

DIPLOMARBEIT

3D Modellierung des Grundwasserkörpers für den Bereich des Brunnenfeldes Donauinsel Nord

ausgeführt zum Zwecke der Erlangung des akademischen Grades eines
Diplom-Ingenieurs

eingereicht an der Technischen Universität Wien
Fakultät für Bauingenieurwesen

von

Georg Kerber

Matr.Nr.: 00727126

unter der Anleitung von

Ao.Univ.Prof. Dipl.-Ing. Dr.techn. **Alfred Paul Blaschke**

und

Senior Scientist Dipl.-Ing. Dr.techn. **Julia Derx**

Institut für Wasserbau und Ingenieurhydrologie
Forschungsbereich Ingenieurhydrologie und Wassermengenwirtschaft
Technische Universität Wien,
Karlsplatz 13/222, A-1040 Wien

Danksagung

Auf diesem Weg möchte ich mich bei allen Personen bedanken, die zum Gelingen dieser Arbeit beigetragen haben.

Allen voran danke ich Ao.Univ.Prof. Dipl.-Ing. Dr.techn. Alfred Paul Blaschke für die außerordentliche Betreuung der Diplomarbeit und die Möglichkeit, diese am Institut für Wasserbau und Ingenieurhydrologie zu erstellen.

Weiters danke ich Senior Scientist Dipl.-Ing. Dr.techn. Julia Derx für Ihre freundliche Unterstützung und hilfreichen Anregungen bei der Entstehung dieser Arbeit.

Überdies gilt mein Dank folgenden Institutionen, ohne die eine Erarbeitung nicht möglich gewesen wäre:

- Magistratsabteilung 29 - Wiener Brückenbau und Grundbau (insb. Hrn. Christian Pospischil)
- Magistratsabteilung 31 - Wiener Wasser (insb. Hrn. Gerhard Vondra)
- Magistratsabteilung 45 - Wiener Gewässer
- Verbund AG
- Wiener Gewässer Management (insb. Dr. Sabine Grupe und Mag. Thomas Payer)

Kurzfassung

Für die Trinkwassergewinnung aus Uferfiltrat ist eine umfangreiche Kenntnis über vorherrschende Grundwasserverhältnisse von maßgeblicher Bedeutung. In der vorliegenden Arbeit wird die Erstellung eines 3D Grundwasserströmungsmodells dokumentiert. Der Modellraum umfasst die Einzugsgebiete zweier Brunnenfelder, die den donaubegleitenden Aquifer am nördlichen Stadtrand von Wien erschließen. Ferner sollen die Wasserfassungen auch der städtischen Notversorgung dienen.

Basierend auf der Finite Elemente Methode erfolgte die Erarbeitung des numerischen Modells mithilfe der Software SVFlux (SoilVision Ltd.). Als Grundlage für die realitätsnahe Modellgeometrie standen ein digitales Geländemodell und Sohlprofile der Donau zur Verfügung. Die Kalibrierung wurde im Verlauf der Ausarbeitung auf den Bereich des Grundwasserwerks *Donauinsel Nord* und den Betrieb der zugehörigen Horizontalfilterbrunnen beschränkt. Zentraler Gegenstand der Modellierung bildeten somit die Grundwasserströmung der Donauinsel und deren Änderungen infolge einer Wasserentnahme.

Die Ergebnisse der Strömungssimulation veranschaulichen eine gute Erfassung der charakteristischen Grundwassermechanismen der Donauinsel. Der Bilanzierung der Volumenströme zufolge, lässt sich die zur Verfügung stehende Uferfiltratmenge in der Größenordnung der Konsensmenge des Grundwasserwerks *Donauinsel Nord* einordnen. Die abschließende Szenarioanalyse zeigt, dass eine theoretisch fortschreitende Kolmatierung der gesamten Donausohle erhebliche Auswirkungen auf das nutzbare Dargebot der Donauinsel hat.

Weiters stellt das Modell ein Instrument dar, welches, im Zuge einer weiterführenden Kalibrierung für den Bereich *Nußdorf* und anhand gemessener Stoffkonzentrationen, eine quantitative und qualitative Bewertung des gegenständlichen Grundwassersystems erlauben soll.

Abstract

For drinking water production based on riverbank filtration a profound knowledge of the present groundwater condition is of significant importance. The thesis at hand documents the development of a 3D groundwater model, which includes the catchment areas of two well fields situated on the river Danube at the northern outskirts of Vienna. Both extraction sites should further provide the water supply for the city in cases of emergency.

The numerical model was implemented within the finite element modeling software SVFlux (SoilVision Ltd.). A digital terrain model and riverbed cross sections were used to create a realistic model geometry. The calibration was confined to the area and operation of the well field *Donauinsel Nord*. Therefore the main emphasis lays on the groundwater flow of the Danube Island and the effects of water extraction.

The model shows good ability in simulating the characteristic groundwater mechanisms of the Danube Island. According to the computation of the aquifer's water balance, the permitted withdrawal rate of the waterworks lies in the range of the present filtration rate. The concluding scenario analysis shows, too, that a theoretical proceeding colmation process of the entire riverbed would affect the water supply exceedingly.

Finally, the model is an extensive management tool for the studied site, which - with further calibration of the catchment Nußdorf and with measurements of solute concentrations - allows for a quantitative and qualitative evaluation of this ground water system.

Inhaltsverzeichnis

1	Einleitung	1
2	Grundlagen	3
2.1	<i>Grundwasserströmung in der gesättigten Bodenzone</i>	3
2.2	<i>Van Genuchten-Mualem-Modell zur Beschreibung der ungesättigten Zone</i>	7
2.3	<i>Numerische Verfahren</i>	9
3	Untersuchungsgebiet	12
3.1	<i>Allgemeine Beschreibung</i>	12
3.2	<i>Untergrund</i>	13
3.3	<i>Hydrologie - Grundwassersystem Donauinsel</i>	15
3.3.1	<i>Oberflächengewässer</i>	15
3.3.2	<i>Brunnenfelder Donauinsel Nord und Nußdorf</i>	16
3.3.3	<i>Kolmation</i>	17
3.4	<i>Datenaufbereitung</i>	18
3.4.1	<i>Oberflächengewässer</i>	21
3.4.2	<i>Pumpbetrieb</i>	22
3.4.3	<i>Interaktion</i>	23
4	Konzeptmodell	25
4.1	<i>Randbedingungen</i>	25
4.2	<i>Ausbildung des Inselkörpers</i>	26
4.3	<i>Zeitraum der Kalibrierung</i>	26
4.4	<i>Weitere Annahmen und Vereinfachungen für die Modellierung</i>	28
5	Numerisches Grundwassermodell	29
5.1	<i>Modellstruktur in SVFlux</i>	29
5.1.1	<i>Eingabe der Modellgeometrie</i>	30
5.1.2	<i>Definition Materialien</i>	33
5.1.3	<i>Räumliche Diskretisierung</i>	34
5.1.4	<i>Zeitliche Diskretisierung</i>	35
5.1.5	<i>Randbedingungen</i>	35
5.2	<i>Kalibrierung</i>	36
5.2.1	<i>Allgemeine Vorgehensweise</i>	36
5.2.2	<i>Detaillierte Vorgehensweise anhand von Beispielen</i>	38
5.2.3	<i>Kenndaten des 3D-Modells und Bewertung der Kalibrierung</i>	45
6	Ergebnisse der Modellierung	49
6.1	<i>Ergebnisse der Strömungsberechnung</i>	49
6.2	<i>Szenarioanalyse - Kolmatierung der gesamten Donausohle</i>	51
7	Zusammenfassung und Ausblick	55
	Literaturverzeichnis	56
	Abbildungsverzeichnis	58
	Tabellenverzeichnis	59
	Anhang	60

1 Einleitung

Die Trinkwasserversorgung der Stadt Wien erfolgt seit mehr als 100 Jahren über die Hochquellleitungen I und II (1873 bzw. 1910) aus den steirisch-niederösterreichischen Kalkalpen. Mit dem rasant steigenden Wasserverbrauch im letzten Jahrhundert kam die Frage nach weiteren möglichen Gewinnungsstellen auf. Als Antwort folgte die Errichtung der Grundwasserwerke Lobau (1966) und Moosbrunn (2006). Noch heute ist die Versorgung der Stadt im Normalbetrieb zu 100 % mit Quellwasser gesichert (MA 31 - Wiener Wasser, o.D.). Im Fall von Revisionen an den Hochquellleitungen sowie zur Abdeckung von Verbrauchsspitzen wird das Trinkwassernetz zusätzlich mit Porengrundwasser gespeist. Während in Moosbrunn das Grundwasser der Mitterndorfer Senke eine aufwändige Aufbereitung mittels erweiterter Oxidation erfordert, handelt es sich beim Wasser der Lobau um Uferfiltrat der Donau, welches im Verlauf der Bodenpassage eine natürliche Reinigung erfährt. (MA 22 - Umweltschutz, 2004)

Weltweit profitieren viele an Flüssen gelegene Städte von der Uferfiltration als Trinkwassergewinnung. Die angrenzenden Grundwasserleiter sind in der Regel leicht zu erschließen und stellen eine ergiebige Quelle dar (DOUSSAN, 1997). So basieren rund 50 % der Trinkwasserversorgung in der Slowakei, 45 % in Ungarn, 16 % in Deutschland und 5 % in den Niederlanden auf Uferfiltration (HISCOCK & GRISCHEK, 2002). Eine Trinkwassergewinnung, welche die natürliche Filter- und Reinigungsleistung des Untergrundes nutzt, bietet eine vielversprechende Möglichkeit den mit der wachsenden Weltbevölkerung steigende Bedarf der wertvollen Ressource sicherzustellen (BOUWER, 2002; DILLON, 2005).

Die Infiltration des Oberflächengewässers ist dabei entweder natürlich bedingt oder wird durch ein von Brunnen erzeugtes hydraulisches Gefälle herbeigeführt. Letzteres entspricht einer anthropogen induzierten Grundwasseranreicherung. Während der Fließstrecke kommt es zur vollständigen oder partiellen Elimination von Schwebstoffen, Bakterien, Viren, Parasiten, adsorbierbaren und biologisch abbaubaren Wasserinhaltsstoffen, wodurch eine Verbesserung der Wasserqualität erreicht wird (MASSMANN *et al.*, 2009). Die Reinigungsleistung erfolgt dabei über mehrere physikalische, chemische und biologische Prozesse und hängt daher maßgeblich von der Beschaffenheit des Oberflächengewässers und des Untergrundes ab. Als weitere entscheidende Faktoren sind die Fließstrecke und die Fließzeit zu nennen (ZIEGLER, 2001). In diesem Zusammenhang wird auf die in Österreich geltende 60-Tagegrenze für die Schutzzone II von Trinkwasserfassungen verwiesen, welche den Schutz vor Verunreinigungen durch pathogene Mikroorganismen sichern soll (ÖVGW, 2004).

Auch Wien, als Stadt an der Donau, forciert den Ausbau der Uferfiltration als 3. Standbein der Trinkwasserversorgung. Mit dem Bau der Brunnenfelder Donauinsel Nord und Nußdorf, soll auch künftig die Notversorgung gesichert sein. Die beiden Grundwasserwerke liegen auf gegenüberliegenden Uferseiten der Donau am nördlichen Stadtrand von Wien und erschließen denselben Grundwasserkörper. Für die Optimierung des Betriebes ist die Kenntnis der vorherrschenden Strömungsverhältnisse wesentlich. Neben langjähriger Forschung und gründlichem Monitoring kann ein Grundwassermodell als wertvolles Instrument zur Beantwortung komplexer Problemstellungen und insbesondere zur Erstellung von Vorhersagen dienen.

Zentraler Inhalt dieser Diplomarbeit ist die Erstellung eines dreidimensionalen Grundwasserströmungsmodelles um Fragestellungen quantitativer Art beantworten zu können. Die Basis für das generelle Verständnis des Grundwassermechanismus wird mit dem Zusammentragen

bestehender Studien und Forschungsergebnisse, sowie der Aufbereitung und Interpretation von Messdaten geschaffen.

Darauf aufbauend erfolgt die Erarbeitung des dreidimensionalen Finite Elemente Modells, welches sich von bisherigen Grundwassermodellen im Untersuchungsgebiet durch den Einbezug beider Brunnenfelder in einem Modell abhebt. Die Umsetzung erfolgt mit der Software SVFlux, welche die effizientere Lösung der Strömungsgleichungen durch eine automatische Anpassung von Berechnungsnetz und Zeitschritten ermöglicht.

Aufgrund der Komplexität des gegenständlichen Modellgebietes wird die Kalibrierung im Zuge dieser Arbeit auf den Bereich des Brunnenfeldes Donauinsel Nord beschränkt. Ziel ist es, die Grundlage für ein Instrument zu schaffen, welches nach einer weiterführenden Kalibrierung zur Beantwortung sämtlicher Problemstellungen im Bereich der Wasserfassungen herangezogen werden kann.

Eine abschließende Szenarioanalyse zeigt die Anwendbarkeit des Modells. Hierbei werden die theoretischen Auswirkungen einer Kolmatierung der gesamten Donausohle auf das Uferfiltratdargebot untersucht - eine Fragestellung, die auch bei der Errichtung des Kraftwerkes Freudenua thematisiert wurde.

2 Grundlagen

Das vorliegende Kapitel gibt einen kurzen Überblick über mathematisch numerische Grundlagen, die für die Erstellung des 3D Finite Elemente Modells relevant erscheinen.

2.1 Grundwasserströmung in der gesättigten Bodenzone

Die mathematische Beschreibung des gesättigten Wassertransports im Grundwasserkörper erfolgt mithilfe von Strömungsgleichungen. Für deren Herleitung bedarf es der Einführung des Kontinuummodells. Dabei werden die Systemeigenschaften eines Aquifers auf ein repräsentatives Elementarvolumen übertragen (s. Abb. 1). Dieses Volumenelement ist klein genug, sodass die auf das Volumen bezogenen Größen stabil bleiben und groß genug, um als repräsentativen Punkt des Systems gelten zu können (DAVID, 1998).

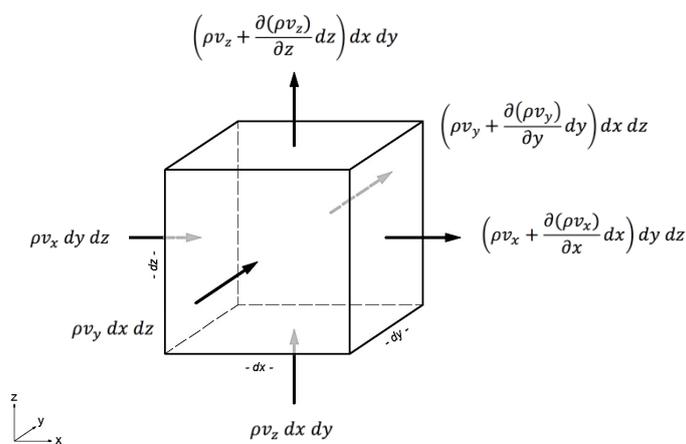


Abb.1: Massenflüsse am Repräsentativen Elementarvolumen (Quelle: Abb. aus Kinzelbach, 2011, S.33)

Ein Weg zur Herleitung der Strömungsgleichung führt über die hydromechanischen Grundprinzipien der Massenerhaltung und der Impulsbilanz am Kontrollvolumen. Eine weitere Möglichkeit besteht aus der Kombination der Kontinuitätsgleichung und dem empirisch ermittelten Gesetz von DARCY (1856) wie beschrieben in ANDERSON & WOESSNER(1992):

Die Kontinuitätsgleichung besagt, dass die Summe aus Zu- und Abflüssen am Kontrollvolumen gleich der Änderung der Wasserspeicherung im Volumen entsprechen muss.

$$\frac{\partial q_x}{\partial x} + \frac{\partial q_y}{\partial y} + \frac{\partial q_z}{\partial z} = -S_s \frac{\partial h}{\partial t} + R^* \quad (1)$$

$$\begin{aligned} q_x &= v_x \, dy \, dz \\ \text{mit } q_y &= v_y \, dx \, dz \\ q_z &= v_z \, dx \, dy \end{aligned} \quad (2)$$

- q ... Spezifischer Durchfluss in Richtung der Koordinatenhauptachsen [m^3/s]
- v ... Fließgeschwindigkeit in Richtung der Koordinatenhauptachsen [m/s]
- h ... Hydraulische Druckhöhe [m]
- S_s ... Spezifischer Speicherkoeffizient [m^{-1}]
- R^* ... Quell- / Senkenterm [m^3/s]

Darin stellt R^* einen Quellen- bzw. Senkenterm innerhalb des betrachteten Systems dar. S_s steht für den spezifischen Speicherkoeffizienten, der allgemein angibt welches Wasservolumen der Boden aufnehmen bzw. abgeben kann. Diese Größe steht in engem Zusammenhang mit der Porosität des Untergrundes.

Die Porosität ist definiert als Anteil des Porenvolumens am Gesamtvolumen. Dieser Porenraum ist entweder mit Wasser oder Luft gefüllt. Ein Teil des Wassers ist dabei adhäsiv an die einzelnen Körner im Boden gebunden und nimmt nicht an der Grundwasserbewegung teil. Aus diesem Grund wird eine effektive Porosität n_{eff} definiert, die sich aus dem Gesamtporenanteil abzüglich des Haftwasseranteils ergibt.

Im freien Grundwasser entspricht der spezifische Speicherkoeffizient S_s im Wesentlichen dem entwässerbaren Anteil der effektiven Porosität n_{eff} . Unter gespannten Grundwasserverhältnissen trägt die Kompressibilität des Fluides und der Bodenmatrix maßgeblich zum Speichervermögen bei (KINZELBACH & RAUSCH, 1995).

Das Gesetz von DARCY beschreibt den direkt proportionalen Zusammenhang zwischen Filtergeschwindigkeit v_f und negativem hydraulischen Gradienten i (s. Abb. 2).

$$v_f = k_f \cdot i = -k_f \cdot \frac{dh}{dl} \quad (3)$$

- v_f ... Filtergeschwindigkeit [m/s]
- k_f ... Durchlässigkeitsbeiwert [m/s]
- i ... Hydraulischer Gradient [-]

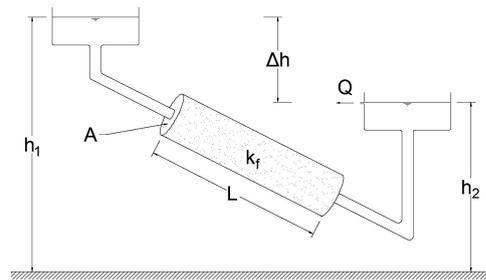
Der Proportionalitätsfaktor in dieser Gleichung ist der Durchlässigkeitsbeiwert k_f , welcher die hydraulische Leitfähigkeit des Bodens angibt. Diese charakteristische Größe hängt sowohl von der Bodenbeschaffenheit, als auch von Dichte und Viskosität des Fluides ab, und ist daher zugleich temperaturabhängig. Dieser Wert wird durch Pumpversuche im Feld oder durch Säulenversuche im Labor bestimmt. Tabelle 1 gibt einen Überblick über die Größenordnung des Durchlässigkeitsbeiwertes k_f für verschiedene Bodentypen.

Tab.1: Durchlässigkeitsbeiwerte in Abhängigkeit vom Bodentyp (Quelle: Tab. aus Hölting, 1980, S. 97)

Bodentyp	k [m/s]		
reiner Kies	10^{-1}	-	10^{-2}
grobkörniger Sand	um 10^{-3}		
mittelkörniger Sand	10^{-3}	-	10^{-4}
feinkörniger Sand	10^{-4}	-	10^{-5}
schluffiger Sand	10^{-5}	-	10^{-7}
toniger Schluff	10^{-6}	-	10^{-9}
Ton	$<10^{-9}$		

Die Gleichung (3) stellt eine spezielle Form der Bewegungsgleichung dar und unterliegt festen Gültigkeitsbedingungen. Demnach gilt die von DARCY beschriebene Linearität nur für den laminaren Strömungsbereich. Unter turbulenten Bedingungen sind die Fließgeschwindigkeiten so hoch, dass die Trägheitskräfte des strömenden Mediums nicht mehr vernachlässigbar klein gegenüber der Kraft zufolge innerer Reibung sind. In porösen Grundwasserleitern hat diese Einschränkung jedoch kaum Bedeutung, da derart hohe Strömungsgeschwindigkeiten nicht erreicht werden. Die untere Anwendungsgrenze beschreiben die Eigenschaften bindiger Böden. Aufgrund derer geringen Porendurchmesser gewinnen elektromolekulare Oberflächenkräfte an Bedeutung.

Das Wasser wird hierbei molekular an das Korngerüst gebunden und beginnt erst bei Überschreitung eines Grenzgefälles zu fließen (DAVID, 1998).



$$Q = A \cdot v_f$$

$$v_f = k_f \cdot i = k_f \cdot \frac{\Delta h}{L}$$

Abb.2: Experimentelle Bestimmung der Durchlässigkeit nach DARCY (Quelle: vgl. Kinzelbach, 2011. Hydraulik I - Vorlesungsunterlagen, ETHZ)

Werden die genannten Grenzen eingehalten, lässt sich durch Kombination der Gleichungen (1) und (3) die instationäre Strömungsgleichung aufstellen.

$$\frac{\partial}{\partial x} \left(K_x \frac{\partial h}{\partial x} \right) + \frac{\partial}{\partial y} \left(K_y \frac{\partial h}{\partial y} \right) + \frac{\partial}{\partial z} \left(K_z \frac{\partial h}{\partial z} \right) = -S_s \frac{\partial h}{\partial t} + R^* \quad (4)$$

- K ... Hydraulischer Durchlässigkeits Tensor [m/s]
- h ... Hydraulische Druckhöhe [m]
- S_s ... Spezifischer Speicherkoeffizient [m⁻¹]
- R^* ... Quell- / Senkenterm [m³/s]

Bei Betrachtung eines stationären Zustandes befinden sich Zu- und Abstrom in einem Gleichgewicht. Der Grundwasserspiegel ist konstant und unterliegt keiner zeitlichen Änderung, wie bei instationären Strömungsverhältnissen. Der Speicherterm ist somit Null und Gleichung (4) vereinfacht sich zu

$$\frac{\partial}{\partial x} \left(K_x \frac{\partial h}{\partial x} \right) + \frac{\partial}{\partial y} \left(K_y \frac{\partial h}{\partial y} \right) + \frac{\partial}{\partial z} \left(K_z \frac{\partial h}{\partial z} \right) = R^* \quad (5)$$

Zur Beschreibung der dreidimensionalen Strömung wurde in den obigen Gleichungen der Durchlässigkeitsbeiwert k_f aus Gleichung (3) in einen Tensor K übergeführt.

$$K = \begin{bmatrix} K_{xx} & K_{xy} & K_{xz} \\ K_{yx} & K_{yy} & K_{yz} \\ K_{zx} & K_{zy} & K_{zz} \end{bmatrix} \quad (6)$$

Durch geschickte Wahl des Koordinatensystems reduziert sich der Tensor auf die Einträge in der Hauptdiagonale. Im Fall einer richtungsunabhängigen Durchlässigkeit ($K_{xx}=K_{yy}=K_{zz}$) spricht man von isotroper Strömung.

Mit Gleichung (4) und (5) liegen nun Partielle Differentialgleichungen (PDGln) vor, die den Wassertransport im Boden für den stationären und instationären Zustand beschreiben. Für die Lösung der PDGln müssen Anfangs- und Randbedingungen eingeführt werden. Die mathematische

Beschreibung der Randbedingungen unterscheidet drei Arten, welche schematisch in Abbildung 3 dargestellt sind.

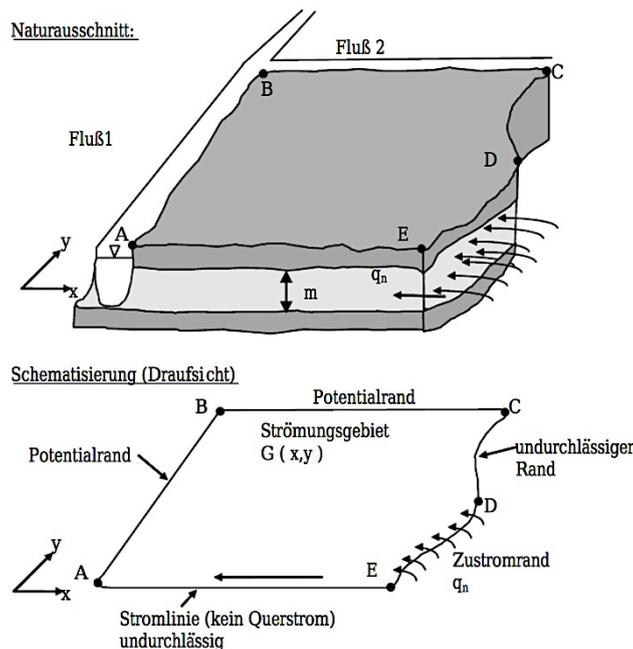


Abb.3: Schematisierung der Randbedingungen einer 2D Strömung (Quelle: Abb. aus DAVID, 1998, S.32)

- Randbedingungen 1. Art (DIRICHLET) - Die hydraulische Druckhöhe $h(t)$ entlang des Randstücks AB und BC ist bekannt.
- Die Randbedingungen 2. Art (NEUMANN) beschreibt das Potentialgefälle $\frac{\partial h}{\partial n}$. Im Abschnitt DE ist der Zu- oder Abfluss bekannt. Eine dichte Berandung wie im Abschnitt CD besitzt ein Potentialgefälle von $\frac{\partial h}{\partial n} = 0$. In gleicher Weise ergibt sich die RB entlang einer Stromlinie EA, die auch eine natürliche Systemgrenze darstellt.
- Die Randbedingung 3. Art (CAUCHY) tritt in der Grundwasserhydraulik selten auf. Sie kombiniert die ersten beiden Randbedingungen und beschreibt den linearen Zusammenhang zwischen hydraulischer Druckhöhe und dem Potentialgradienten.

Die genannten Randbedingungen besitzen Gültigkeit in Bezug auf einem idealisierten Grundwasserkörper, der den Annahmen nach DUPUIT unterliegt. Diese besagen, dass die Strömung über die gesamte Mächtigkeit eines Grundwasserleiters mit freier Oberfläche horizontal verläuft und die Geschwindigkeit konstant ist. Für Problemstellungen, die beispielsweise freie Oberflächen wie bei Dämmen oder In- bzw. Exfiltration von Vorflutern umfassen, sind diese Bedingungen nicht gegeben und die mathematischen Formulierungen müssen erweitert werden (DAVID, 1998).

Im Gegensatz zu den Randbedingungen werden Anfangsbedingungen nur zur Lösung instationärer Problemstellungen benötigt. Sie geben die Druckhöhenverteilung des Grundwasserleiters zu Beginn einer Berechnung an.

2.2 Van Genuchten-Mualem-Modell zur Beschreibung der ungesättigten Zone

Die in 2.1 gezeigten Strömungsgleichungen beschränken sich auf die gesättigte Zone, in welchem der Porenraum vollständig mit Wasser gefüllt ist. In der darüber liegenden ungesättigten Bodenzone herrscht ein Unterdruck, welcher durch die Kapillarität des Korngerüsts hervorgerufen wird. Die vorhandene Saugspannung ergibt zusammen mit den Adsorptionskräften der einzelnen Körner das Matrixpotential ψ . Diese Größe hängt von der Bodenart ab und variiert je nach Zusammensetzung über mehrere Potenzen. Durch das Vorhandensein dieses Potentials ist die ungesättigte Zone teilweise mit Kapillarwasser aus aufsteigendem Grundwasser sowie festgehaltenem Sickerwasser gefüllt (HÖLTING u. COLDEWEY, 2013).

RICHARDS (1931) überträgt das DARCYsche Gesetz auf den ungesättigten Bereich, indem er über den volumetrischen Wassergehalt θ eine Beziehung zwischen Matrixpotential ψ und hydraulischer Leitfähigkeit K herstellt. Er erweitert Gleichung (4) zu

$$\frac{\partial}{\partial x} \left(K_x(\psi) \frac{\partial \psi}{\partial x} \right) + \frac{\partial}{\partial y} \left(K_y(\psi) \frac{\partial \psi}{\partial y} \right) + \frac{\partial}{\partial z} \left(K_z(\psi) \left(\frac{\partial \psi}{\partial z} + 1 \right) \right) = C(\psi) \frac{\partial \psi}{\partial t} \quad (7)$$

K ... Hydraulischer Durchlässigkeitstensor [m/s]
 ψ ... Matrixpotential [mWS]
 C ... spezifische Speicherkoeffizient [m⁻¹]

Der volumetrische Wassergehalt θ ist als Quotient aus dem Wasservolumen und dem Gesamtvolumen definiert. Ist der Porenraum vollständig mit Wasser gefüllt spricht man vom gesättigten volumetrischen Wassergehalt θ_s . Im Vergleich dazu versiegt der Flüssigkeitsaustausch zwischen den Poren bei sehr geringer Sättigung. Als Grenzwert wird als residualer Wassergehalt θ_r bezeichnet. Abbildung 4 zeigt die Matrixpotential-Wassergehalts-Beziehung für unterschiedliche Bodenarten. Die Feldkapazität FK entspricht dabei dem maximalen Wasservolumen, das im Boden entgegen der Gravitation gehalten werden kann. In diesem Zusammenhang wird häufig der Begriff der Saugspannung verwendet, welcher allerdings den Betrag des Matrixpotentials beschreibt. Im Sinne von Potentialbetrachtungen wirkt das Matrixpotential entgegen dem positiv definierten Gravitationspotential, weshalb es mit einem negativen Vorzeichen versehen ist.

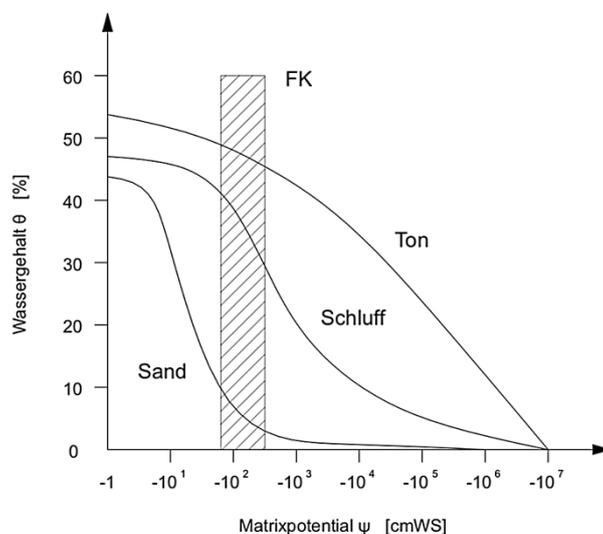


Abb.4: Beziehung zwischen Matrixpotential und Wassergehalt für verschiedene Bodenarten (in Anlehnung an Scheffer u. Schachtschabel, 1998)

VAN GENUCHTEN (1980) beschreibt die Schwierigkeit, Aussagen über die hydraulische Leitfähigkeit der ungesättigten Bodenzone zu treffen. Aufwändige Messungen und die hohe Variabilität der Leitfähigkeit, insbesondere bei größeren Untersuchungsgebieten, spricht gegen eine Erhebung im Feld. Praktikabler hingegen erweisen sich Modelle, die eine Berechnung der hydraulischen Leitfähigkeit mithilfe weniger Parameter ermöglichen.

MUALEM (1976a) präsentiert eine Gleichung mit der sich die relative Leitfähigkeit K_r anhand des Matrixpotentials berechnen lässt:

$$K_r = S_e^{1/2} \left[\frac{\int_0^{S_e} \frac{dS_e}{\psi}}{\int_0^1 \frac{dS_e}{\psi}} \right]^2 \quad (8)$$

$$\text{mit } S_e = \frac{\theta - \theta_r}{\theta_s - \theta_r} \quad (9)$$

K_r ... Relative hydraulische Leitfähigkeit [m/s]
 ψ ... Matrixpotential [cmWS]
 S_e ... normalisierte Wassergehalt [-]
 θ ... momentane Wassergehalt [-]
 θ_r ... residuale Wassergehalt [-]
 θ_s ... Sättigungswassergehalt [-]

VAN GENUCHTEN (1980) stellt eine Parametrisierung der Wasserretentionskurve in folgender Form dar:

$$S_e = \left[\frac{1}{1 + (\alpha\psi)^n} \right]^m \quad (10)$$

S_e ... effektive Wassergehalt [-]
 ψ ... Matrixpotential [cmWS]
 α, n, m ... Parameter zur Anpassung der Kurve

Er kombiniert sie mit MUALEMs Ansatz zur Beschreibung der hydraulischen Leitfähigkeit zu

$$K_r(\psi) = \frac{\{1 - (\alpha\psi)^{n-1} [1 + (\alpha\psi)^n]^m\}^2}{[1 + (\alpha\psi)^n]^{m/2}} \quad (11)$$

$$\text{mit } m = 1 - 1/n \quad (12)$$

Mit dem Van Genuchten-Mualem-Modell lassen sich auf einfache Weise Wasserretentionskurven erstellen und durch Variation weniger Parameter an vorliegende Gegebenheiten anpassen. Es stellt eine einfache Methode dar, die ungesättigte hydraulische Leitfähigkeit im Untergrund abzuschätzen.

2.3 Numerische Verfahren

Zur Lösung der beschriebenen Strömungsgleichungen, unterscheidet man grundsätzlich zwischen zwei Verfahren. Analytische Methoden liefern eine geschlossene Lösung, d.h. für eine gegebene Position und einen Zeitpunkt lässt sich die hydraulische Druckhöhe h direkt berechnen. Bei Anwendung des Verfahrens müssen jedoch vorweg viele Vereinfachungen angenommen werden. Meist wird ein homogener, isotroper Grundwasserkörper vorausgesetzt und das Problem auf eine oder zwei Dimensionen reduziert. Daher kommen analytische Lösungen primär für einfache Fragestellungen, zur Interpretation von Messdaten und Abschätzung der Strömungsverhältnisse oder zur Verifizierung der Ergebnisse aus numerischen Simulationen in Betracht (ISTOK, 1989).

