

# Endbericht Phase 1

## Projekt:

**Innovative Düsensauginfiltration zur energieeffizienten sowie Umwelt und Ressourcen schonenden Grundwasserabsenkung**

Gefördert durch:

**Deutsche Bundesstiftung Umwelt (DBU)**

**Abt. 2: *Umwelttechnik***

**Referat 23: *Kreislaufführung und Bautechnik,  
Dipl.-Ing. Franz-Peter Heidenreich***

**Förderaktenzeichen: AZ 28299/01-23**

**Bewilligungsempfänger: **Hölscher Wasserbau GmbH****  
Dipl.-Ing. Heinz Hölscher,  
Hinterm Busch 23, 49733 Haren

**Kooperationspartner: **Georg-August Universität Göttingen****  
Prof. Dr. Martin Sauter,  
Goldschmidtstr. 3, 37077 Göttingen

**Nordmeyer Geschäftsführungs-GmbH**  
Heinz Hermann Nordmeyer und Bernd Felski,  
Werner-Nordmeyer-Str. 3, 31226 Peine

## Inhaltsverzeichnis

Projekt:

### **Innovative Düsensauginfiltration zur energieeffizienten sowie Umwelt und Ressourcen schonenden Grundwasserabsenkung**

Deutsche Bundesstiftung Umwelt (DBU)

1.	Einleitung.....	3
2.	Feldversuche.....	4
2.1	Plötzin.....	4
2.2	Korschenbroich.....	7
3.	Modellierung Einzelbrunnen.....	9
3.1	Einleitung.....	9
3.2	Konzeptionelles Modell.....	10
3.3	Methode der Finiten Elemente .....	14
3.4	Ergebnisse 2D-Modelle .....	17
3.4.1	2D vertikal, für gespannten Fall.....	17
3.4.2	2D vertikal, freie Oberfläche .....	19
3.4.3	2D vertikal, Skin-Effekt .....	20
3.4.4	Abgleich mit Feldversuchen.....	22
3.5	Ergebnisse 3D-Modelle .....	23
3.6	Modellerweiterung: Freie Strömung .....	24
4.	Zusammenfassung und Diskussion .....	26
5.	Ausblick, weitere Aufgaben, Planung.....	26
6.	Literatur und Software .....	27
6.1	Allgemein.....	27
6.2	Projektpublikationen .....	27
7.	Anhang .....	27
7.1	Aufbau und Ergebnisse der Feldversuche - Plötzin .....	28
7.2	Voruntersuchungen in Korschenbroich .....	42
7.3	Glossar .....	43

## 1. Einleitung

Bei der Düsensauginfiltration (DSI) handelt es sich um ein innovatives, patentrechtlich geschütztes Verfahren zur Infiltration von flüssigen Medien in einen Grundwasserleiter. Die Anwendungsmöglichkeiten unterscheiden DSI-Einheiten die ausschließlich zur Reinfiltration genutzt werden und kombinierte Einheiten zur gleichzeitigen Förderung und Reinfiltration. Hauptsächlich wird bei der reinen Infiltration die DSI-Einheit Glindow angewendet. Bei der kombinierten DSI-Einheit, dem Typ Brandenburg, wird ein einzelnes Bohrloch nicht nur zum Fördern von Grundwasser sondern auch zur Infiltration in einen tieferen Grundwasserleiter genutzt – im Gegensatz zu herkömmlichen Absenkungstechniken, bei denen zumeist nur abgepumpt wird (evtl. wird in benachbarten Bohrlöchern begleitend infiltriert, um die Absenkung lokal zu begrenzen). Das Verfahren wurde von Ebneht *et al.* (2009) dem Fachpublikum vorgestellt, wobei u.a. festgestellt wurde, dass eine systematische Erkundung des Anwendungsbereichs und der Grenzen der Anwendbarkeit noch aussteht. Zu dem genannten Zweck wurde das hier behandelte DSI Projekt ins Leben gerufen.

Der Antrag zum Projekt wurde im September 2009 eingereicht. Das Projekt ist in drei Phasen gegliedert, wovon die erste Phase Feldexperimente und Modellierungsarbeiten mit einem Bohrloch beinhaltet. Ursprünglich waren die Arbeiten der Phase 1 für die Monate Januar bis April 2010 geplant. Nicht nur aufgrund der Bewilligungszeit, die zunächst sehr kurz veranschlagt war, konnte dieser Zeitplan nicht eingehalten werden. Die Bewilligung für Phase 1 erfolgte schließlich im August 2010. Im Jahre 2010 wurden von der Fa. Hölscher Feldversuche und vom Ingenieurbüro Holzbecher als Unterauftragnehmer Modellierungsarbeiten durchgeführt. Zum 1. Dezember wurde an der Universität Göttingen eine Doktorandin als Bearbeiterin des Projekts eingestellt.

Die in Phase 1 geplanten Feldversuche am Standort Plötzin, als Teilarbeiten der Fa. Hölscher, wurden bereits im Februar 2010 durchgeführt. Es erfolgten drei Pumpversuche mit Einzelbrunnen. Einzelheiten dazu sind in Kapitel 2 dieses Berichts beschrieben. Am Standort Korschenbroich ergab sich eine Verzögerung der Arbeiten dadurch, dass sich die Genehmigungen zu den Arbeiten nicht nach dem ursprünglichen Zeitplan einholen ließen.

Modellierungsarbeiten zur Phase 1 wurden vom Ingenieurbüro Holzbecher im August 2010 begonnen. Es wurden zwei Modelle in einer 2D Geometrie, die einem Vertikalschnitt um den Brunnen entspricht, aufgebaut und berechnet. In einem Modell wurde der Grundwasserleiter als gespannt, im anderen als ungespannt, d.h. mit freier Oberfläche, angenommen. Details dazu siehe Kapitel 3.

In den folgenden Kapiteln geben wir einige Details zu den erfolgten Arbeiten, bevor wir im letzten Kapitel zu den weiterführenden Arbeiten kommen. Zur Kontinuität des Projekts wäre es wichtig, wenn die Bearbeiterin an der Universität Göttingen die begonnenen Arbeiten nach Abschluss der genehmigten Phase 1, d.h. im April 2011 fortsetzen könnte.

## 2. Feldversuche

### 2.1 Plötzin

Der Standort des DSI-Testgeländes am Ortsrand von Plötzin, in der Nähe von Werder bei Potsdam in Brandenburg, liegt in einer eiszeitlichen Rinne, die vor etwa 19.000 Jahren im Zuge des Weichselhochglazials entstand. Getrennt wird er von der Havel durch einen bis zu 70 Meter hohen Höhenzug, der aus Resten von Stauchmöränen besteht.



**Bild 1:** Ansicht der Versuchsanlage in Plötzin

Das Bild 1 zeigt im unteren Bildabschnitt die DSI-Einheit Typ Brandenburg mit den benachbarten GWMS. Die örtliche Geometrie, die GWMS und der DSI-Brunnen sowie deren Filterstrecken, wurden in ein digitales Modell eingefügt. Diese Daten bilden die Grundlage für die Modellierungen der Georg-August Universität Göttingen.

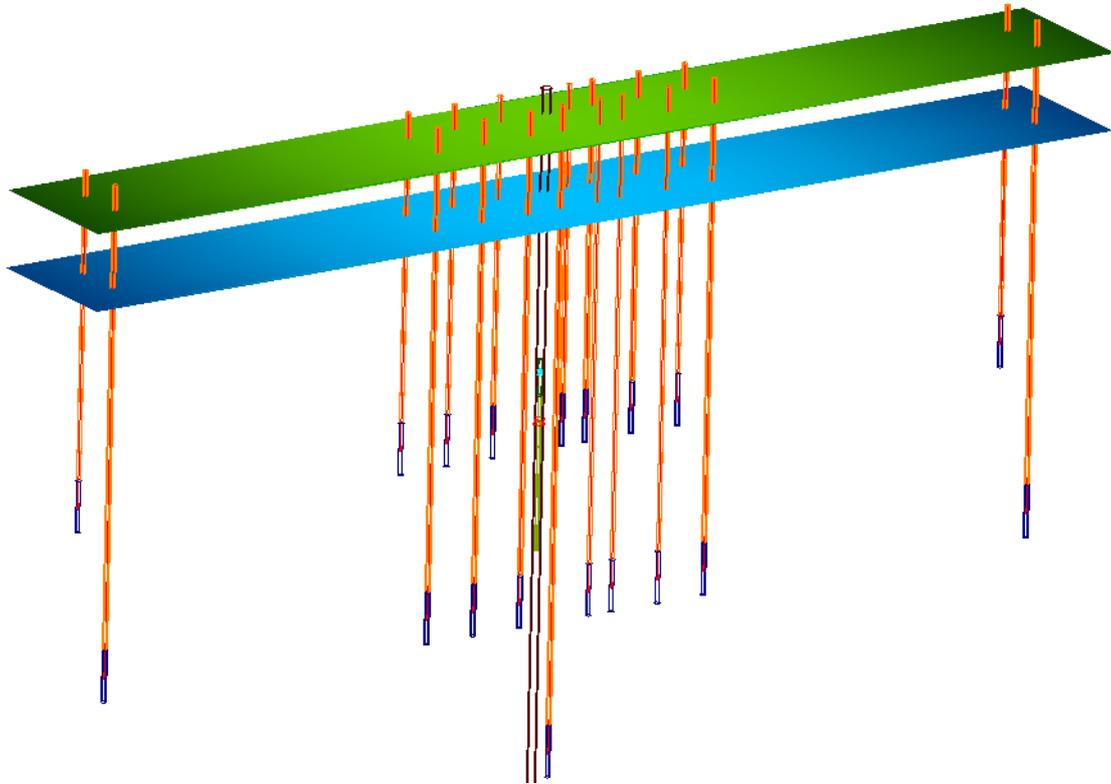
Die Untergrundverhältnisse des Versuchsgeländes sind wie folgt:

- ~ -00,30 m u GOK: feiner – grober Sand, feiner - mittlerer Kies, Ziegelreste
- ~ -03,20 m u GOK: feiner – grober Sand
- ~ -06,90 m u GOK: grober Sand, feiner – mittlerer Kies
- ~ -12,50 m u GOK: mittlerer – grober Sand, feiner Kies

Der Ausbau und die Anordnung der Grundwassermessstellen (GWMS) sind im Anhang (Kapitel 7.1: Aufbau und Ergebnisse der Feldversuche – Plötzin) im Detail graphisch dargestellt (siehe auch Bild 2).

Es wurden fünf Einzelpumpversuche durchgeführt. Die Dokumentation erfolgte im Rahmen einer Bachelorarbeit durch Herrn Dany, Student der Fachhochschule Trier. (Dany 2010). Die wichtigsten Ergebnisse sind auszugweise ebenfalls im Anhang hinterlegt.

Im ersten Pumpversuch befand sich die Unterwasserpumpe 4,00 m unter Grundwasser (u GW) und hatte eine Falleitung von 3,00 m. Der zweite Pumpversuch erfolgte mit der gleichen Falleitungslänge, jedoch war die Pumpe 6,00 m u GW angebracht. Pumpversuch 3 und 4 erfolgten mit einer Falleitung von 5,00 m mit jeweils einer Installationstiefe der Pumpe von 4,00 m u GW und 5,00 m u GW. Der letzte Versuch erfolgte mittels des zum Gravitationsbrunnen umfunktionierten DSI-Brunnens. Die Unterwassermotorpumpe befand sich in diesem Fall 5,00 m u GW.



**Bild 2:** Räumliche Versuchsanordnung (Brunnen in schwarz, Grundwassermessstellen in orange)

Bild 2 zeigt eine anschauliche Darstellung der dreidimensionalen Anordnung der Feldversuche. Die örtliche Geometrie, die GWMS und der DSI-Brunnen sowie deren Filterstrecken, wurden in ein digitales Modell eingefügt. Diese Daten bilden die Grundlage für die Modellierungen der Georg-August Universität Göttingen.

## **2.2 Korschenbroich**

Am Standort in Korschenbroich ist eine für das deutsche Niederrheinland typische geologische Situation vorhanden. Nach bodennahen Schichten aus bindigen Boden- und Auffüllmaterial zeigen sich ab ungefähr zwei Metern unter der Geländeoberflächige sandige bis leicht kiesige Bodenschichten. Im weiteren Verlauf wird die Körnung bis zum Übergang zu tertiären Bodenschichten bei ungefähr 25 Metern zunehmen grobkörniger (mittel- bis grobkiesig). Der nachstehenden Auflistung ist die charakteristische Bodenschichtung am Standort Korschenbroich zu entnehmen: ~ -00,50 m u GOK: Mutterboden

~ -02,00 m u GOK: Auffüllung (Sand, Kies, Ziegel, Schluff)

~ -12,00 m u GOK: Fein- bis Mittelsand, feinsandig, kiesig

~ -23,00 m u GOK: Grobkies, Steine, sandig bis schwach sandig,

Der für die DSI interessante Bereich mit großen Durchlässigkeitsbeiwerten liegt in den Tiefen zwischen 18 und 23 Metern.

Die grundwassertechnische Gefährdung von Gebäuden in weiten Teilen des Rhein-Kreises Neuss hier im speziellen der Stadt Korschenbroich geht auf flurnahe Grundwasserstände zurück. Durch tagebautechnischen Einfluss ab den 1970er Jahren fiel der durchschnittliche Grundwassersand um ungefähr zwei Meter. Nach neueren Prognosen wird sich der mittlere Grundwasserspiegel langfristig mit einhergehender Verringerung des tagebautechnischen Einflusses wieder an den ursprünglichen Wert annähern.

In zahlreichen Gebäuden der Stadt Korschenbroich, die mit Berücksichtigung der temporär niedrigeren Grundwassersande, inklusive eines Untergeschosses, das bauphysikalisch nicht gegen anstehendes Grundwasser geschützt ist, erbaut wurden, dringt bei Grundwasserhochständen Wasser in die Räume des Untergeschosses ein. Auch das Gebäude „An der Insel 20“ in Korschenbroich leidet unter diesem Problem.

Zur Schutz vor eindringendem Wasser wurde am Objekt vor ungefähr zehn Jahren eine konventionelle Brunnenanlage zur lokalen Grundwasserabsenkung installiert. Mit deren Betrieb konnte der Grundwasserspiegel unter dem Objekt bei Bedarf auf ein nicht gefährdendes Maß abgesenkt werden. Das Förderwasser wurde über einen nahliegenden Vorfluter abgeleitet.

Die neu zu errichtende DSI-Grundwasserhaltungsanlage leitet die geförderten Wassermengen nicht in einen Vorfluter und belässt das Gut Wasser in tieferen Teilen des Aquifers. Somit bestehen gegenüber der konventionellen Anlage große Vorteile in Bezug auf den Umwelt- und Ressourcenschutz speziell für den Wasserhaushalt der Flora und Fauna.

Am Standort Korschenbroich, An der Insel 20 wurde die Vorplanung abgeschlossen und die wasserrechtliche Genehmigung für die Durchführung des Pumpversuches erteilt.

Zur Festlegung des Ausbaus der DSI-Einheiten wurden zunächst zwei CPT durchgeführt. Im Bild 3 ist der Aufbau der CPT-Untersuchungen dargestellt.



**Bild 3:** Versuchsstandort Korschenbroich mit CPT-Anlage im Vordergrund

Im Verlauf des Spitzenwiderstandes (siehe Anhang: Kapitel 7.2) zeigt sich, dass im oberen Teil des Grundwasserleiters eine inhomogene Schichtung und entsprechend inhomogene Strömungsverhältnisse vorliegen. Für die DSI wird der günstigere Tiefenbereich um 12 m, der lithologisch mit dem Übergang von Mittelsanden zu kiesigen Schichten korrespondiert gewählt.

### 3. Modellierung Einzelbrunnen

#### 3.1 Einleitung

Parallel zu den Feldexperimenten am Standort Plötzin wurden an der Universität Göttingen Modellrechnungen vorgenommen. Die Modelle basieren auf der Gültigkeit des Darcy-Gesetzes für poröse Medien und dem Prinzip der Massenerhaltung (Bear 1976, Holzbecher 1996). Der Abgleich zwischen Modellergebnissen und Messwerten der Experimente zeigt, ob die der Technologie zugrundeliegenden Prozesse richtig verstanden werden, und wie gut die Feldsituationen am Computer nachgebildet werden können. Mit validierten Modellen, die auf den in Phase 1 erstellten Methoden aufbauen, sollen in Projektphase 2 die Grenzen der Anwendbarkeit der DSI-Technik getestet werden.

Zum Einstieg in die Modellierung der DSI wurden von Herrn Holzbecher in Zusammenarbeit mit der Universität Göttingen Computermodelle zu Einzelbrunnen erstellt. Es erfolgte ein erster Abgleich mit den im Kapitel 2 beschriebenen Pumpversuchen.

In den 2D Modellen wird ein Vertikalschnitt mit radialem Koordinatensystem, mit dem Brunnen als Mittelpunkt betrachtet. Das Modellgebiet umfasst den Aquifer mit seiner Gesamtmächtigkeit, und erstreckt sich vom Brunnenrand bis zu einer angenommenen Brunnenreichweite. Die Geometrie des Modellgebiets kann an den jeweiligen Standort angepasst werden. Da die Brunnenreichweite zumeist nur unzureichend bekannt ist, erfolgen Testrechnungen zum Einfluss dieses Parameters. Im Normalfall muss sichergestellt werden, dass die Ergebnisse im Nahfeld des Brunnens nicht von der Wahl der Reichweite beeinflusst werden. Das ist nicht nötig, wenn die Reichweite durch geologische oder andere standortgebundene Gegebenheiten eingeschränkt ist.

