



Tutorial

Die Software für die professionelle
Gewässersystemmodellierung.

- Grundwassermodelle
- Stofftransportmodelle
- Wärmetransportmodelle
- Geologische Modelle
- Dichtemodelle

delta h Ingenieurgesellschaft mbH
Parkweg 67
58453 Witten
<https://spring.delta-h.de>
info@delta-h.de

Autoren:

Prof. Dr.-Ing. Christoph M. König,

Dr. Katrin Brömme, Annette Diehl, Dr. Amin Ghanizadeh, Jessica Göbel, Timo M. König,
Dr. Britta Rosen, Dr. Otto Rüber, Dr. Simon Schröder, Torsten Seidel, Christian Zimmermann

SPRING 7

Stand 12.12.2025

ISBN 978-3-00-073433-5

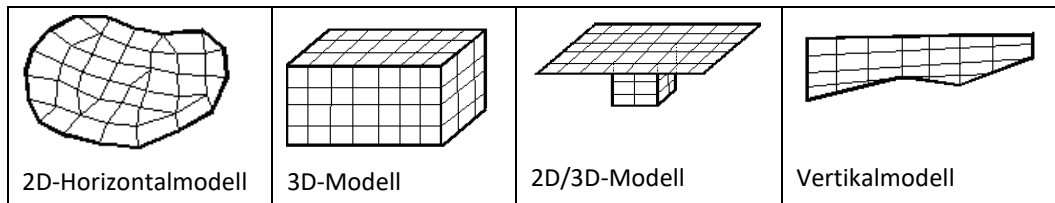
Inhaltsverzeichnis

1	Aufbau der einzelnen Modellarten	4
1.1	Aufbau eines 2D-Modells	4
1.1.1	Schritt 1: Erstellen eines regelmäßigen FE-Netzes durch automatische Netzgenerierung	4
1.1.2	Schritt 2: Erstellung eines FE-Netzes mit unregelmäßigen Zwangsgeometrien	6
1.1.3	Schritt 3: Datenzuweisung	17
1.1.4	Schritt 4: Kalibrierung eines Grundwassermodells	25
1.2	Aufbau eines 3D-Modells	32
1.2.1	Aufbau eines vollständigen 3D-Modells	33
1.2.2	Einbau von auslaufenden Schichten in das 3D-Modell	37
1.2.3	Aufbau eines 3D-Teilmodells	40
1.2.4	Import eines Teilmodells in das Gesamtmodell	43
1.2.5	Erzeugen von Klüften in einem 3D-Netz	49
1.3	Aufbau eines instationären Transportmodells	49
1.3.1	Modellbeschreibung	49
1.3.2	Notwendige Angaben für den Stofftransport	50
1.3.3	Instationäre Eingaben für den Stofftransport	51
1.4	Aufbau eines 3D-Vertikalmodells	52
1.4.1	Besonderheiten im 2D-Vertikalmodell	53
1.4.2	Erweiterung ins Dreidimensionale	54
1.4.3	Darstellung von Schnitten in einem 3D-Vertikalmodell	55
1.4.4	Besonderheiten in der Ploterstellung	57
2	How To	58
2.1	Ermittlung von Einzugsgebieten	58
2.1.1	Theoretische Grundlagen der Bahnlinienberechnung	58
2.1.2	Berechnen und Darstellen von Bahnlinien	59
2.1.3	Theoretische Grundlagen der Stromlinien	62
2.1.4	Erzeugen und Darstellen von Stromlinien	62
2.1.5	Einzugsgebietsermittlung mit Schlieren (FLIC)	63
2.1.6	Transport bei invertierter Strömung	65
2.2	Massenbilanzen	65
2.2.1	Grundlagen der Kontrolllinien	66
2.2.2	Allgemeine Hinweise zur Nutzung von Kontrolllinien	66
2.2.3	Verwendung von Kontrolllinien zur Ermittlung des Zustroms zu einem Entnahmebrunnen (KNOT)	67
2.2.4	Verwendung von Kontrolllinien zur Ermittlung von Uferfiltratmengen eines großen Hauptvorfluters (POTE)	67
2.2.5	Verwendung von Kontrolllinien zur Ermittlung des grundwasserbürtigen Zustroms zu einem Vorfluter (VORF)	68
2.2.6	Durchströmende Wassermenge in einem See (GLEI)	70
2.3	Berechnung mittlerer Neubildungsraten	72
2.3.1	Neubildungsberechnung nach Schroeder und Wyrwich	72
2.3.2	Neubildungsberechnung nach Meßer 2008	74
2.3.3	Flächennutzungs-kategorie aus RVR-Code	77
2.3.4	Neubildungsberechnung nach Bodenwasserbilanz	84
2.4	Berechnung einer instationären Neubildungsrate	87
2.4.1	Eingangsdaten in der Modelldatei	88

2.4.2	Eingabedialog in SPRING	92
2.5	Leakage-Beziehungen und Vorflutinteraktionen	104
2.5.1	Flurabstandsregulierung durch einen Polderbrunnen	105
2.5.2	Modellierung einer Dränage	106
2.5.3	Sickerlinie in einem Damm	107
2.6	Flutungssimulation von Grubenbauwerken	108
2.6.1	Beispiel einer Realisierung in SPRING	111
3	Index	118
4	Notizen	123

1 Aufbau der einzelnen Modellarten

In den folgenden Kapiteln wird beschrieben, wie die einzelnen Modelle aufgebaut werden und welche Daten erforderlich sind. Anhand von praktischen Beispielen werden die Vorgehensweisen verdeutlicht.



Es ist empfehlenswert, sich vorab mit der generellen Vorgehensweise eines Modellaufbaus (Download „Getting_Started“), mit der "SPRING-Benutzeroberfläche" sowie den "Daten- und Datei-Strukturen" von SPRING vertraut zu machen..

Das folgende Kapitel ermöglicht es dem Anwender, Schritt für Schritt ein horizontales Grundwassermodell aufzubauen. Der Text und die Beispieldaten stehen als zip-file auf unserer Homepage <https://spring.delta-h.de/> unter Download&Support - Dokumentationen zum Download bereit.

1.1 Aufbau eines 2D-Modells



Die zentrale Datei in SPRING ist die ASCII-Modelldatei *name.net*. In der Datei *name.net* befinden sich alle Informationen für ein 2D-Modell. Diese Datei wird in der Regel mit SPRING interaktiv erstellt bzw. verändert. Sie ist aber auch mit einem beliebigen Editor zu bearbeiten.

Während der *Modellprüfung* werden die Modelldaten eingelesen und in binäre Hintergrunddateien geschrieben. Die nachfolgenden Berechnungsmodule lesen die für sie erforderlichen Daten aus diesen Hintergrunddateien und speichern ihre Ergebnisse ebenfalls dort ab. Zur grafischen Darstellung der Eingabe- oder Ergebnisdaten (*Ploterstellung*) werden die Daten aus den Hintergrunddateien gelesen und der entsprechende Plot erstellt. Danach können die Plots mit SPRING wiederum dargestellt, nachbearbeitet und auf einem Plotter oder Drucker ausgegeben werden.

Die SPRING-Oberfläche dient zur Modellerstellung, Strömungsberechnung und Ploterstellung und wird über einen



Doppelklick mit der linken Maustaste auf das Icon auf dem Desktop geöffnet.

1.1.1 Schritt 1: Erstellen eines regelmäßigen FE-Netzes durch automatische Netzgenerierung

Zum Aufbau eines Grundwassermodells ist zuerst die Erstellung des Finite-Element-Netzes erforderlich. Dazu wird das Modul SPRING mit einem Doppelklick gestartet. Über *Datei* → *Neu* erscheint das folgende Fenster zur Erstellung eines neuen Projekts. Hier lassen sich grundlegende Daten (Art des Modells, Zeiteinheit, Maßstab, Ausdehnung in x-y-Richtung) vorgeben. Im Beispiel wird der Maßstab auf 1:10.000 gesetzt und die Y-Koordinate auf Y = 80 m.

Neues Projekt anlegen

Titel

Spring 6

Tutorial, Schritt 1

2D-Modell

Typ

☒ Horizontal

☐ Vertikalmodell

Zeiteinheit

☒ Jahr ☐ Monat

☐ Tag ☐ Sekunde

Maßstab

X-Richtung 10000

Y-Richtung 10000

Gebietsgrenzen

minimale X-Koordinate 0 maximale X-Koordinate 100

minimale Y-Koordinate 0 maximale Y-Koordinate 80

OK Abbrechen Hilfe

Abb. 1: Neues Projekt anlegen

Nach Schließen des Fensters mit OK gelangt man zurück in die Oberfläche des SPRING-Moduls. Damit sind die grundlegenden Informationen vor dem Erstellen des Finite-Element-Netzes (FE-Netz) eingegeben. Nun werden über den Menüpunkt *Netz* → *Netzgenerierung* → *Regelmäßiges Netz* in einem weiteren Dialog die Abmessungen für das zu erstellende FE-Netz eingegeben:

Regelmäßiges Netz

Modelltyp

☒ Horizontal

☐ Vertikal

Elementanzahl x: 40 y: 40

Netzrand

☐ Rechteck wählen

Koordinatenursprung x: 0 y: 0

Länge dx: 100 dy: 80

☒ Beliebiges Viereck - Eckkoordinaten definieren

Eckpunktkoordinaten

Links unten x: 10 y: 10

Rechts unten x: 90 y: 20

Rechts oben x: 80 y: 80

Links oben x: 20 y: 60

☐ Beliebiges Viereck - Eckkoordinaten fangen

OK Abbrechen Hilfe

Abb. 2: Generierung eines regelmäßigen Netzes

In diesem Dialog muss zunächst die Elementanzahl in x- und y-Richtung und die Richtung (horizontal oder vertikal) festgelegt werden.

Des Weiteren kann der Netzrand auf drei unterschiedliche Arten festgelegt werden:

- Rechteck wählen:

Hier ist der Koordinatenursprung sowie die Längen in x- und y-Richtung vorzugeben. Es ist darauf zu achten, dass der gewählte Ursprung und die Abmessungen innerhalb der beim Anlegen des Modells gewählten Gebietsgrenzen liegen.

- Beliebiges Viereck – Eckkoordinaten definieren:

Bei dieser Methode sind die vier Eckpunktkoordinaten festzulegen. Es ist darauf zu achten, dass der gewählte Ursprung und die Abmessungen innerhalb der beim Anlegen des Modells gewählten Gebietsgrenzen liegen.

