelle 13, ohne Brunnen 17, würde die durchschnittliche Fördermenge der gesamten Brunnenfassung 541 m<sup>3</sup>/h mit spezifischen Förderkosten von **0,0741 €/m<sup>3</sup>** betragen. Der mittlere spezifische Stromverbrauch würde sich auf **0,477 kWh/m<sup>3</sup>** belaufen.

**Über den Betrachtungszeitraum der Prognose würde das Szenario 2 gegenüber dem Szenario 1, ohne Berücksichtigung der Spitzenlastzeiten, bei gleicher Rohwassermenge 96.000 €, also 9.600 €/a, sparen.**

### Sicherstellung des Wasserbedarfes

In Abbildung 25 sind die durchschnittlichen stündlichen Fördermengen der einzelnen Jahre aufgelistet. Die Brunnen 14 und 17 sind wegen ihres Status‘ als Ersatzbrunnen nicht mit berücksichtigt. Die kleinste stündliche Fördermenge beläuft sich auf 522 m<sup>3</sup>/h, die höchste auf 561 m<sup>3</sup>/h. Im Gegensatz zu Szenario 1 ist die Abdeckung des normalen Wasserbedarfes von 520 m<sup>3</sup>/h in Szenario 2 in jedem Fall gesichert. Für den erhöhten Bedarf bei Spitzenlastzeiten können die Ersatzbrunnen 14 und 17 zugeschaltet werden. Für verringerten Bedarf können einzelne Brunnen kurzfristig ausgeschaltet werden.

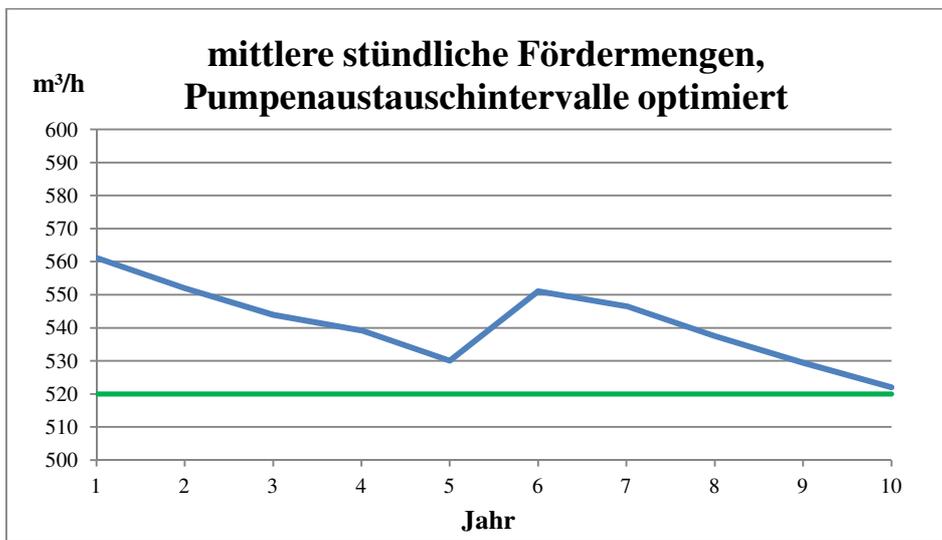


Abbildung 25: Szenario 2, mittlere stündliche Fördermengen

### Spitzenlast

Mit der Annahme, dass die spezifischen Förderkosten des Brunnen 14 im Durchschnitt 0,070 €/m<sup>3</sup> betragen, werden bei einer Spitzenlast an 10 % des Jahres zusätzlich 165 m<sup>3</sup>/h (Br. 17: 80 m<sup>3</sup>/h, Br. 14: 85 m<sup>3</sup>/h) für 0,0730 €/m<sup>3</sup> gefördert. Die durchschnittlichen spezifischen Förderkosten der gesamten Brunnenfassung unter Einbeziehung der Spitzenlast von 706 m<sup>3</sup>/h an 36,5 Tagen im Jahr belaufen sich ebenfalls auf **0,0741 €/m<sup>3</sup>**. Die Gesamtfördermenge des Szenarios beläuft sich so auf 48,86 Mio. m<sup>3</sup> für insgesamt 3,62 Mio. € bei einem mittleren spezifischen Stromverbrauch von **0,477 kWh/m<sup>3</sup>**.

### 4.3.2 Szenario 2.1, Einsparpotential der gesamten Brunnenfassung

Unter Berücksichtigung der Mindestfördermenge von 520 m<sup>3</sup>/h kann durch gezielte Brunnenfahrweise im Szenario 2 Energie gespart werden: Ersetzt man den Brunnen 26 durch den Brunnen 17 und führt nur einen Pumpenwechsel wie in Szenario 1 am Brunnen 26 durch, hat dies einen Anstieg der Fördermenge (siehe Abbildung 26) bei einem Rückgang der spezifischen Förderkosten zur Folge. Bei einer durchschnittlichen Fördermenge von 569 m<sup>3</sup>/h und Gesamtkosten von 3,65 Mio. € ergeben sich spezifische Förderkosten von **0,0732 €/m<sup>3</sup>**.

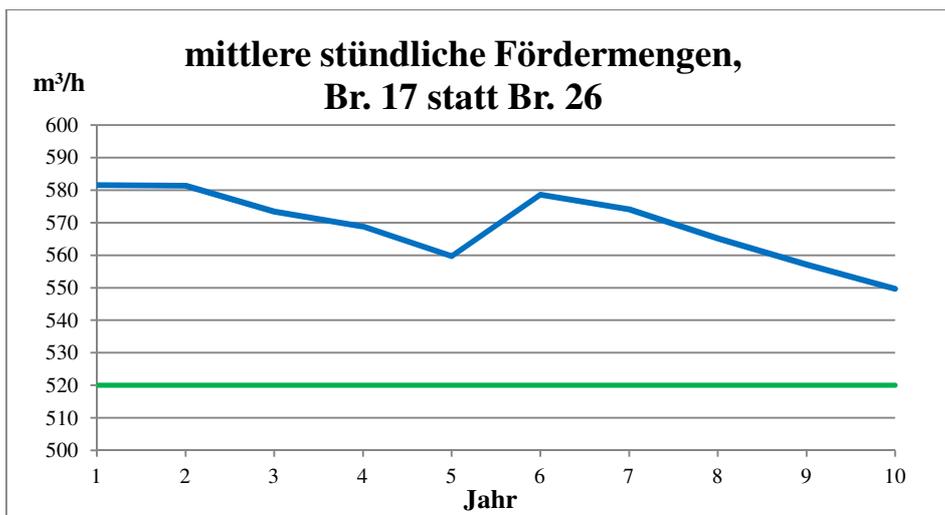


Abbildung 26: Gesamtbetrachtung, Br. 17 statt Br. 26, mittlere stündliche Fördermengen

Die Verwendung des Brunnen 14 als Standard-Brunnen wäre wegen seines geringen spezifischen Stromverbrauchs sinnvoll, jedoch darf er nur als Ersatz des Brunnen 12 betrieben werden, nicht die restlichen Brunnen ersetzen (siehe Kapitel).

**Über den Betrachtungszeitraum der Prognose würde das Szenario 2.1 gegenüber dem Szenario 1, ohne Berücksichtigung der Spitzenlastzeiten, bei gleicher Rohwassermenge 140.000 €, also 14.000 €/a, sparen.**

#### Spitzenlast

Bei einer Spitzenlastanforderung an 10 % des Jahres können im Durchschnitt zusätzlich 47 m<sup>3</sup>/h im Brunnen 26 und 85 m<sup>3</sup>/h im Brunnen 14 gefördert werden. Die spezifischen Förderkosten zur Spitzenlastzeit belaufen sich so auf 0,0740 €/m<sup>3</sup> für Die mittleren spezifischen Förderkosten des Szenarios betragen **0,0733 €/m<sup>3</sup>**. Der mittlere spezifische Stromverbrauch beläuft sich auf **0,476 kWh/m<sup>3</sup>**. Insgesamt werden 51,00 Mio. m<sup>3</sup> für 3,73 Mio. € gefördert.

#### 4.4 Szenario 3, Optimierung durch Frequenzumrichter

Szenario 3 wird analog zu Szenario 2 auf Grundlage des Ist-Zustandes und der beiden vorherigen Szenarien erstellt. Es wird das zusätzliche Optimierungspotential durch den Einsatz von Frequenzumrichtern (FU's) zur Steuerung der Fördermenge untersucht (vgl. Kapitel 2.3.3). Ziel ist es die prognostizierten Wasserbedarfe relativ genau abzudecken und geringere spezifische Förderkosten zu erreichen. Der große Vorteil beim Einsatz von FU's ist die hohe Betriebsflexibilität. Einzelne Brunnen können ohne Aufwand ihre Förderleistung drosseln, oder (bis zum Auslegungspunkt) steigern. Ein Nachteil ist der damit verbundene Wirkungsgradverlust, der u.a. abhängig vom Betriebspunkt und der umgebenden Temperatur ist und ohne das Wissen der Betriebsparameter oder Vergleichsmessungen nicht genau vorhergesagt werden kann. Auf Grund von Erfahrungswerten von HAMBURG WASSER wird hier pauschal von einem Verlust von 3 % des Gesamtwirkungsgrades bei Einsatz einer frequenzgesteuerten Betriebsweise ausgegangen. Den Berechnungen des Szenarios liegen folgende Annahmen zugrunde:

- durch FU-Schaltung bleibt die Fördermenge  $Q$  konstant
- die Absenkung  $s$  des Betriebswasserspiegels errechnet sich aus  $s = \frac{Q}{Q/s}$
- die Pumpenwirkungsgrade entwickeln sich nach den Prognosen aus Szenario 2
- ein FU kostet 3.000 €, eine Pumpe inklusive Einbau 15.000 €
- Der Einbau eines FU's und der passenden Pumpe werden zu Beginn des Szenarios durchgeführt

In Tabelle 14 ist das Szenario 3 bezüglich der Fördermengen und dem Einsatz von FU's dargestellt. Die Möglichkeiten bei der Variation von Fördermengen und Frequenzsteuerungen, sowohl der einzelnen Pumpe, als auch der Brunnenfassung insgesamt, sind vielseitig und das optimale Zusammenspiel schwer berechenbar. Szenario 3 stellt eine beispielhafte Variante einer möglichen Betriebsoptimierung mittels Frequenzumrichter dar. Dabei werden die Brunnen, welche geringere mittlere Förderkosten als die des Durchschnittswertes aus Szenario 2 aufweisen, bevorzugt mit hoher Fördermenge betrieben. In Anhang 8 (S. 120 f.) sind berechnete Auswirkungen eines FU-Einsatzes tabellarisch gelistet.

**Brunnen 10** wird nach Szenario 1 betrieben, da er so nur einen geringen Rückgang der Fördermenge um 2,7 m<sup>3</sup>/h in zehn Jahren aufweist. Bei einer konstanten Fördermenge von 90 m<sup>3</sup>/h mit FU würden sich die mittleren spezifischen Förderkosten um 0,0042 €/m<sup>3</sup> gegenüber Szenario 1 auf 0,0733 €/m<sup>3</sup> erhöhen. **Brunnen 12** weist in Szenario 1 geringe spezifische Förderkosten auf. Jedoch ist ein starker Förderstromrückgang von 1 m<sup>3</sup>/a zu beobachten. Deshalb wird er mittels FU bei seiner maximal zulässigen Auslastung von 90 m<sup>3</sup>/h betrieben. Seine mittleren spez. Förderkosten erhöhen sich dabei auf 0,0708 €/m<sup>3</sup>. **Brunnen 15** wird wie im Szenario 2 betrieben,

seine mittleren spezifischen Stromkosten würden sich dem gegenüber bei einem FU-Einsatz mit konstanten 85 m<sup>3</sup>/h auf 0,0767 €/m<sup>3</sup> erhöhen. **Brunnen 16** wird nach Szenario 1 betrieben, die Fördermenge geht innerhalb der zehn Jahre um weniger als 3,5 m<sup>3</sup>/h zurück. Die spezifischen Förderkosten des **Brunnen 17** liegen über dem Durchschnitt des Szenario 1, mit FU würden sich diese bei 80 m<sup>3</sup>/h um weitere 0,003 €/m<sup>3</sup> erhöhen. Er wird daher wie in Szenario 1 betrieben, mit Pumpenwechsel zu Beginn der Prognose. Die Fördermenge geht insgesamt um 3,5 m<sup>3</sup>/h zurück. Auf Grund des niedrigen Stromverbrauches wird **Brunnen 19** wie in Szenario 2 betrieben. Dies ist die Variante mit dem geringsten mittleren Stromverbrauch. Ein FU-geregelter Förderstrom von 80 m<sup>3</sup>/h (mehr wäre wegen der starken Betriebswasserspiegelabsenkung nicht möglich) würde die spezifischen Stromkosten um 0,0041 €/m<sup>3</sup> erhöhen. Bei FU-Betrieb könnte die Fördermenge jedoch genau auf den jeweiligen Betriebswasserstand angepasst werden.

**Brunnen 23** wird auf Grund der hohen Stromverbräuche mit einem FU-Einsatz auf 50 m<sup>3</sup>/h betrieben. Gegenüber Szenario 1 verringern sich seine spezifischen Stromkosten auf Grund der verringerten Reibungsverluste und des höheren Betriebswasserspiegels um 0,0038 €/m<sup>3</sup>.

Brunnen 14 ist Ersatzbrunnen, die Brunnen 20 und 26 werden wegen ihrer hohen mittleren spezifischen Stromverbräuche ebenfalls nur als Ersatz- oder Spitzenlastbrunnen betrieben. Bei den Ersatzbrunnen sind lediglich die Investitionskosten inklusive ihrer Zinsen berücksichtigt. Auf Grund der vergleichsweise vielen Ersatzbrunnen und der Möglichkeit zusätzlich bei den beiden FU-geregelten Brunnen die Fördermenge zu erhöhen wird von einer 100%igen Betriebszeit ausgegangen. Bei Ausfällen ist genügend Pufferkapazität vorhanden.

Tabelle 14: Szenario 3, Zusammenfassung

Brunnen	Fahrweise	Q mittel	kW [kWh/m <sup>3</sup> ]	kS [€/m <sup>3</sup> ]	m <sup>3</sup> gesamt	€ gesamt
10	Szenario 1	81,2	0,478	0,0692	7.111.327	491.447
12	FU	90,0	0,470	0,0708	7.884.000	555.032
14	-	-	0,500	0,0700	0	19.426
15	Szenario 2	94,2	0,465	0,0767	8.247.540	601.544
16	Szenario 1	48,6	0,420	0,0650	4.259.782	274.756
17	Szenario 1	79,8	0,512	0,0761	6.990.089	529.620
19	Szenario 2	85,0	0,430	0,0672	7.446.000	496.041
20	-	-	0,472	0,0777	0	19.426
23	FU	50,0	0,486	0,0754	4.380.000	327.649
26	-	-	0,596	0,0898	0	19.426
				Summe:	46.318.738	3.334.365

Das dargestellte Szenario führt zu durchschnittlichen Förderkosten von **0,0720 €/m<sup>3</sup>** bei einer durchschnittlichen Fördermenge von 529 m<sup>3</sup>/h. Der spezifische Stromverbrauch beträgt **0,466 kWh/m<sup>3</sup>**.

Über den Betrachtungszeitraum der Prognose würde das Szenario 3 gegenüber dem Szenario 1, ohne Berücksichtigung der Spitzenlastzeiten, bei gleicher Rohwassermenge 194.000 €, also 19.400 €/a, sparen.

Gegenüber dem Szenario 2 würde das Szenario 1 bei einer Rohwassermenge von 46,3 Mio. m<sup>3</sup> (entspricht der gesamt-Fördermenge des Szenario 3) 97.000 €, also 9.700 €/a sparen.

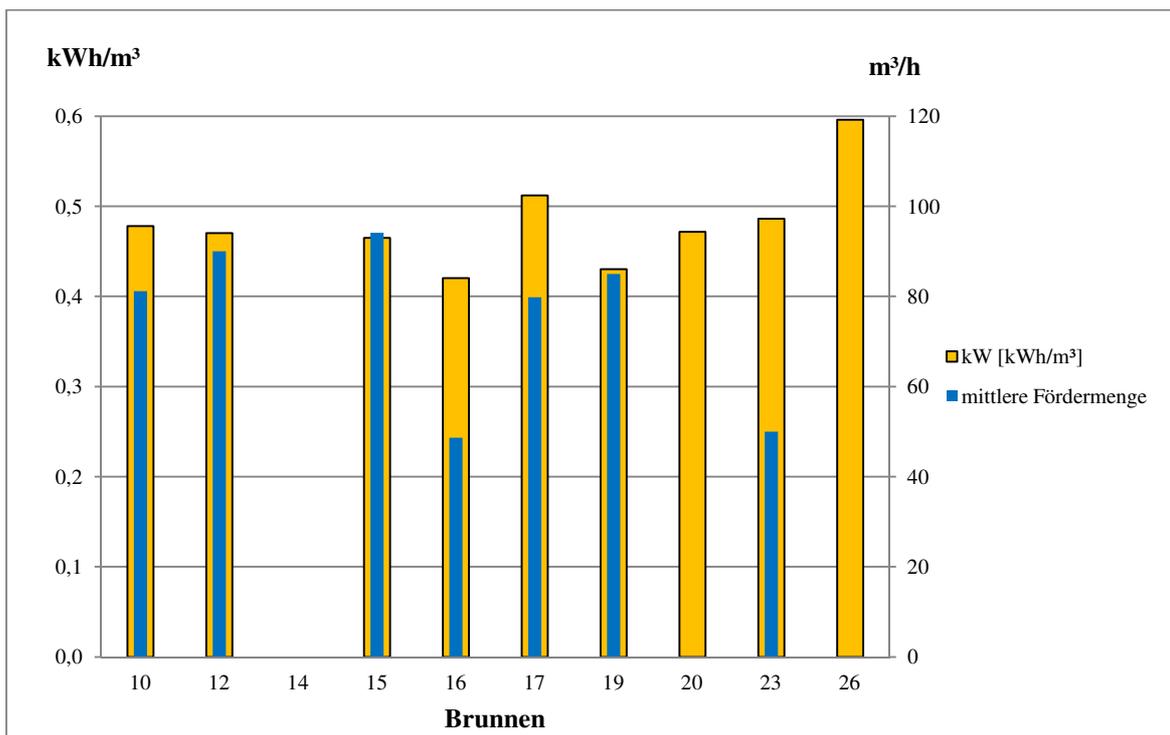


Abbildung 27: Zusammenfassung Szenario 3, mittlere kWh/m<sup>3</sup> und mittlere Fördermengen

### Sicherstellung des Wasserbedarfes

In Abbildung 28 sind die mittleren stündlichen Fördermengen der einzelnen Jahre dargestellt. Wenn man die geringfügige Unterschreitung von 0,2 % im zehnten Jahr vernachlässigt ist der Bedarf bei normaler Auslastung vollständig gedeckt.

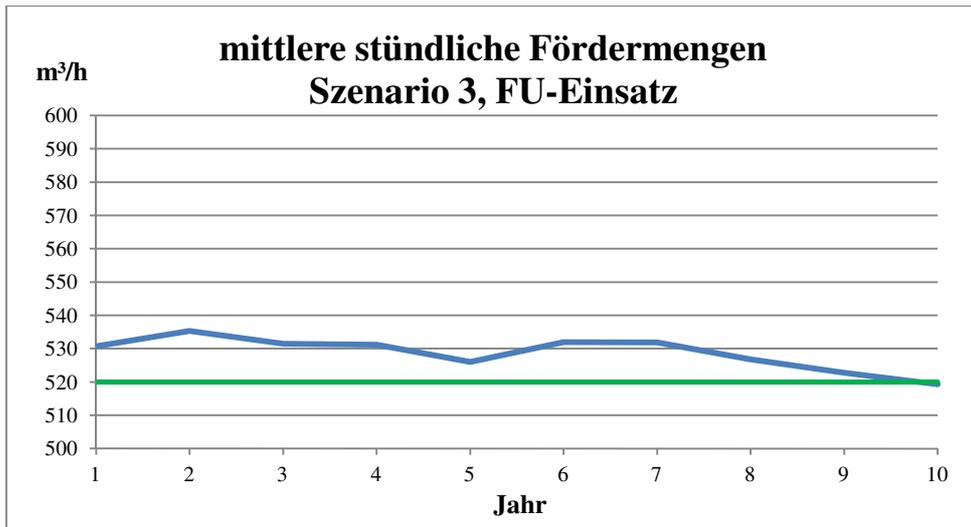


Abbildung 28: Szenario 3, mittlere stündliche Fördermengen

### Spitzenlast

Mit der Annahme, dass sich die Brunnen 20 und 26 bezüglich Fördermenge und spezifischen Förderkosten wie in Szenario 1 verhalten, und die spezifischen Förderkosten des Brunnen 14 im Durchschnitt  $0,070 \text{ €/m}^3$  betragen werden zur Spitzenlastzeit zusätzlich  $192 \text{ m}^3/\text{h}$  für  $0,0798 \text{ €/m}^3$  gefördert. Die durchschnittlichen spezifischen Förderkosten der Prognose betragen so  **$0,0722 \text{ €/m}^3$** . Insgesamt werden  $48,88 \text{ Mio. m}^3$  für  $3,53 \text{ Mio. €}$  gefördert. Der durchschnittliche spezifische Stromverbrauch steigt wegen der hohen spezifischen Verbräuche der Brunnen 20 und 26 auf  **$0,490 \text{ kWh/m}^3$** .

Trotz der vergleichsweise hohen spezifischen Stromverbräuche zur Spitzenlastzeit, sind die durchschnittlichen spezifischen Förderkosten geringer als bei Szenario 1 und 2.

## 4.5 Szenarienvergleich

Tabelle 15: Szenarienvergleich (inklusive Spitzenlastzeiten)

Szenario	Beschreibung	Q <sub>mittel</sub> [m <sup>3</sup> /h]	Q <sub>mittel</sub> [m <sup>3</sup> /h] ohne Spitzenlast	mittlere Jahreskosten [€]	k <sub>w</sub> [kWh/m <sup>3</sup> ]	k <sub>s</sub> [€/m <sup>3</sup> ]
1	Weiterführung Ist-Zustandes	531	515	353.000	0,509	0,0762
2	Optimierung Pumpenzyklen	558	541	362.000	0,477	0,0741
2.1	Optimierung Ersatzbrunnen	582	569	373.000	0,476	0,0733
3	Einsatz von FU's	558	529	353.000	0,490	0,0722

In Tabelle 15 werden die drei vorrausgegangen Szenarien miteinander verglichen. Sofern nicht anders bezeichnet beziehen sich die Werte auf das gesamte Szenario unter Einbeziehung der Spitzenlastzeiten. **Szenario 2.1**, mit Brunnen 26 statt 17 als Ersatzbrunnen, ist die energetisch effizienteste Variante. Pro gefördertem m<sup>3</sup> Wasser kann im Vergleich zum Szenario 1 ca. **6,5 % an Energie gespart** werden. Für eine Fördermenge entsprechend des Szenario 1 würden pro Jahr ca. 140.000 kWh an Strom gespart werden.

**Szenario 3** ist die wirtschaftlich günstigste Variante. Pro gefördertem m<sup>3</sup> Wasser kann im Vergleich zum Szenario 1 im Durchschnitt **5,3 % an Kosten gespart** werden. Für die Fördermenge des Szenario 1 würden im Durchschnitt 19.400 € pro Jahr eingespart werden. Außerdem bietet diese Variante die Möglichkeit die Entnahmemenge bis zu einem gewissen Grade problemlos zu regulieren. Der höhere spezifische Stromverbrauch resultiert aus den hohen spezifischen Stromverbräuchen der Ersatzbrunnen, welche nur zu Spitzenlastzeiten betrieben werden. Da Investitionskosten in die spezifischen Stromkosten mit einfließen können die spezifischen Förderkosten eines Szenarios durchaus höher sein, obwohl der spezifische Stromverbrauch geringer ist.

Ohne Berücksichtigung eventueller Spitzenlastzeiten betrüge die Kosteneinsparung im Szenario 3 ca. 6,5 %, die Energieeinsparung beläuft sich auf 8,5 %.

In Abbildung 29 sind die mittleren stündlichen Fördermengen der verschiedenen Szenarien ohne Berücksichtigung der Spitzenlast dargestellt. Die Weiterführung des Ist-Zustandes in Szenario 1 würde zu einer Unterschreitung der Mindestfördermenge führen, Szenario 2 und 2.1 würden hingegen kontinuierlich zu hohe Fördermengen aufweisen. Der Einsatz von Frequenzumrichtern in Szenario 3 verbindet die Vorzüge der Pumpenzyklusbetrachtung und der Brunnengewichtung mit einer angepassten und konstanteren Fördermenge.

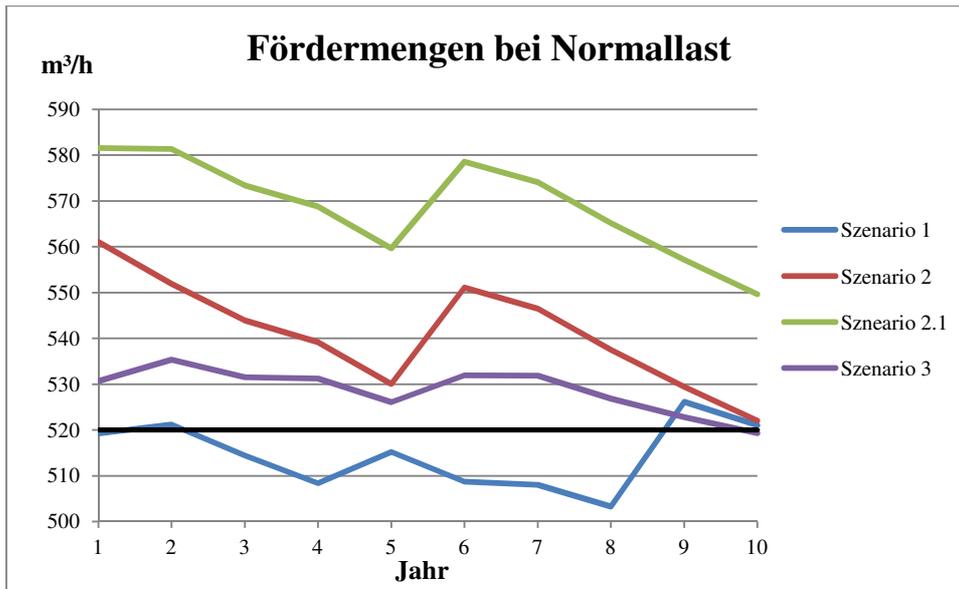


Abbildung 29: Vergleich der mittleren stündlichen Fördermengen bei Normallast, Szenario 1-3

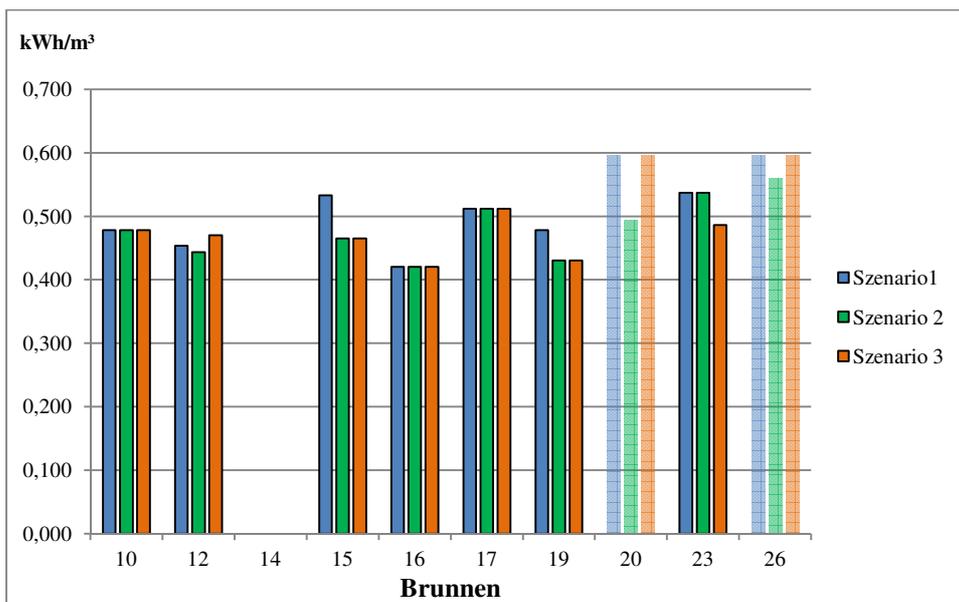


Abbildung 30: Szenarienvergleich, Stromverbräuche

## 5. Optimierungsvorschläge

Im Rahmen der Untersuchungen und prognostizierten Szenarienverläufe konnten bestimmte Brunnenfahrweisen festgestellt werden, welche die Gesamtfördersituation des Wasserwerkes Bausberg unter energiewirtschaftlichen Aspekten verbessern und dabei die gewünschte Förderleistung gewährleisten. Die Empfehlungen beruhen allesamt auf dem Szenario 3, das die niedrigsten Förderkosten für die Sicherstellung des Wasserbedarfes zu Standard- und Spitzenlastzeiten aufweist. Falls nur einzelne Empfehlungen umgesetzt werden, muss geprüft werden, ob damit trotzdem die gewünschte Förderleistung erreicht werden kann.

### **Brunnen 10**

Der Brunnen 10 sollte wie bisher betrieben werden. Die derzeitige Pumpe ist auf den aktuellen Betriebspunkt ausgelegt und sollte bei Bedarf saniert oder ausgetauscht werden.

### **Brunnen 12**

Der Brunnen 12 sollte mittels Frequenzumrichter auf einer konstanten Fördermenge betrieben werden (90 m<sup>3</sup>/h nach Szenario 3), da er einen hohen Rückgang der Fördermenge aufweist, die spezifischer Ergiebigkeit und der Betriebswasserspiegel sich jedoch kaum verringern. Der Einbau einer auf den Betriebspunkt ausgelegten Pumpe wird empfohlen.

### **Brunnen 14**

Für Brunnen 14 wird, auf Grund der geringen Betriebszeiten und der damit verbundenen unzureichenden Datenerhebung, keine Empfehlung abgegeben.

### **Brunnen 15**

Auf Grund des starken Rückgangs der Fördermenge und des Pumpenwirkungsgrades ist ein Pumpenwechsel alle drei Jahre sowohl unter Energieeffizienzaspekten, als auch unter wirtschaftlicher Sicht die empfohlene Variante.

### **Brunnen 16**

Für Brunnen 16 wird eine Förderung mittels FU empfohlen. Das in Kapitel 3.4 angesprochene Problem des Trockenlaufens der Pumpe muss vermieden werden. Eine Überprüfung des Grundwasserdargebots wird empfohlen.

### **Brunnen 17**

Es wird empfohlen den Brunnen 17 auf Grund seines moderaten Stromverbrauches an Stelle von „schlechteren“ Brunnen zu betreiben und nicht wie vorgesehen als Ersatzbrunnen. Die Pumpe sollte bei Möglichkeit auf den aktuellen Betriebspunkt ausgelegt werden.

### **Brunnen 19**

Der Brunnen 19 sollte unter wirtschaftlichen Aspekten nach Szenario 2 betrieben werden. Das bedeutet in dem Fall ein Pumpenwechselintervall von 5 Jahren. Des Weiteren weist er dieselben Auffälligkeiten wie Brunnen 16 auf (vgl. Kapitel 3.4), was auf eine Überlastung des Grundwasserleiters hinweist. Ein längerer Pumpversuch wird hier ebenfalls empfohlen.

Ein Frequenzumrichter könnte außerdem die Entnahmemenge so regulieren, dass sich der Betriebswasserspiegel jederzeit kurz über dem Pumpeneinlauf befindet, und so bei größtmöglicher Fördermenge die geringen spezifischen Förderkosten des Brunnen 19 optimal ausgenutzt werden.