Im Modellgebiet wird jeweils die Potentialgleichung gelöst, unter Berücksichtigung von Randbedingungen. Zunächst wurde der einfachste (Potential-)Ansatz für den gespannten Grundwasserleiter zugrundegelegt:

$$\nabla(\mathbf{K}\nabla h) = 0 \quad (1)$$

mit Durchlässigkeitstensor  $\mathbf{K}$  und Piezometerhöhe  $h$  als abhängiger Variable. Zwischen der Piezometerhöhe und dem Druck  $p$  besteht die Beziehung:

$$h = \frac{p}{\rho g} + z \quad (2)$$

mit Fluidichte  $\rho$  und Gravitationsbeschleunigung  $g$ . Für den 2D Fall in einem radialen Koordinatensystem mit radialer Koordinate  $r$  und vertikaler Koordinate  $z$ , ist das gleichbedeutend mit der detaillierteren Formulierung:

$$\frac{1}{r} \frac{\partial}{\partial r} \left( K_r r \frac{\partial h}{\partial r} \right) + \frac{\partial}{\partial z} \left( K_z \frac{\partial h}{\partial z} \right) = 0 \quad (3)$$

wobei  $K_x$  die Durchlässigkeit in horizontaler, und  $K_z$  die Durchlässigkeit in vertikaler Richtung bezeichnen. Im 3D Fall mit den Koordinaten  $x$ ,  $y$ , und  $z$  lautet die entsprechende Formulierung:

$$\frac{\partial}{\partial x} \left( K_x \frac{\partial h}{\partial x} \right) + \frac{\partial}{\partial y} \left( K_y \frac{\partial h}{\partial y} \right) + \frac{\partial}{\partial z} \left( K_z \frac{\partial h}{\partial z} \right) = 0 \quad (4)$$

Im Falle des gespannten Grundwasserleiters bleiben die Ränder des Modellgebiets fest. Die Details der Randbedingungen sind unten angegeben.

In einem weiterführenden Schritt erfolgte die Modellierung des ungespannten Grundwasserleiters als ein freies Randwertproblem. Hierbei ist der obere Rand, sowie der obere Teil Bohrlochrandes variabel. Diese Ränder verändern sich unter der Bedingung, dass am oberen Rand atmosphärische Druckverhältnisse gelten, d.h.:

$$p = 0 \quad (5)$$

Probleme mit freien, d.h. veränderlichen Rändern werden in der Mathematik als freie Randwertprobleme bezeichnet. Die Lösung derartiger Probleme ist die der Regel aufwendiger als entsprechende Probleme mit festen Rändern. Mit der Veränderung des Randes geht intern auch die Koordinatentransformation des Gitters überein.

Zur Lösung der angegebenen partiellen Differentialgleichungen (1), (3) oder (4) wurde das Programm COMSOL Multiphysics ausgewählt. Das Programm ist äußerst flexibel für die Behandlung allgemeiner partieller Differentialgleichungen. Insbesondere entscheidend für die Wahl der Software war die Verfügbarkeit der Option das Problem des ungespannten Grundwasserleiters als ein freies Randwertproblem zu behandeln.

Bei der Modellentwicklung wurden Parameter gewählt, die soweit bekannt, den Gegebenheiten am Standort Plötzin entsprechen. Bzgl. des Ausbaus wurde ein konstanter Rohrdurchmesser von 0.05 m angenommen. Das Rohr ist durchgängig verfiltert bis zu einer Tiefe von 15.4 m. Der Flurabstand beträgt 2.6 m. Im Bohrloch ist eine Pumpe umgekehrt eingebaut; das entspricht der Konstellation beim Typ Brandenburg. Im Bohrloch wird oben gepumpt oben und unten injiziert. Die Pumpenposition liegt bei 3 m unterhalb des ursprünglichen Grundwasserspiegels. Infiltration erfolgt in 6 m Tiefe. Die Pumprate beträgt 18 m<sup>3</sup>/h. Der Grundwasserleiter ist homogen. Er besteht wesentlich aus hoch durchlässigem Mittelsand ( $K_f$ -Werte  $7.5 \cdot 10^{-4}$ - $1.5 \cdot 10^{-3}$  m/s). Alle in der Projektphase 1 erstellten Modelle betreffen den stationären Fall.

### **3.2 Konzeptionelles Modell**

Im Modellgebiet wird die Lösung der Potentialgleichung für die Piezometerhöhe  $h$  numerisch (Finite Elemente) gelöst. Anisotropien können bei diesem Ansatz berücksichtigt werden.

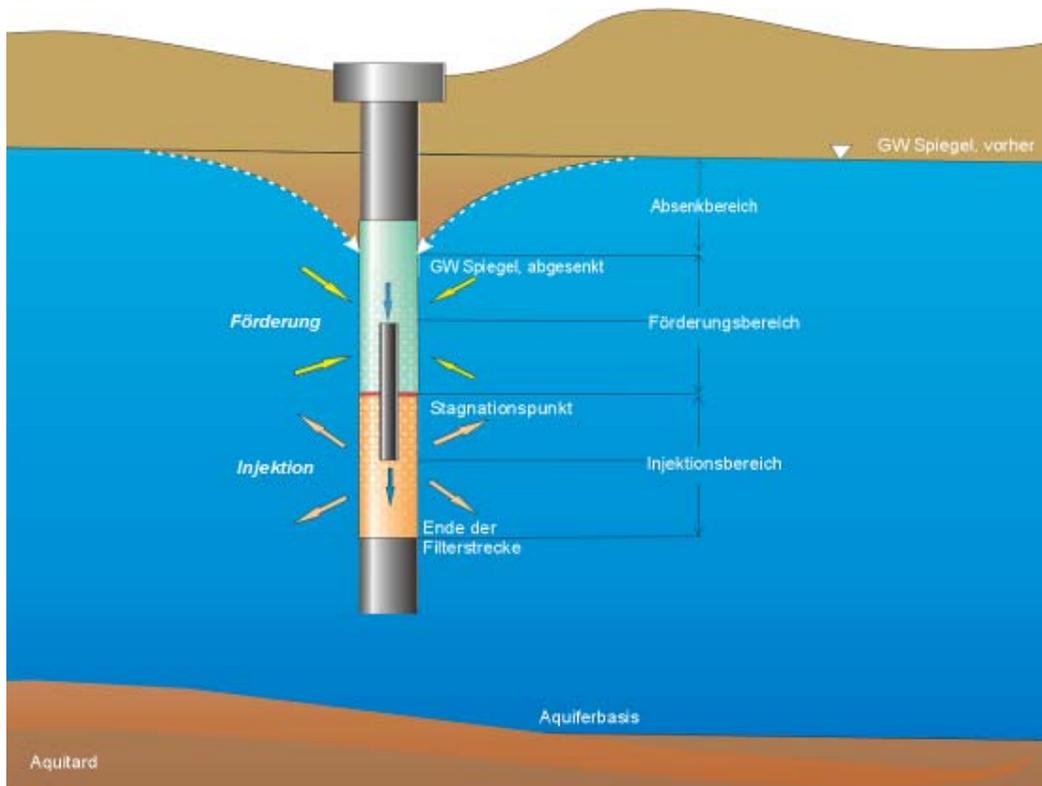
Bzgl. der Randbedingungen wird das Modell an den drei Außenkanten als geschlossen angenommen. Grundwasserneubildung bzw. 'Leaky Aquifer' Verhält-

nisse werden dabei ausgeschlossen. Außerdem wird vorausgesetzt, dass die Reichweite des Brunnens bekannt ist. Der äußere Rand des Modellgebiets entspricht damit einer Grenzstromlinie. Da die Beträge der Geschwindigkeiten am äußeren Rand verschwindend klein sind, kann dies zunächst als vernachlässigbar gelten. In der weiteren Projektphase werden andere Randbedingungen getestet.

Im Bohrloch selbst wird die Normalgeschwindigkeit (radiale Geschwindigkeit) als Randbedingung angesetzt. Dabei wird das Bohrloch in vier Teilabschnitte geteilt. Von oben nach unten sind dies die Abschnitte zwischen den folgenden Positionen:

1. Grundwasserspiegel – Pumpposition
2. Pumpposition – Stagnationspunkt
3. Stagnationspunkt – Infiltrationsposition
4. Infiltrationsposition - Bohrlochende

Die Abschnitte sind im Bild 4 graphisch dargestellt.



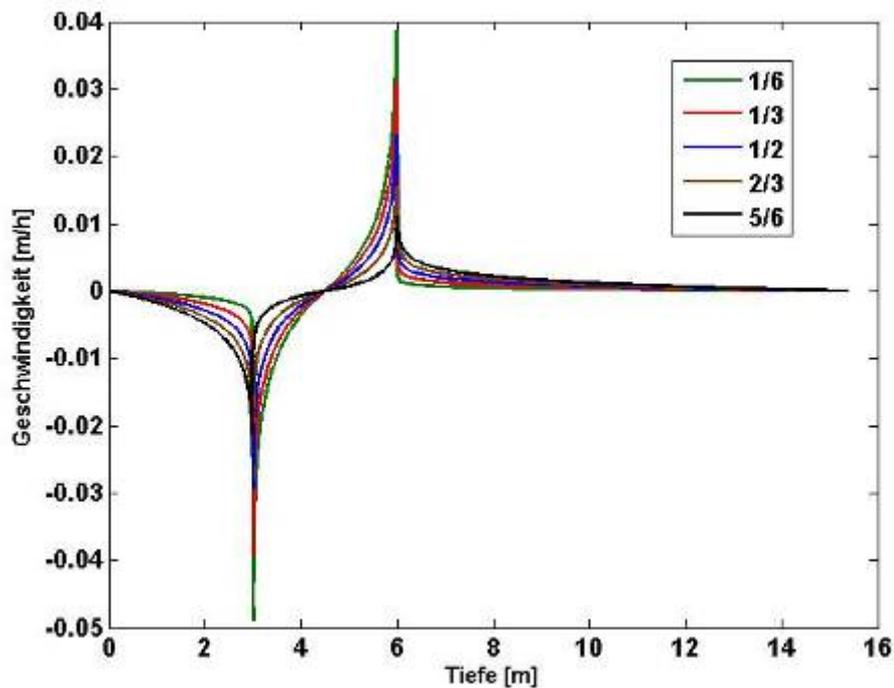
**Bild 4:** Bohrloch mit DSI-Installation, Konzept

Für alle Abschnitte wird eine logarithmische Verteilung der Normalgeschwindigkeit der Form

$$v_r = \frac{\theta Q_{well}}{2\pi r_b H} \log\left(\frac{z - z_s}{H}\right) \quad (6)$$

angenommen; mit Pumprate  $Q_{well}$ , Bohrlochradius  $r_b$ , Höhe des Bohrlochabschnitts  $H$ , sowie der Position der Quelle, bzw. Senke  $z_s$ . Ein daraus resultierendes Tiefenprofil für die Normalkomponente der Geschwindigkeit ist im Bild 5 dargestellt.

Die Verteilung des An- bzw. Abstoms auf den Bereich ober- bzw. unterhalb der Pumprohrposition wird durch den Parameter  $\theta$  dargestellt. Der Standardwert  $\theta=1/2$  beschreibt den Fall, dass die Hälfte des Wassers von oben und die andere von unten gezogen bzw. infiltriert wird. Der logarithmische Ansatz ist besonders geeignet, weil er für den Standardwert einen differenzierbaren Übergang zwischen den Bohrlochabschnitten 2 und 3 liefert. Die Tatsache das der Betrag der Geschwindigkeit an Pump- bzw. Infiltrationspunkt unendlich wird, spielt keine Rolle, da bei der numerischen Methode die Randbedingung nur an Punkten ausgewertet werden, die in einiger Entfernung von den beiden kritischen Punkten liegen.

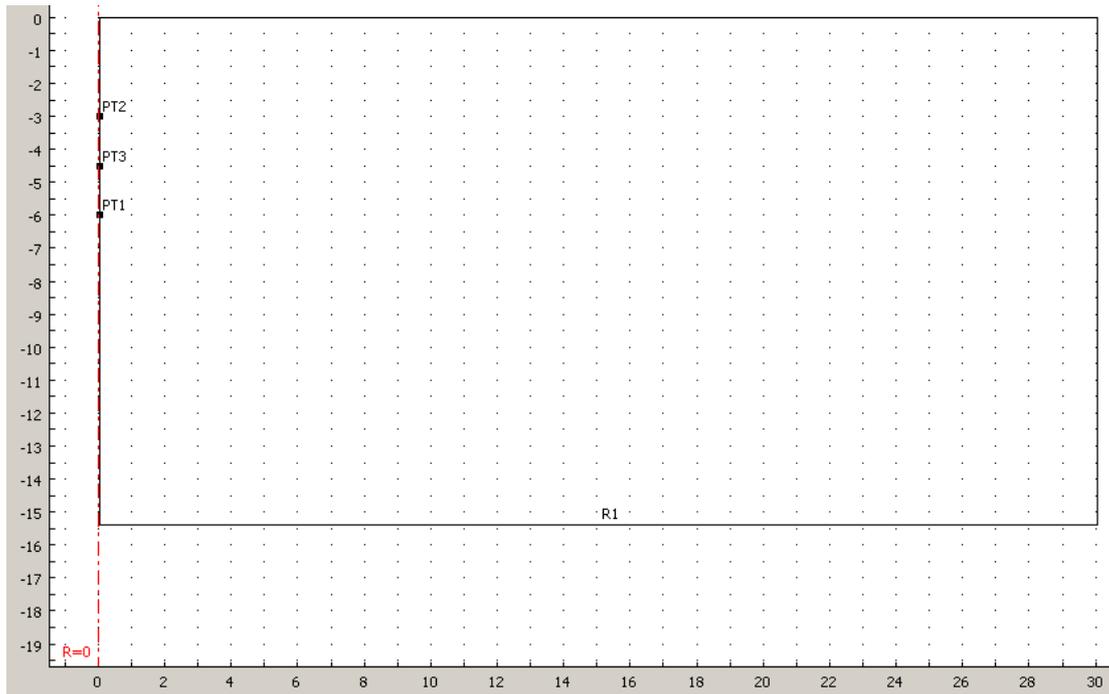


**Bild 5:** Verteilung der radialen Geschwindigkeitskomponente längs der Bohrlochwand (positiv: Infiltration, negativ: Entnahme)

Die Potentialgleichung allein gilt streng genommen nur für den gespannten Fall, in dem sich die Geometrie des Vertikalschnitts nicht ändert. Im ungespannten Fall muss die Verschiebung des Grundwasserspiegels berücksichtigt werden. Das freie Randwertproblem' wird mit der ALE (Arbitrary Lagrangian Element) Methode behandelt, bei der auch das FE-Gitter nicht räumlich fixiert, sondern beweglich ist (Moving Mesh). Zusätzlich zur Piezometerhöhe wird ein Verschiebungsvektor berechnet.

Das gesamte Modellgebiet für die 2D Modelle ist im Bild 6 dargestellt. Am linken Rand befindet sich das Bohrloch. Durch die Punkte PT1, PT2 und PT3 ist dieser Rand in vier Abschnitte, wie oben beschrieben, eingeteilt. Der obere Rand ist mit dem Grundwasserspiegel identisch, der untere mit der Basis des

Grundwasserleiters. Der rechte Rand ist durch eine angenommene Brunnenreichweite gegeben.



**Bild 6:** Modellgebiet 2D Modell

Die Randbedingung in den vier Bohrlochabschnitten ist durch die Vorgabe der Normalgeschwindigkeitskomponente, wie oben beschrieben, gegeben. An den übrigen Rändern wird die sogenannte 'No-flow' Bedingung gefordert, bei der ebenfalls die Normalgeschwindigkeitskomponente gesetzt wird, aber eben auf den Wert Null.

Wenn an allen Rändern allesamt Bedingungen vom Neumann Typ aufgestellt sind, muss zur Normierung des Drucks, bzw. der Piezometerhöhe eine Punktbedingung gesetzt werden. Das geschieht hier im Punkt PT3, in dem der Piezometerwert Null gefordert wird. Alternativ dazu wurde der Fall mit Dirichlet-Randbedingung am gesamten äußeren Modellrand in den Vergleich einbezogen.

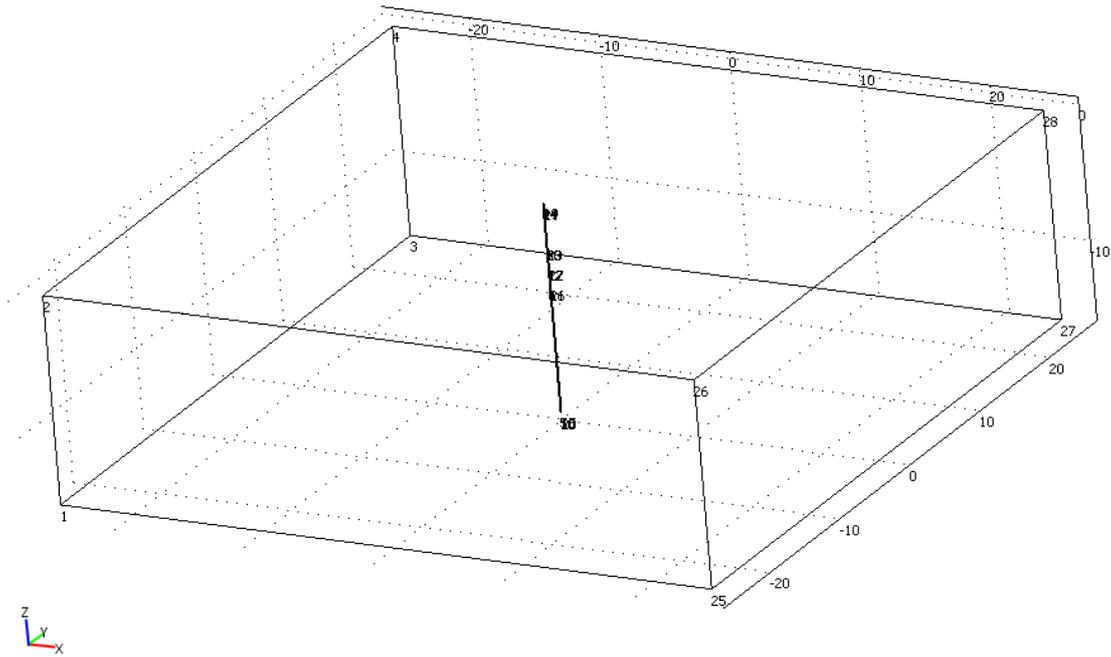
Die Randbedingungen bei der Berechnung der Verschiebung des Gitters (ALE siehe oben) und der Punkte des Modellgebiets sind wie folgt gewählt:

oberer Rand: frei beweglich mit Bedingung  $h=z$

oberer Bohrlochabschnitt: beweglich in vertikaler Richtung

übrige Ränder: fest, d.h. unbeweglich im Raum

Ein vereinfachter 2D Modellansatz ist erlaubt, wenn die Situation um den Einzelbrunnen radialsymmetrisch ist. Das ist der Fall, wenn keine nicht-radialen Inhomogenitäten vorliegen und keine Grundströmung vorhanden ist. Im Modell benutzt man dann die Zylinderkoordinaten  $r$  für die horizontale und  $z$  für die vertikale Längenkoordinate.