- Beliebiges Viereck – Eckkoordinaten fangen:

Hier können die Eckkoordinaten des FE-Netzes interaktiv in der Benutzeroberfläche durch Auswahl mit der linken Maustaste gewählt werden. Die Eckkoordinaten sind gegen den Uhrzeigersinn festzulegen. Diese Funktion ist zurzeit noch nicht implementiert.

Bei Übernahme dieser Einstellungen durch Drücken des OK-Buttons und anschließendem Klick auf die rechte Maustaste wird das generierte FE-Netz dargestellt.

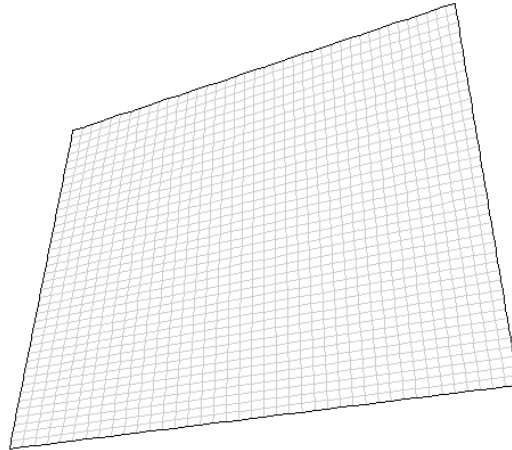


Abb. 3: Automatisch generiertes FE-Netz

Es wird empfohlen, während der Modellerstellung ab und zu den Zwischenstand abzuspeichern: Beim ersten Mal erhält das Projekt unter *Datei* → *Speichern unter* ... einen eigenen Namen. Im weiteren Verlauf des Projekts genügt es, das Projekt zu speichern. Nun würde die Datenzuweisung (S. 17) erfolgen, aber da die automatische Netzgenerierung für die meisten Problemstellungen nicht ausreicht, folgt Schritt 2: Erstellung eines FE-Netzes mit unregelmäßigen Zwangsgeometrien (S. 6).

1.1.2 Schritt 2: Erstellung eines FE-Netzes mit unregelmäßigen Zwangsgeometrien

1.1.2.1 Beschreibung des Untersuchungsgebiets

Das Untersuchungsgebiet des zu erstellenden Modells sieht folgendermaßen aus:

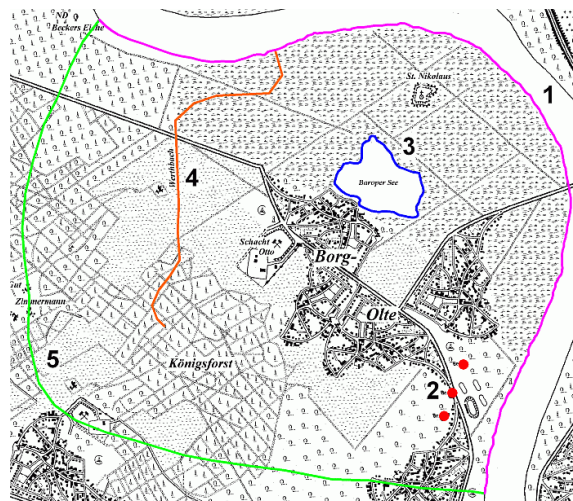


Abb. 4: Untersuchungsgebiet

Die georeferenzierte Tiff-Datei „topo1.zip“ sowie alle weiteren benötigten Dateien finden sich im Downloadbereich unserer Homepage (TOOLS- SPRING Helferlein und Beispieldateien)

Das Untersuchungsgebiet lässt sich wie folgt beschreiben:

Von Südosten nach Nordwesten erstreckt sich ein großes Hauptgewässer (pink), in das ein kleinerer Bachlauf (orange) einmündet. Des Weiteren befindet sich ein See (blau) mit Grundwasserkontakt im Untersuchungsgebiet. Hinzu kommen drei Grundwasser fördernde Entnahmepumpen (rot) im Südosten. Da diese Zwangspunkte Einfluss auf die örtliche Grundwassersituation haben, müssen sie im Modellgebiet berücksichtigt werden.

1.1.2.2 Fragestellungen an ein Grundwassermodell

Ein Grundwassermodell wird erstellt, wenn verschiedenste Einflüsse die Grundwassersituation beeinflussen bzw. komplexe Randbedingungen vorhanden sind und eine analytische Lösung des Problems nicht mehr möglich ist.

Mögliche Fragestellungen für ein Grundwassermodell sind z.B.:

- Wie verhält sich die Grundwasserströmung bei Veränderung der Entnahmemengen?
- Welche Flurabstände liegen vor?
- Welche Auswirkungen haben Bergsenkungen auf die vorhandenen Flurabstände?
- Welche Folgen hat eine Hochwasserwelle und wie verändern sich die Überschwemmungsflächen?
- Welchen Einfluss haben Eingriffe in Gewässer (Bachverlegung, Veränderungen an der Bachsohle)?
- Was passiert beim Bau von neuen Förderbrunnen und wie ist deren Einfluss auf die bestehende Situation?

Diese und viele andere Fragestellungen lassen sich mit einem Grundwassermodell beantworten.

1.1.2.3 Datenbeschaffung

Als Datengrundlage werden diese Parameter für die folgende Bearbeitung benötigt:

Hauptgewässer: Wasserstände in m (meistens m NN) an mindestens zwei Punkten: Festpotentialrand → POTE

Nebengewässer: Wasserstand im Oberlauf (m), evtl. Abflussmessungen für die Leakagebestimmung → VORF und LERA

Entnahmepumpen: Entnahmemengen → KNOT (neg. Vorzeichen, umrechnen in m³/Zeiteinheit der Modell-datei)

Grundwasserneubildung: Niederschlag, Bodentyp, Bodennutzung, Gefälle zur Berechnung der Neubildung → FLAE (mm/Zeiteinheit der Modelldatei)

Geologie: Durchlässigkeitswerte in m/s → KWER

Geländeoberfläche: → GELA, und evtl. Daten über eine undurchlässige Schicht im Untergrund → UNTE, sonst Berechnung mit einer

Mächtigkeit: → MAEC

Grundwassermesswerte zur Erstellung eines Kalibrierzustands: Grundwasseroberfläche → EICH

Anmerkung: Die Zeiteinheit der Modelldatei wird beim Anlegen eines neuen Projekts (*Datei* → *Neu*) festgelegt.

Folgende Quellen können diese Daten liefern:

- Geländehöhen und Tiff-Dateien: Landesvermessungsamt, Katasteramt
- Grundwassermessstellen, Pegelwerte an Vorflutern: Staatliches Umweltamt, Wasserverbände, Wasserwerke, etc.
- Entnahmen: Brunnenbetreiber
- Geologie: Geologische Karten, Aufschlussbohrungen, Pumpversuche
- Leakage: z.B. Berechnung über K-Werte der Umgebung und Abflussmessungen
- Neubildung: z.B. auf Grundlage von RVR-Daten, nach Schroeder und Wyrwich oder Meßer

1.1.2.4 Festlegen der Modellgrenzen

Bevor ein neues Projekt angelegt werden kann, muss grob die Gebietsgrenze des FE-Modells ermittelt werden. Hierzu müssen zunächst die Modellränder festgelegt werden. Im westlichen und südlichen Untersuchungsgebiet

liegt eine Wasserscheide vor, d.h. hier kann als Begrenzung des Modells ein $Q=0$ -Rand definiert werden. Das Hauptgewässer im Norden und Osten wird als weitere Modellgrenze angenommen.

In den folgenden Kapiteln wird das Untersuchungsgebiet schrittweise in einem Grundwassermodell abgebildet.

1.1.2.5 Neues Projekt erstellen

Wie bereits unter Schritt 1 (regelmäßiges Raster) beschrieben, werden für die Erstellung eines neuen Projekts die minimalen und maximalen Koordinaten des Untersuchungsbereichs benötigt. Unter *Datei* → *Öffnen...* → *Auswahl des Dateityps Bitmap (*.tif)* öffnen Sie bitte die bereits gespeicherte Datei topo1.tif (Verzeichnis: „.../Tutorial_bsp_files/Tutorial_2D_bsp_files/topo1.tif“).

In der Statusleiste werden die Koordinaten des Mauszeigers angezeigt. Der Darstellungsbereich der Karte kann mit gedrückter mittlerer Maustaste verschoben werden. Durch Drehen des Mausekkrads kann in die Darstellung hinein bzw. heraus gezoomt werden. Drücken der rechten Maustaste führt zurück in die Totale.

Die Koordinaten für die topographische Karte bzw. dem gewählten Modellrand lassen sich so für die linke untere Ecke der Karte zu $x = 800$, $y = 120$ und für die rechte obere Ecke der Karte zu $x = 7800$, $y = 6100$ grob ermitteln.

Um wieder in den Modus Modelldatei zu gelangen, wird SPRING erneut geöffnet. Dann werden in dem Dialog *Datei* → *Neu* die drei Kommentarzeilen und die ermittelten Koordinaten für die Gebietsgrenzen eingetragen:

Abb. 5: Koordinaten des neuen Projekts

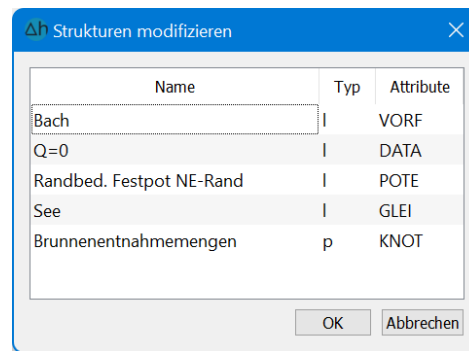
Nach Bestätigen mit dem OK-Button ist das Projekt angelegt und sollte mit *Datei* → *Speichern unter...* benannt werden.

1.1.2.6 Strukturen erstellen bzw. importieren

Normalerweise muss der Anwender sich diese Daten selbst über ein Geoinformationssystem einlesen oder am Bildschirm digitalisieren (z.B. unter *Struktur* → *Neu* → *Punkte erfassen* auf Grundlage einer Tiff-Datei). In dem Kapitel "SPRING Menüs - Struktur" des benutzer-Handbuchs sind die Möglichkeiten zum Erstellen und Importieren von Strukturen detailliert beschrieben.

Die Digitalisierung der für dieses Modell notwendigen Strukturen wurde bereits vorgenommen. Die Strukturdaten stehen in dem bereits heruntergeladenen Verzeichnis unter *.../Tutorial_2D_bsp_files/s1_daten1.str* zur Verfügung.

Über *Struktur* → *Importieren...* → (Dateiauswahl) *.str kann die Datei "s1_daten1.str" eingelesen werden.