### **Brunnen 20**

Es wird empfohlen den Brunnen 20 als Ersatz- und Spitzenlastbrunnen zu betreiben.

### **Brunnen 23**

Auf Grund des hohen Stromverbrauchs sollte Brunnen 23 mit einer neuen Pumpe ausgestattet und mittels Frequenzumrichter auf 50 m<sup>3</sup>/h betrieben werden.

### **Brunnen 26**

Es wird empfohlen den Brunnen 26 als Ersatz- und Spitzenlastbrunnen zu betreiben.

## **5.1 Generelle Handlungsempfehlungen**

Um die Fördersituation im Wasserwerk Boursberg weiter zu verbessern, werden hier Empfehlungen angesprochen, die nicht in die Szenarienprognosen eingeflossen sind, da ihre Auswirkungen schwer vorhersehbar sind, oder sich die Maßnahmen erst langfristig (nach Ablauf der zehn Jahre) amortisieren.

### **Regenerierungen**

Brunnen sollten aus Gründen der Wirtschaftlichkeit und des Genehmigungsrechtes lange Betriebs- und Standzeiten haben. Die im Laufe eines Brunnenlebens entstehenden Alterungsprozesse führen

zu einem Rückgang der Brunnenleistung, sowie zu einem verstärktem Verschleiß von Pumpe und Brunnen und sollten so gut wie möglich vermindert werden. Mögliche Folgen bei Missachtung entsprechender Alterungsanzeichen sind u.a. (Wicklein & Steußloff, 2006):

- geringere Gesamtnutzungszeit des Brunnens
- höhere Betriebskosten (kürzere Regenerierintervalle, häufigere Regeneriermaßnahmen)
- ggf. Durchführung von Sanierungsmaßnahmen
- höhere Energiekosten der Förderung

Alle untersuchten Brunnen weisen bereits einen starken Rückgang der spezifischen Ergiebigkeit auf und haben den optimalen Zeitpunkt einer Regenerierung überschritten. Am Beispiel des Brunnen 20 ist zu sehen, dass die Leistungsverbesserung durch eine Regenerierung in dem Fall nur von kurzer Dauer ist (vgl. Kapitel 3.3.2).

Bei neu gebauten Brunnen sollte darauf geachtet werden einen eventuellen Leistungsrückgang kontinuierlich zu beobachten und entsprechende Regenerierungen rechtzeitig durchzuführen.

### **Pumpenschaltungen**

Häufige Pumpenschaltungen führen u.a. zu Wasserspiegelschwankungen und einer Verringerung der Filterkiesdurchlässigkeit durch verstärkte Sauerstoffzufuhr und dadurch eintretende Verockerung. Mögliche Folgen sind ein höherer Pumpenverschleiß und dadurch höhere Energiekosten, bzw. kürzere Regenerierintervalle.

Die Auswertung der Daten der letzten zwei Jahre hat gezeigt, dass alle Brunnen mit mehr oder weniger häufigen Unterbrechungen betrieben werden. Dies sollte möglichst vermieden, bzw. Unterbrechungen optimal genutzt werden in dem man Untersuchungen, Pumpenaustausche und Regenerierungen zusammen durchführt. Lastschwankungen können im empfohlenen Förderkonzept durch die Steuerung mittels Frequenzumrichter ausgeglichen werden.

### **Steigleitungen**

In Kapitel 3.3 ist der hohe Verlust in den Steigleitungen dargestellt, der vor allem auf ihren verhältnismäßig kleinen Durchmessern beruht. Durch eine Vergrößerung der Rohrfläche kann die Verlusthöhe in Dimensionen zwischen der 4. und 5. Potenz verringert werden (vgl. Gleichung [8], [9], [13], S. 14 f):

$$H_V = \left( \zeta + \lambda * \frac{l}{d} \right) * \left( \frac{4Q}{\pi} \right)^2 * \frac{1}{2g} * d^{-4} \quad [\text{m}] \quad [33]$$

Würde z.B. die Steigleitung des Brunnen 10 von DN125 auf DN150 vergrößert werden, so würde sich im Szenario 1 die Verlusthöhe in derselben um mehr als 50 %, entsprechend 2,6 m, reduzieren. Nach Gleichung 1 führt dies zu einer Verringerung der Kraftübertragung von 590 W. Bei einem Wirkungsgrad von 65 % würde die Pumpe ca. 0,9 kW weniger Leistung aufnehmen, was ca. 2 % ihres Leistungsbedarfes entspräche. In 365 Tagen würde die Pumpe dementsprechend 7885 kWh einsparen.

Es wird daher empfohlen, sofern möglich, langfristig den Rohrdurchmesser der Steigleitungen zu vergrößern.

## 6. Diskussion und Bewertung der Ergebnisse

Durch ein gezieltes Zusammenspiel der drei Optimierungsansätze wurde ein Szenario entwickelt, welches unter den gegebenen Voraussetzungen die wirtschaftlich beste Variante darstellt: das Szenario 3. Unter Berücksichtigung der Spitzenlastzeiten ist jedoch das Szenario 2.1 jenes mit den geringsten spezifischen Stromverbräuchen, trotz höherer spezifischer Förderkosten. Ein Nachteil ist hierbei das Ausbleiben der Möglichkeit einer exakten Entnahmemengenregulierung, da in dieser Variante keine Frequenzumrichter eingeplant sind. Im Falle einer Strompreisentwicklung, die stärker ausfällt, als die im Zuge dieser Arbeit angenommene, könnte jedoch das Szenario 2.1 die wirtschaftlichere Variante darstellen.

Die Szenarienprognosen wurden ohne Berücksichtigung potentieller Regenerierungen einzelner Brunnen erstellt. Zum einen auf Grund der bereits sehr niedrigen spezifischen Ergiebigkeit (vgl. Kapitel 2.5.2), zum anderen wegen der schlechten Regeneriierungsergebnisse in den letzten Jahren (vgl. Kapitel 3.3.2 und 3.3.3). Des Weiteren sind einige Brunnen noch nie regeneriert worden und die Auswirkung einer Regenerierung daher nicht vorhersehbar. Es bleibt zu prüfen inwiefern sich Regenerierungen einzelner Brunnen mittel- und langfristig positiv auf diese auswirken könnten.

Auf Grund des verhältnismäßig kurzen Zeitraumes der Datenerfassung, welcher, je nach Brunnen, höchstens zwei Jahre beträgt, ist es schwer eine Abschätzung über die Genauigkeit der Prognose abzugeben. Der Ansatz kann nur durch Auswertung langjähriger Datenreihen der Fördermengen und Absenkraten optimiert werden. So wäre eine Validierung der Prognose möglich und die Berechnung der Energieeffizienz könnte mit höherer Genauigkeit bestätigt werden.

## 7. Zusammenfassung

Im Zuge der ständigen Betriebsoptimierung von HAMBURG WASSER wird die Analyse der laufenden Grundwasserförderung gefordert. Auf Grund der starken Alterungserscheinungen und den daraus resultierenden Leistungseinbußen der Brunnen im Wasserwerk Bausberg ist es naheliegend, das Förderkonzept und den Betrieb der einzelnen Brunnen, als auch einzelne technische Bestandteile der Brunnen auf ihr Optimierungspotential hin zu untersuchen. Die vorliegende Arbeit trägt dazu bei die Optimierungspotentiale der aktuellen Fördersituation des Wasserwerks Bausberg zu erkennen und unter energiewirtschaftlichen Aspekten eine nachhaltig verbesserte Betriebsweise zu entwickeln.

Für die Ausarbeitung werden an erster Stelle die Grundlagen der Wasserwirtschaft erläutert, auf denen die weitere Bearbeitung aufbaut. Neben einer Beschreibung von Grundwasservorkommen, Unterwassermotorpumpen, Vertikalfilterbrunnen und Rohrnetzen wird die Brunnenalterung besprochen und ihre Ursachen aufgezeigt. Zur Berechnung von Rohrreibungsverlusten und Förderhöhen wird das gesamte Rohwassernetz bis hin zum Einlauf in die Filterkammern mittels eines Modells zur hydraulischen Strömungsanalyse simuliert.

Aus elektronischen Messdaten der Betriebszeiten, Fördermengen, Pegelstände und Energieverbräuche der letzten zwei Jahre wird der Zustand der einzelnen Brunnen und Pumpen analysiert und bewertet. An Hand der Entwicklung dieser Messwerte über die Zeit wird eine Prognose der Brunnenzustände über die nächsten zehn Jahre entwickelt und darauf aufbauend drei verschiedene Betriebsszenarien entworfen und miteinander verglichen.

Im Zuge der Datenanalyse konnte aufgezeigt werden, dass ein Großteil der installierten Pumpen sowohl starke Wirkungsgradverluste auf Grund von Alterungserscheinungen aufweist und somit in einem suboptimalen Betriebsbereich läuft. Des Weiteren sind auch die Brunnen selbst von starken Alterungserscheinungen betroffen, die sich in den nächsten Jahren voraussichtlich kontinuierlich verstärken werden. Die spezifische Ergiebigkeit der meisten Brunnen ist bereits soweit abgesenkt, dass von irreversiblen Alterungserscheinungen ausgegangen werden muss und Regenerierungen nur noch bedingt zu einer mittelfristigen Verbesserung führen können. Insgesamt führen die besagten Alterungs- und Abnutzungserscheinungen der Pumpen und Brunnen zu hohen Stromverbräuchen, die durch entsprechende Maßnahmen zumindest teilweise verringert werden können.

Manche Brunnen weisen besondere Auffälligkeiten auf, die zu einer starken Absenkung des Betriebswasserspiegels und der Fördermenge führen. Eine Untersuchung des Grundwasserdargebotes sollte hierbei zu einem besseren Verständnis des auffällig hohen Leistungsrückganges in kurzer Zeit führen.

Im Rahmen der Untersuchung konnten drei Optimierungsansätze erarbeitet werden:

- Veränderung der Pumpenaustauschzyklen
- Bevorzugte Fahrweise bestimmter Brunnen
- Gezielte Brunnenfahrweise durch Frequenzsteuerung

Zusammenfassend wird durch die vorgeschlagene Optimierung der Rohwasserförderung die Möglichkeit geschaffen eine, sowohl energetisch, als auch wirtschaftlich, verbesserte Gesamtsituation zu entwickeln und deren Nachhaltigkeit langfristig zu sichern. Ferner wird die Sicherstellung des prognostizierten Wasserbedarfes gewährleistet und die Flexibilität der Entnahmemenge erhöht.

Durch ein Verkürzen der Pumpeneinsatzdauer, eine veränderte Betriebsführung und den Einsatz von Frequenzumrichtern kann unter den gegebenen Annahmen der Strompreisentwicklung und der fortschreitenden Brunnenalterung eine mittlere jährliche Einsparung der Förderkosten zwischen 5 und 10 % erreicht werden.

## Literaturverzeichnis

Bayrisches Landesamt für Umwelt. (kein Datum). *Trinkwasser von der Quelle bis zum Verbraucher – Gewinnung – Brunnen*. Abgerufen am 1. März 2012 von [http://www.lfu.bayern.de/wasser/trinkwasser\\_quelle\\_verbraucher/trinkwassergewinnung/brunnen/index.htm](http://www.lfu.bayern.de/wasser/trinkwasser_quelle_verbraucher/trinkwassergewinnung/brunnen/index.htm)

DVGW. (2007). Arbeitsblatt W 130: Brunnenregenerierung. In D. V.-u. e.V, *technisches Regelwerk Wasser*. Bonn.

edur. (kein Datum). *Grundlagen für die Projektierung und den Betrieb von EDUR-Kreiselpumpen*. Abgerufen am 6. März 2012 von <http://www.edur.de/imgs/service/projekt/deutsch/WA6.pdf>,

Erich Bieske, W. R. (1992). *Bohrbrunnen*. München: R. Oldenbourg Verlag GmbH.

Erneuerbare Energien Verbraucherportal. (3. Mai 2012). Die Entwicklung der Strompreise. <http://www.solar-und-windenergie.de/blog/?p=77>.

HAMBURG WASSER. (kein Datum). *Wasserwerke*. Abgerufen am 13. März 2012 von <http://www.hamburgwasser.de/wasserwerke.html?download=259>

HAMBURG WASSER. (2012). *Wasserwerke*. Abgerufen am 13. März 2012 von <http://www.hamburgwasser.de/wasserwerke.html?download=259>

Hellmann, D.-H. (2009). *KSB-Kreiselpumpenlexikon*. Frankenthal: KSB Aktiengesellschaft.

Herborner Pumpentechnik. (14. Mai 2012). Frequenzregelung von Kreiselpumpen. <http://www.herborner-pumpen.de/de/energieeinsparung/frequenzumrichter.php>.

hgt-geotech. (kein Datum). Abgerufen am 6. März 2012 von [http://www.hgt-geotech.de/1a-brunnen.de/kf\\_wert.html](http://www.hgt-geotech.de/1a-brunnen.de/kf_wert.html)

HW. vgl. Internes HAMBURG WASSER Material.

Langguth, H.-R., & Voigt, R. (1980). *Hydrogeologische Methoden*. Heidelberg: Springer Verlag Berlin.

Merkel, G. (2008). *Technik der Wasserversorgung - Praxisgrundlage für Führungskräfte*. München: Oldenbourg Industrie Verlag GmbH.

Mutschmann, J., & Stimmelmayer, F. (2007). *Taschenbuch der Wasserversorgung: mit 286 Tabellen*. Wiesbaden: Vieweg+Teubner Verlag / Springer Fachmedien Wiesbaden GmbH.

Ostermann, K. (1991). *Pumpentechnik in der Wasserversorgung*. Lüneburg: Rudolf Müller GmbH.

Pleuger. (kein Datum). *Pleuger Electrical Submersible Pumps and Water-Filled Motors*. Abgerufen am 2. März 2012 von [www.flowserve.com/files/Files/Literature/ProductLiterature/Pumps/fpd-1362-ea4.pdf](http://www.flowserve.com/files/Files/Literature/ProductLiterature/Pumps/fpd-1362-ea4.pdf)

Pleuger. (Januar 2008). *Submersible Motors - 50 Hz*. Abgerufen am 15. April 2012 von [www.flowserve.com/files/Files/Literature/ProductLiterature/Pumps/fpd-1224-e.pdf](http://www.flowserve.com/files/Files/Literature/ProductLiterature/Pumps/fpd-1224-e.pdf)

Schneider, K.-J. (2004). *Bautabellen für Ingenieure - mit Berechnungshinweisen und Beispielen*. Minden: Werner Verlag.

Tholen, M. (2006). *Arbeitshilfen für Brunnenbauer - Brunnenausbau- und Brunnenbetriebstechniken*. Bonn: wvgw Wirtschafts- und Verlagsgesellschaft Gas und Wasser mbH.

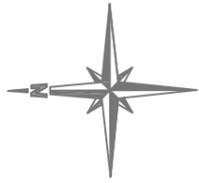
Wicklein, A., & Steußloff, S. (2006). *Brunnen - ein komplexes System*. Renningen: expert Verlag.

*Zeit.de*. (2012). Abgerufen am 04 2012 von <http://www.zeit.de/2011/42/Stimmts-Wasser>

## Anhang

Anhang 1:	AUTOCAD Zeichnung des Brunnenfeldes Boursberg.....	76
Anhang 2:	Ausbauprofile der untersuchten Brunnen.....	78
Anhang 3:	Pumpenkennlinien und Pumpenprüfprotokolle.....	89
Anhang 4:	Grafiken der Förderströme, Absenkungen und spezifischen Ergiebigkeiten aus Messwerten der letzten zwei Jahre.....	103
Anhang 5:	Szenario 1, Entwicklung der einzelnen Brunnen.....	107
Anhang 6:	Szenario 2, Auswirkung der Pumpenaustauschintervalle Brunnen 19 und 17.....	115
Anhang 7:	Szenario 2, Pumpenintervallunterschiede.....	119
Anhang 8:	Szenario 3, Auswirkung FU auf einzelnen Brunnen.....	121

**Anhang 1 – AUTOCAD-Zeichnung des Brunnenfeldes Boursberg**



12

15

20

10

14

17

19

16

23

26

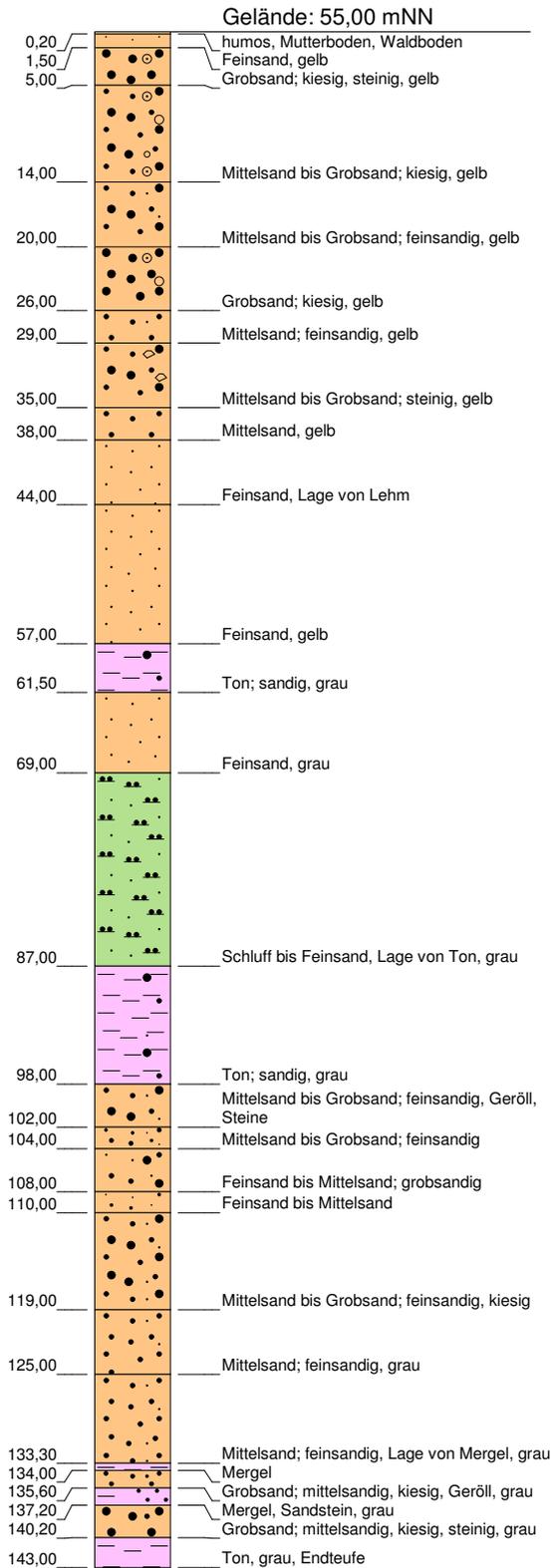
Einlauf  
WW Bausberg

Planverfasser:			 BERATUNGSGESELLSCHAFT MBH Ausschläger Elbdeich 2 - 20539 Hamburg Tel: 040/ 7888 89555 - Fax: 040/ 7888 189999		Auftraggeber:		
F			Baumaßnahme / Inhalt:				
E			<b>Rohwasserleitung Wasserwerk Bausberg</b>				
D							
C							
B							
A							
	Datum	Bearbeitet	Änderung		Plan-Nr.: 01		
	Datum	Name	Projekt-Nr.:		Dokumentationsstadium:		
gez.:	12.04.2012	Marc Lüdtko	Blattgröße:		<b>Entwurfsplanung</b>		
gepr.:	-	-	ISO A3				
gepr.:	-	-	Maßstab: 1: 100.000				

## **Anhang 2 – Ausbauprofile der untersuchten Brunnen**

# Bohrprofil

(in m u. GOK)



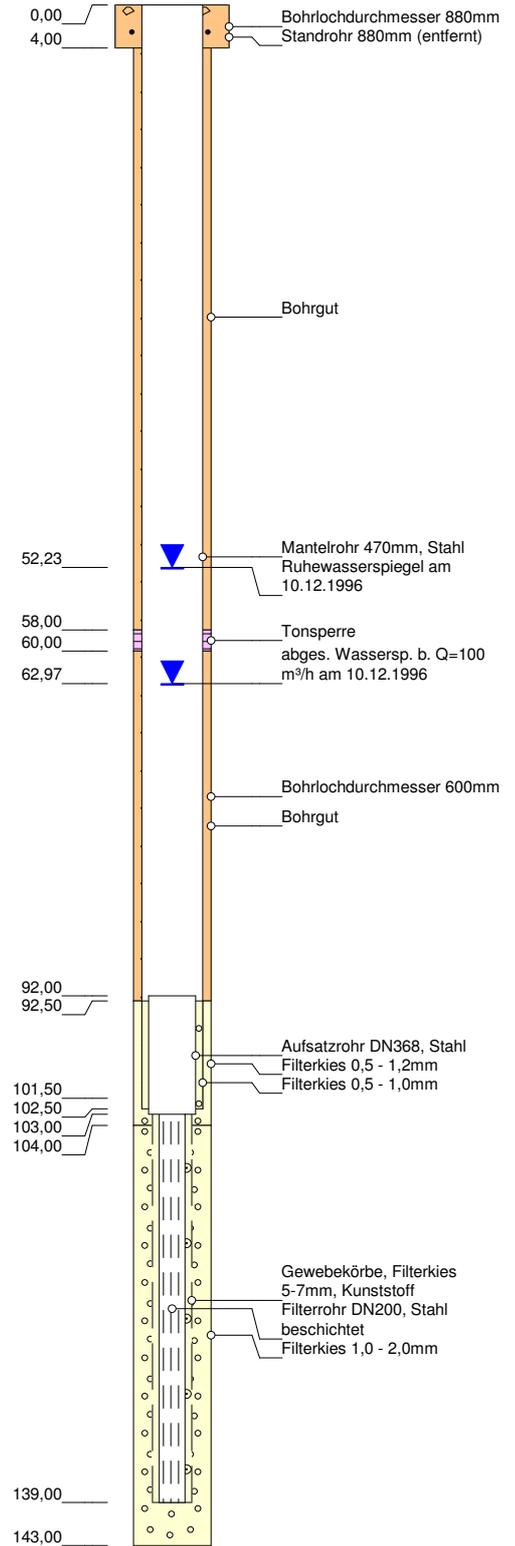
# Stratigraphie

(in mNN)

-85,20 qp  
-88,00 tmiGT

# Ausbau

(in m u. GOK)



## Ww. Boursberg: Förderbrunnen 10

HWW-Name:	BBAU.RS10
Archiv Nr GLA / LANU / NLfB:	5038
Kartenblatt:	2424 Wedel
Lage:	R: 3551510 H: 5938430
Maßstab:	1:700
Bohrfirma:	Loeck; Bj.: 1967, Gebr. Lange Reg.: 1996
Vermessung:	
Stand der Daten:	24.03.2010



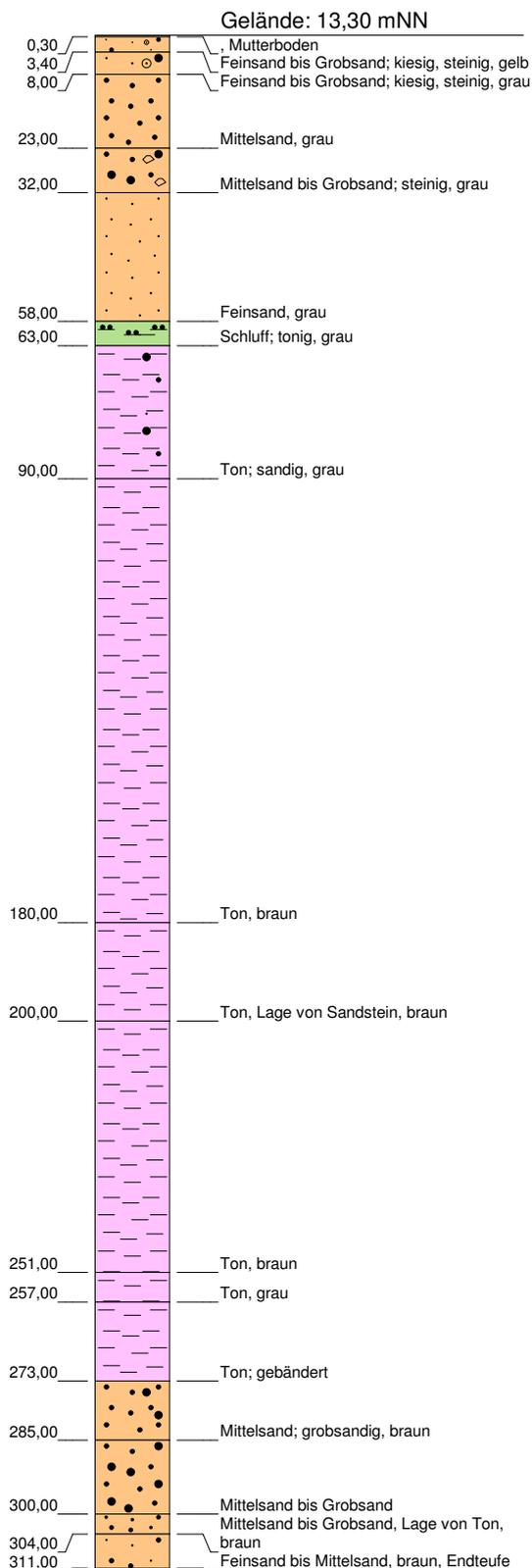
**HAMBURG  
WASSER**

Hamburger Wasserwerke GmbH  
Billhorner Deich 2 · 20539 Hamburg

**Abt. G 3**  
**Wasserwirtschaftliches  
Ressourcenmanagement**

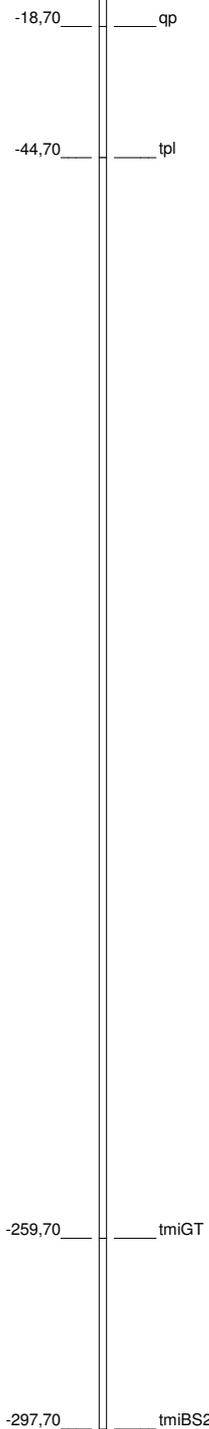
## Bohrprofil

(in m u. GOK)



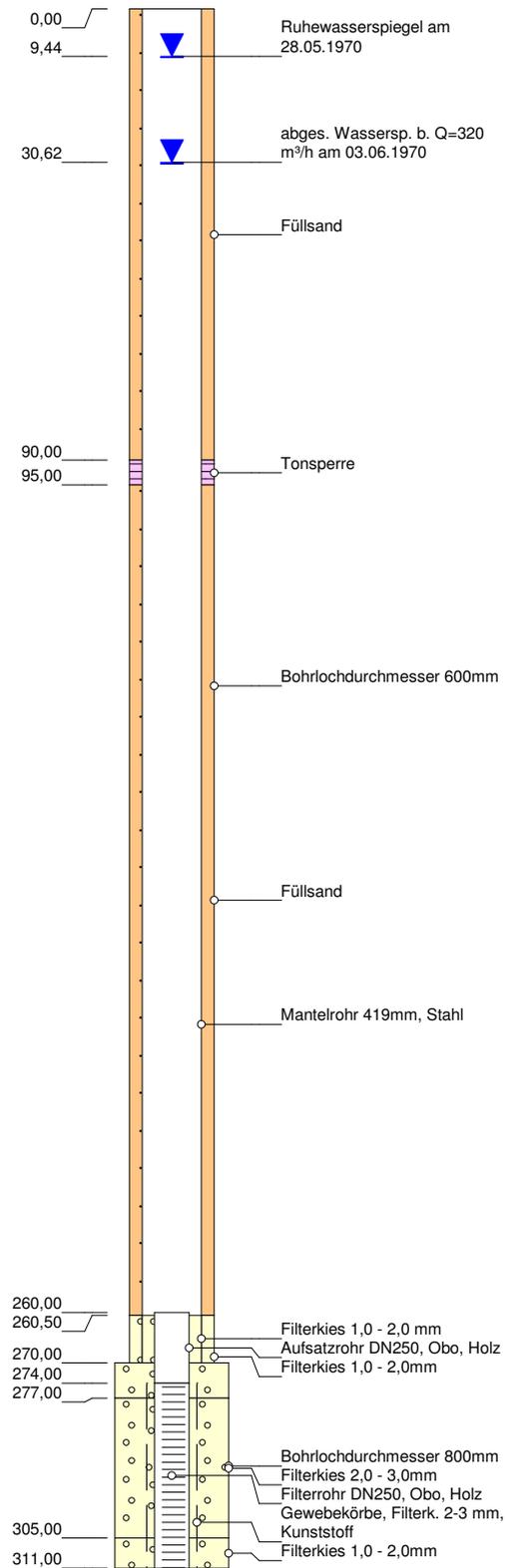
## Stratigraphie

(in mNN)



## Ausbau

(in m u. GOK)



### Ww. Bausberg: Förderbrunnen 12

HWW-Name:	BBAU.RS12
Archiv Nr GLA / LANU / NLfB:	5040
Kartenblatt:	2424 Wedel
Lage:	R: 3550666 H: 5940291
Maßstab:	1:1500
Bohrfirma:	Loeck; Bj.: 1970
Vermessung:	
Stand der Daten:	24.03.2010