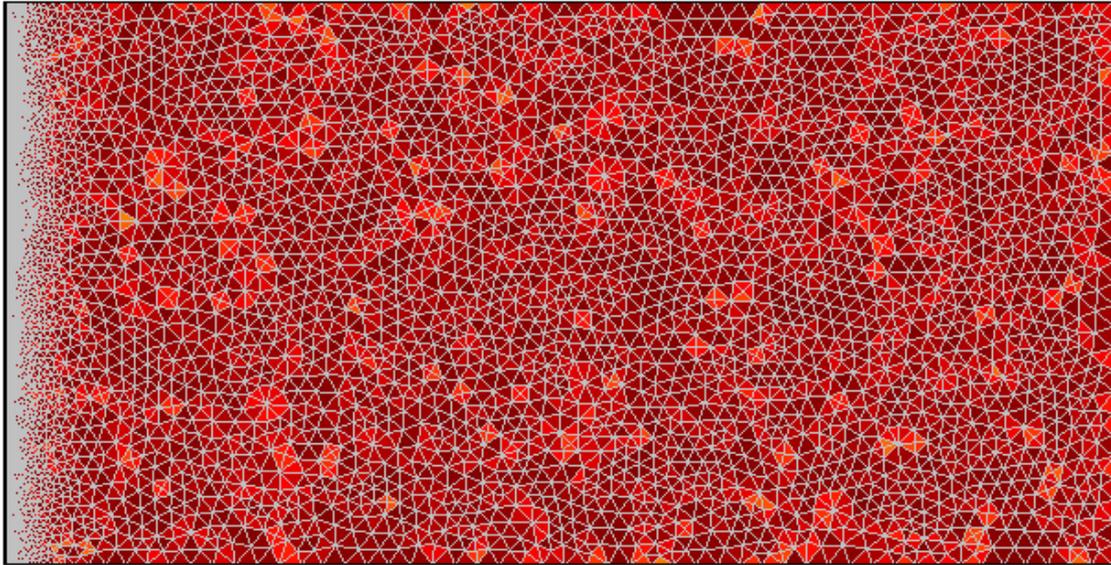
**Bild 7:** Modellgebiet 3D Modell

In den 3D Modellen werden Randbedingung des gleichen Typs verwendet. Auch hier ist die Bohrlochwand in vier Teilabschnitte geteilt.

### **3.3 Methode der Finiten Elemente**

Die Lösung der Differentialgleichung erfolgt mit der Methode der Finiten Elemente. Dazu wird das Programm COMSOL Multiphysics verwendet.

In den 2D Modellen wurden Dreiecksgitter mit quadratischen Ansatzfunktionen gewählt. Eine Beispiel-Diskretisierung ist im Bild 8 gezeigt. Am gesamten linken Modellrand, der der Bohrlochwand entspricht, ist das Gitter stark verfeinert. Vorgabe ist dort eine maximale Kantenlänge von 1 cm. Die Farbe ist eine Maß für die Güte des Elements. Rote Farbe entspricht einer Elementgüte von über 0.8 der höchsten Güteklasse (bei 1.0 für höchste Güte). Die minimale Güte im gesamten Modellgebiet lag bei 0.61 in diesem Beispiel.



**Bild 8:** Beispiel eines Finite Element Gitters für das 2D Modelle

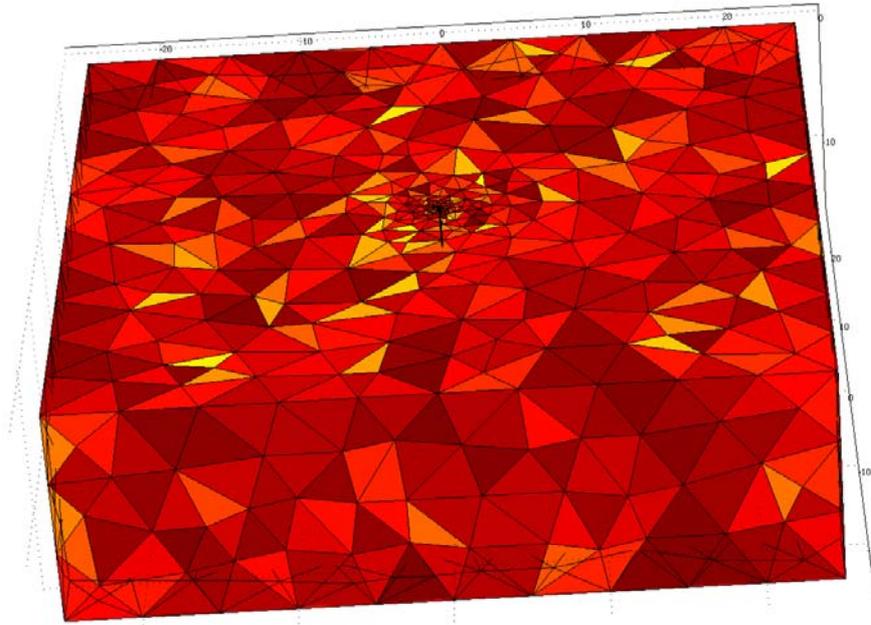
In Tabelle 1 sind Details für einige der verwendeten Gitter angegeben. Gitter 1 ist in Bild 8 dargestellt. Ein Maß für die Komplexität der Modelle ist die Anzahl der Freiheitsgrade. Diese gibt die Größe der Gleichungssysteme an, d.h. die Anzahl der zu lösenden Gleichungen.

Gitter	Elemente	Knoten	Randelemente	Freiheitsgrade
1	22897	5830	703	22897
2	24407	6209	698	24407
3	32860	16738	614	66335

**Tabelle 1:** Details für einige der in den 2D Modellen ohne freien Rand verwendeten Dreiecksgitter

Die Anzahl der Freiheitsgrade erhöht sich bei der Behandlung der freien Oberfläche für den ungespannten Grundwasserleiter. Bei 8215 Elementen, 4262 Knoten und 307 Randelementen kommt man dann bereits auf 51266 Freiheitsgrade. Ohne die ALE ergeben sich bei demselben Gitter lediglich 16738 Freiheitsgrade. Die Erhöhung um in etwa den Faktor 3 erklärt sich daraus, dass an jedem Knoten statt einer Unbekannten nun drei berechnet werden müssen (Piezometerhöhe und die Verschiebungen in beiden Koordinatenrichtungen).

Im Bild 9 ist das Gitter des 3D Modells gezeigt. Das Gitter besteht aus Tetraedern.



**Bild 9:** Finite-Element Gitter in 3D Modellen

In Tabelle 2 sind Details für einige der verwendeten Gitter angegeben. Gitter 1 ist in Bild 9 dargestellt.

Gitter	Elemente	Knoten	Randelemente	Freiheitsgrade
1	8190	1759	1540	12478
2	21260	4044	2084	30390
3	94886	17837	3966	132543
4	44729	8389	4074	260820

**Tabelle 2:** Details für einige der in den 2D Modellen verwendeten Dreiecksgitter

### 3.4 Ergebnisse 2D-Modelle

Zum Testen der unterschiedlichen Modellansätze wurde ein Referenzfall entworfen. Es wurde ein vollständiger Brunnen angenommen, der bis zur Basis des Grundwasserleiters verfiltert ist. Die Eingangswerte für diesen Einzelbrunnen sind in der folgenden Tabelle 3 zusammengefasst.

Parameter	Wert	Einheit
Pump/ Infiltrationsrate	18	m <sup>3</sup> /s
Brunnenradius	5	cm
Förderhorizont unterhalb Gelände	3	m
Infiltrationshorizont unterhalb Gelände	6	m
Aquifermächtigkeit	15.4	m
Reichweite	30	m
Hydraulische Durchlässigkeit	1.5·10 <sup>-3</sup>	m/s
Anisotropiefaktor	1	-
Dichte	1000	kg/m <sup>3</sup>

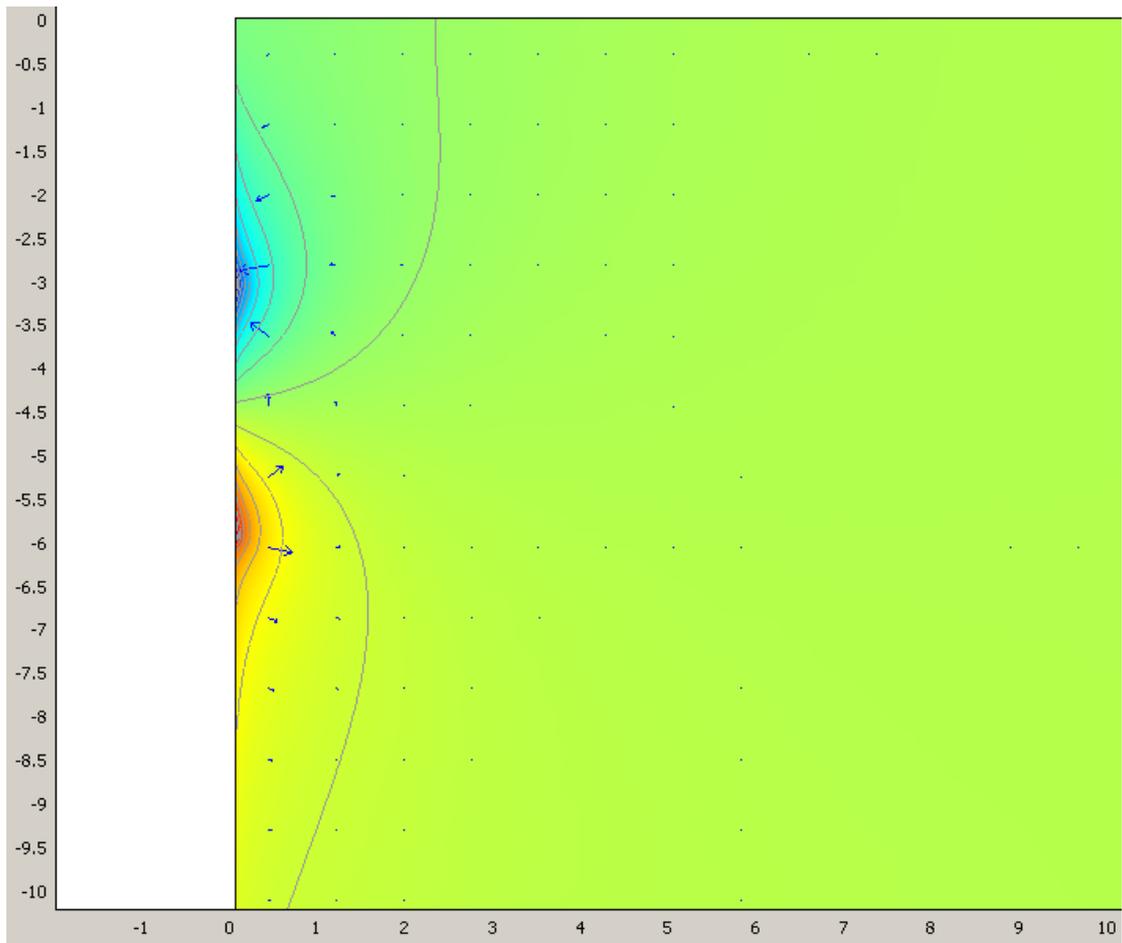
**Tabelle 3:** Eingabewerte für den Referenzfall

#### 3.4.1 2D vertikal, für gespannten Fall

Ein Ergebnisausschnitt, mit Piezometerverteilung als Farbmuster ist im Bild 10 dargestellt. Konturlinien repräsentieren Isolinien der Piezometerhöhe. Das Geschwindigkeitsfeld ist durch Pfeile angedeutet.

Absenkungen sind im Modell blau, Erhöhungen der Piezometerhöhe rot dargestellt. Die maximale Absenkung ist 1.44 m, die maximale Erhöhung im Bereich der Infiltration 1.17 m.

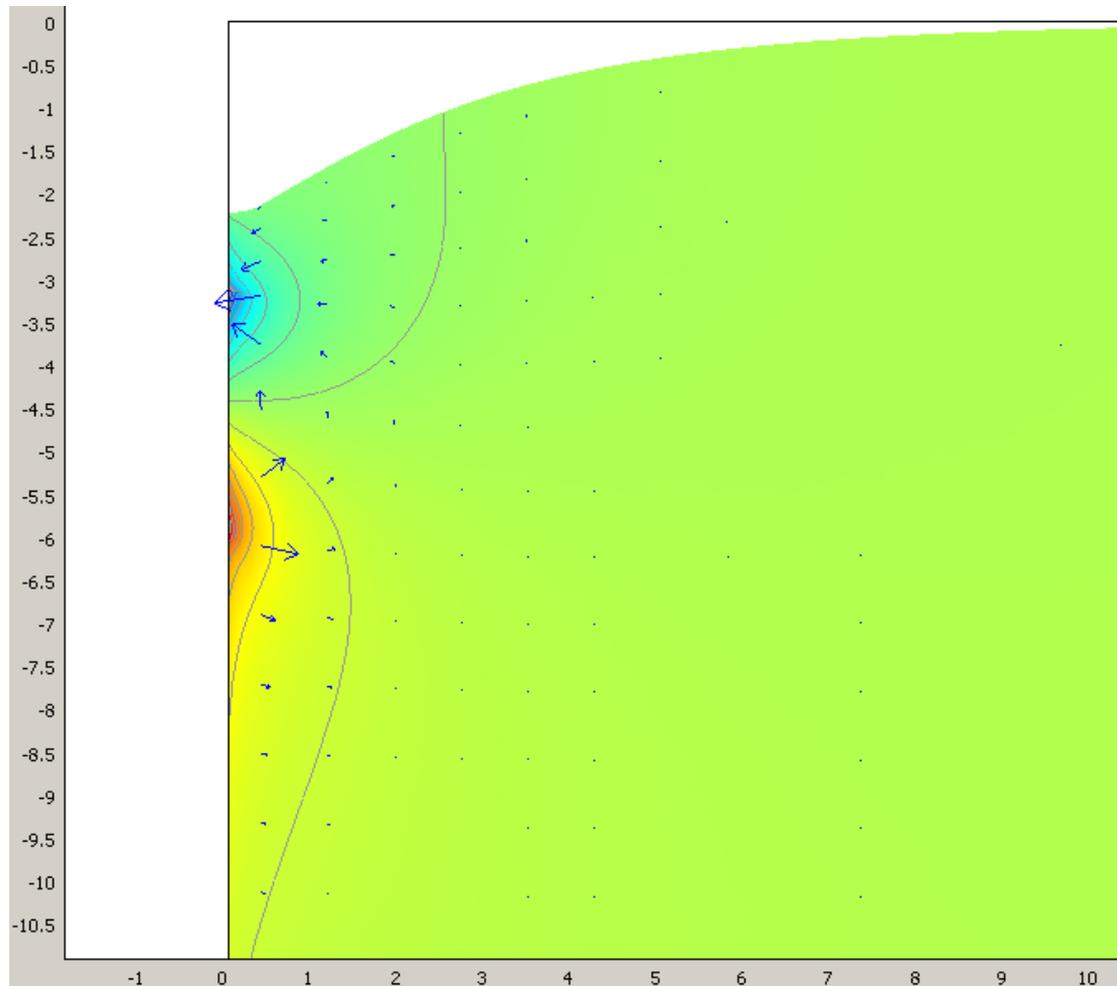
Der Vergleich der Modelle mit unterschiedlichen Randbedingungen am äußeren Rand zeigt lediglich einen geringen Einfluss auf die Verhältnisse am Brunnen selbst. Im Falle der Punkt-Bedingung (anstelle der Dirichlet-Bedingung für den gesamten Rand) ergibt sich eine maximale Absenkung von 1.41 m, und eine maximale Erhöhung von 1.20 m. D.h. der Unterschied zwischen den Modellen bzgl. dieser Ausgabegröße beträgt lediglich 3 cm.



**Bild 10:** Piezometerverteilung und Geschwindigkeitsfeld in einem 2D-Vertikalschnitt für den gespannten Grundwasserleiter (Ausschnitt); Modellberechnung für Referenzfall mit Dirichlet Randbedingung am äußeren Modellrand

### 3.4.2 2D vertikal, freie Oberfläche

Das Modell für den freien Grundwasserleiter wurde mittels der ALE Methode, wie oben beschrieben, als freies Randwertproblem gelöst.