Für komplexe Problemstellungen eignen sich numerische Methoden weitaus besser. Sie sind in der Lage inhomogene Aquifere sowie aufwendige Randbedingungen zu berücksichtigen. Die Grundidee numerischer Verfahren besteht darin, das Untersuchungsgebiet in Teilgebiete zu zerlegen - das Modellgebiet zu "diskretisieren". Für jedes dieser Elemente wird im Anschluss eine Bilanzgleichung aufgestellt. Die Gesamtheit aller Gleichungen bildet ein Gleichungssystem, dessen Ergebnis Funktionswerte in den Stützstellen, den sogenannten Knoten, sind. Durch Interpolation kann anschließend eine Näherungslösung in jedem beliebigen Punkt ermittelt werden. Verschiedene numerische Verfahren wurden entwickelt um den Wasser- und Stofftransport von Grundwassersystemen zu berechnen. Zwei haben sich im Laufe der Zeit besonders bewährt - die Finite Differenzen Methode (FDM) und die Finite Elemente Methode (FEM). Der Unterschied der beiden Methoden liegt in der Art der Diskretisierung (s. Abb. 5) und folglich auch in der Lösung des Gleichungssystems (KINZELBACH & RAUSCH, 1995).

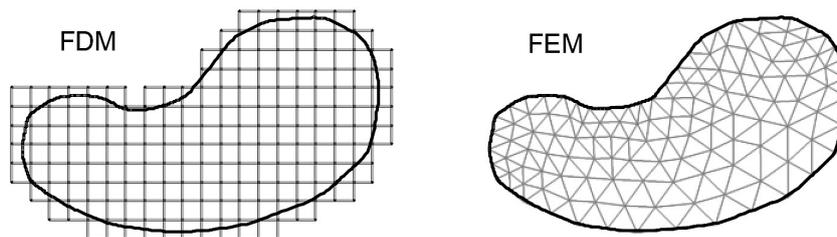


Abb.5: Diskretisierung FDM und FEM

Bei der FDM kommen Rechteckelemente zum Einsatz, die eine Diskretisierung komplizierter Geometrien und insbesondere die Erfassung der Randbedingungen erschweren. Der Vorteil dieser Methode liegt in der einfacheren Programmierung und einer schnelleren Berechnung, die auf der Entwicklung von Taylorreihen basiert. Die FEM verwendet für die Diskretisierung Dreiecke, Rechtecke oder beliebige Vielecke, was die einfache Anpassung an beliebige Formen ermöglicht. Die Methode hat ihren Ursprung im Bereich der Strukturmechanik. Das mathematische Fundament bildet die Verknüpfung der Stabstatik mit dem Prinzip der virtuellen Kräfte und dem Prinzip der virtuellen Verschiebungen. Je nach Komplexität und Feinheit der Elementierung entsteht dabei ein enormer Rechenaufwand. Die Entwicklung auf dem Gebiet der Computerhardware und die Bereitstellung leistungsfähiger Lösungsalgorithmen haben der FEM in den letzten Jahrzehnten jedoch zum Durchbruch verholfen (MATHIAK, 2010).

Numerische Modelle sind mittlerweile ein Standardinstrument zur Beantwortung geohydrologischer Fragestellungen. Sie erlauben die Untersuchung komplexer Aquifere und die Abbildung komplexer Prozesse. Ihre Anwendung führt, angefangen bei der Interpretation von Messdaten, über die Erfassung von Grundwassermechanismen hin zur Prognose beliebiger Szenarien. Die Erstellung des Grundwassermodells dieser Arbeit basiert auf der FEM. Die Umsetzung erfolgt mit der Software SVFlux (SoilVision Systems Ltd.), welche die Modellierung von dreidimensionalem Grundwassertransport unter verschiedensten Bedingungen erlaubt. Für die Eingabe des Modells

wird eine Benutzeroberfläche verwendet, die an CAD-Programme erinnert. Die interaktive 3D Visualisierung des numerischen Modells ermöglicht ein erweitertes Modelldesign und einen übersichtlichen Schaffungsprozess. Nach der Fertigstellung des Modells generiert die Software ein Skript mit der mathematischen Formulierung der grafisch eingegebenen Problemstellung, welches im zugehörigen Solver FlexPDE (PDE Solutions Inc.) gelöst wird. Die Ergebnisse werden entweder direkt im Solver angezeigt oder können nach Rückimport in SVFlux in attraktiven 3D Renderings dargestellt werden.

Eine Besonderheit der Software ist die automatische Diskretisierung des Modells und Anpassung während der Berechnung, sowie die automatische Anpassung von Zeitschritten bei instationären Berechnungen (THODE, 2013). Speziell für die Größe und Komplexität, des gegenständlichen Untersuchungsgebiet stellen diese Programmeigenschaft eine willkommene Hilfestellung und eine erhebliche Zeitersparnis dar.

Der Vollständigkeit halber werden nachfolgend jene Formen der Gleichungen angegeben, welche SVFlux zur Lösung des Grundwassertransportes heranzieht. Die Gleichungen und zugehörigen Definitionen werden dabei direkt aus dem Handbuch übernommen (THODE, 2014).

H-Based Formulation of Three-Dimensional Seepage (with negligence of vapor flow)

$$\frac{\partial}{\partial x} \left(k_x^w \frac{\partial h}{\partial x} \right) + \frac{\partial}{\partial y} \left(k_y^w \frac{\partial h}{\partial y} \right) + \frac{\partial}{\partial z} \left(k_z^w \frac{\partial h}{\partial z} \right) = -\gamma_w m_2^w \frac{\partial h}{\partial t} \quad (13)$$

- h ... hydraulic head
- k^w ... hydraulic conductivity function
- m_2^w ... represents the derivate of the soil-water characteristic curve with respect to matric suction
- γ_w ... unit weight of water [kN/m³]

[Anm.: $m_2^w = \frac{d\theta}{d\psi}$]

Soil-Water Characteristics Curve (Van Genuchten & Mualem Equation 1976)

$$\theta_w = \theta_{rm} + (\theta_s - \theta_{rm}) \cdot \left[\frac{1}{[1 + (\alpha_m \cdot \psi)]^{(1-\frac{1}{n_m})}} \right] \quad (14)$$

- θ_w ... volumetric water content at any soil suction
- θ_{rm} ... residual volumetric water content
- θ_s ... saturated volumetric water content
- α_m ... a material parameter which is primarily a function of the air entry value of the soil in kPa
- n_m ... a material parameter which is primarily a function of the rate of water extraction from the soil once the air entry value has been exceeded
- ψ ... soil suction

Hydraulic Conductivity Estimation (Van Genuchten Estimation)

$$k(\psi) = k_s \cdot \left[\frac{\{1 - (\alpha \cdot \psi)^{n \cdot m} \cdot [1 + (\alpha \cdot \psi)^n]^{-m}\}^2}{[1 + (\alpha \cdot \psi) \cdot n]^{\frac{m}{2}}} \right] \quad (15)$$

- k ... hydraulic conductivity of permeability of the water phase
 k_s ... saturated hydraulic conductivity of the water phase determined by the van Genuchten Linked
ksat field
 a ... van Genuchten soil-water characteristic curve fitting parameter
 n ... van Genuchten soil-water characteristic curve fitting parameter
 m ... van Genuchten soil-water characteristic curve fitting parameter
 ψ ... soil suction

3 Untersuchungsgebiet

3.1 Allgemeine Beschreibung

Der untersuchte Grundwasserleiter befindet sich am nördlichen Stadtrand von Wien, im oberen Teil der Donauinsel auf Höhe der Ausleitung des Donaukanals (siehe Abb. 6). Durch den höheren Wasserpegel in der Donau existiert ein Potentialgefälle zur Neuen Donau, welches ein Durchströmen des Grundwasserkörpers der Donauinsel bewirkt. Das Uferfiltrat wird von der Brunnenreihe des Grundwasserwerkes Donauinsel Nord gefördert, welche zwischen Jedleseer Brücke im Nordosten und der Nordbrücke im Südwesten angelegt ist. Auf dem gegenüberliegenden Donauufer befindet sich auf etwa selber Höhe das Brunnenfeld Nußdorf, welches ebenso Donaufiltrat fördert.

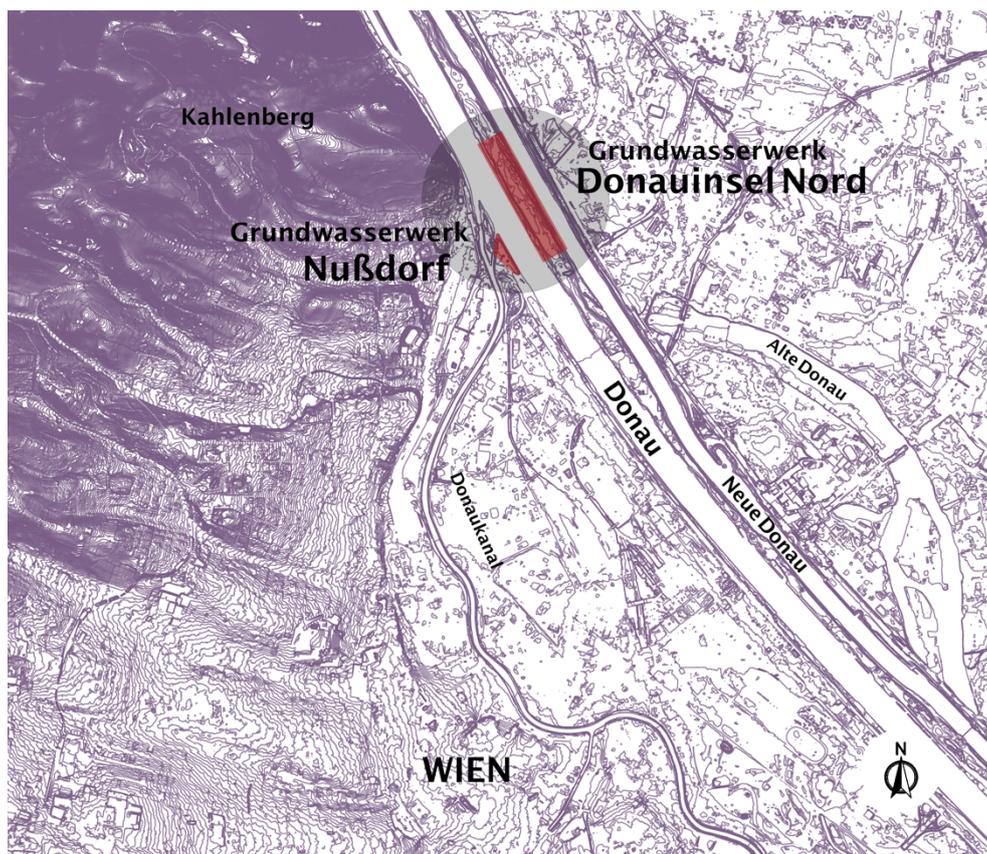


Abb.6: Lage des Untersuchungsgebietes

Heute als beliebtes Freizeit- und Erholungsgebiet bekannt, entstand die Donauinsel im Zuge des Hochwasserschutzprojektes in den Jahren 1972 bis 1988, durch die Aufschüttung des Aushubmaterials der Neuen Donau, die bei Hochwasserabfluss als Entlastungsgerinne der Donau dient. Die künstliche Insel erstreckt sich über eine Länge von 21,1 km. Die Breite beträgt zwischen 70 und 210 m. Die Neue Donau wird durch drei Wehre in obere und untere Stauhaltung unterteilt, welche eine gute Regulierung des Wasserspiegels erlauben. Bei Normalabfluss der Donau ($MQ = \text{ca. } 1900 \text{ m}^3/\text{s}$) entspricht das Entlastungsgerinne einem stehenden Gewässer, welches lediglich über den Grundwasserkörper der Donauinsel mit Wasser der Donau dotiert wird. Erst ab einem Durchfluss von $5100 \text{ m}^3/\text{s}$ in der Donau wird auch die Neue Donau geflutet. Dies entspricht einem 1-jährlichen Hochwasser. Mit einer Maximalabflussmenge von $5200 \text{ m}^3/\text{s}$ in der Neuen Donau und $8800 \text{ m}^3/\text{s}$ in der Donau ist eine Abführung von Hochwässern mit bis zu $14000 \text{ m}^3/\text{s}$ möglich (MA 45 - Wiener Gewässer, 2017).

3.2 Untergrund

Als Träger des Grundwassers ist eine Charakterisierung des Untergrundes meist der erste Schritt zur Beantwortung hydrogeologischer Problemstellungen. Die Zusammensetzung des Bodens bestimmt die Durchlässigkeit und in weiterer Folge die Menge des durchströmenden Wassers.

Zum Großteil aus Aushubmaterial des ehemaligen Überschwemmungsgebietes bestehend, zeigt sich der obere Aufbau der Donauinsel äußerst heterogen. Bei der Errichtung wurde an den Inselkern keine speziellen Anforderungen gestellt und unterschiedlichstes Schüttmaterial verwendet. Überdies wurden keine Aufzeichnungen zur Verteilung des Materials geführt. Lediglich die Randbereiche sind aus sandig-kiesigem Material geschüttet und verdichtet worden. Zusätzlich wurde die Uferböschung der Neuen Donau mit Beton-Waben-Steinen gesichert. Am Ufer zur Donau erfolgte die Sicherung mittels Wasserbausteinen (MICHLMAYR, 2002). Im Bereich des Grundwasserwerkes Donauinsel Nord wurden an das donauseitige Ufer besondere Ansprüche gestellt. Über die gesamte Länge (Str.-km. 1932,8 - 1934,3) wurde im Schwankungsbereich des Wasserspiegels eine Dichtung angeordnet um den Eintrag oberflächlicher Schadstoffe, wie beispielsweise Öl, in den Inselkörper zu verhindern. Dafür wurde im Anschluss an die bestehende Uferböschung eine bis zu 6 m breite Vorschüttung eingebracht. Auf diese wurde eine neue Böschung angesetzt und im Bereich 1m unterhalb bis 1m oberhalb Mittelwasser mit einer dichtenden Bentonitmatte und einer Steinschüttung abgesichert (MASSINGER u. MICHLMAYR, 2003).

In Inselmitte befindet sich unterhalb der Aufschüttung, in einer Tiefe zwischen 7 und 12 m, die grundwasserführende Schicht aus Donauschotter, deren Mächtigkeit über die Länge der Donauinsel variiert. Steine und Kiese bilden den Hauptbestandteil dieser Schicht, der sich zudem Sande und Schluffe beimengen. In bestimmten Teilen der Donauinsel können schluffige Einlagerungen eine beträchtliche Ausdehnung und eine Schichtdicke im Bereich von Metern erreichen. Diese "Schlufflinsen", wie sie auch in REINER (2012) beschrieben werden, bilden undurchlässige Bereiche im Grundwasserleiter.

Der tiefere Untergrund im nördlichen Teil der Donauinsel besteht zumeist aus Flysch, der von der Kahlenberger Decke bei Nußdorf im steil zur Donau abfallenden Gelände ausstreicht. Dieser besteht neben Mergel und Kalkmergel überwiegend aus Sandstein und kann praktisch als dicht angesehen werden (KÜPPER, 1954). Im Untersuchungsraum bildet die Flyschdecke daher den Grundwasserstauer. Stromaufwärts im Brunnenfeld ist dieser einige Meter früher anzutreffen als bei der Nordbrücke.

Abbildung 7 zeigt ein für die Donauinsel charakteristisches Bohrprofil nahe der Jedleseer Brücke. Unter der Anschüttung von 8 m befindet sich die grundwasserführende Schicht aus Kiesen und Steinen mit einer Mächtigkeit von rund 7 m. In einer Tiefe von 15 m durchteuft man die Flyschdecke als Grundwasserstauer. Mit dem Grundwasserspiegel in einer Tiefe von 12 m liegt hier eine Mächtigkeit des Aquifers von knapp 3 m vor.

Zahlreiche Bohrprofile der MA29 - Brückenbau und Grundbau dokumentieren den Aufbau der Donauinsel. Sie verdeutlichen den Umstand der äußerst inhomogenen Zusammensetzung. So ist, trotz der relativ hohen Informationsdichte, eine flächendeckende Interpretation des Untergrundes schwer möglich. Die vergleichsweise wenigen Bohrungen, die bis in die Tiefen des Stauers vordringen, erlauben zur Mächtigkeit des Grundwasserleiters nur vage Aussagen. Abbildung 8 zeigt einen vereinfachten Querschnitt der Donauinsel mit den gegenüberliegenden Ufern bei Nußdorf und Jedlesee. Mit wenigen Bohrprofilen wird hier versucht ein mögliches Bild des tieferen Untergrundes schematisch wiederzugeben.

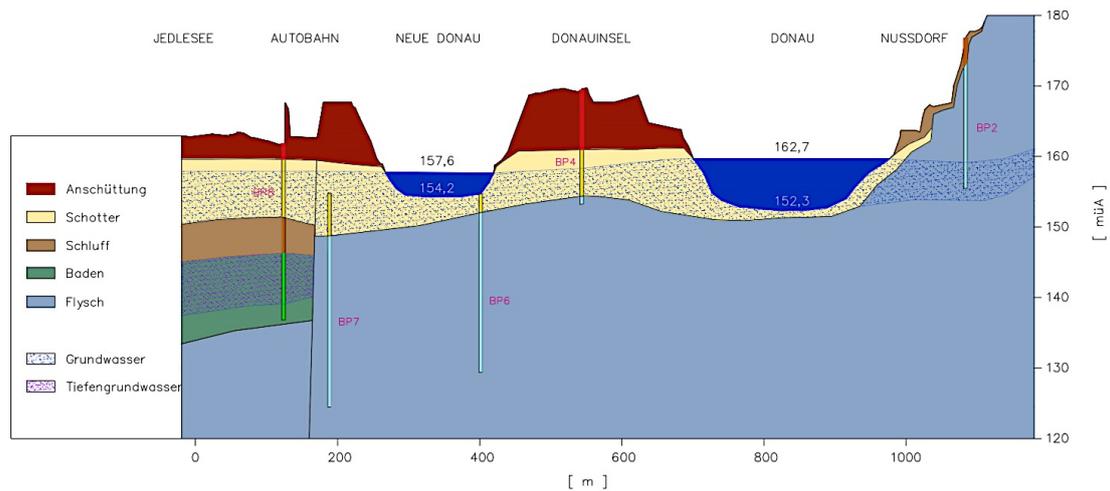


Abb.8: Geologischer Querschnitt auf Höhe der Jedleseer Brücke (Quelle: Abb. aus Kerber, 2017. Interdisziplinäre Seminararbeit am Institut für Wasserbau und Ingenieurhydrologie / Institut für Wassergüte und Ressourcenmanagement)

Anhand der vorliegenden Schichtung der einzelnen Profile ist die vom Kahlenberg austreichende Flyschdecke deutlich zu erkennen. Auf ihr lagern rezente Donauschotter auf, die den wichtigsten Grundwasserträger Wiens darstellen. Die Mächtigkeit des Aquifers unterhalb der Donaurohle ist gering und beträgt nur wenige Dezimeter bis einige Meter (GUTKNECHT *et al.*, 1998). Im Bereich der Autobahn ist aufgrund Bohrungen eine Störung in größerer Tiefe zu vermuten, welche sich durch die Lage der Donauinsel erklären lässt. Geologisch gesehen befindet sie sich in der Randzone des Wiener Beckens - einem Gebiet, das aufgrund der hohen tektonischen Aktivität durch zahlreiche Brüche, Faltungen und Überschiebungen geprägt ist (WESSELY, 1983).

Dieses Kapitel abschließend, soll erneut auf die hohe Heterogenität des Untergrunds im Untersuchungsgebiet hingewiesen werden, und in diesem Zusammenhang die Wichtigkeit des Gesamtverständnisses des Systems betont werden. Weitaus bedeutsamer, als die Berücksichtigung einzelner punktueller Messungen, ist die Erfassung der gesamtheitlichen Situation.

3.3 Hydrologie - Grundwassersystem Donauinsel

3.3.1 Oberflächengewässer

Die Grundwasserströmung des obersten Grundwasserhorizontes der Donauinsel ist primär geprägt durch die begleitenden Oberflächengewässer Donau und Neue Donau. In Fließrichtung linksseitig liegt die Neue Donau, die unter Normalabfluss ein stehendes Gewässer darstellt. Drei Wehranlagen unterteilen sie in obere und untere Stauhaltung und erlauben die genaue Steuerung des Wasserstandes. Durch einen erhöhten Aufstau kann eine gezielte Dotation des angrenzenden Grundwasserkörpers im 22. Wiener Gemeindebezirk erfolgen und zugleich die Wasserbilanz der Donaualtarme in den wasserärmeren Sommermonaten verbessert werden (MICHLMAYR, 2002). Am rechten Ufer der Insel fließt die Donau. Aufgrund des rund 12 km stromab gelegenen Kraftwerkes Freudenu bei Str.-km 1921,05 befindet sich die Donau in diesem Abschnitt in einem aufgestauten Zustand. Der erhöhte Wasserspiegel erfordert eine Abdichtung des rechten Donauufers. Ein Dichtwandssystem, welches bis in die undurchlässigen Bodenschichten reicht, erstreckt sich vom Kraftwerk bis hin zum Brigittenauer Sporn, dem Ausleitungsbauwerk des Donaukanals. Durch diese Maßnahme ist die freie Kommunikation zwischen der Donau und dem Grundwasser des 2. und 20. Wiener Gemeindebezirk unterbunden. 21 Brunnenpaare wurden jeweils land- und wasserseitig der Dichtwand errichtet und bewerkstelligen heute die gezielte Grundwasserdotation des Gebietes (MA 45 - Wiener Gewässer, 2017).

Der beschriebene Aufstau bewirkt zudem eine erhöhte Wasserspiegeldifferenz zwischen Donau und Neuer Donau von rund 4,0 m im Bereich der oberen Stauhaltung, gemessen bei Mittelwasser. Durch diese Höhendifferenz entsteht bei Annahme einer mittleren Inselbreite von 200 m ein Potentialgefälle von 2,0 % quer zur Fließrichtung der Donau. Ein Großteil des Potentials wird jedoch durch die Kolmationsschicht beim Eintritt in den Grundwasserkörper der Donauinsel abgebaut (BLASCHKE *et al.*, 2002). Die Kolmatierung (= Selbstabdichtung der Gewässersohle) ist ebenfalls eine Folge des Aufstaus und wird in Kapitel 3.3.3 näher beschrieben.

Dem Grundwasserkörper der Donauinsel wird generell eine gute Durchlässigkeit zugeschrieben. BLASCHKE *et al.* (2003) geben einen mittleren Durchlässigkeitsbeiwert von $6,0 \cdot 10^{-3}$ m/s an. Im Zuge von Kurzpumpversuchen wurde ein mittlerer Wert von rund $4,5 \cdot 10^{-3}$ m/s ermittelt (DONAUKRAFT, 1995. zit. in REINER, 2012). REINER (2012) verwendet für ein Modell im selben Gebiet k_f -Werte zwischen 10^{-3} und 10^{-2} m/s. Für die Porosität werden Werte im Bereich von 0,1 angegeben. Die Kombination aus hohem Potentialgefälle und Durchlässigkeit resultiert in einer guten Durchströmung des Inselkörpers, welche temperaturbedingten saisonalen Schwankungen von bis zu 40 % unterliegt (BLASCHKE *et al.*, 2002).

3.3.2 Brunnenfelder Donauinsel Nord und Nußdorf

Wesentlichen Einfluss auf die Grundwasserbewegung im Untersuchungsraum hat der Betrieb der Brunnenfelder. In keinem der beiden Werke ist der Pumpbetrieb konstant, wodurch sehr unterschiedliche Strömungszustände im Untersuchungsgebiet vorliegen können. Folgende Abbildung zeigt die Lage der Brunnen im Untersuchungsraum.

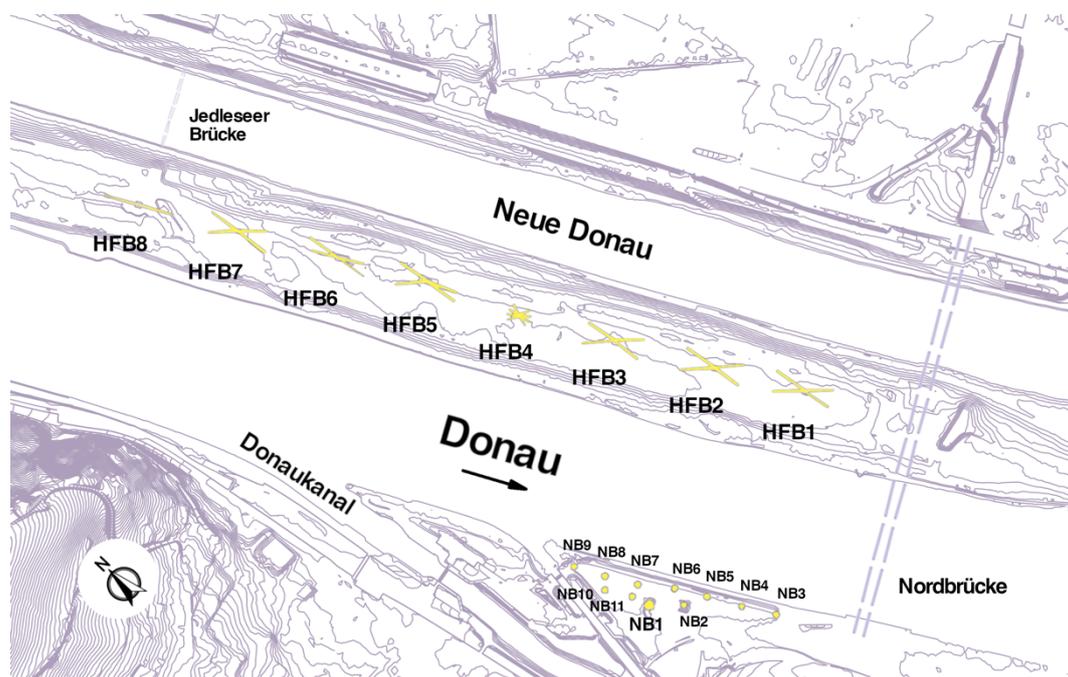


Abb.9: Lage der Brunnen im Untersuchungsraum

Das Grundwasserwerk Donauinsel Nord besteht aus einer Reihe von acht Horizontalfilterbrunnen (HFB), die inselmttig im Abstand von rund 200 m angeordnet sind. Die Ausbildung der Filterstränge in horizontaler Ebene ist bedingt durch die teils geringe Mächtigkeit des Aquifers, die in manchen Bereichen nur wenige Meter misst. Die einzelnen Brunnen zählen vier Stränge mit einer Länge von bis zu 70 m, die annähernd parallel zum Flussufer ausgelegt sind, um den Grundwasserstrom möglichst gleichmäßig zu erfassen. Ausnahme bilden HFB 8 mit lediglich zwei Strängen

und HFB 4 als zentral gelegener Brunnen mit acht kürzeren Filtersträngen, die sternförmig ausgerichtet sind. Das mögliche Fassungsvermögen aller Brunnen beträgt insgesamt 1200 l/s. Die Konsensmenge von 500 l/s kann daher auch bei Ausfall einzelner Brunnen problemlos gefördert werden. Für die Wasserentnahme ist das sogenannte "5cm-Kriterium" einzuhalten. Entsprechend dem Bescheid der obersten Wasserrechtsbehörde schreibt dieses ein Gefälle im Abstrombereich der Brunnen, von den ufernahen Sonden hin zur Neuen Donau, vor (HÜPER, 2005).

Das Brunnenfeld Nußdorf umfasst insgesamt 11 Brunnen, die alle als Schachtbrunnen ausgeführt sind. Brunnen NB1 sammelt das gesamte geförderte Wasser der Anlage und führt es weiter zur Aufbereitung. Die maximale Gesamtfördermenge im Untersuchungszeitraum liegt bei über 720 l/s.

Aufgrund der hohen Transmissivität des Grundwasserleiters und der Abdichtung des Flussbettes infolge Kolmatierung, beeinflussen sich die Brunnenfelder gegenseitig. Je nach Förderleistung kann der Betrieb des einen Brunnenfeldes zu einer Absenkung des Grundwasserspiegels auf der gegenüberliegenden Uferseite führen. Diese Interaktion wird im Abschnitt 3.4 genauer besprochen.

3.3.3 Kolmation

Unter Kolmation versteht man die Selbstverdichtung der Gewässersohle. In Fließgewässern ist sie häufig die Folge einer Stauerrichtung und der einhergehenden Reduzierung der Fließgeschwindigkeit im Stauraum. Dadurch wird das Transportvermögen im Fluss verringert und es kommt vermehrt zur Absetzung von feinkörnigen Partikel und Schwebstoffen, die sich im Porenraum der Flusssohle einlagern. Dies kann zu einer Abdichtung der obersten Zentimeter führen. Im Fall der Donauinsel wird dieser Effekt zusätzlich durch das hohe Potential quer zur Fließrichtung der Donau begünstigt. Der folglich höhere Filterwiderstand im Gewässerbett resultiert in einer verminderten Uferfiltratmenge, weshalb die Kolmation großen Einfluss auf den Grundwasserhaushalt der Donauinsel hat.

Untersucht wurde der Kolmationsprozess im Stauraum Freudenau während eines mehrjährigen Forschungsprojektes. Mithilfe von Videodokumentation der Gewässersohle sowie der Entnahme von ungestörten Sedimentproben gelang es die zeitliche Entwicklung während der Stauerrichtung zu dokumentieren (GUTKNECHT *et al.*, 1998). Vor der Stauerrichtung wurde im Bereich des Schulschiffs (Str.-km. 1931,7) eine mittlere Fließgeschwindigkeit von 1,6 m/s gemessen. Durch den Aufstau verringerte sich diese auf rund 0,9 m/s. Etwa zwei Monate nach Teilstauerrichtung (1996) wurde dort erstmals ein quasi-stabiler Zustand der Kolmationsschicht beschrieben. Die abgelagerten Partikel drangen nicht mehr ins Korngerüst ein und wurden weitertransportiert. Erst eine Erhöhung der Fließgeschwindigkeit hatte eine Auflockerung der oberen Schicht zur Folge. So konnte nach kleineren Hochwasserereignissen eine temporäre Dekolmation und eine Erhöhung der Durchlässigkeit festgestellt werden, die nach einigen Tagen wieder den ursprünglichen Zustand erreichte. Nach großen Hochwässern konnte dieser Effekt ebenso festgestellt werden, wobei es anschließend zu einer Durchlässigkeitsreduzierung kam, die deutlich unter der Ausgangsdurchlässigkeit vor dem Hochwasser lag.

Im Allgemeinen erklärt sich dieser Umstand zum einen durch den erhöhten Fest- und Schwebstofftransport während der Hochwasserereignisse. Zum anderen gehen mit dem Geschiebetransport räumlich stark unterschiedliche Erosions- und Anlandungsprozesse einher. So werden bereits verfestigte Kolmationsschichten nicht aufgelockert. Das frische Sediment liegt auf und kolmatiert in weiterer Folge. Der Kolmationsprozess wird also hervorgerufen durch die Reduzierung der Fließgeschwindigkeit. Wesentlicher Faktor für den Grad und die Geschwindigkeit der Ausbildung stellen allerdings der Schwebstoffgehalt und der Geschiebetransport im Strom dar.

Infolge mehrerer Kolmationszyklen kommt es im Laufe der Zeit im Stauraum Freudenau zu einer fortschreitenden Verdichtung des Gewässerbettes. Diese Entwicklung konnte im Forschungsprojekt bis etwa Ende 1998 beobachtet werden. Zu diesem Zeitpunkt war die Sohlverfestigung derart hoch, dass selbst große Hochwässer keine Dekolmationserscheinungen hervorriefen (GUTKNECHT *et al.*, 1998). Im Uferbereich hatte sich ein quasi-stabiler Zustand der Flusssohle eingestellt, welcher in den darauffolgenden Jahren in Richtung Strommitte fortschreiten sollte (BLASCHKE *et al.*, 2002).

BLASCHKE *et al.* (2002) gibt für die Kolmationsschicht der Donauinsel eine geringe Schichtdicke von wenigen Zentimeter an. Der Durchlässigkeitsbeiwert wird im Bereich von 10^{-7} m/s vermutet. Der Uferfiltratzufluss bekommt hinsichtlich der förderbaren Wassermengen des Grundwasserwerkes große Bedeutung. Aus diesem Grund waren nach Stauerrichtung Untersuchungen hinsichtlich der Änderung im Dargebot zentraler Bestandteil der Forschung (BLASCHKE *et al.*, 2002). Abbildung 10 zeigt die Entwicklung für die Jahre 1996 bis 2000.

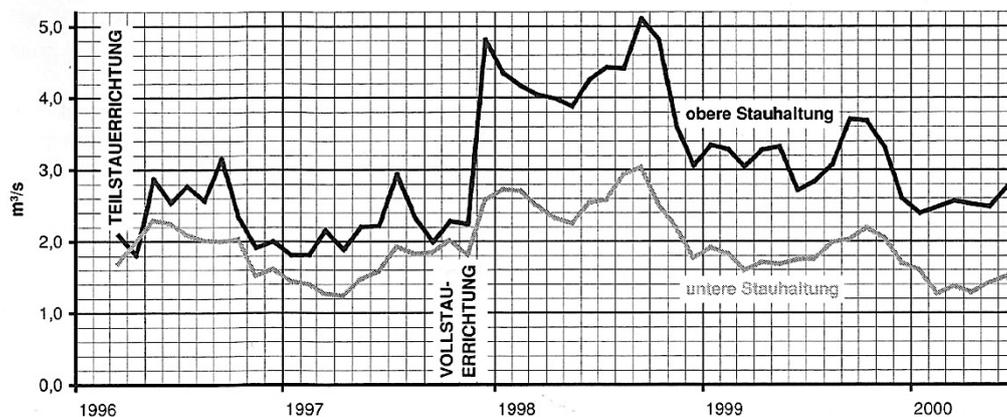


Abb.10: Uferfiltratzufluss zur Neuen Donau von 1996 bis 2000 (Quelle: Abb. aus Blaschke *et al.*, 2002, S.55)

Unmittelbar nach Vollstauerrichtung können Grundwasserzuströme bis zu $5,1 \text{ m}^3/\text{s}$ verzeichnet werden. Dieser Wert erklärt sich durch die große Wasserspiegeländerung und die, zu jenem Zeitpunkt, wenig ausgebildete Kolmationsschicht. Zwei Jahre später reduziert sich der Wert auf etwa die Hälfte. Die Verdichtung der Gewässersohle führt zur beträchtlichen Reduzierung des Dargebots und der gewinnbaren Wassermenge.