Name	Typ	Attribute
Bach	I	VORF
Q=0	I	DATA
Randbed. Festpot NE-Rand	I	POTE
See	I	GLEI
Brunnenentnahmemengen	p	KNOT

Abb. 6: Importierte Strukturen der Datei s1_daten1.str

Sind noch keine Knoten oder Elemente vorhanden, muss das Projekt gespeichert und erneut geöffnet werden, bevor die Strukturen darstellbar sind.

Nachdem unter *Ansicht* → *Strukturen* → *Alle* oder Drücken des entsprechenden Buttons () die Darstellung aktiviert wurde, erscheint folgendes Bild:



Abb. 7: Vorhandene Strukturdaten

1.1.2.7 Strukturen modifizieren

Einige Strukturen haben bereits Daten, welche durch eine Bearbeitung (z.B. löschen der Strukturpunkte) verloren gehen. Zur Vorbeugung werden daher alle Strukturen kopiert (*Struktur* → *Kopieren*), die später als Konturen verwendet werden sollen und Strukturpunkte außerhalb des Modellrandes besitzen.

Es empfiehlt sich, die kopierten Strukturen umzubenennen (*Struktur* → *Bearbeiten*) und z.B. den Zusatz „für Konturen“ beim Info-Text zu ergänzen.

Die kopierten Strukturen können nun bearbeitet werden (*Punkte löschen, ergänzen und verschieben*), ohne dass wertvolle Daten verloren gehen.

Über *Struktur* → *Bearbeiten* → *Fangen* oder Aktivieren des entsprechenden Buttons in der Symbolleiste () kann die gewünschte Struktur ausgewählt werden. Zunächst wird der nordöstliche Modellrand (pink) ausgewählt. Es öffnet sich folgender Dialog:

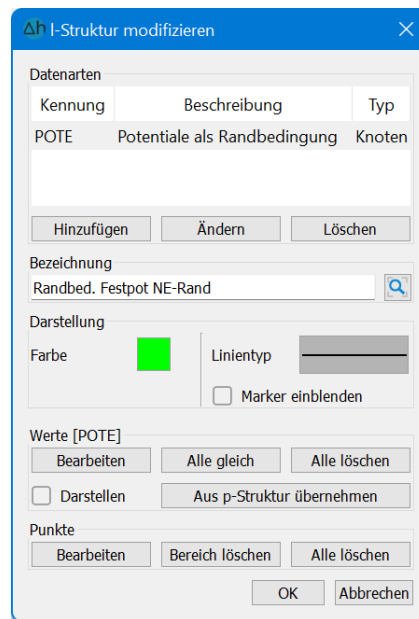


Abb. 8: I-Struktur modifizieren

Nach *Marker einblenden* können über *Punkte: Löschen: Picken* oder *Löschen: Bereich* die überflüssigen Strukturpunkte am westlichen Ende der Struktur beseitigt werden. Erst durch Beenden des Struktur-Menüs mit OK werden die Punkte auch tatsächlich gelöscht!

Zusätzlich sollte überprüft werden, ob die Endpunkte des nordöstlichen und südwestlichen Modellrandes übereinstimmen. Ist dies nicht der Fall, können die Endpunkte aufeinander geschoben werden mit dem Strukturmenü über *Punkte: verschieben*. In dem Auswahlfenster, ob der Punkt "frei" oder auf einen "Punkt" verschoben werden soll, wird hier „Punkt“ gewählt.

Genauso gut lassen sich in diesem Menü Punkte an die vorhandenen Strukturen anhängen oder einfügen. Dies ist bei dem innerhalb des Modells liegenden Bachlaufs (orange) erforderlich. Dieser Struktur sollte ein weiterer Punkt angehängt werden, der auf dem Hauptgewässer liegt. In die Struktur des Hauptgewässers sollte an dieser Stelle dann ein weiterer Punkt eingefügt werden (Punkt fangen).

1.1.2.8 Konturen erzeugen

In den Strukturdaten werden alle Eingabedaten vorgehalten. Nicht alle Strukturdaten sind jedoch automatisch Zwangsgeometrien für das FE-Netz. Z.B. außerhalb des Untersuchungsgebiets liegende Messstellen oder geologische Aufschlüsse stellen keine Zwangsgeometrien dar. Nur die Zwangsgeometrien der Strukturen werden in Konturen übertragen (*Kontur → Neu → Aus Struktur*).

Ein Bearbeiten der Konturen bietet die Grundlage für ein homogenes FE-Netz. Beim Übertragen der Struktur in eine Kontur entsteht an jedem Strukturpunkt ein Konturpunkt an dem wiederum bei der Netzgenerierung ein Knoten entsteht. Daher ist beim Übertragen der Strukturen in Konturen schon auf die Abstände der Strukturpunkte zu achten.

Im Strukturmenü können die einzelnen Strukturpunkte daher durch *Marker → einblenden* sichtbar gemacht werden.

In den Beispiel-Strukturen ist der Abstand der Strukturpunkte des nordöstlichen Randes teilweise sehr gering. Daher sollen nicht alle Strukturpunkte des nordöstlichen Randes als Konturpunkte übernommen werden.

Über *Kontur → Neu → Aus Struktur* (Fangen bzw. Liste) und dem dann erscheinenden Eingabefenster wird der Abstand der Konturpunkte vergrößert. Der maximal mögliche Abstand zum Ursprungsrand wird auf 5 m gesetzt.

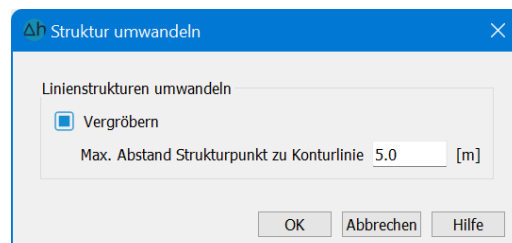


Abb. 9: I-Struktur umwandeln

Um eine regelmäßige Verteilung der Randknoten zu erzeugen, wird über *Kontur* → *I-Kontur bearbeiten* → *Maximalen Abstand setzen* → *Polygon* der Abstand der Konturpunkte auf 300 m gesetzt. Dies entspricht in etwa dem Abstand der Strukturpunkte des südwestlichen Randes.

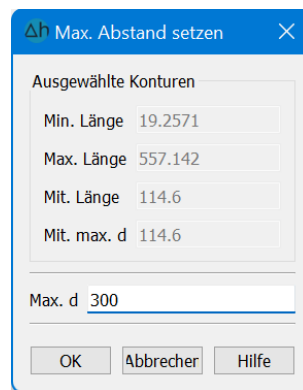


Abb. 10: Maximalen Abstand setzen

Für den See wird die gleiche Vorgehensweise empfohlen, allerdings sollte hier der Abstand der Konturpunkte geringer gewählt werden (ca. 35-50 m), um später eine kleinere Elementkantenlänge zu erhalten.

Die übrigen Strukturen (Bachlauf, Brunnen und der südwestlich Modellrand) werden mit *Kontur* → *Neu* → *Aus Struktur* → *Fangen / Liste...* als Konturen übernommen, ohne dass eine Vergrößerung stattfindet. Bei Auswahl von *Liste* ist es möglich, durch Drücken der STRG-Taste und gleichzeitigem Auswählen der gewünschten Strukturen mehrere Strukturen zeitgleich umzuwandeln.

Am südwestlichen Strukturrand sowie am Bachlauf kann für einzelne Konturelemente der Abstand der Punkte verringert werden. Dies geschieht über *Kontur* → *I-Kontur bearbeiten* → *Maximalen Abstand setzen* → *Fangen*. Nun werden die Konturelemente ausgewählt, die dem Anwender "zu groß" erscheinen. Es erscheint ein Eingabefenster, in dem der gewünschte maximale Abstand eingegeben werden kann.

Am Mündungspunkt des Bachlaufs in den Hauptvorfluter muss die angrenzende Kontur des Hauptvorfluters einmal geteilt werden (*Kontur* → *I-Kontur bearbeiten* → *n-mal teilen: 1*), damit der Konturpunkt des Bachlaufs auf dem Teilungspunkt einmünden (*Kontur* → *Punkte verschieben*) kann.

Das Ergebnis sind die in der folgenden Abbildung dargestellten Konturen:

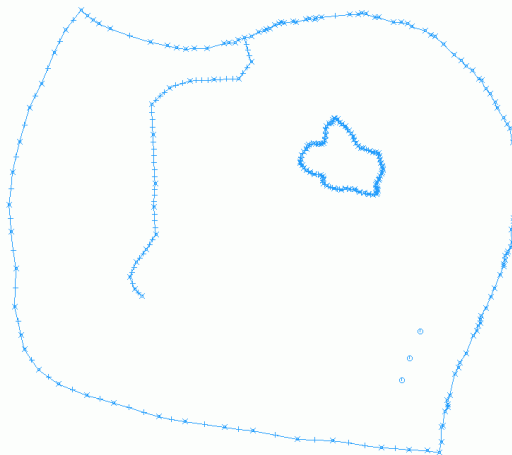


Abb. 11: Vorhandene Konturen

Zur besseren Abbildung des logarithmischen Absenktrichters um einen Förderbrunnen ist es erforderlich, den Kontur-Punkten der Brunnen entsprechende Brunnenparameter zuzuweisen. Dies beugt Oszillationen vor, die durch die punktuelle Potentialveränderung in Brunnennähe hervorgerufen werden. Nach *Kontur* → *p-Kontur bearbeiten* → *Brunnenparameter* → *Fangen* und Anklicken der drei Punkte erscheint folgendes Eingabefenster:

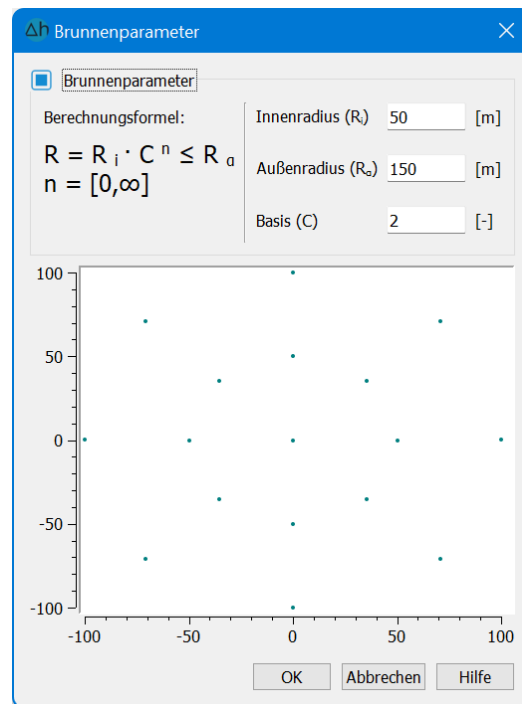


Abb. 12: Brunnenparameter setzen

Eine genaue Beschreibung der Parameter findet sich im Kapitel "Datenstruktur des Grundwassermodells: Ortsdiskretisierung: Sonderfall Brunnendiskretisierung" im Benutzer-Handbuch.