**HAMBURG  
WASSER**

Hamburger Wasserwerke GmbH  
Billhorner Deich 2 · 20539 Hamburg

**Abt. G 3**  
Wasserwirtschaftliches  
Ressourcenmanagement

# Bohrprofil

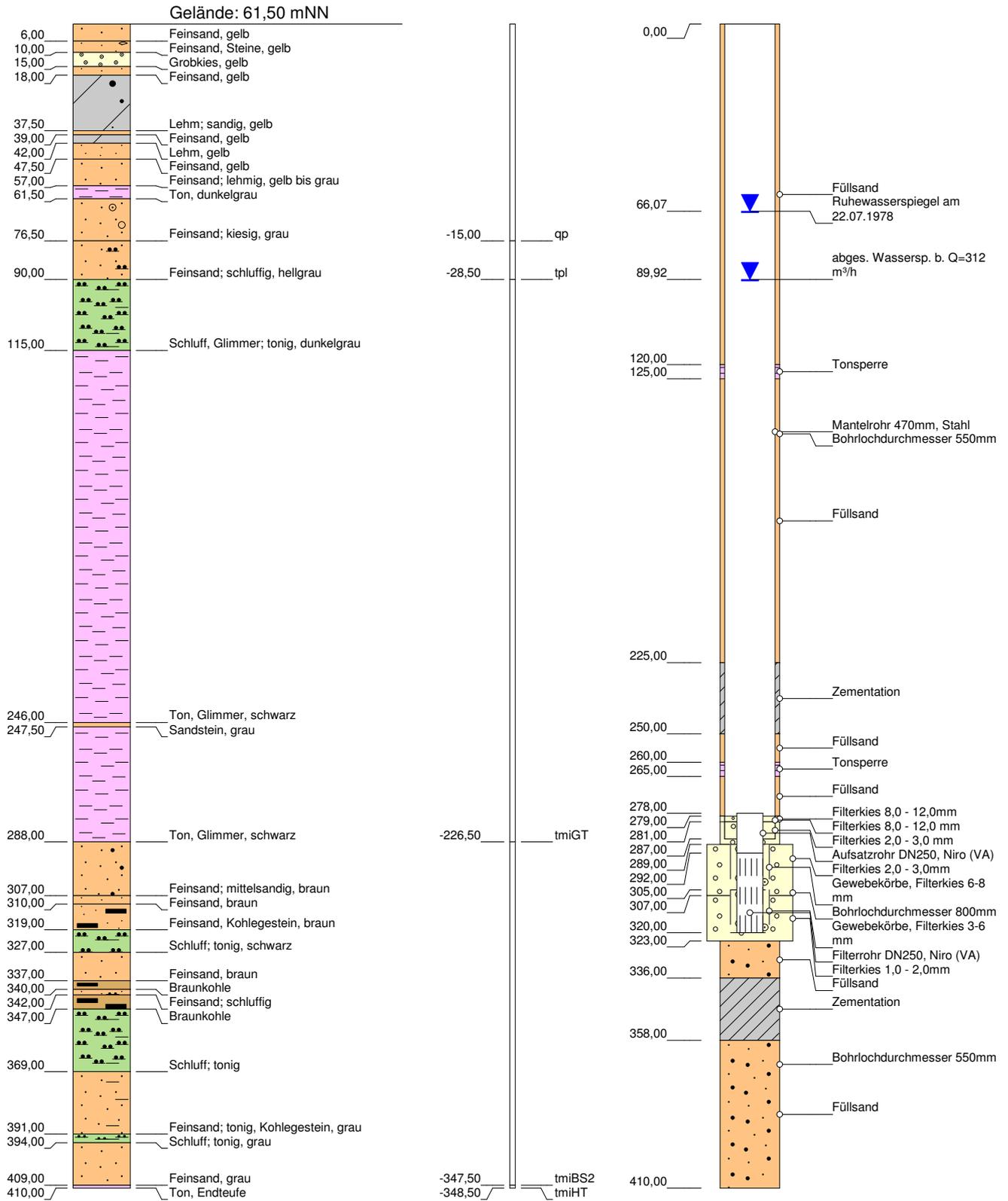
(in m u. GOK)

# Stratigraphie

(in mNN)

# Ausbau

(in m u. GOK)



## Ww. Boursberg: Förderbrunnen 14

HW-Name:	BBAU.RS14
Archiv Nr GLA / LANU / NLfB:	5036B100
Kartenblatt:	2424 Wedel
Lage:	R: 3551707 H: 5937974
Maßstab:	1:2000
Bohrfirma:	Gebr. Lange & Söhne; Bj.: 1978
Vermessung:	
Stand der Daten:	29.11.2011



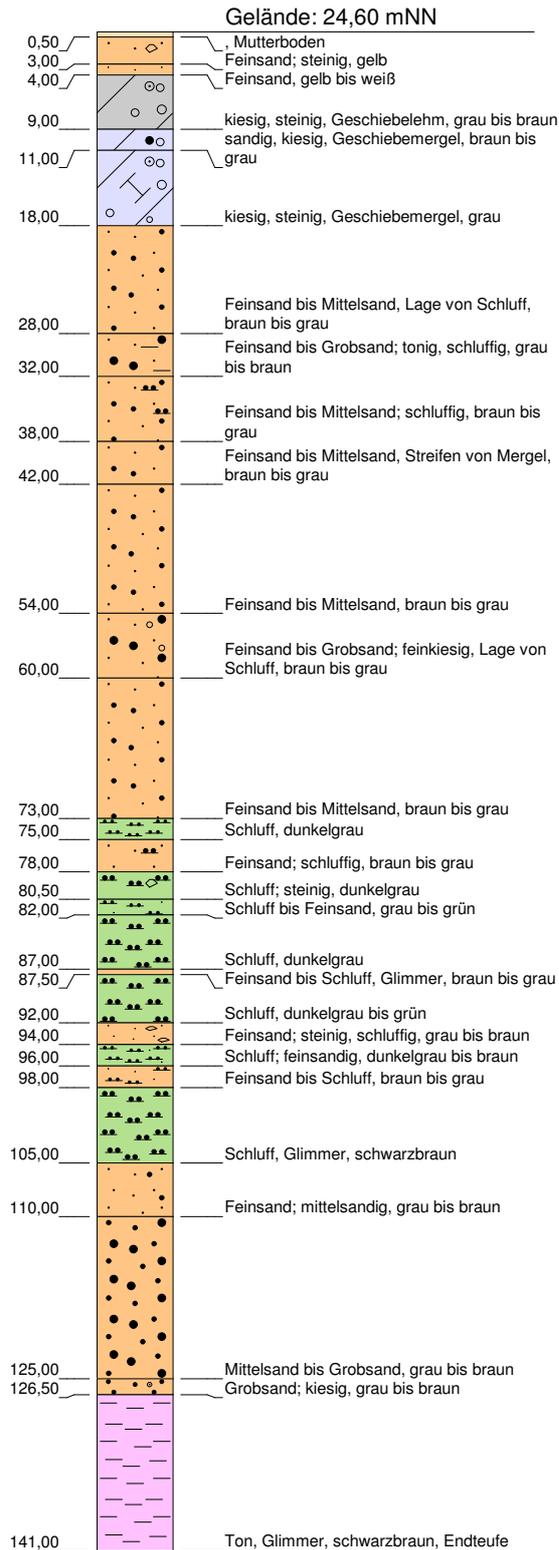
**HAMBURG  
WASSER**

Hamburger Wasserwerke GmbH  
Billhorner Deich 2 · 20539 Hamburg

**Abt. G 3**  
**Wasserwirtschaftliches  
 Ressourcenmanagement**

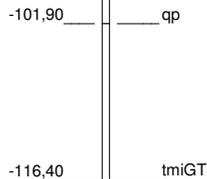
## Bohrprofil

(in m u. GOK)



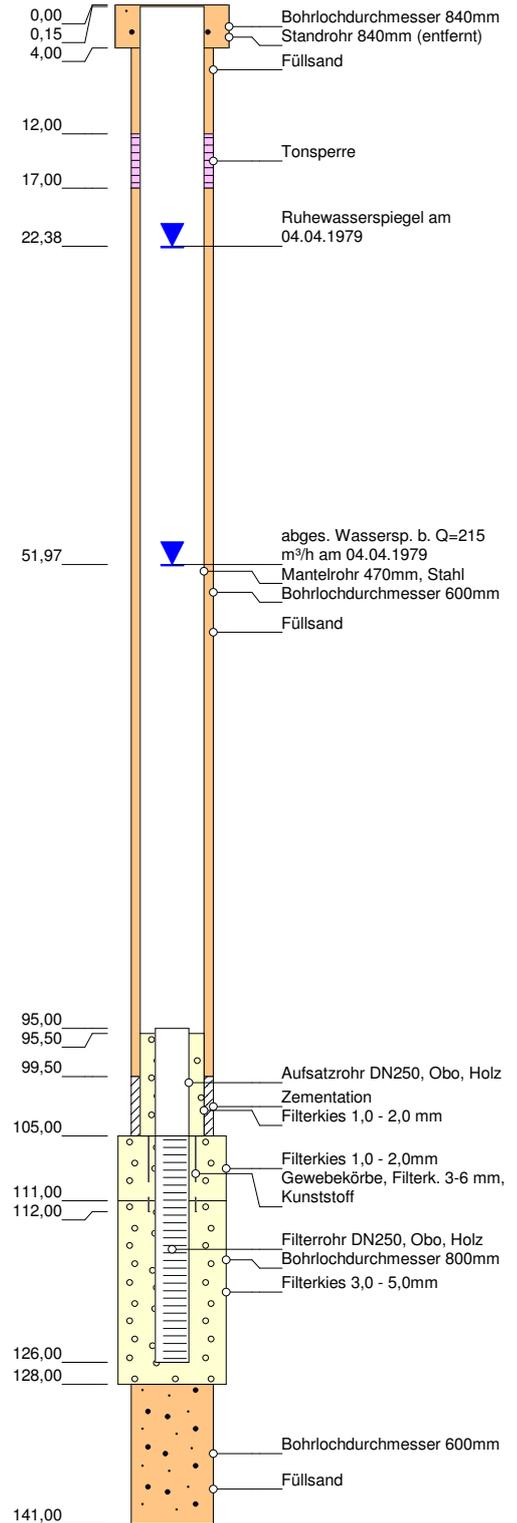
## Stratigraphie

(in mNN)



## Ausbau

(in m u. GOK)



### Ww. Bausberg: Förderbrunnen 15

HW-Name:	BBAU.RS15
Archiv Nr GLA / LANU / NLfB:	5038
Kartenblatt:	2424 Wedel
Lage:	R: 3551164 H: 5939194
Maßstab:	1:700
Bohrfirma:	Preussag; Bj.: 1979
Vermessung:	
Stand der Daten:	24.03.2010



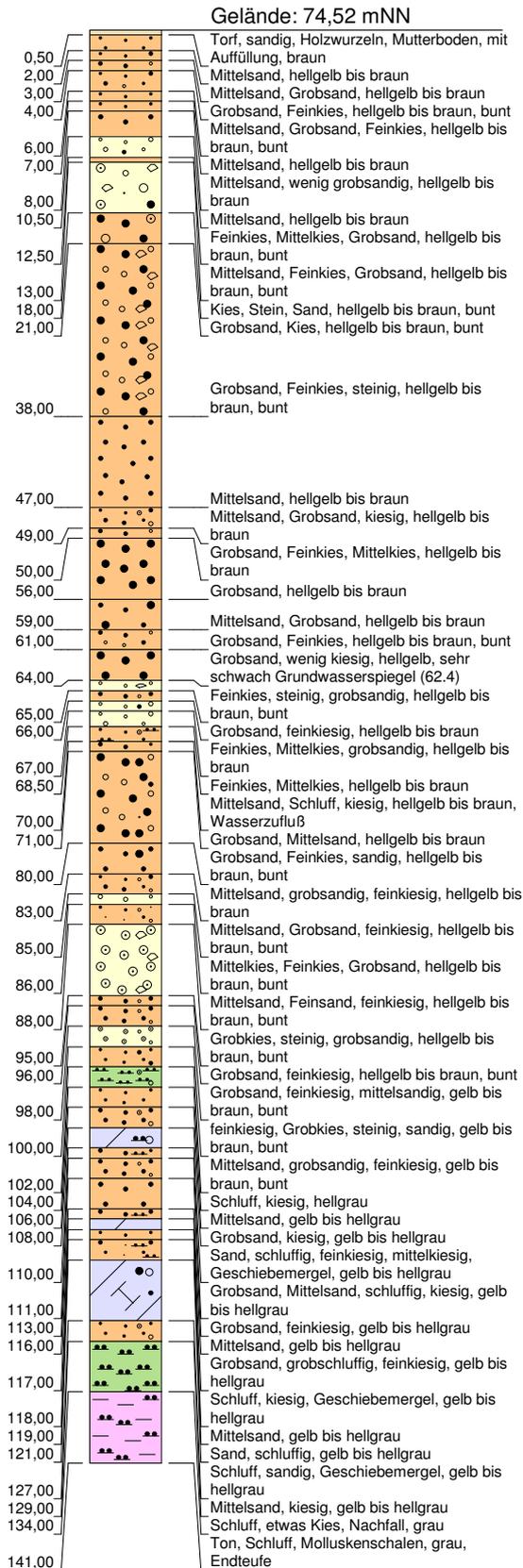
**HAMBURG  
WASSER**

Hamburger Wasserwerke GmbH  
Billhorner Deich 2 · 20539 Hamburg

**Abt. G 3**  
Wasserwirtschaftliches  
Ressourcenmanagement

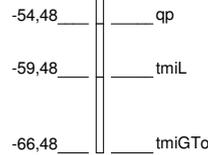
# Bohrprofil

(in m u. GOK)



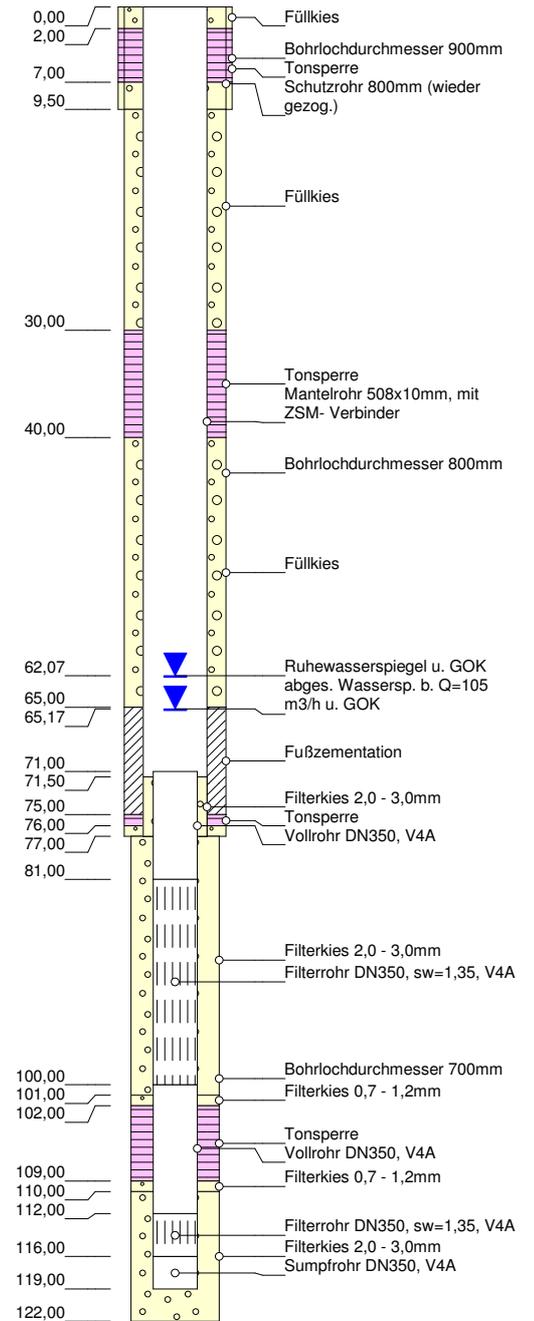
# Stratigraphie

(in mNN)



# Ausbau

(in m u. GOK)



## Ww. Bausberg: Förderbrunnen 16

HWW-Name:	BBAU.16
Archiv Nr GLA / LANU / NlfB:	5236
Kartenblatt:	2424 Wedel
Lage:	R: 3552336 H: 5937597
Maßstab:	1:700
Bohrfirma:	Gebr. Lange, Bj. 2007
Vermessung:	TeGeo 2007
Stand der Daten:	24.03.2010



**HAMBURG WASSER**

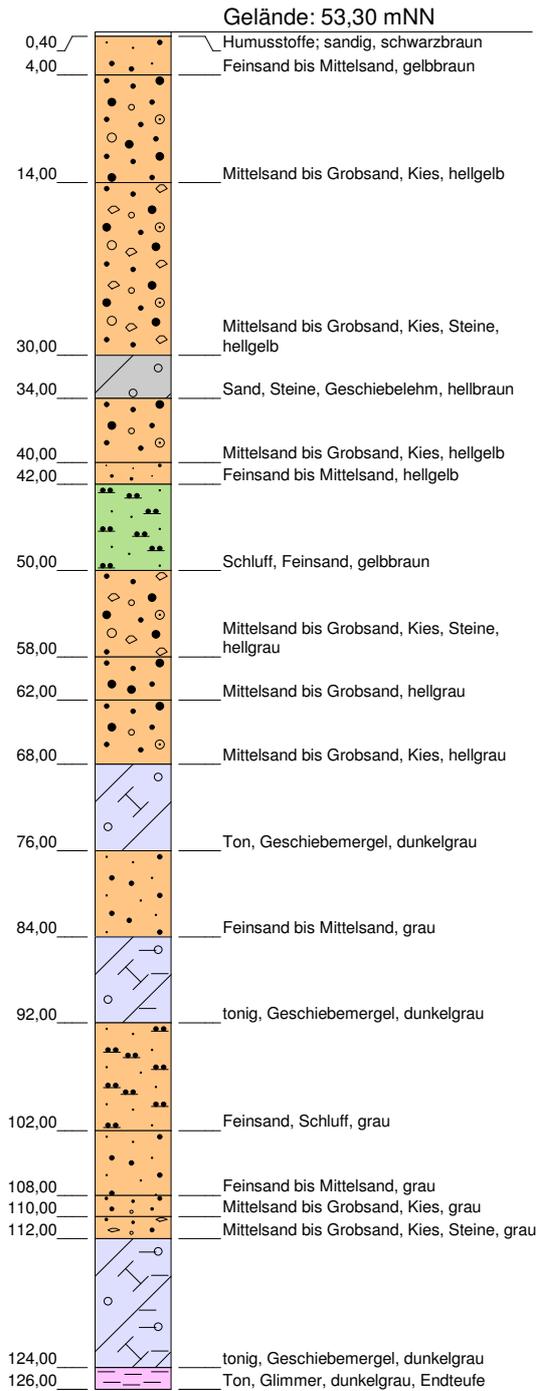
Hamburger Wasserwerke GmbH  
Billhorner Deich 2 · 20539 Hamburg

Abt. G 3

Wasserwirtschaftliches  
Ressourcenmanagement

# Bohrprofil

(in m u. GOK)



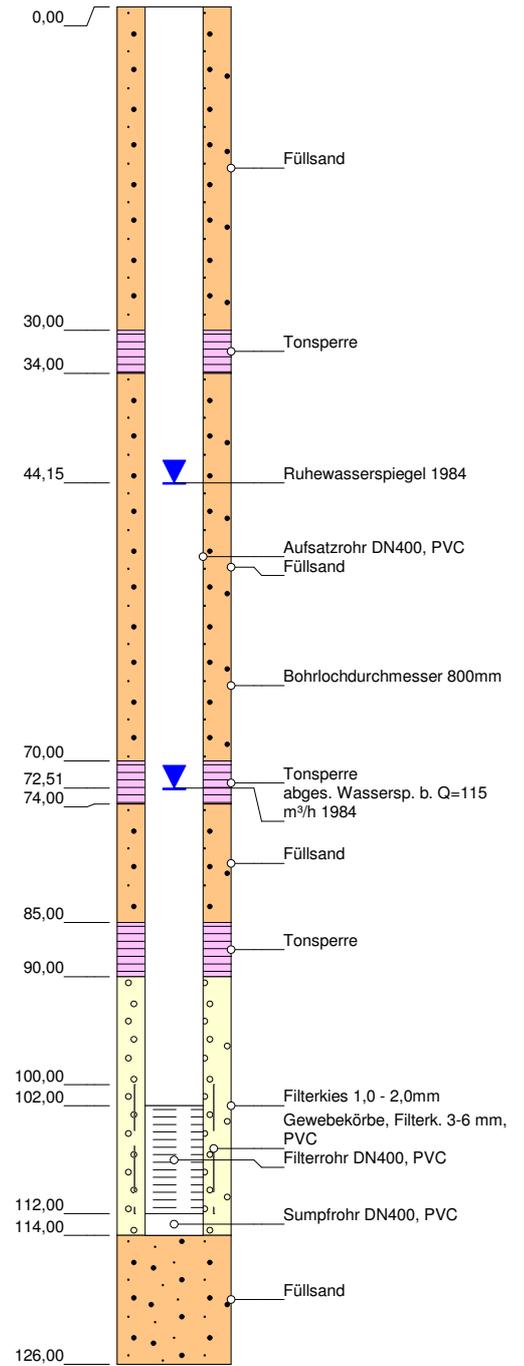
# Stratigraphie

(in mNN)

-70.70 qp  
-72.70 tmiGT

# Ausbau

(in m u. GOK)



## Ww. Bausberg: Förderbrunnen 17

HW-Name:	BBAU.RS17
Archiv Nr GLA / LANU / NLfB:	5038
Kartenblatt:	2424 Wedel
Lage:	R: 3551987 H: 5938403
Maßstab:	1:700
Bohrfirma:	R. Lange; Bj.: 1984
Vermessung:	
Stand der Daten:	24.03.2010



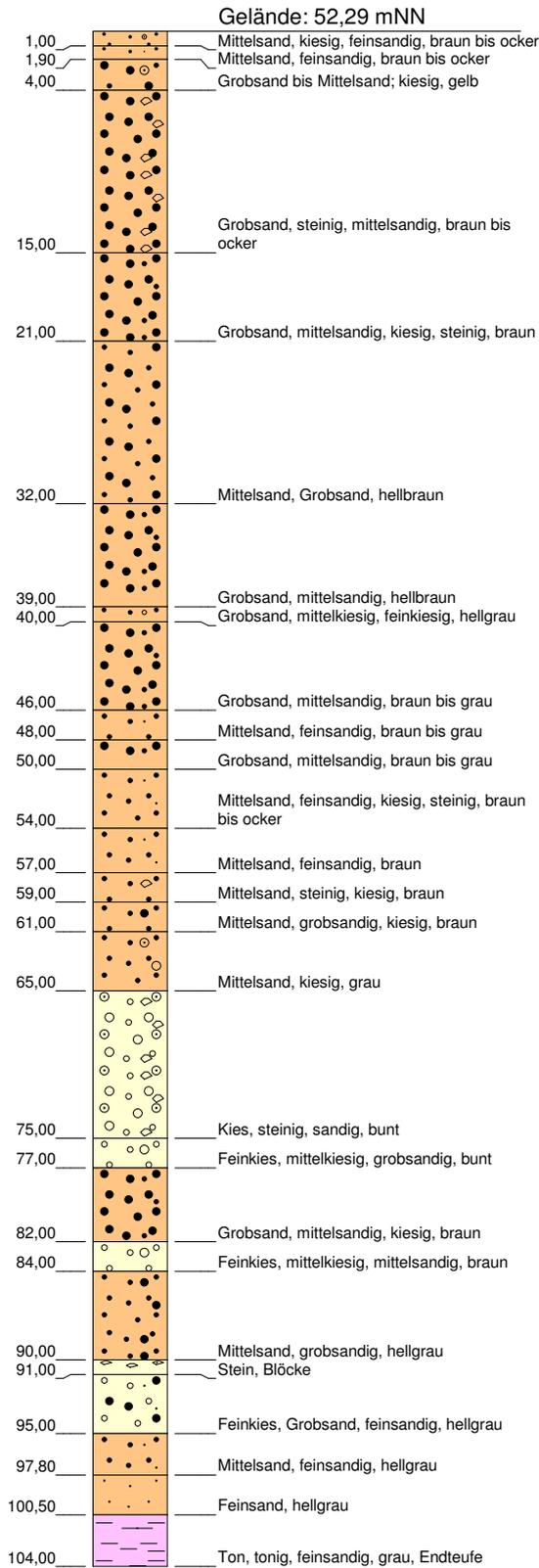
**HAMBURG  
WASSER**

Hamburger Wasserwerke GmbH  
Billhorner Deich 2 · 20539 Hamburg

**Abt. G 3**  
Wasserwirtschaftliches  
Ressourcenmanagement

# Bohrprofil

(in m u. GOK)



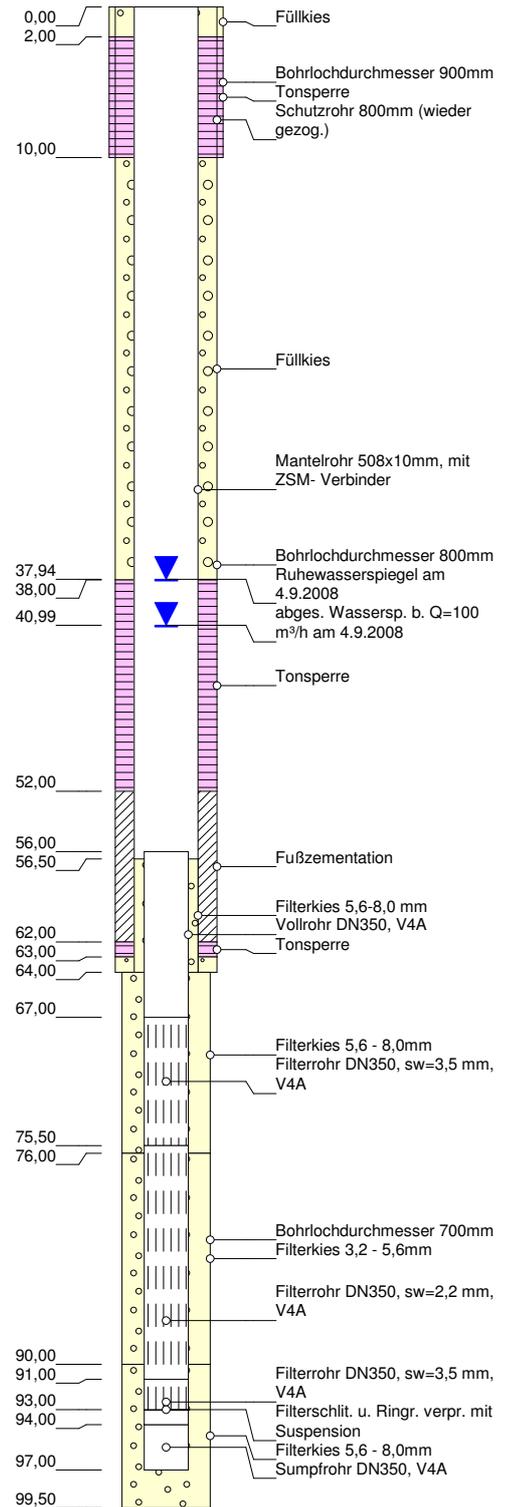
# Stratigraphie

(in mNN)



# Ausbau

(in m u. GOK)



## Ww. Boursberg: Förderbrunnen 19

HWW-Name:	BBAU.19
Archiv Nr GLA / LANU / NLfB:	
Kartenblatt:	2424 Wedel
Lage:	R: 3552540 H: 5938449
Maßstab:	1:500
Bohrfirma:	Hölscher Wasserbau, Bj. 2008
Vermessung:	TEGEO
Stand der Daten:	24.03.2010



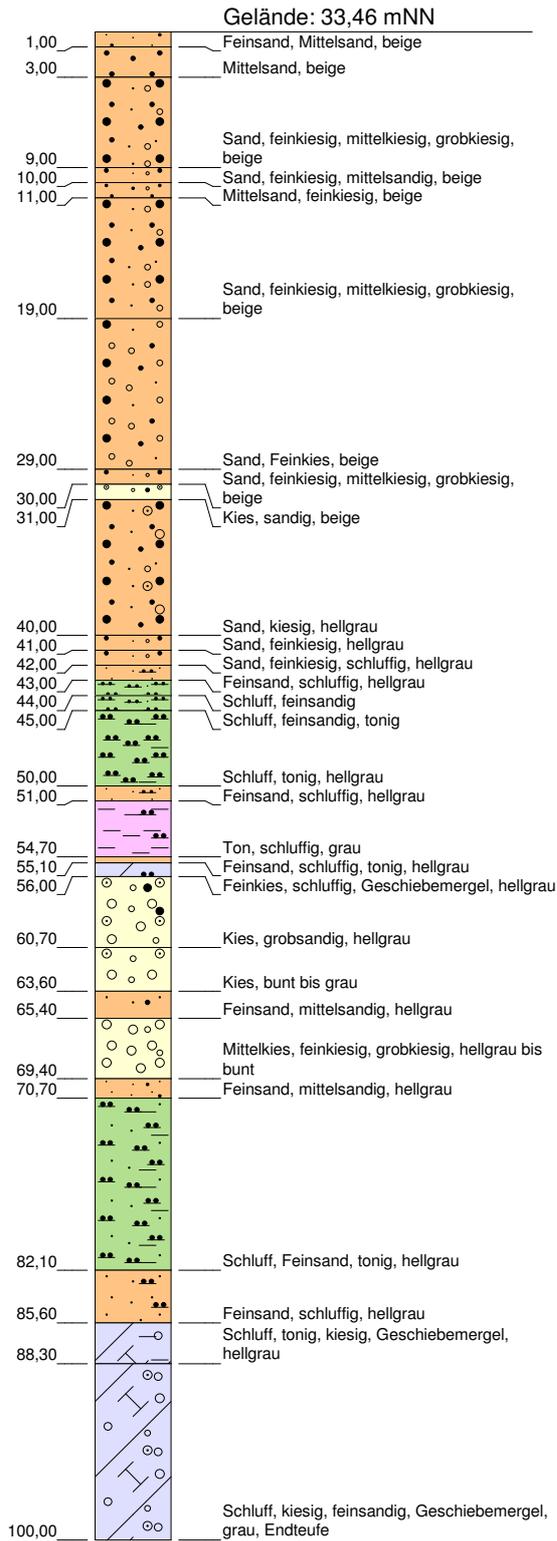
**HAMBURG  
WASSER**

Hamburger Wasserwerke GmbH  
Billhorner Deich 2 · 20539 Hamburg

**Abt. G 3**  
**Wasserwirtschaftliches  
Ressourcenmanagement**

# Bohrprofil

(in m u. GOK)



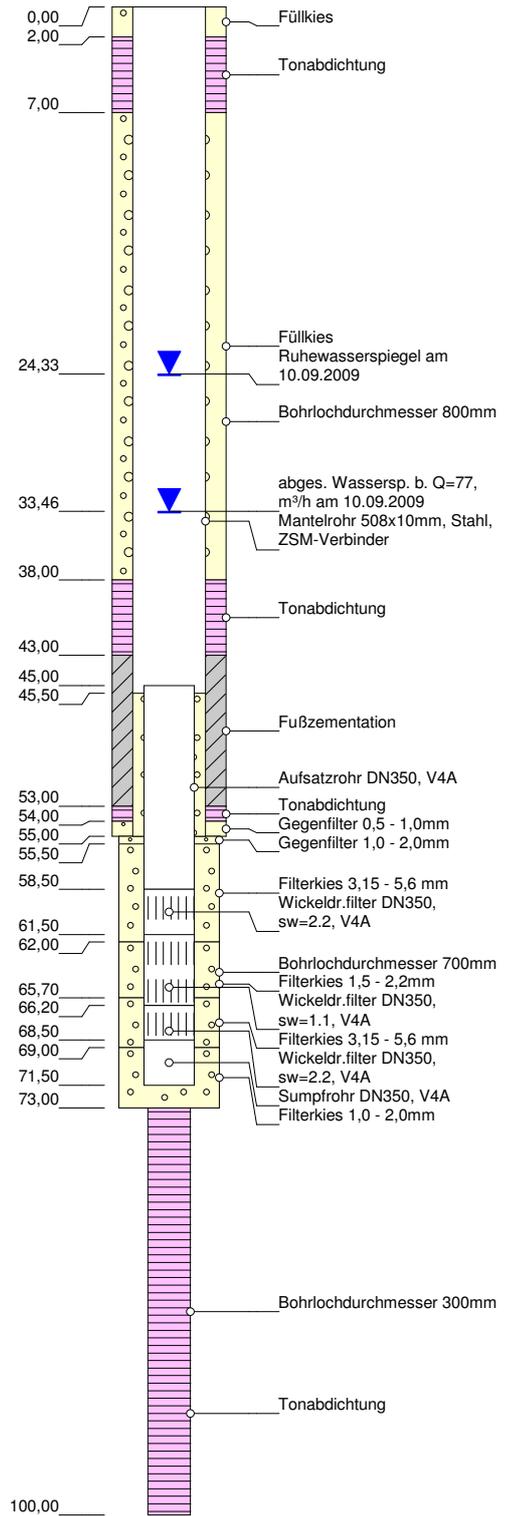
# Stratigraphie

(in mNN)

-66,54 qp

# Ausbau

(in m u. GOK)



## Ww. Bausberg: Förderbrunnen 20

HWW-Name:	BBAU.20
Archiv Nr GLA / LANU / NLfB:	
Kartenblatt:	2424 Wedel
Lage:	R: 3551570 H: 5938811
Maßstab:	1:500
Bohrfirma:	Hölscher Wasserbau, Bj. 2009
Vermessung:	Tegtmeyer
Stand der Daten:	29.11.2011