Diese Entwicklung war der Anlass zur Durchführung eines Dekolmationsversuches, dessen Ziel die quantitativen Auswirkungen ufernahe gelegener "Sohlpflegemaßnahmen" auf den Grundwasserhaushalt zu erfassen. Durch das Abheben der obersten Zentimeter konnte eine deutliche Erhöhung der Sohldurchlässigkeit festgestellt werden. Mithilfe eines einfachen Grundwassermodells wurde gezeigt, dass die Dekolmation eines 40 m breiten Streifen am Böschungsfuß zu einer Verdoppelung des Uferfiltratdargebots führt. Die Wirkungsdauer der Maßnahmen war jedoch auf drei Monate beschränkt, ehe das Dargebot auf den Ausgangswert zurückfiel. Dekolmationsbaggerungen in kurzen Abständen könnten den erhöhten Zustrom zwar aufrechterhalten - die Wirtschaftlichkeit dieser Vorgehensweise sei jedoch in Frage zu stellen.

3.4 Datenaufbereitung

In diesem Kapitel sollen die Messdaten, die dem Grundwassermodell zugrunde liegen, übersichtlich dargestellt werden. Dazu wird eigens in R (R Core Team 2018), einer Programmiersprache

für statistische Berechnungen, ein Programm geschrieben, welches den Umgang mit der beträchtlichen Datenmenge vereinfacht. Die Messungen beinhalten neben den Wasserständen der Donau und Neuen Donau, die Pumpmengen der Brunnenfelder Donauinsel Nord und Nußdorf, sowie die Piezometerhöhen der Grundwassermesssonden. Die Daten für die Erstellung dieser Arbeit wurden von der MA 31 und MA 45 der Stadt Wien sowie der Verbund AG zur Verfügung gestellt. Im Rahmen der gegenständlichen Fragestellung erscheint das Jahr 2017 für die Untersuchung sinnvoll. Dieser Zeitraum zeichnet sich durch eine nahezu lückenlose Datendokumentation im Untersuchungsgebiet aus und weist einen für die Modellierung geeigneten Betrieb der Brunnen vor. In Abbildung 11 ist das Messstellennetz der MA 31 abgebildet. Die Grafik verdeutlicht mit welcher hoher Dichte hydrologische Informationen auf der Donauinsel gesammelt werden. Darüber hinaus gibt es noch zahlreiche weitere Sonden auf der Donauinsel, die teils speziell für bestimmte Untersuchungsprogramme angelegt wurden und nicht mehr regelmäßig in Verwendung sind. Jene Sonden, die blau hinterlegt sind bilden die Datengrundlage für die Ausarbeitung dieser Arbeit. Sie unterliegen einem laufenden Monitoring Programm, wodurch stündliche Messwerte vorliegen.

Mithilfe von Ganglinien werden im Folgenden zunächst jene Einflüsse dargestellt, die den Grundwasserhaushalt der Donauinsel primär gestalten. Der nächste Schritt ist die Visualisierung sowie Erläuterung von Eigenheiten für die Messdaten des Jahres 2017. Im Anschluss folgt eine Gegenüberstellung mit Pegelmessungen ausgewählter Piezometer der Donauinsel, um anhand von Korrelationen Zusammenhänge darzulegen.

3.4.1 Oberflächengewässer

Abbildung 12 zeigt die Ganglinien der Oberflächengewässer im erweiterten Untersuchungsgebiet für das Jahr 2017. Die beiden tieferliegenden Linien stellen die obere und untere Stauhaltung der Neuen Donau dar. Gut ersichtlich ist der charakteristische Jahresverlauf der Neuen Donau, die in den wasserärmeren Sommermonaten angehoben wird, um eine Dotation der Donaualtarme zu bewirken. Die sprunghaften Änderungen sind zurückzuführen auf ein Öffnen der Ein- bzw. Auslaufbauwerke der Neuen Donau im Falle von Hochwasserereignissen. Die höchsten Pegel in der Grafik stammen von der Messstelle Korneuburg, rund 10 km stromauf gelegen, und vom oberen Einlaufbauwerk der Neuen Donau. Sie liegen am Rande des Stauraums, wodurch sich Schwankungen infolge von Hochwässern noch deutlich abzeichnen. Mit zunehmender Nähe zum Kraftwerk verringert sich die Amplitude der einzelnen Ereignisse. Die Messstelle der Floridsdorfer Brücke liegt etwa 1 km stromab der Modellgrenze und entspricht ungefähr den Verhältnissen im Untersuchungsgebiet. Der bedeutend flachere Verlauf veranschaulicht die Auswirkung der Stauung auf deutliche Weise. Während der Wintermonate führt die Donau bis zur Schneeschmelze im Frühjahr gewöhnlich weniger Wasser aufgrund geringerer Niederschläge. Dies lässt sich auch im betrachteten Jahr feststellen. Anhand der verschiedenen Pegelmessstellen ist ein Fließgefälle der Donau bestimmbar. Dieses liegt im Modellgebiet je nach Durchfluss zwischen 0,02 % und 0,1 %. Ausgenommen sind hierbei Hochwasserereignisse.

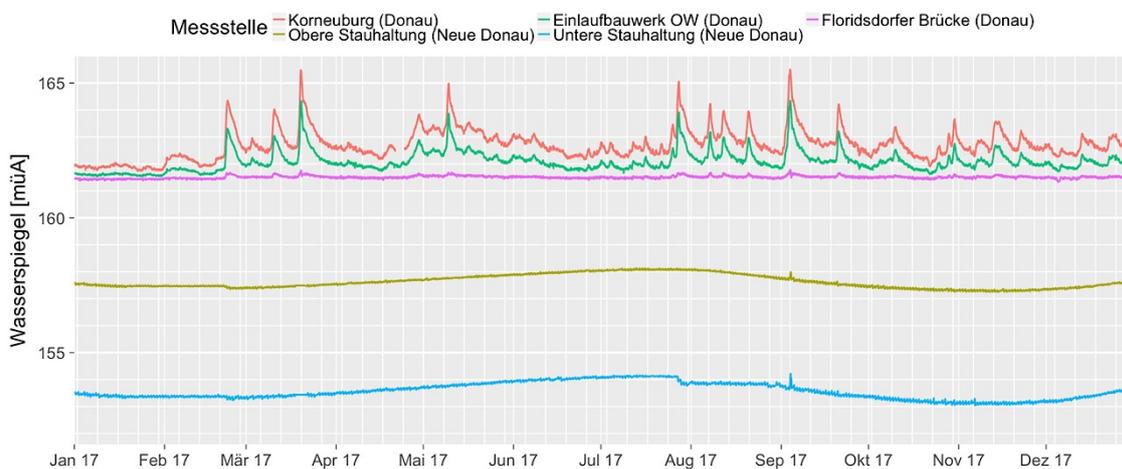


Abb.12: Ganglinien der Oberflächengewässer im umliegenden Raum des Jahres 2017

3.4.2 Pumpbetrieb

Die Grundwasserwerke Nußdorf und Donauinsel Nord unterliegen beide einem äußerst unregelmäßigen Betrieb. Während das Werk in Nußdorf eher kurze Inbetriebnahmen mit hohen Fördermengen aufweist, können beim Betrieb auf der Donauinsel deutlich weniger Ruhepausen verzeichnet werden. Dort liegt das geförderte Volumen über weite Strecken im Bereich von 200 l/s. Die Konsensmenge beträgt 500 l/s und wird nur im Februar des betrachteten Jahres erreicht. Durch die Darstellung der Fördermengen jedes einzelnen Brunnens ist ersichtlich, welche unterschiedliche Kombinationen im Pumpbetrieb vorliegen. Für den Betrieb in Nußdorf steht eine derartige Aufgliederung für diese Arbeit nicht zu Verfügung, weshalb es sich um die Gesamtfördermenge des Brunnenfeldes handelt.

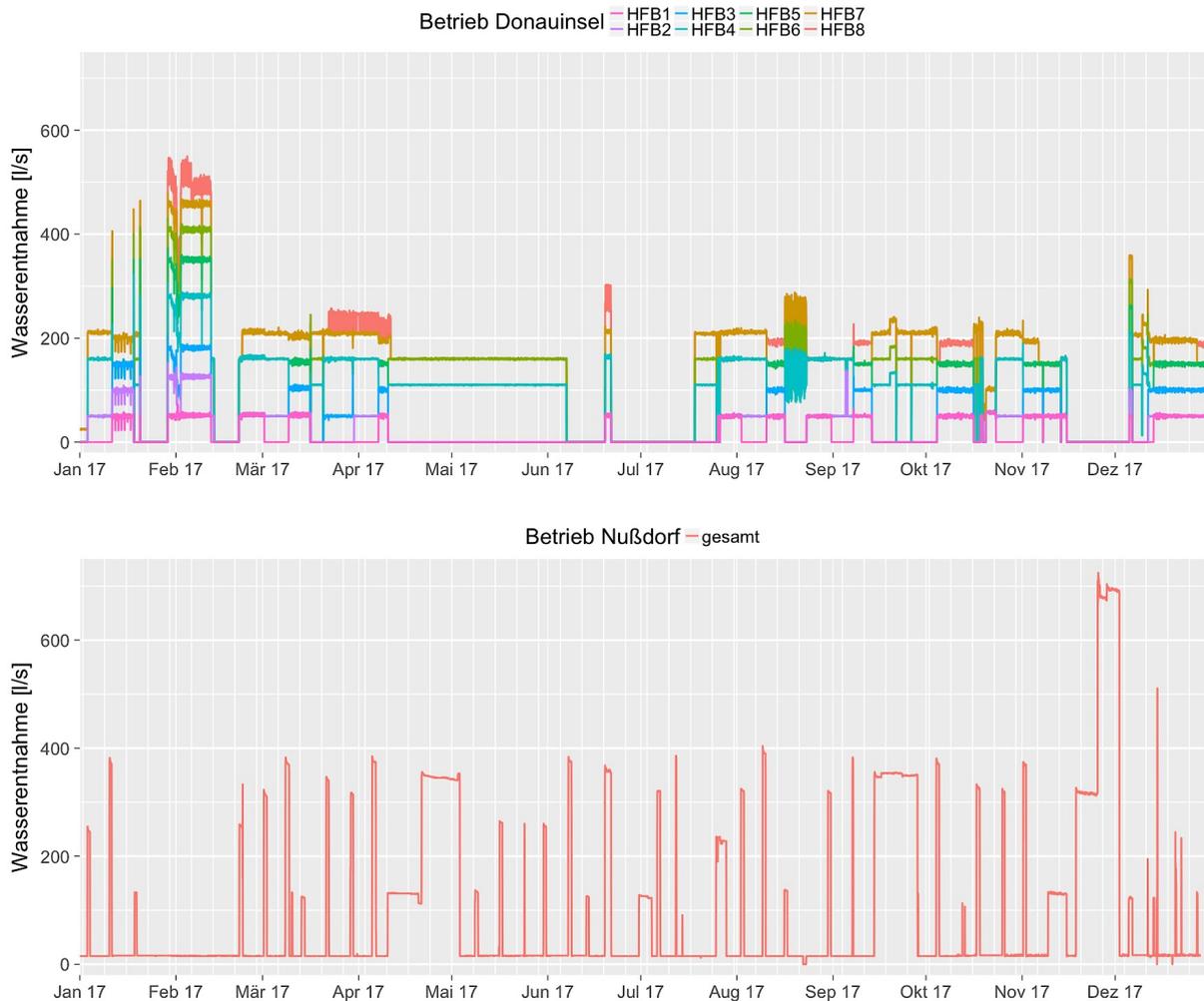


Abb.13: Fördermengen der Grundwasserwerke Donauinsel Nord und Nußdorf im Jahr 2017

3.4.3 Interaktion

Der unregelmäßige Pumpbetrieb der beiden Grundwasserwerke führt zu sehr unterschiedlichen Strömungszuständen im Aquifer. Abbildung 15 stellt die Entnahmemengen zusammen mit ausgewählten Sonden dar und soll die Beeinflussung der Grundwasserströmung verdeutlichen. Abbildung 14 visualisiert den räumlichen Konnex mit einer schematischen Darstellung der Einflussbereiche her. Zu Beginn des betrachteten Abschnitts sind lediglich HFB 4 und HFB 6 auf der Donauinsel in Betrieb. Mit dem Abschalten der Pumpen steigt der Wasserstand bis in den Bereich der Sonden DS33,19 und DS310 schlagartig an. Auf DS32,7 zeigt HFB 4 nur noch geringe Einwirkung. Kurze Zeit später gehen die Pumpen auf der Nußdorfer Seite für etwa 24 h mit einer Förderleistung von knapp 400 l/s in Betrieb. Unter diesen Bedingungen kann eine deutliche Absenkung auf dem gegenüberliegenden Bereich der Donauinsel bis hin zu Sonde DS220 im Uferbereich der Neuen Donau verzeichnet werden. Ein geringer Einfluss ist selbst noch auf Höhe des HFB 4 (DS410 und DS14) zu erkennen. Mit der Entnahmemenge von rund 120 l/s eine Woche später, ändert sich der Wasserspiegel nur geringfügig im donau nahen Bereich.

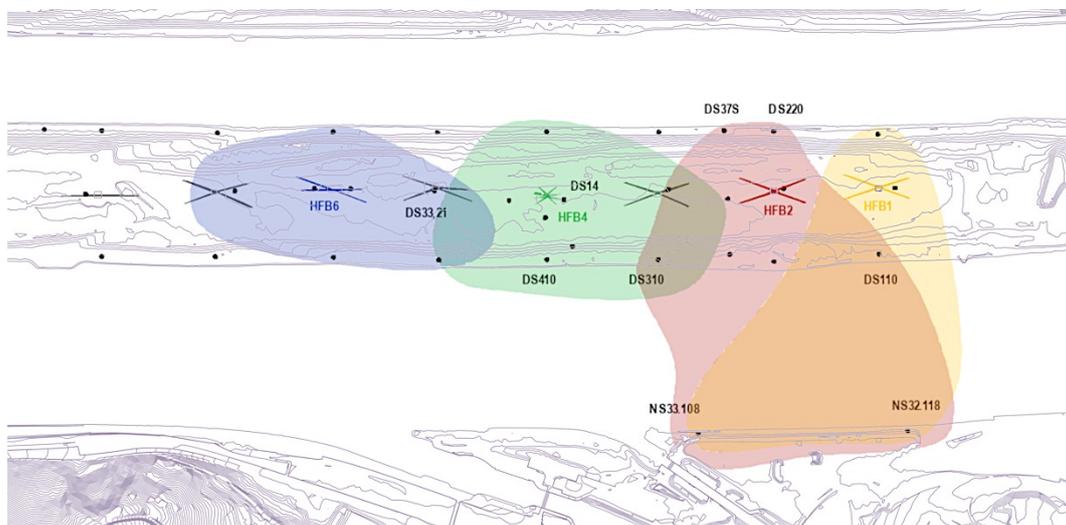


Abb.14: Einflussbereiche der Brunnen

Weitere sieben Tage darauf wird in Nußdorf die Entnahmemenge erneut auf 400 l/s angehoben. Zur selben Zeit gehen Horizontalfilterbrunnen HFB 1, HFB 4, HFB 7 und HFB 8 in Betrieb. Unter diesen Umständen erfahren erwartungsgemäß alle betrachteten Piezometer eine Absenkung. Bei den Pegeln am Ufer der Neuen Donau zeigt sich diese meist gering. Besonders auffallend ist jedoch die enorme Wasserstandsänderung in den Sonden NS33.108 und NS32.118 auf der Nußdorfer Seite. Diese lässt sich allerdings nicht ausschließlich auf den zusätzlichen Brunnenbetrieb der Donauinsel zurückführen. Da keine Aufschlüsselung über die Einzelförderleistung der Brunnen in Nußdorf vorliegt besteht die Möglichkeit, dass ein den Sonden näher gelegener Schachtbrunnen in Betrieb genommen wurde. Der Einfluss der Horizontalfilterbrunnen auf den Grundwasserstand im Brunnenfeld Nußdorf ist jedoch unbestritten und wird auch im nächsten Kapitel belegt. Allgemein ist festzustellen, dass Absenkung und Aufspiegelung äußerst rasch erfolgen. Diese Tatsache unterstreicht abermals die hohe Transmissivität des Aquifers.

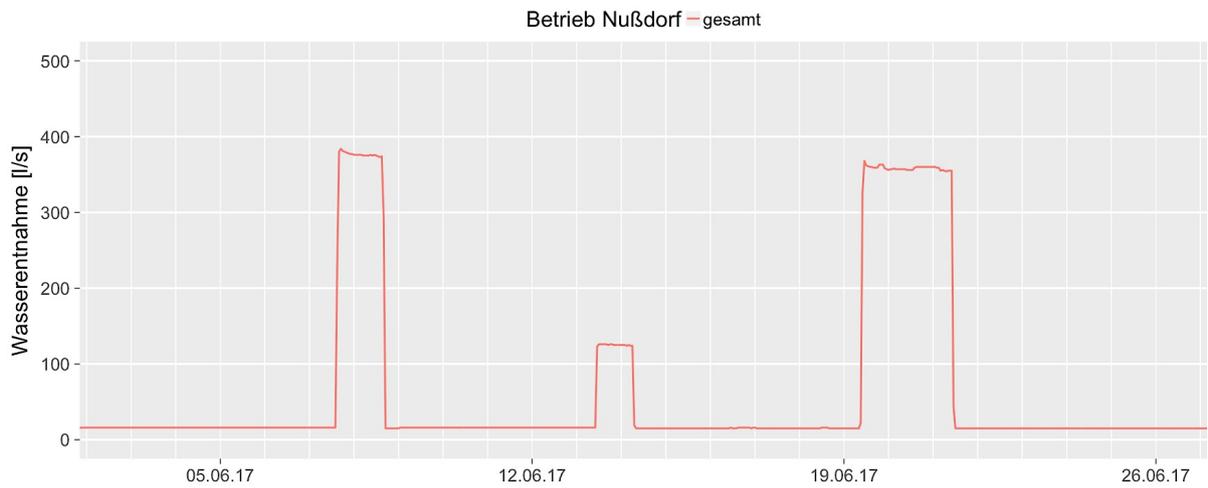
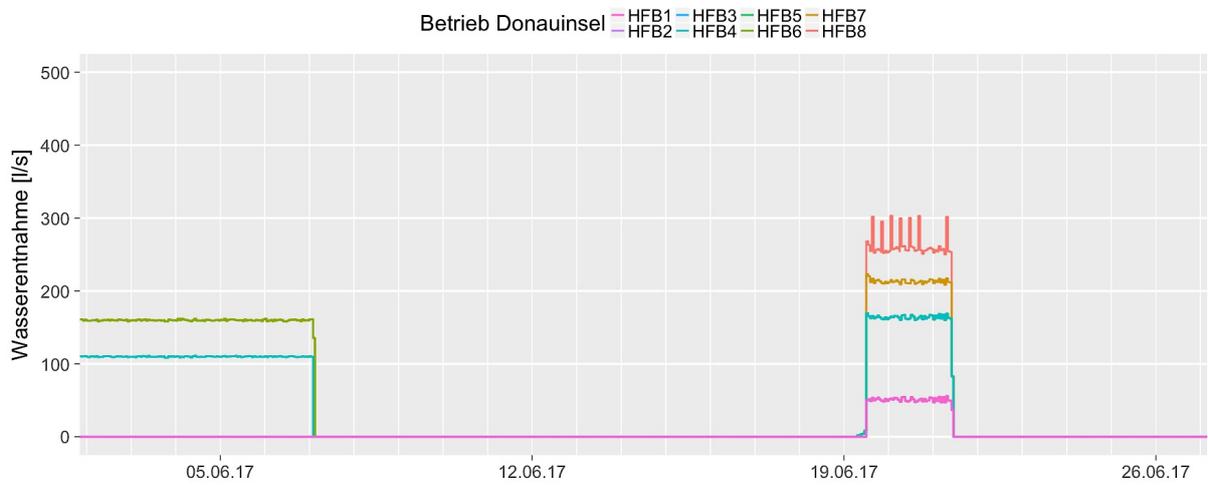
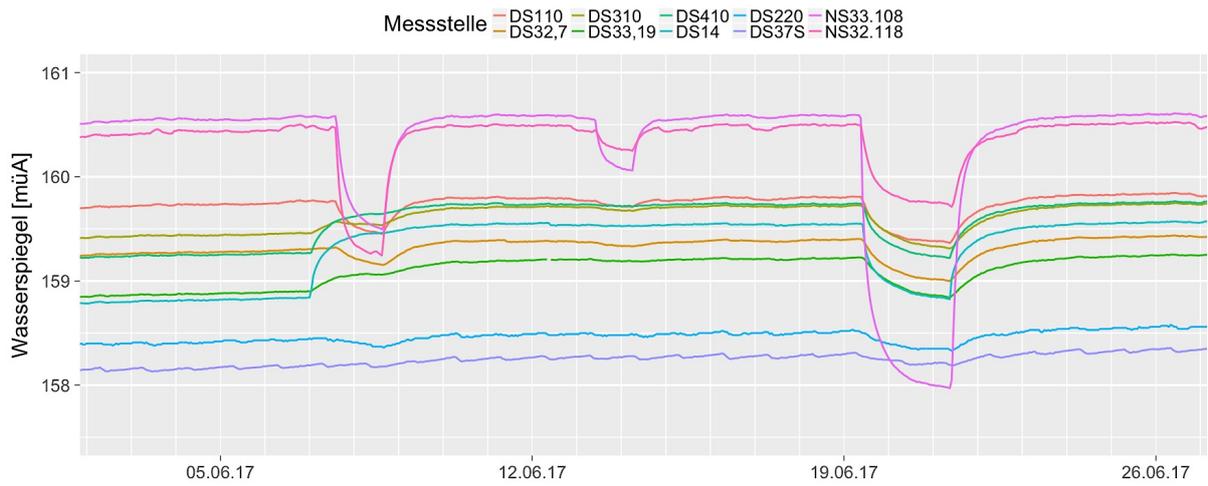


Abb.15: Interaktion der Brunnenfelder im Juni 2017

4 Konzeptmodell

Anhand der gewonnenen Erkenntnisse aus dem letzten Kapitel, sollen nun die Rahmenbedingungen für das Grundwassermodell festgelegt werden. Dabei ist die Definition der Modellgrenzen mit zugehörigen Randbedingungen und die Wahl eines geeigneten Zeitraums für die Kalibrierung relevant. Weiters wird entschieden, welche Prozesse als wesentlich gelten und ins Modell miteinbezogen werden und welche vernachlässigbar sind.

4.1 Randbedingungen

Die Wahl der Modellberandung ist von äußerst großer Bedeutung. Die verschiedenen Randbedingungen (RB) wurden bereits in Kapitel 2.1 beschrieben. Die geschickte Wahl der Grenzen vereinfacht die mathematischen Formulierungen und minimiert zugleich den Rechenaufwand. In Abbildung 16 und Abbildung 17 sind die systemspezifischen RB übersichtlich dargestellt.

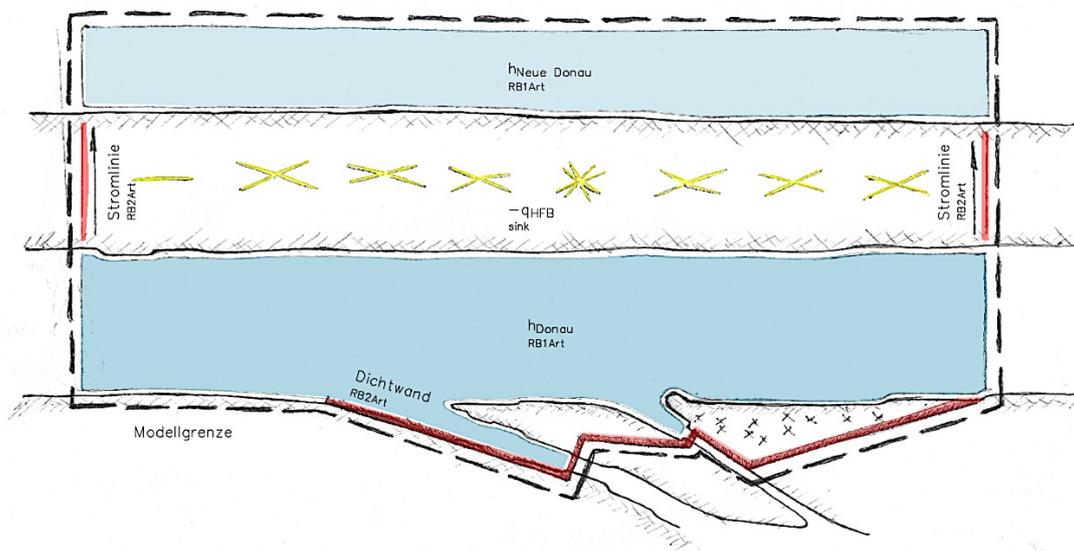


Abb.16: Schematische Darstellung der Modellgrenzen und Randbedingungen im Grundriss

Die Dichtwand auf der Nußdorfer Seite verhindert ein Zu- und Abströmen und stellt eine RB 2. Art mit einem Potentialgefälle von $\frac{\partial h}{\partial n} = 0$ dar. Unter Annahme einer idealisierten Durchströmung der Donauinsel, die ohne Betrieb der Brunnen quer zur Donaufließrichtung erfolgt und kein Potentialgefälle in Längsrichtung aufweist, verläuft die Stromlinie entlang des Randes stromauf und stromab der Insel. Diese natürliche Systemgrenze bildet ebenso eine RB 2. Art. Die Wasserstände der Donau und Neuen Donau sind bekannt und werden als piezometrische Druckhöhe h in Form einer RB 1. Art auf die Gewässersohle angesetzt. In vertikaler Ebene wird das Modell nach unten durch den Grundwasserstauer begrenzt, der ebenfalls einen dichten Rand und somit eine RB 2. Art darstellt. Die Wasserentnahme durch die Brunnen wird mittels Senkenterme realisiert.

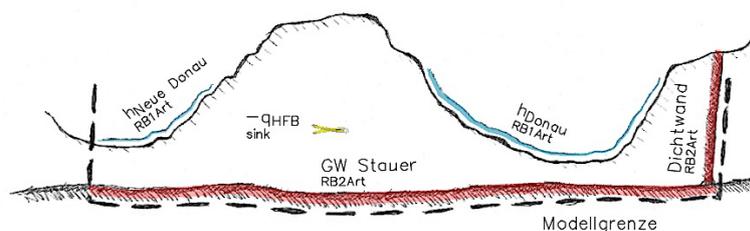


Abb.17: Schematische Darstellung der Modellgrenzen und Randbedingungen im Querschnitt

4.2 Ausbildung des Inselkörpers

Der in Kapitel 3.2 beschriebene Aufbau der Donauinsel spiegelt sich im Verlauf des Grundwassergefälles in Abbildung 18 wieder. Die Sonde DS410 liegt etwa 10 m von der Donau entfernt und verdeutlicht mit seinem bereits 240 cm tieferen Wasserstand den Einfluss der Kolmationsschicht. Die weiteren Sonden in Ufernähe zeigen einen vergleichbaren Abbau des Potentialgefälles in der Uferböschung, welcher auf den dichteren Aufbau der Böschung und die Kolmationsschicht zurückgeht. Die Pegel in Inselmitte liegen mit etwa 20 cm nur gering tiefer als die Randmessstellen und belegen durch den geringen Potentialabbau die hohe Durchlässigkeit des Inselkörpers. Zur Neuen Donau hin steigt das Gefälle erneut aufgrund des dichteren Uferausbaus. Die Kolmationsschicht und die Uferböschung haben im Inselkörper demnach eine besondere Bedeutung und müssen beim Aufbau des 3D Modells entsprechend berücksichtigt werden.

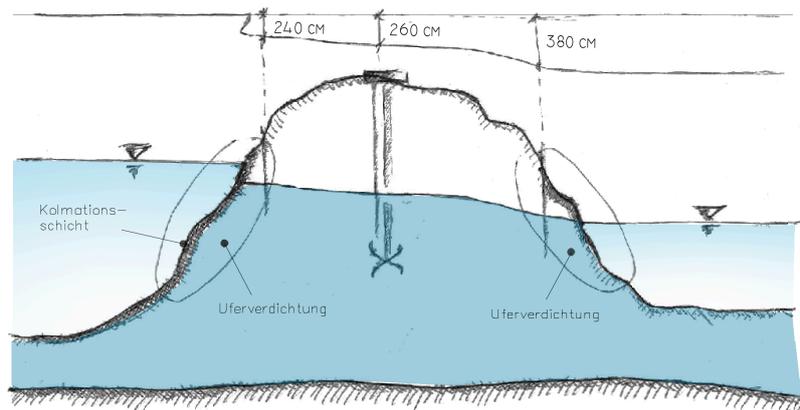


Abb.18: Schematische Darstellung des Potentialabbaus auf Höhe HFB 4

4.3 Zeitraum der Kalibrierung

Wesentlich für die Kalibrierung ist die Wahl eines geeigneten Zeitraums. Im Falle einer instationären Berechnung sind Anfangsbedingungen erforderlich, die den Grundwasserstand zu Beginn definieren. Es eignet sich den Startpunkt in einem Zeitabschnitt festzulegen, der möglichst wenig Änderungen aufweist und einem stationären Zustand gleicht. Damit lässt sich für die Anfangsbedingung das Ergebnis der stationären Berechnung im entsprechenden Zeitpunkt einsetzen. Abbildung 19 zeigt einen Abschnitt, der den genannten Anforderungen entspricht.

Wie bereits in Kapitel 3.4 beschrieben, zeigt sich der Beginn des Jahres 2017 mit einem geringeren Durchfluss der Donau eher unauffällig. In Abbildung 19 sind die Messdaten vom Beginn des Monats Februar dargestellt. Die Sonden DPNB1L und DPNB2L entsprechen den Wasserständen der Donau und Neuen Donau auf Höhe der Nordbrücke. Diese sind im betrachteten Zeitabschnitt annähernd konstant. Bis zum Einsetzen des Pumpbetriebs erfährt kein Pegel im Untersuchungsgebiet eine nennenswerte Änderung. Da alle Horizontalfilterbrunnen in Betrieb sind, wird im Zuge der Kalibrierung die Wirkung jedes einzelnen Brunnens und somit der gesamte Inselkörper berücksichtigt. Ein Einfluss von Seiten des Brunnenfeldes Nußdorf wird durch dessen Betriebsunterbrechung ausgeschlossen. Dennoch registrieren die Sonden NS33.108 und NS32.118 auf der Nußdorfer Seite einen sinkenden Grundwasserspiegel, was den Einfluss der Brunnenreihe Donauinsel Nord bestätigt. Die Sonden auf der Donauinsel verzeichnen alle eine schlagartige Absenkung, die trotz andauernder Förderleistung nach ca. einer Woche ihr Maximum erreicht.

Im Rahmen der Diplomarbeit wird der Fokus der Kalibrierung auf den Bereich des Aquifers im Bereich der Donauinsel gelegt. Die Interaktion mit dem Grundwasserwerk Nußdorf wird daher vorerst nicht berücksichtigt.

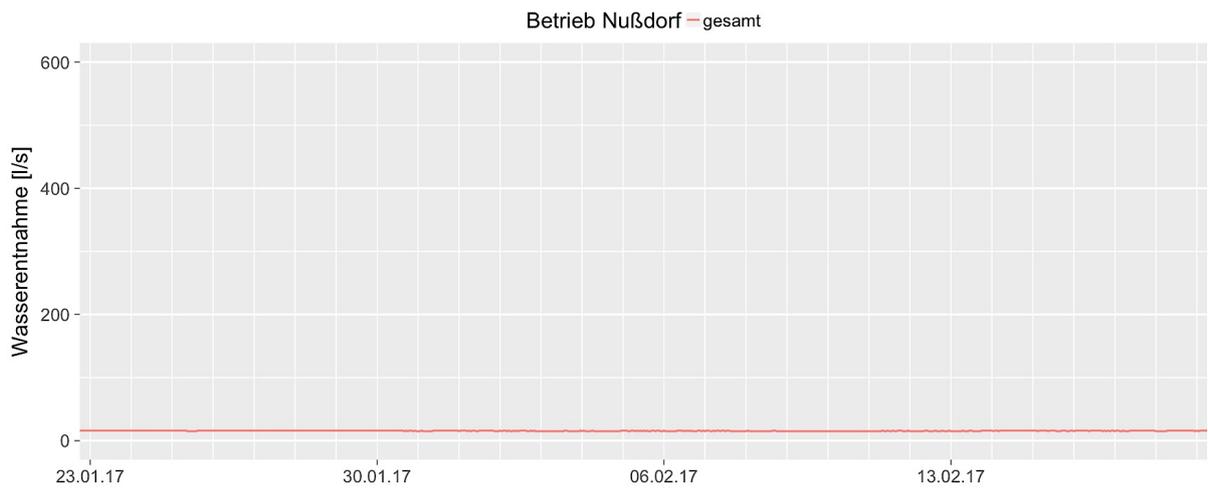
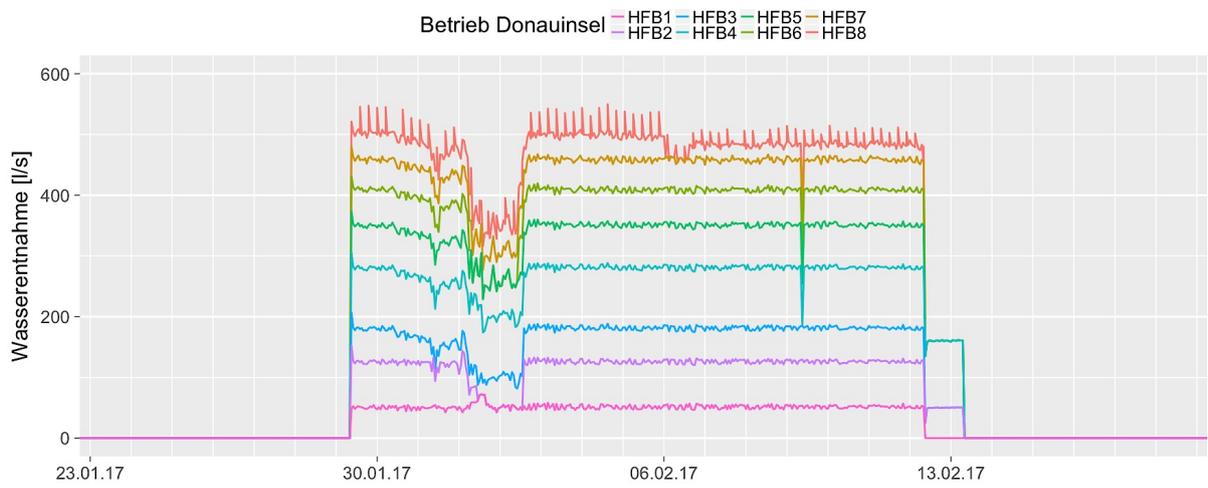
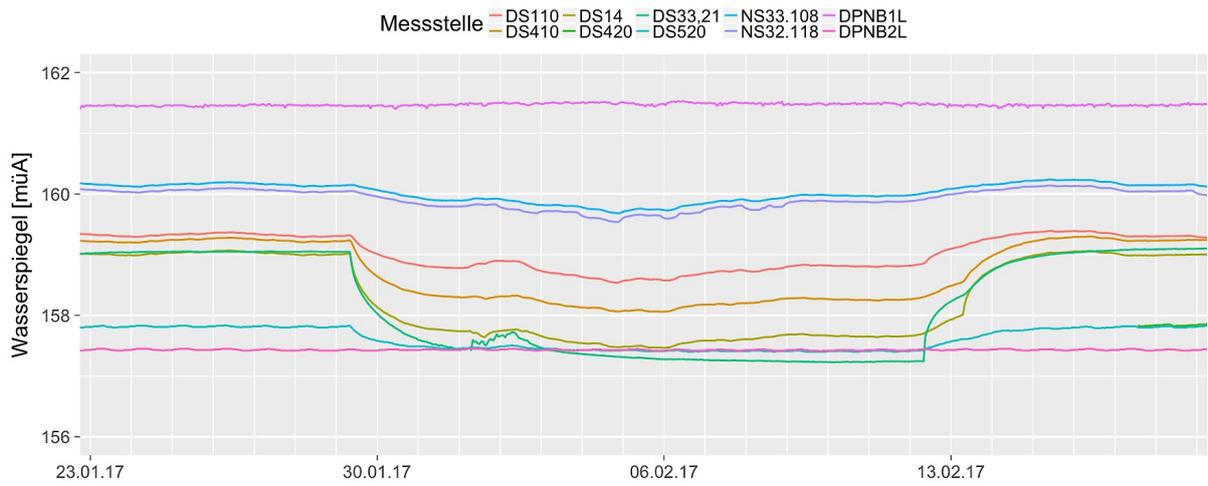


Abb.19: Gemessene Wasserspiegel und Entnahmemengen im Zeitraum der Kalibrierung

4.4 Weitere Annahmen und Vereinfachungen für die Modellierung

Der direkte Einfluss von Niederschlag auf den Grundwasserhaushalt der Donauinsel ist gering. REINER (2012) zufolge ist die Grundwasserneubildung durch Infiltration von Regenwasser auf der Oberfläche vernachlässigbar klein. Angesichts der Tatsache, dass im Falle eines Starkregenereignisses die Abhängigkeit des Grundwasserstandes vom steigenden Donaupegel weitaus höher ist, wird die Grundwasserneubildung durch Niederschlag vernachlässigt.