Vor der Knotenerzeugung muss kontrolliert werden, ob der Konturrand geschlossen ist und die Abstände einzelner Konturpunkte nicht zu klein sind. Dies erfolgt über *Kontur* → *Optimieren*. Die Einstellung der Genauigkeitsparameter wird mit "OK" bestätigt. Ist die Prüfung fehlerfrei, erscheint eine Meldung mit dem Kommentar "Konturrand geschlossen". Treten Fehler auf, werden diese angezeigt und müssen durch Veränderung der Genauigkeitsparameter beseitigt werden.

Anmerkung: Auch für die Konturen gilt: bei erneutem Öffnen des Projektes müssen die Konturen über *Ansicht* → *Konturen* oder über den entsprechenden Button (📐) dargestellt werden.

1.1.2.9 Knoten erzeugen

Bei der Knotenerzeugung werden zunächst Knoten auf und im Bereich der Konturen erzeugt mit *Netz* → *Netzgenerierung* → *Randknoten generieren* → *Global...*. Die Anzahl der Durchgänge legt fest, wie viel Knotenreihen parallel zu den Konturen erzeugt werden sollen. Empfehlenswert sind 2-3 Durchgänge. Gewählt wird im Beispiel: 3 Durchgänge.

Anschließend werden die konturfreien Bereiche mit Rasterknoten belegt über *Netz* → *Netzgenerierung* → *Raster generieren* → *Global...*. Der ungefähre Knotenabstand wird im folgenden Eingabefenster festgelegt:

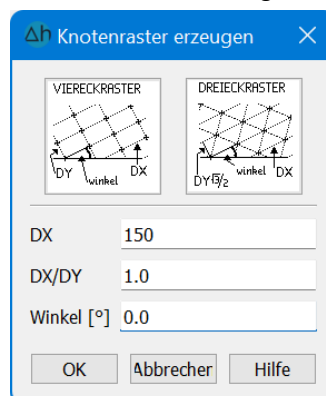


Abb. 13: Rasterknotengenerator

Im Feld *DX* erscheint als Vorbelegung der durchschnittliche Knotenabstand bereits erzeugter Knoten, dieser kann vom Anwender modifiziert werden. Im Beispiel wird $DX = 150.0$ m gesetzt. Danach erscheint das generierte Knotenraster.

Nun wird kontrolliert, ob die Lage der einzelnen Knoten ein homogenes Bild ergibt. An Fehlstellen können Knoten hinzugefügt werden (*Netz* → *Netzgenerierung* → *Knoten einfügen*), zu viele Knoten können gelöscht werden (*Netz* → *Knoten* → *Löschen*) oder Knoten ab einem definierten Abstand werden zusammengelegt über *Netz* → *Knoten* → *Zusammenlegen* → *Nach Abstand*....

An dieser Stelle können Sie mit den genannten Funktionen experimentieren und diese testen.

Hinweis: Zum Zoomen wird die aktuelle Funktion (z.B. "Knoten einfügen") mit der rechten Maustaste beendet. Mit der linken Maustaste wird der gewünschte Zoom-Bereich aufgezoogen. Mit der Taste F12 kann dann die aktuelle Funktion wieder aufgerufen werden. (Dieses neue Feature gilt für alle Bearbeitungsfunktionen!)

1.1.2.10 Elemente erzeugen

Die automatische Erzeugung der Elemente erfolgt durch *Netz* → *Netzgenerierung* → *Elemente erzeugen* → *Drei- und Vierecke (global)*. Mit *Netz* → *Entspannen* wird das Netz z.B. zwanzig Mal entspannt, um optimale Winkel zwischen den Elementseiten zu erhalten.

Anschließend werden über *Netz* → *Elemente* → *Löschen* → *Bereich* die Elemente im Inneren des Sees gelöscht, da der See in diesem Modell als innerer Rand behandelt wird. Zu guter Letzt werden noch die Knoten gelöscht über *Netz* → *Knoten* → *Löschen* → *Ohne Element und Klüfte*.

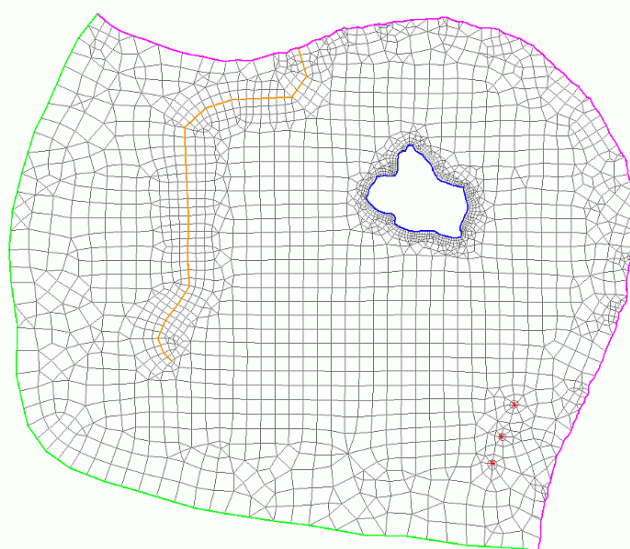


Abb. 14: Fertiges FE-Netz

Im obigen Bild wurden zur besseren Übersicht die Knoten und Konturen ausgeblendet (*Ansicht* → *Knoten* bzw. *Konturen* oder Drücken der entsprechenden Buttons in der Symbolleiste).

Die Marker an den Strukturen wurden ausgeblendet mit *Struktur* → *Bearbeiten* → *Fangen* und anschließend Deaktivieren der Checkbox *Marker einblenden*.

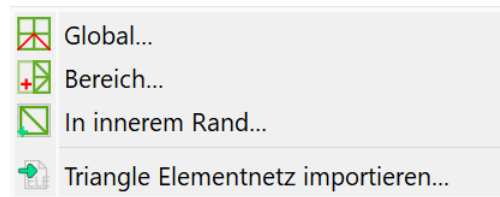
Als letzten Schritt in der Netzerstellung werden Netzkontrollen (*Netz* → *Kontrollen*) durchgeführt und die eventuell auftretenden Fehler beseitigt, bevor mit Schritt 3: Datenzuweisung begonnen wird!

Die fertige Modell- und Struktur-Datei „schritt2_netz.net“ steht auf unserer zum Download bereit in der Datei „schritt2_tutorial.zip“. Sie kann für die weitere Bearbeitung verwendet werden.

1.1.2.11 Nutzung des externen Netzgenerators TRIANGLE

Es besteht auch die Möglichkeit, mit dem externen Netzgenerator Triangle ein Netz zu generieren. Der Vorteil dieses Netzgenerators liegt darin, dass der Benutzer z.B. die minimale Fläche oder den minimalen Winkel eines Dreieckselements vorgeben kann, um Formfaktoren für die Elementgüte direkt einzuhalten (Verhältnis Innenkreis zu Außenkreis).

Unter dem Menüpunkt *Netz* → *Netzgenerierung* → *Netzgenerator Triangle* öffnet sich ein weiteres Menü:



Nach Auswahl einer der drei ersten Menüpunkte (*Netzerstellung* → *Global...*, *Im Bereich...* oder *Aus innerem Rand...*) öffnet sich der zugehörige Dialog:

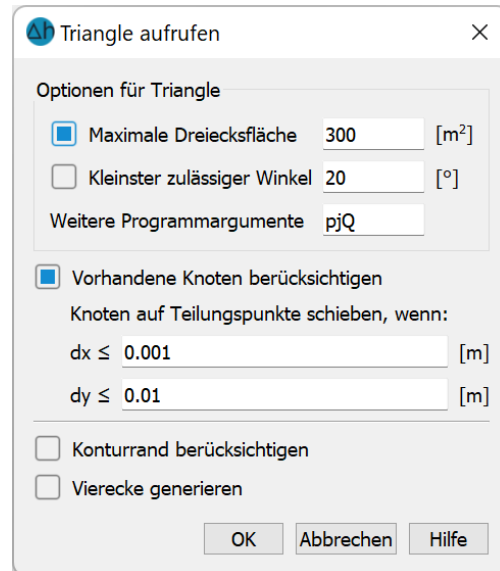


Abb. 15: Dialog für Netzgenerator Triangle

"Größtes Dreieckselement": (Triangle Option "-a")

Diese Option veranlasst Triangle, zusätzliche Knoten zu generieren, so dass keine Dreiecke entstehen, deren Flächeninhalt größer als der angegebene Wert ist.

"Kleinsten Winkel im Dreieck": (Triangle Option "-q")

Diese Option veranlasst Triangle, zusätzliche Knoten zu generieren, so dass keine Winkel unter dem angegebenen Wert entstehen. Der Standardwert liegt bei 20°. Diese Vorgabe erzeugt qualitativ hochwertige Netze, kann aber zur Folge haben, dass Triangle nicht korrekt beendet wird.

"Zusätzliche Programmargumente": (Alle Triangle Options)

Triangle bietet noch zahlreiche weitere Möglichkeiten, die Netzgenerierung zu beeinflussen. Näheres dazu findet sich auf der Internetseite <http://www.cs.cmu.edu/~quake/triangle.switch.html>. Die entsprechenden Parameter für den Triangle-Aufruf lassen sich hier eingeben.

"Berücksichtigung vorhandener Knoten":

Hiermit werden die vorhandenen Knoten als zusätzliche Zwangsgeometrien in die Eingabedatei von Triangle geschrieben. So kann zunächst mit dem Rastergenerator von SPRING ein Knotenraster erstellt werden, das anschließend von Triangle vermascht wird.

"Konturen von Triangle übernehmen" und „Konturrand berücksichtigen“:

Wenn Triangle zusätzliche Knoten erzeugt um bspw. das Winkelkriterium zu erfüllen, werden diese neuen Punkte auch auf den darunter liegenden Zwangsgeometrien (Konturen) erzeugt. Durch die Option "Konturen von Triangle übernehmen" liest SPRING nach einem erfolgreichen Triangle Lauf nicht nur die Netzgeometrie ein, sondern überschreibt auch die bestehenden Konturen mit den von Triangle modifizierten.