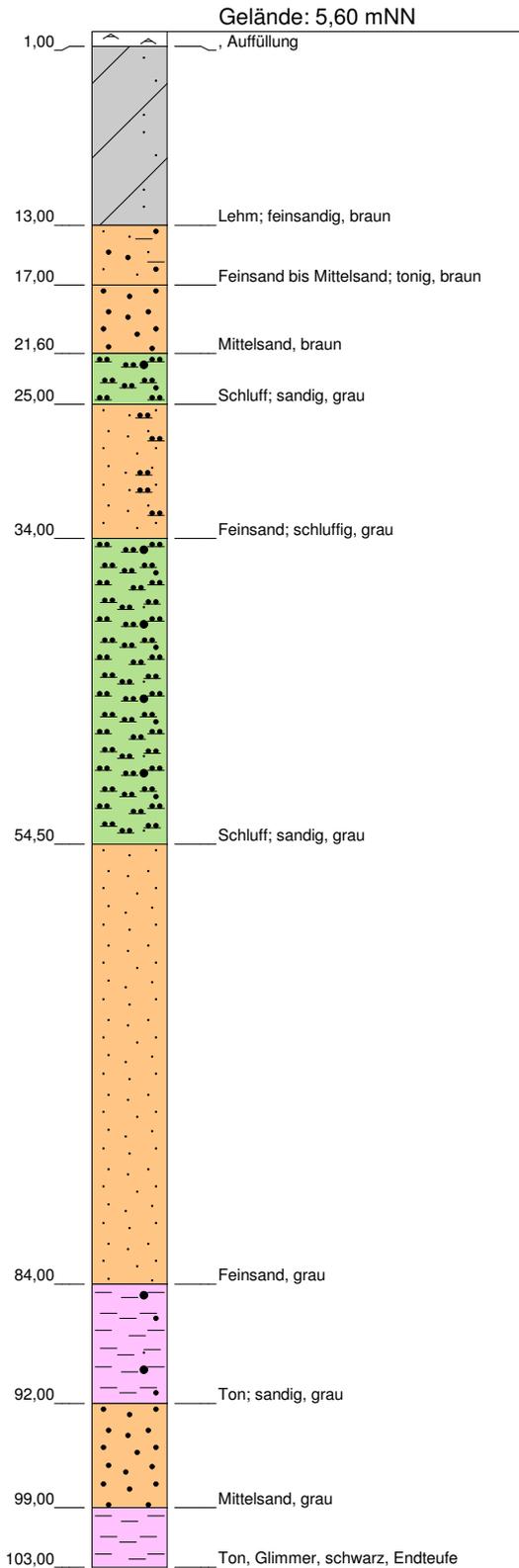
**HAMBURG WASSER**

Hamburger Wasserwerke GmbH  
Billhorner Deich 2 · 20539 Hamburg

**Abt. G 3**  
**Wasserwirtschaftliches Ressourcenmanagement**

## Bohrprofil

(in m u. GOK)



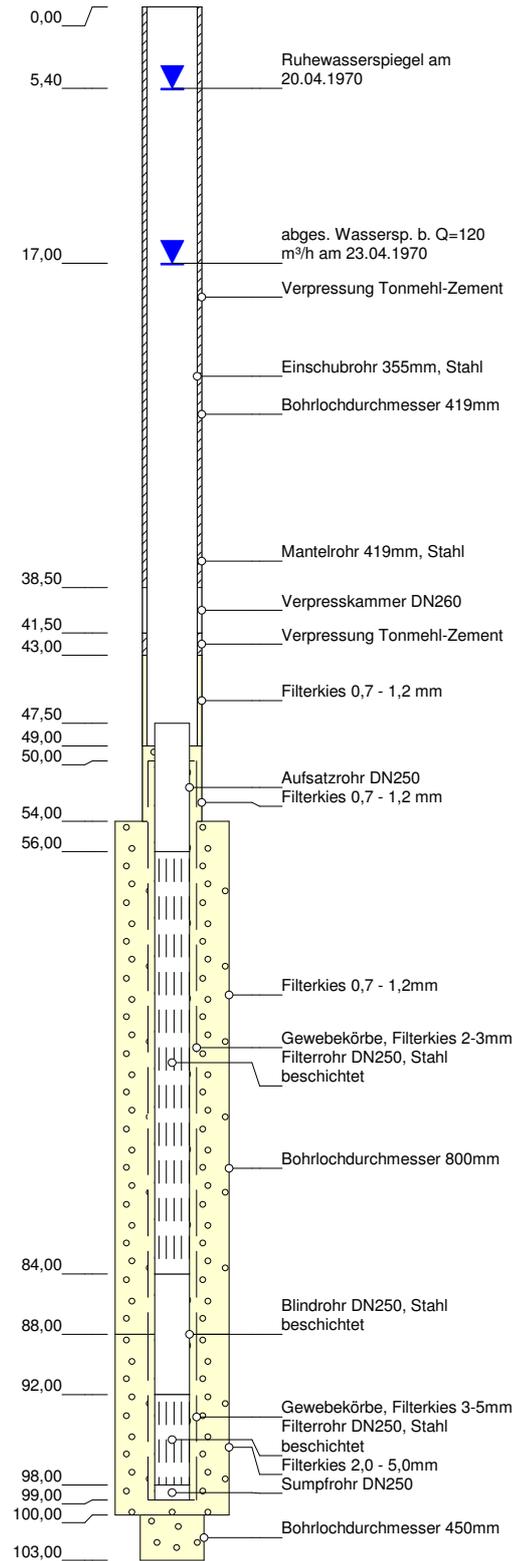
## Stratigraphie

(in mNN)

-93,40 qp  
-97,40 tmiGT

## Ausbau

(in m u. GOK)



### Ww. Boursberg: Förderbrunnen FS23

HWW-Name:	BBAU.FS23
Archiv Nr GLA / LANU / NLfB:	5036
Kartenblatt:	2424 Wedel
Lage:	R: 3551265 H: 5937179
Maßstab:	1:500
Bohrfirma:	Lange & S., Bj. '70; Preussag Rep. '96
Vermessung:	
Stand der Daten:	24.03.2010



**HAMBURG  
WASSER**

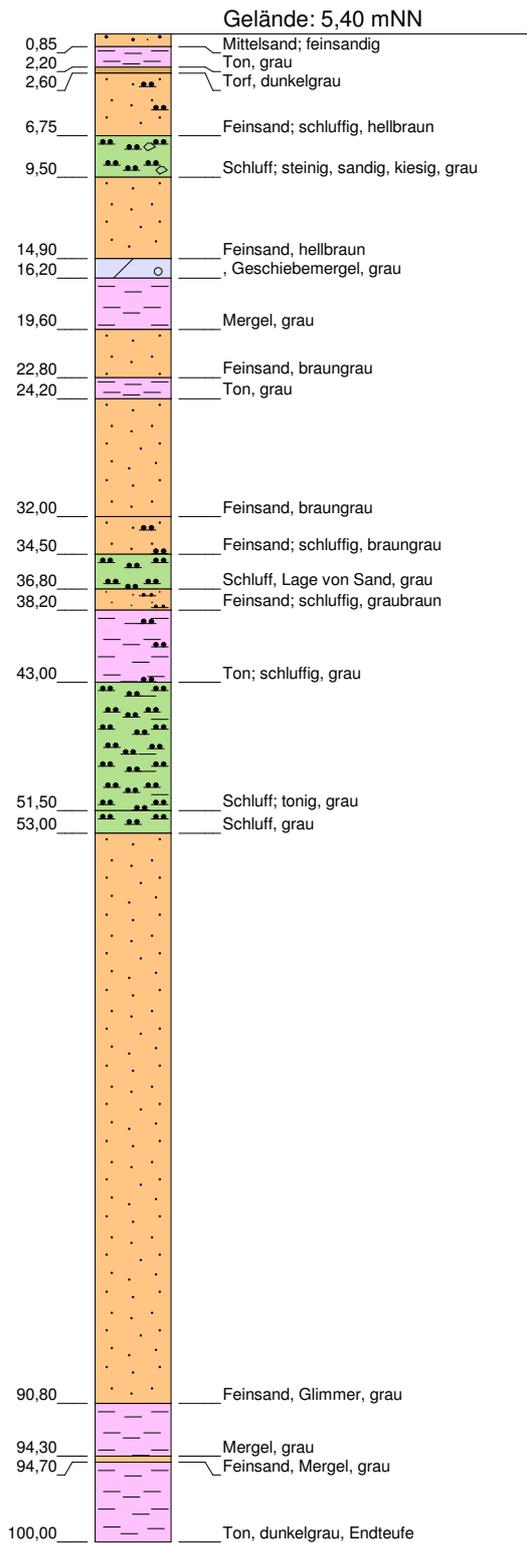
Hamburger Wasserwerke GmbH  
Billhorner Deich 2 · 20539 Hamburg

Abt. G 3

Wasserwirtschaftliches  
Ressourcenmanagement

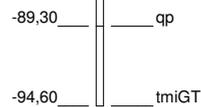
## Bohrprofil

(in m u. GOK)



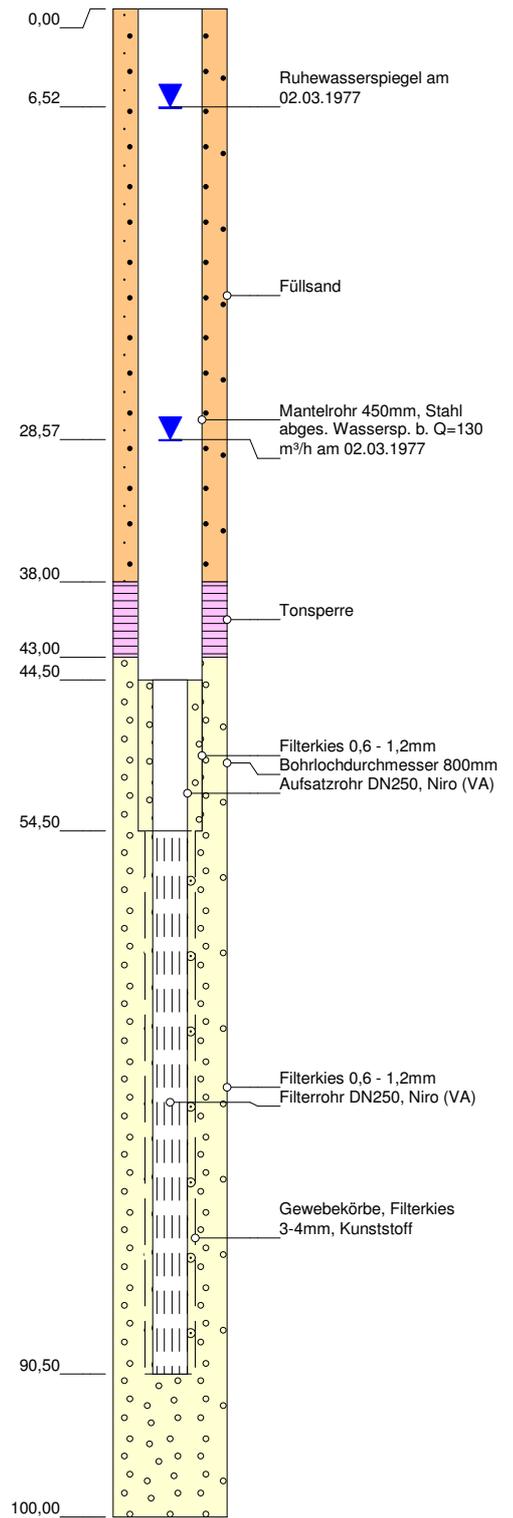
## Stratigraphie

(in mNN)



## Ausbau

(in m u. GOK)



### Ww. Boursberg: Förderbrunnen FS26

HW-Name:	BBAU.FS26
Archiv Nr GLA / LANU / NLfB:	5036
Kartenblatt:	2424 Wedel
Lage:	R: 3551094 H: 5937226
Maßstab:	1:500
Bohrfirma:	Scheven; Bj.: 1977
Vermessung:	
Stand der Daten:	24.03.2010



**HAMBURG  
WASSER**

Hamburger Wasserwerke GmbH  
Billhorner Deich 2 · 20539 Hamburg

Abt. G 3

Wasserwirtschaftliches  
Ressourcenmanagement

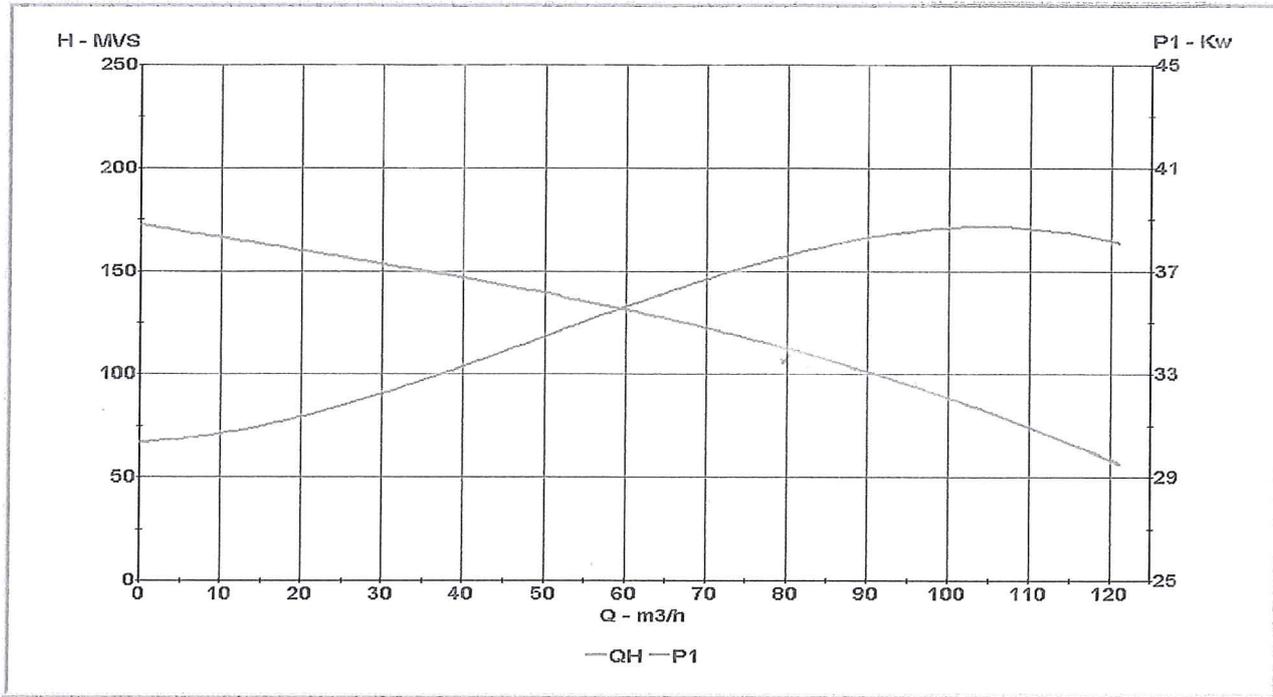
## **Anhang 3 – Pumpenkennlinien und Pumpenprüfprotokolle**

Br. 10

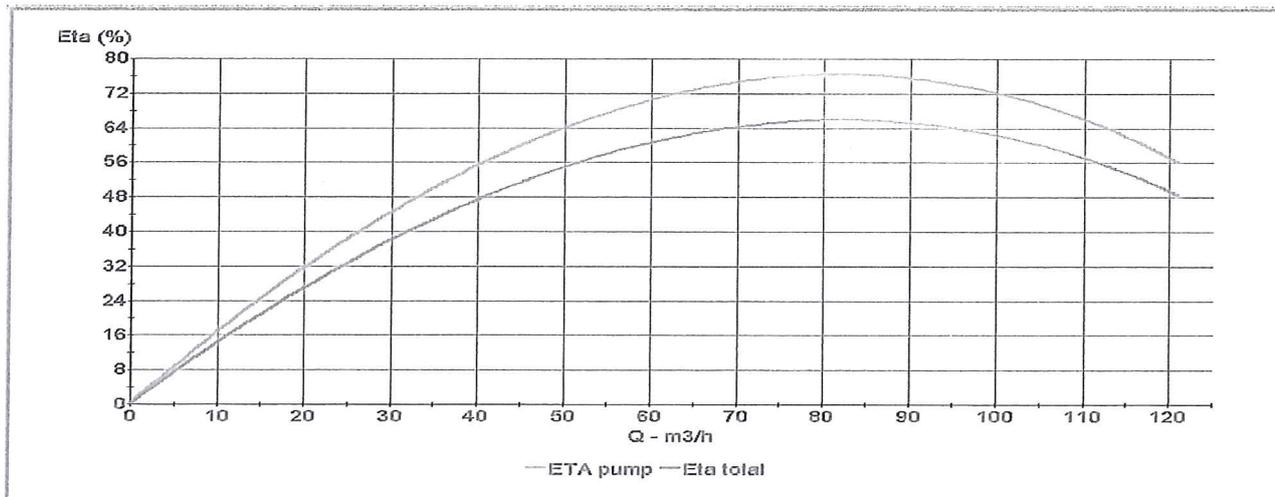
# Pumpen Prüfzertifikat

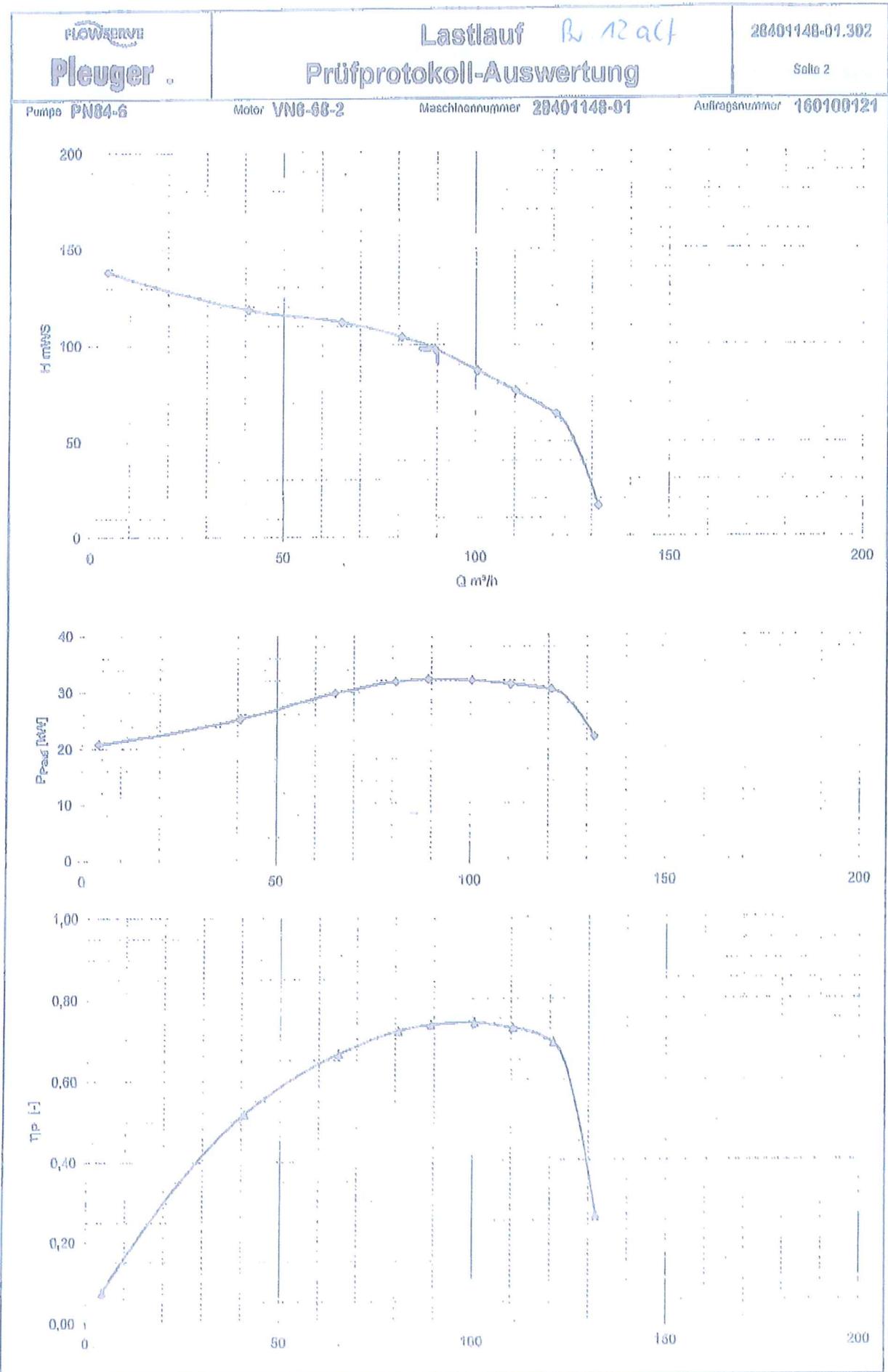


## Prüfdiagramme



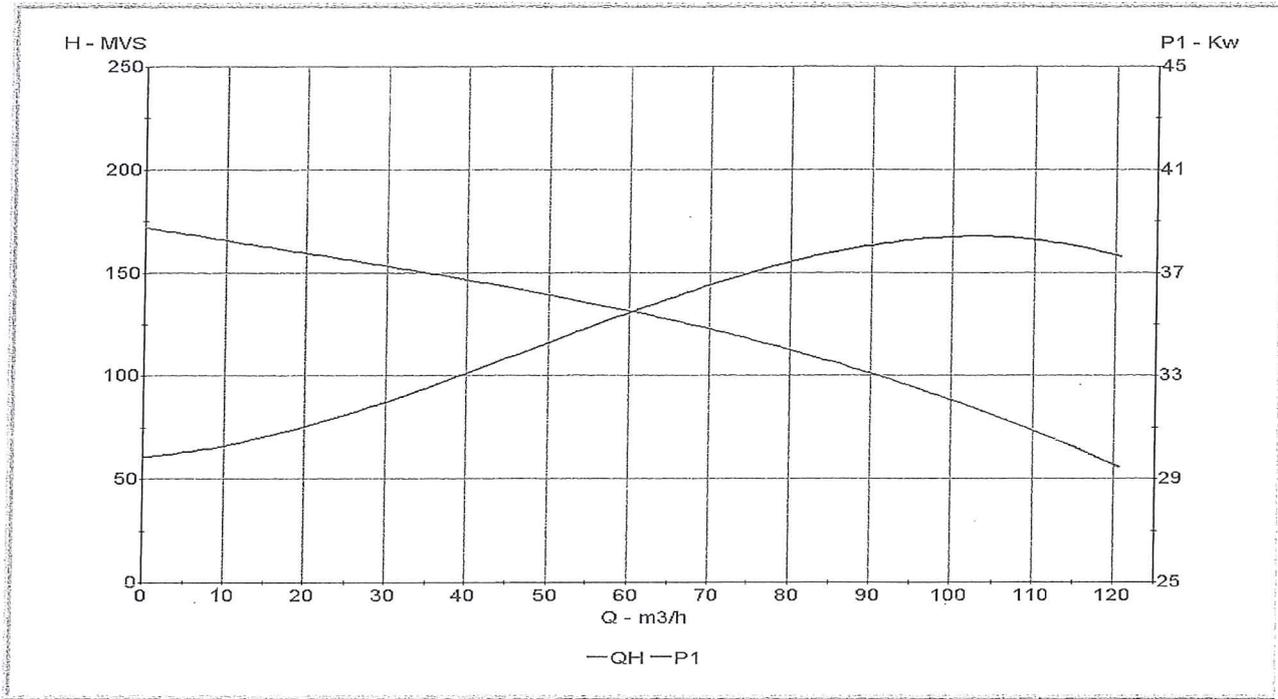
## Pumpenwirkungsgraddiagramm



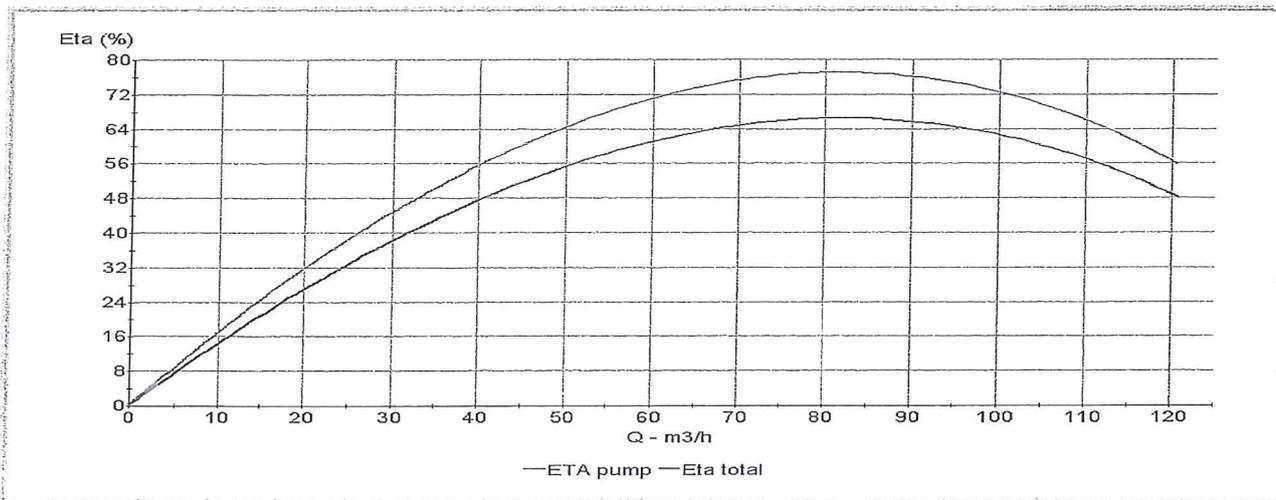


# Pumpen Prüfzertifikat

## Prüfdiagramme



## Pumpenwirkungsgraddiagramm

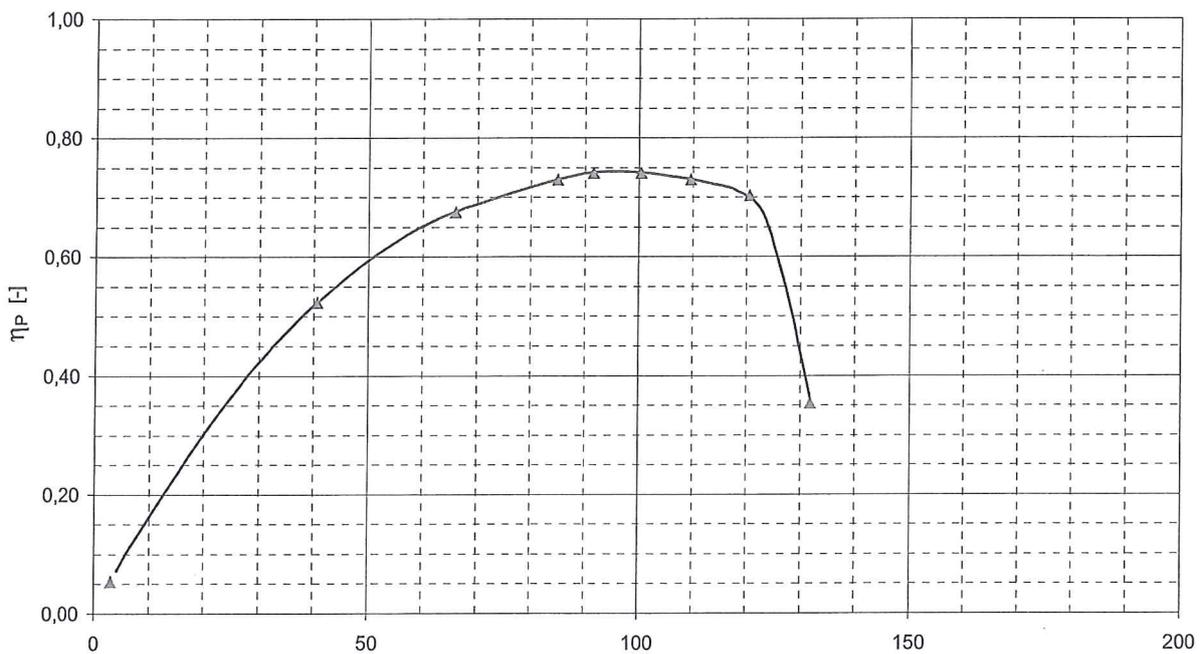
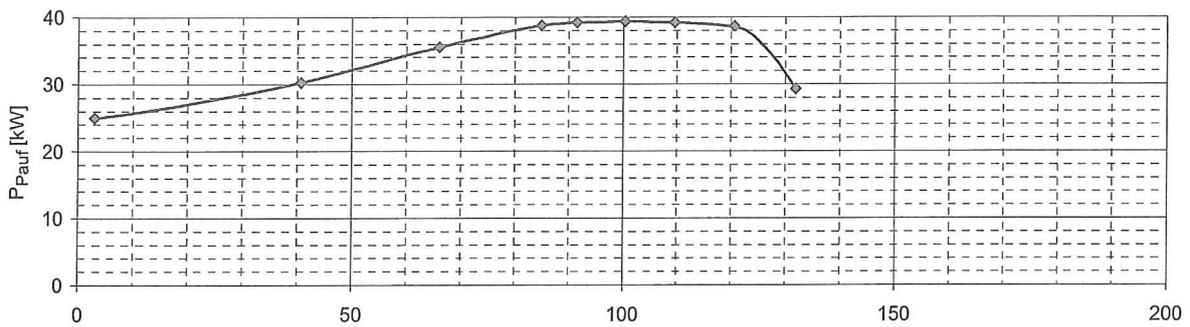
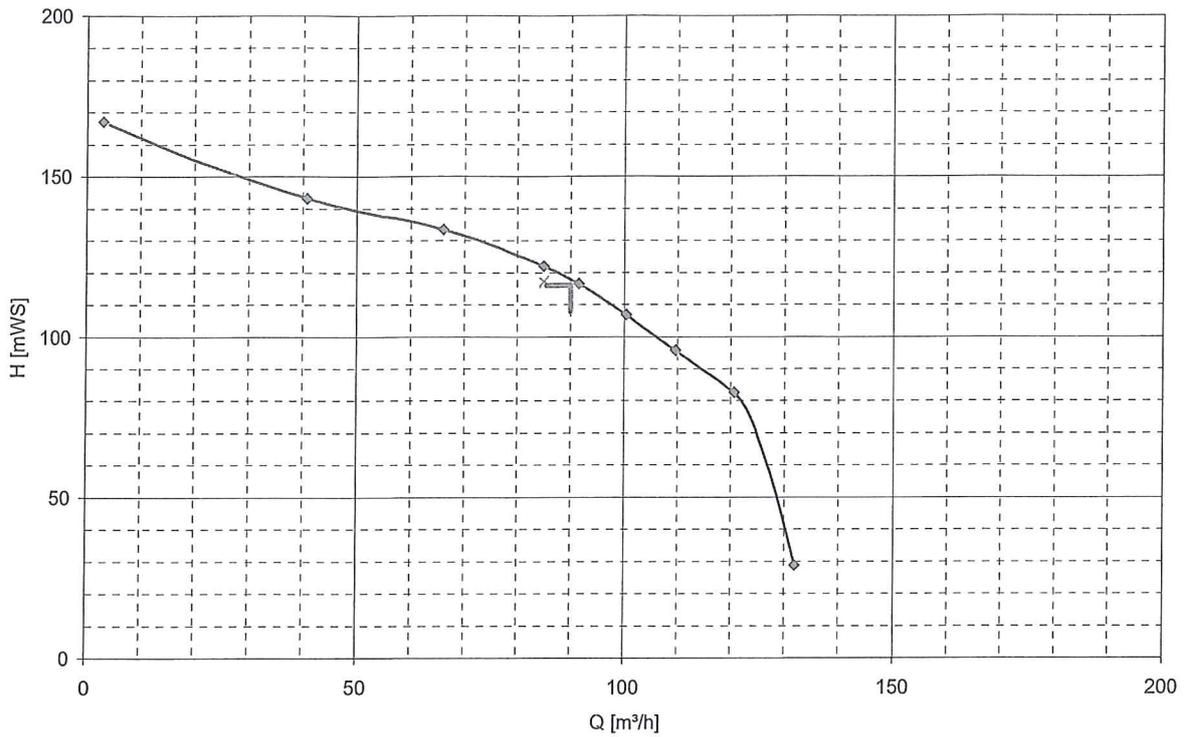


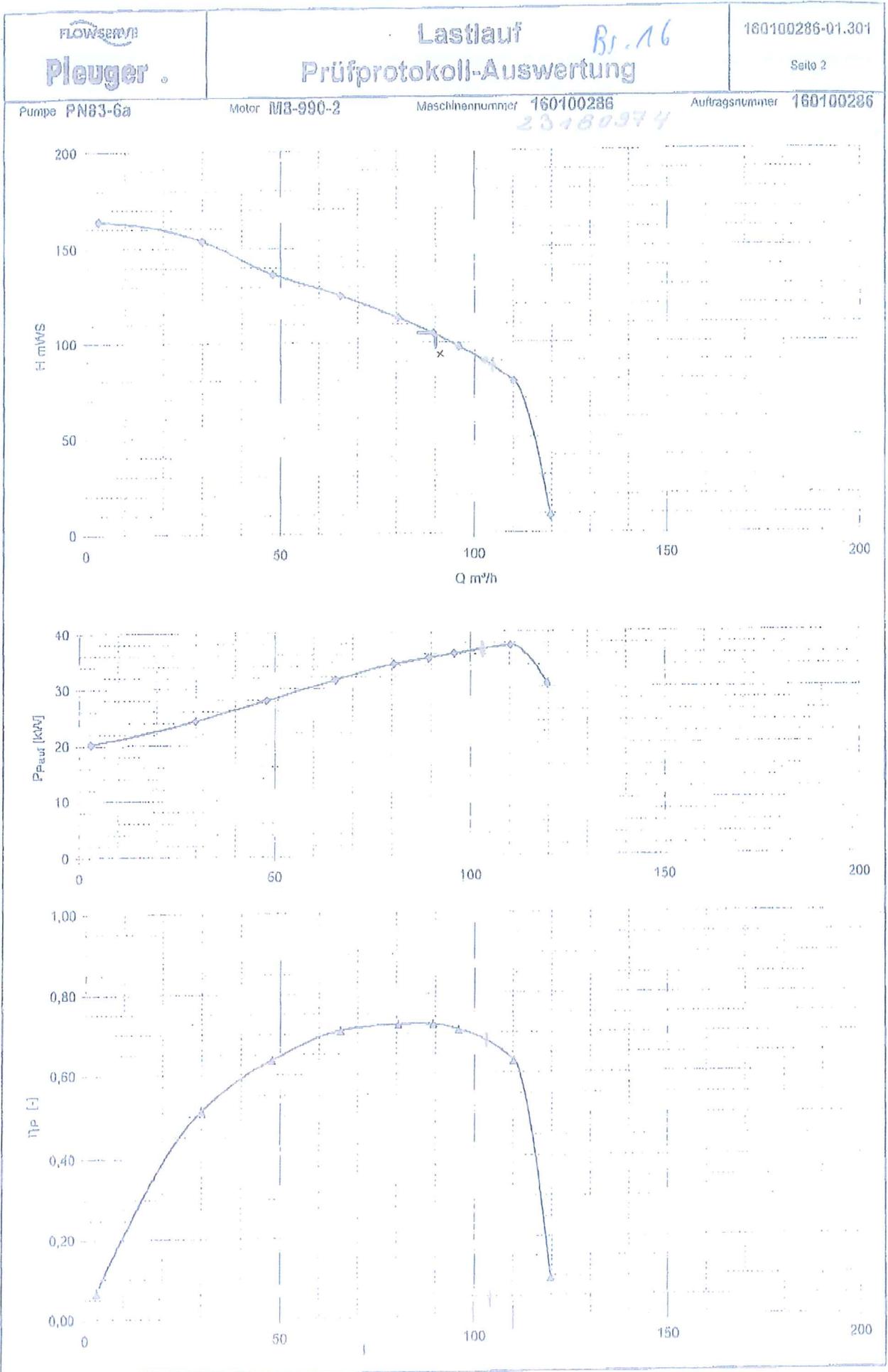
Pumpe **PN84-7a**

Motor **M8-530-2**

Maschinennummer **110103221**

Auftragsnummer **110103221**





FLOWSERVO

Pleuger.