Weiters wird die Viskosität des Wassers als konstant angenommen. Der Ausgangswert ist eine mittlere Temperatur von 10°C , auf welche sich k_f -Werte in der Literatur im Regelfall beziehen. Der Einfluss der Temperatur ließe sich mit dem fertiggestellten Modell in einer einfachen Szenarioanalyse erheben.

5 Numerisches Grundwassermodell

Die Erstellung des Modells stellt den Schwerpunkt dieser Diplomarbeit dar. Durch die detailreiche Ausführung der Modellierung soll in erster Linie die genaue Erfassung der Grundwassermechanismen im System der Donauinsel erreicht werden. Kolmationsschicht, Schlufflinsen und Horizontalfilterbrunnen weisen kleine geometrische Abmessungen gegenüber dem gesamten Modellraum auf. Sie stellen jedoch äußerst einflussreiche Elemente im Grundwassersystem dar, weshalb auf die detaillierte Implementierung viel Wert gelegt wird. Die genaue Einarbeitung der Horizontalfilterbrunnen bewirkt einen erheblichen Mehraufwand gegenüber der einfacheren Modellierung von Vertikalfilterbrunnen. Neben einer eigenen Modellfindung erfordert es die Ausarbeitung der Geometrie, sowie eine gut überlegte Zonierung und Diskretisierung des Entnahmereichs.

Als weiteren Grund für die realitätsnahe Einarbeitung von Geometrien und Strukturen ist die Möglichkeit der außerordentlichen Visualisierung von Berechnungsergebnissen zu nennen. In seiner primären Funktion ist dieses Modell als Berechnungstool zur Schaffung neuer Erkenntnisse zu werten. Darüber hinaus soll es dienen, die erlangten Informationen auf ansprechende Weise nach außen zu tragen. Diesem Aspekt wird in der Modellierung oftmals weniger Beachtung geschenkt und soll bei der Erstellung berücksichtigt werden.

Dieses Kapitel erklärt die Erstellung des dreidimensionalen Finite Elemente Modells auf Basis des Konzeptmodells mithilfe mehrerer Softwarepakete. Die Aufbereitung des Geländemodells und koordinatenbehafteter Strukturen erfolgt im frei verfügbaren Geoinformationssystem QGIS (QGIS.ORG) und mit dem CAD Programm CIVIL 3D (Autodesk), das hauptsächlich im Bereich der Tiefbau- und Infrastrukturplanung Verwendung findet. Das FEM Modell wird in der eingangs beschriebenen Software SVFlux (SoilVision Systems Ltd.) generiert. Nach der Eingabe der Geometrie erfolgt die Definition der Untergrundeigenschaften und die Zuweisung von Anfangs- und Randbedingungen. Daran knüpft die Generierung des Berechnungsnetzes mit anschließender Ermittlung der Grundwasserströmung. Im Kalibrierungsprozess werden die berechneten Grundwasserstände mit den gemessenen Höhen der Piezometersonden verglichen und durch gezielte Variation der Bodenparameter versucht, den Fehler zwischen berechneter und gemessener Werte zu reduzieren. Der Vorgang der Kalibrierung ist abgeschlossen sobald das Modell den Grundwassermechanismus zufriedenstellend erfasst. Mit dem fertigen Modell können im Anschluss Simulationen und Szenarienanalysen durchgeführt werden um zukünftige Entwicklungen vorherzusagen.

5.1 Modellstruktur in SVFlux

SVFlux strukturiert seine Modelle in Form von *Regions* (Regionen), *Surfaces* (Flächen) und *Layer* (Schichten) (s. Abb. 20). *Regions* bezeichnen Bereiche im Grundriss. *Surfaces* dienen zur Unterteilung des Modells in vertikaler Ebene. Ein *Layer* wird definiert durch die Angabe einer *Top Surface* (Schichtoberkante) und einer *Bottom Surface* (Schichtunterkante). Im Modell kann eine *Region* aus mehreren *Layern* bestehen und verschiedene Untergrundschichten darstellen, oder auf einzelne *Layer* beschränkt werden um beispielweise einen Kern in einem größeren Volumenkörper zu definieren. Die Schnittmengen aus *Region* und *Layer* ergeben Volumina, denen Untergrundeigenschaften in Form von Materialien zugewiesen werden. Die Definition der Materialien basiert auf der Angabe charakteristischer Bodenkenngrößen und hydrologischer Parameter.

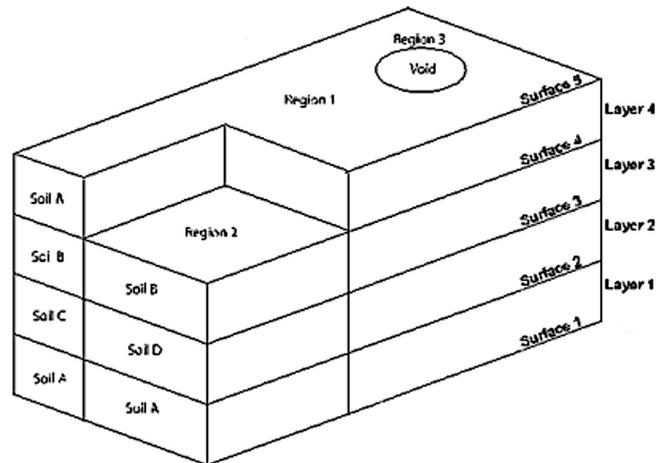


Abb.20: Struktur eines 3D Modells in SVFlux (Quelle: Thode, 2013)

Zu Beginn ist eine simple Betrachtungsweise sinnvoll um sich schrittweise an das Modell in seiner vollständigen Komplexität heranzutasten. Nicht nur das Kalibrieren, auch das Erstellen der Geometrie in SVFlux stellt sich als ein iterativer Prozess heraus, der ein Hinzufügen bzw. Entfernen von Komponenten und Materialeigenschaften verlangt. Vom Modell und im Speziellen vom generierten Berechnungsnetz sind bestimmte Bedingungen zu erfüllen um die Lösbarkeit des Partiiellen Differentialgleichungssystems zu bewerkstelligen. Liegen numerische Probleme vor, muss die Berechnung vorzeitig abgebrochen werden um den Fehler ausfindig zu machen. Bei der vorliegenden Komplexität sind diese jedoch nicht gleich ersichtlich und in manchen Fällen gelingt es auch nicht die Fehlerquellen zu eliminieren. In diesem Fall bleibt nur der Schritt zurück und der Versuch mit einem alternativen Ansatz.

Durch anfängliche Beschränkung auf wenige Regionen, Durchführung von stationären Berechnungen und Vernachlässigung des ungesättigten Materialverhaltens wird der Rechenaufwand geringgehalten und es lassen sich schneller erste Ergebnisse ermitteln. Durchaus sinnvoll ist es, Konzepte zuerst in 2D auf Anwendbarkeit und Richtigkeit zu überprüfen, bevor sie dem dreidimensionalen Modell zugefügt werden. Die Rechenleistung der Hardware steigt enorm mit wachsendem Umfang der Struktur. Aus diesem Grund werden während dem Aufbau des Modells weitere Vereinfachungen angenommen um die Rechenzeit im Rahmen zu halten. Schlussendlich soll ein numerisch kompatibles Modell vorliegen, welches die für die Problemstellung geforderten Prozesse ausreichend gut abbildet und überdies die Berechnung in einer akzeptablen Zeit durchführt.

Nachfolgend werden die einzelnen Komponenten des Modells zur besseren Nachvollziehbarkeit nach Kategorien geordnet angeführt, ohne die chronologische Entstehung im Entwicklungsprozess zu berücksichtigen.

5.1.1 Eingabe der Modellgeometrie

Auf die realitätsnahe Darstellung der Geländeoberfläche und die Visualisierung prozessregulierender bzw. einflussreicher Elemente wird beim Aufbau des Modells besonderer Wert gelegt. SVFlux ist hinsichtlich der direkten Konstruktion aufwändiger Geometrien und im Umgang mit Koordinaten nur bedingt geeignet. Aus diesem Grund werden die Geländeoberfläche und weitere Elemente zuerst in CIVIL 3D aufbereitet und anschließend in SVFlux importiert. Der große Vorteil des Programmes liegt in der einfachen Handhabung von räumlichen Daten geografischer Informationssysteme. Dies umfasst den Import und Export von Digitalen Gelände Modellen (DGM) und Koordinatenpunkten in den verschiedensten Formaten sowie deren Transformation und Verknüpfung.

Zunächst wird das DGM des Untersuchungsgebietes in CIVIL 3D eingelesen (Datenquelle: Stadt Wien - data.wien.gv.at). Dieses beinhaltet Punkte der natürlichen Erdoberfläche, die oberhalb der Gewässeroberfläche liegen. Das Gewässerbett wird mithilfe vorhandener Querprofile der Donausohle ergänzt, die 1997 im Zuge der Erfassung der Flussmorphologie anhand von Echolotmessungen im Abstand von rund 100 m erhoben wurden (GUTKNECHT *et al.*, 1998). Zwischen den Profilen ermöglicht eine Interpolation das Flussbett zu vervollständigen. Anschließend werden im Grundriss die Dichtwand des rechten Donauufers und die Horizontalfilterbrunnen der Donauinsel unter Zuhilfenahme von Plänen im Grundriss konstruiert. Die Koordinaten der Grundwassermessstellen sind bekannt und werden ebenfalls eingelesen. Am vorliegenden Lageplan lassen sich die Modellgrenzen auf einfache Weise grafisch definieren. In der Länge misst die gewählte Berandung 1760 m und bis zu 860 m an der breitesten Stelle im Bereich der Dichtwand.

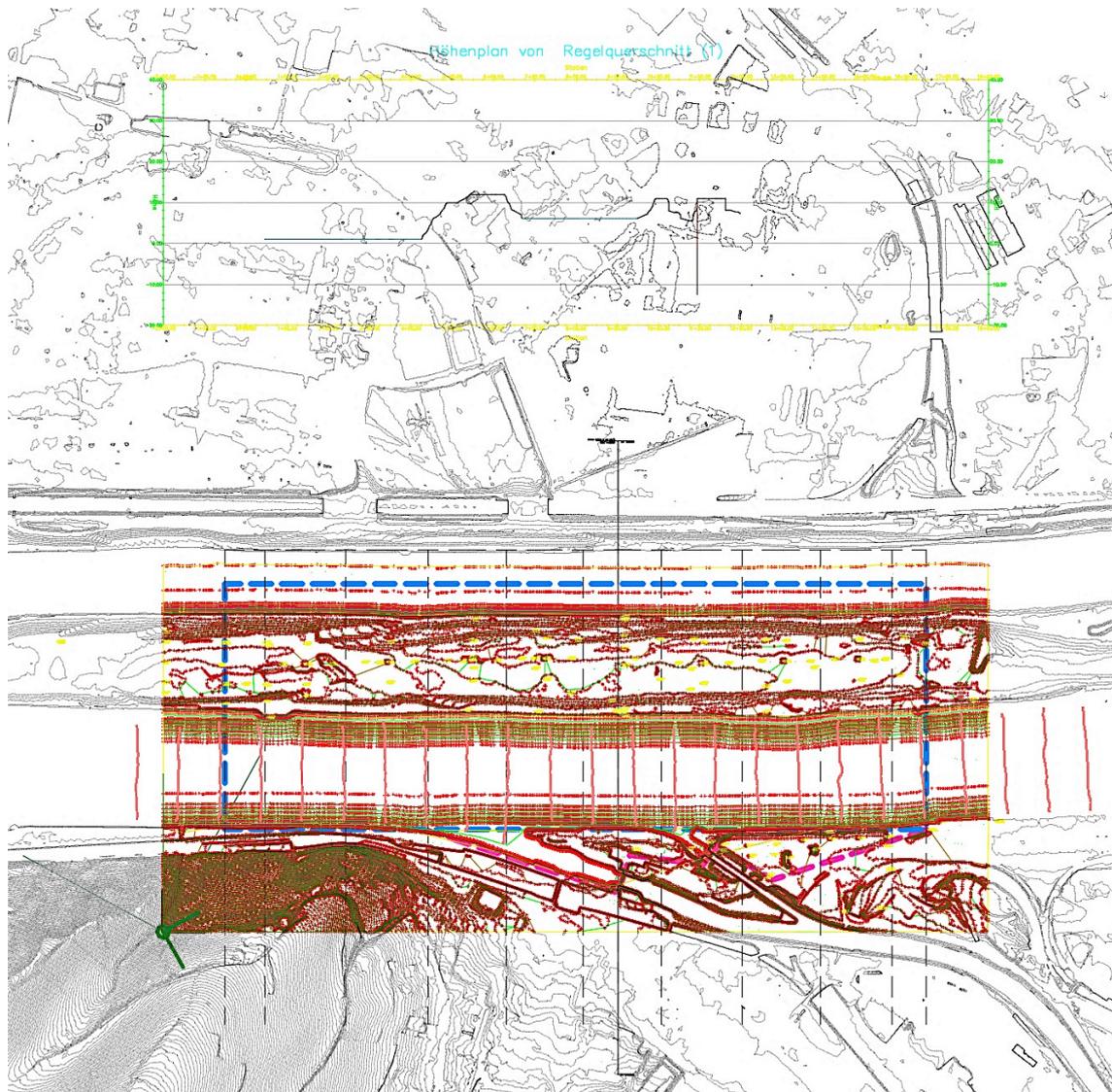


Abb.21: Planung und Geländekonstruktion in Civil 3D

Das Geländemodell sowie die gezeichneten Geometrien lassen sich als Koordinatentripel (x,y,z) exportieren. In diesem Format können sie auch von SVFlux eingelesen werden.

In SVFlux wird zu Beginn ein erweiterter Modellierungsraum definiert. Dabei erfolgt die Eingabe der Geländeoberfläche als *Top Surface*, des Grundwasserstauers als *Bottom Surface* und einer *Region*, welche die Abmessungen der Modellgrenzen in etwa um 10 % übersteigt. Um die Menge der

oberflächenbeschreibenden Punkte beim Import zu reduzieren, werden sie auf einem Raster interpoliert. Die Abstände werden vom Anwender festgelegt und stellen gleichzeitig die Grundlage für die spätere Diskretisierung des Modells dar, zumal jeder Kreuzungspunkt im Raster einen festen Knoten im Berechnungsnetz darstellt. In Längsrichtung wird über den gesamten Modellbereich ein Rasterabstand von 40 m vorgegeben. In Querrichtung liegt durch die Uferböschung ein größerer Oberflächengradient vor, weshalb der Abstand mit 10 bzw. 20 m deutlich enger gewählt wird. Die Lage des Grundwasserstauer ist anhand der Auswertung der Bohrprofile nur in wenigen Punkten bekannt. Basierend auf der Kenntnis, dass die Flyschdecke stromauf um einige Meter ansteigt und zum Kahlenberg hin ausstreicht, werden weitere Punkte im Randbereich angenommen und die restliche Fläche zwischen den Stützpunkten interpoliert.

Abbildung 22 zeigt den erstellten Modellraum mit der Geländeoberfläche und dem Grundwasserstauer. Diese und sämtliche folgende Grafiken des 3D Modells in SVFlux sind in einer 10-fach überhöhten Darstellung ausgeführt. Die unverzerrte Ansicht lässt eine übersichtliche Visualisierung aller Informationen aufgrund der geringen Höhenausdehnung des Modells im Verhältnis zu den Abmessungen in der Ebene nicht zu.

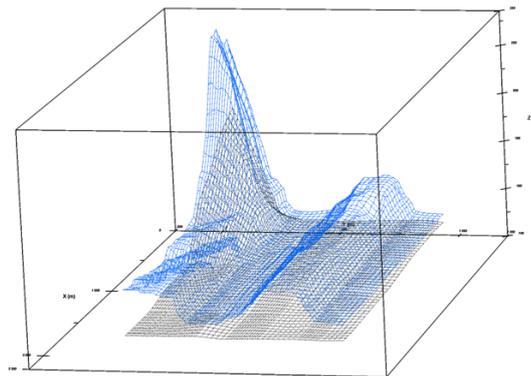


Abb.22: Der erweiterte Modellraum in SVFlux

Im nächsten Schritt passiert die Unterteilung in vertikaler Richtung durch die Definition neuer *Surfaces* (s. Abb. 23). Hierzu wird vorab überlegt, welche Schichten bzw. Komponenten im Modell implementiert werden. Für die Ausbildung von Kolmationsschicht, Schlufflinsen und Horizontalfilterbrunnen bedarf es jeweils der Definition einer begrenzenden Fläche auf der Ober- und Unterseite. Dementsprechend ist das Anlegen fünf weiterer *Surfaces* erforderlich.

An dieser Stelle sei erwähnt, dass jede Fläche in SVFlux über den gesamten Modellraum definiert werden muss, um die Lösbarkeit des Differentialgleichungssystems zu garantieren. Die Flächen dürfen sich in keinem Punkt schneiden, ein Ineinanderlaufen ist jedoch möglich. Dies führt zu sogenannten *Pinch-Out-Zones*, deren Ausbildung gut durchdacht werden muss, zumal deren Lage stets auf einer Regionsgrenze eine zwingende Bedingung ist. Das Erstellen der Flächen erfolgt entweder durch Versatz von bestehenden Flächen bzw. Flächenabschnitten oder durch Angabe von Punkten und anschließender Interpolation auf dem definierten Raster. Unter Vorgabe von Mindestschichtdicken eines *Layers* kann einem Überschneiden von Flächen vorgebeugt werden.

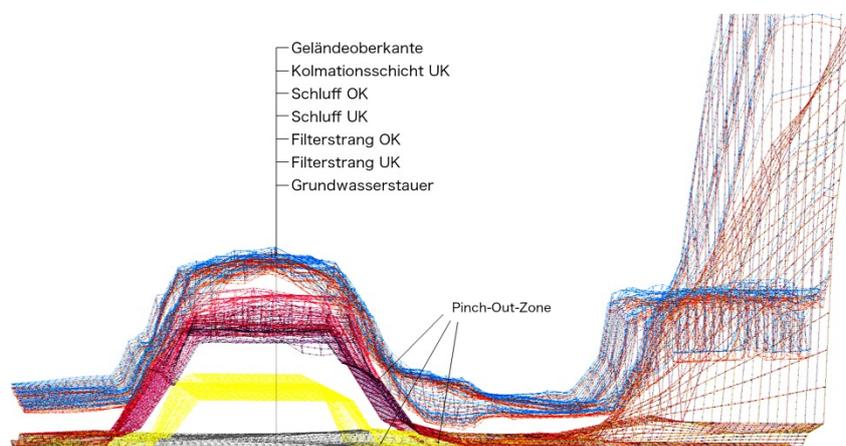


Abb.23: Vertikale Unterteilung mit *Surfaces* (Ansicht in Fließrichtung)

Die Kolmationsschichtunterkante wird durch vertikalen Versatz der Geländeoberfläche erzeugt. Je nach Bereich und vorliegendem Geländegradienten beträgt dieser zwischen 30 und 70 cm, sodass im Mittel eine Kolmationsschicht von rund 30 cm Stärke vorliegt. Für die Filterstränge wird eine 1 m dicke Schicht in einer Tiefe zwischen 153 und 155 müA angenommen. Diese Mächtigkeit ergibt sich aus Überlegungen zur Filterkiesschicht, welche die rund 200 mm starken Filterrohre umgibt und eine deutlich höhere Durchlässigkeit aufweist als der umliegende Untergrund. Das Konstruieren der schluffschicht-definierenden Flächen erfolgt in Anlehnung an die Ausarbeitung der Schlufflinsen in REINER (2012). Bei der Erstellung aller *Surfaces* wird auf die oberflächennahe Verdichtung im Bereich der Böschung Bedacht genommen, weshalb die Ausbildung mehrschichtig erfolgt. Erst im Abschnitt des Böschungsfußes werden die Flächen zusammengeführt.

Nachdem alle erforderlichen *Surfaces* angelegt sind, folgt die weitere Unterteilung des Modells im Grundriss. Für Regionen gilt dabei dieselbe Bedingung wie für Flächen - sie dürfen sich in keinem Punkt schneiden. Regionen, die innerhalb einer anderen Region erstellt werden, können bereits vorhandene Eigenschaften überschreiben. Es ist demnach möglich während des Bearbeitungsverlaufes die Unterteilung nach Erfordernis anzupassen. Zunächst wird daher lediglich eine Segmentierung in Längsrichtung vorgenommen - in Streifen, die hydrologischen Einheiten mit ähnlichen Eigenschaften gleichen (siehe Abb. 24).

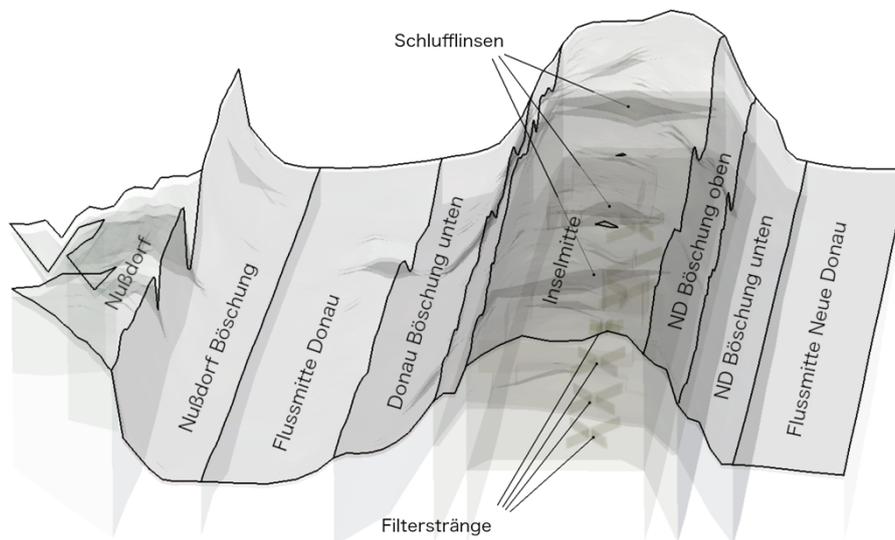


Abb.24: Vorläufige Regionalisierung (Ansicht gegen Fließrichtung)

Ein weiterer Schritt ist die Erstellung der Regionen für die Horizontalfilterbrunnen und Schlufflinsen. Die Filterstränge werden durch Import der zuvor aufbereiteten Koordinaten angelegt. Dabei entspricht die Lage der Schlufflinsen REINER (2012). Beide Regionen werden in vertikaler Ebene auf ihren jeweiligen *Layer* beschränkt, wodurch sie quasi freistehende Volumina im Inselkörper darstellen.

Der Bereich am Fuße des Kahlenberges liegt nicht innerhalb der betrachteten Grenzen und wird von der Berechnung ausgeschlossen. In grafischen Darstellungen des Modellgebiets dient er lediglich der Vervollständigung des Bildes und der Orientierung.

5.1.2 Definition Materialien

Nach Eingabe der Geometrie erfolgt die Zuordnung der Untergrundeigenschaften in Form von Materialien. Dabei wird die Anzahl zu Beginn wiederum geringgehalten. Im Zuge der Kalibrierung ist es dann möglich die erweiterte Differenzierung vorzunehmen. Entsprechend Abbildung 25

werden vorerst sechs Materialgruppen erstellt, die alle auf einem gesättigten Materialmodell basieren (siehe Tab. 2). Den größten Einfluss üben hierbei der k_f -Wert und die effektive Porosität n_{eff} aus. Die zugewiesenen Werte orientieren sich an den Ergebnissen vorangegangener Forschungsarbeiten im nahen Untersuchungsraum (BLASCHKE *et al.*, 2002; DERX *et al.*, 2010; REINER, 2012) sowie allgemeinen Richtwerten aus der Literatur (DAVID, 1998; HÖLTING, 1980; SCHEFFER u. SCHACHTSCHABEL, 1998).

Tab.2: Anfangs gewählte Materialparameter

Material	k_f [m/s]	k_f [m/h]	n_{eff} [-]
Schotter Insel	5,0e-3	18	0,28
Schotter Flussbett	4,5e-1	16	0,26
Schluff	1,0e-5	0,036	0,14
Sand	5,6e-4	2	0,20
Kolmation	2,8e-7	0,001	0,12
Filterstränge	2,3e-2	84	0,36

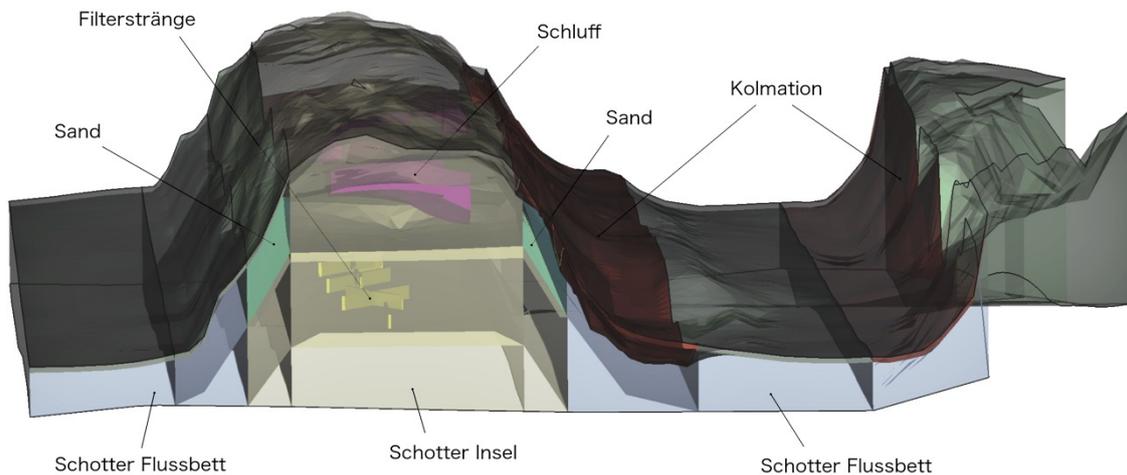


Abb.25: Erstmalige Verteilung der Materialien vor der Kalibrierung (Ansicht in Fließrichtung)

5.1.3 Räumliche Diskretisierung

Die Zerlegung des Modells in Elemente nimmt SVFlux automatisch vor. Ebenso wird das Netz (*Mesh*) während der Berechnung fortlaufend adaptiert, beispielsweise in Bereichen, die sich durch eine große Strömungsdynamik auszeichnen und für die Lösung eine höhere Auflösung verlangen (s. Abb. 26). Der Anwender kann jedoch selber Einstellungen treffen, die das Verhalten der Software steuern. So werden durch die Angabe von Minimal- bzw. Maximalabständen der Knoten oder deren Maximalanzahl, Rahmenbedingungen für die automatische *Mesh* - Generierung definiert.

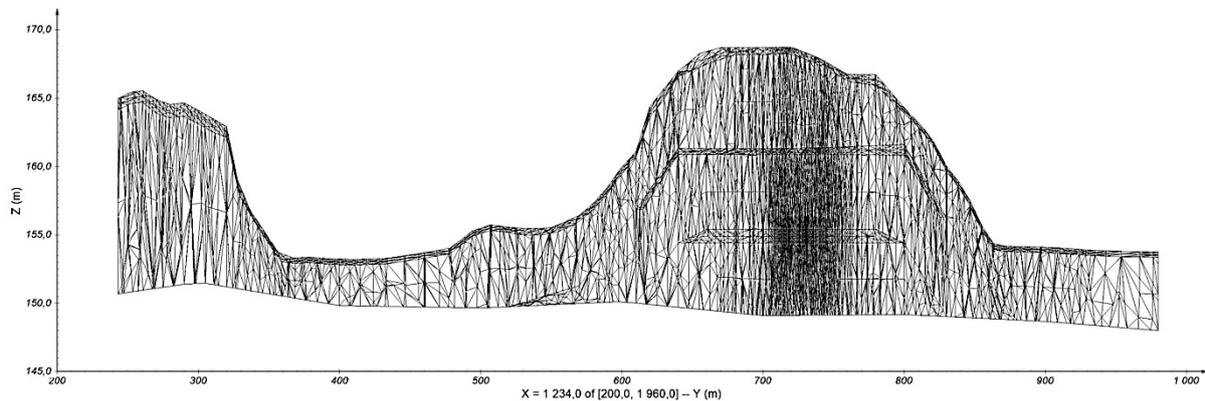


Abb.26: Automatische *Mesh*-Verdichtung im Bereich kleiner Geometrien

Beim vorliegenden Modell stellen insbesondere die Kolmationsschicht, deren Höhe sehr gering im Verhältnis zu den Abmessungen in der Ebene ist, und der Bereich in der Inselmitte mit den zahlreichen kleinen Regionen für Filterstränge und Schlufflinsen eine Herausforderung dar. Die große Nähe der Grenzen zueinander kann zu einer übermäßigen Verdichtung und ebenfalls zu Fehlern in der Netzgenerierung führen. Sofern die Möglichkeit besteht ist es daher sinnvoller Regionsgrenzen entsprechend anders zu setzen. Auch in den *Pinch-Out-Zones* sind manuelle Adaptierungen im Berechnungsnetz erforderlich. Eine lokale Verfeinerung des Netzes behebt zumeist das Problem, geht jedoch gleichzeitig mit einem erhöhten Rechenaufwande einher. Diese Folgerscheinung kann durch die Vergrößerung der Elemente in wenig relevanten Bereichen verringert werden.

5.1.4 Zeitliche Diskretisierung

Anhand der Überlegungen in Kapitel 4.3 dient der Kalibrierung des Modells der Abschnitt zwischen 28.01.17 00:00 und 06.02.17 00:00. Dieses Intervall wird unterteilt in Zeitschritte (*Time Steps*), für die jeweils die Berechnung des Systems erfolgt. Für die zeitliche Diskretisierung wird ein Inkrement dt von einer Stunde festgelegt. Die betrachtete Zeitspanne von neun Tagen entspricht somit insgesamt 217 Berechnungsschritten. Definiert der Jahreserste den *Step 0*, befindet sich der Startpunkt bei *Step 648*, das Einsetzen der Pumpen liegt bei *Step 672* und mit *Step 864* endet die Kalibrierung.

SVLUX unternimmt auch eine automatische Anpassung der zeitlichen Diskretisierung. Bei Bedarf verringert sich das Zeitinkrement dt um die Stabilität der Berechnung und ein Konvergieren der Lösung sicherzustellen. Dies tritt in der Regel zu Beginn des Rechenvorgangs auf, wenn die aus der stationären Berechnung ermittelten Anfangsbedingung nicht dem eigentlichen Zustand in der instationären Berechnung entspricht. Der Ausgleich des Fehlers erfordert die Bearbeitung in kleineren Zeitschritten. Auf gleiche Weise passt SVFlux das Zeitinkrement auch nach oben an, sofern die Berechnung dies erlaubt.