"Vierecke generieren":

Hiermit wird nach einem Triangle-Lauf der Viereckgenerator von SPRING gestartet.

Mithilfe des Menüpunkts "Triangle Elementnetz importieren" kann ein mit dem externen Netzgenerator Triangle erstelltes Elementnetz (*.ele) importiert werden.

1.1.2.12 Einbau einer neuen Struktur in ein bestehendes Modell

In diesem Kapitel wird dem Anwender ein Konzept für den nachträglichen Einbau einer neuen Struktur in ein bereits bestehendes Netz vorgestellt.

Bevor mit der nachträglichen Bearbeitung der Netzgeometrie begonnen wird, ist es ratsam, Kopien der ursprünglichen Netz- und Strukturdatei zu erstellen. Sämtliche Attributdaten, die durch Löschen eines Elementbereichs beeinflusst werden, sollten über: *Attribute* → *Exportieren...* gespeichert werden. Es erscheint eine Auflistung aller vorhandenen Attributdaten. Durch Auswahl der einzelnen Attribute lassen sich diese als eigenständige Dateien im Strukturdateiformat speichern, um sie später wieder auf das veränderte Netz zuweisen (interpolieren) zu können.

Achtung: Im 3D-Modell nicht die Daten der 3D-Datei vergessen!

Nach den Vorarbeiten beginnt nun der schrittweise Umbau der Modelldatei:

Elemente im Bereich der neuen Struktur weiträumig löschen

Zunächst werden die Knoten bzw. Elemente im Bereich der neuen Struktur weiträumig über *Netz* → *Knoten bzw. Elemente* → *Löschen* → *Bereich* gelöscht.

Erzeugen der neuen Struktur:

Struktur → *Neu* → *Linienzug* (beim Vorfluter oder Spundwand)

Zur Abbildung einer Spundwand ist es möglich, eine identische zweite Struktur parallel zur ersten Struktur automatisch zu erzeugen. Der Abstand beider Strukturen ist frei wählbar. Dazu wird unter dem Menüpunkt: *Struktur* → *Parallele erzeugen* → *Fangen/Liste* die Struktur gewählt und mit der linken Maustaste die Seite bestimmt, an der die Parallele erzeugt werden soll (bei Flächenstrukturen innerhalb oder außerhalb anklicken). Dann erscheint ein Eingabefenster, in dem man den gewünschten Abstand eingibt:

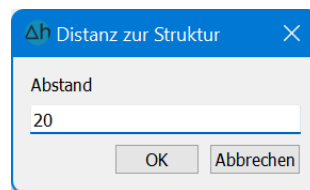


Abb. 16: Distanz der Parallele zur Struktur (m)

Damit die Parallele sichtbar wird, wurde hier eine Distanz von 20 m eingegeben. Nach Bestätigen mit der rechten Maustaste erscheint die Struktur im Netz.

Übernehmen der neuen Struktur als Kontur

Kontur → *Neu* → *Aus Struktur* → *Fangen*

Das folgende Bild zeigt im Modellausschnitt die neue Struktur mit ihrer Parallelen:

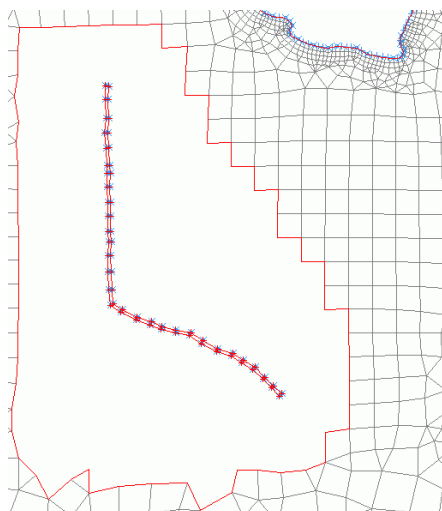


Abb. 17: Modell mit neuer Struktur und bereits zugewiesener Kontur (blau)

Neue Netzknoten erstellen:

Netz → Netzgenerierung → Raster generieren → Bereich: Netzknoten fangen. Hier ist es wichtig, alle Knoten des bestehenden Randes zu fangen! Der Knotenabstand dx sollte ungefähr der vorhandenen Seitenlänge der Elemente entsprechen (im Beispiel $dx = 120.0$ m). Für eine saubere Elementvernetzung werden einige Knoten manuell eingefügt.

Anmerkung: Wenn ein geschlossener Konturrand vorhanden ist, können nur innerhalb dieses Konturrandes Knoten generiert werden.

Beispiel: Ein Bereich in einem bestehenden Modell wird gelöscht, um z.B. ein neues Bauwerk einzubauen. Für dieses Bauwerk wird eine geschlossene Kontur angelegt. In dem Moment ist es nur möglich, innerhalb der Bauwerks-Kontur Knoten zu erzeugen. Erst wenn diese Kontur gelöscht wird, lassen sich auch außerhalb des Bauwerks wieder Knoten erzeugen.

Neue Elemente erzeugen:

Netz → Netzgenerierung → Elemente erzeugen → Dreiecke und Vierecke aus innerem Rand: Der Bereich, in dem neue Elemente erzeugt werden sollen, kann durch einen einzigen Mausklick sofort ausgewählt werden.

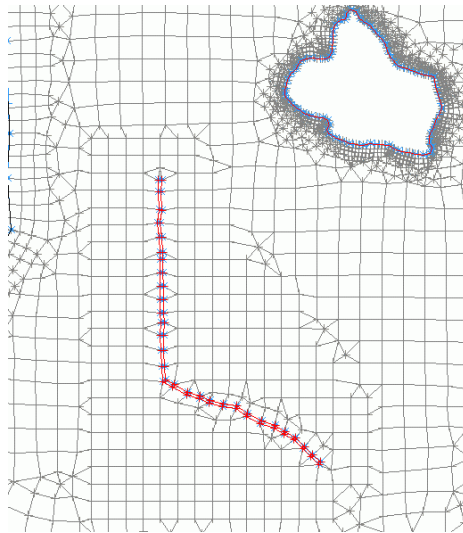


Abb. 18: Neue Knoten und Elemente im Bereich der neuen Struktur

Nach Fertigstellen des Netzes müssen Geometriekontrollen durchgeführt und die Daten gespeichert werden!

Da im Bereich der neu generierten Elemente Lücken in der Datenbank entstanden sind, müssen die fehlenden Daten durch Neuzuweisung der Attribute ergänzt werden (Attribute → Zuweisen → Durch Interpolation...).

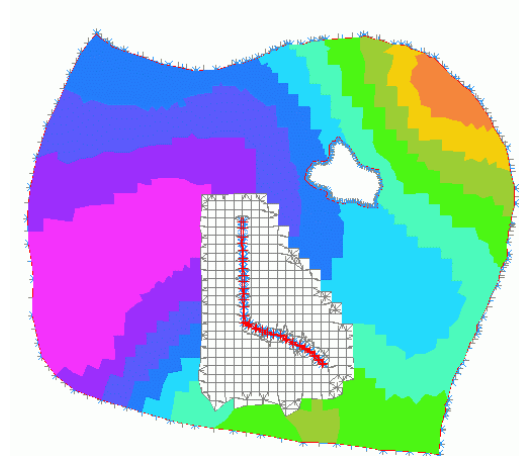


Abb. 19: Fehlende Daten im Bereich der neuen Elemente am Beispiel des Attributs "UNTE"

Bei großen Datenmengen ist es erforderlich, vor der neuen Zuweisung die abgespeicherten Attributdateien auf den betroffenen Bereich zu reduzieren. Dies geschieht über *Struktur* → *Importieren* → z.B. *.txt, Zuordnen der Spalten und Attributkennung, dann *Struktur* → *Bearbeiten* → *Punkte löschen: im Bereich*. Durch Wahl des Buttons "Auswahl umkehren" beim Fangmodus reicht es, den zuzuweisenden Bereich auszuwählen, der Rest wird gelöscht.

Bei der Frage nach dem Interpolationsalgorithmus sollte möglichst "Gauß" gewählt werden, sowie "vorhandene Daten berücksichtigen" und "Daten mit kl. Abstand filtern".

Anmerkung:

Wenn sich durch eine lokale Netzveränderung der Wert nur weniger Knoten verändert hat, empfiehlt sich Folgendes:

Sofern die vorhandenen Knotendaten der nicht veränderten Knoten zur Interpolation genügen, ist eine Interpolation ohne ASCII-Datei und ohne zusätzliche Daten aus Strukturen nur mit "Berücksichtigung vorhandener Daten" im Allgemeinen ausreichend. Hierbei ist bei Knotendaten auch bei einer großen Knotenzahl die Verwendung des Gaußalgorithmus geeignet, da vor der Interpolation alle vorhandenen Knotendaten, die nicht in Nachbarschaft zu den zu interpolierenden Knoten liegen, aus den Interpolationspunkten gestrichen werden.

Wenn durch lokale Netzveränderungen Elementdaten (z. B. Neubildungsraten oder Durchlässigkeiten), die bereichsweise konstant sind, nachbelegt werden müssen, ist folgendes Vorgehen empfehlenswert:

Die Werte können ohne Verwendung weiterer ASCII-Dateien und ohne zusätzliche Daten aus Strukturen nur mit "Berücksichtigung der vorhandener Daten" interpoliert werden. Mit der Abstandswichtung, der Einstellung eines sehr großen Suchradius und Setzen der Anzahl der minimalen und maximalen Interpolationspunkte = 1 (genau ein Interpolationspunkt), kann erreicht werden, dass die entsprechenden Elemente den Wert erhalten, den das ihnen am nächsten liegende mit Daten belegte Element hat.

1.1.3 Schritt 3: Datenzuweisung

Im Kapitel „Datenstruktur des Grundwassersmodells – Beschreibung der Datenarten“ sind die Attribute eines SPRING-Grundwassersmodells beschrieben. Um eine Strömungsberechnung zu starten, sind mindestens folgende Daten erforderlich:

- Durchlässigkeitswerte für alle Elemente: Kennung KWER [z.B. 0.0001 m/s]
- Mächtigkeiten für alle Elemente: Kennung MAEC [z.B. 10 m]
- Potentialrandbedingung an mind. 2 Knoten (Potentialgefälle): Kennung POTE [z.B. 5-1 m NN]

1.1.3.1 Direkte Zuweisung vorhandener Strukturdaten

Nach der Fertigstellung des FE-Netzes erfolgt die Zuweisung der notwendigen Modelldaten. Dazu gehören z.B. Fest-Potentiale als Randbedingung der 1. Art (POTE), Vorflutpotentialhöhen und Leakagekoeffizienten an Bachläufen (VORF und LERA), Grundwasserneubildungsraten (FLAE), Durchlässigkeitswerte (KWER), Brunnenentnahmen (KNOT) oder Bereiche mit gleichem Potential (GLEI).