# Lastlauf Prüfprotokoll-Auswertung

23129165-01.301

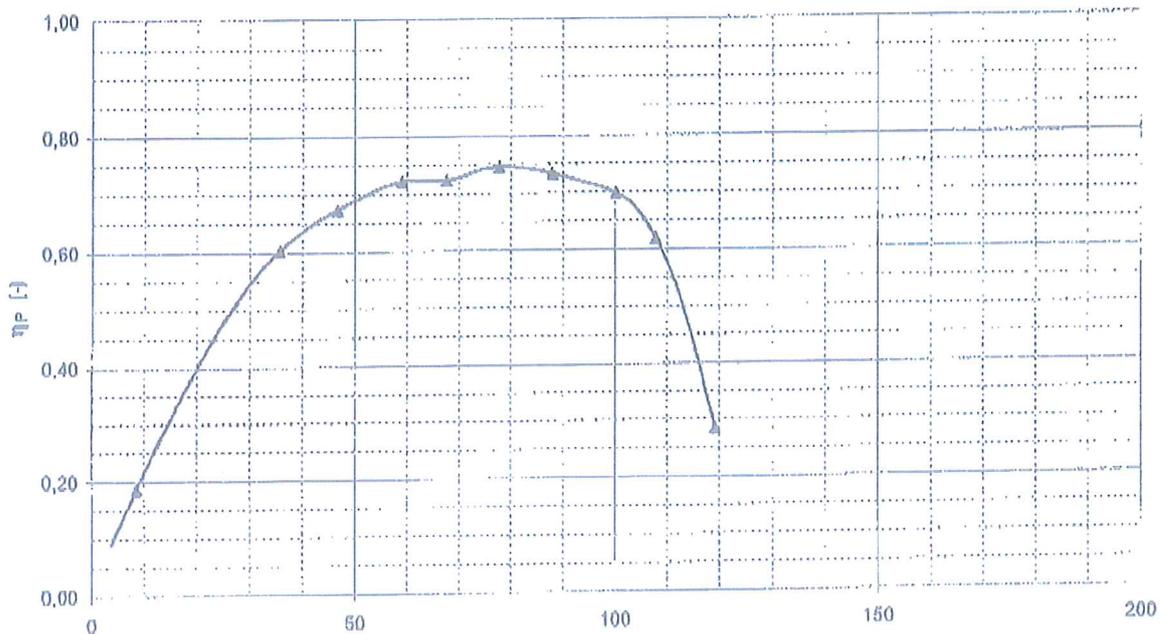
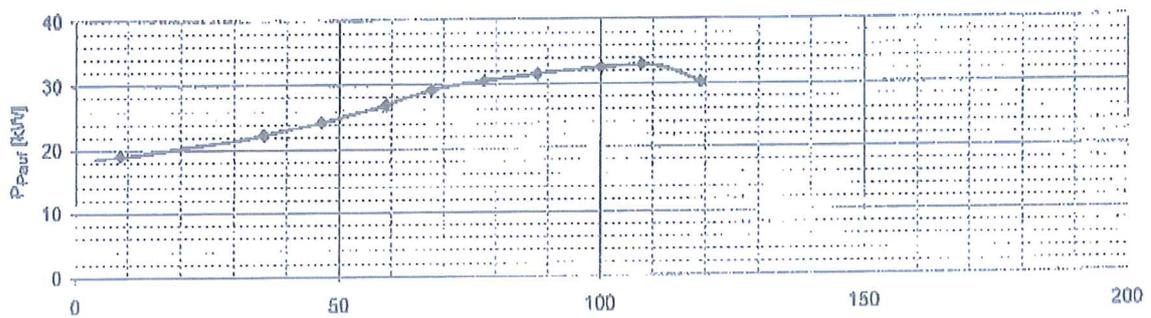
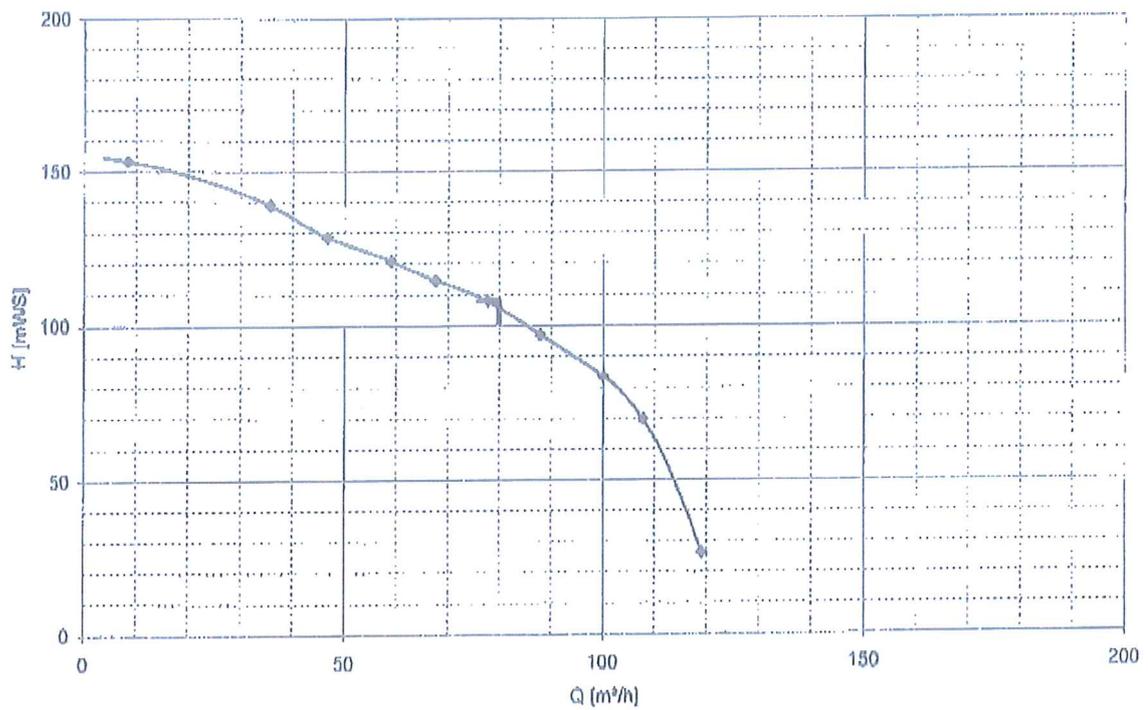
Seite 2

Pumpe PN83-6a

Motor M0-520-2

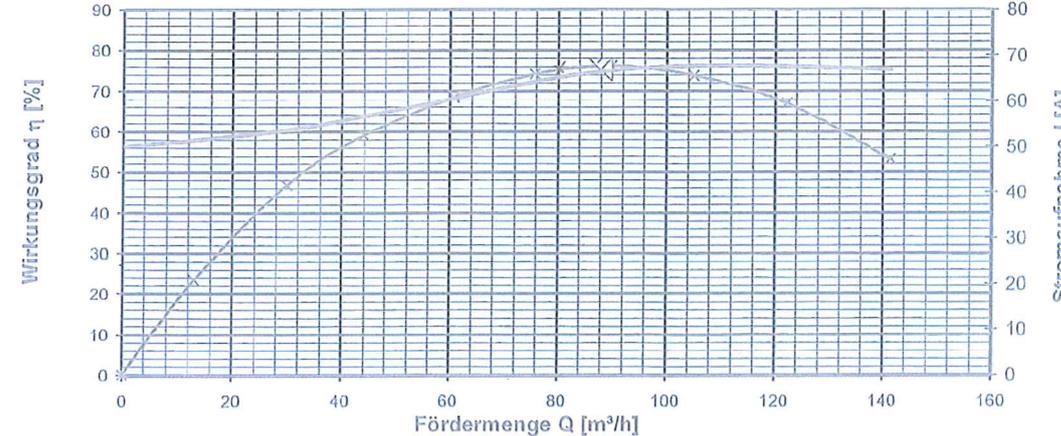
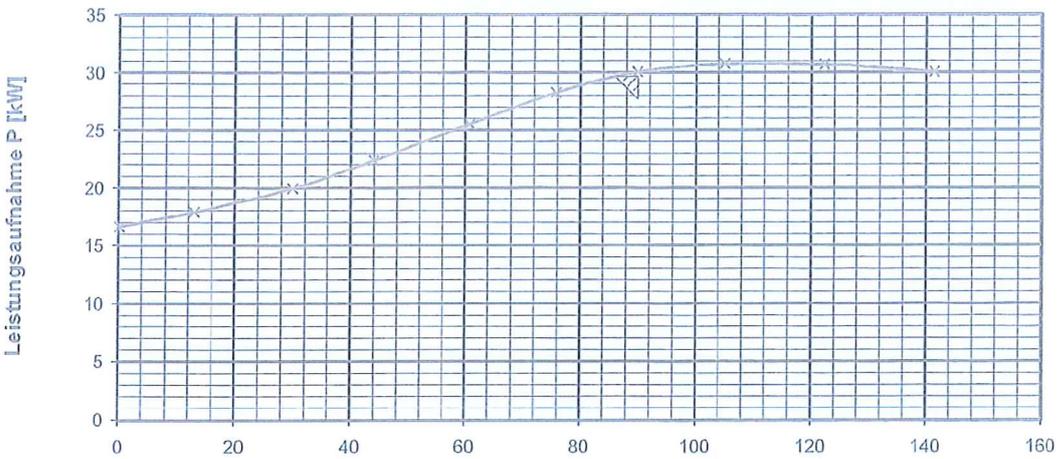
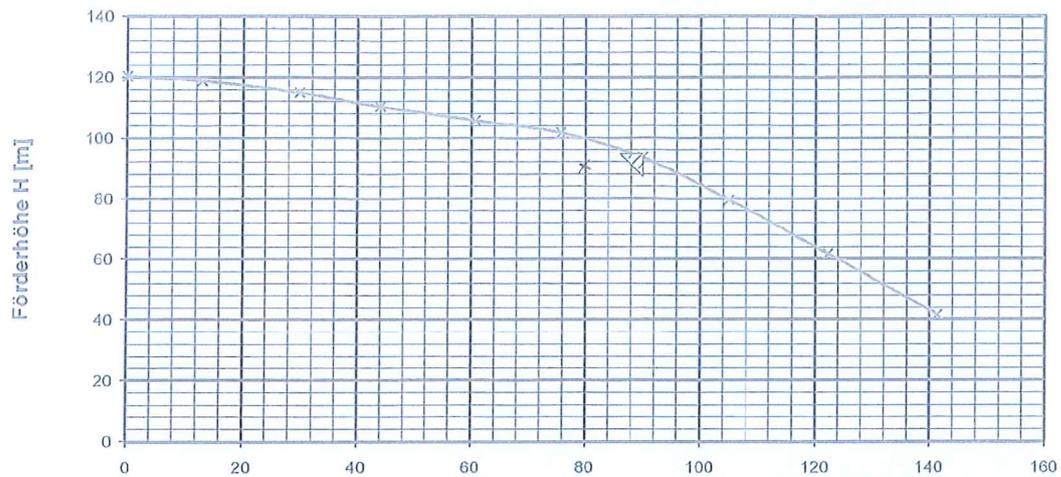
Maschinennummer 23129165

Auftragsnummer 160100285



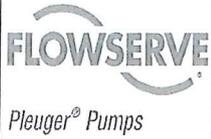
B. 19

Kennlinien bei Betriebsdrehzahl 2951 bis 2972 1/min



	<b>Prüfkurven</b>				Kunde <b>Hamburger Wasserwerke</b>				
	IPTEST_NEU_2.MDB / ROOT / 9971701567-200				Werksnr. 9971701567-200		Auftragsnr. .		Datum: 07.05.2010
<b>Pumpendaten</b> Protokollnr.	Typ	UPA 200 B - 80 / 5 a		Stufenzahl	-				
	Hersteller	KSB		5	Durchmes.	D1a [mm]	D1i [mm]	D2a [mm]	D2i [mm]
<b>Motordaten</b> Kundenmotor?	Typ	UMA 200 D - 55/21		Netzfrequ.	P Motor	n	Spannung	Strom	cos φ
	Hersteller	MSR		50 Hz	38 kW	2940 1/min	400 V	81,90 A	0,77
<b>Bestelldaten</b> Abnahme nach: ISO 9906-1	Q	H	P Pumpe	η Pumpe	Drehzahl	NPSH	Dichte ρ	kin. Visk	g
	m³/h	m	kW	%	1/min	m	kg/m³	m²/s	m²/s²
	90,0	94,6	29,6	78,1	2940	0,0	998,0	1,00E-06	9,8100

Reservepumpe : Überholung bei Flowserve 10/2011



PN82-7a + M6-720-2

Br. 20

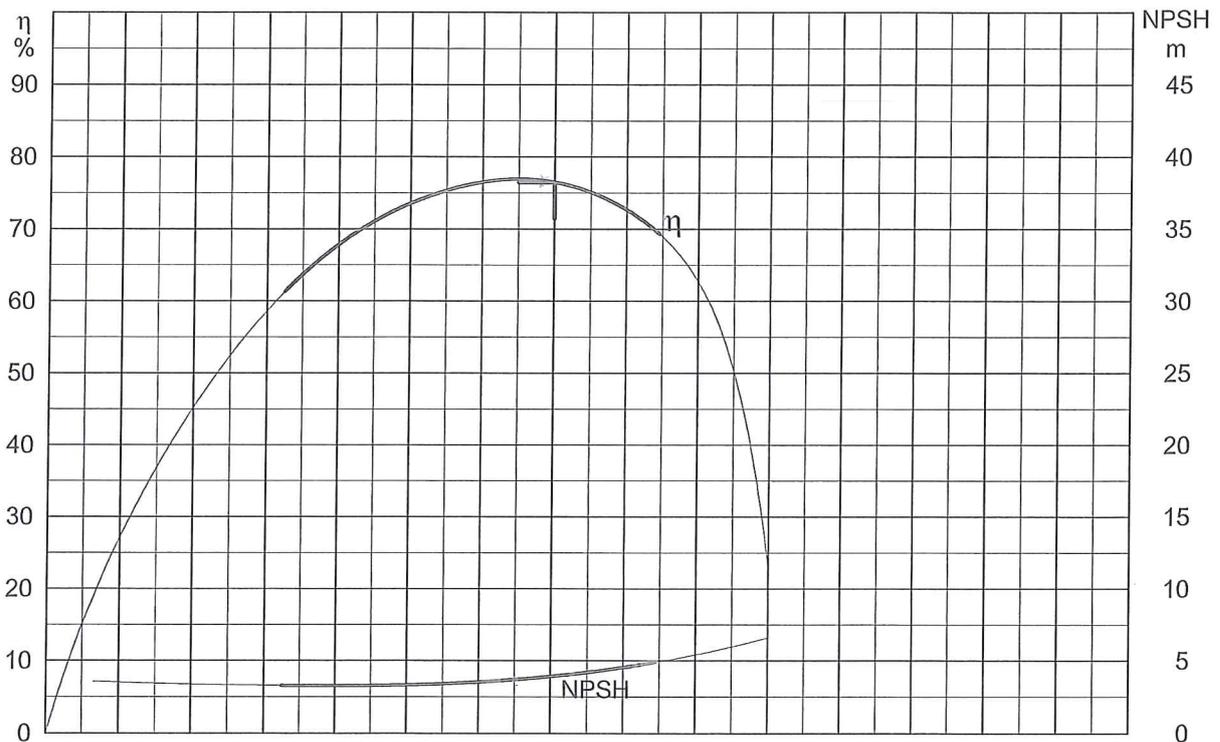
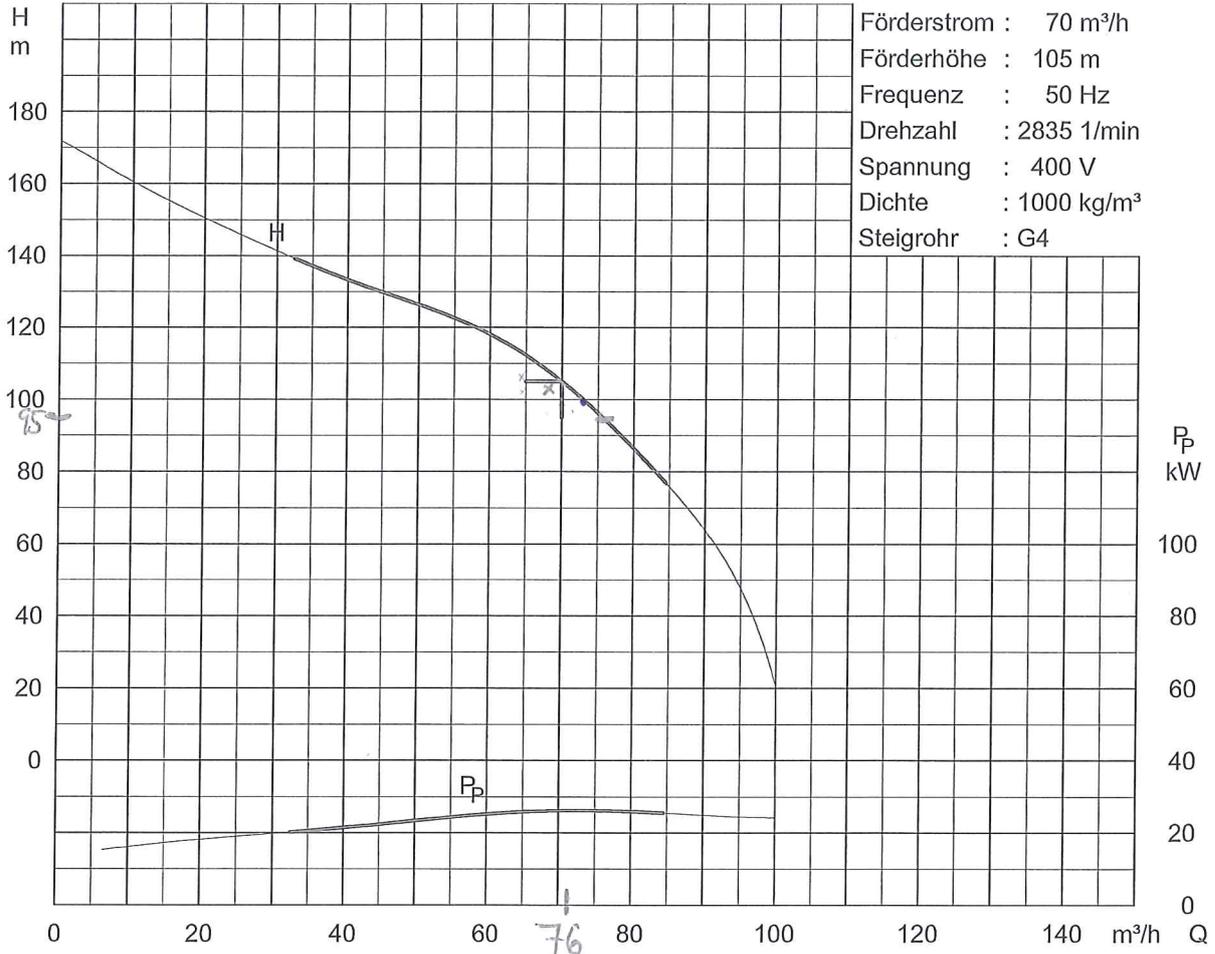
S 11-1921

Projekt  
110105238 HH Wasser

Datum  
20.07.2011

Sachbearbeiter  
J. López

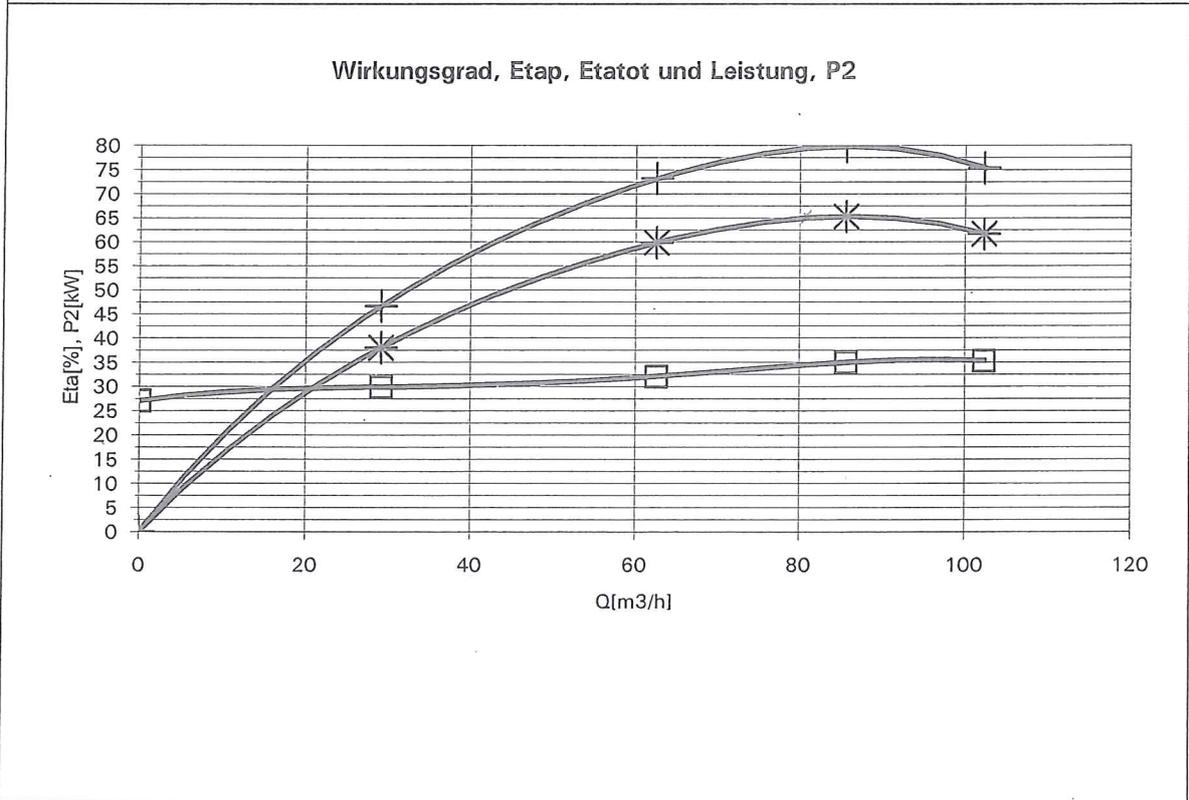
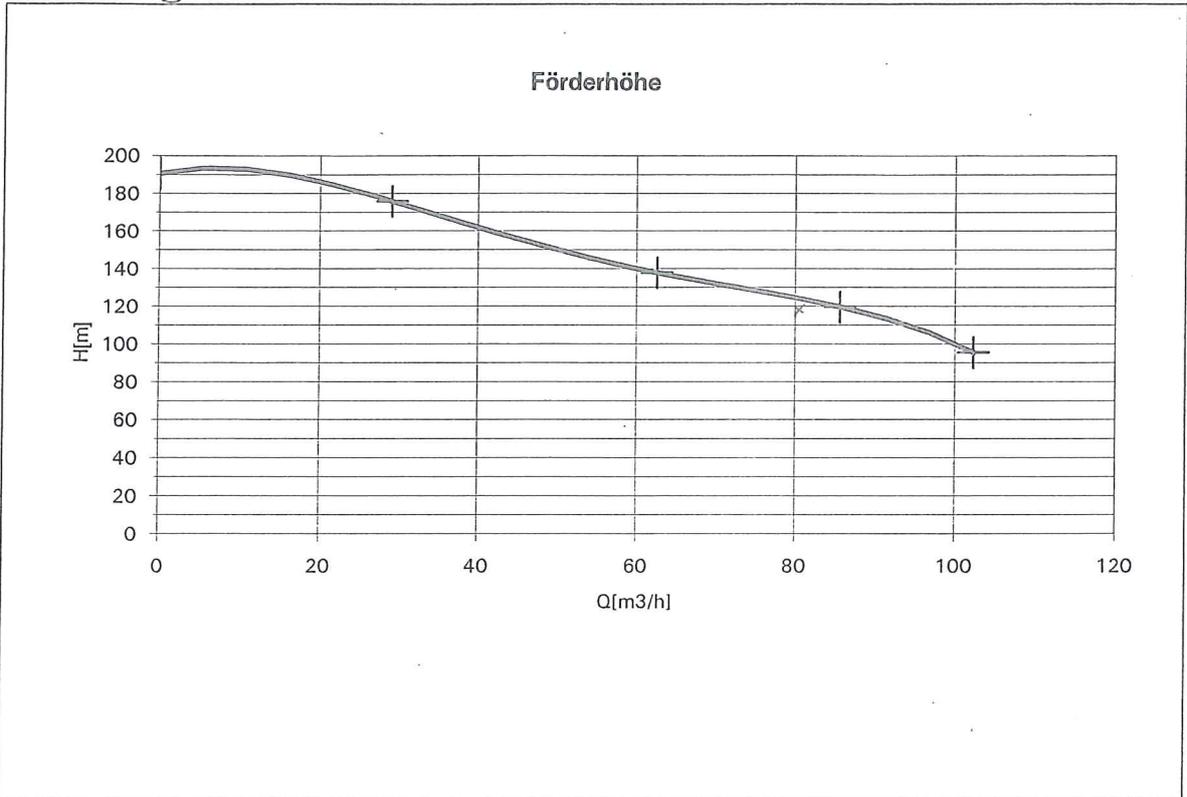
Laufradmaterial: IP: NORYL