**Bild 11:** Piezometerverteilung, Absenkung und Geschwindigkeitsfeld in einem 2D-Vertikalschnitt für einen ungespannten Grundwasserleiter (Ausschnitt); Modellberechnung für den Referenzfall

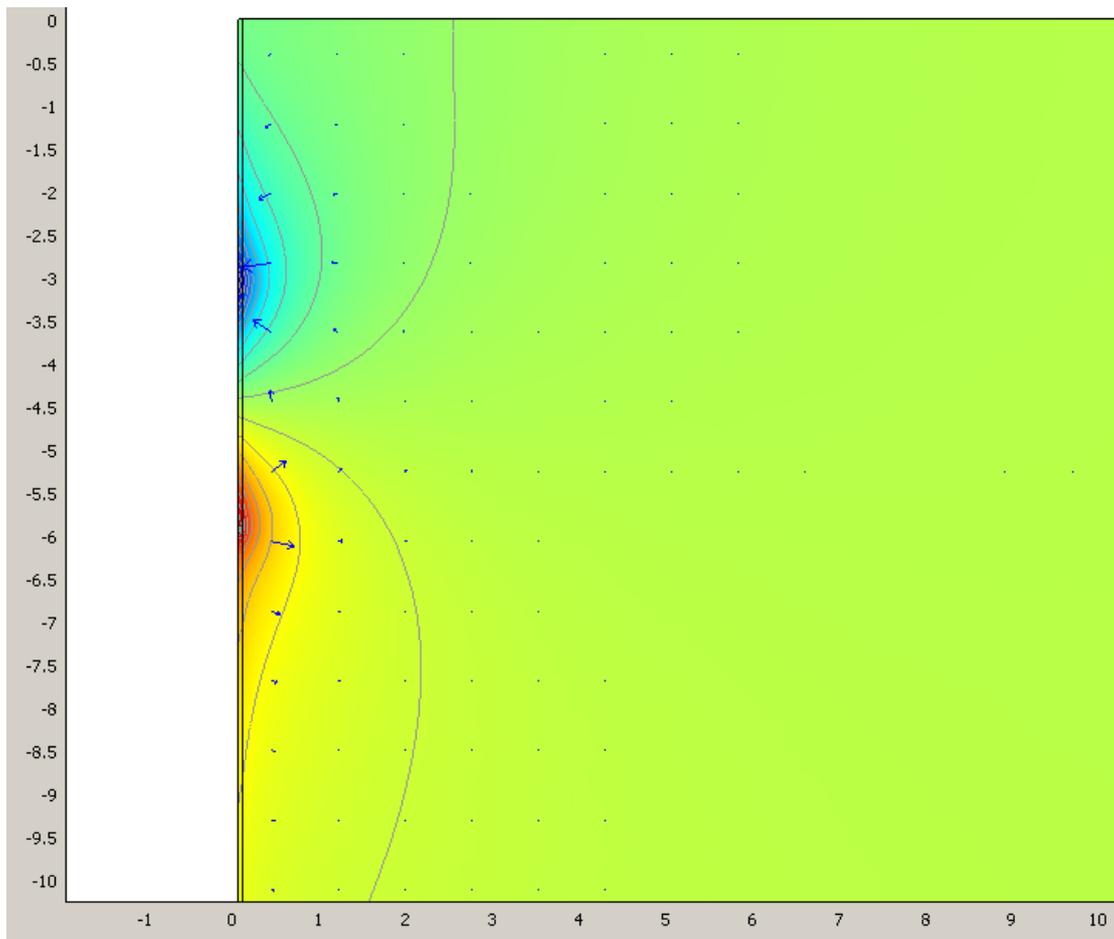
Ein Ergebnisausschnitt, mit Piezometerverteilung als Farbmuster ist im Bild 11 dargestellt. Konturlinien repräsentieren Piezometerhöhenverteilung. Das Geschwindigkeitsfeld ist durch Pfeile angedeutet. Grundlage der Zeichnung ist die deformierte Geometrie. Die Verschiebung der freien Oberfläche am oberen Rand ist deutlich durch die Verschiebung des farbigen Bereichs nach unten zu erkennen.

Die maximale Absenkung beträgt nach diesem Modell 1.43 m, die maximale Erhöhung 1.17 m. Die Abweichung zum gespannten Fall beträgt lediglich 2.5 cm. Für den Fall der Punktrandbedingung ergab sich eine maximale Absenkung von 1.37 m sowie eine maximale Erhöhung von 1.24 m. Der Einfluss der äußeren Randbedingung ist hier als größer, wenn auch immer noch im Bereich einiger cm.

### 3.4.3 2D vertikal, Skin-Effekt

Es wurden Varianten gerechnet, in denen das Vorhandensein einer gestörten Zone im unmittelbaren Bohrlochumfeld. Die Störungen sind eine direkte Folge des Bohrvorgangs.

Für das betrachtete Modell wurde eine gestörte Zone von 5 cm Dicke um das Bohrloch herum angenommen. Um die Messwerte besser nachzubilden, musste für den Skin-bereich eine erhöhte Durchlässigkeit von  $3 \cdot 10^{-3}$  m/s angenommen werden. Im Modellansatz könnten auch reduzierte Durchlässigkeiten im unmittelbaren Bohrlochumfeld berücksichtigt werden.



**Bild 12:** Piezometerverteilung, Absenkung und Geschwindigkeitsfeld in einem 2D-Vertikalschnitt für einen gespannten Grundwasserleiter (Ausschnitt); Modellberechnung für Referenzfall mit Skin-Effekt

Das Ergebnis für den Fall des Skin-Effekts ist im Bild 12 dargestellt. Das generelle Strömungsmuster verändert sich, wie zu erwarten, nicht. Die maximale Absenkung beträgt hier 1.16 m, die maximale Erhöhung 0.93 m. Der Einfluss des Skin-effekts auf die Modellergebnisse ist größer, als alle anderen hier betrachteten Variationen. Er beträgt hier in etwa 25 cm, sowohl, was die Absenkung im Förderbereich, als auch, was die Erhöhung im Infiltrationsbereich angeht.

Als weitere Variante wurde hier ebenfalls der Einfluss der Randbedingung am äußeren Rand untersucht. Es ergab sich eine maximale Absenkung von 0.96 cm und eine maximale Erhöhung von 1.16 cm. Der Einfluss der Randbedingung in den Modellansätzen für den gespannten Aquifer beläuft sich bei dem untersuchten Referenzfall auf lediglich 3 cm.

Eine Zusammenstellung der Ergebnisse der hier dokumentierten Modellvarianten, was Absenkung bzw. Erhöhung betrifft, wird in Tabelle 4 gezeigt.

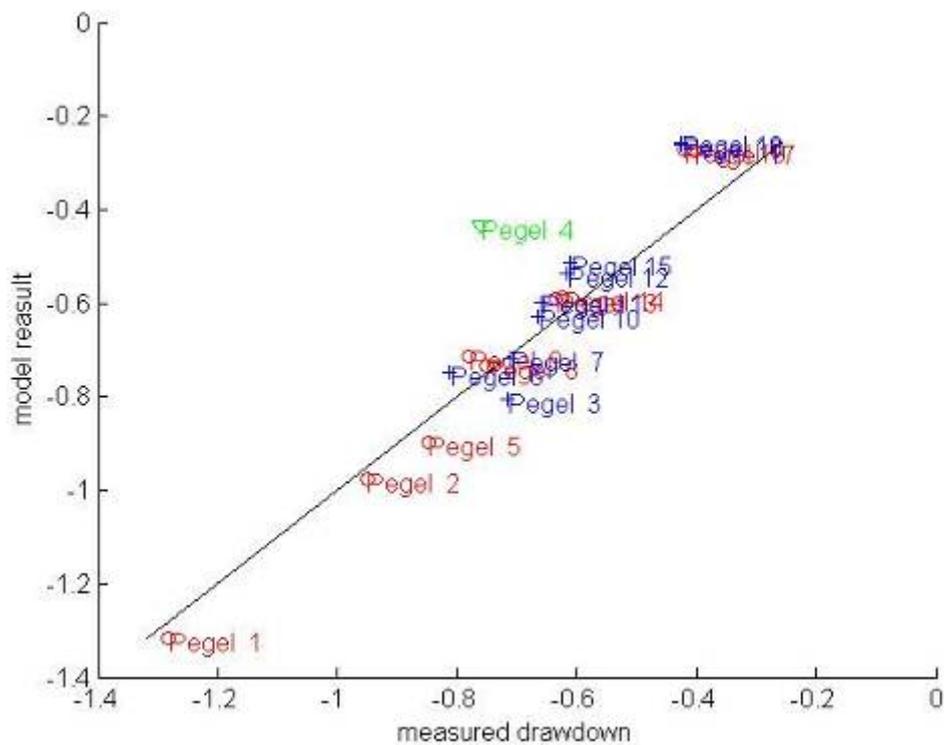
	Punktrandbedingung			Dirichlet-Bedingung am äußeren Rand		
	gespannt	mit Skin	ungespannt	gespannt	mit Skin	ungespannt
<b>Max. Absenkung</b>	1.41	1.13	1.37	1.44	1.16	1.43
<b>Max. Erhöhung</b>	1.20	0.96	1.24	1.17	0.93	1.17

**Tabelle 4:** Eingabewerte für den Referenzfall

### 3.4.4 Abgleich mit Feldversuchen

Das hier erstellte Modell wird in der weiteren Projektphase zur Anpassung an Feldversuche herangezogen; zunächst für die Versuche in Plötzin (siehe II.1). Dabei werden für unterschiedliche Modellparameter die Modellergebnisse an den 19 Beobachtungsbrunnen mit den Messergebnissen verglichen. Im Bild 13 ist ein Beispiel für eine Parameter-Einstellung gezeigt. Flache und mittel-tiefe Messpunkte sowie ein tiefer Messpunkt sind durch unterschiedliche Farben gekennzeichnet (rot – blau – grün). Die maximale Abweichung liegt hier mit etwas mehr als 35 cm am tiefsten Messpunkt (Pegel 4). Die mittlere Abweichung liegt bei etwa 10 cm.

Weitere Anpassungen aller Pumpversuche erfolgen in Projektphase 2.



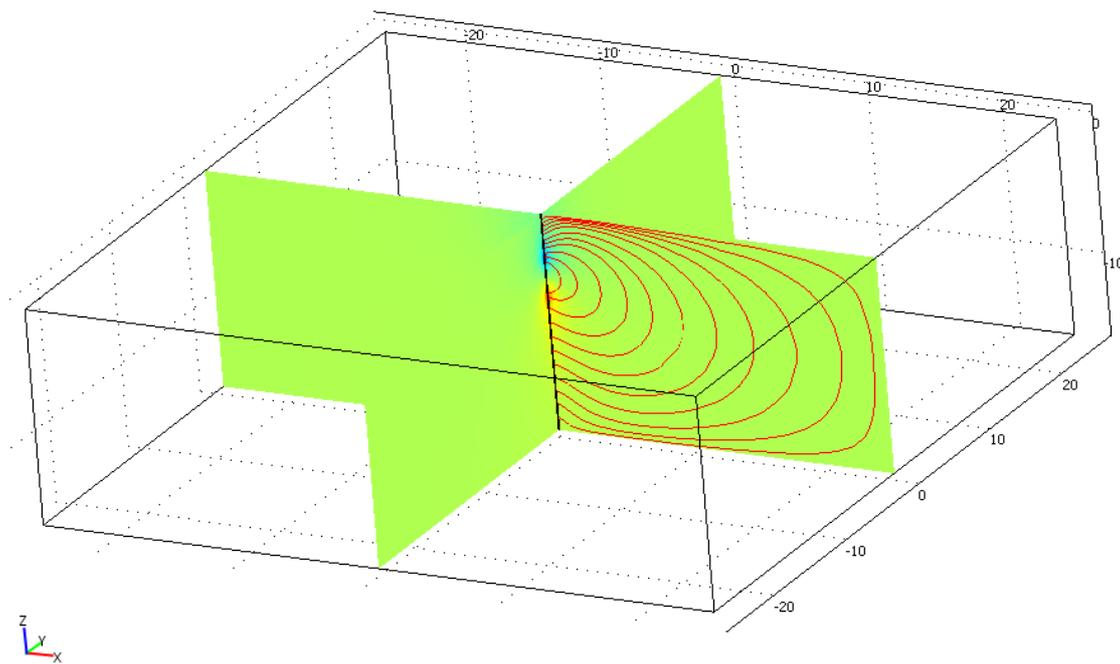
**Bild 13:** Modellanpassung für Pumpveruch 1

### 3.5 Ergebnisse 3D-Modelle

Neben den 2D Modellen wurden erste Ansätze von 3D Modellen erstellt. Von der realen Situation entsprechen diese den 2D Modellen, mit dem Unterschied, dass sie mit einem kartesischen Koordinatensystem arbeiten. Der Vorteil der 3D Modelle ist, daß mit ihnen auch Inhomogenitäten berücksichtigt werden können, und vor allem der Einfluss einer Grundströmung. Der Nachteil der 3D Modelle ist, das sich der Rechenaufwand beim Übergang von 2D auf 3D erheblich erhöht.

Wie in den 2D-Modellen wurde auch für den 3D-Fall wurde die Potentialgleichung mit festem oberem Rand (gepannter Fall), wie für einen freien oberen Rand (ungespannter Fall) gelöst. In Bild 9 ist das Finite Element Gitter des 3D-Modells gezeigt.

Bild 14 zeigt ein Ergebnis der 3D Modellierung. Die Piezometerhöhenverteilung ist durch Farbmuster in zwei sich kreuzenden Schnitten gezeigt. Deutlich sind die Bereiche mit erhöhter Piezometerhöhe im Umfeld des Infiltrationspunktes, sowie mit reduzierter Piezometerhöhe im Umfeld des Förderpunktes zu erkennen. Zur Berechnung der Stromlinien (in rot) wurden Startpunkte im an der Bohrlochkante im Infiltrationsabschnitt vorgegeben.



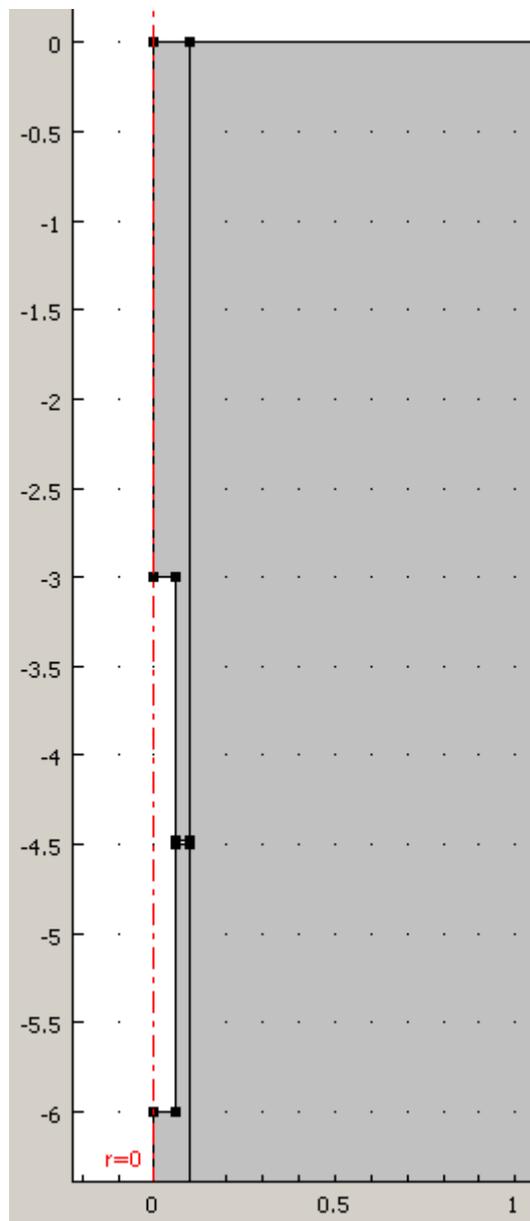
**Bild 14:** Ergebnis 3D Modell

Die Modelle bilden die Grundlage für Berechnungen unter Bedingungen, die eine 3D Strömung induzieren. Insbesondere ist der Fall einer relevanten Grundströmung interessant, der in der weiteren Projektarbeit mit diesem Programm behandelt werden wird.

### 3.6 Modellerweiterung: Freie Strömung

Es wurde eine Modellerweiterung vorgenommen, bei der die Strömungsvorgänge im freien Bohrloch mitbetrachtet werden können. Insbesondere lassen sich mit diesen Modellen Strömungen im Übergang vom laminaren zum turbulenten Strömungsregime berücksichtigen.

Die Modellerweiterung erfolgte für die oben beschriebenen 2D Modelle. Das erweiterte Modellgebiet ist im Bild 15 dargestellt. Das Bohrloch ist dabei in verschiedene Abschnitte eingeteilt. In einem mittleren Teil ist die Pumpe eingehängt. Darüber und darunter wird im gesamten Bohrloch eine freie radialsymmetrische Strömung zugelassen. Im Pumpenbereich selbst ist die freie Strömung lediglich in einem Ringraum zugelassen. In der Mitte des Pumpenbereichs liegt eine Trennung vor, die den gesamten freien Raum in einen oberen und einen unteren Bereich trennt.