5.1.5 Randbedingungen

Im letzten Schritt der Modelleingabe werden die Randbedingungen entsprechend der festgelegten Modellgrenzen zugewiesen. Nicht definierte Seitenwände an der Modellgrenze betrachtet die Software automatisch als dicht. Die Dichtwand sowie die Kopfseiten des Inselkörpers sind daher von vornherein mit einer *Zero Flow* - Randbedingung belegt. An der Uferseite zur Neuen Donau wird der *Top Surface* in der Gewässersohle und im Böschungsbereich eine *Head Data Flow* - Bedingung mit den tatsächlichen Wasserständen im betrachteten Zeitraum zugewiesen. Diese Rand-

bedingung unterteilt den Uferbereich in Abhängigkeit des Wasserstandes in zwei Segmente. Oberhalb des Wasserspiegels entspricht sie einer *Zero Flow* - Bedingung, unterhalb ist je nach vorliegendem Potentialgefälle ein Ein- und Ausströmen möglich. Da es sich um ein stehendes Gewässer handelt, ist die Druckhöhe in einem Zeitschritt über die gesamte Modelllänge konstant. Donauseitig liegt ein Gefälle vor. Von Seiten der Software ist es nicht möglich dieses gemeinsam mit dem Datensatz der Donauwasserstände innerhalb einer Randbedingung zu verknüpfen. Um den gegebenen Sachverhalt zu berücksichtigen sind zwei separate Berechnungsdurchgänge erforderlich. Die daraus folgende Verdopplung der Rechenzeit auf 4 Stunden wäre jedoch unannehmbar. Aus diesem Grund wird abgewägt welche der beiden Bedingungen größeren Einfluss auf die Berechnung hat. Die Wasserstandschwankungen der Donau betragen innerhalb des Kalibrierungszeitraums weniger als 10 cm und sind als gering einzustufen. Das vorliegende Gefälle von 0,025 % resultiert in einer Höhendifferenz entlang des Modellgebietes von rund 50 cm und wird als bedeutender angesehen. Die gemessenen Wasserstände der Donau werden daher vernachlässigt. Das Gefälle wird mit einer *Head Equation* - Bedingung der Form $h(x) = h_0 - i \cdot x$ berücksichtigt und über den Berechnungszeitraum als konstant angenommen. h_0 stellt dabei die Druckhöhe am Modellrand stromauf dar, i steht für das Potentialgefälle und x ist die Koordinate in Fließrichtung.

Zuletzt werden noch die Entnahmemengen der Horizontalfilterbrunnen als Senkenterme definiert. Das geförderte Volumen wird dabei durch die Fläche der jeweiligen Filterstrangregion dividiert und als *Sink* - Term der Grundfläche zugewiesen.

5.2 Kalibrierung

5.2.1 Allgemeine Vorgehensweise

Bei der Kalibrierung des Modells wird durch gezielte Variation der Untergrundeigenschaften versucht die Abweichung zwischen Messung und Simulation zu minimieren. Dieser Vorgang erfolgt nach der simplen Trial-and-Error-Methode. Die detaillierte Dokumentation von veränderten Parametern und der Auswirkung auf die Berechnung ist unumgänglich, um ein Voranschreiten des Prozesses zu gewährleisten. Weiters erweist es sich zu Beginn als sinnvoll größere Änderungen vorzunehmen um eine deutliche Wirkung wahrnehmen zu können, die der Parametervariation eindeutig zugeschrieben werden kann.

Mit dem erstellten Modell aus Kapitel 5.1 lassen sich erste Ergebnisse ermitteln. Vor der Berechnung werden *Piezometer* definiert, welche das hydraulische Potential im gewählten Punkt über den Berechnungszeitraum aufzeichnen. Die berechneten Werte werden anschließend mit den Messungen verglichen. Mithilfe des in SVFlux integrierten Kalibrierungstools, kann dies durch die Darstellung in Diagrammen auf einfache Weise erfolgen. Der Bereich der Donauböschung stellt sich jedoch anfangs als problematisch dar. Als Ursache werden die größeren Ungenauigkeiten in der Lösung der numerischen Berechnung zu Beginn der Kalibrierung vermutet, wodurch die *Piezometer* falsche Werte ermitteln. Mit der Definition von *Observation Points* wird diese Problematik umgangen. Diese funktionieren auf ähnliche Weise und können neben dem Potential auch weitere Parameter, wie beispielsweise Fließgeschwindigkeiten und Porenwasserdrücke, berechnen. Die ermittelten Werte lassen sich jedoch nicht im Kalibrierungstool darstellen und werden daher in der Statistiksoftware R graphisch aufbereitet.

Im Allgemeinen wird versucht die Kalibrierung der einzelnen Bereiche fortschreitend in Strömungsrichtung auszulegen, d.h. die Bearbeitung beginnt bei den Pegeln stromauf und im jeweilig betrachteten Abschnitt von den donau nahen Sonden hin zur Neuen Donau. Für die Zuweisung unterschiedlicher Materialien muss vorweg die weitere Unterteilung in Regionen vorgenommen werden. Hierbei ist es sinnvoll, die Regionen möglichst großflächig zu belassen und auf punktuelle

Eingriffe, mit großer Variabilität hinsichtlich der Bodenkenngrößen, zu verzichten. Auch wenn die Donauinsel durch eine äußerst inhomogene Zusammensetzung geprägt ist, erscheint es aufgrund der vielen Unsicherheiten zielführend, den Mechanismus des Gesamtsystems mit möglichst wenig diversen Materialeigenschaften nachzubilden. Das Erstellen neuer Regionen fordert in vielen Fällen wieder eine manuelle Korrektur des generierten Berechnungsnetzes und die erneute Zuweisung von Randbedingungen. Diese Vorgehensweise erschwert den Kalibrierungsprozess und ist mit einem erheblichen Zeitaufwand verbunden. Als einfache Lösung wird einmalig ein großflächiger, regelmäßiger Raster angelegt, der nun auch eine Unterteilung des Modells in der Breite vornimmt (s. Abb. 27). Diese Regionalisierung ist für die Kalibrierung des gesamten Modells weitestgehend ausreichend.

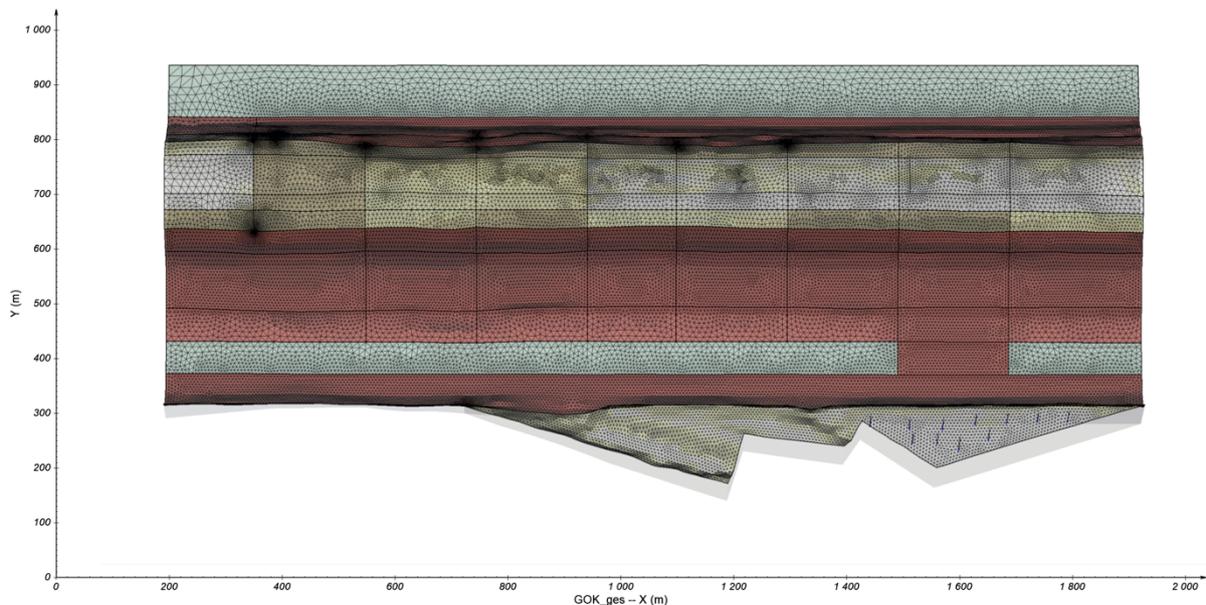


Abb.27: Finale Regionalisierung des Modells in der Aufsicht

Die Wahl des quasistationären Zustandes zu Simulationsbeginn erlaubt es, die Anfangspegel näherungsweise durch Betrachtung der stationären Berechnung einzustellen. Gerade zu Beginn, werden die k_f -Werte teilweise um bis zu einer Zehnerpotenz verändert. Daher erfordert die sukzessive Annäherung an den endgültigen Wert oftmals viele Berechnungsdurchgänge. Bei einer Rechenzeit von rund 2 h für die instationäre und 15 min für die stationäre Berechnung ist letztere Option attraktiver und darüber hinaus ausreichend um die Anfangspegel im Bereich um ± 30 cm des tatsächlichen Wertes einzustellen.

Mit den Ergebnissen der stationären Berechnung liegt zugleich die benötigte Anfangsbedingung für die instationäre Berechnung vor. Werden große Änderungen am Modell vorgenommen, ist die Anfangsbedingung aus einer vorlaufenden stationären Berechnung stets neu zu ermitteln. Bei kleineren Adaptierungen genügt es jeweils das Ergebnis eines Zeitschrittes der vorangegangenen instationären Berechnung heranzuziehen. Am besten eignet sich hierfür ein Zeitschritt kurz vor Pumpbeginn (*Step 670*). Bei Simulationsbeginn (*Step 648*) treten stets Unregelmäßigkeiten im berechneten Pegelverlauf auf, da die Anfangsbedingung von der neuen Situation abweicht und ein Einpendeln des quasi-stationären Zustandes erfordert. Abbildung 28 zeigt die Ganglinien einer instationären Berechnung in FlexPDE.

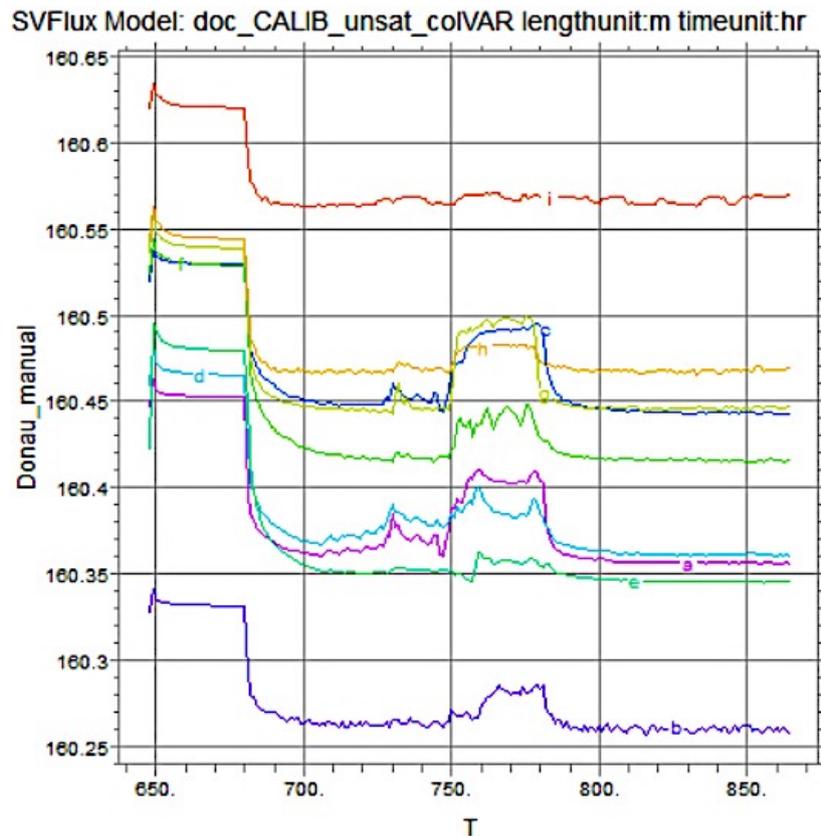


Abb.28: Ganglinien einer instationären Berechnung in Flex PDE

5.2.2 Detaillierte Vorgehensweise anhand von Beispielen

Im Folgenden wird die Vorgehensweise anhand auserwählter *Piezometer* und *Observation Points* veranschaulicht und Zusammenhänge erläutert, die sich während der Kalibrierung abzeichnen. An dieser Stelle soll noch vermerkt werden, dass für die Pegel DS510, DS610 und DS710 im Kalibrierungszeitraum keine Daten vorliegen. Der Vergleich der Werte des restlichen Jahres zeigt jedoch, dass die Differenz zwischen den benachbarten Pegeln in Zeiten ohne Pumpbetrieb unabhängig vom Donaudurchfluss annähernd konstant ist. Die ermittelten Abweichungen werden hier auf Dezimeter gerundet lediglich zur Orientierung angeführt $\Delta_{DS410-DS510} \approx 50$ cm, $\Delta_{DS510-DS610} \approx 50$ cm und $\Delta_{DS610-DS710} \approx 20$ cm.

Zu Beginn wird versucht die k_f -Werte der Kolmationsschicht für die unterschiedlichen Bereiche anzunähern, während das restliche Modellgebiet unverändert bleibt. Aufgrund der geringen Schichtdicke wird das vorhandene ungesättigte Verhalten in der Modellierung vernachlässigt und fortwährend mit dem gesättigten Materialmodell gerechnet. Da die Kolmation maßgeblich verantwortlich für die Absenkung des Wasserspiegels innerhalb der ersten Meter ist, werden anfangs nur die Ergebnisse der donaunahen Pegel verglichen. Je nach Messstelle liegt eine Absenkung im Böschungsbereich von über 2 m vor. Für eine derartige Simulation bedarf es extrem niedriger k_f -Werte, die weit unterhalb der genannten Richtwerte liegen. Bei Betrachtung der instationären Berechnung wird ersichtlich, dass über die Simulationsdauer zu viel Wasser im Inselkörper gehalten wird bzw. zu viel nachströmt. Abbildung 29 zeigt Kalibrierungskurven der donaunahen Pegel für ein Modell mit konstanten und mit bereichsweise veränderten Durchlässigkeitsbeiwerten der Kolmationsschicht. Darin werden die simulierten Ganglinien (durchgezogene Linien) den gemessenen Werten (strichlierte L.) gegenübergestellt.

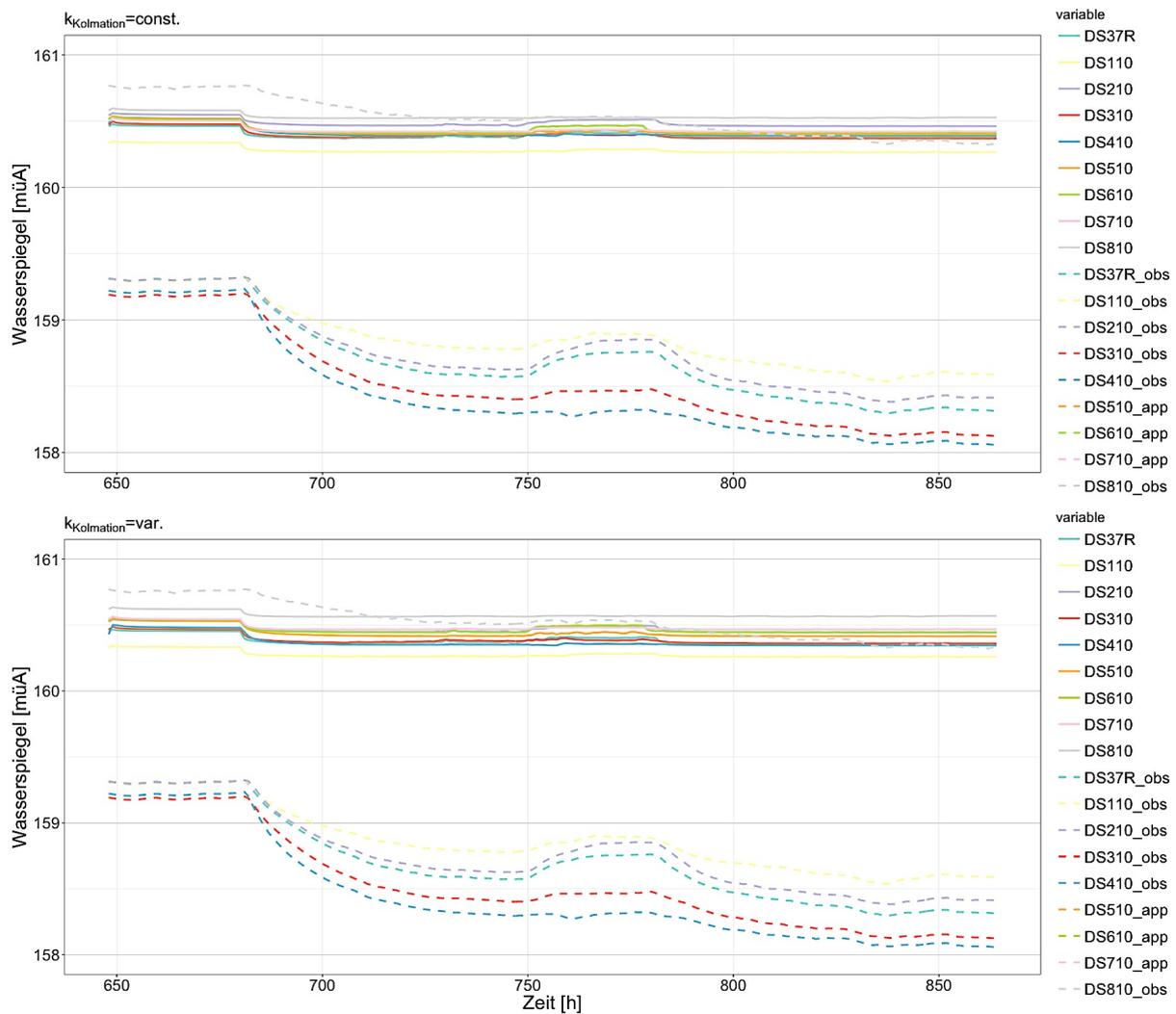


Abb.29: Kalibrierung Kolmationsschicht bei k_f -Variation

In beiden Fällen ist die Gesamtabenkung der Simulation deutlich zu gering. Die differenzierte Kolmationsschicht bewirkt zwar eine gewisse Auffächerung der Ganglinien, wenngleich die Anfangspegel der Sonden stromab von HFB 4 um mehr als 1 m zu hoch sind. Die Absenkung infolge des Pumpbetriebes erfolgt entsprechend schlagartig und zum richtigen Zeitpunkt, jedoch im viel zu geringen Maße. Bereits nach 30 h erreicht sie ihr Maximum, während die Kurven der gemessenen Werte erst gegen Ende abflachen. Dieser Umstand wird wesentlich von den hydraulischen Eigenschaften des Inselkörpers beeinflusst und verdeutlicht, dass dieser im weiteren Verlauf nicht unberücksichtigt bleiben darf. Daher erfolgt im nächsten Schritt eine Variation der Parameter der Schotterschicht. Abbildung 30 zeigt die Kalibrierungskurven nach einer deutlichen Änderung des Durchlässigkeitsbeiwertes k_f und der Porosität n für repräsentative donanahe Pegel sowie Messstellen in Inselmitte.

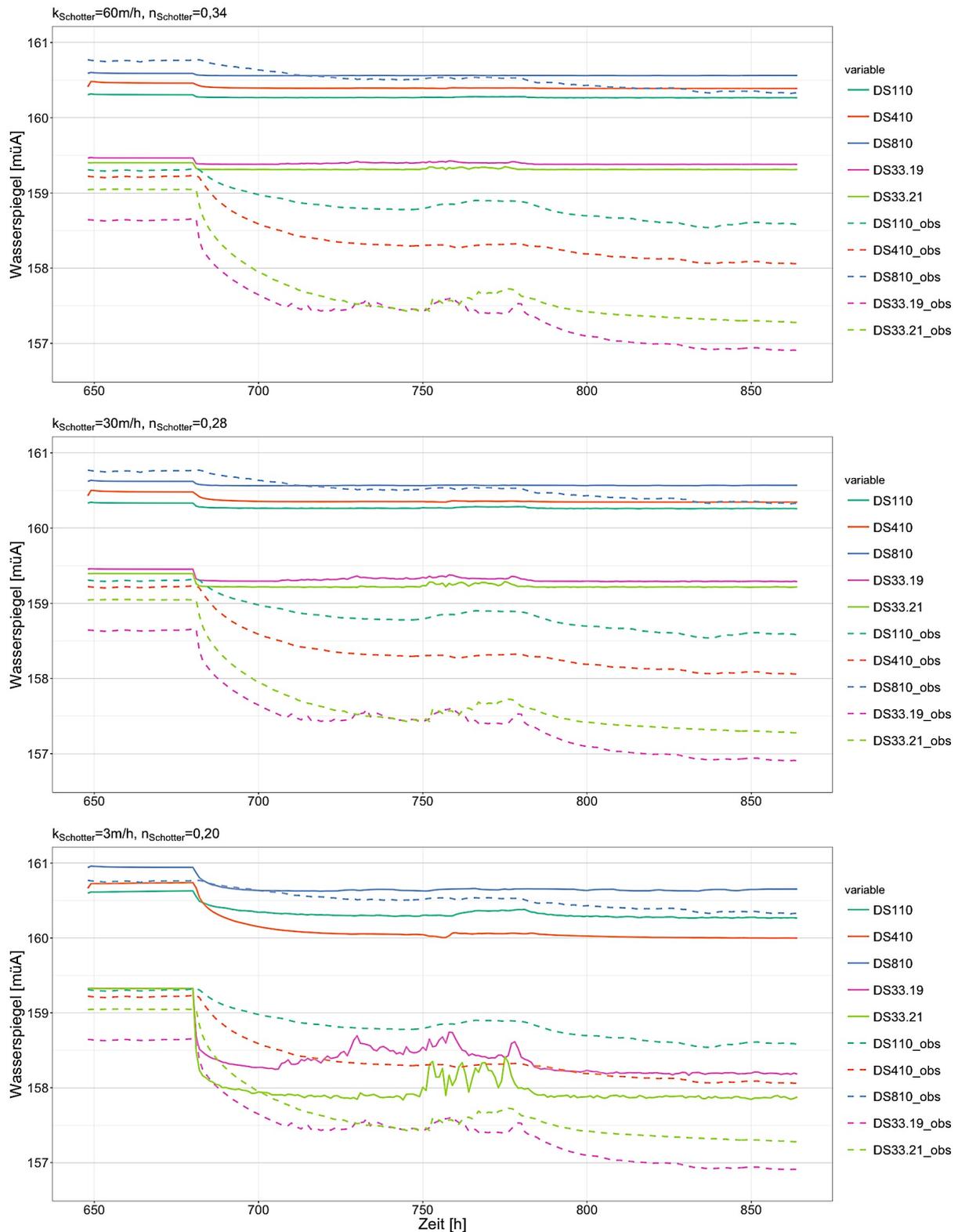


Abb.30: Kalibrierung Donauschotter bei k_F - und n -Variation

Bei einer geringeren Durchlässigkeit (s. Abb. 30 unten) zeichnet sich die Absenkung infolge des Pumpbetriebes deutlich ab. Der Anfangspegel wird durch den dichteren Inselkörper jedoch angehoben. Im Vergleich ist bei einer größeren Durchlässigkeit (s. Abb. 30 oben) die Absenkung weniger ausgeprägt. Wasser strömt schneller nach und hält den Wasserspiegel auf einem höheren Niveau. Bei genauer Betrachtung erkennt man jedoch, dass die höhere Durchlässigkeit den Anfangspegel gering senkt. Das infiltrierende Wasser wird zunächst von der Kolmationssschicht

und dem dichteren Uferaufbau zurückgehalten und fließt nach dem Durchdringen der Schicht schneller ab.

Tab.3: Van Genuchten - Mualem - Parameter in der Literatur

Quelle	Bodentyp	θ_r [-]	θ_s [-]	n [-]	α [kPa]	K_s [m/hr]
CARSEL and PARRISH, 1988	Sand	0,045	0,43	2,68	0,677	0,2970
	Loamy sand	0,057	0,41	2,28	0,791	0,1458
	Sandy loam	0,065	0,41	1,89	1,308	0,0439
	Sandy clay loam	0,100	0,39	1,48	1,663	0,0131
	Loam	0,078	0,43	1,56	2,725	0,0104
	Silt loam	0,067	0,45	1,41	4,905	0,0045
	Clay loam	0,095	0,41	1,31	5,163	0,0026
	Silt	0,034	0,46	1,37	6,131	0,0025
	Clay	0,068	0,38	1,09	12,263	0,0020
	Sandy clay	0,100	0,38	1,23	3,633	0,0012
	Silty clay loam	0,089	0,43	1,23	9,810	0,0007
	Silty clay	0,070	0,36	1,09	19,620	0,0002
WÖSTEN, 1999	<i>Topsoils</i>					
	Coarse	0,025	0,403	1,3774	0,0383	14,4000
	Medium	0,010	0,439	1,1804	0,0314	2,8800
	Mediumfine	0,010	0,430	1,2539	0,0083	0,5453
	Fine	0,010	0,520	1,1012	0,0367	5,9520
	Very Fine	0,010	0,614	1,1233	0,0265	3,6000
	<i>Subsoils</i>					
	Coarse	0,025	0,366	1,5206	0,0430	16,8000
	Medium	0,010	0,392	1,1689	0,0249	2,5812
	Mediumfine	0,010	0,412	1,2179	0,0082	0,9600
	Fine	0,010	0,481	1,0861	0,0198	2,0400
	Very Fine	0,010	0,538	1,0730	0,0168	1,9764
Organic	0,010	0,766	1,2039	0,0130	1,9200	

Unter Berücksichtigung der Schotterschicht im Kalibrierungsprozess werden an dieser Stelle die bisherigen Materialeigenschaften mit dem Van Genuchten-Mualem-Model (VGM) erweitert, welches die Grundwasserströmung in der ungesättigten Zone berücksichtigt und maßgeblich für die Wasserbewegung in vertikaler Richtung verantwortlich ist. Als zusätzliche Parameter stehen nun α und n_m sowie der residuale Wassergehalt θ_r als modellbestimmende Variablen zur Verfügung. Der Sättigungswassergehalt θ_s entspricht der Porosität n . In Tabelle 3 findet sich eine Zusammenstellung von Richtwerten aus der Literatur.

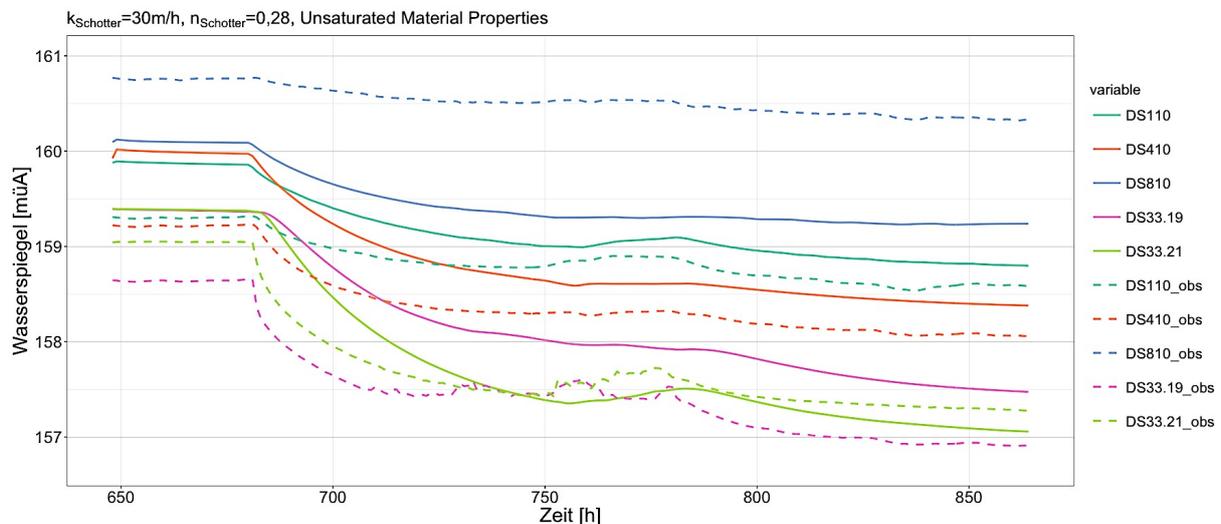


Abb.31: Kalibrierung Donauschotter bei Berücksichtigung des ungesättigtes Materialverhalten

Mit dem VGM-Modell liegen die Berechnungen schon wesentlich näher an den Messwerten (s. Abb. 31). Aufgrund der Berücksichtigung des ungesättigten Materialverhaltens im Inselkörper sind sowohl die Absenkung infolge Kolmationschicht als auch jene infolge des Pumpbetriebes deutlich ausgeprägter. Zum besseren Verständnis wird eine Parameterstudie zu den neu eingeführten Variablen durchgeführt. Die Werte für α und n_m werden im Bereich der jeweiligen Maximal- und Minimalrichtwerte nach WÖSTEN (1999) variiert, wobei θ_s und θ_r konstant gehalten werden. In Abbildung 32 wird der Einfluss der Parameter auf die Saugspannungskurve dargestellt.

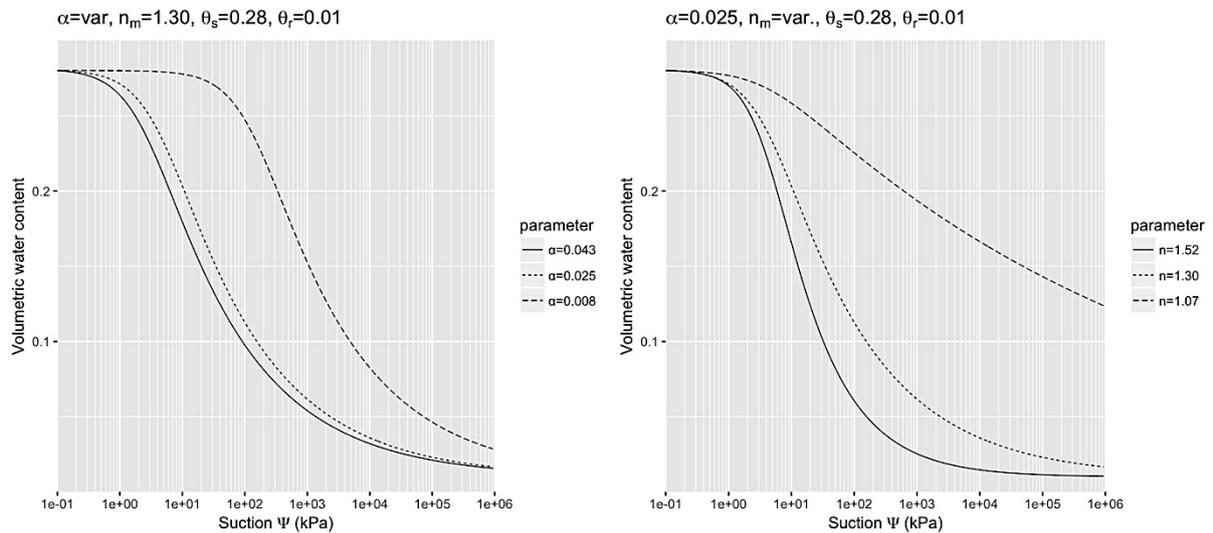


Abb.32: Vergleich Saugspannungskurven bei α - und n_m -Variation

Die Änderung in α bewirkt eine Verschiebung der Kurve in horizontaler Richtung. Ein kleines α bedeutet eine größere Saugspannung bei gleichem Wassergehalt. Im Vergleich ändert sich bei Variation von n_m die Form der Kurve grundlegend. Ein großes n_m bewirkt grundsätzlich eine geringere Saugspannung. Eine deutliche Zunahme der Saugspannung erfolgt erst bei geringem Wassergehalt. Grobkörnigen Bodenarten werden demnach größere n_m zugeschrieben wie auch in Tabelle 3 ersichtlich ist. Bei Betrachtung des Speicherverhaltens ergibt sich ein ähnliches Bild (s. Abb.33). Die Variation von α hat erneut eine Verschiebung der Kurve zufolge, während die Vergrößerung von n_m zu einer spitzeren Kurve und einer größeren Speicherkapazität führt. Für einen bestimmten Saugspannungsbereich kann mehr Wasser gespeichert werden. Die Bereichsdefinition bestimmt der Wert α .

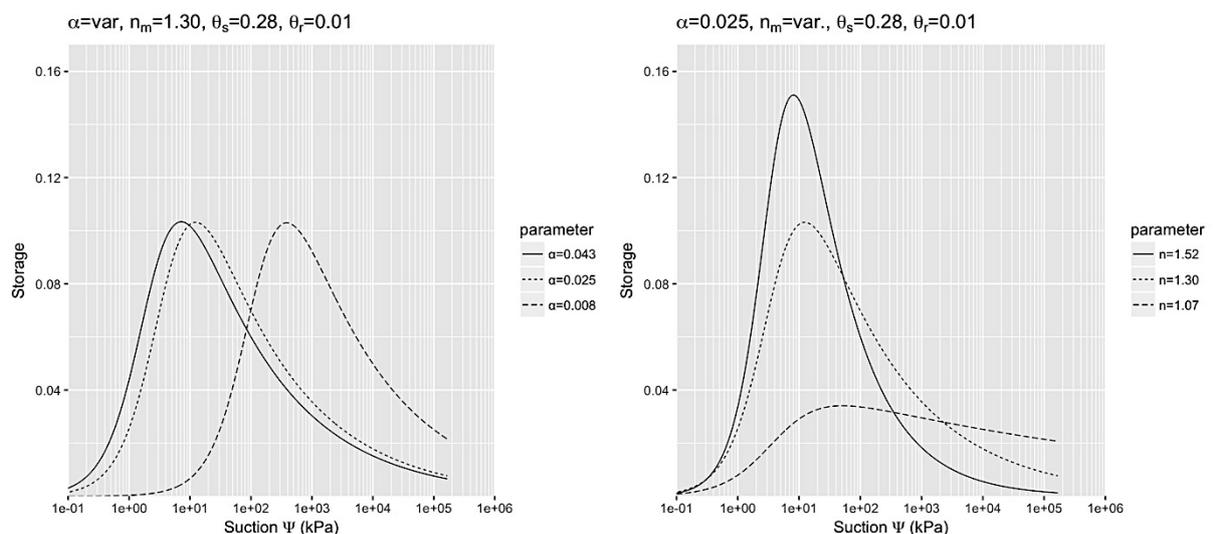


Abb.33: Vergleich Speicherkurven bei α - und n_m -Variation

Neben der Abschätzung der ungesättigten hydraulischen Durchlässigkeit nimmt SVFlux mit dem VGM - Model auch eine Korrektur des gesättigten Durchlässigkeitsbeiwertes k_{sat} vor. Eine hohe Saugspannung, geht demnach automatisch mit einer Reduzierung der Durchlässigkeit einher.