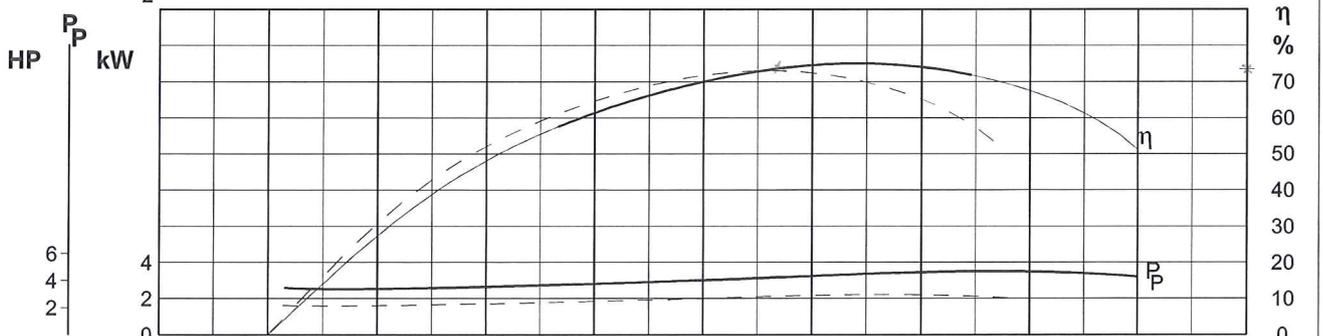
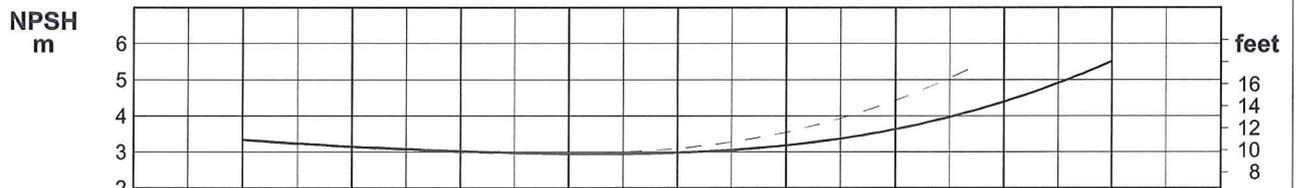
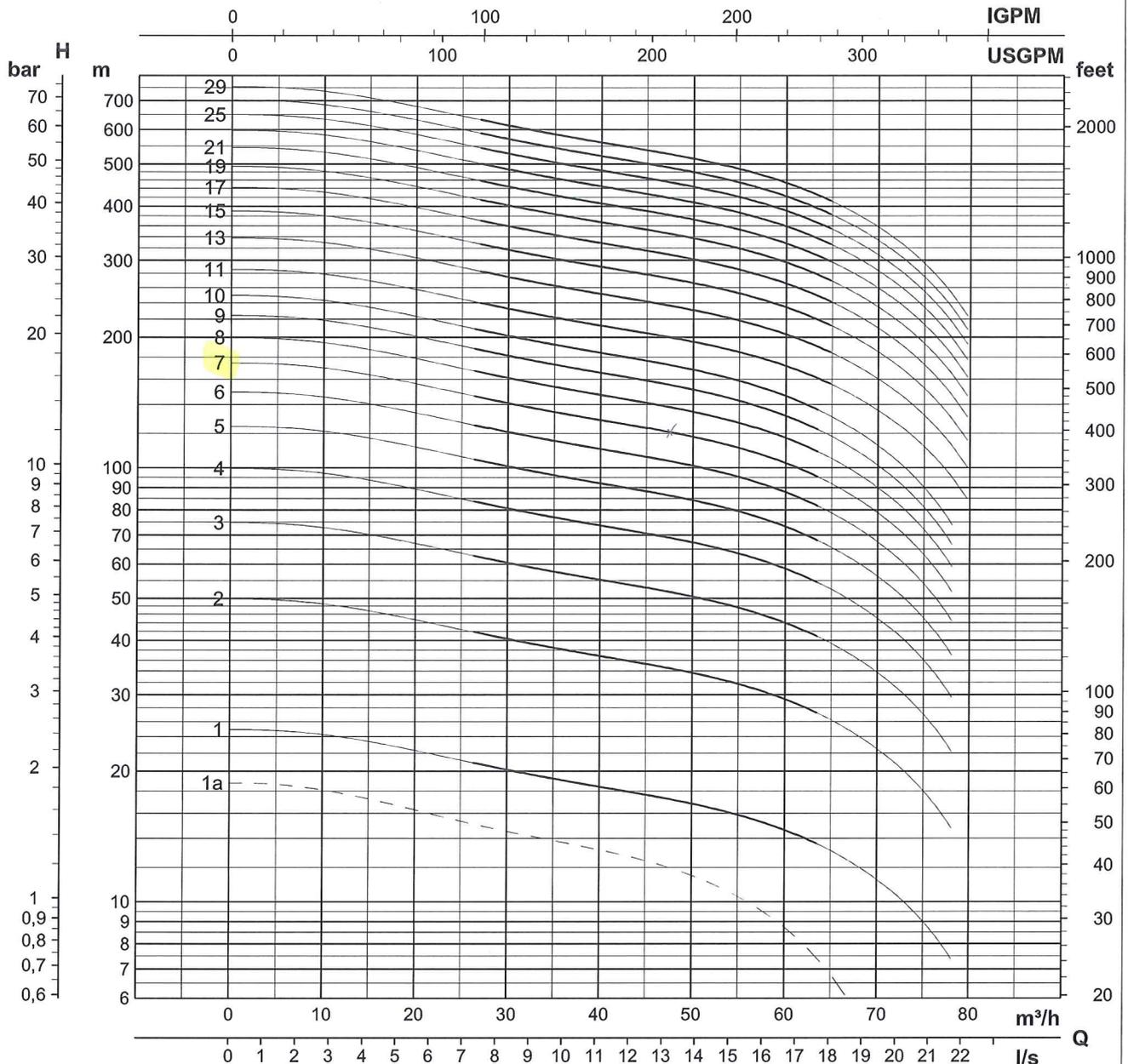


Die Kurven sind angenähert, der Auslegungspunkt der Pumpe wird garantiert gemäß EN ISO 9906 1999, Kl. 2  
 Die Garantie bezieht sich auf Werkstest mit sauberem Wasser nicht über 20 °C

Br. 23

# Prüfdiagramme





*$\eta_{Motor} = 0,81$*

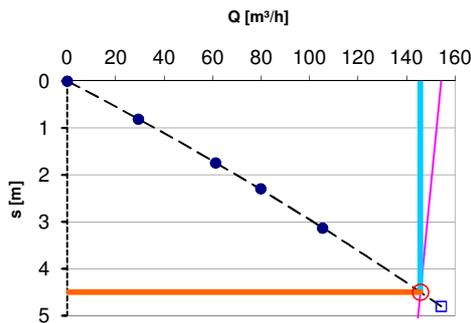
Wasserwerk Bausberg Grundwasserleiter (GWL) : Quartär HWW Code: q2 ungespannt

Stufentest 12/2007 PV Messpunkt (m NN) = 74,96 GOK (m NN) = 74,52

Stufe	Q [m³/h]	Q [m³/s]	Datum	Zeit	Abstich s[m]	Absenkung ds [m]	spez. Abs. ds/Q [s*m²]	BQ [m]	DQ [m]	CQ² [m]
Rwsp	0,00	0,00	03.12.	7:15	62,44	0,00	0,00	0,000	0,000	0,000
1. Stufe	29,30	0,00814	03.12.	8:15	63,25	0,81	99,52	0,279	0,529	0,0018
2. Stufe	61,20	0,017	03.12.	10:15	64,18	1,74	102,53	0,630	1,105	0,0078
3. Stufe	79,80	0,02217	03.12.	14:15	64,73	2,29	103,44	0,839	1,441	0,0133
4. Stufe	105,30	0,02925	03.12.	22:15	65,57	3,13	107,04	1,207	1,901	0,0231

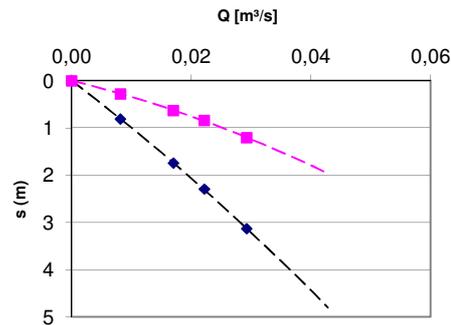
**Q<sub>Betrieb</sub> = 145,7 m³/h** **s<sub>Betrieb</sub> = 4,5** **E<sub>s</sub> Betrieb [m³/h/m] = 32,4**

**Ermittlung des Betriebspunktes**



● Absenkung gemessen [m]      — Fassungsvermögen Q<sub>f</sub>  
 — Q<sub>Betrieb</sub> [m³/h]              — s<sub>Betrieb</sub> [m]

**Brunnenverlust**



◆ Absenkung gemessen BQ+DQ+CQ² [m]      — Absenkung Grundwasserleiter BQ [m]

**Brunnendaten und Hydrogeologische Parameter**

**Entwicklung E<sub>s</sub> = Q<sub>Betrieb</sub> / s<sub>Betrieb</sub>**

Parameter	Zeichen	Einheit	Wert	Datum	s <sub>Betrieb</sub> [m]	Q <sub>Betrieb</sub> [m³/h]	E <sub>s</sub> Betrieb [m³/h/m]	Bem.
Messpunkt im Betrieb	Mp	m NN		03.12.	3,13	105,30	33,64	Es 100% Neubau 4. Stufe
Pumpentiefe u. GOK	TP	m						
k <sub>f</sub> - Wert *	k <sub>f</sub>	m/s	6,46E-04					
Speicherkoeffizient *	S*	(-)	3,50E-01					
Hydraulischer Widerstand *	c*	s	6,59E+04					
Filterlänge	F	m	23,00					
Bohrradius	rB	m	0,35					
OK Deckschicht u.GOK	D <sub>o</sub>	m	-					
Basis Deckschicht u.GOK	D <sub>b</sub>	m	-					
Filteroberkante u.GOK	FOK	m	81,00					
Basis GWL <sup>1</sup>	GWL <sub>b</sub>	m	117,00					
Verlustkoeffizient	C*	s²m <sup>-5</sup>	27,00					
Verlustkoeffizient	Skin D*	s*m <sup>-2</sup>	65,00					
Gesamtmächtigkeit GWL	M	m	80,65					
Fassungsvermögen	Q <sub>f</sub>	m³/h	154,27					
Betriebsfördermenge	Q <sub>Betrieb</sub>	m³/h	145,70					
Infiltrationsmenge	Q <sub>in</sub>	m³/h	61,71					
Betriebsabsenkung*	s <sub>Betrieb</sub>	m	4,50					
theoret. Reichweite	R	m	342,93					

\* durch PV - Programm ermittelt

$$Q_F = (2rB * \pi * F * (\text{Wurzel } k_f) / 30) * 3600 \text{ [m}^3\text{/h]} \text{ (HUISMAN)}$$

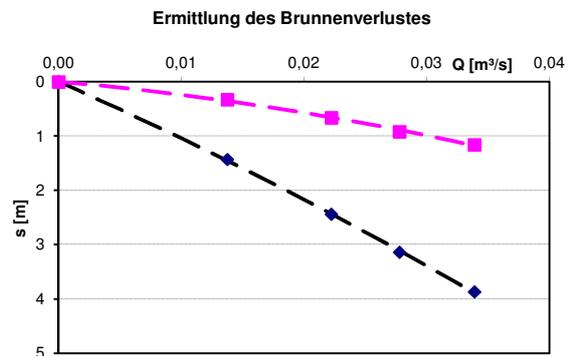
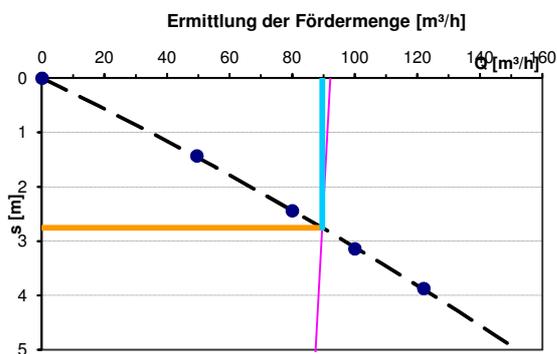
Auswertung instationär nach HANTUSH

$$\text{Reichweite (SICHARDT) } R = 3000 * s * \text{Wurzel } (k_f)$$

<sup>1</sup> oder Ende der Bohrung

07.02.2008 GW3 Cron

Wasserwerk Bausberg		Grundwasserleiter (GWL) :		Quartär		HWW Code: q2		ungespannt		
Stufentest 09/2008		PV Messpunkt (m NN) =		53,24		GOK (m NN) =		52,29		
Stufe	Q [m³/h]	Q [m³/s]	Datum MM:TT	Zeit hh:mm	Abstich [m] zu GOK	Absenkung s [m]	BQ [m]	DQ [m]	CQ² [m]	Es [m³/h/m]
Rwsp	0,0	0,000	04.09.	06:00	37,95	0,00	0,00	0,000	0,000	0,00
1. Stufe	49,5	0,014	04.09.	07:00	39,38	1,43	0,33	1,100	0,000	34,62
2. Stufe	80,0	0,022	04.09.	14:00	40,39	2,44	0,66	1,778	0,000	32,79
3. Stufe	100,0	0,028	04.09.	22:00	41,09	3,14	0,92	2,222	0,000	31,85
4. Stufe	122,0	0,034	05.09.	08:00	41,82	3,87	1,16	2,711	0,000	31,52
<b>Q<sub>max</sub> =</b>		<b>90,0</b>	<b>m³/h</b>		<b>s<sub>max</sub>[m] =</b>		<b>2,8</b>	<b>E<sub>s Qmax</sub> [m³/h/m] =</b>		<b>32,6</b>



- Absenkung gemessen [m]
- s<sub>Betrieb</sub>[m]
- Q<sub>f</sub>[m³/h]
- Q<sub>Betrieb</sub>[m³/h]

- ◆ Absenkung gemessen BQ+DQ+CQ² [m]
- Absenkung Grundwasserleiter BQ [m]

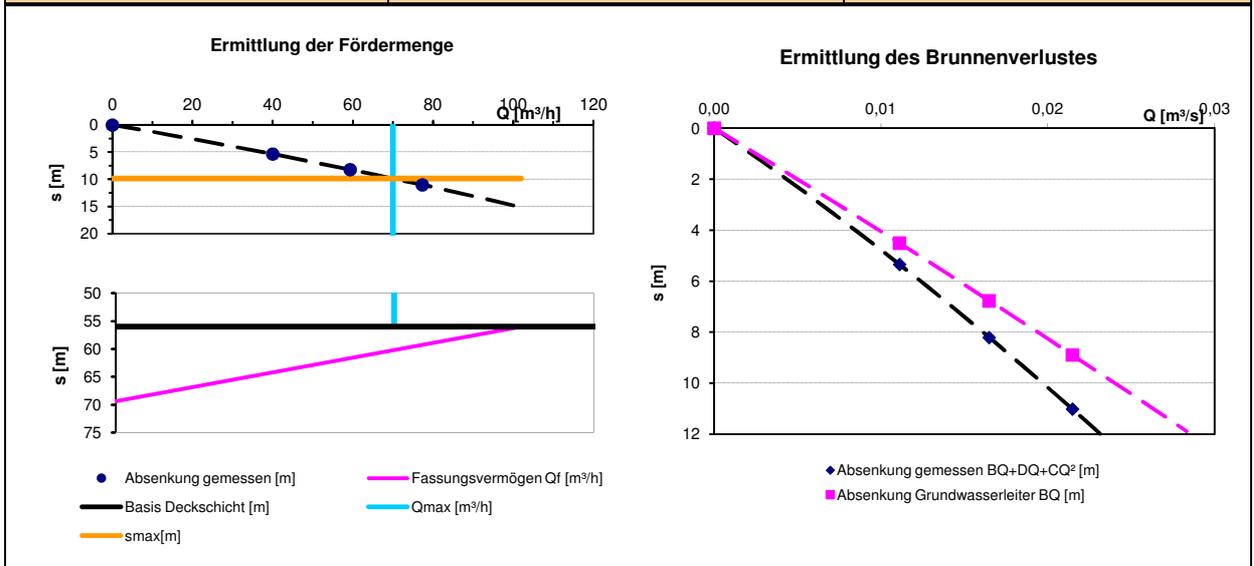
Brunnendaten und Hydrogeologische Parameter				Entwicklung spez. Ergiebigkeit Es = Q <sub>max</sub> / s <sub>max</sub>				
Parameter	Zeichen	Einheit	Wert	Datum	s <sub>max</sub> [m]	Q <sub>max</sub> [m³/h]	E <sub>s Qmax</sub> [m³/h/m]	Bem.
Messpunkt im Betrieb zu NN	MP	m		13.11.08	2,76	90,0	32,6	100 % Es Neubau
Pumpentiefe u. GOK	TP	m						
k <sub>f</sub> - Wert GWL *	k <sub>f</sub>	m/s	2,12E-04					
Speicherkoeffizient *	S*	(-)	6,34E-02					
Hydraulischer Widerstand *	c*	s						
Filterlänge	F	m	24,00					
Bohrradius	rB	m	0,35					
OK Deckschicht u.GOK	D <sub>o</sub>	m						
Basis Deckschicht u.GOK	D <sub>b</sub>	m						
Filteroberkante u.GOK	FOK	m	67,00					
Basis GWL <sup>1</sup> unter GOK	GW <sub>Bas</sub>	m	98,00					
Verlustkoeffizient turbulent	C*	s²m <sup>-5</sup>	0,00					
Verlustkoeffizient linear	Skin D*	s*m <sup>-2</sup>	80,00					
Mächtigkeit Deckschicht	M <sub>D</sub>	m						
Mächtigkeit GWL	M <sub>G</sub>	m	31,00					
k <sub>f</sub> - Wert GWL	k <sub>f</sub>	m/s	2,12E-04					
k <sub>f</sub> - Wert Deckschicht	k <sub>fV</sub>	m/s						
Fassungsvermögen	Q <sub>f</sub>	m³/h	92,22					
Fördermenge	Q <sub>max</sub>	m³/h	89,62					
Infiltrationsmenge max.	Q <sub>inmax</sub>	m³/h	36,89					
Absenkung für Q <sub>max</sub>	s <sub>max</sub>	m	2,76					
Reichweite bei s <sub>max</sub>	R	m	120,56					

\* durch PV - Programm ermittelt  
<sup>1</sup> oder Ende der Bohrung

$$Q_F = (2rB \cdot \pi \cdot F \cdot (\text{Wurzel } k_f) / 30) \cdot 3600 \text{ [m}^3/\text{h]} \text{ (HUISMAN)}$$

$$\text{Reichweite (SICHARDT) } R = 3000 \cdot s \cdot \text{Wurzel } (k_f)$$

<b>Wasserwerk Bausberg</b>		<b>Grundwasserleiter (GWL) :</b>		<b>Quartär</b>	<b>HWW Code: q2</b>		<b>gespannt</b>			
<b>Stufentest 09/2009</b>		<b>PV Messpunkt (m NN) =</b>			<b>33,96</b>	<b>GOK (m NN) =</b>			<b>33,46</b>	
Stufe	Q [m³/h]	Q [m³/s]	Datum MM:TT	Zeit hh:mm	Abstich [m] zu GOK	Absenkung s [m]	BQ [m]	DQ [m]	CQ² [m]	Es [m³/h/m]
Rwsp	0,0	0,000	10.09.	08:00	24,33	0,00	0,00	0,000	0,000	0,00
1. Stufe	40,0	0,011	10.09.	14:00	29,67	5,34	4,50	0,556	0,280	7,49
2. Stufe	59,3	0,016	10.09.	22:00	32,54	8,21	6,77	0,824	0,616	7,22
3. Stufe	77,3	0,021	11.09.	09:00	35,34	11,01	8,89	1,074	1,047	7,02
4. Stufe										
<b>Q<sub>max</sub> =</b>		<b>70,0 m³/h</b>	<b>s<sub>max</sub>[m] =</b>			<b>9,9</b>	<b>E<sub>s Qmax</sub> [m³/h/m] =</b>		<b>7,1</b>	

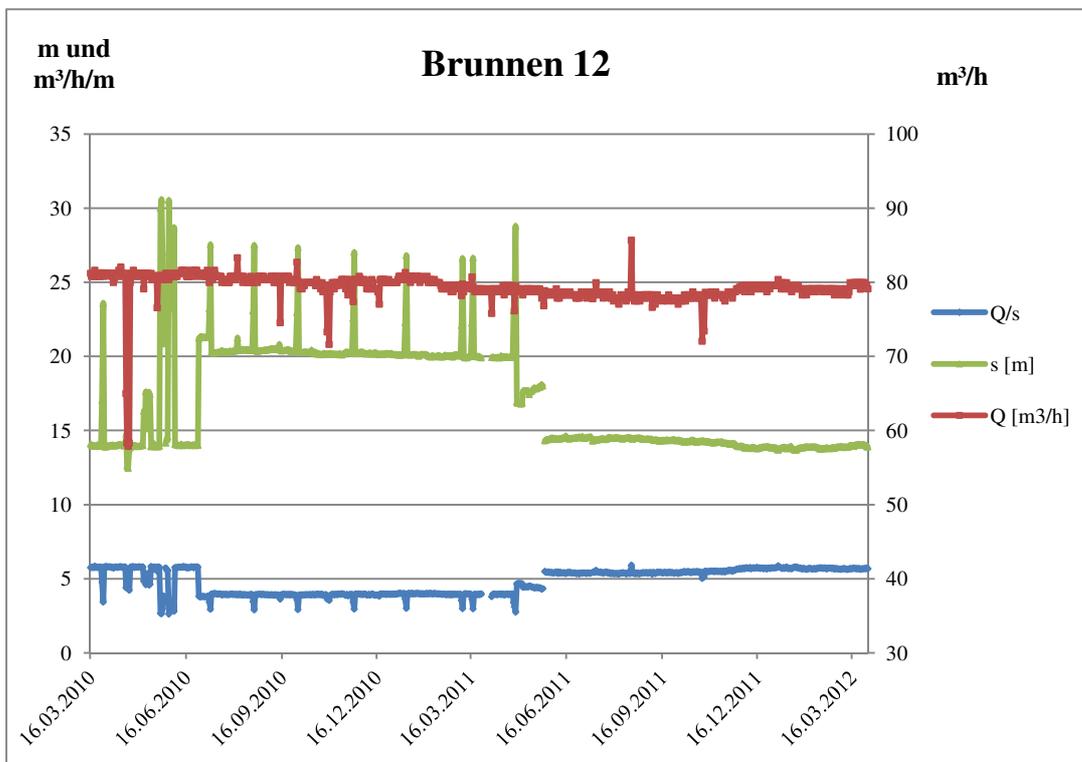


Brunnendaten und Hydrogeologische Parameter				Entwicklung spez. Ergiebigkeit Es = Q / s				
Parameter	Zeichen	Einheit	Wert	Datum	s [m]	Q [m³/h]	Es [m³/h/m]	Bem.
Messpunkt im Betrieb zu NN	MP	m		17.04.08	9,9	70,0	7,1	100 % Es Neubau
Pumpentiefe u. GOK	TP	m						
Transmissivität *	T*	m²/s	2,00E-02					
Speicherkoefizient *	S*	(-)	1,50E-04					
Hydraulischer Widerstand *	c*	s						
Filterlänge	F	m	10,00					
Bohrradius	rB	m	0,35					
OK Deckschicht u.GOK	D <sub>o</sub>	m	43,00					
Basis Deckschicht u.GOK	D <sub>b</sub>	m	56,00					
Filteroberkante u.GOK	FOK	m	58,50					
Basis GW <sup>1</sup> unter GOK	GW <sub>Bas</sub>	m	69,40					
Verlustkoeffizient turbulent	C*	s²m <sup>-5</sup>	2271,00					
Verlustkoeffizient linear	Skin D*	s*m <sup>-2</sup>	50,00					
Mächtigkeit Deckschicht	M <sub>D</sub>	m	13,00					
Mächtigkeit GWL	M <sub>G</sub>	m	13,40					
k <sub>f</sub> - Wert GWL	k <sub>f</sub>	m/s	1,49E-03					
k <sub>f</sub> - Wert Deckschicht	k <sub>fV</sub>	m/s						
Fassungsvermögen	Q <sub>f</sub>	m³/h	101,95					
Fördermenge	Q <sub>max</sub>	m³/h	70,00					
Infiltrationsmenge max.	Q <sub>inmax</sub>	m³/h	40,78					
Absenkung für Qmax	s <sub>max</sub>	m	9,85					
Reichweite bei smax	R	m						

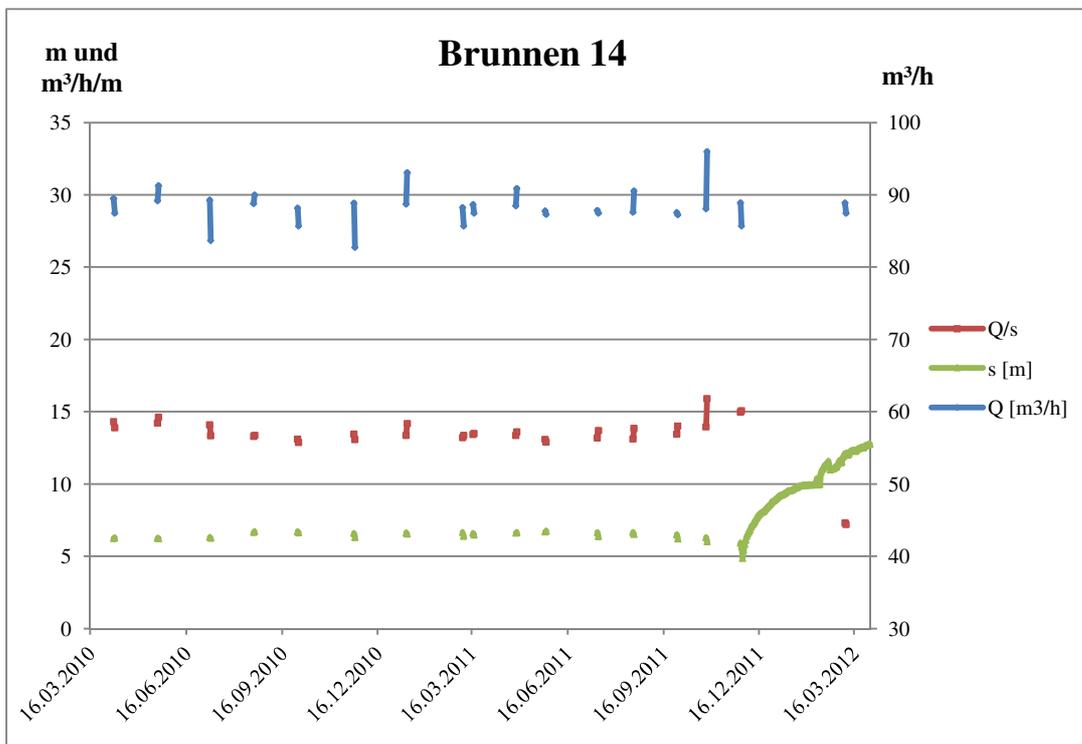
**Bemerkung:**  
 Die Auswertung wird durch undefinierbare Randbedingungen erschwert. Brauchbar für Auswertung der Durchlässigkeit (T und k<sub>f</sub>) sind die Daten der Grundwassermeßstele R13C.2. Trotz der guten hydraulischen Durchlässigkeit liegt der Brunnen in einem zumindest einseitig begrenzten Grundwasserleiter. Es ist damit zu rechnen, daß sich die Absenkung während des Betriebes noch um 2-3 m erhöht. Daher wird eine maximale Fördermenge von 70 m³/h empfohlen. Die Entwicklung der spezifischen Ergiebigkeit (in Tabelle oben) ist zu beobachten.

\* durch PV - Programm ermittelt       $Q_F = (2rB * \pi * F * (\text{Wurzel } k_f) / 30) * 3600 \text{ [m}^3\text{/h]} \text{ (HUISMAN)}$   
 Auswertung instationär nach THEIS      Reichweite (THEIS)  $R = \text{Wurzel} ((2.25 * k_f * t) / S)$   
<sup>1</sup> oder Ende der Bohrung

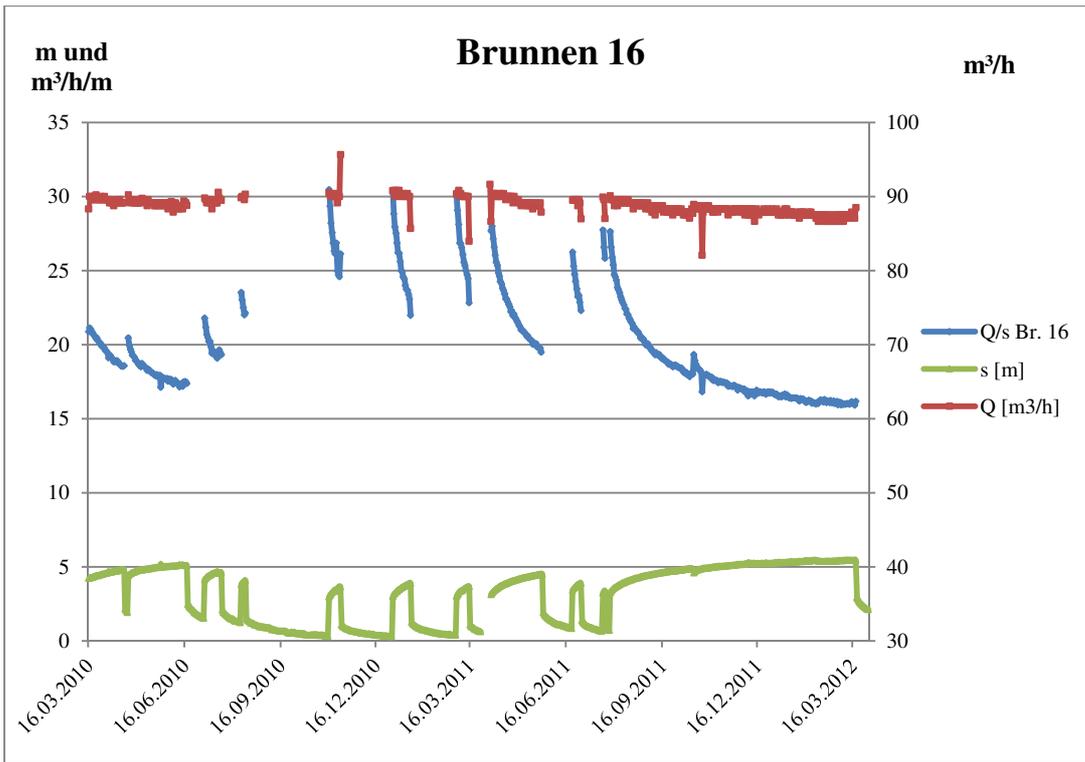
**Anhang 4- Grafiken der Förderströme, Absenkungen und spezifischen  
Ergiebigkeiten aus Messwerten der letzten zwei Jahre**



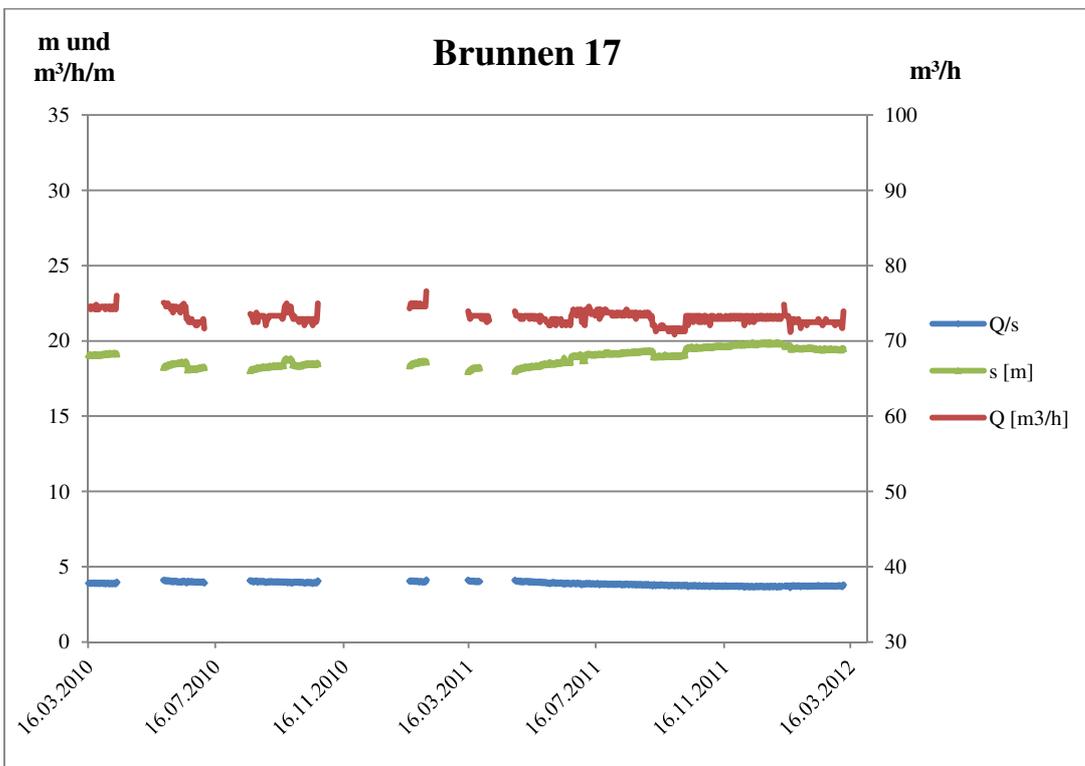
Brunnen 12:  $Q$ -,  $s$ - und  $Q/s$ -Werte der letzten 2 Jahre (Pegelstandmessung kaputt zwischen 06.2010 und 06.2011)