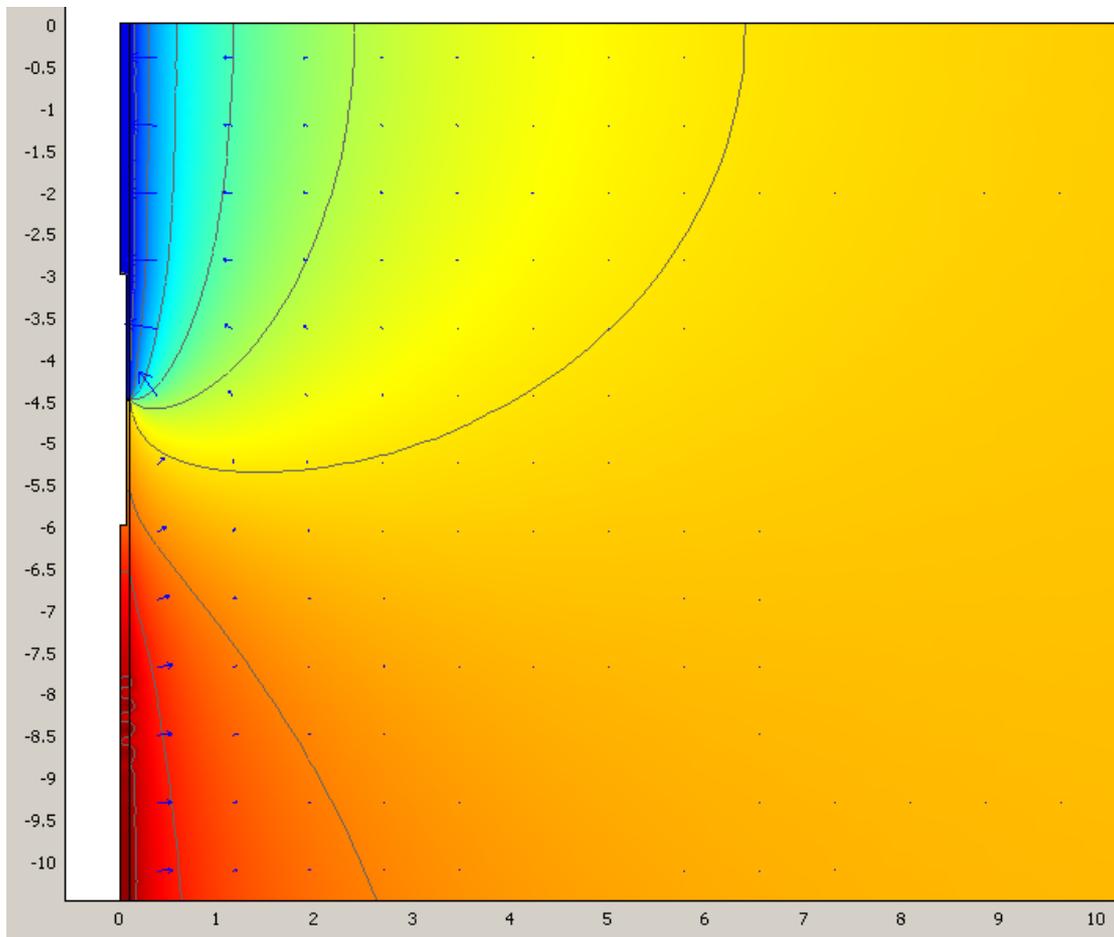


**Bild 15:** Modellgebiet für erweitertes 2D Modell, Ausschnitt

An der Bohrlochwand ist der Übergang zwischen Bohrloch und porösem Medium möglich. Dabei wird das Massenerhaltungsgesetz eingehalten. Aus Symmetriegründen ist in den Bereichen ober- und unterhalb der Pumpe eine 'no-flow' Bedingung anzusetzen. An der Pumpe selbst sind drei unterschiedliche Randbedingungen gesetzt:

- Druckvorgabe am Einlass (horizontale Kante oben)
- 'no-flow' an der vertikalen Kante
- Geschwindigkeitsvorgabe am Auslass (horizontale Kante unten)

Ein Ergebnis des Modells ist im Bild 16 gezeigt. Gezeigt sind Isobaren: rot für Überdruck, bzw. blau für Unterdruck. Da die Randbedingungen in dieser Modellerweiterung anders gesetzt sind, lassen sich die Ergebnisse dieses Modells nicht direkt mit den Ergebnissen der vorherigen 2D-Modelle vergleichen.



**Bild 16:** Ergebnis 2D Modell-Erweiterung für freie Strömung, Ausschnitt mit Isobaren und Geschwindigkeitsfeld in Vektordarstellung

Das erweiterte Modell soll in der Phase 22 weiter getestet werden. Insbesondere soll ein Vergleich mit den Ergebnissen der anderen 2D Modelle erfolgen.

## 4. Zusammenfassung und Diskussion

Das Modell konnte so angepasst werden, dass Modellergebnisse und Messwerte lediglich geringe Abweichungen zeigen. Damit wurde nachgewiesen, dass mit dem entwickelten Modellansatz die bei der DSI-Technik relevanten Prozesse nachgebildet werden können. Im Vergleich zu manchen klassischen Pumpversuchen erscheinen die Abweichungen möglicherweise noch recht groß. Allerdings ist zu berücksichtigen,

- dass umfangreiche Messergebnisse erst von einem Testfeld vorliegen, das möglicherweise nicht repräsentativ ist,
- dass es sich um einen ersten Ansatz zum Verständnis einer neuen Technik handelt,
- dass Modellerweiterungen unterschiedlicher Art bei dem gewählten Ansatz und der gewählten Software in einfacher Art möglich sind,
- dass das Forschungsprojekt gerade erst die Anfangsphase durchlaufen hat.

Mit dem erstellten Modellansatz können unterschiedliche Brunnengeometrien, unterschiedliche Pumpenpositionen (d.h. in Bezug auf Förder- und Infiltrationshorizonte), Anisotropien, horizontale Schichtungen, sowie Skin-Effekte berücksichtigt werden.

Für einen homogenen Aquifer, in dem keine Grundströmung vorliegt, kann zur Modellierung eines Bohrlochs mit DSI-Technik ein vereinfachter 2D Ansatz verwendet werden. Zur Berücksichtigung des allgemeinen Falls muss ein 3D Modell aufgestellt werden, mit dem Grundwasserströmung und Inhomogenitäten allgemeiner Art berücksichtigt werden können.

Mögliche Modellerweiterungen betreffen eine Verallgemeinerung des Darcy-Gesetzes, sowie eine Modellierung des Brunnens selbst. Durch diese erweiterten Ansätze könnten die Verhältnisse im unmittelbaren Brunnenumfeld evtl. besser erfasst werden. Auch das ist Gegenstand der Untersuchungen in Phase 2.

## 5. Ausblick, weitere Aufgaben, Planung

Ausgehend von den vorhandenen Modellansätzen sollen Sensitivitätsstudien und weitere Modellalternativen untersucht werden (siehe Kapitel 4).

Zusätzlich zu den hier bereits dargestellten Varianten sollen systematische Sensitivitätsstudien durchgeführt werden. Diese betreffen die Reichweite, den Brunnenradius, die Positionen von Infiltrations- und Pumpenhorizont, sowie auch die Länge der Filterstrecke im Verhältnis zur Aquifermächtigkeit. Auch der Einfluß der Verteilungsparameters  $\theta$  soll untersucht werden, sowie des Skin-Effekts, wie auch von Anisotropien im Bereich des Aquifers, Inhomogenitäten in horizontaler Richtung und des Skins. Ebenso ist der Vergleich mit klassischen Pumpversuchen geplant.

Die Alternativen betreffen insbesondere die Randbedingungen am äußeren Rand. Der hier gewählte Ansatz einer 'no-flow' Bedingung setzt die Kenntnis der Brunnenreichweite voraus. Letztere ist aber in der Regel nicht bekannt, insbesondere, wenn es sich um das Langzeitverhalten unter permanentem Betrieb

handelt. Alternativ dazu können Dirichlet-Bedingungen gesetzt werden, die allerdings auch die Einführung mindestens eines zusätzlichen Parameters erfordern.

Es sollen weitere Pumpversuche, mit Einzelbrunnen, wie auch mit mehreren Brunnen durchgeführt werden. Geplant sind weitere Feldversuche am Standort Plötzin, sowie Versuche am Standort Korschenbroich. Bei Eignung können weitere Standorte hinzugezogen werden.

Die vorhandenen Modelle sollen an die Standorte und Feldversuche angepasst und ausgewertet werden. Wenn im Falle von Einzelbrunnen keine Inhomogenitäten und keine Grundströmung vorliegen, wird auch mit dem 2D-Ansatz getestet; ansonsten werden 3D-Modelle verwendet. Wenn maximale Absenkungen vorliegen, wird zunächst ein stationäres Modell verwendet. Eine inverse Modellierung liefert Parameterwerte für Durchlässigkeiten, Anisotropie-Verhältnisse und Verteilungsparameter. Eine nachfolgende instationäre Modellierung liefert Speicherkoeffizienten.

In Verbindung mit den Feldversuchen können anschließend mittels der geeichten Modelle Aussagen über den Einsatzbereich der innovativen DSI-Technik gemacht werden.

## **6. Literatur und Software**

### **6.1 Allgemein**

Bear J., *Hydraulics of Groundwater*, Mc Graw Hill, New York, 569pp, 1976

Ebneth S., Hölscher H., Wils W., *Düsensauginfiltration (DSI) – Einsatz einer neuen Wasserhaltungstechnik in der Baupraxis*, 5. Hans Lorenz Symposium, Veröffentlichungen des Grundbauinstitutes der TU Berlin, Heft Nr. 47, 2009

COMSOL Multiphysics, Version 4, siehe: <http://www.comsol.de>

Holzbecher E., *Modellierung dynamischer Prozesse in der Hydrologie: Grundwasser und ungesättigte Zone*, Lehrbuch inkl. Software auf CD-ROM, Springer Verlag, Heidelberg, 1996

Dany, S., *Durchführung und Auswertung von Pumpversuchen an einem Düsensaug-Infiltrationsbrunnen Typ Brandenburg*, Bachelorarbeit Fachhochschule Trier, 2010

### **6.2 Projektpublikationen**

Holzbecher E., Jin Y., Ebneth S., *An environmentally sound new method for groundwater lowering*, International Workshop on Civil Engineering and Urban Planning (WCEUP 2011), Hangzhou (China), 2011

Jin Y., Holzbecher E., Oberdorfer P., *Simulation of a novel groundwater lowering technique using arbitrary Lagrangian-Eulerian method*, COMSOL2011, Stuttgart, 2011

Holzbecher E., Jin Y., Ebneth S., *Borehole pump & inject: an environmentally sound new method for groundwater lowering*, eingereicht bei: International Journal of Environmental Protection.

# Anhang

## 7.1 Aufbau und Ergebnisse der Feldversuche - Plötzin

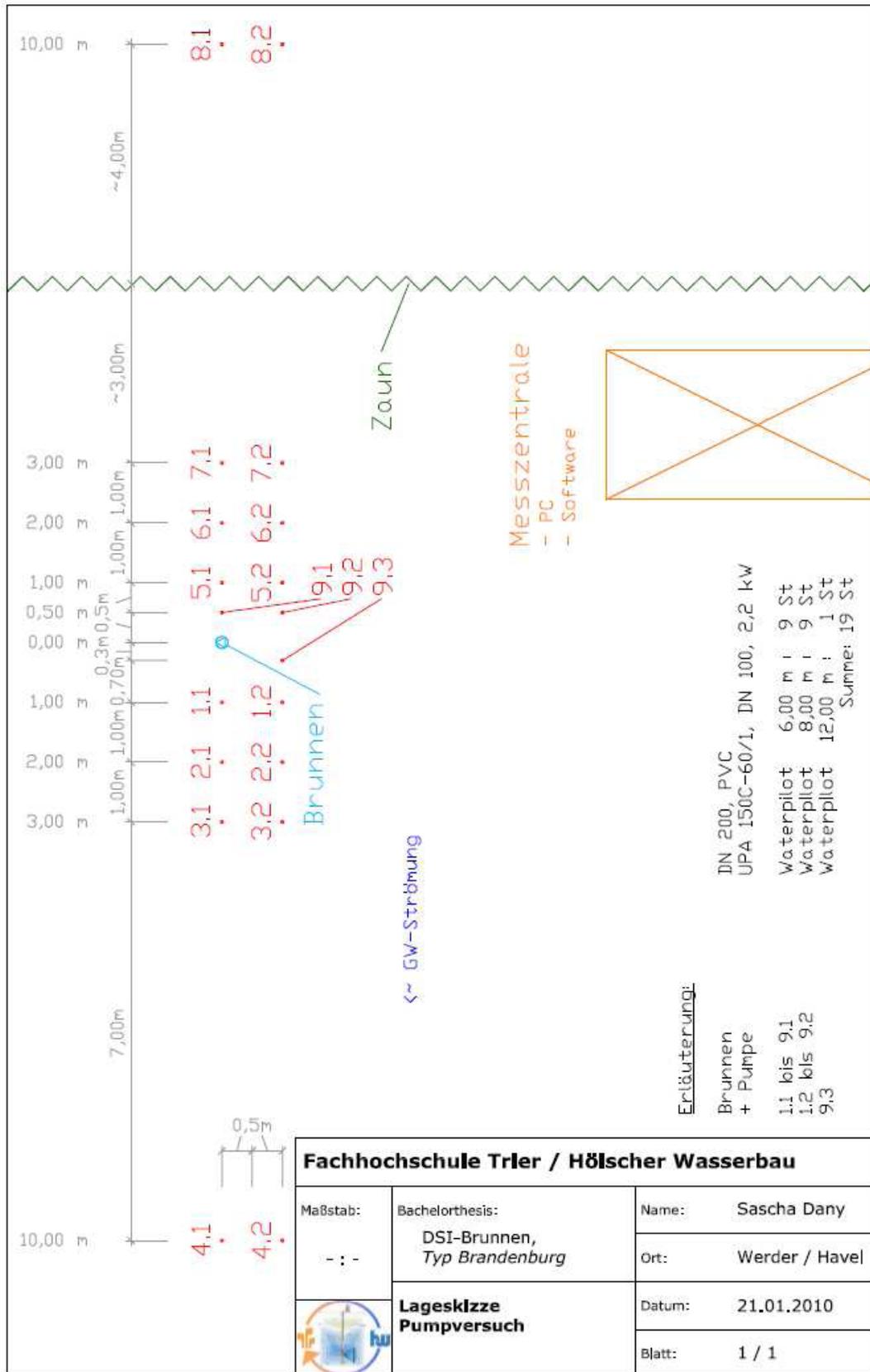
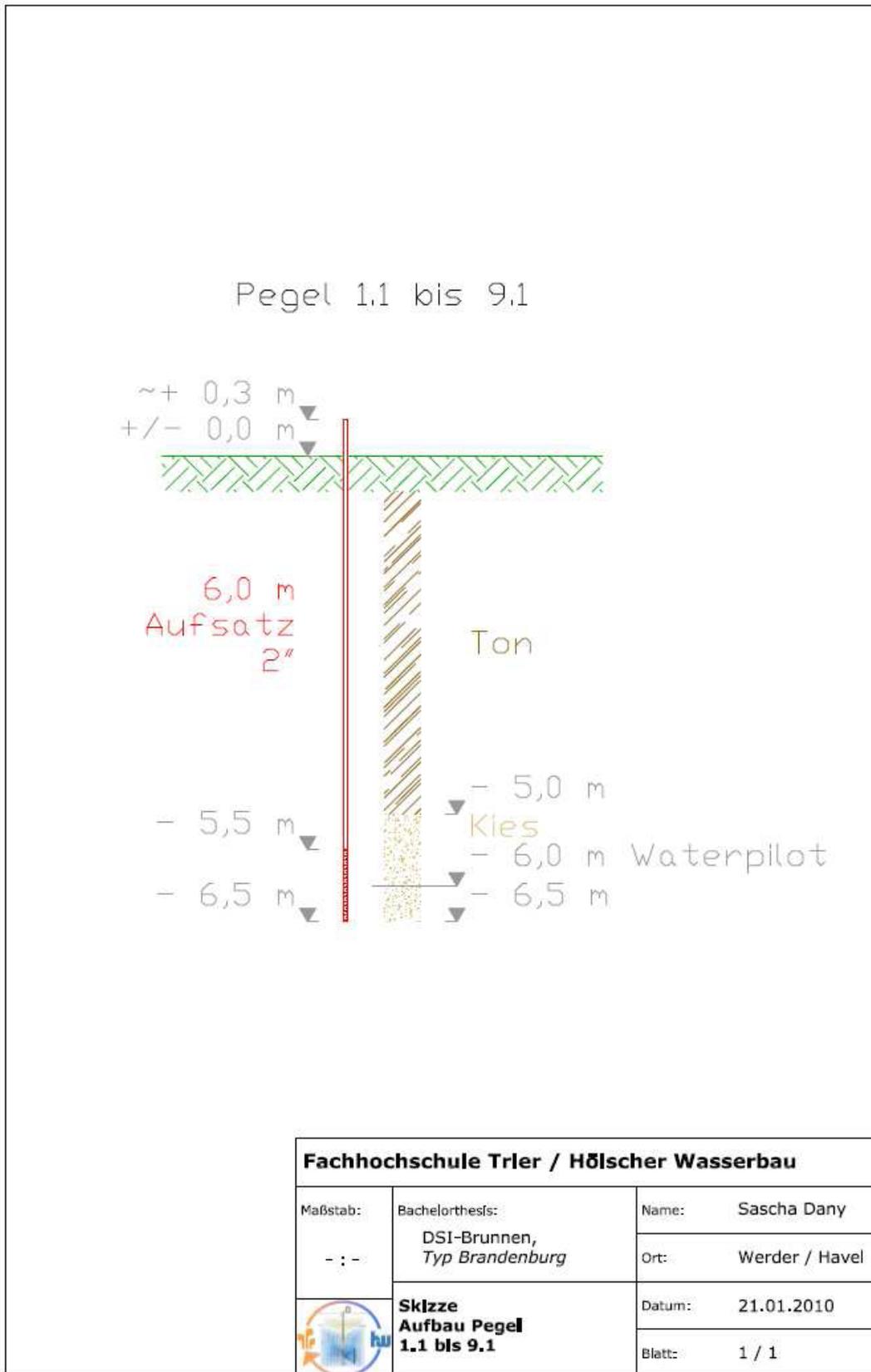