Nachfolgend wird die Vorgehensweise der Kalibrierung einer Region anhand eines Pegels dargestellt (s. Abb. 34 u. 35). Dies erfolgt am Beispiel der Messstelle DS602, welche sich durch eine ausgeprägte Absenk- und Aufspiegelungskurve auszeichnet, die vom un stetigen Pumpbetrieb des HFB 6 hervorgerufen wird.

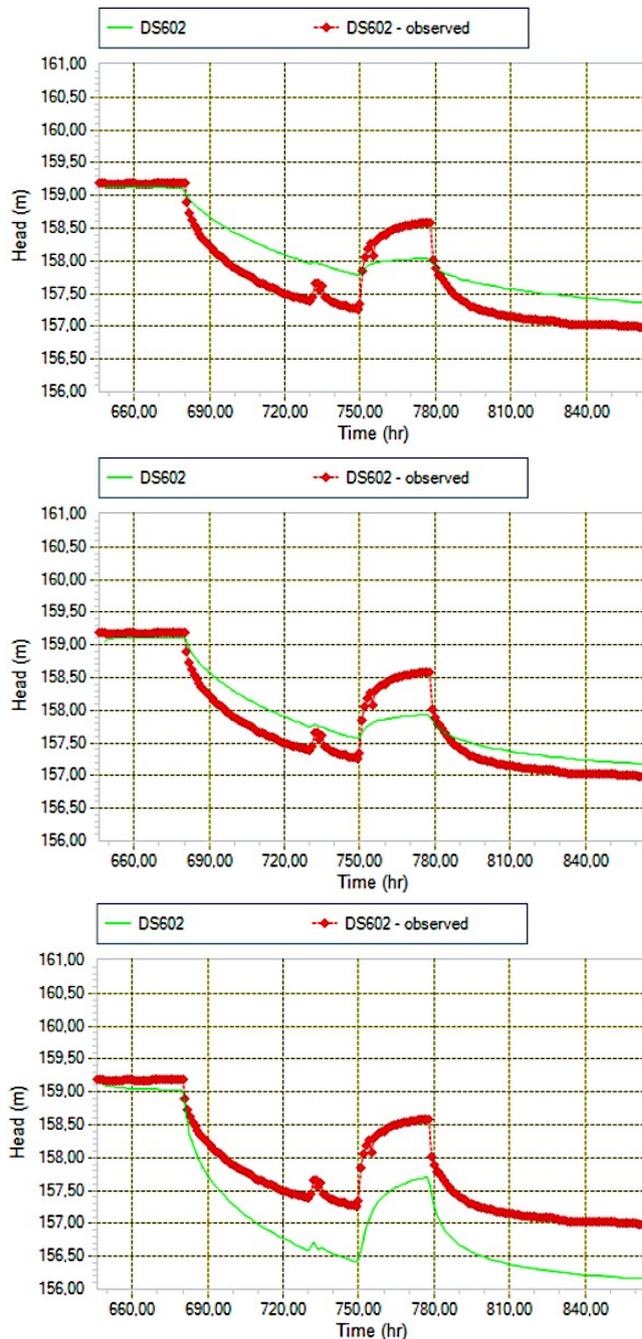


Abb.34: Kalibrierschritte DS602 (0-2)

Schritt 0 - $k=38\text{m/h}$, $n=0.34$, $n_m=1.52$, $\alpha=0.043$

Der Anfangspegel wurde bereits anhand der Kolmationsschicht und dem Uferaufbau kalibriert. Dadurch stimmt auch das zeitliche Einsetzen der Absenkung und Aufspiegelung infolge des Pumpbetriebes mit den beobachteten Werten gut überein. Das Ausmaß ist jedoch viel zu gering. Es wird versucht, diese durch Reduzierung der Durchlässigkeit zu verstärken, ohne den Anfangspegel maßgeblich zu beeinflussen.

-> Verringerung der Durchlässigkeit

Schritt 1 - $k=28\text{m/h}$, $n=0.24$, $n_m=1.52$, $\alpha=0.043$

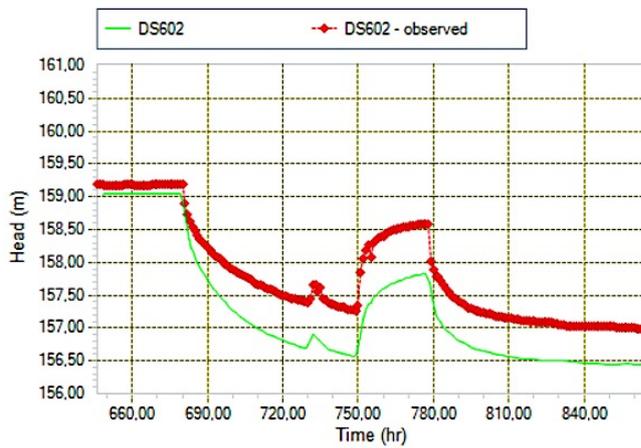
Der Anfangspegel stimmt nach wie vor gut überein. Die Absenkung ist stärker ausgeprägt, jedoch immer noch zu gering. Weiters verläuft die Kurve zu flach bzw. zu wenig definiert.

-> kleineres n_m

Schritt 2 - $k=28\text{m/h}$, $n=0.24$, $n_m=1.12$, $\alpha=0.043$

Durch das kleinere n_m ist die Absenkung insgesamt zu groß und würde bei Fortführung der Simulation noch weiter von den Messungen abweichen. Die Aufspiegelung infolge des Pumpstopps wird jedoch sehr gut nachgebildet.

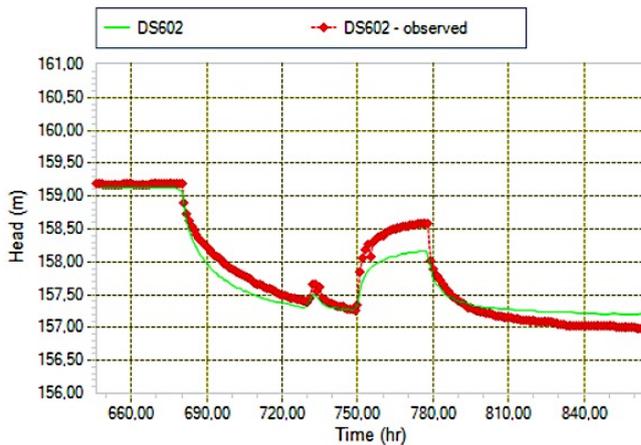
-> kleineres α



Schritt 3 - $k=28\text{m/h}$, $n=0.24$, $n_m=1.12$, $\alpha=0.020$

Das kleinere α hebt die Kurve im letzten Stück ein wenig an. Sie wirkt gedrungener und der Verlauf ab dem 2. Drittel ist nun annähernd parallel. Die Gesamtabenkung ist jedoch zu groß.

-> n_m wieder etwas größer, α noch geringer



Schritt 4 - $k=28\text{m/h}$, $n=0.24$, $n_m=1.14$, $\alpha=0.008$

Die Absenkkurve ist in ihrer Gesamtheit soweit zufriedenstellend kalibriert. Der fehlende Anteil der Aufspiegelung wird im weiteren Verlauf durch die dichtere Modellierung stromauf und des daraus resultierenden erhöhten Zustroms bewerkstelligt.

Abb.35: Kalibrierschritte DS602 (3-4)

Wie am Beispiel des Pegel DS602 demonstriert, wird ein Bereich nach dem anderen auf ähnliche Weise kalibriert. Die Änderung in einer Region hat natürlich stets Auswirkungen auf die umliegenden Regionen zur Folge. Die Schwierigkeit liegt im Finden einer hinreichenden Lösung des Gesamtsystems. Zwangsläufig kommt es zu tolerierbaren Abweichungen. Beispielsweise wird einem weniger zufriedenstellenden Pegel, welcher in einem ansonsten gut kalibrierten Bereich liegt, demnach weniger Bedeutung zugeschrieben. Wie zu Beginn des Kapitels bereits erwähnt, ist das Ziel ein möglichst homogenes Modell zu erstellen, welches den Gesamtmechanismus des Systems gut abbildet. Der Wertebereich der Parameter innerhalb einer Materialgruppe soll daher möglichst schmal gehalten werden. Mit fortschreitender Kalibrierung wird der Fokus mehr auf die Pegel in Inselmitte gelegt. Diese Schwerpunktsverlagerung begründet sich in der Lage zu den Horizontalfilterbrunnen, welche einen wesentlichen Untersuchungsgegenstand darstellen. Weiters ist festzuhalten, dass die Modellierung der Kolmationsschicht und des Uferaufbaus mit sehr vielen Unsicherheiten behaftet sind, im Speziellen betreffend der Schichtdicken und Geometrien. Bei Durchlässigkeitsbeiwerten die über mehrere Zehnerpotenzen vom restlichen Modell abweichen, hat jede kleine Veränderung bedeutende Auswirkungen zur Folge.

Der gesamte Kalibrierungsprozess gestaltet sich mit den zahlreichen Iterationsschritten als äußerst zeitaufwendig. Da Zeit schlussendlich der limitierende Faktor für die Kalibrierung darstellt, wird stets darauf geachtet die erforderliche Dauer der Modellberechnung gering zu halten. Durch die manuelle Vergrößerung und eines fest vorgeschriebenen Diskretisierung des Berechnungsnetzes in Bereichen von geringerem Interesse, kann die Elementzahl reduziert werden. Als weitere Maßnahme lassen sich ganze Bereiche, die auf die aktuell betrachtete Region wenig Einfluss haben, von der Berechnung ausschließen. Auch die Berücksichtigung der ungesättigten Zone mittels VGM-Modell resultiert neben dem Kalibrieraufwand in einer höheren Rechenzeit. Aus diesem

Grund wird für viele Materialien eine gesättigte Variante erstellt. Dieser werden in Bereichen verwendet, die zu jedem Zeitpunkt unterhalb des Grundwasserspiegels liegen. Des Weiteren können in den Berechnungseinstellungen globale Steuerungselemente der Finite Elemente Methode festgelegt werden um die Berechnung zu beschleunigen. Beispielsweise lässt sich mit dem Parameter *Errlim* die erforderliche Genauigkeit der Näherungslösung des partiellen Differentialgleichungssystems in einem Zeitschritt definieren. Liegt die Lösung oberhalb dieses Grenzwertes, nimmt der Solver eine weitere Unterteilung der räumlichen oder zeitlichen Diskretisierung vor, bevor er zum nächsten Zeitschritt übergeht. So kann gerade zu Beginn eine erste Abschätzung schneller erfolgen und durch kontinuierliche Verfeinerung eine genauere Lösung gefunden werden.

5.2.3 Kenndaten des 3D-Modells und Bewertung der Kalibrierung

Das fertige Modell (s. Abb. 36) zählt insgesamt rund 364.000 Knoten und 245.000 Elemente. Die Rechenzeit für das stationäre Modell beträgt rund 30 min während die instationäre Berechnung zwischen zwei und drei Stunden in Anspruch nimmt. Die Zonierung des Modells erfolgt durch sieben *Surfaces*, und 92 *Regions*. Zusammen bilden sie 331 unabhängige Geometriekörper, denen jeweils eines von 66 verschieden definierten Materialien zugewiesen wird.

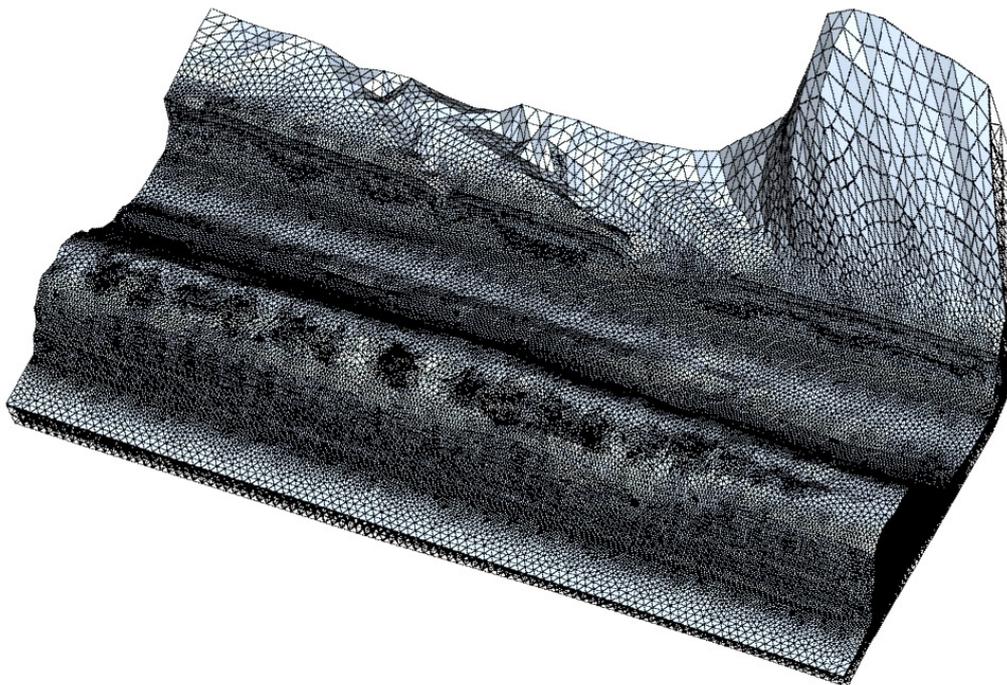


Abb.36: 3D-Ansicht des gesamten Modellraums

Abbildung 37 zeigt die Materialverteilung des Querschnittes auf Höhe des HFB 6 nach Fertigstellung der Kalibrierung. Darin angeführt ist die Durchlässigkeit der einzelnen Bereiche in m/h. Die Farbgebung ist beliebig und trägt keine Information. Während die Inselmitte eine relativ homogene Zusammensetzung aufweist, ist der Böschungsbereich, wie auch in Natura, heterogener aufgebaut. Um das hohe Potentialgefälle über den Bereich der Uferböschung zu bewerkstelligen, sind daher mehrere Regionen und Materialien erforderlich. Tabelle 4 gibt einen Überblick über die Größenordnung der Kennwerte einer Materialgruppe. Die VGM-Parameter werden an dieser Stelle nicht angeführt, liegen jedoch im Bereich der in Tabelle 3 angeführten Werte. Eine komplette Auflistung der einzelnen Materialien findet sich im Anhang.

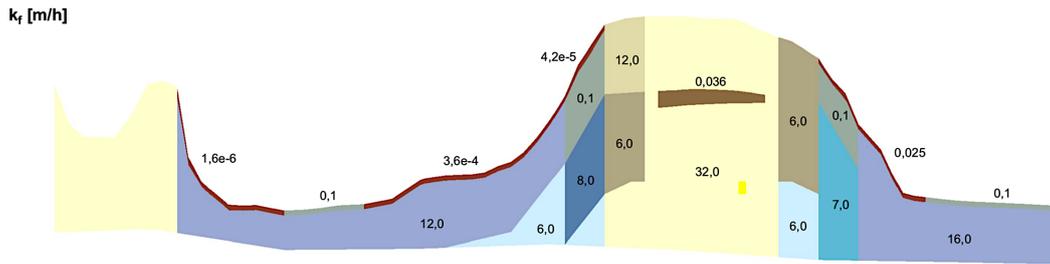


Abb.37: Materialverteilung im Querschnitt bei HFB5

Tab.4: Wertebereich der vergebenen Materialparameter

Material	k_f [m/h]	k_f [m/s]	n_{eff} [-]
Schotter Insel	2,0 - 54,0	$5,6e-4$ - $1,5e-2$	0,14 - 0,42
Schotter Flussbett	12,0 - 16,0	$3,3e-3$ - $4,4e-3$	0,18 - 0,20
Schluff	0,0036	$1,0e-6$	0,14
Sand	0,0075 - 1,2	$2,1e-6$ - $3,3e-4$	0,12 - 0,14
Kolmation	$2,8e-5$ - $5,0e-3$	$7,8e-9$ - $1,4e-6$	0,12
Filterstränge	84,0	$2,3e-2$	0,36

Als mittlere Durchlässigkeit des zentralen Inselkörpers wird ein Wert um $7,0 \cdot 10^{-3}$ m/s (≈ 25 m/h) angegeben. Die höchste Transmissivität ergibt sich im Bereich des HFB 4. Das Gebiet um HFB 8 hingegen weist den dichtesten Untergrund auf. Der Kolmationsgrad nimmt mit der Nähe zum Kraftwerk, also mit abnehmender Fließgeschwindigkeit der Donau infolge des Aufstaus zu. Die Uferböschung wird im Bereich des Donauwasserstandes über die gesamte Länge annähernd gleich, aus einer Lagerung von feinkörnigen Sanden über dichterem Schotter, modelliert.

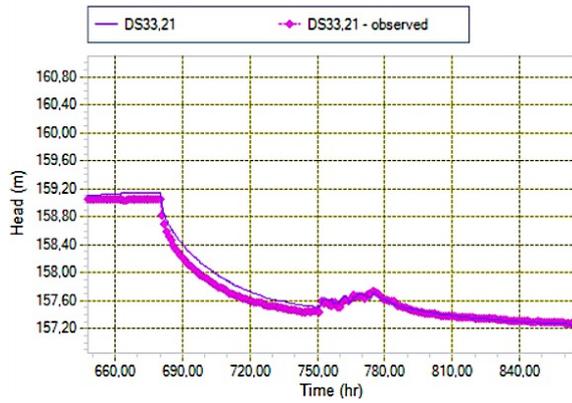
Eine Bewertung der Kalibrierung erlaubt die sogenannte Nash-Sutcliffe-Effizienz (NSE), ein Kriterium welches simulierte und beobachtete Werte miteinander vergleicht und häufig zur Beurteilung hydrologischer Modelle herangezogen wird.

$$NSE = 1 - \frac{\sum(x_{sim} - x_{obs})^2}{\sum(x_{obs} - \bar{x}_{obs})^2} \quad \text{mit } \bar{x}_{obs} = \frac{1}{n} \sum x_{obs} \quad (16)$$

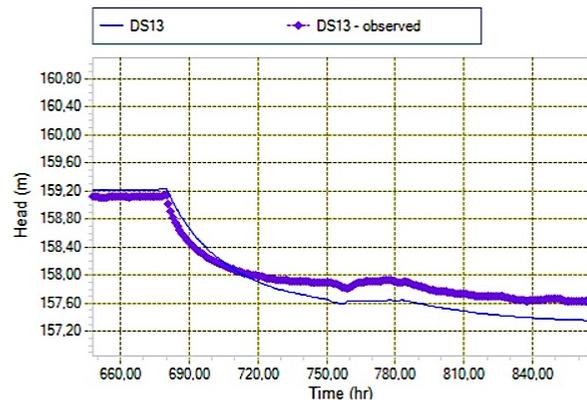
- x_{sim} ... Simulierte Wert
- x_{obs} ... Beobachtete Wert
- \bar{x}_{obs} ... Mittelwert der Beobachtungen

Der NSE kann einen Wert zwischen $-\infty$ und 1 annehmen. 1 bedeutet eine perfekte Übereinstimmung der simulierten und beobachteten Werte. Ein negativer Wert bedeutet, dass der Mittelwert der Beobachtung eine bessere Anpassung ist, als die Werte der Modellkalibrierung (NASH & SUTCLIFFE, 1970). Um die Güte der Kalibrierung des erstellten Grundwassermodells darzustellen, wird eine Unterteilung in vier Kategorien nach NSE vorgenommen: Sehr gut ($0,9 < 1,0$), Gut ($0,8 < 0,9$), Zufriedenstellend ($0,5 - 0,8$), Wenig zufriedenstellend ($< 0,5$). Nachfolgend wird für jede Kategorie ein Pegel mit kalibrierter Grundwasserstandsganglinie dargestellt um eine Vorstellung über das Kriterium zu erhalten (s. Abb.38). Die restlichen Kalibrierkurven sind im Anhang zu finden.

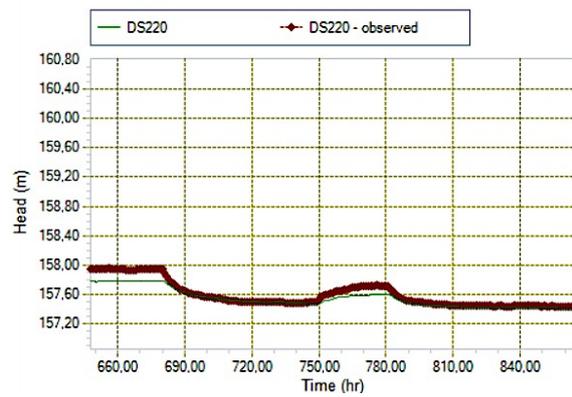
NSE=0,97 (Sehr gut)



NSE=0,82 (Gut)



NSE=0,79 (Zufriedenstellend)



NSE=0,30 (Wenig zufriedenstellend)

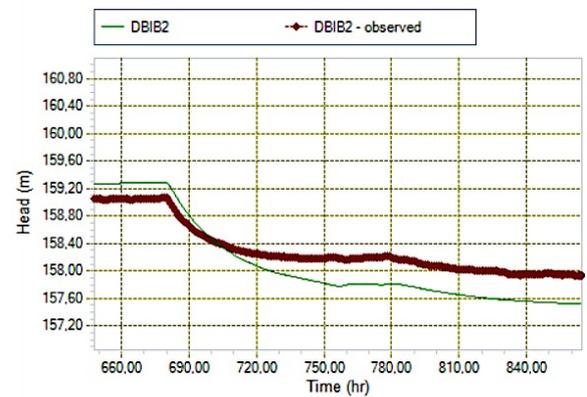


Abb.38: Kalibrierte Grundwasserstandsganglinien und Einordnung in die definierten Bewertungskategorien nach NSE

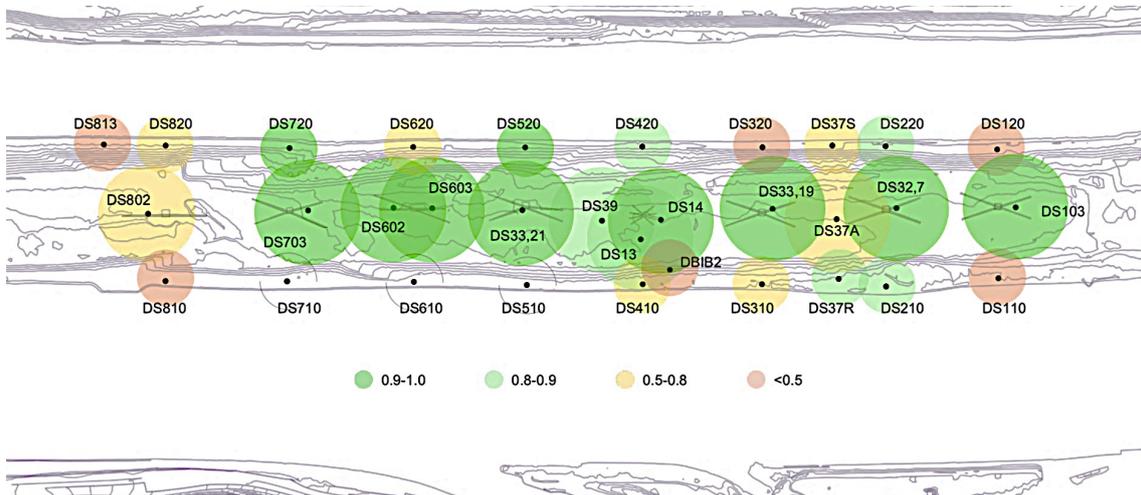


Abb.39: Nash-Sutcliffe-Efficiency im kalibrierten Modellraum

Abbildung 39 verdeutlicht das bemerkenswerte Ergebnis der Kalibrierung. Die größere Darstellung der Pegel in Inselmitte geht lediglich auf die höhere Dichte der betrachteten Messstellen zurück. Darüber hinaus wird von vornherein der Fokus der Modellierung auf den Bereich der Inselmitte und die Horizontalfilterbrunnen gelegt. Bis auf eine Ausnahme finden sich über die gesamte Länge durchwegs gut bis sehr gut kalibrierte Bereiche. Wenig zufriedenstellende Pegel sind in den Randzonen des Modells situiert. Die größten Schwierigkeiten ergeben sich im Bereich von HFB 8.

Geophysikalische Messungen deuten jüngst auf einen Untergundaufbau hin, der sich vom restlichen Untersuchungsgebiet unterscheidet und eine geringere Durchlässigkeit aufweist (SCHMITZER u. THUMMERER, 2016). Für die Pegel DS510, DS610 und DS710 liegen im betrachteten Zeitraum keine Messungen vor. Bei Vergleich mit den benachbarten Pegeln befinden sich die simulierten Ganglinien aber durchaus im plausiblen Bereich.

Für das Brunnenfeld Nußdorf wurde im Zuge der Diplomarbeit keine gezielte Kalibrierung durchgeführt. Dennoch kann bei Betrachtung der simulierten Pegel eine Beeinflussung durch die Horizontalfilterbrunnen der Donauinsel im richtigen Ausmaß beobachtet werden (s. Anhang). Die Absenkkurve infolge des Pumpbetriebes verläuft nahezu parallel zu den gemessenen Werten. Dieses vielversprechende Ergebnis deutet auf eine bereits gut kalibrierte Donausohle hin und legt eine weiterführende Kalibrierung für den Bereich Nußdorf nahe.

6 Ergebnisse der Modellierung

Mit dem kalibrierten Modell ist es möglich die Strömungsverhältnisse im Grundwasserkörper der Donauinsel unter verschiedenen Bedingungen zu simulieren. Zunächst werden die beiden Zustände miteinander verglichen, die sich ohne Betrieb der Horizontalfilterbrunnen bzw. während einer Wasserentnahme von insgesamt 500 l/s einstellen. Die abschließende Szenarioanalyse untersucht die Auswirkung einer hypothetisch fortschreitenden Kolmatierung der gesamten Donausohle auf das Uferfiltratdargebot.

6.1 Ergebnisse der Strömungsberechnung

Abbildung 40 zeigt den Grundwasserschichtlinienplan zu Simulationsbeginn mit einem Höhenlinienabstand von 20 cm. Deutlich erkennbar ist der große Potentialabbau infolge des dichteren Uferbereichs und der Kolmationsschicht. In Inselmitte, zwischen HFB 1 und HFB 5, ergibt sich infolge der höheren Durchlässigkeit nur ein geringes Gefälle, ehe der Abbau im Böschungsbereich zur Neuen Donau weiter fortschreitet. Anhand des Schichtlinienverlaufs kann die Annahme der primär quer zur Donau gerichteten Fließrichtung im Grundwasserkörper bestätigt werden. Auf Höhe von HFB 8 führt die dichtere Ausbildung des Untergrundes in Kombination mit dem geringeren Kolmationsgrad zu einer konstanten Abnahme des Potentials über die gesamte Breite der Donauinsel. Gleichzeitig entsteht dadurch im Bereich von HFB 5 und HFB 6 ein geringes Gefälle in Längsrichtung. Die dominierende Fließrichtung des Aquifers bleibt dennoch quer zur Donau gerichtet.

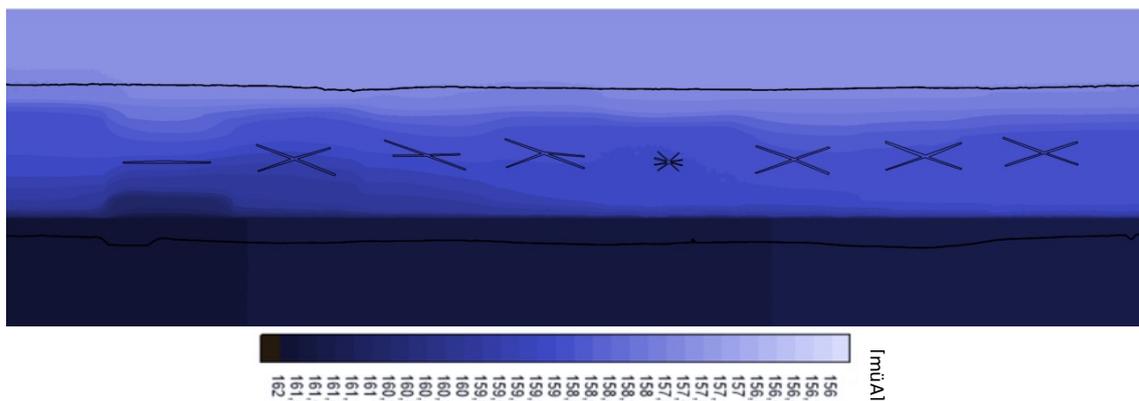


Abb.40: Grundwasserschichtlinienplan bei Step 670

Infolge des Pumpbetriebes aller Horizontalfilterbrunnen ergibt sich eine weiträumige Absenkung des Grundwasserspiegels (s. Abb. 41), welche im zentralen Bereich zwischen HFB 2 und HFB 5 über 2 m beträgt. Dieser Sachverhalt ist zurückzuführen auf die höhere Pumpleistung der dort gelegenen Brunnen (allen voran HFB 4) und den hohen Filterwiderstand der Uferböschung, welcher ein schnelles Nachströmen von Donauwasser unterbindet. Die vorliegende Grafik zeigt ein minimales Gefälle von der Neuen Donau zu den Filtersträngen. Demnach kann ein Einziehen von Wasser der Neuen Donau nicht ausgeschlossen werden. Angesichts der wenig optimierten Kalibrierung des Randbereichs soll dieser Modellaussage jedoch nicht die volle Bedeutung zugeschrieben werden. Überdies zeigt im nächsten Kapitel eine Gegenüberstellung von infiltrierenden und exfiltrierenden Wassermengen im Grundwasserleiter der Donauinsel ein differenziertes Bild.

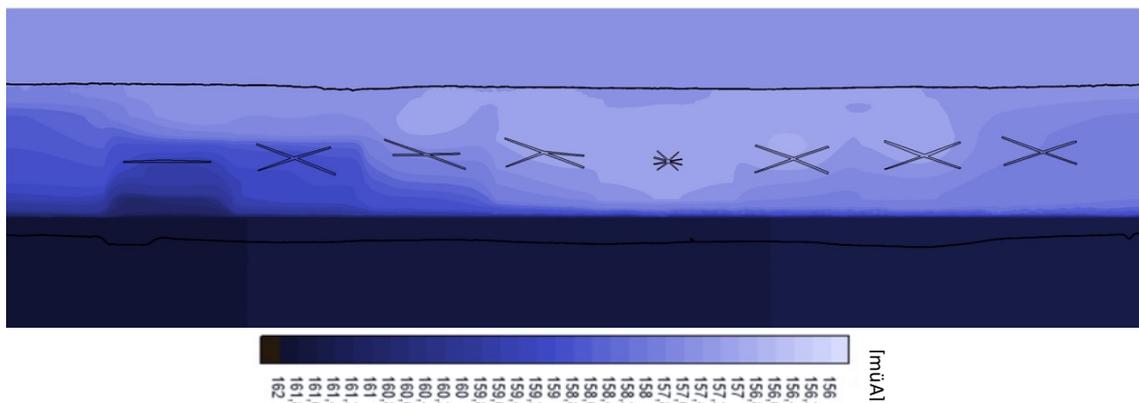


Abb.41: Grundwasserschichtlinienplan bei Step 864

Abbildung 42 zeigt den Querschnitt auf Höhe des HFB 3. Der Verlauf der Grundwasserspiegellinie verbildlicht den Potentialabbau über den Inselkörper. Auffallend ist der markante Sprung des Wasserstandes bei Eintritt in den Grundwasserkörper, der aus der Kombination von großem Filterwiderstand und darauffolgender hoher Durchlässigkeit entsteht. In weiterer Folge stellt sich ein geringes Gefälle ein, das im Böschungsbereich der Neuen Donau wieder zunimmt. Die maßgebliche Speisung des Grundwasserkörpers erfolgt über die Gewässersohle. Dieser Sachverhalt wird in BLASCHKE *et al.* (2002) beschrieben und resultiert aus dem hohen Kolmationsgrad der Böschung, welcher zur Flussmitte hin abnimmt.

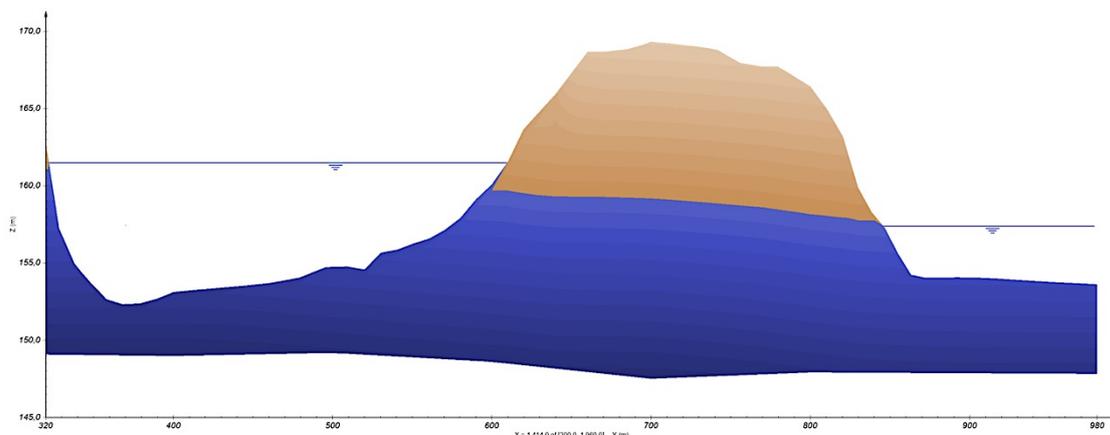


Abb.42: Querschnitt auf Höhe HFB3 bei Step 670

Bei Pumpbetrieb bildet sich im unteren Fassungsbereich kein prägnanter Absenktrichter aus (s. Abb. 43), wie auch im Schichtlinienplan erkenntlich ist. Dies ist auf die weitreichenden Filterstränge und die hohe Durchlässigkeit des Grundwasserkörpers zurückzuführen. Zudem ergibt sich eine Erhöhung der Fließgeschwindigkeit im Zuströmbereich von 0,3 - 0,5 auf 0,4 - 0,9 m/h. Weiters ist ein deutliches Zuströmen zu den Brunnen sowie ein geringerer Austausch zwischen Donauinsel und Neuer Donau wahrnehmbar.