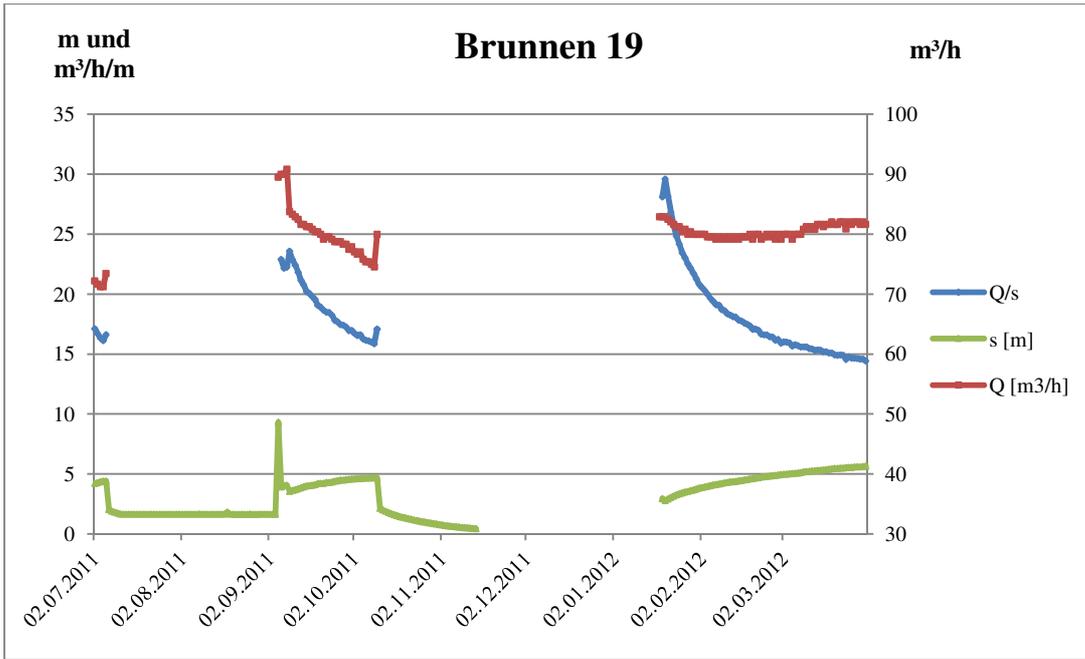
Brunnen 14:  $Q$ -,  $s$ - und  $Q/s$ -Werte der letzten 2 Jahre



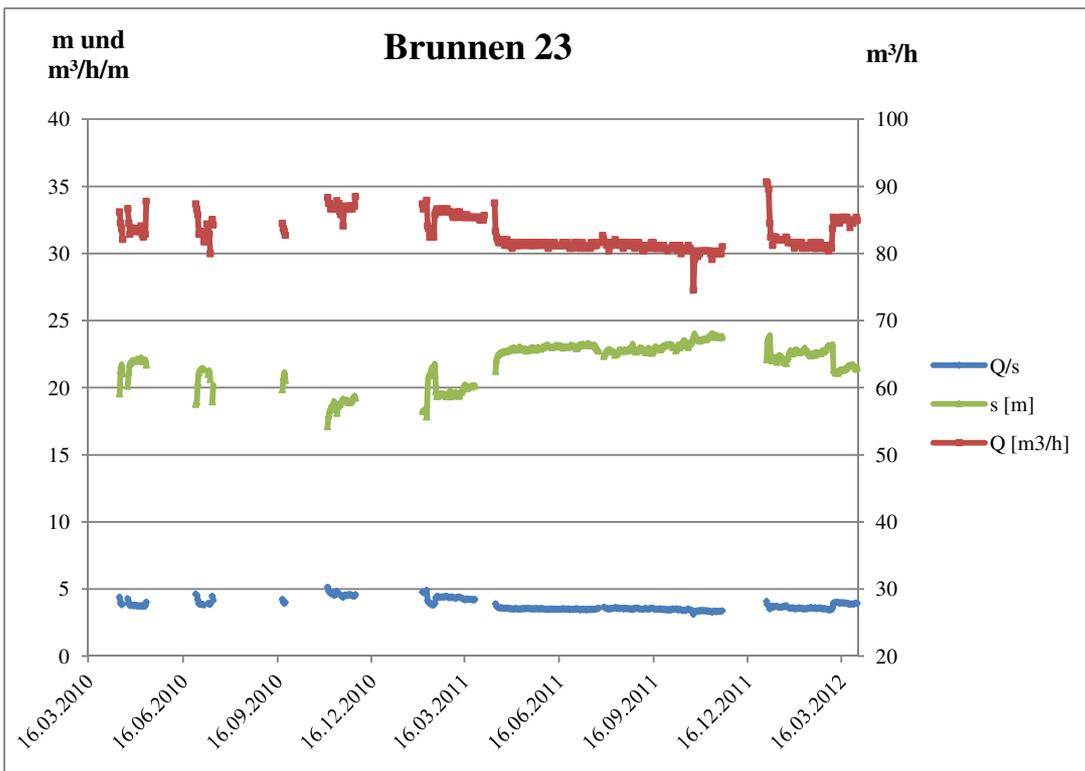
Brunnen 16: Q-, s- und Q/s-Werte der letzten 2 Jahre



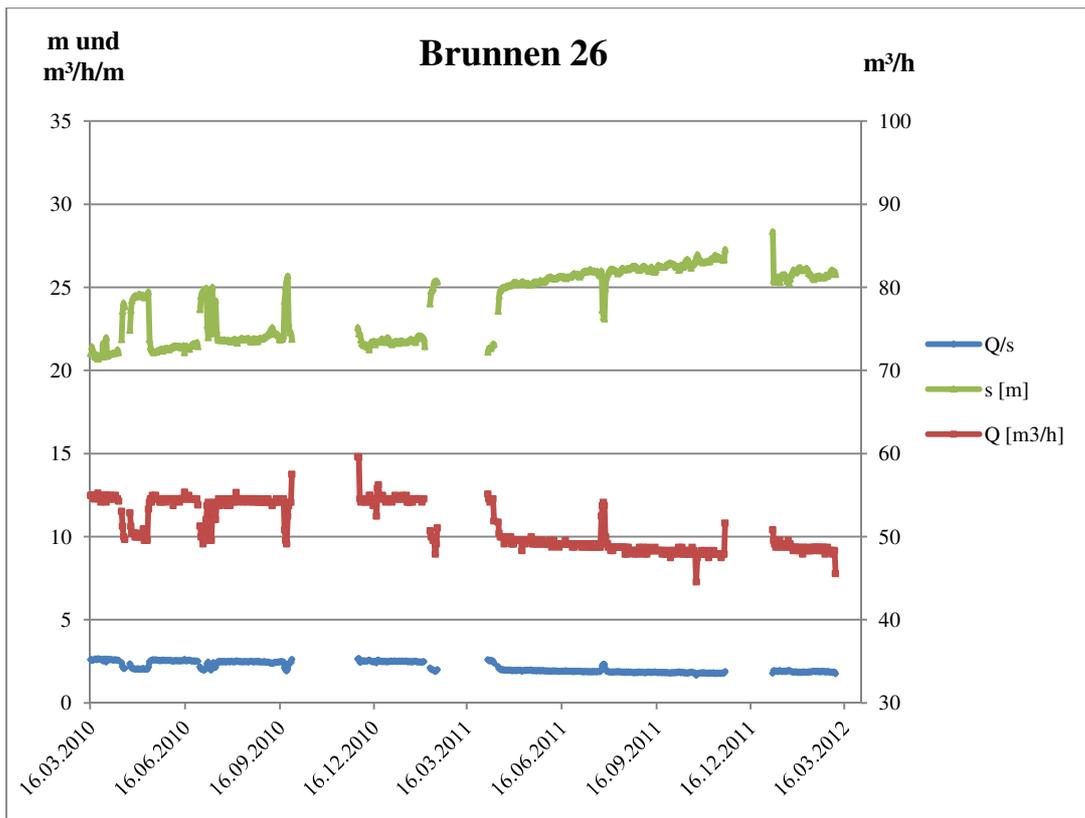
Brunnen 17: Q-, s- und Q/s-Werte der letzten 2 Jahre



Brunnen 19:  $Q$ -,  $s$ - und  $Q/s$ -Werte über 1 Jahr



Brunnen 23:  $Q$ -,  $s$ - und  $Q/s$ -Werte der letzten 2 Jahre



Brunnen 26: Q-, s- und Q/s-Werte der letzten 2 Jahre

## Anhang 5 – Szenario 1, Entwicklung der einzelnen Brunnen

### Brunnen 12

In den letzten zwei Jahren Anstieg (!! ) des Betriebswasserspiegels und linearer Rückgang der Fördermenge um 2 m<sup>3</sup>/h.

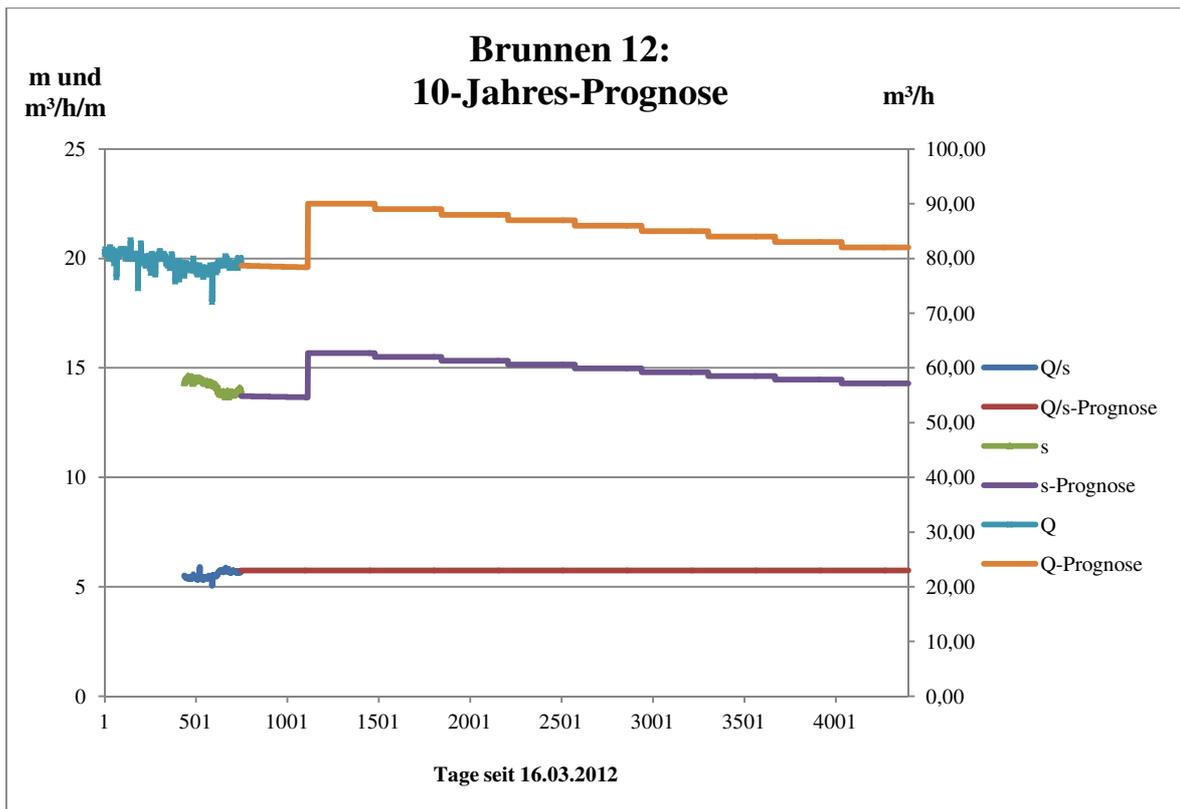
theoretisch guter Wirkungsgrad der alten Pumpe, jedoch 7 % Wirkungsgradverlust durch Alterung in den 9 Betriebsjahren

neue Pumpe im zweiten Jahr, Auslegung nach Herstellerempfehlung

Annahme für neue Pumpe: jährlicher Rückgang von  $\eta$  um 0,78 % zum Vorjahr und von Q um 1 m<sup>3</sup>/h pro Jahr, Q/s-Wert konstant, Betriebswasserspiegel laut Absenkung und Q/s-Wert

Szenario1, 10-Jahres-Prognose Brunnen 12

Jahr	Q	H	$\eta_{ges}$	kw [kWh/m <sup>3</sup> ]	Strompreis [€]	ks [€/m <sup>3</sup> ]	m <sup>3</sup> /a	Kosten [€/a]
1	78,5	104,3	0,5970	0,4761	0,1200	0,0571	619.181	35.373
2	90,0	106,2	0,6490	0,4461	0,1250	0,0558	709.560	39.565
3	89,0	105,6	0,6439	0,4469	0,1300	0,0581	701.676	40.763
4	88,0	105,0	0,6389	0,4478	0,1350	0,0605	693.792	41.945
5	87,0	104,5	0,6339	0,4492	0,1400	0,0629	685.908	43.135
6	86,0	104,0	0,6290	0,4506	0,1450	0,0653	678.024	44.297
7	85,0	103,7	0,6241	0,4528	0,1500	0,0679	670.140	45.516
8	84,0	103,3	0,6192	0,4546	0,1550	0,0705	662.256	46.664
9	83,0	102,9	0,6144	0,4564	0,1600	0,0730	654.372	47.785
10	82,0	102,6	0,6096	0,4586	0,1650	0,0757	646.488	48.924
						Summe:	6.721.397	433.966



Szenario 1, 10-Jahres-Prognose Brunnen 12

### Brunnen 14

Da für den Brunnen 14 kaum Messdaten vorliegen wird hier von einer Prognose abgesehen.

### Brunnen 16

Entwicklung im letzten halben Jahr (durchgängige Förderung): Rückgang der Fördermenge um 3 m³/h, Absinken des Betriebswasserspiegels um 2 m, Rückgang der spezifischen Ergiebigkeit um 11 m³/h/m

Entwicklung in den letzten zwei Jahren: Rückgang von Q um 3 m³/h (ca. 2 %)

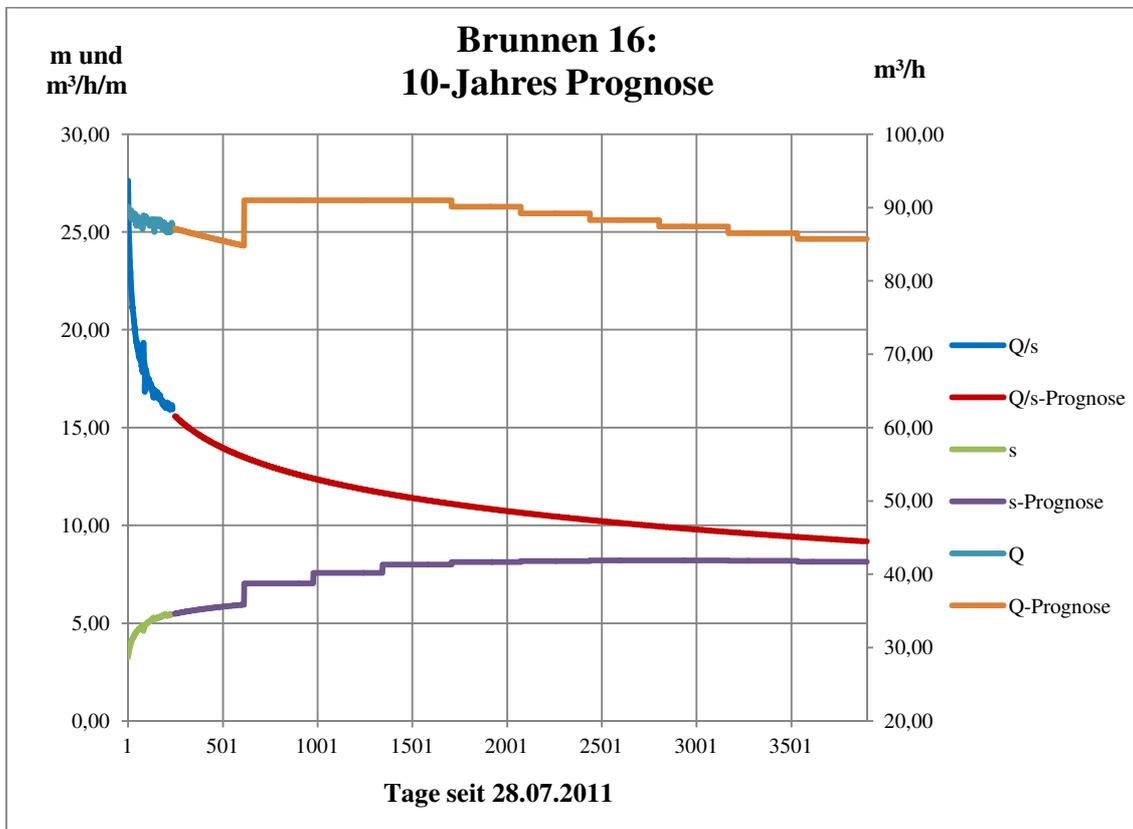
Wirkungsgradverlust der alten Pumpe durch Alterung in den 9 Betriebsjahren: 8 %

neue Pumpe im ersten Jahr:  $\eta = 0,605$  bei 50 m³/h und 92 m, Wirkungsgradoptimum bei 45 m³/h,

Annahme: kein Wirkungsgradabfall in den ersten 3 Jahren, danach 1 % Verlust zum Vorjahr, jährlicher Rückgang von Q um 1 %.

Szenario 1, 10-Jahres-Prognose Brunnen 16

Jahr	Q	H	$\eta_{ges}$	$k_w$ [kWh/m <sup>3</sup> ]	Strompreis [€]	$k_s$ [€/m <sup>3</sup> ]	m <sup>3</sup> /a	Kosten [€/a]
1	50,0	89,9	0,6050	0,4049	0,1200	0,0486	394200	19154
2	50,0	90,3	0,6050	0,4067	0,1250	0,0508	394200	20041
3	50,0	90,6	0,6050	0,4080	0,1300	0,0530	394200	20910
4	49,5	90,8	0,5990	0,4129	0,1350	0,0557	390258	21752
5	49,0	90,9	0,5930	0,4176	0,1400	0,0585	386355	22588
6	48,5	91,0	0,5870	0,4222	0,1450	0,0612	382492	23418
7	48,0	91,0	0,5812	0,4269	0,1500	0,0640	378667	24247
8	47,5	91,1	0,5753	0,4315	0,1550	0,0669	374880	25071
9	47,1	91,2	0,5696	0,4362	0,1600	0,0698	371131	25900
10	46,6	91,2	0,5639	0,4407	0,1650	0,0727	367420	26715
Summe:							3.833.804	229.797



Szenario 1, 10-Jahres-Prognose Brunnen 16

### Brunnen 17

Entwicklung in den letzten zwei Jahren:  $\Delta Q = 2 \text{ m}^3/\text{h}$  (ca. 3 %),  $\Delta s = 1 \text{ m}$ ,  $\Delta Q/s = 0,1$

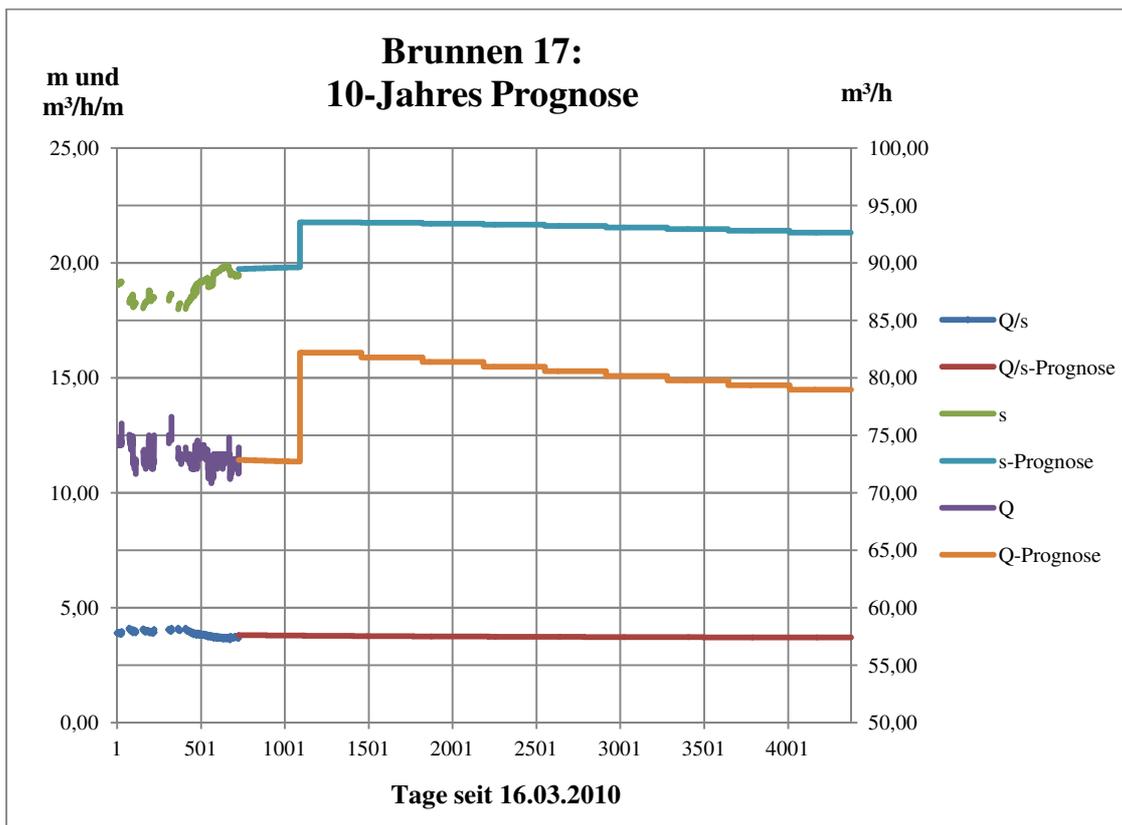
reeller Wirkungsgrad nach 9 Jahren 1 % unter Theoretischem

Pumpenwechsel im zweiten Jahr, Auslegung nach Herstellerempfehlung:  $\eta = 0,617$  bei  $82,5 \text{ m}^3/\text{h}$  und  $117 \text{ m}$

laut Kennlinie neuer Pumpe Wirkungsgradoptimum bei 75 m<sup>3</sup>/h,  
daher Annahme: kein Wirkungsgradabfall in den ersten 3 Jahren, danach 0,05 %/a

Szenario 1, 10-Jahres-Prognose Brunnen 17

Jahr	Q	H	$\eta_{ges}$	kw [kWh/m <sup>3</sup> ]	Strompreis [€]	ks [€/m <sup>3</sup> ]	m <sup>3</sup> /a	Kosten [€/a]
1	72,8	112,9	0,6070	0,5068	0,120	0,0608	573.798	34.899
2	82,2	116,4	0,6170	0,5141	0,125	0,0643	648.065	41.645
3	81,8	116,1	0,6170	0,5128	0,130	0,0667	644.824	42.983
4	81,4	116,0	0,6170	0,5123	0,135	0,0692	641.600	44.375
5	81,0	116,0	0,6167	0,5126	0,140	0,0718	638.392	45.811
6	80,6	115,9	0,6164	0,5124	0,145	0,0743	635.200	47.193
7	80,2	115,8	0,6161	0,5122	0,150	0,0768	632.024	48.559
8	79,8	115,7	0,6158	0,5120	0,155	0,0794	628.864	49.908
9	79,4	115,6	0,6155	0,5118	0,160	0,0819	625.720	51.242
10	79,0	115,5	0,6152	0,5116	0,165	0,0844	622.591	52.560
Summe:							6.291.080	459.175



Szenario 1, 10-Jahres-Prognose Brunnen 17

## Brunnen 19

Prognose schwierig (vgl. Kapitel 3.4)

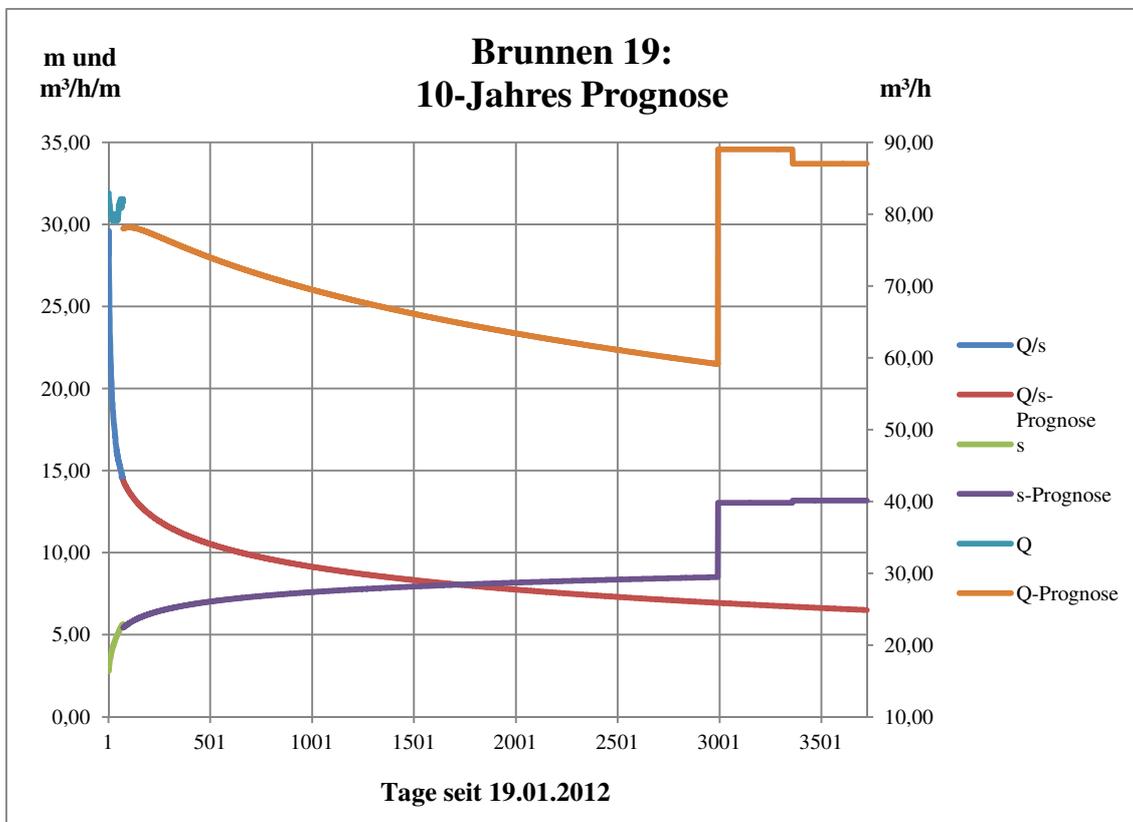
Reeller Pumpenwirkungsgrad nach zwei Jahren Betrieb um 7 % geringer als theoretisch.

Annahme: Wirkungsgrad laut Kennlinie, abzüglich Differenz, pro Jahr 2 % zusätzliche Differenz

Neue Pumpe im neunten Jahr: Auslegung: 90 m<sup>3</sup>/h und 104 m, Abnahme von Q um 2 m<sup>3</sup>/h pro Jahr

Szenario 1, 10-Jahres-Prognose Brunnen 19

Jahr	Q	H	$\eta_{\text{ges}}$	kw [kWh/m <sup>3</sup> ]	Strompreis [€]	ks [€/m <sup>3</sup> ]	m <sup>3</sup> /a	Kosten [€/a]
1	76,7	95,3	0,5800	0,4477	0,1200	0,0537	604.500	32.479
2	72,8	95,5	0,5700	0,4566	0,1250	0,0571	573.739	32.743
3	69,6	95,4	0,5500	0,4727	0,1300	0,0614	548.841	33.724
4	67,1	95,2	0,5490	0,4725	0,1350	0,0638	528.665	33.724
5	64,9	95,2	0,5140	0,5047	0,1400	0,0707	511.608	36.150
6	63,0	95,1	0,5020	0,5162	0,1450	0,0749	496.762	37.184
7	61,3	95,0	0,4800	0,5393	0,1500	0,0809	483.570	39.120
8	59,8	95,0	0,4570	0,5665	0,1550	0,0878	471.667	41.413
9	89,0	103,8	0,6700	0,4222	0,1600	0,0675	701.676	47.396
10	87,0	104,8	0,6540	0,4367	0,1650	0,0721	685.908	49.420
						Summe:	5.606.938	383.355



Szenario 1, 10-Jahres-Prognose Brunnen 19

### Brunnen 23

Prognose unter Annahme, dass Brunnen 26 gleichzeitig läuft (Absenkung des Betriebswasserspiegels stärker ausgeprägt)

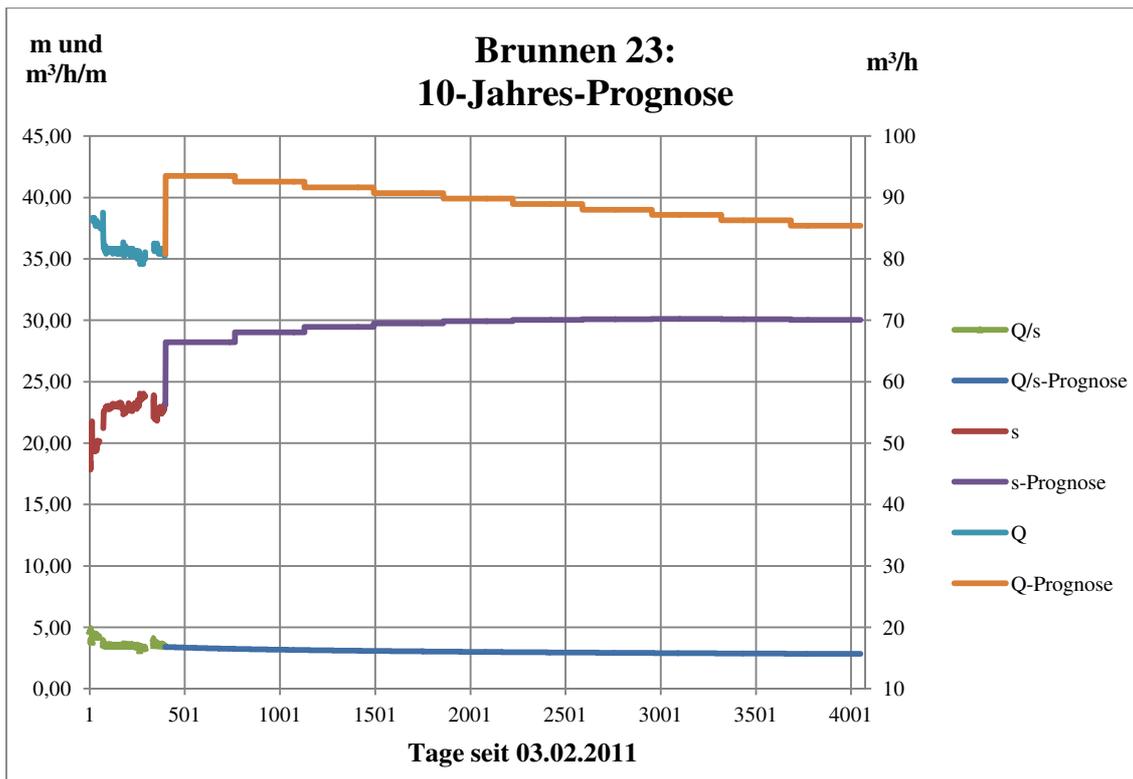
Förderstromabsenkung von ca. 2 m<sup>3</sup>/h in den letzten zwei Jahren (ca. 2 %).