Bild 17: Lageskizze der Pumpversuchsanordnung



**Bild 18:** Flache Beobachtungsrohre, Skizze

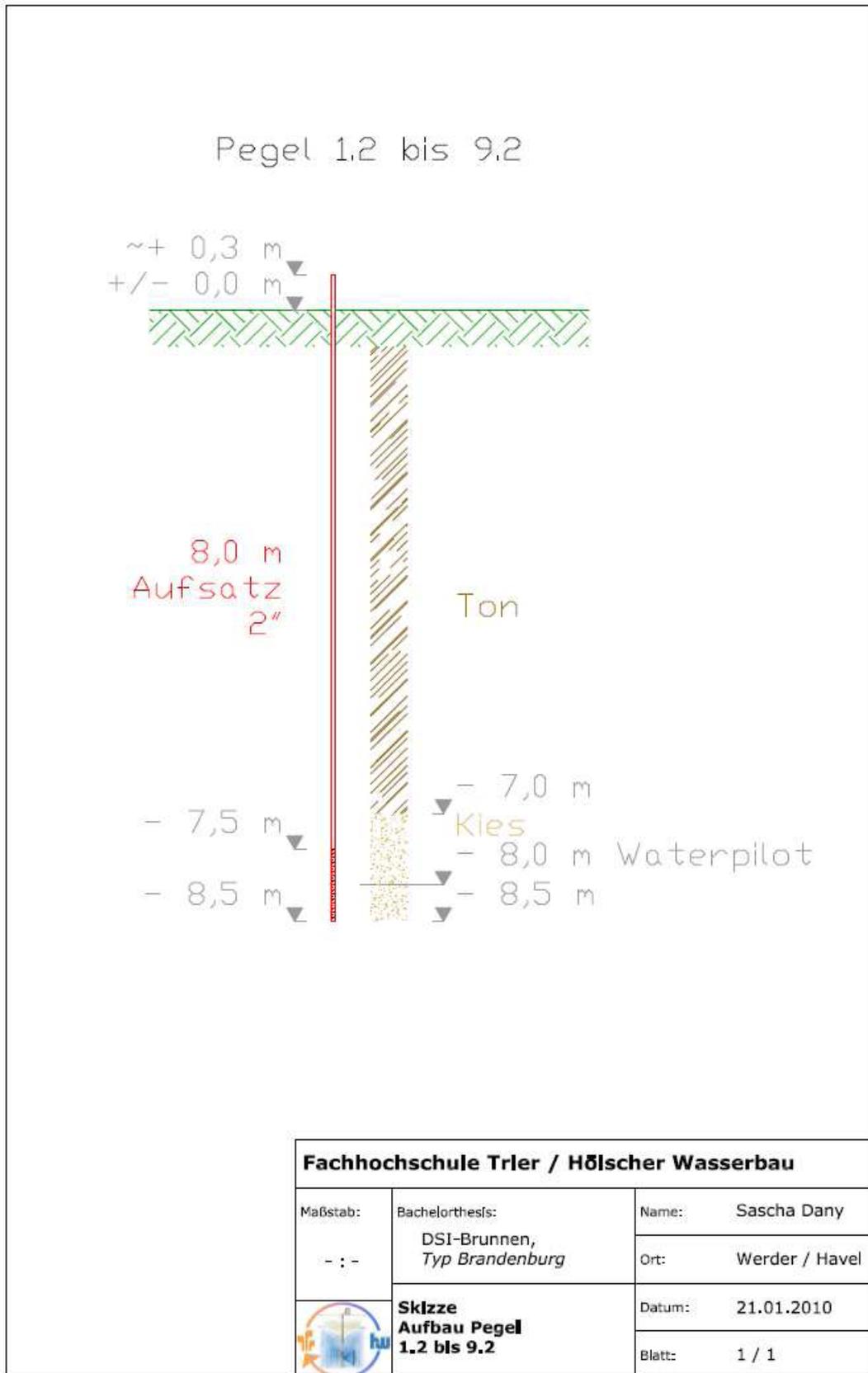
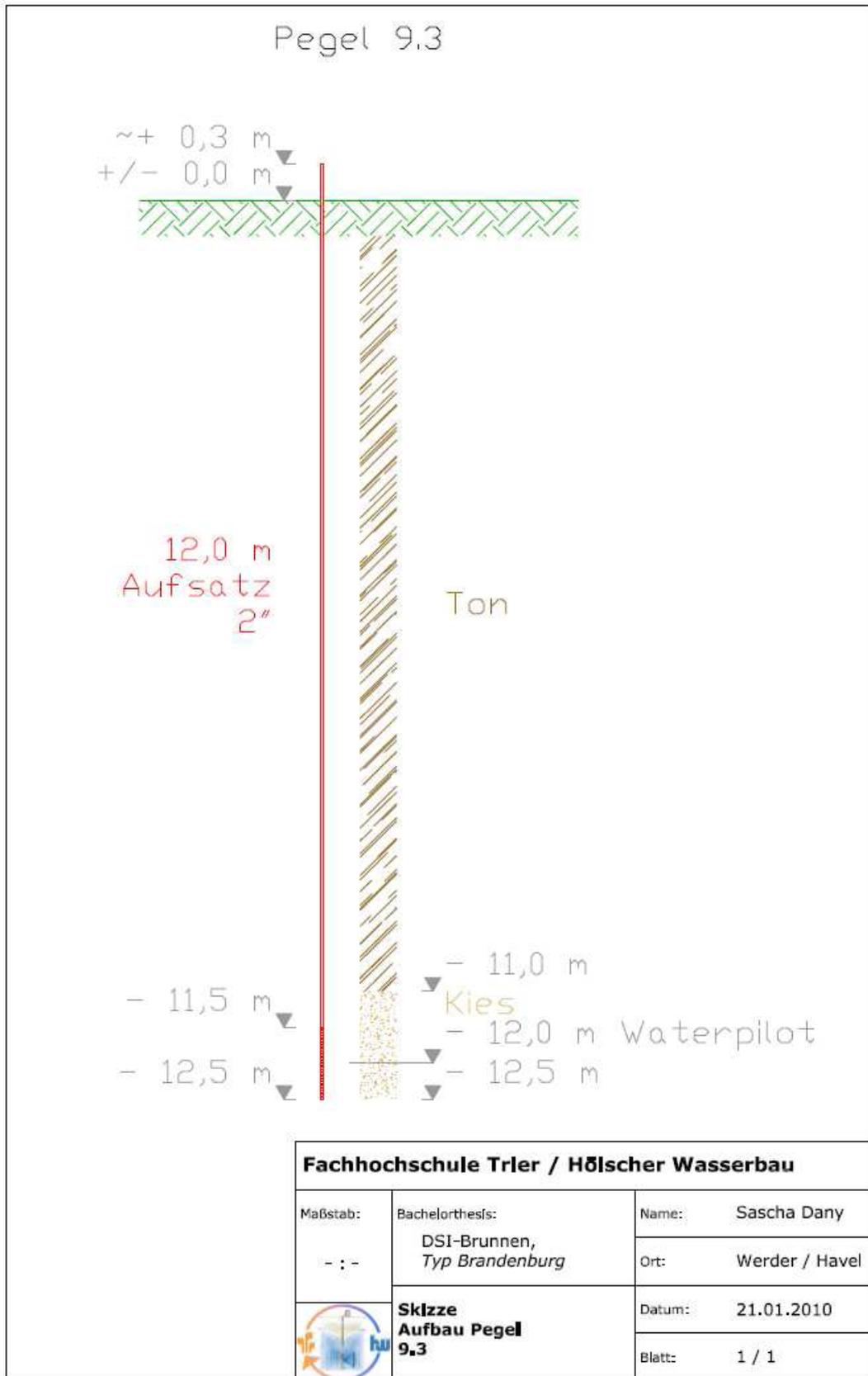


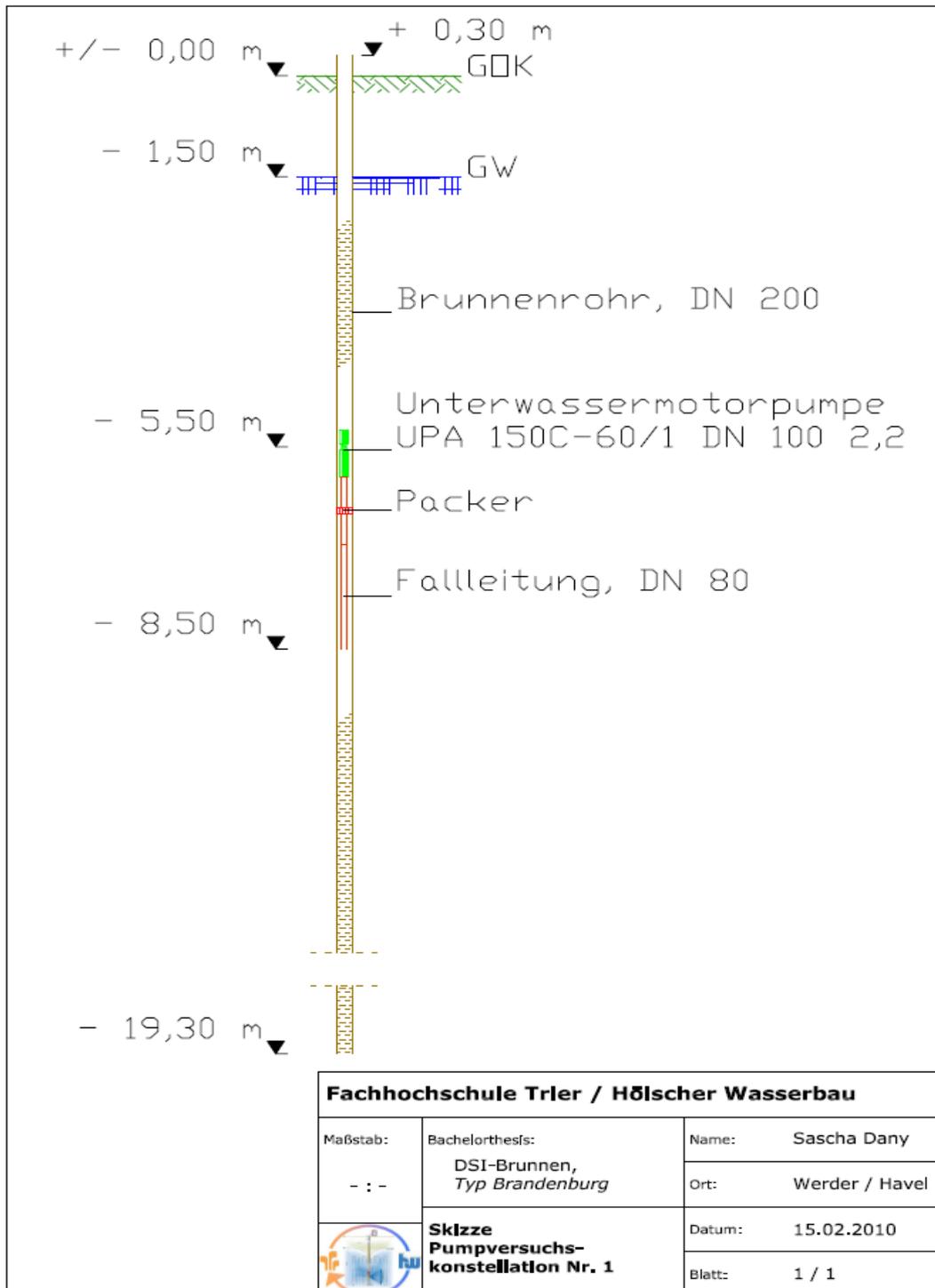
Bild 19: Mittlere Beobachtungsrohre, Skizze



**Bild 20:** Tiefes Beobachtungsrohr, Skizze

**Pumpversuchskonstellation Nr. 1**

- Unterwasserpumpe 4,00 m u GW
- DSI-Düse 7,00 m u GW
- Absenkziel 1,00 m über Wassereinzug der Pumpe
- Laufzeit 2 Stunden



**Bild 21:** Pumpversuchskonstellation 1

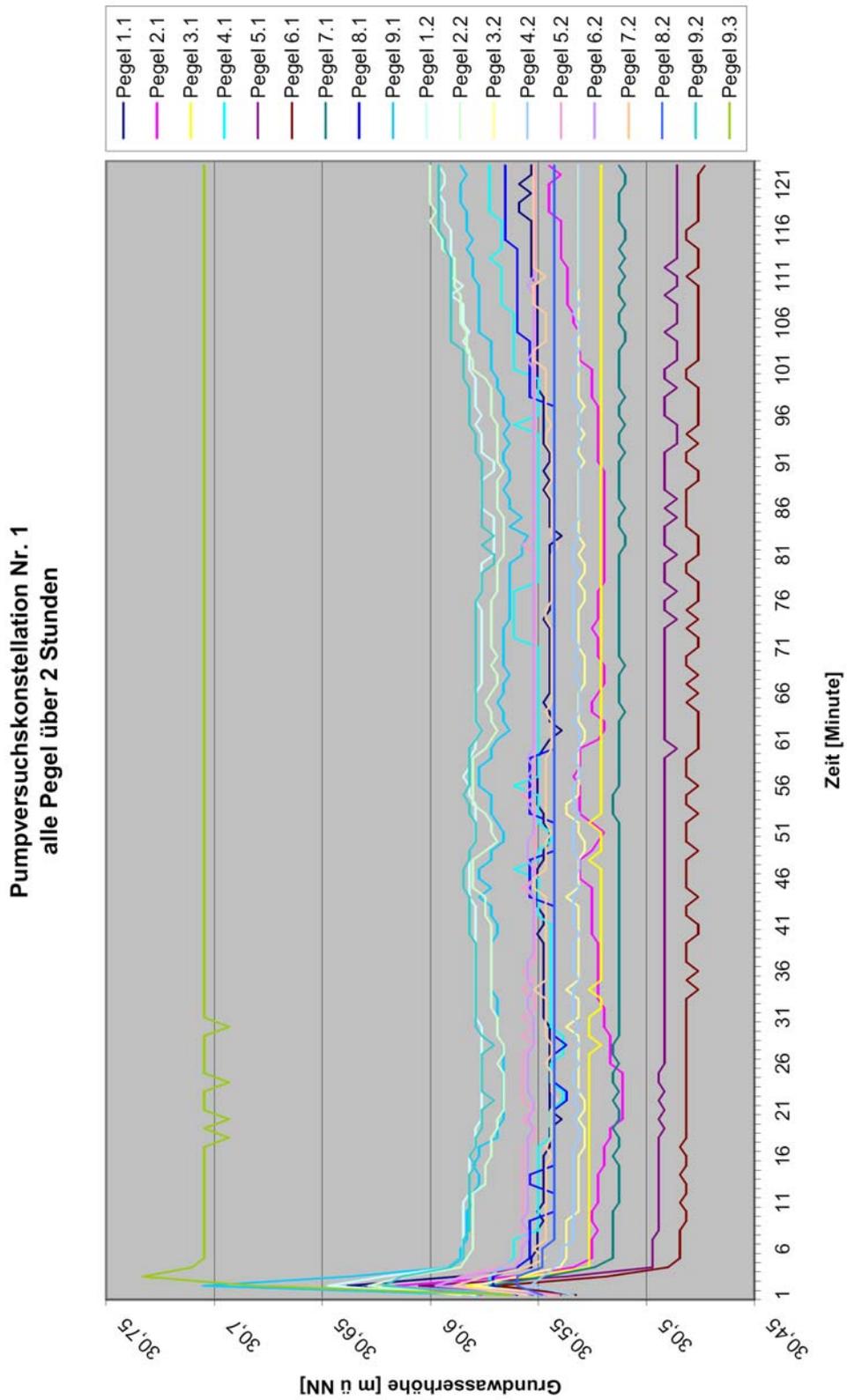
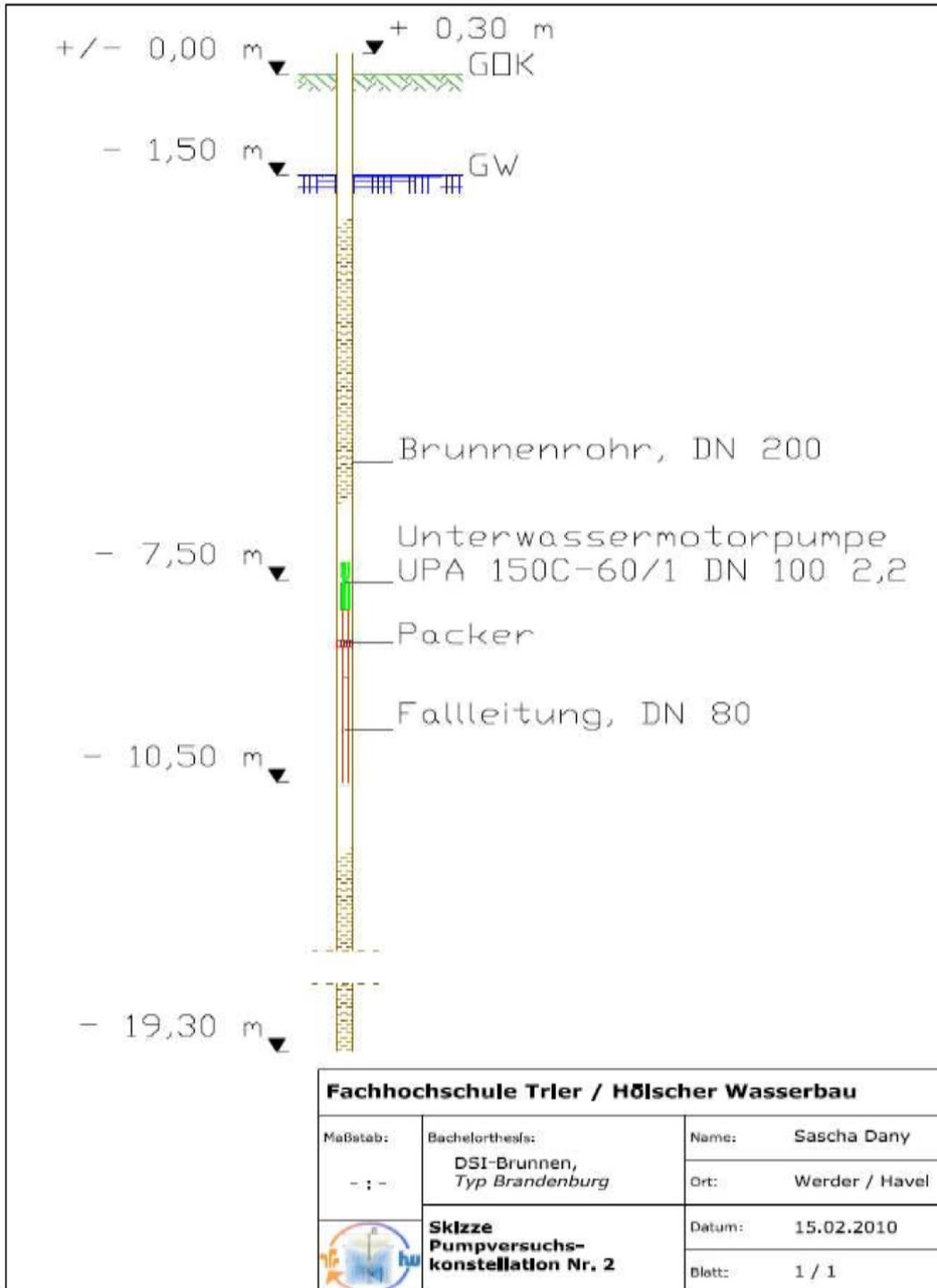