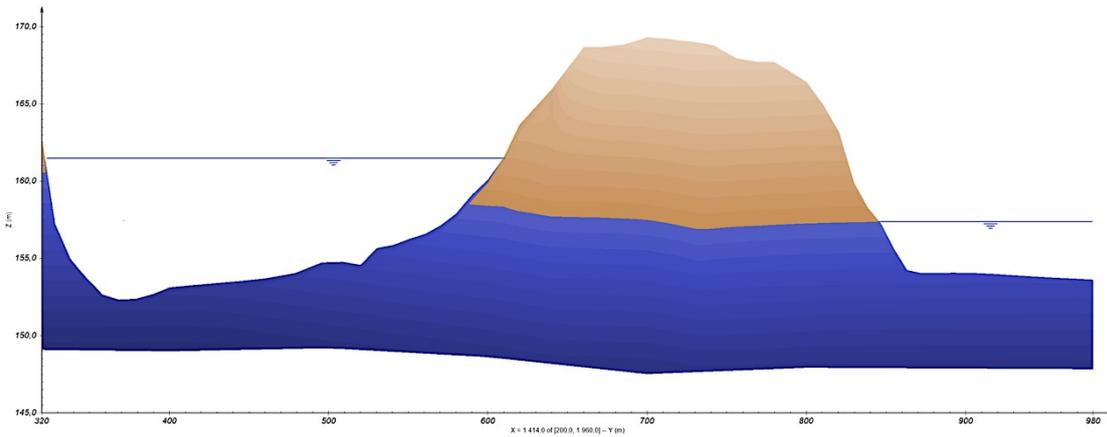


Abb.43: Querschnitt auf Höhe HFB3 bei Step 864

Abbildung 44 überlagert die Längsschnitte beider Zustände in einer Grafik. Der hell hinterlegte Grundwasserstand zeigt das minimale Fließgefälle in Insel-Längsrichtung ohne Betrieb der Pumpen auf. Durch den direkten Vergleich ist die gesamtheitliche Absenkung über die Länge des Brunnenfeldes infolge der Wasserentnahme deutlich erkennbar. Einzig im Bereich des HFB 8 bildet sich lokal ein definierter Absenktrichter aus. Als Hauptursache ist die geringe Durchlässigkeit zu nennen. Ein weiterer Grund bildet die Ausführung des Brunnens mit lediglich zwei Filtersträngen (s. Querschnitt HFB 8 im Anhang).

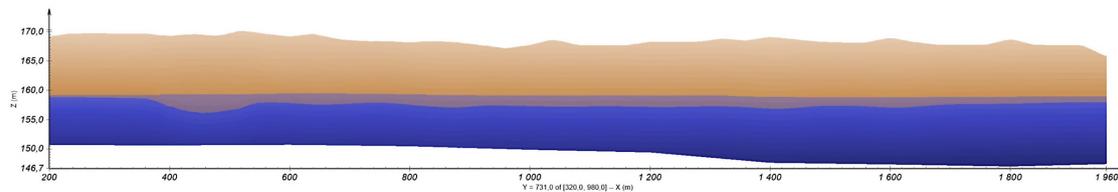


Abb.44: Überlagerte Längsschnitte durch Inselmitte

Die Strömungssimulation zeigt, dass die in der Literatur beschriebenen charakteristischen Grundwassermechanismen der Donauinsel vom Modell gut erfasst werden. Die Ergebnisse veranschaulichen das Zusammenspiel von Kolmationsschicht, dichtem Uferaufbau und hoher Durchlässigkeit des Aquifers, welches den Grundwasserleiter der Donauinsel prägt.

6.2 Szenarioanalyse - Kolmatierung der gesamten Donausohle

Die Fragestellung der fortschreitenden Kolmation taucht bereits in der Vergangenheit mit der Errichtung des Kraftwerkes Freudenu auf. Zum damaligen Zeitpunkt konnten keine genauen Aussagen zur Kolmationsentwicklung getroffen werden. Gewiss war, dass mit der Verdichtung der Gewässersohle eine Reduzierung des Uferfiltratzuflusses einhergeht. Inwiefern der Betrieb des Grundwasserwerkes Donauinsel Nord dadurch gefährdet wird, konnte hingegen nicht prognostiziert werden. Erst langjährige Beobachtungen zeigten ein allmähliches Einhalten des Kolmationsprozesses bis zum heutigen, nahezu konstanten Zustand, wodurch die Sicherstellung des Uferfiltratdargebotes und die Einhaltung des Wasserrechtsbescheides (5 cm - Kriterium) gegeben ist.

Das kalibrierte Modell erlaubt es auf einfache Weise eine andere Entwicklung der Situation zu simulieren. Für das Szenario einer theoretisch fortschreitenden Kolmatierung der gesamten Donausohle werden drei Zustände definiert und die jeweiligen Folgen auf das Grundwassersystem der Donauinsel untersucht.

- Der IST-Zustand entspricht den heutigen Gegebenheiten und dient als Referenz. Die Kolmatierung nimmt entgegen der Strömungsrichtung der Donau ab und ist im Bereich des HFB 8 geringer ausgeprägt. Die Sohle in Flussmitte ist nicht von der Kolmatierung betroffen und weist einen k_f -Wert von $2,8 \cdot 10^{-5}$ m/s auf.
- In Phase 1 wird eine Kolmatierung der gesamten Donausohle angenommen. Das Ausmaß der Verdichtung wird dem Kolmatierungsgrad im Bereich des HFB 8, mit einem k_f -Wert von $1,4 \cdot 10^{-6}$ m/s, angeglichen.
- Phase 2 stellt die fortschreitende Kolmatierung dar mit einer maximalen Durchlässigkeit von 10^{-7} m/s. Diese Wert wird von BLASCHKE *et al.* (2002) als mittlere Durchlässigkeit der Kolmationsschicht im Bereich des Schulschiffs angegeben.

Um möglichst realitätsnahe Randbedingungen zu schaffen, erfolgt die Analyse auf Basis jener Messdaten, die auch für die Strömungsanalyse herangezogen wurde. Der Betrieb aller Horizontalfilterbrunnen und die Pumpleistung entsprechend der Konsensmenge von 500 l/s stellt den maßgebenden Betriebsfall für die Wassergewinnung dar.

Zur Beurteilung der zu erwartenden Auswirkung folgt zunächst eine Gegenüberstellung des hydraulischen Druckpotentials der drei Zustände im Querschnitt auf Höhe des HFB 5. Wie in Abbildung 45 ersichtlich, zeigt sich bei Betrachtung des quasi-stationären Zustandes ohne Pumpbetrieb im Inselkörper während allen Phasen ein ähnliches Bild. Ein merklicher Unterschied ist nur im Bereich der Donausohle festzustellen. Im IST-Zustand infiltriert das Wasser mit geringem Potentialverlust über die Sohle in Flussmitte. Anschließend erfolgt entlang der Aquifersohle ein kontinuierlicher Potentialabbau. In Phase 2 ist der Infiltrationswiderstand in Flussmitte und am Böschungsfuß etwa gleich groß. Unter diesen Konditionen infiltriert Wasser vermehrt im Bereich der Uferböschung.

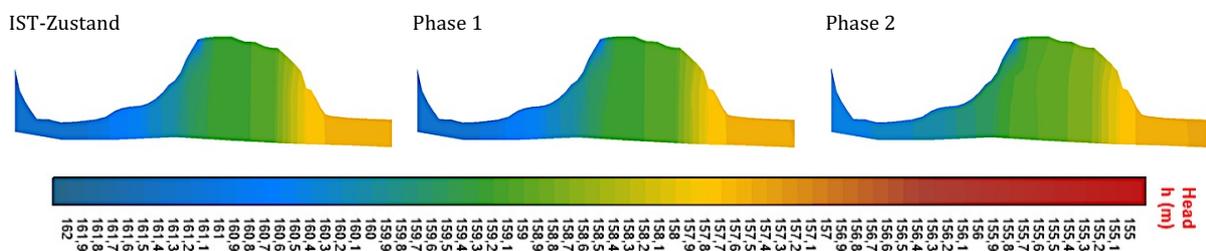


Abb.45: Szenarioanalyse - Potentialabbau ohne Betrieb der Brunnenreihe

Im Falle des Betriebes der Horizontalfilterbrunnen sind die Auswirkungen der fortschreitenden Kolmatierung deutlich zu erkennen. In Abbildung 46 lässt sich bereits in Phase 1 neben der Vergrößerung, auch eine Verschiebung des Potentialminimums hin zur Inselmitte feststellen. Im weiteren Verlauf verstärkt sich diese Entwicklung drastisch, wodurch das Einziehen von Wasser der Neuen Donau in Phase 2 gewiss wäre.

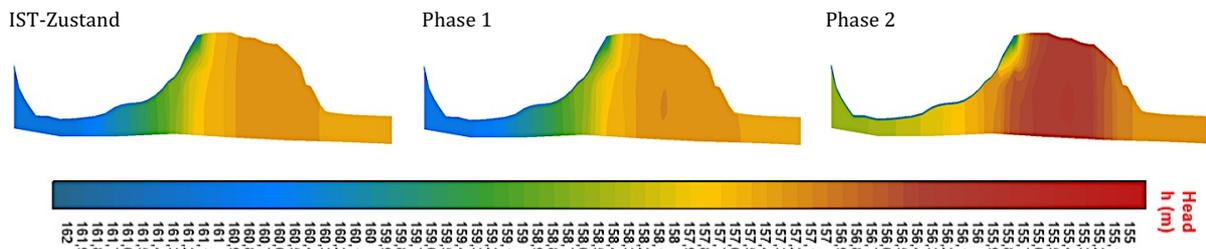


Abb.46: Szenarioanalyse - Potentialabbau der 3 Zustände bei Betrieb der Brunnenreihe

Um die Auswirkungen auf das Dargebot aufzuzeigen, folgt eine Bilanzierung der Volumenströme für den Grundwasserleiter der Donauinsel. Hierfür erforderlich ist die Definition eines Kontrollvolumens (s. Abb. 47). Ein Längsschnitt im Bereich der Uferböschung oberhalb des Donauwasserstandes misst die infiltrierenden Durchflussmengen der Donau. Diese werden in Abbildung 48 anhand der durchgezogenen Linien visualisiert. Die strichlierten Ganglinien stellen darin den simulierten Wasseraustausch zwischen Aquifer und Neuer Donau dar, welcher sich aus der Summe aller Volumenströme über die gesamte Böschungsoberfläche und die Gewässersohle berechnet. Positive Werte deuten dabei auf eine Infiltration in den Grundwasserkörper hin, negative Werte stehen für eine Exfiltration.

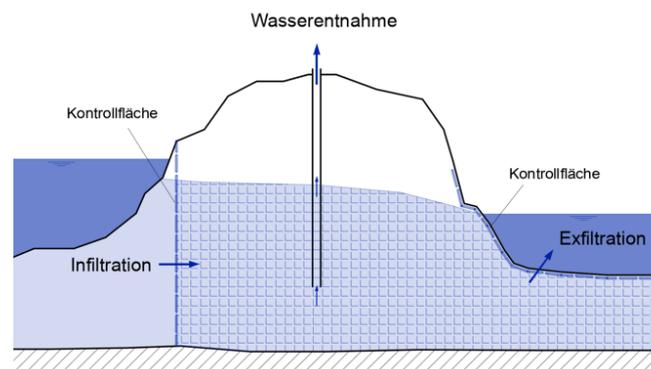


Abb.47: Abgrenzung des Kontrollvolumens

Bei Betrachtung des quasi-stationären Zustandes besteht erwartungsgemäß für jedes Szenario annähernd ein Gleichgewicht zwischen infiltrierender und exfiltrierender Wassermenge. Infolge des Brunnenbetriebes wird ein größeres Potentialgefälle erzeugt, das in allen Fällen zu einer Erhöhung des Uferfiltratzuflusses führt. Gleichzeitig findet durch die Wasserentnahme eine Verringerung der Exfiltration statt.

Auffallend ist, dass sich Phase 1 nur geringfügig vom Referenzzustand unterscheidet. Mit Inbetriebnahme der Brunnen stellt sich, unter Ausklammerung des Zeitraumes der unregelmäßigen Förderleistung zwischen Stunde 730 bis 790, bei beiden Zuständen eine nahezu konstante Filtratmenge ein. Der Zustrom von ca. $1780 \text{ m}^3/\text{h}$ entspricht dabei in etwa der Konsensmenge von 500 l/s ($=1800 \text{ m}^3/\text{h}$). Folglich ist im Verlauf der strichlierten Kurven mit zunehmender Dauer des Pumpbetriebes eine stetige Abnahme der Exfiltration und eine Annäherung gegen Null erkennbar.

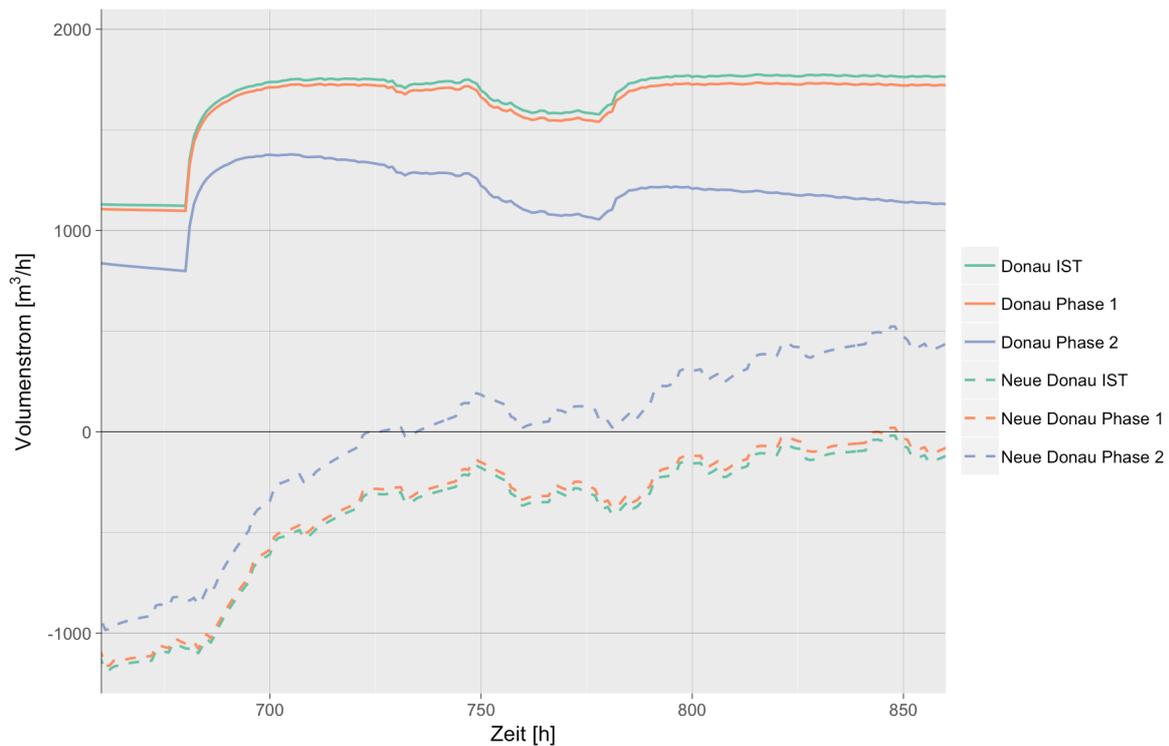


Abb.48: Bilanzierung der Grundwasserströme der Donauinsel

In Phase 2 kommt es infolge des höheren Filterwiderstandes im gesamten Modellraum zu einer Reduzierung im Zustrom um rund 23 %, von 1100 auf rund 850 m³/h. Die durch den Brunnenbetrieb herbeigeführte Erhöhung ist in allen Phasen im ähnlichen Ausmaß zu beobachten. Dies lässt die Vermutung aufkommen, dass es sich bei der Zunahme um jene Wasser handelt, welche sich bereits im Zuströmbereich unterhalb der Donausohle und der Uferböschung aufhält. Bei anhaltendem Betrieb ist in Phase 2 eine deutliche Verringerung des infiltrierenden Volumens wahrnehmbar. Die entzogene Menge wird nicht mehr durch das Filtratdargebot gedeckt, wodurch eine Entnahme von Wasser der Neuen Donau resultiert. Dieser Umstand wird durch den Übergang vom negativen in den positiven Wertebereich visualisiert.

Dieser Analyse zufolge, wäre die Auswirkung einer fortschreitenden Kolmatierung der gesamten Donausohle stark vom Grad der Verdichtung abhängig. Die Verringerung der momentanen Durchlässigkeit von rund $2,8 \cdot 10^{-5}$ m/s auf $1,4 \cdot 10^{-6}$ m/s hätte eine Reduzierung des Uferfiltratdargebotes von ca. 2,5 % zu Folge. Dadurch wären keine unmittelbaren Auswirkungen auf das Grundwassersystem zu erwarten. Die weiterführende Verdichtung wird im Szenario einer Verringerung der Durchlässigkeit der Kolmationsschicht im gesamten Modellgebiet auf einen Maximalwert von $1,0 \cdot 10^{-7}$ m/s gleichgesetzt. Die Uferböschung wäre dabei ebenso betroffen. Eine derartige Kolmatierung hätte enorme Auswirkungen auf den Grundwasserhaushalt der Donauinsel und würde die Rahmenbedingungen für Wassergewinnung maßgeblich verändern.

7 Zusammenfassung und Ausblick

Mithilfe der Software SVFlux konnte ein 3D Finite Elemente Grundwassertransportmodell erstellt werden, welches die Beurteilung der Grundwasserverhältnisse der Donauinsel ermöglicht. Auf Basis eines digitalen Geländemodells und Sohlprofilmessungen der Donau, sowie unter Zuhilfenahme eines bestehenden Modells konnte eine realitätsnahe Einarbeitung der vorliegenden Geometrien und Strukturen erfolgen. Im Anschluss wurde die Kalibrierung des Modells anhand eines maßgebenden Betriebsfalles des Grundwasserwerkes Donauinsel Nord durchgeführt. Abschließend wurde die Anwendbarkeit des Modells mit einer Strömungssimulation und einer Szenarioanalyse geprüft.

In Bezug auf Ausgangsdaten und Erkenntnisse der vorangegangenen Literaturstudie kann gesagt werden, dass die charakteristischen Gegebenheiten der Donauinsel gut im Modell implementiert sind und die beschriebenen Grundwassermechanismen zufriedenstellend erfasst werden. Dies wird anhand der Kalibrierkurven verdeutlicht und durch Auswertung der Nash-Sutcliffe-Effizienz bestärkt.

Auf Basis der Kalibrierung wird für den zentralen Inselkörper eine mittlere Durchlässigkeit von $7,0 \cdot 10^{-3}$ m/s angegeben, welche die hohe Durchlässigkeit der Donauinsel widerspiegelt. Eine Ausnahme stellt der Bereich um HFB 8 dar, der mit einem mittleren k_f -Wert von $5,6 \cdot 10^{-4}$ m/s wesentlich dichter modelliert wurde. Die Kolmationsschicht weist im Modell k_f -Werte zwischen $1,4 \cdot 10^{-6}$ und $7,8 \cdot 10^{-9}$ m/s auf, wobei die Durchlässigkeit mit zunehmender Entfernung vom Kraftwerk Freudenufer steigt. Für die Anwendung des VGM-Modells zur Berücksichtigung der Grundwasserströmung der ungesättigten Zone der Donauinsel, werden die Richtwertangaben nach WOESTEN (1999) als wertvolle Hilfestellung gesehen.

Die Ergebnisse der Strömungssimulation unterstreichen den großen Einfluss der Kolmationsschicht auf den Grundwasserhaushalt der Donauinsel. Die Kolmatierung im Böschungsbereich zeigt sich verantwortlich für den großen Potentialabbau beim Eintritt in den Aquifer und bedingt zudem die überwiegende Speisung über die Flusssohle der Donau. Die Absenkung bei Betrieb aller Horizontalfilterbrunnen erfolgt (mit Ausnahme des obersten Fassungsbereichs bei HFB 8) sehr weiträumig ohne Ausbildung definierter Absenkrichter.

Die praktische Anwendbarkeit des Modells wurde anhand der Szenarioanalyse gezeigt. Hierbei wurde die theoretisch fortschreitende Kolmatierung der gesamten Donausohle untersucht, welche aus gegenwärtiger Sicht unwahrscheinlich ist. Der Analyse zufolge, sind die Auswirkungen stark vom Kolmatierungsgrad abhängig. Die Ausweitung der Kolmationsschicht auf den Bereich der Flussmitte (im Modell realisiert durch eine Reduzierung des k_f -Wertes auf $1,4 \cdot 10^{-6}$ m/s) zeigt keine unmittelbaren Auswirkungen auf den Grundwasserhaushalt. Hingegen ist bei einer weiterführenden Verdichtung im gesamten Untersuchungsraum (umgesetzt durch die Beschränkung des k_f -Wertes der Kolmationsschicht auf maximal 10^{-7} m/s) mit einer Verringerung des Uferfiltratmenge von rund 23 % zu rechnen. Überdies konnte anhand einer Bilanzierung der Volumenströme im Grundwasserleiter der Donauinsel festgestellt werden, dass die Konsensmenge von 500 l/s in der Größenordnung des gegenwärtigen Dargebotes liegt.

Weiters ist das erstellte Modell als eine Grundlage für ein Instrument zu verstehen, welches nach einer weiterführenden Kalibrierung für den Bereich Nußdorf eine Beurteilung des gesamten, zusammenhängenden Grundwasserleiters erlaubt. Mit der Erweiterung können beispielsweise Problemstellungen hinsichtlich der Interaktion der Brunnenfelder untersucht werden, welche im Hinblick auf die Betriebsoptimierung von großer Bedeutung ist. Als weiterer Schritt wird die Kalibrierung von Stofftransporten nahegelegt um zukünftig auch eine Bewertung qualitativer Art zu erlauben.

Literaturverzeichnis

- Anderson, M. P., Woessner, W. W. (1992). *Applied groundwater modeling: simulation of flow and advective transport*. Academic press.
- Blaschke, A. P., Braunschöfer, R., Feregyhazy, H., Gutknecht, D., Habersack, H., Karner, Ch., Mayr, P., Schmalfuß, R., Schober, St., Sengschmitt, D., Steiner, K.-H. (2002): *Kolmationsprozesse am Beispiel des Stauraumes Freudenau, Projektphase II – Vollstau*. Forschung im Verbund, Schriftenreihe Band 75; Verbund, Eigenverlag, Wien.
- Blaschke, A. P., Steiner, K. H., Schmalfuß, R., Gutknecht, D., & Sengschmitt, D. (2003). *Clogging processes in hyporheic interstices of an impounded river, the Danube at Vienna, Austria*. International Review of Hydrobiology: A Journal Covering all Aspects of Limnology and Marine Biology, 88(3-4), 397-413.
- Bouwer, H. (2002). *Artificial recharge of groundwater: hydrogeology and engineering*. Hydrogeology Journal, 10(1), 121-142.
- Carsel, R. F., & Parrish, R. S. (1988). *Developing joint probability distributions of soil water retention characteristics*. Water resources research, 24(5), 755-769.
- Darcy, H. P. G. (1856). *Les Fontaines publiques de la ville de Dijon. Exposition et application des principes à suivre et des formules à employer dans les questions de distribution d'eau, etc.* V. Dalamont.
- David, J. (1998). *Grundwasserhydraulik: Strömungs- und Transportvorgänge*. Vieweg, Wiesbaden.
- Dillon, P. (2005). *Future management of aquifer recharge*. Hydrogeology journal, 13(1), 313-316.
- Donaukraft Österreichische Donaukraftwerke AG (1995). *Stauraum: Linkes Ufer, Bereich Neue Donau-Donauinsel. Bewirtschaftung Neue Donau*. Technischer Bericht. Donaukraft, Wien.
- Doussan, C., Poitevin, G., Ledoux, E., & Detay, M. (1997). River bank filtration: modelling of the changes in water chemistry with emphasis on nitrogen species. *Journal of contaminant hydrology*, 25(1-2), 129-156.
- Derx, J., Blaschke, A. P., & Blöschl, G. (2010). Three-dimensional flow patterns at the river-aquifer interface—a case study at the Danube. *Advances in Water Resources*, 33(11), 1375-1387.
- Gutknecht, D., Blaschke, A. P., Schmalfuß, R., Sengschmitt, D., Steiner, K.-H., Reichel, K. G., Feregyhazy H., Herndl, G. J., Battin, T. J., Dreher, J. E. (1998). *Kolmationsprozesse am Beispiel des Stauraumes Freudenau*. Forschung im Verbund, Bd. 44, Eigenverlag Wien.
- Hiscock, K. M., & Grischek, T. (2002). *Attenuation of groundwater pollution by bank filtration*. Journal of Hydrology, 266(3-4), 139-144.
- Hölting, B. (1980). *Hydrogeologie: Einführung in die Allgemeine und Angewandte Hydrogeologie*. Enke Verlag, Stuttgart.
- Hölting, B., Coldewey, W. (2013). *Hydrogeologie: Einführung in die Allgemeine und Angewandte Hydrogeologie*. Springer-Verlag
- Hüper, G., Haertl, H., Zerobin, W. (2005). *Bau von acht Horizontalfilterbrunnen auf der Donauinsel in Wien*. bbr Fachmagazin für Brunnen- und Leitungsbau, Ausgabe 2/05, 32-39
- Istok, J. (1989). *Groundwater Modeling by the Finite Element Method*. Water Resources Monograph Volume 13. American Geophysical Union
- Kerber, G. (2017). *Tiefengrundwasser Donauinsel*. Interdisziplinäre Projektarbeit, Institut für Wasserbau und Ingenieurhydrologie, Technische Universität Wien.
- Kinzelbach, W., Rausch, R. (1995). *Grundwassermodellierung - Eine Einführung mit Übungen*. Bortraeger Verlag, Stuttgart.
- Kinzelbach, W. (2011). *Hydraulik I*. Vorlesungsunterlagen, Eidgenössische Technische Hochschule Zürich.
- Küpper, H. (1954). *Geologie und Grundwasservorkommen im südlichen Wiener Becken*. Jahrbuch Geol. B. A. Bd. XCVII. 162-209
- MA 22 - Umweltschutz (2004). *Wiener Umweltbericht 2002/2003*. Magistrat der Stadt Wien.
- MA 31 - Wiener Wasser (o.D.). *Der Weg des Wiener Wassers von den Alpen in die Stadt*. <https://www.wien.gv.at/wienwasser/versorgung/weg/> abgerufen am 14.02.2019
- MA 45 - Wiener Gewässer (2017). *Donauhochwasserschutz Wien*. Magistrat der Stadt Wien.

- Massinger, G., Michlmayr, F. (2003). *Die Uferstrukturen der Donauinsel im Stauraum Freudenau*. Denisia 10, 11-25
- Massmann, G., Pekdeger, A., Dünnbier, U., Heberer, T., Richter, D., Sültenfuß, J., & Tosaki, Y. (2009). *Hydrodynamische und hydrochemische Aspekte der anthropogen und natürlich induzierten Uferfiltration am Beispiel von Berlin/Brandenburg*. Grundwasser, 14(3), 163-177.
- Mathiak, F. U., 2010. *Die Methode der finiten Elemente (FEM) - Einführung und Grundlagen*. Hochschule Neu-Brandenburg.
- Michlmayr, F. (2002). *Die Grundzüge des Donauinsel-Projektes*. Denisia 03, 11-23
- Mualem, Y. (1976). *A new model for predicting the hydraulic conductivity of unsaturated porous media*. Water resources research, 12(3), 513-522.
- Nash, J. E., Sutcliffe, J.V., 1970. River flow forecasting through conceptual models part I - A discussion of principles. Journal of hydrology 10.3, 282-290
- ÖVGW, (2004). *ÖVGW Richtlinie W 72: 2004 02 - Schutz- und Schongebiete*. Österreichische Vereinigung für Gas- und Wasserfach
- Reiner, P., (2012). *3D-Modellierung der Grundwasserverhältnisse für einen Teilbereich der Donauinsel Wien*. Diplomarbeit, Institut für Wasserbau und Hydrologie, Technische Universität Wien.
- Richards, L. A. (1931). *Capillary conduction of liquids through porous mediums*. Physics, 1(5), 318-333.
- Scheffer, F., & Schachtschabel, P. (1998). Lehrbuch der Bodenkunde. 14.
- Schmitzer, M., Thummerer, J. (2016). *Geophysikalische Charakterisierung der Donauinsel*. Bachelorarbeit, Departement für Geodäsie und Geoinformation, Technische Universität Wien.
- Thode, R., & Fredlund, M.D. (2013). *SVOffice 2009: 1D, 2D, 3D Finite Element Modeling Software - User's Manual*. SoilVision Systems Limited., Sakatchewan, Canada.
- Thode, R., Gitirana, G. (2014). *SVFlux: 2D/3D Seepage Modeling Software - Theory Manual*. Soilvision Systems Ltd., Sakatchewan, Canada.
- Van Genuchten, M. T. (1980). *A closed-form equation for predicting the hydraulic conductivity of unsaturated soils 1*. Soil science society of America journal, 44(5), 892-898.
- Wessely, G. (1983). *Zur Geologie und Hydrodynamik im südlichen Wiener Becken und seiner Randzone*. Mitt. österr. geol. Ges. 76, 27-68
- Wösten, J. H. M., Lilly, A., Nemes, A., & Le Bas, C. (1999). *Development and use of a database of hydraulic properties of European soils*. Geoderma, 90(3-4), 169-185.
- Ziegler, D. H. (2001). *Untersuchungen zur nachhaltigen Wirkung der Uferfiltration im Wasserkreislauf Berlins*. Dissertation, Fakultät III - Prozesswissenschaften, Technische Universität Berlin.