Zu beachten ist, dass Daten, die im ganzen Modellgebiet erforderlich sind, wie z.B. Durchlässigkeitswerte, Oberflächen oder Geländehöhen, durch Interpolation zugewiesen werden müssen, damit alle Elemente oder Knoten vollständig belegt sind.

Daten, die nur punktuell oder linienförmig benötigt werden, wie z.B. Leakagekoeffizienten, Brunnenentnahmen oder feste Potentiale am Modellrand, können direkt zugewiesen werden.

In der bestehenden Strukturdatendatei *schritt2_netz.str* sind die Datenarten POTE, VORF, KNOT und GLEI vorhanden, die auf folgende Weise zugewiesen werden:

Über *Struktur* → *Zuweisen* → *Liste...* oder *Attribute* → *Zuweisen* → *Aus Struktur...* → *Liste...* erscheint der Dialog:

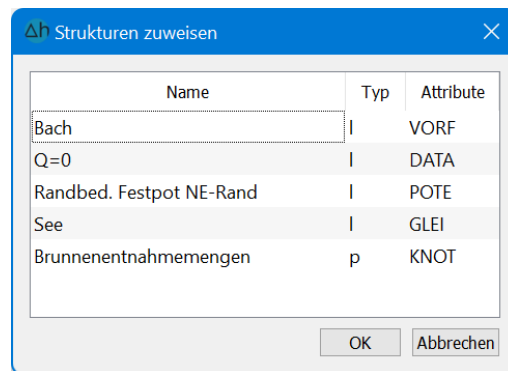


Abb. 20: Strukturdaten zuweisen

Wenn alle Strukturen mit der linken Maustaste und Drücken der SHIFT-Taste ausgewählt und der Dialog mit "OK" bestätigt werden, erscheint ein weiteres Dialogfenster, in dem die Genauigkeitsparameter der Zuweisung definiert werden können. (**Anmerkung:** Datenart DATA wird beim Zuweisen immer ignoriert.)

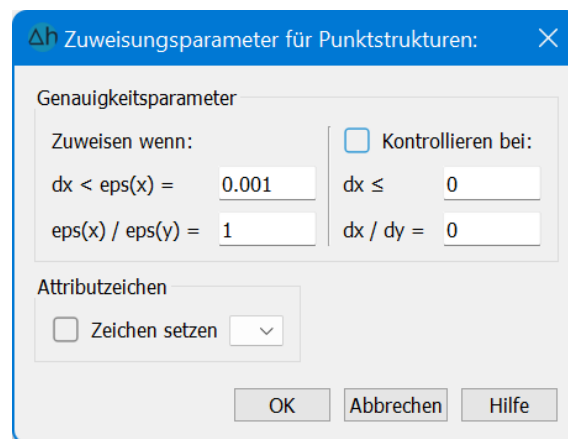


Abb. 21: Zuweisungsparameter

Ohne weitere Eingaben werden die Daten nach Drücken des OK-Buttons zugewiesen. Mit dem Menüpunkt *Attribute* → *Knoten bearbeiten* → *Fangen* können einzelne Knoten angeklickt werden, für die am nordöstlichen Rand das Attribut POTE, an den Knoten des Bachlaufes das Attribut VORF, an den Knoten des Sees das Attribut GLEI und an den drei Brunnen das Attribut KNOT erscheint.

Durch Darstellung der Potentiale unter *Ansicht* → *Attribute darstellen* → *Isolinien/Flächenplots/Werte...* mit der Darstellungsart "Kreise",

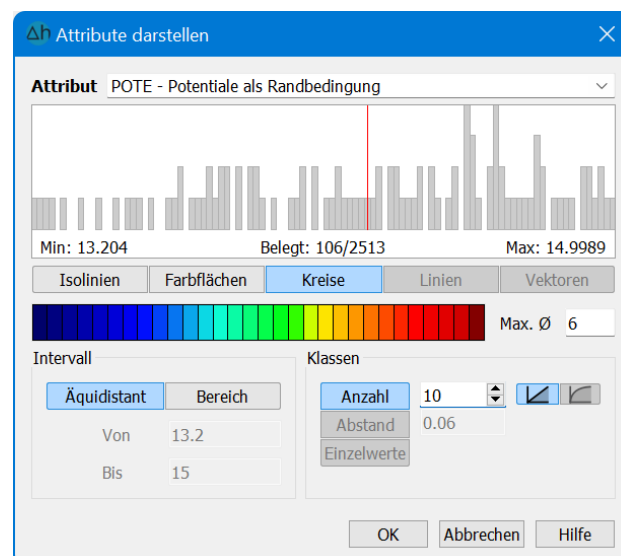


Abb. 22: Attribut-Darstellung

wird deutlich, dass nicht alle Knoten des nordöstlichen Randes einen Potentialwert haben. Dies liegt an den Genauigkeitsparametern der Datenzuweisung!

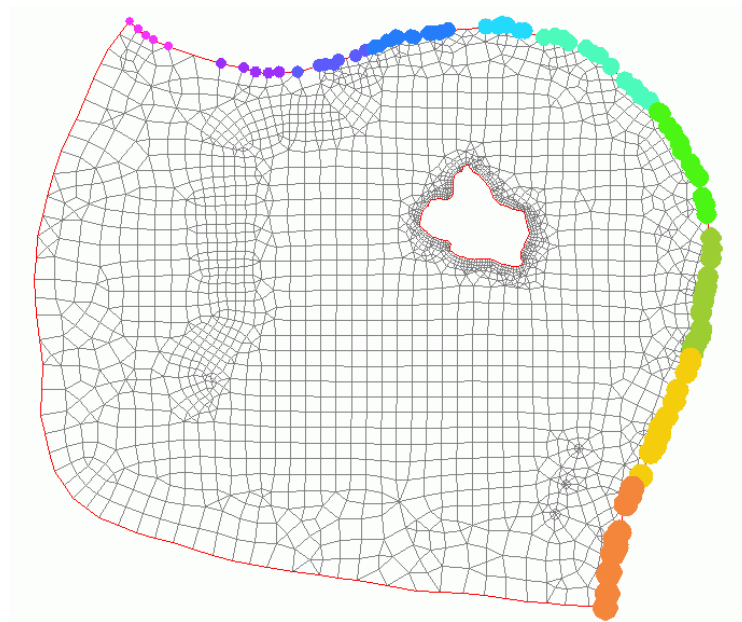


Abb. 23: Darstellung der zugewiesenen (noch nicht vollständigen) Potentiale

Eine erneute Zuweisung von POTE aus den Strukturen (*Struktur* → *Zuweisen* → *Liste*) mit folgenden Parametern:

Abb. 24: Angabe der Genauigkeitsparameter

und einer Bestätigung der Abfrage: "Alle überschreiben" weist allen Knoten des nordöstlichen Randes einen Potentialwert zu! Die Darstellung aktualisiert sich anschließend automatisch.

Für die Datenart GLEI der Seerand-Knoten sollte die Vollständigkeit der Zuweisung ebenfalls kontrolliert werden. Standardmäßig kann GLEI nicht mit Kreisen dargestellt werden. Mit dem Umweg über eine andere Datenart (z.B. 1KON, KKKK) ist die Darstellung trotzdem möglich. Mit *Attribute* → *Kopieren* → *Attributweise...* wird GLEI z.B. auf KKKK kopiert und anschließend dargestellt. Nach erfolgter Kontrolle sollten die Hilfsdaten wieder gelöscht werden.

Abb. 25: Attribute kopieren

1.1.3.2 Durch Interpolation von fremden Datenformaten

Es können auch Strukturdaten aus "projektfremden" Dateien (Fremdformat) in ein bestehendes Projekt eingelesen werden. Diese Dateien müssen nicht im *.str-Format vorliegen. Über *Struktur* → *importieren ...* → *.str*, *.txt*, *.csv*, *.arc*, *.shp* lassen sich verschiedene Formate einlesen. Im Beispiel wurde die Strukturdatendatei „s3_Daten2.str“ ausgewählt. Sie steht auf unserer zum Download bereit bzw. wurde bereits heruntergeladen (Verzeichnis: .../Tutorial_bsp_files/Tutorial_2D_bsp_files/...).

Beim Abspeichern des Projekts (eventuell unter einem neuen Namen), werden die "alten" und "neuen" Strukturdaten gemeinsam in die bestehende Strukturdatendatei geschrieben.

Die neuen eingeblendeten Strukturen sind: Tiefenangaben der Modellunterkanten, eine MARKierung des Bachlaufs und der linienbezogene Leakagewert des Bachlaufs (LERA). Während die Attribute MARK und LERA direkt, wie im Kapitel "Direkte Zuweisung" (S. 17) beschrieben, zugewiesen werden können, muss das Attribut UNTE (Modellunterkante) im vorliegenden Beispiel elementweise interpoliert werden.

Die Eingaben zu den einzelnen Interpolationsverfahren sind im Kapitel "Berechnung – Interpolation" des benutzer-Handbuchs ausführlich beschrieben.

Unter *Attribute* → *Zuweisen* → *Durch Interpolation...* erscheint folgendes Menü:

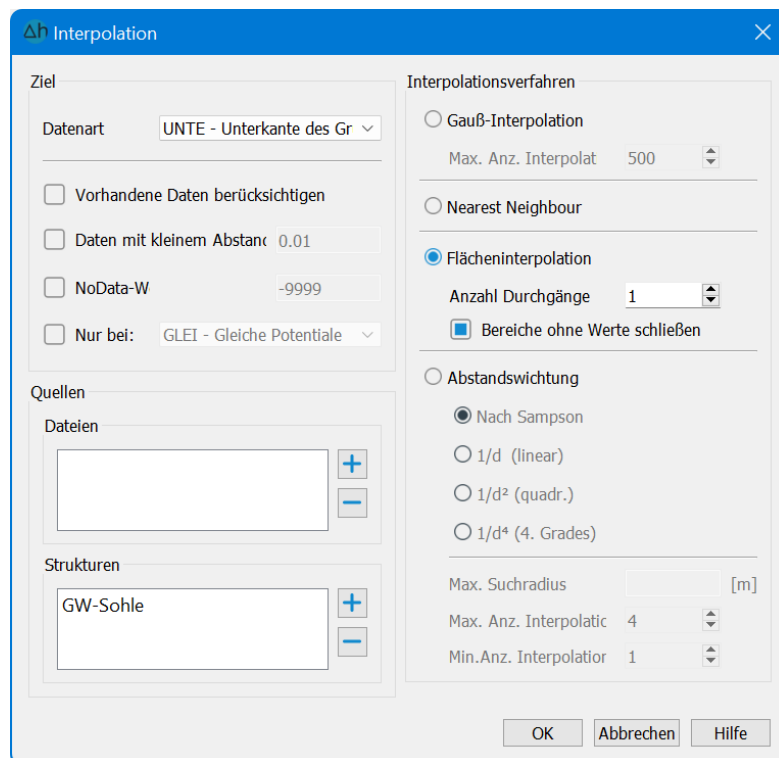


Abb. 26: Interpolation von Elementdaten

Bei Wahl der Quellen: "Aus Strukturen" *Eintrag hinzufügen* (+) öffnet sich ein weiteres Auswahlmennü, in dem alle vorhandenen Strukturdaten aufgelistet werden. Gewählt wird "UNTE". Als Ergebnisdatenart wird ebenfalls "UNTE" ausgewählt.