Diagramm Pumpversuchskonstellation Nr. 1 über 2 Stunden, alle GW-Messstellen

**Bild 22:** Ergebnisse Versuch 1

**Pumpversuchskonstellation Nr. 2**

- Unterwasserpumpe 6,00 m u GW
- DSI-Düse 9,00 m u GW
- Absenkziel 1,00 m über Wassereinzug der Pumpe
- Laufzeit 2 Stunden



**Bild 23:** Pumpversuchskonstellation 2

**Pumpversuchskonstellation Nr. 2  
alle Pegel über 2 Stunden**

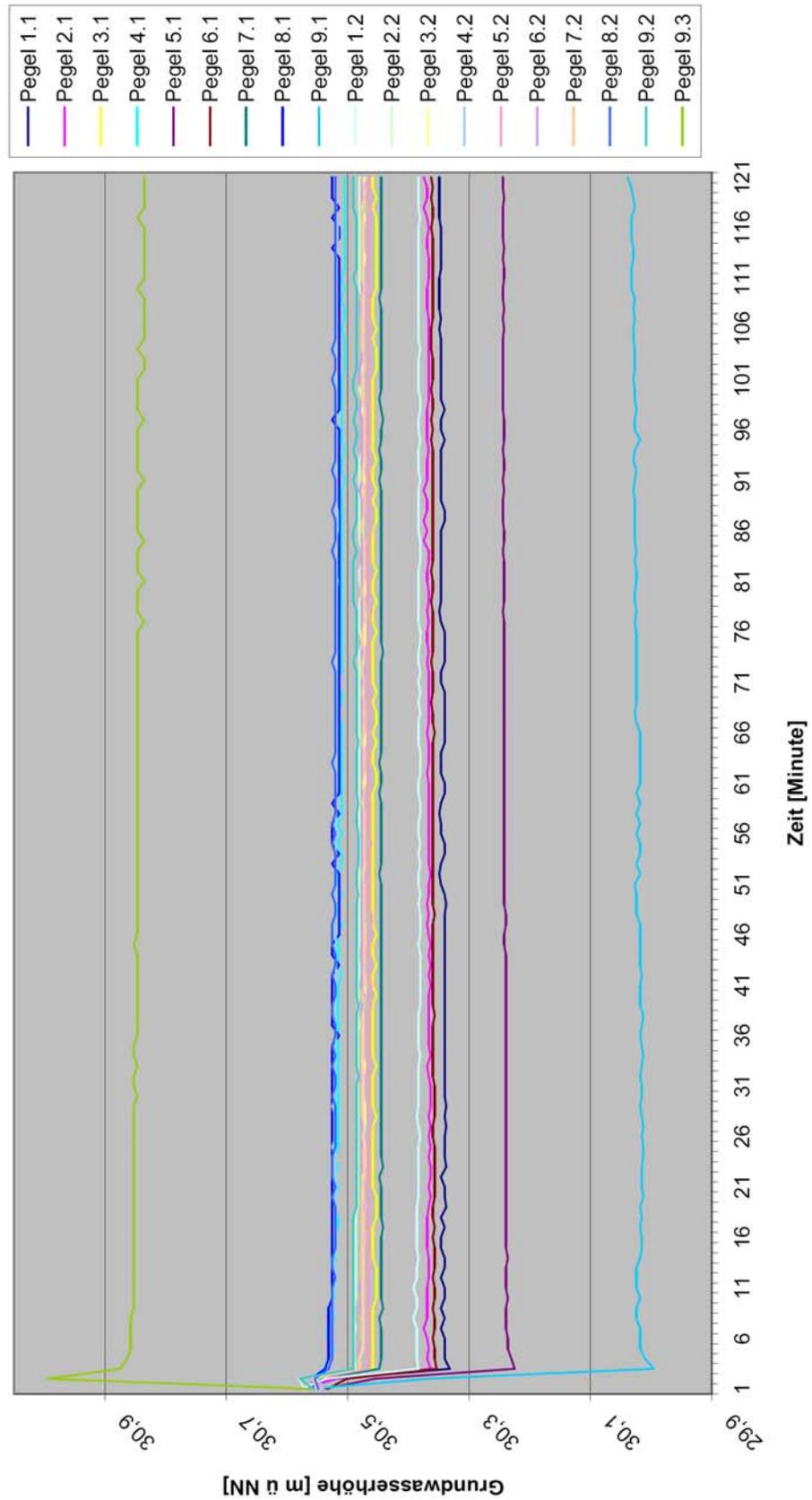


Diagramm Pumpversuchskonstellation Nr. 2 über 2 Stunden, alle Pegel

**Bild 24:** Ergebnisse Versuch 2

### Pumpversuchskonstellation Nr. 3

- Unterwasserpumpe 4,00 m u GW
- DSI-Düse 9,00 m u GW
- Absenkziel 1,00 m über Wassereinzug der Pumpe
- Laufzeit 2 Stunden

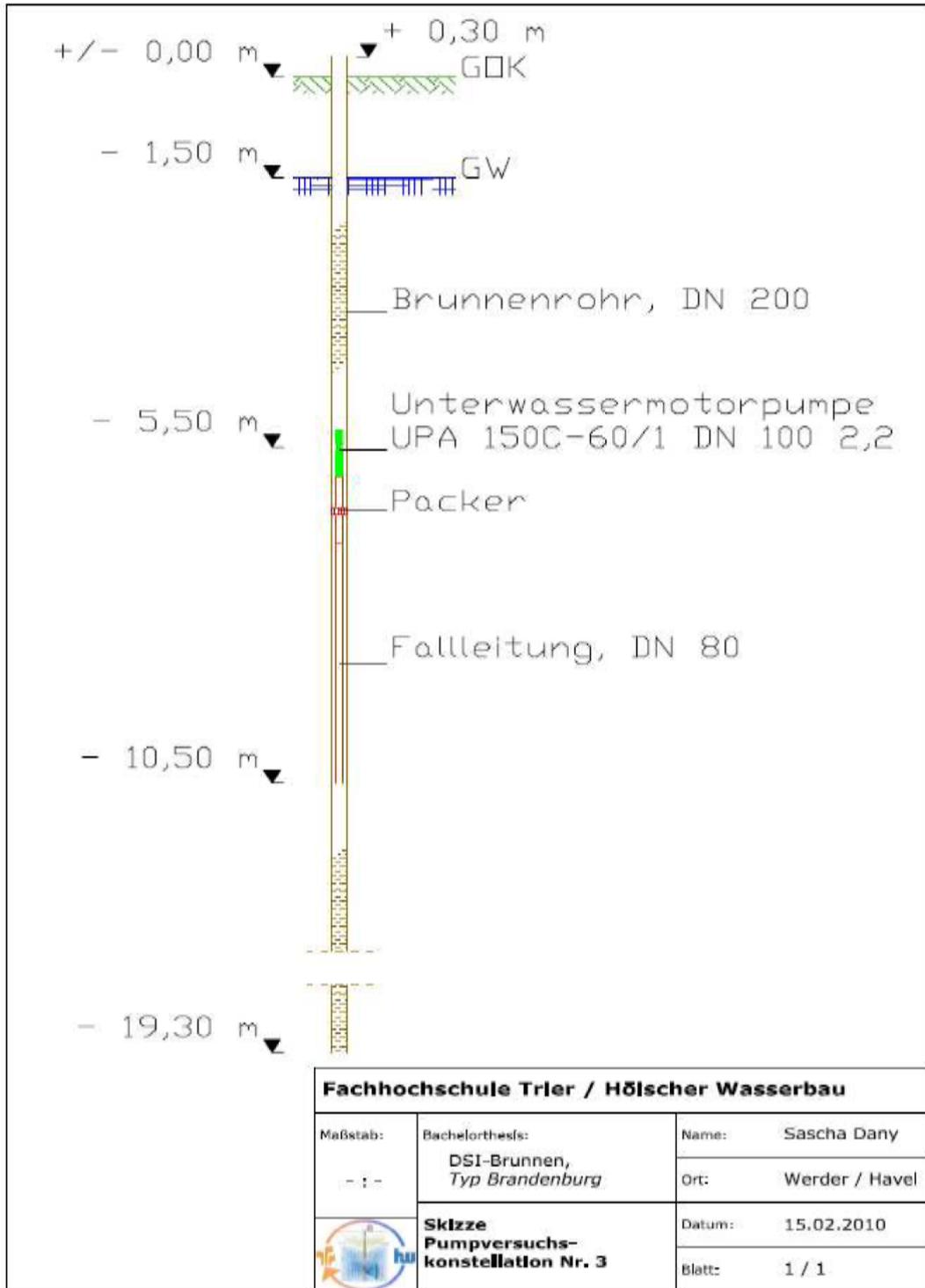


Bild 25: Pumpversuchskonstellation 3

Pumpversuchskonstellation Nr. 3  
alle Pegel über 2 Stunden

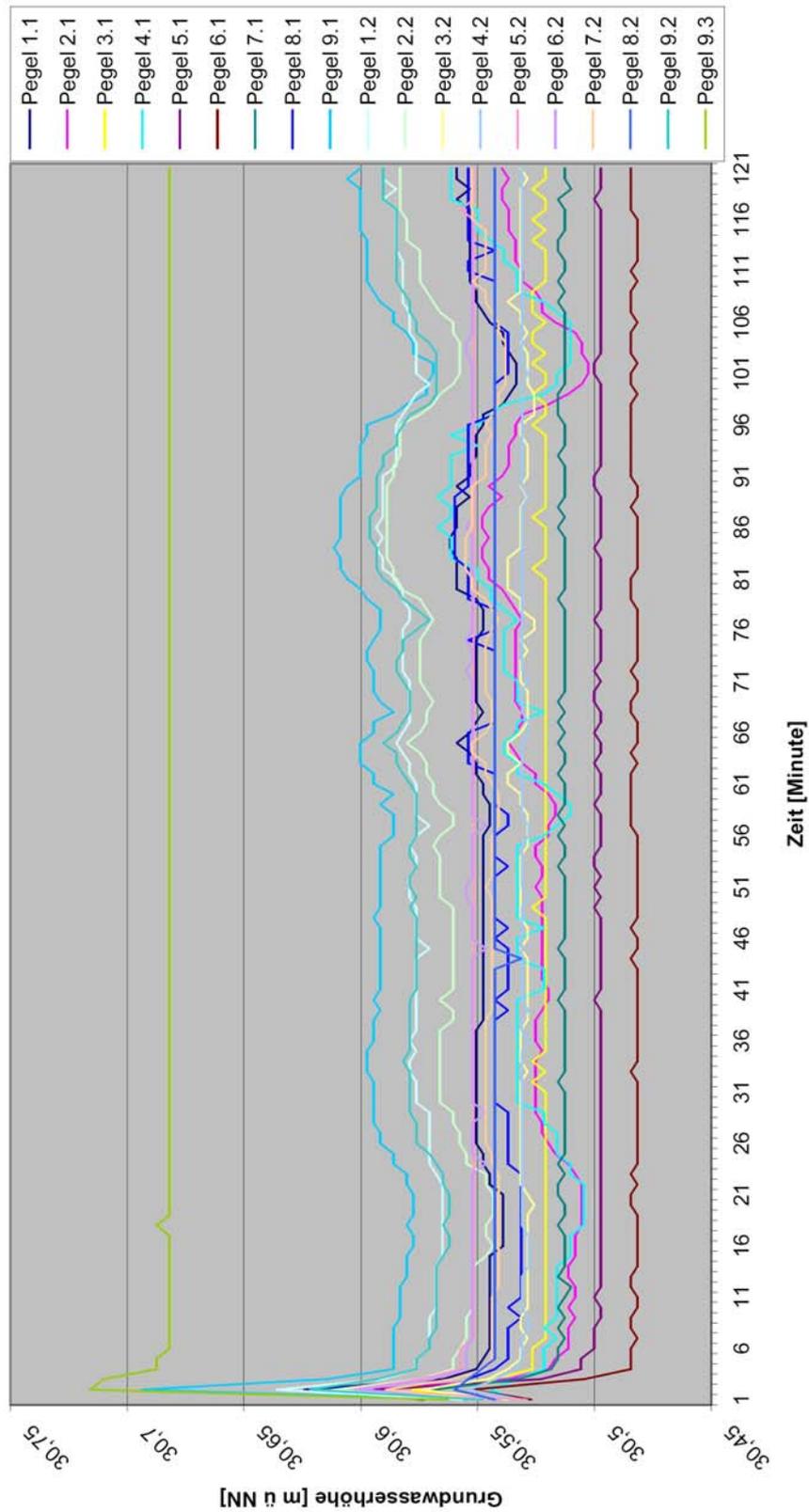
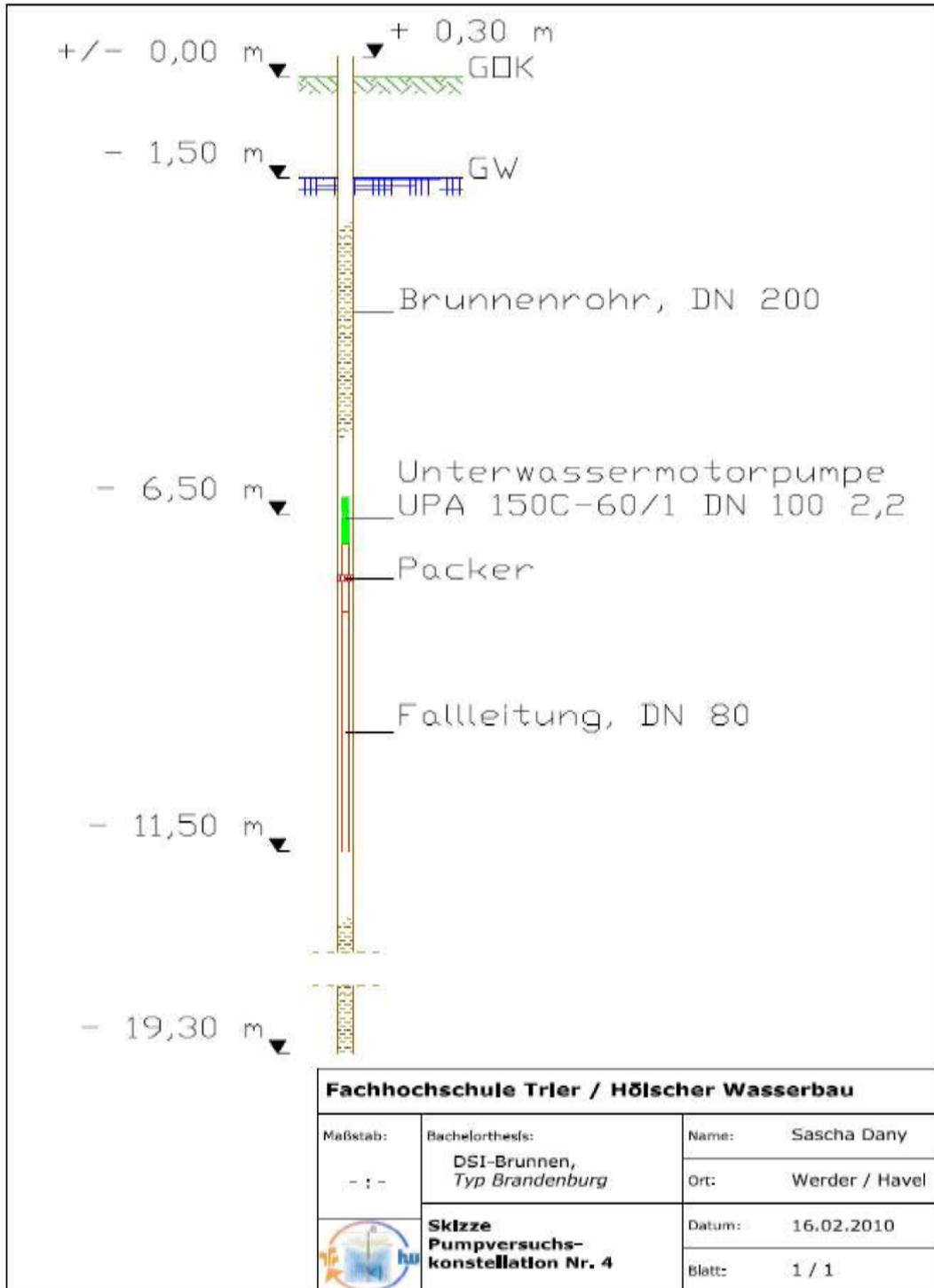


Diagramm Pumpversuchskonstellation Nr. 3 über 2 Stunden, alle Pegel

Bild 26: Ergebnisse Versuch 3

**Pumpversuchskonstellation Nr. 4**

- Unterwasserpumpe 5,00 m u GW
- DSI-Düse 10,00 m u GW
- Absenkziel 1,00 m über Wassereinzug der Pumpe
- Laufzeit 2 Stunden