Abbildungsverzeichnis

Abb.1:	Massenflüsse am Repräsentativen Elementarvolumen	3
Abb.2:	Experimentelle Bestimmung der Durchlässigkeit nach DARCY	5
Abb.3:	Schematisierung der Randbedingungen einer 2D Strömung	6
Abb.4:	Beziehung zwischen Matrixpotential und Wassergehalt für verschiedene Bodenarten	7
Abb.5:	Diskretisierung FDM und FEM	9
Abb.6:	Lage des Untersuchungsgebietes	12
Abb.7:	Bohrprofil der Donauinsel	14
Abb.8:	Geologischer Querschnitt auf Höhe der Jedleseer Brücke	15
Abb.9:	Lage der Brunnen im Untersuchungsraum	16
Abb.10:	Uferfiltratzufluss zur Neuen Donau von 1996 bis 2000	18
Abb.11:	Lageplan der berücksichtigten Messstellen	20
Abb.12:	Ganglinien der Oberflächengewässer im umliegenden Raum des Jahres 2017	21
Abb.13:	Fördermengen der Grundwasserwerke Donauinsel Nord und Nußdorf im Jahr 2017	22
Abb.14:	Einflussbereiche der Brunnen	23
Abb.15:	Interaktion der Brunnenfelder im Juni 2017	24
Abb.16:	Schematische Darstellung der Modellgrenzen und Randbedingungen im Grundriss	25
Abb.17:	Schematische Darstellung der Modellgrenzen und Randbedingungen im Querschnitt	25
Abb.18:	Schematische Darstellung des Potentialabbaus auf Höhe HFB 4	26
Abb.19:	Gemessene Wasserspiegel und Entnahmemengen im Zeitraum der Kalibrierung	27
Abb.20:	Struktur eines 3D Modells in SVFlux	30
Abb.21:	Planung und Geländekonstruktion in Civil 3D	31
Abb.22:	Der erweiterte Modellraum in SVFlux	32
Abb.23:	Vertikale Unterteilung mit <i>Surfaces</i>	32
Abb.24:	Vorläufige Regionalisierung	33
Abb.25:	Erstmalige Verteilung der Materialien vor der Kalibrierung	34
Abb.26:	Automatische <i>Mesh</i> -Verdichtung im Bereich kleiner Geometrien	35
Abb.27:	Finale Regionalisierung des Modells in der Aufsicht	37
Abb.28:	Ganglinien einer instationären Berechnung in Flex PDE	38
Abb.29:	Kalibrierung Kolmationsschicht bei k_v -Variation	39
Abb.30:	Kalibrierung Donauschotter bei k_v - und n_v -Variation	40
Abb.31:	Kalibrierung Donauschotter bei Berücksichtigung des ungesättigtes Materialverhalten	41
Abb.32:	Vergleich Saugspannungskurven bei α - und n_v -Variation	42
Abb.33:	Vergleich Speicherkurven bei α - und n_v -Variation	42
Abb.34:	Kalibrierschritte DS602 (0-2)	43
Abb.35:	Kalibrierschritte DS602 (3-4)	44
Abb.36:	3D-Ansicht des gesamten Modellraums	45
Abb.37:	Materialverteilung im Querschnitt bei HFB5	46
Abb.38:	Kalibrierte Grundwasserstandsganglinien und Einordnung in die definierten Bewertungskategorien nach NSE	47
Abb.39:	Nash-Sutcliffe-Efficiency im kalibrierten Modellraum	47
Abb.40:	Grundwasserschichtlinienplan bei Step 670	49
Abb.41:	Grundwasserschichtlinienplan bei Step 864	50
Abb.42:	Querschnitt auf Höhe HFB3 bei Step 670	50
Abb.43:	Querschnitt auf Höhe HFB3 bei Step 864	51
Abb.44:	Überlagerte Längsschnitte durch Inselmitte	51
Abb.45:	Szenarioanalyse - Potentialabbau ohne Betrieb der Brunnenreihe	52
Abb.46:	Szenarioanalyse - Potentialabbau der 3 Zustände bei Betrieb der Brunnenreihe	53
Abb.47:	Abgrenzung des Kontrollvolumens	53
Abb.48:	Bilanzierung der Grundwasserströme der Donauinsel	54

Tabellenverzeichnis

Tab.1:	Durchlässigkeitsbeiwerte in Anhängigkeit vom Bodentyp	4
Tab.2:	Anfangs gewählte Materialparameter	34
Tab.3:	Van Genuchten - Mualem - Parameter in der Literatur	41
Tab.4:	Wertebereich der vergebenen Materialparameter	46

Anhang

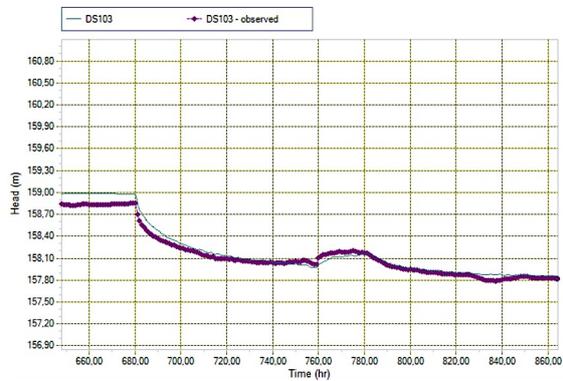
Grundwasserstandsganglinien gemessen und berechnet nach Modellkalibrierung

Bereich Donauinsel

DBIB2 (NSE=0,30)



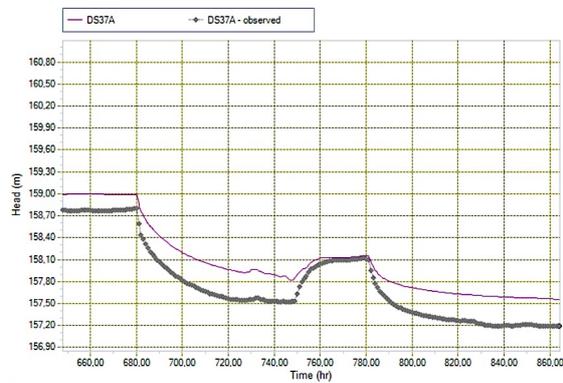
DS103 (NSE=0,94)



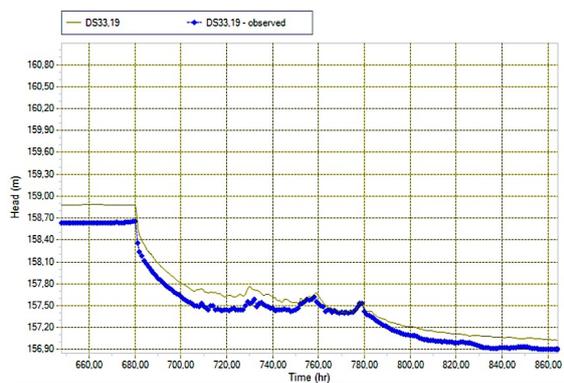
DS32,7 (NSE=0,98)



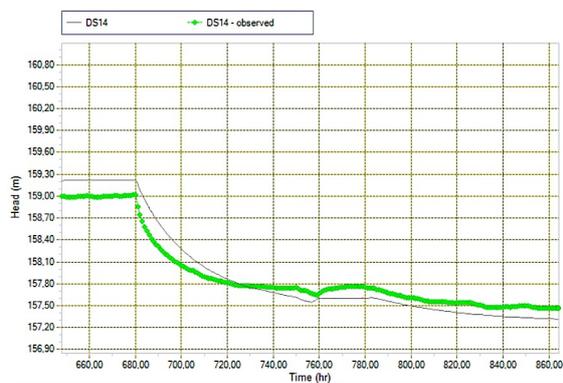
DS37A (NSE=0,64)



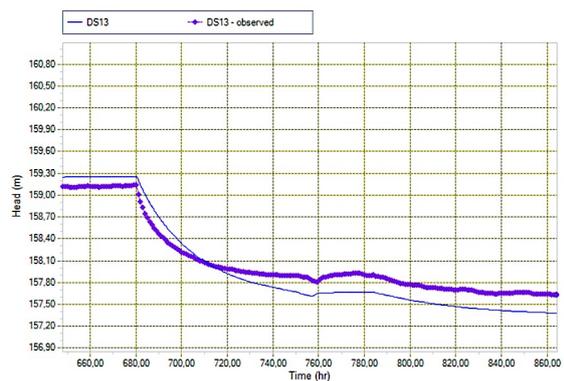
DS33.19 (NSE=0,92)



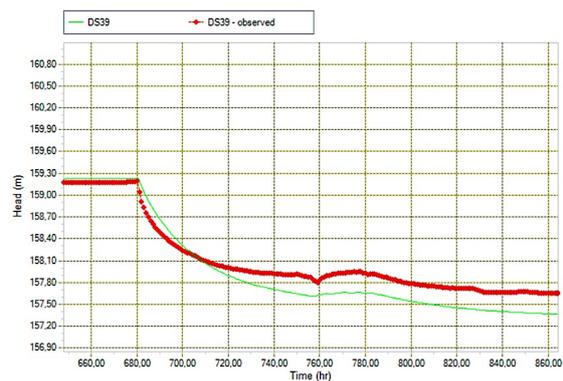
DS14 (NSE=0,89)



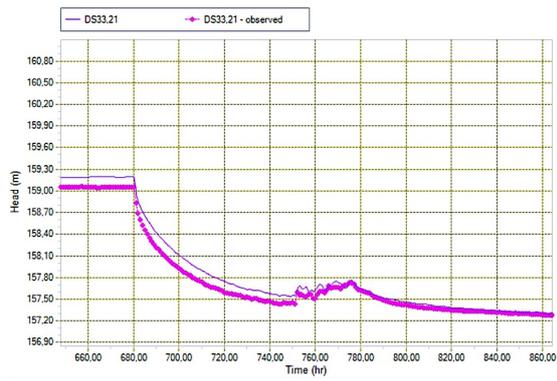
DS13 (NSE=0,84)



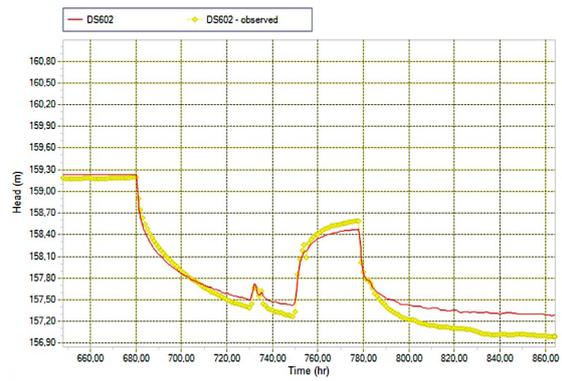
DS39 (NSE=0,83)



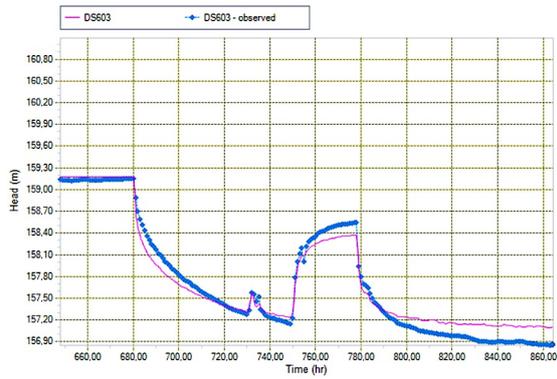
DS33.21 (NSE=0,97)



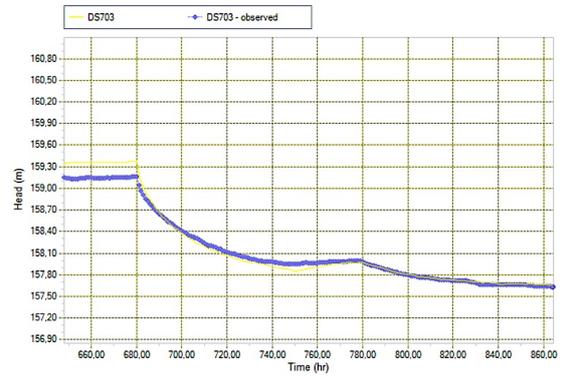
DS602 (NSE=0,95)



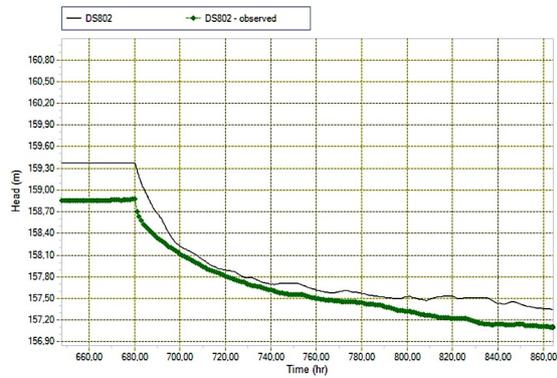
DS603 (NSE=0,97)



DS703 (NSE=0,97)

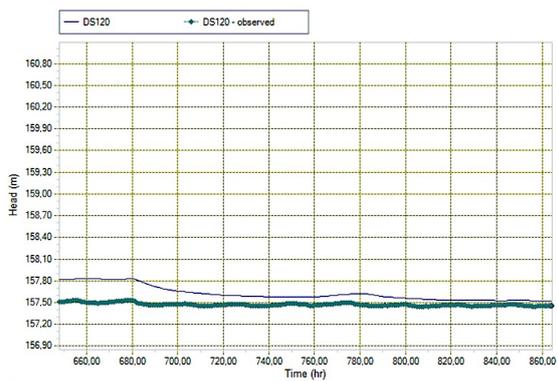


DS802 (NSE=0,76)

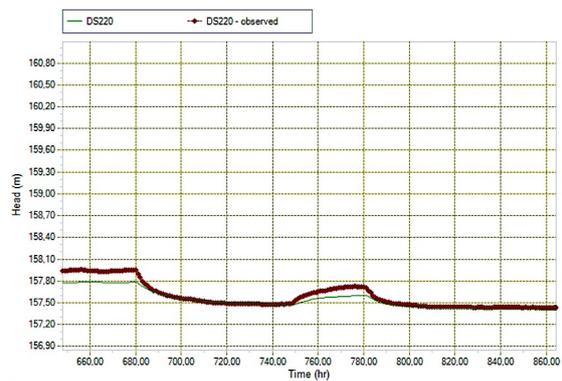


Bereich Donauinsel - Ufer Neue Donau

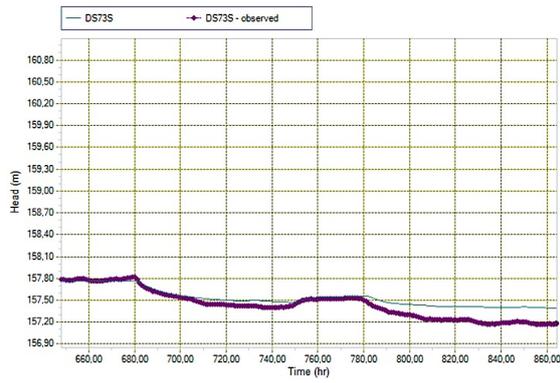
DS120 (NSE=-78,49)



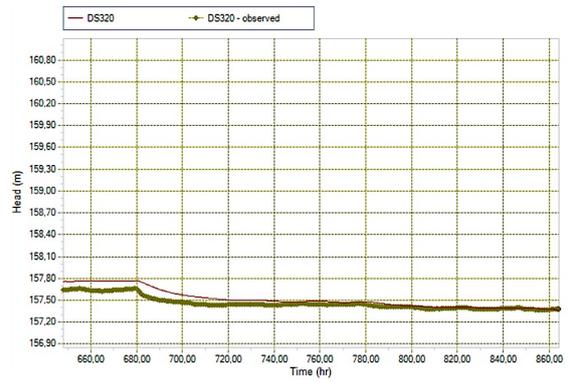
DS220 (NSE=0,80)



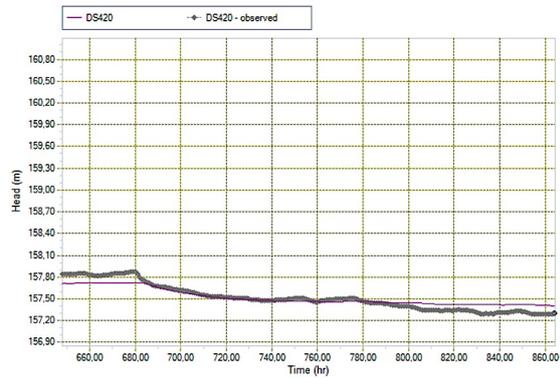
DS37S (NSE=0,63)



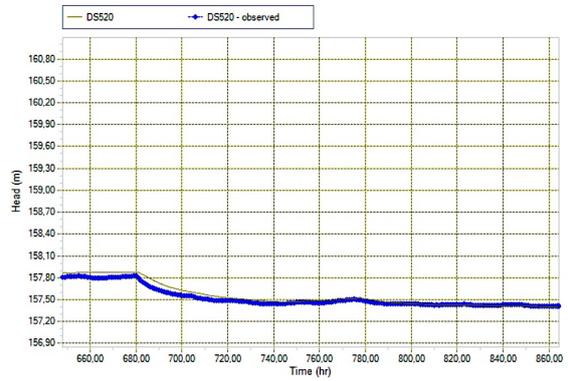
DS320 (NSE=0,26)



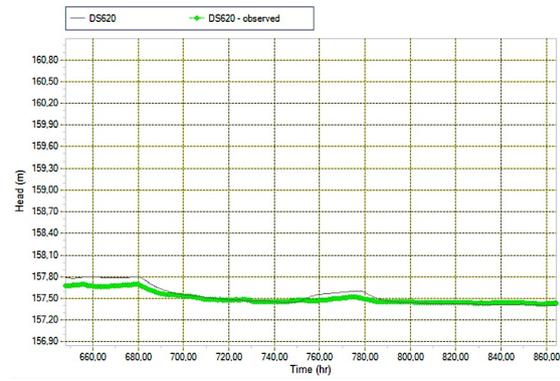
DS420 (NSE=0,81)



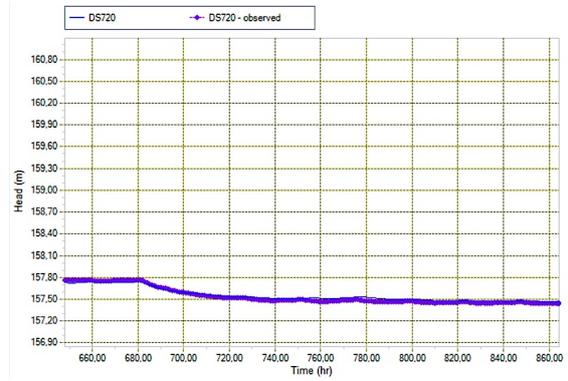
DS520 (NSE=0,90)



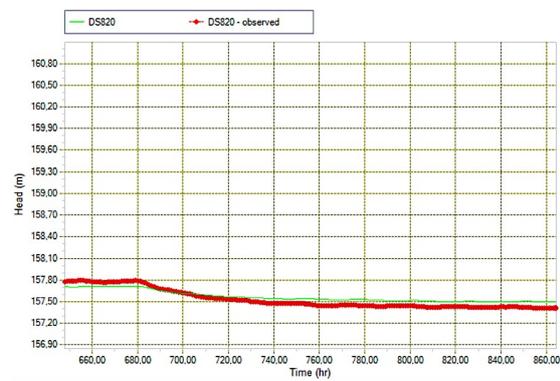
DS620 (NSE=0,56)



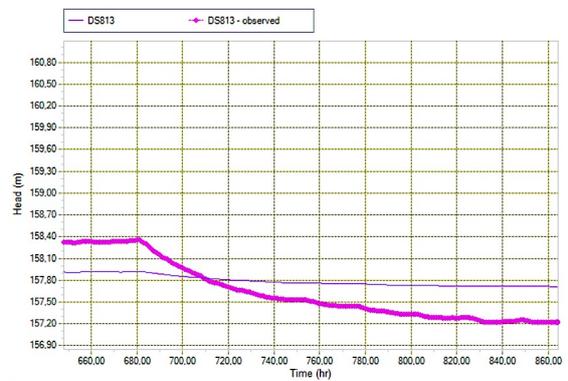
DS720 (NSE=0,94)



DS820 (NSE=0,73)

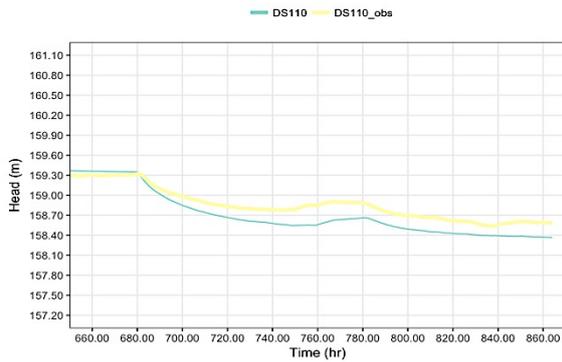


DS813 (NSE=0,19)

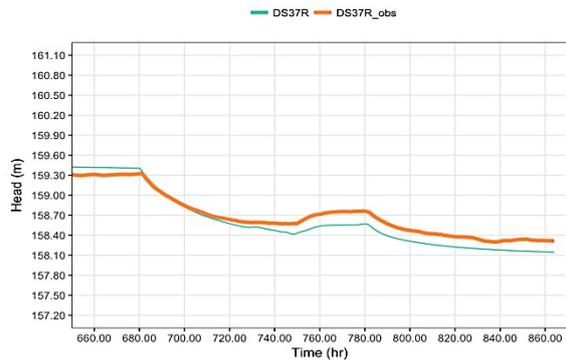


Bereich Donauinsel - Ufer Donau

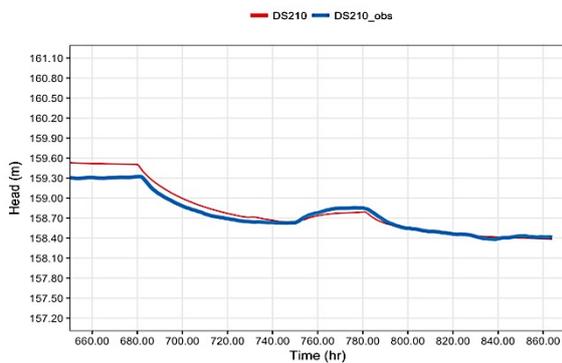
DS110 (NSE=0,41)



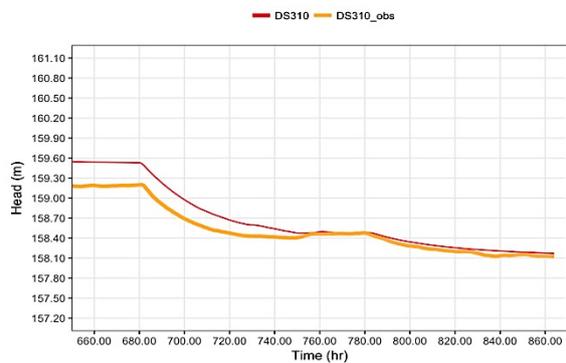
DS37R (NSE=0,83)



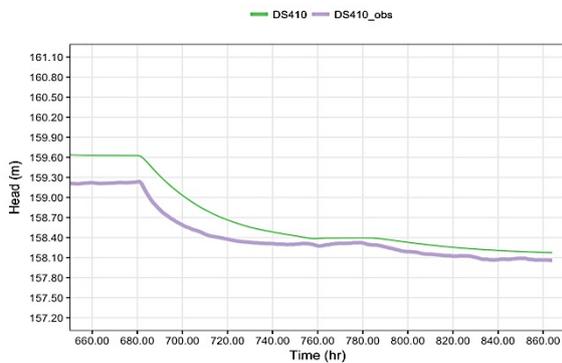
DS210 (NSE=0,88)



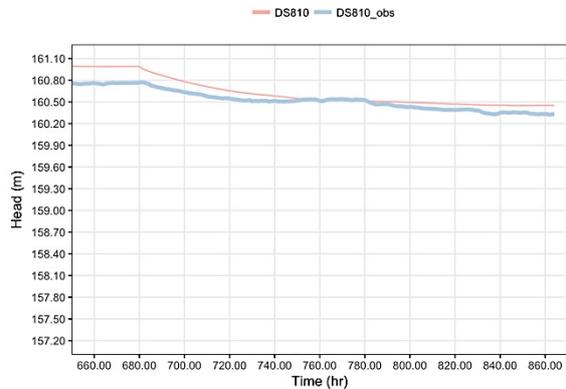
DS310 (NSE=0,68)



DS410 (NSE=0,49)

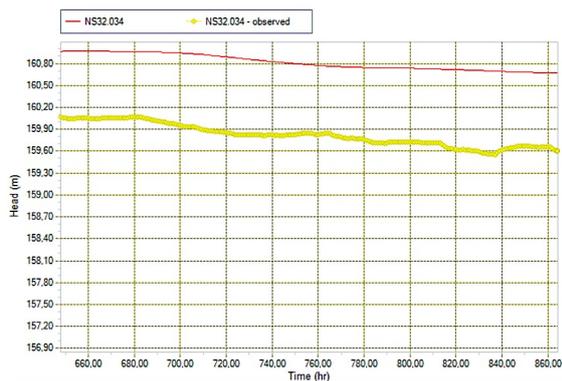


DS810 (NSE=0.13)

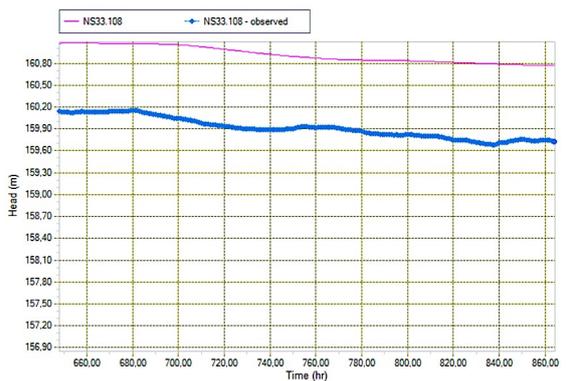


Bereich Nußdorf

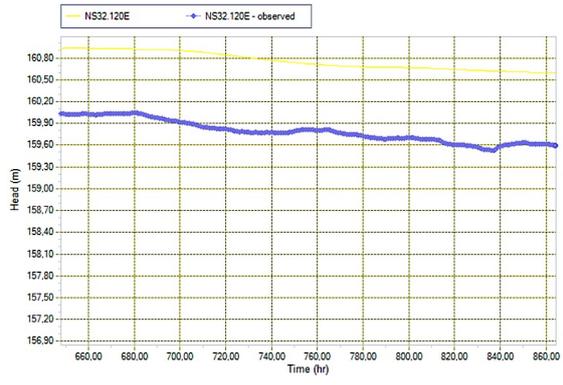
NS32.034



NS33.108



NS32.120E

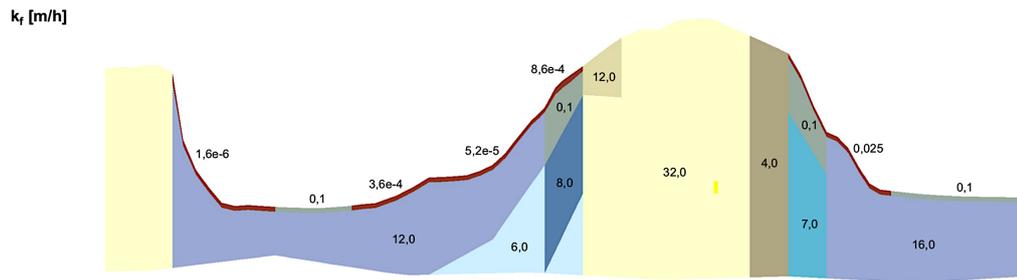


Liste der definierten Materialien in SVFlux

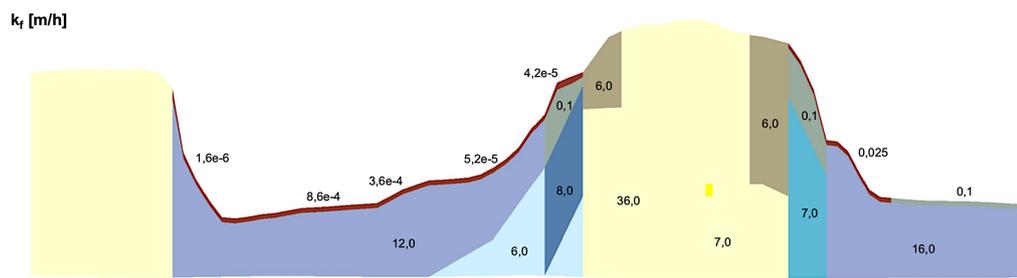
Materials		
X_Schotter_bank	ksat = 1,00E-001 (m/hr)	n = 0,1
X_Schotter_bed	ksat = 1,60E+001 (m/hr)	n = 0,18
X_Kolmation_ND	ksat = 2,50E-002 (m/hr)	n = 0,13
ND_DI4_7	ksat = 7,00E+000 (m/hr)	n = 0,14
ND_DI4_7_sat	ksat = 7,00E+000 (m/hr)	n = 0,14
X_Kolmation_less	ksat = 3,60E-004 (m/hr)	n = 0,12
DO_bank_piezo	ksat = 8,00E+000 (m/hr)	n = 0,14
X_Schotter_DI3	ksat = 6,00E+000 (m/hr)	n = 0,1
X_Schotter_bed2	ksat = 1,20E+001 (m/hr)	n = 0,18
Kolmation_NUSS	ksat = 1,60E-006 (m/hr)	n = 0,12
ND_Schotter_13	ksat = 1,00E+001 (m/hr)	n = 0,25
ND_Schotter_13_sat	ksat = 1,00E+001 (m/hr)	n = 0,25
Schluff	ksat = 3,60E-002 (m/hr)	n = 0,14
north_Schotter_4	ksat = 4,00E+000 (m/hr)	n = 0,22
north_Schotter_4_sat	ksat = 4,00E+000 (m/hr)	n = 0,22
1_Schotter_avg	ksat = 3,20E+001 (m/hr)	n = 0,38
X_Schotter_avg_sat	ksat = 3,20E+001 (m/hr)	n = 0,38
bank_schotter_12	ksat = 1,20E+001 (m/hr)	n = 0,26
bank_schotter_6	ksat = 6,00E+000 (m/hr)	n = 0,24
3_Schotter_6_sat	ksat = 6,00E+000 (m/hr)	n = 0,23
2_Schotter_7	ksat = 7,00E+000 (m/hr)	n = 0,28
2_Schotter_7_sat	ksat = 7,00E+000 (m/hr)	n = 0,28
2_Schotter_40	ksat = 4,00E+001 (m/hr)	n = 0,14
high_Schotter_sn	ksat = 3,60E+001 (m/hr)	n = 0,27
high_Schotter_sn_sat	ksat = 3,60E+001 (m/hr)	n = 0,27
3_Schotter_6	ksat = 6,00E+000 (m/hr)	n = 0,23
4_Schotter_40	ksat = 5,40E+001 (m/hr)	n = 0,41
bank_max	ksat = 1,20E+000 (m/hr)	n = 0,11
4_Schotter_40_sat	ksat = 5,40E+001 (m/hr)	n = 0,41
4_Schotter_high	ksat = 4,40E+001 (m/hr)	n = 0,42
4_Schotter_high_sat	ksat = 4,40E+001 (m/hr)	n = 0,42
bank_schotter_12hp_h	ksat = 2,60E+001 (m/hr)	n = 0,34
X_Schotter_DI3_4	ksat = 6,00E+000 (m/hr)	n = 0,1
5_Schotter_32	ksat = 3,20E+001 (m/hr)	n = 0,28
5_Schotter_32_sat	ksat = 3,20E+001 (m/hr)	n = 0,28
6_Schotter_4	ksat = 8,00E+000 (m/hr)	n = 0,32
6_Schotter_4_sat	ksat = 8,00E+000 (m/hr)	n = 0,32
bank_schotter_6_sat	ksat = 6,00E+000 (m/hr)	n = 0,24
7_Schotter_11	ksat = 6,00E+000 (m/hr)	n = 0,22
7_Schotter_11_sat	ksat = 1,10E+001 (m/hr)	n = 0,14
Schotter_avg_sn_sat	ksat = 2,80E+001 (m/hr)	n = 0,26
8_Schotter_2	ksat = 2,00E+000 (m/hr)	n = 0,24
bank_schotter_12_sat	ksat = 1,20E+001 (m/hr)	n = 0,26
8_Schotter_2_sat	ksat = 2,00E+000 (m/hr)	n = 0,24
X_Schotter_avg	ksat = 3,20E+001 (m/hr)	n = 0,38
X_Schotter_avg_22	ksat = 2,20E+001 (m/hr)	n = 0,28
37_Schotter_5	ksat = 5,00E+000 (m/hr)	n = 0,28
37_Schotter_5_sat	ksat = 5,00E+000 (m/hr)	n = 0,28
Filterstraenge	ksat = 8,40E+001 (m/hr)	n = 0,36
Kolmation_8	ksat = 5,00E-003 (m/hr)	n = 0,13
DO_bank_piezo_2	ksat = 2,00E+000 (m/hr)	n = 0,14
X_Schotter_DI3_3	ksat = 3,00E+000 (m/hr)	n = 0,1
Kolmation_7	ksat = 3,60E-004 (m/hr)	n = 0,13
bank_min	ksat = 7,50E-002 (m/hr)	n = 0,11
7_DO_bank_piezo	ksat = 2,00E+000 (m/hr)	n = 0,14
Kolmation_6	ksat = 3,50E-003 (m/hr)	n = 0,13
Kolmation_5	ksat = 4,20E-005 (m/hr)	n = 0,13
X_Kolmation_4	ksat = 2,80E-005 (m/hr)	n = 0,12
2_Kolmation	ksat = 4,20E-005 (m/hr)	n = 0,12
1_Kolmation_b	ksat = 5,20E-005 (m/hr)	n = 0,12
X_Schotter_bed_NUSS	ksat = 2,00E+001 (m/hr)	n = 0,1
X_Kolmation_12	ksat = 8,60E-004 (m/hr)	n = 0,12
X_Schluff	ksat = 3,60E-002 (m/hr)	n = 0,14
Kolmation_less	ksat = 3,60E-004 (m/hr)	n = 0,12

Kalibrierte k_f -Werte im Querschnitt der Brunnenstadtorte (Legende siehe S. 65)

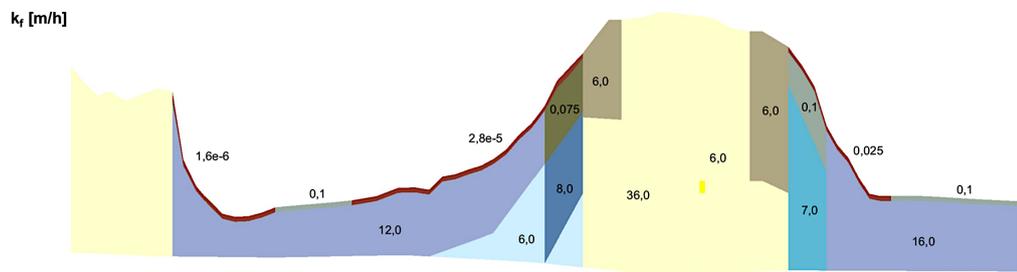
HFB 1



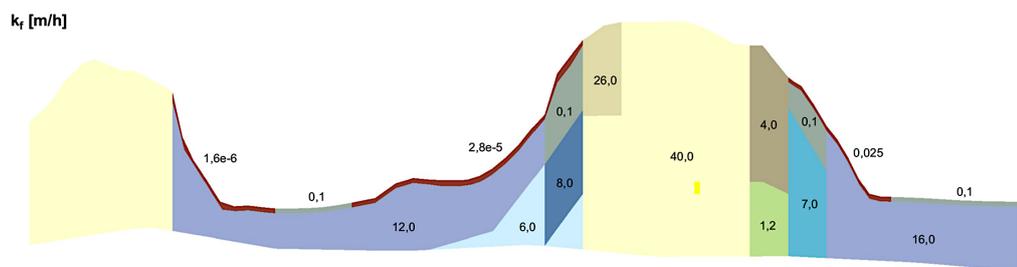
HFB 2



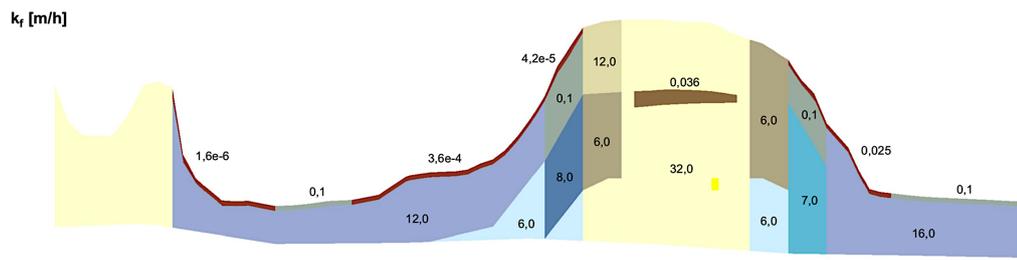
HFB 3



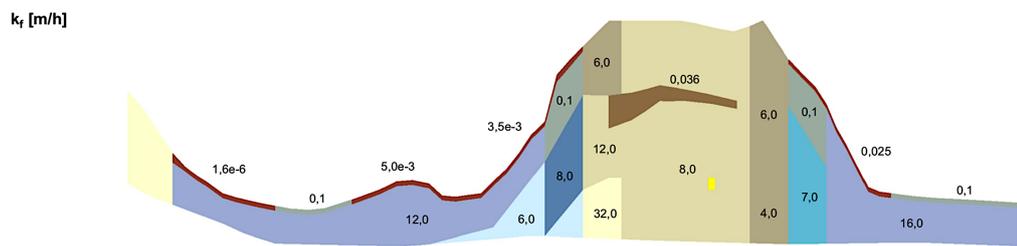
HFB 4



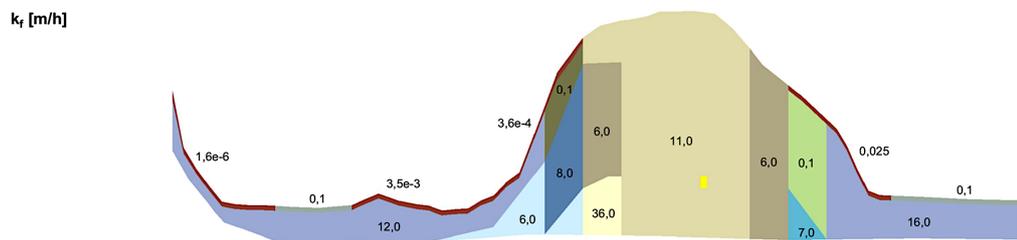
HFB 5



HFB 6



HFB 7



HFB 8