Anmerkung: Die Zieldatenart kann dabei von der Kennung der zur Interpolation ausgewählten Strukturdaten abweichen!

Als Interpolationsverfahren wird die Flächen-Interpolation gewählt. Nach Drücken des OK-Buttons werden die Daten interpoliert und nach erfolgreicher Berechnung erscheint folgendes Kontrollfenster:

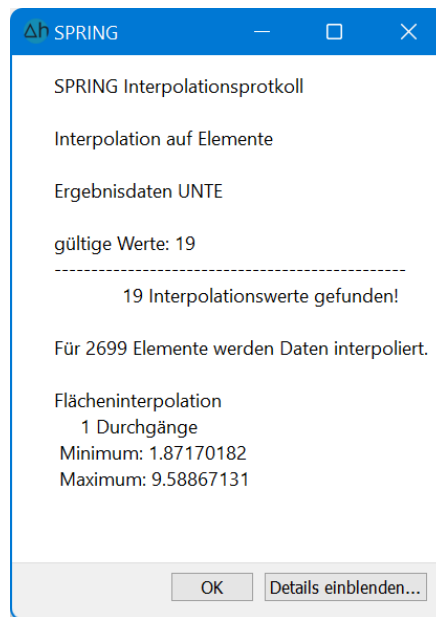


Abb. 27: Protokoll der Interpolation

Als nächstes erfolgt die Interpolation der Eichpotentiale. Diese ist besonders sorgfältig durchzuführen, da die Eichpotentiale eine der wichtigsten Datenarten für die Kalibrierung des Grundwassermodells sind. In der Regel liegen an den Grundwassermessstellen im Untersuchungsgebiet zum Kalibrierungszeitpunkt Messwerte vor, die in einer Datei abgelegt sind. Zusätzlich sind Informationen über die Wasserstände des Hauptvorfluters (POTE) und des Nebengewässers (VORF) bekannt. Aus diesen drei Datenarten wird durch Interpolation ein Kalibrierzustand ermittelt, der dann nach einer ersten Darstellung manuell überarbeitet werden muss.

Ein Beispiel für eine notwendige Überarbeitung sind interpolierte Grundwasssergleichen, die eine Infiltration ins Grundwasser zeigen, wo keine ist. Dieses Bild entsteht, wenn die Sohlhöhe kleiner Nebengewässer als Vorfluthöhe angesetzt wird, diese jedoch gar kein Wasser führen. Hier müssen dann die Vorfluthöhen an den Knoten für die Interpolation gelöscht werden.

Zur Berücksichtigung der Attribute VORF und POTE (sie wurden im Kapitel "Direkte Zuweisung" auf S. 17 bereits zugewiesen) werden sie über *Attribute* → *Kopieren* → *Attributweise...* von "VORF" bzw. "POTE" auf "EICH" übertragen, um als "vorhandene Daten" in die Interpolation einzugehen.

Unter *Attribute* → *Zuweisen* → *Durch Interpolation...* steht das Menü zur Interpolation von Knotendaten zur Verfügung. Dort wird bei *Quellen: "aus ASCII-Datei" Eintrag hinzufügen* die Datei „s3_gwmesspkte_neu.txt“ ausgewählt. Sie steht auf unserer zum Download bereit bzw. wurde bereits heruntergeladen (Verzeichnis: .../Tutorial_bsp_files/Tutorial_2D_bsp_files/...).

Zusätzlich wird der Menüpunkt "Vorhandene Daten berücksichtigen" aktiviert. Dadurch werden die unter der als Ergebnisdaten ausgewählten Datenart (hier EICH) bereits vorhandenen Daten bei den Interpolationspunkten berücksichtigt. Ergebnisdaten sind hier die EICHpotentiale.

Abb. 28: Interpolation von Knotendaten

Randbedingungen für die Interpolation:

Durch Aktivieren des Kontrollkästchens *Daten mit kleinerem Abstand filtern* können Interpolationspunkte mit sehr nahe beieinander liegenden oder identischen Koordinaten bei der Interpolation herausgefiltert werden. Dafür wird der Abstand aller Interpolationspunkte zueinander auf den im Textfeld eingegebenen Mindestabstand überprüft. Haben zwei Interpolationspunkte einen kleineren Abstand zueinander, wird der Interpolationspunkt, der als zweites auftritt nicht verwendet. Dabei werden erst die vorhandenen Daten, dann die Strukturdaten in der Reihenfolge der Liste und anschließend die Daten aus den ASCII-Dateien überprüft.

Durch Auswahl des Kontrollkästchens *Nur bei* lassen sich Knotendaten genau in dem Bereich interpolieren, in dem die ausgewählte Datenart zugewiesen ist.

Achtung: Bei der Abstandswichtung muss im Interpolationsprotokoll darauf geachtet werden, ob alle FE-Knoten einen Wert erhalten haben. Wenn nicht, muss der "Suchradius" vergrößert werden.

Es können jederzeit über *Datei* → *Importieren* → *Datei überlagern* → *.txt die Messwerte und die Lage der Messstellen angezeigt werden. Über folgendes Eingabefenster werden die Daten ausgewählt.

Zunächst muss auf den „Vorschau“ Button geklickt werden. Im unteren Bereich des Dialoges werden anschließend die Spalten ausgewählt. Außerdem kann ein Marker (Typ, Höhe und Farbe) ausgewählt werden.

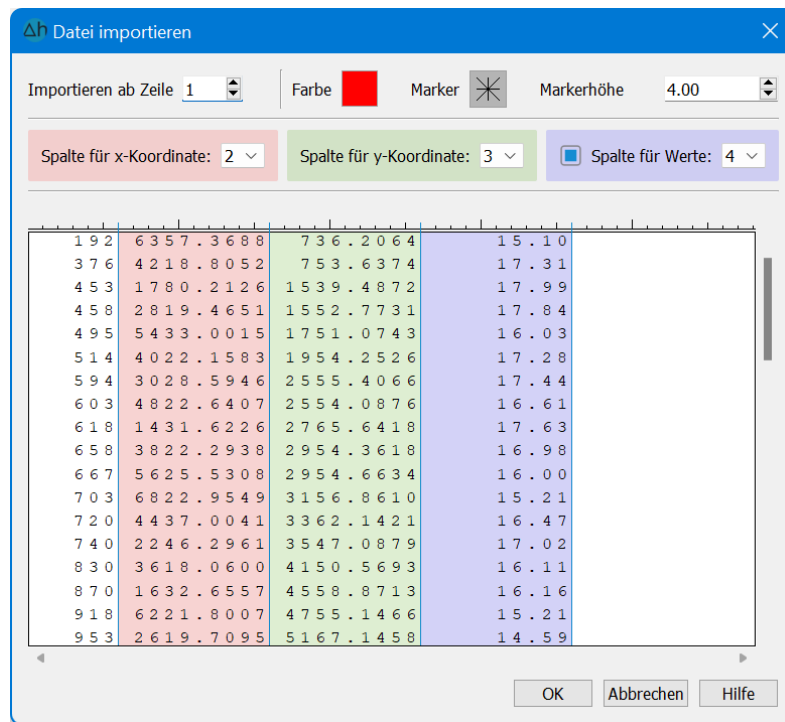


Abb. 29: Textdatei importieren

Nach erfolgreicher Interpolation lassen sich die EICHpotentiale über *Ansicht* → *Attribute darstellen* → *Isolinien/Flächenplots/Werte...* in folgender Form darstellen (Isolinien im Intervall 12.50 bis 20.0 und dem Abstand 0.5 m):

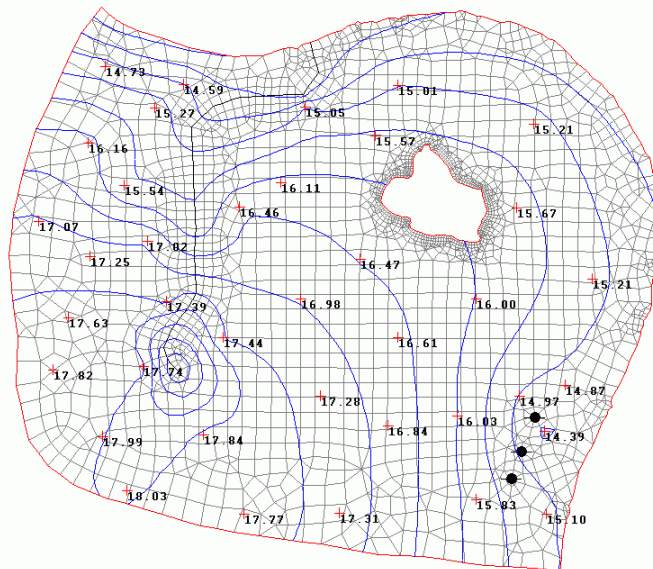


Abb. 30: Interpolierte Eichpotentiale, Isolinien im Abstand 0.5 m

Im Oberlauf des Baches ist die vorher beschriebene, aber nicht wirklich vorhandene Grundwasserinfiltration des Baches erkennbar, die durch einen "Grundwasserberg" sichtbar wird. Für die Kalibrierung werden die Daten folgendermaßen aufbereitet:

Zunächst wird das Attribut VORF auf eine Hilfsdatenart (z.B. KKKK, wenn schon belegt, dann vorher löschen!) kopiert. An 17 Knoten des Bach-Oberlaufs werden die VORFlutpotentiale gelöscht (*Attribute* → *Löschen...*).