Reeller Wirkungsgrad erreicht nach zehn Jahren ca. 96 % des Theoretischen.

Neue Pumpe im ersten Jahr, Auslegung: 94 m<sup>3</sup>/h bei 125 m. Annahme: 1 % Q-Verlust pro Jahr, Wirkungsgrad nach Kennlinie, pro Jahr 0,4 % Anstieg der Differenz zwischen reellem und theoretischem Wert.

*Szenario1, 10-Jahres-Prognose Brunnen 23*

Jahr	Q	H	$\eta_{ges}$	kw [kWh/m <sup>3</sup> ]	Strompreis [€]	ks [€/m <sup>3</sup> ]	m <sup>3</sup> /a	Kosten [€/a]
1	93,5	127,0	0,6640	0,5212	0,1200	0,0625	737.154	46.104
2	92,6	127,7	0,6640	0,5241	0,1250	0,0655	729.782	47.807
3	91,6	128,1	0,6640	0,5257	0,1300	0,0683	722.485	49.376
4	90,7	128,3	0,6613	0,5286	0,1350	0,0714	715.260	51.046
5	89,8	128,4	0,6547	0,5344	0,1400	0,0748	708.107	52.979
6	88,9	128,4	0,6501	0,5382	0,1450	0,0780	701.026	54.708
7	88,0	128,4	0,6396	0,5470	0,1500	0,0821	694.016	56.949
8	87,1	128,4	0,6370	0,5493	0,1550	0,0851	687.076	58.496
9	86,3	128,3	0,6344	0,5511	0,1600	0,0882	680.205	59.978
10	85,4	128,1	0,6318	0,5525	0,1650	0,0912	673.403	61.390
						Summe:	7.048.514	538.833



Szenario 1, 10-Jahres-Prognose Brunnen 23

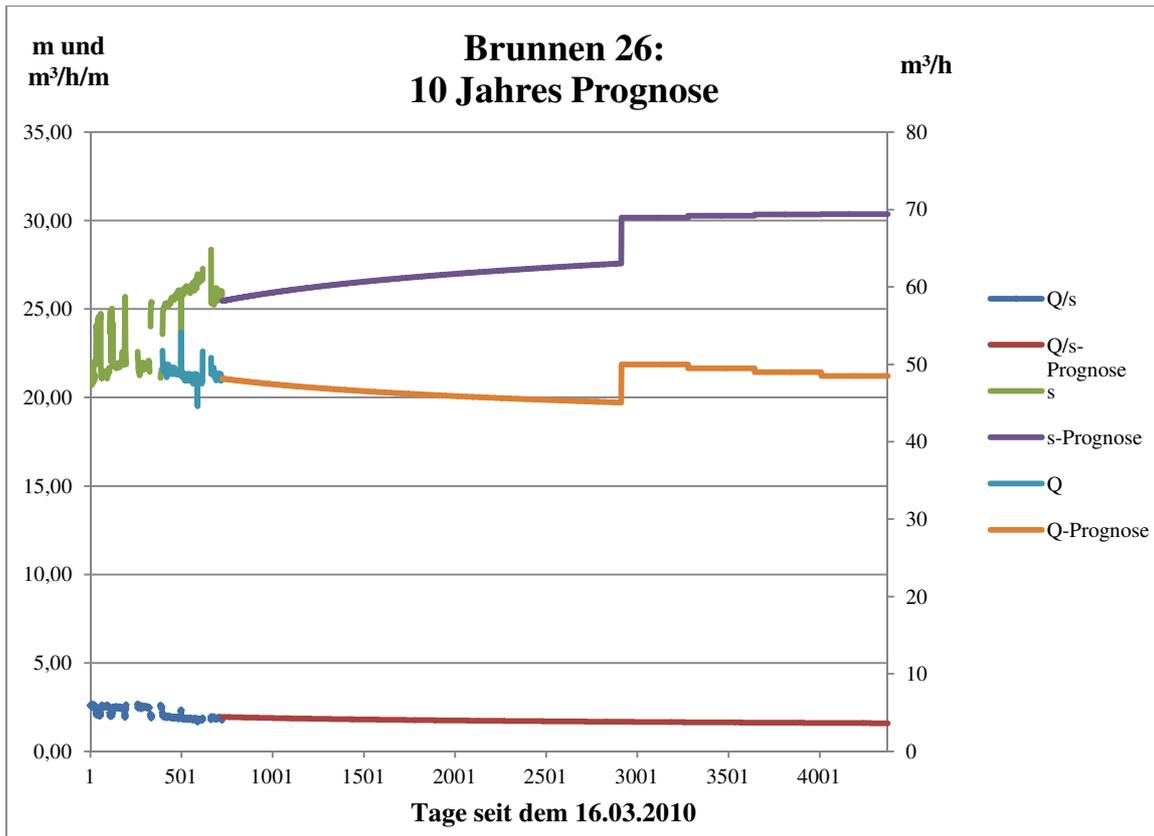
## Brunnen 26

Laut Prognose Rückgang der Fördermenge um ca. 5 % in 4 Jahren. Reeller Wirkungsgrad erreicht nach 3 Jahren noch ca. 96 % des Theoretischen. Wirkungsgrad laut Kennlinie. Annahme: Anstieg der Differenz zwischen reellem und theoretischem Wirkungsgrad um ca. 1 %/a.

Neue Pumpe im siebten Jahr: 50 m³/h bei 128 m. Annahme: Rückgang der Fördermenge um 1%/a, Wirkungsgrad laut Kennlinie. Wirkungsgrad wie bei alter Pumpe berechnet.

Szenario1, 10-Jahres-Prognose Brunnen 26

Jahr	Q	H	$\eta_{ges}$	kw [kWh/m³]	Strompreis [€]	ks [€/m³]	m³/a	Kosten [€/a]
1	47,7	122,0	0,5554	0,5986	0,1200	0,0718	375.816	26.995
2	46,9	122,4	0,5498	0,6066	0,1250	0,0758	369.843	28.044
3	46,3	122,8	0,5443	0,6147	0,1300	0,0799	365.407	29.202
4	45,9	123,1	0,5389	0,6225	0,1350	0,0840	361.874	30.410
5	45,5	123,3	0,5335	0,6298	0,1400	0,0882	358.944	31.648
6	45,2	123,5	0,5282	0,6372	0,1450	0,0924	356.430	32.931
7	50,0	126,5	0,6160	0,5596	0,1500	0,0839	394.200	33.089
8	49,5	126,6	0,6160	0,5600	0,1550	0,0868	390.258	33.877
9	49,0	126,6	0,6098	0,5657	0,1600	0,0905	386.355	34.970
10	48,5	126,6	0,6037	0,5714	0,1650	0,0943	382.492	36.062
						Summe:	3.741.618	317.228



Szenario 1, 10-Jahres-Prognose Brunnen 26

## Anhang 6 – Szenario 2, Auswirkung der Pumpenaustauschintervalle Brunnen 19 und 17

Szenario 2, Brunnen 19, Pumpenaustausch einmal jährlich

Jahr	Q	H	$\eta_{ges}$	$k_w$ [kWh/m <sup>3</sup> ]	Strompreis [€]	$k_s$ [€/m <sup>3</sup> ]	m <sup>3</sup> /a	Kosten [€/a]
1	89,00	98,3	0,6700	0,4000	0,1200	0,0480	701.676	33.677
2	89,00	100,0	0,6700	0,4065	0,1250	0,0508	701.676	35.655
3	89,00	100,9	0,6700	0,4102	0,1300	0,0533	701.676	37.415
4	89,00	101,6	0,6700	0,4130	0,1350	0,0558	701.676	39.124
5	89,00	102,2	0,6700	0,4155	0,1400	0,0582	701.676	40.813
6	89,00	102,8	0,6700	0,4179	0,1450	0,0606	701.676	42.519
7	89,00	103,3	0,6700	0,4199	0,1500	0,0630	701.676	44.199
8	89,00	103,8	0,6700	0,4220	0,1550	0,0654	701.676	45.893
9	89,00	104,2	0,6700	0,4236	0,1600	0,0678	701.676	47.556
10	89,00	104,7	0,6700	0,4256	0,1650	0,0702	701.676	49.278
						Summe:	7.016.760	416.129

Die Investitionskosten betragen  $10 \cdot 15.000 \text{ €} = 150.000 \text{ €}$ .

Szenario 2, Brunnen 19, Pumpenaustausch alle 2 Jahre

Jahr	Q	H	$\eta_{ges}$	$k_w$ [kWh/m <sup>3</sup> ]	Strompreis [€]	$k_s$ [€/m <sup>3</sup> ]	m <sup>3</sup> /a	Kosten [€/a]
1	89,00	98,3	0,6700	0,4000	0,1200	0,0480	701.676	33.677
2	87,00	99,2	0,6540	0,4133	0,1250	0,0517	685.908	35.431
3	89,00	100,6	0,6700	0,4093	0,1300	0,0532	701.676	37.337
4	87,00	100,8	0,6540	0,4199	0,1350	0,0567	685.908	38.883
5	89,00	101,9	0,6700	0,4146	0,1400	0,0580	701.676	40.729
6	87,00	101,9	0,6540	0,4245	0,1450	0,0616	685.908	42.219
7	89,00	103,0	0,6700	0,4191	0,1500	0,0629	701.676	44.109
8	87,00	102,9	0,6540	0,4287	0,1550	0,0664	685.908	45.574
9	89,00	103,9	0,6700	0,4227	0,1600	0,0676	701.676	47.460
10	87,00	103,8	0,6540	0,4324	0,1650	0,0713	685.908	48.939
						Summe:	6.937.920	414.359

Die Investitionskosten betragen  $5 \cdot 15.000 \text{ €} = 75.000 \text{ €}$ .

Szenario 2, Brunnen 19, Pumpenaustausch alle 3 Jahre

Jahr	Q	H	$\eta_{ges}$	$k_w$ [kWh/m <sup>3</sup> ]	Strompreis [€]	$k_s$ [€/m <sup>3</sup> ]	m <sup>3</sup> /a	Kosten [€/a]
1	89,00	98,3	0,6700	0,4000	0,1200	0,0480	701676	33677
2	87,00	99,2	0,6540	0,4133	0,1250	0,0517	685908	35431
3	85,00	99,5	0,6380	0,4251	0,1300	0,0553	670140	37035
4	89,00	101,3	0,6700	0,4122	0,1350	0,0556	701676	39043
5	87,00	101,4	0,6540	0,4224	0,1400	0,0591	685908	40563
6	85,00	101,3	0,6380	0,4328	0,1450	0,0628	670140	42055
7	89,00	103,0	0,6700	0,4191	0,1500	0,0629	701676	44109
8	87,00	102,9	0,6540	0,4287	0,1550	0,0664	685908	45574
9	85,00	102,7	0,6380	0,4388	0,1600	0,0702	670140	47047
10	83,00	103,2	0,6220	0,4523	0,1650	0,0746	654372	48835
						Summe:	6827544	413370

Die Investitionskosten betragen  $3 \cdot 15.000 \text{ €} = 45.000 \text{ €}$ .

Szenario 2, Brunnen 19, Pumpenaustausch alle 5 Jahre

Jahr	Q	H	$\eta_{ges}$	$k_W$ [kWh/m <sup>3</sup> ]	Strompreis [€]	$k_S$ [€/m <sup>3</sup> ]	m <sup>3</sup> /a	Kosten [€/a]
1	89,00	98,3	0,6700	0,4000	0,1200	0,0480	701.676	33.677
2	87,00	99,2	0,6540	0,4133	0,1250	0,0517	685.908	35.431
3	85,00	99,5	0,6380	0,4251	0,1300	0,0553	670.140	37.035
4	83,00	99,6	0,6220	0,4363	0,1350	0,0589	654.372	38.543
5	81,00	99,6	0,6060	0,4476	0,1400	0,0627	638.604	40.022
6	89,00	102,5	0,6700	0,4170	0,1450	0,0605	701.676	42.432
7	87,00	102,4	0,6540	0,4266	0,1500	0,0640	685.908	43.890
8	85,00	102,2	0,6380	0,4366	0,1550	0,0677	670.140	45.355
9	83,00	102,1	0,6220	0,4473	0,1600	0,0716	654.372	46.828
10	81,00	101,9	0,6060	0,4580	0,1650	0,0756	638.604	48.258
	85,00						Summe: 6.701.400	411.470

Die Investitionskosten betragen  $2 \cdot 15.000 \text{ €} = 30.000 \text{ €}$ .

Szenario 2, Brunnen 19, Pumpenaustausch alle 6 Jahre

Jahr	Q	H	$\eta_{ges}$	$k_W$ [kWh/m <sup>3</sup> ]	Strompreis [€]	$k_S$ [€/m <sup>3</sup> ]	m <sup>3</sup> /a	Kosten [€/a]
1	89,00	98,3	0,6700	0,4000	0,1200	0,0480	701.676	33.677
2	87,00	99,2	0,6540	0,4133	0,1250	0,0517	685.908	35.431
3	85,00	99,5	0,6380	0,4251	0,1300	0,0553	670.140	37.035
4	83,00	99,6	0,6220	0,4363	0,1350	0,0589	654.372	38.543
5	81,00	99,6	0,6060	0,4476	0,1400	0,0627	638.604	40.022
6	79,00	99,5	0,5900	0,4596	0,1450	0,0666	622.836	41.503
7	89,00	103,4	0,6700	0,4205	0,1500	0,0631	701.676	44.263
8	87,00	102,9	0,6540	0,4287	0,1550	0,0664	685.908	45.574
9	85,00	102,7	0,6380	0,4388	0,1600	0,0702	670.140	47.047
10	83,00	102,5	0,6220	0,4490	0,1650	0,0741	654.372	48.480
							Summe: 6.685.632	411.576

Die Investitionskosten betragen  $2 \cdot 15.000 \text{ €} = 30.000 \text{ €}$ .

Szenario 2, Brunnen 17, Pumpenaustausch alle 2 Jahre

Jahr	Q	H	$\eta_{ges}$	$k_W$ [kWh/m <sup>3</sup> ]	Strompreis [€]	$k_S$ [€/m <sup>3</sup> ]	m <sup>3</sup> /a	Kosten [€/a]
1	82,2	116,4	0,6170	0,5140	0,120	0,0617	648.065	39.972
2	81,8	116,4	0,6170	0,5141	0,125	0,0643	644.824	41.440
3	82,2	116,7	0,6170	0,5153	0,130	0,0670	648.065	43.415
4	81,8	116,5	0,6170	0,5146	0,135	0,0695	644.824	44.794
5	82,2	116,8	0,6170	0,5158	0,140	0,0722	648.065	46.795
6	81,8	116,6	0,6170	0,5150	0,145	0,0747	644.824	48.153
7	82,2	116,9	0,6170	0,5162	0,150	0,0774	648.065	50.180
8	81,8	116,7	0,6170	0,5155	0,155	0,0799	644.824	51.518
9	82,2	117,0	0,6170	0,5166	0,160	0,0827	648.065	53.571
10	81,8	116,8	0,6170	0,5159	0,165	0,0851	644.824	54.889
							Summe: 6.464.446	474.729

Die Investitionskosten betragen  $5 \cdot 15.000 \text{ €} = 75.000 \text{ €}$ .

Szenario 2, Brunnen 17, Pumpenaustausch alle 3 Jahre

Jahr	Q	H	$\eta_{ges}$	$k_W$ [kWh/m <sup>3</sup> ]	Strompreis [€]	$k_S$ [€/m <sup>3</sup> ]	m <sup>3</sup> /a	Kosten [€/a]
1	82,2	116,4	0,6170	0,5140	0,120	0,0617	648.065	39.972
2	81,8	116,4	0,6170	0,5141	0,125	0,0643	644.824	41.440
3	81,4	116,2	0,6170	0,5134	0,130	0,0667	641.600	42.820
4	82,2	116,7	0,6170	0,5153	0,135	0,0696	648.065	45.085
5	81,8	116,6	0,6170	0,5150	0,140	0,0721	644.824	46.493
6	81,4	116,4	0,6170	0,5143	0,145	0,0746	641.600	47.843
7	82,2	116,9	0,6170	0,5162	0,150	0,0774	648.065	50.180
8	81,8	116,7	0,6170	0,5155	0,155	0,0799	644.824	51.518
9	81,4	116,5	0,6170	0,5147	0,160	0,0824	641.600	52.837
10	81,0	116,5	0,6170	0,5144	0,165	0,0849	638.392	54.188
Summe:							6.441.861	472.377

Die Investitionskosten betragen  $3 \cdot 15.000 \text{ €} = 45.000 \text{ €}$ .

Szenario 2, Brunnen 17, Pumpenaustausch alle 5 Jahre

Jahr	Q	H	$\eta_{ges}$	$k_W$ [kWh/m <sup>3</sup> ]	Strompreis [€]	$k_S$ [€/m <sup>3</sup> ]	m <sup>3</sup> /a	Kosten [€/a]
1	82,2	116,4	0,6170	0,5140	0,120	0,0617	648.065	39.972
2	81,8	116,4	0,6170	0,5141	0,125	0,0643	644.824	41.440
3	81,4	116,2	0,6170	0,5134	0,130	0,0667	641.600	42.820
4	81,0	116,1	0,6167	0,5128	0,135	0,0692	638.392	44.198
5	80,6	116,0	0,6164	0,5128	0,140	0,0718	635.200	45.605
6	82,2	116,7	0,6170	0,5153	0,145	0,0747	648.065	48.420
7	81,8	116,6	0,6170	0,5150	0,150	0,0772	644.824	49.810
8	81,4	116,4	0,6170	0,5142	0,155	0,0797	641.600	51.138
9	81,0	116,3	0,6167	0,5137	0,160	0,0822	638.392	52.473
10	80,6	116,2	0,6164	0,5137	0,165	0,0848	635.200	53.841
Summe:							6.416.165	469.718

Die Investitionskosten betragen  $2 \cdot 15.000 \text{ €} = 30.000 \text{ €}$ .

Szenario 2, Brunnen 17, Pumpenaustausch alle 7 Jahre

Jahr	Q	H	$\eta_{ges}$	$k_W$ [kWh/m <sup>3</sup> ]	Strompreis [€]	$k_S$ [€/m <sup>3</sup> ]	m <sup>3</sup> /a	Kosten [€/a]
1	82,2	116,4	0,6170	0,5140	0,120	0,0617	648.065	39.972
2	81,8	116,4	0,6170	0,5141	0,125	0,0643	644.824	41.440
3	81,4	116,2	0,6170	0,5134	0,130	0,0667	641.600	42.820
4	81,0	116,1	0,6167	0,5128	0,135	0,0692	638.392	44.198
5	80,6	116,0	0,6164	0,5128	0,140	0,0718	635.200	45.605
6	80,2	115,9	0,6161	0,5128	0,145	0,0744	631.968	46.993
7	79,8	115,8	0,6158	0,5123	0,150	0,0768	628.752	48.319
8	82,2	116,9	0,6170	0,5162	0,155	0,0800	648.065	51.853
9	81,8	116,8	0,6170	0,5159	0,160	0,0825	644.824	53.226
10	81,4	116,6	0,6170	0,5151	0,165	0,0850	641.600	54.535
Summe:							6.403.292	468.961

Die Investitionskosten betragen  $2 \cdot 15.000 \text{ €} = 30.000 \text{ €}$ .

Szenario 2, Brunnen 17, Pumpenaustausch alle 8 Jahre

Jahr	Q	H	$\eta_{ges}$	$k_W$ [kWh/m <sup>3</sup> ]	Strompreis [€]	$k_S$ [€/m <sup>3</sup> ]	m <sup>3</sup> /a	Kosten [€/a]
1	82,2	116,4	0,6170	0,5140	0,120	0,0617	648.065	39.972
2	81,8	116,4	0,6170	0,5141	0,125	0,0643	644.824	41.440
3	81,4	116,2	0,6170	0,5134	0,130	0,0667	641.600	42.820
4	81,0	116,1	0,6167	0,5128	0,135	0,0692	638.392	44.198
5	80,6	116,0	0,6164	0,5128	0,140	0,0718	635.200	45.605
6	80,2	115,9	0,6161	0,5127	0,145	0,0743	631.968	46.980
7	79,8	115,8	0,6158	0,5122	0,150	0,0768	628.752	48.311
8	79,3	115,7	0,6155	0,5121	0,155	0,0794	625.536	49.652
9	82,2	117,0	0,6170	0,5165	0,160	0,0826	648.065	53.557
10	81,8	116,8	0,6170	0,5158	0,165	0,0851	644.824	54.875
Summe:							6.387.228	467.411

Die Investitionskosten betragen  $2 \cdot 15.000 \text{ €} = 30.000 \text{ €}$ .

## Anhang 7 - Szenario 2, Pumpenaustauschintervalle

Szenario 3, Brunnen 10, Intervalluntersuchung

Intervall [a]	kW mittel	kS mittel	m <sup>3</sup> gesamt	€ gesamt
1	0,485	0,0982	6.701.400	658.376
2				
3	0,488	0,0784	6.661.292	522.253
5	0,483	0,0748	6.552.611	489.995
7				
8	0,498	0,0770	6.605.162	508.700
<b>Szenario 1</b>	<b>0,478</b>	<b>0,0692</b>	<b>6.400.194</b>	<b>442.950</b>

Szenario 3, Brunnen 12, Intervalluntersuchung

Intervall [a]	kW mittel	kS mittel	m <sup>3</sup> gesamt	€ gesamt
1	0,437	0,0895	7.095.600	635.367
2				
3	0,441	0,0711	7.000.992	497.519
5	0,444	0,0687	6.937.920	476.820
7	0,445	0,0690	6.906.384	476.200
8	0,498	0,0770	6.605.162	508.700
<b>Szenario 1</b>	<b>0,454</b>	<b>0,0675</b>	<b>6.721.397</b>	<b>453.392</b>

Szenario 3, Brunnen 15, Intervalluntersuchung

Intervall [a]	kW mittel	kS mittel	m <sup>3</sup> gesamt	€ gesamt
1	0,514	0,0989	7.568.640	748.295
2	0,512	0,0859	7.489.800	643.302
3	0,465	0,0737	7.422.786	547.217
5	0,514	0,0785	7.371.540	578.562
7				
8				
<b>Szenario 1</b>	<b>0,533</b>	<b>0,0787</b>	<b>7.031.828</b>	<b>553.748</b>

Szenario 3, Brunnen 16, Intervalluntersuchung

Intervall [a]	kW mittel	kS mittel	m <sup>3</sup> gesamt	€ gesamt
1	0,410	0,1077	3.942.000	424.711
2				
3	0,410	0,0733	3.938.058	288.731
5	0,412	0,0687	3.918.427	269.173
7				
8				
<b>Szenario 1</b>	<b>0,420</b>	<b>0,0650</b>	<b>3.833.804</b>	<b>249.223</b>

Szenario 3, Brunnen 20, Intervalluntersuchung

Intervall [a]	kW mittel	kS mittel	m <sup>3</sup> gesamt	€ gesamt
1	0,460	0,0999	5.676.480	567.085
2				
3	0,481	0,0794	5.392.656	428.255
5	0,493	0,0777	5.203.440	404.512
7				
8				
<b>Szenario 1</b>	0,596	0,0858	4.691.238	402.285

Szenario 3, Brunnen 23, Intervalluntersuchung

Intervall [a]	kW mittel	kS mittel	m <sup>3</sup> gesamt	€ gesamt
1	0,531	0,1021	7.371.540	752.528
2				
3	0,530	0,0836	7.283.523	608.778
5	0,532	0,0812	7.225.576	586.459
7				
8				
<b>Szenario 1</b>	0,537	0,0792	7.048.514	558.259

Szenario 3, Brunnen 23, Intervalluntersuchung

Intervall [a]	kW mittel	kS mittel	m <sup>3</sup> gesamt	€ gesamt
1	0,554	0,1283	3.942.000	505.673
2				
3	0,556	0,0942	3.894.932	367.001
5	0,559	0,0898	3.865.857	347.147
7	0,561	0,0901	3.848.797	
8				
<b>Szenario 1</b>	0,596	0,0900	3.741.618	336.654

## Anhang 8 – Auswirkung FU auf einzelne Brunnen

Brunnen 10 mit FU

Jahr	Q	H	$\eta_{\text{ges}}$	$k_W$ [kWh/m <sup>3</sup> ]	Strompreis [€]	$k_S$ [€/m <sup>3</sup> ]	m <sup>3</sup> /a	Kosten [€/a]
1	80,00	110,8	0,6402	0,4715	0,120	0,0566	630.720	35.685
2	80,00	112,1	0,6370	0,4797	0,125	0,0600	630.720	37.821
3	80,00	113,1	0,6338	0,4863	0,130	0,0632	630.720	39.877
4	80,00	113,9	0,6306	0,4922	0,135	0,0664	630.720	41.910
5	80,00	114,6	0,6275	0,4976	0,140	0,0697	630.720	43.937
6	80,00	115,2	0,6244	0,5027	0,145	0,0729	630.720	45.971
7	80,00	115,7	0,6212	0,5075	0,150	0,0761	630.720	48.016
8	80,00	116,2	0,6181	0,5122	0,155	0,0794	630.720	50.075
9	80,00	116,6	0,6150	0,5168	0,160	0,0827	630.720	52.152
10	80,00	117,1	0,6120	0,5213	0,165	0,0860	630.720	54.246
	80,00					Summe:	6.307.200	449.690

Brunnen 12 mit FU

Jahr	Q	H	$\eta_{\text{ges}}$	$k_W$ [kWh/m <sup>3</sup> ]	Strompreis [€]	$k_S$ [€/m <sup>3</sup> ]	m <sup>3</sup> /a	Kosten [€/a]
1	90,00	106,5	0,6295	0,4610	0,120	0,0553	709.560	39.253
2	90,00	105,8	0,6246	0,4618	0,125	0,0577	709.560	40.957
3	90,00	105,4	0,6197	0,4634	0,130	0,0602	709.560	42.747
4	90,00	105,1	0,6149	0,4655	0,135	0,0628	709.560	44.595
5	90,00	104,8	0,6101	0,4680	0,140	0,0655	709.560	46.489
6	90,00	104,6	0,6054	0,4707	0,145	0,0682	709.560	48.424
7	90,00	104,4	0,6006	0,4735	0,150	0,0710	709.560	50.396
8	90,00	104,2	0,5960	0,4765	0,155	0,0739	709.560	52.402
9	90,00	104,1	0,5913	0,4795	0,160	0,0767	709.560	54.442
10	90,00	103,9	0,5867	0,4827	0,165	0,0796	709.560	56.514
						Summe:	7.095.600	476.218

Brunnen 15 mit FU

Jahr	Q	H	$\eta_{\text{ges}}$	$k_W$ [kWh/m <sup>3</sup> ]	Strompreis [€]	$k_S$ [€/m <sup>3</sup> ]	m <sup>3</sup> /a	Kosten [€/a]
1	80,0	117,1	0,6402	0,4984	0,120	0,0598	630.720	37.725
2	80,0	117,5	0,6402	0,5001	0,125	0,0625	630.720	39.424
3	80,0	117,7	0,6402	0,5012	0,130	0,0652	630.720	41.092
4	80,0	117,9	0,6354	0,5058	0,135	0,0683	630.720	43.070
5	80,0	118,1	0,6305	0,5104	0,140	0,0715	630.720	45.071
6	80,0	118,2	0,6257	0,5150	0,145	0,0747	630.720	47.097
7	80,0	118,4	0,6247	0,5163	0,150	0,0774	630.720	48.845
8	80,0	118,5	0,6216	0,5193	0,155	0,0805	630.720	50.766
9	80,0	118,6	0,6186	0,5222	0,160	0,0836	630.720	52.703
10	80,0	118,6	0,6155	0,5252	0,1650	0,0867	630.720	54.658
						Summe:	6.307.200	460.451

Brunnen 17 mit FU

Jahr	Q	H	$\eta_{\text{ges}}$	$k_w$ [kWh/m <sup>3</sup> ]	Strompreis [€]	$k_s$ [€/m <sup>3</sup> ]	m <sup>3</sup> /a	Kosten [€/a]
1	80,0	115,4	0,5985	0,5253	0,120	0,0630	630.720	39.758
2	80,0	115,5	0,5985	0,5258	0,125	0,0657	630.720	41.456
3	80,0	115,6	0,5985	0,5262	0,130	0,0684	630.720	43.147
4	80,0	115,6	0,5982	0,5268	0,135	0,0711	630.720	44.856
5	80,0	115,7	0,5979	0,5273	0,140	0,0738	630.720	46.564
6	80,0	115,8	0,5976	0,5278	0,145	0,0765	630.720	48.272
7	80,0	115,8	0,5973	0,5283	0,150	0,0792	630.720	49.980
8	80,0	115,8	0,5970	0,5287	0,155	0,0820	630.720	51.690
9	80,0	115,9	0,5967	0,5292	0,160	0,0847	630.720	53.400
10	80,0	115,9	0,5964	0,5296	0,165	0,0874	630.720	55.112
						Summe:	6.307.200	474.233

Brunnen 19 mit FU

Jahr	Q	H	$\eta_{\text{ges}}$	$k_w$ [kWh/m <sup>3</sup> ]	Strompreis [€]	$k_s$ [€/m <sup>3</sup> ]	m <sup>3</sup> /a	Kosten [€/a]
1	80,0	96,1	0,6499	0,4030	0,1200	0,0484	630.720	30.500
2	80,0	97,4	0,6344	0,4183	0,1250	0,0523	630.720	32.981
3	80,0	98,2	0,6189	0,4324	0,1300	0,0562	630.720	35.454
4	80,0	98,8	0,6033	0,4465	0,1350	0,0603	630.720	38.015
5	80,0	99,4	0,5878	0,4608	0,1400	0,0645	630.720	40.692
6	80,0	99,9	0,5723	0,4757	0,1450	0,0690	630.720	43.507
7	80,0	100,4	0,5568	0,4912	0,1500	0,0737	630.720	46.475
8	80,0	100,8	0,5413	0,5075	0,1550	0,0787	630.720	49.613
9	80,0	101,2	0,5257	0,5246	0,1600	0,0839	630.720	52.938
10	80,0	101,6	0,5102	0,5426	0,1650	0,0895	630.720	56.468
						Summe:	6.307.200	426.644

Brunnen 23 mit FU

Jahr	Q	H	$\eta_{\text{ges}}$	$k_w$ [kWh/m <sup>3</sup> ]	Strompreis [€]	$k_s$ [€/m <sup>3</sup> ]	m <sup>3</sup> /a	Kosten [€/a]
1	50,00	111,0	0,6441	0,4695	0,1200	0,0563	394.200	22.207
2	50,00	111,6	0,6441	0,4720	0,1250	0,0590	394.200	23.256
3	50,00	112,0	0,6441	0,4737	0,1300	0,0616	394.200	24.273
4	50,00	112,3	0,6415	0,4769	0,1350	0,0644	394.200	25.380
5	50,00	112,5	0,6351	0,4829	0,1400	0,0676	394.200	26.649
6	50,00	112,8	0,6306	0,4873	0,1450	0,0707	394.200	27.853
7	50,00	113,0	0,6204	0,4962	0,1500	0,0744	394.200	29.339
8	50,00	113,1	0,6179	0,4990	0,1550	0,0773	394.200	30.489
9	50,00	113,3	0,6154	0,5018	0,1600	0,0803	394.200	31.647
10	50,00	113,5	0,6128	0,5045	0,1650	0,0832	394.200	32.812
						Summe:	3.942.000	273.905