**Bild 27:** Pumpversuchskonstellation 4

**Pumpversuchskonstellation Nr. 4  
alle Pegel über 2 Stunden**

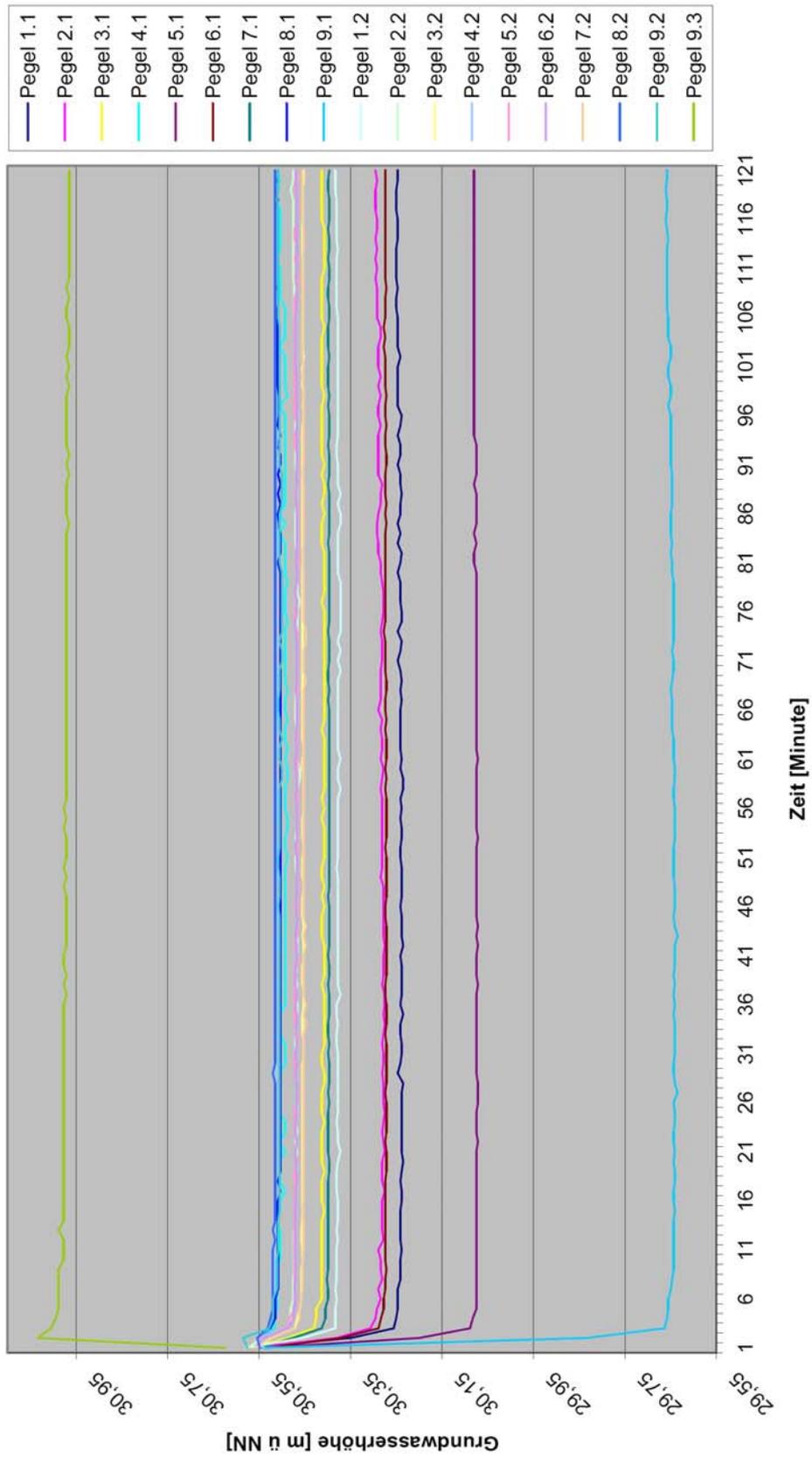
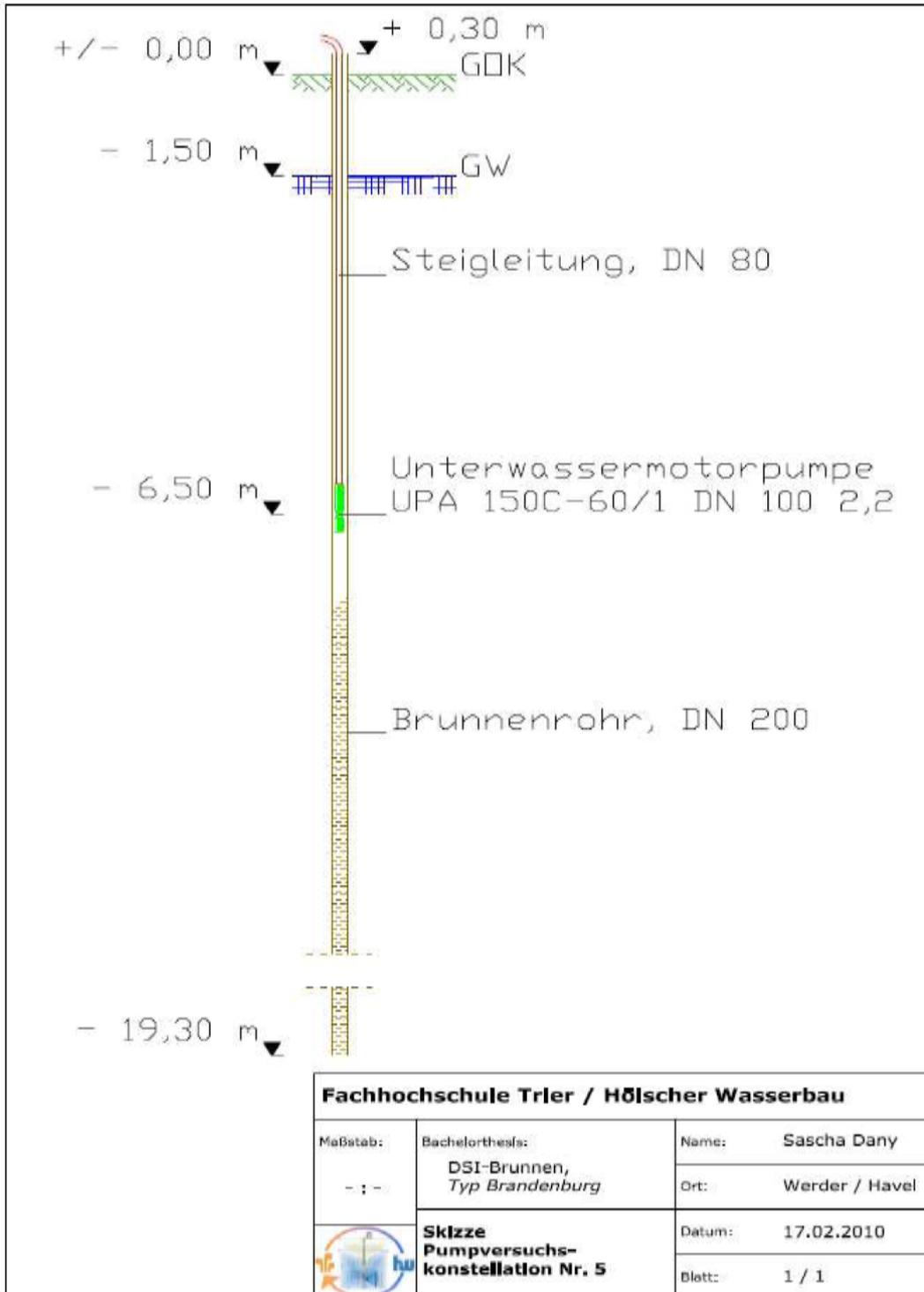


Diagramm Pumpversuchskonstellation Nr. 4 über 2 Stunden, alle Pegel

**Bild 28:** Ergebnisse Versuch 4

**Pumpversuchskonstellation Nr. 5**

- Unterwasserpumpe 5,00 m u GW
- Absenktziel 1,00 m über Wassereinzug der Pumpe
- Laufzeit 5 Stunden



**Bild 29:** Pumpversuchskonstellation 5

Pumpversuchskonstellation Nr. 5  
alle Pegel über 7 Stunden

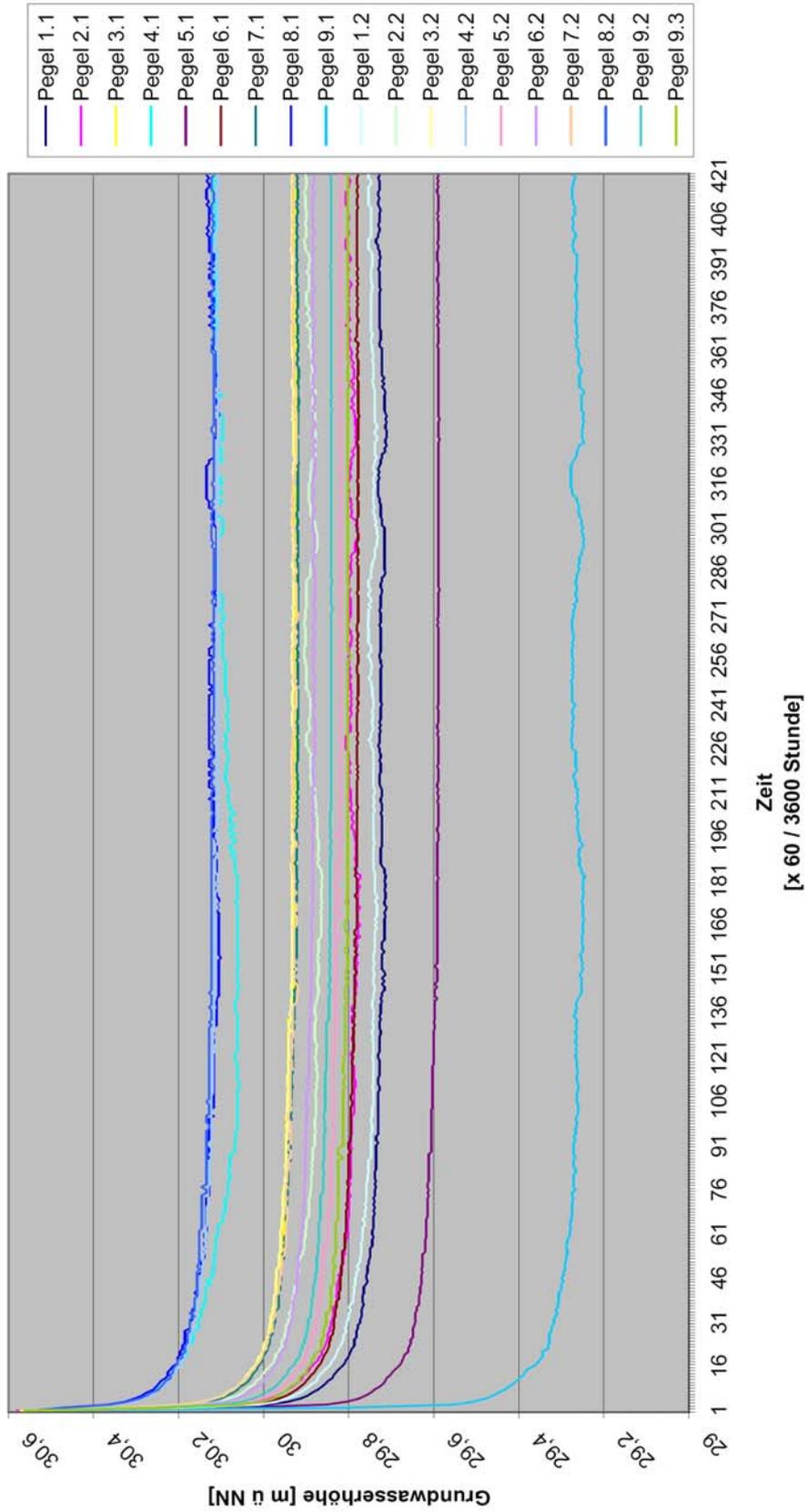


Diagramm Pumpversuchskonstellation Nr. 5 über 7 Stunden, alle Pegel

**Bild 30:** Ergebnisse Versuch 5

## 7.2 Voruntersuchungen in Korschenbroich

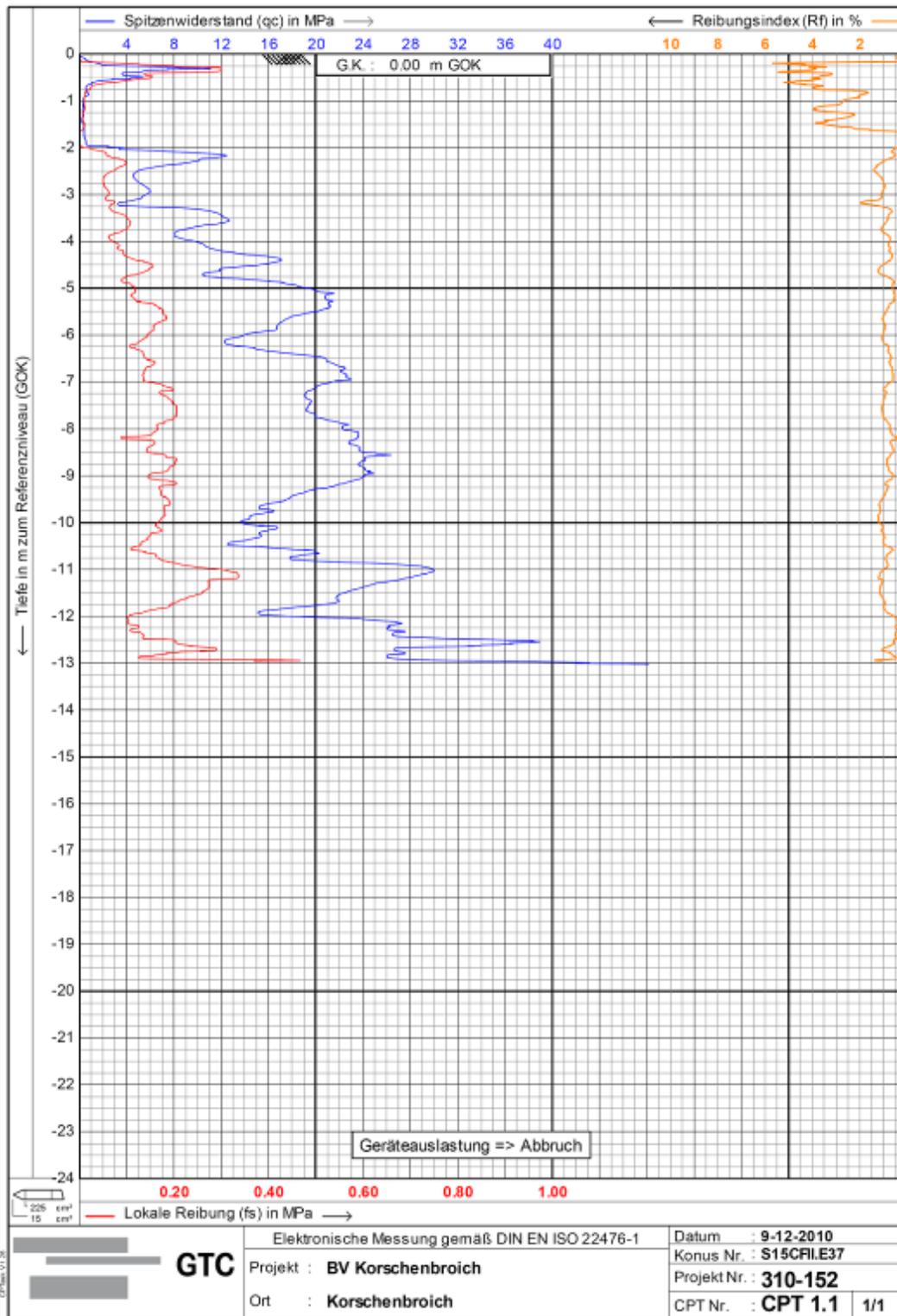


Bild 31: Ergebnisse der Drucksondierung in Korschenbroich

### 7.3 Glossar

<b>Aquifer</b>	Grundwasserleiter
<b>CPT</b>	Die Drucksondierung (Cone Penetration Test, CPT) ist ein Sondierverfahren zur Baugrunderkundung, bei dem ein Messkopf mit kegelförmiger Spitze mit konstanter Geschwindigkeit über ein Gestänge in den Boden gedrückt wird.
<b>Darcy-Gesetz</b>	<p>Das <b>Darcy-Gesetz</b>, benannt nach dem französischen Ingenieur Henry Darcy, ist eine empirisch (also durch Versuche) ermittelte Gesetzmäßigkeit der Strömung im porösen Medium.</p> <p>Das Gesetz lautet:</p> $v_f = -k_f \cdot i$ <p>wobei:</p> <p><math>v_f</math> – Filtergeschwindigkeit; [<math>v_f</math>] = m/s</p> <p><math>k_f</math> – Durchlässigkeitsbeiwert; [<math>k_f</math>] = m/s</p> <p><math>i</math> – hydraulischer Gradient (auch hydraulisches Gefälle oder Potentialgefälle); [<math>i</math>] = m/m</p>
<b>DSI</b>	Düsensauginfiltration: mit einer Düse wird im strömenden Aquifer eine Saugspannung erzeugt, die eine <u>Infiltration</u> von entsprechenden Mengen von Wasser ermöglicht.
<b>DSI-Einheit Typ Brandenburg</b>	Brunnenbauwerk zur Förderung und Reinfiltration von Grundwasser mit der DSI-Technik
<b>DSI-Einheit Typ Glindow</b>	Brunnenbauwerk zur Reinfiltration von Wasser in einen Grundwasserleiter mit der DSI-Technik
<b>DSI-Punkt</b>	Der Punkt im Aquifer, an dem die Saugspannung im Boden aktiviert wird; der Spüldruck bricht zusammen; der Boden saugt das Spülwasser auf; der Spülstrom im Ringraum der Spülbohrung wird unterbrochen; der Boden um das Bohrgestänge/Lanze konsolidiert sich (Lanze sitzt fest!)
<b>DSI-Überlaufsenke</b>	Notüberlauf aus einem offenen Gewässer zur Aufnahme von überschüssigem Wasser und Zuführung zu einem DSI-System zum Infiltrieren des Wassers im Boden.
<b><math>k_f</math>-Wert</b>	Durchlässigkeitsbeiwert [m/s]
<b>Leaky Aquifer</b>	Ungespannter oder gespannter Aquifer dessen Boden- oder Deckschicht relativ durchlässig ist.
<b>Piezometerhöhe</b>	Summe aus geodätischer Höhe und Druckhöhe an einem Messpunkt