Außerdem werden die EICHpotentiale vollständig gelöscht. Anschließend werden die VORFluthöhen und die Rand-POTentiale erneut auf das Attribut EICH kopiert.

Die oben beschriebene Interpolation der EICHpotentiale wird nun noch einmal durchgeführt.

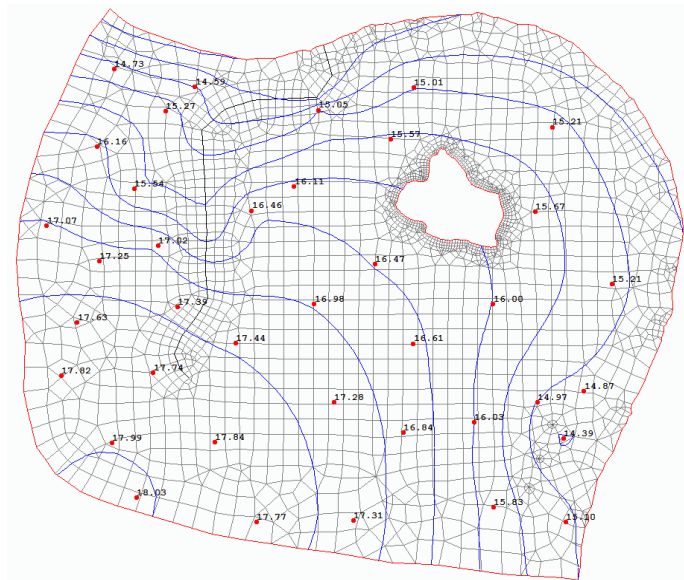
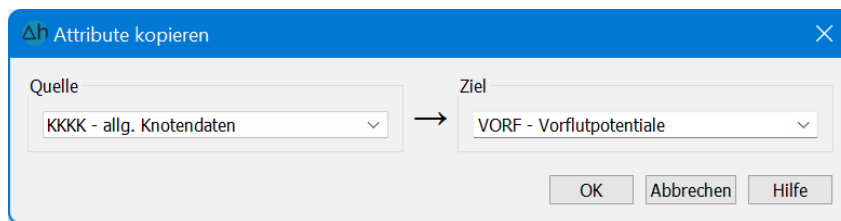


Abb. 31: Interpolierte Eichpotentiale unter Berücksichtigung der Vorflutverhältnisse

Danach werden die auf einem Hilfsattribut (z.B. KKKK) abgelegten vollständigen VORFlutpotentiale wieder zugewiesen (*Attribute* → *Kopieren* → *Attributweise...*).



Durch die geringe Datendichte im Bereich der Entnahmebrunnen spiegelt sich deren Grundwasserabsenkung nicht im Verlauf der Isolinien wider.

Des Weiteren muss noch die Geländehöhe zugewiesen werden. Geländehöhen liegen meist als ASCII-Datensätze vor, die erst in die Strukturdatendatei eingelesen werden müssen.

Die Datei „s3_gela.zip“ enthält die Datei gela.txt (Downloadbereich der Homepage). Da diese Datei nicht im Strukturdatenformat vorliegt, müssen diese Daten zunächst als Struktur importiert werden (*Struktur* → *Importieren*, S. 8).

Anschließend können die Daten ebenfalls über *Attribute* → *Zuweisen* → *Durch Interpolation...*, *Quellen: aus Strukturen* zugewiesen werden.

1.1.3.3 Manuelle Attributzuweisung

Zur besseren Übersichtlichkeit in der späteren Plotdarstellung werden den Entnahmebrunnen die Markierungen "120." (= typische Brunnenmarkierung) folgendermaßen zugewiesen:

Über *Ansicht* → *Attribute darstellen* → *Isolinien/Flächenplots/Werte* → *KNOT* können die Entnahmeknoten ein-geblendet und ihnen über *Attribute* → *Zuweisen* → *Direkt...*: *MARK* = 120. die entsprechende Markierung zugewiesen werden.

Für die anschließende Strömungsberechnung fehlen noch die Grundwasserneubildung (FLAE) und die Durchlässigkeiten (KWER). Diese Datenarten können flächendeckend auf alle Elemente zugewiesen werden mit *Attribute* → *Zuweisen* → *Direkt...* Im Beispiel wird die Grundwasserneubildung für das ganze Gebiet auf FLAE = 0.200 mit Zeichen " * " gesetzt, dies entspricht einer Neubildungsrate von 0.200 m³/m²/Zeiteinheit bzw. 200 mm/Jahr.

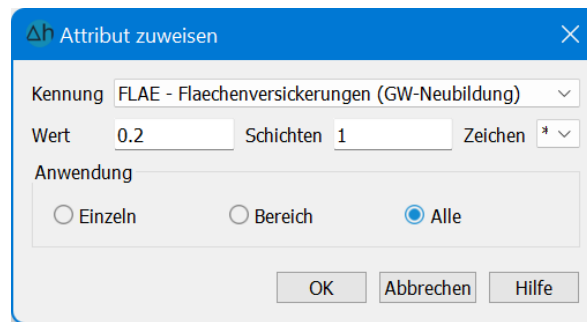


Abb. 32: Attribute direkt zuweisen

Das Gleiche wird nun für die Festlegung der Durchlässigkeitswerte (KWER) des gesamten Modellgebiets durchgeführt, jedoch ohne zusätzliches Zeichen in der 15./16. Spalte. Die Start-K-Werte vor Beginn der Kalibrierung werden auf 0.00005 m/s gesetzt. Außerdem werden für die K-Werte eine obere (KMAX = 0.002 m/s) und eine untere (KMIN = 0.000001 m/s) Schranke für die Kalibrierung eingeführt, die ebenfalls auf alle Elemente zugewiesen werden müssen.

Über *Ansicht* → *Markierungen* lassen sich die zugewiesenen Markierungen einblenden, oder man aktiviert den entsprechenden Button in der Symbolleiste ().

Das bis hierher erstellte Netz einschließlich der Strukturdatendatei „s3_schritt3_3.zip“ steht unter dem bekannten Link auf der Homepage zur Verfügung.

Da nun alle notwendigen Daten für eine Kalibrierung vorliegen, wird in Schritt 4: Vorgehen bei der Kalibrierung eines Grundwassermodells der Vorgang der Kalibrierung näher erläutert.

1.1.4 Schritt 4: Kalibrierung eines Grundwassermodells

1.1.4.1 Visualisierung des Ausgangszustandes

Sind das FE-Netz erstellt und die Daten zugewiesen, muss vor der Kalibrierung (und jedes Mal, wenn die Daten der Netz-Datei verändert werden) eine Modellprüfung durchgeführt werden. Dies geschieht über *Berechnung* → *Modellprüfung*. Hierbei werden die Modelldaten zur schnelleren Verarbeitung in so genannten Hintergrunddateien abgelegt (aaa, bbb, ccc).

1.1.4.2 Erstellung eines Modelldaten-Plots

Nach der Modellprüfung lassen sich bereits Plots von den Modelldaten erstellen. Zur Veranschaulichung des bisherigen Modellstandes können die EICH-Potentiale in einem Isolinenplan dargestellt werden. Mit *Datei* → *Ploterstellung* → *Draufsicht/Kartenerstellung...* erscheint folgendes Eingabefenster:

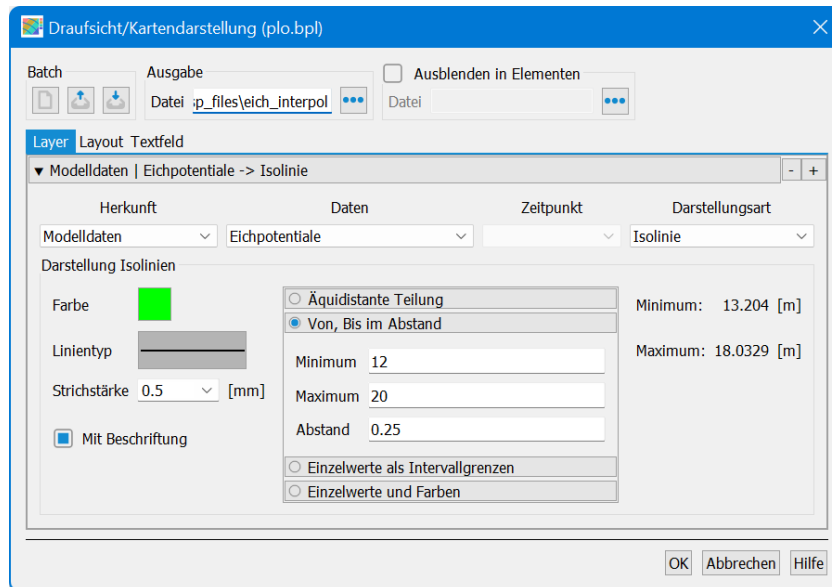


Abb. 33: Ploterstellung

Nach Auswahl der Datenart *Modelldaten* → *Eichpotentiale* → *Isolinien* wird die Darstellung von *bis im Abstand*: 12.0 - 20.0, 0.25 m, *Farbe*: grün gewählt. Anschließend wird ein Name für den Plot ("eich_intpol.plx") eingegeben und der Rechenlauf gestartet. Mit *Datei* → *Importieren* → *Datei überlagern...*: *.plx lässt sich der Plot darstellen. Es erscheint folgendes Bild:

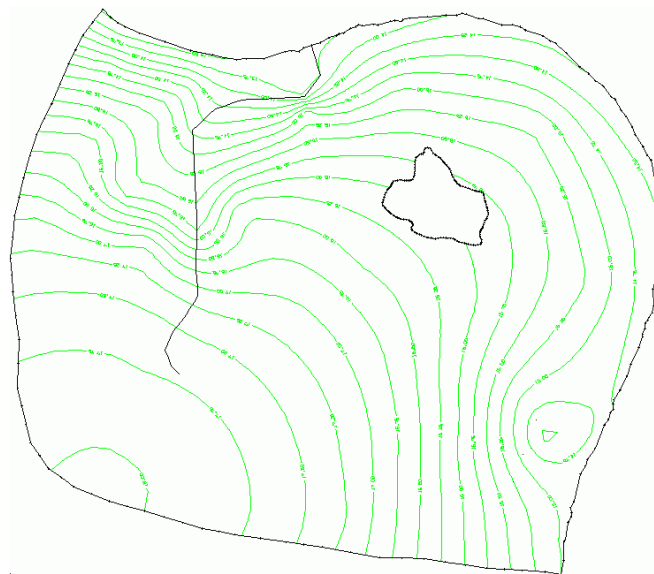


Abb. 34: Isolinien der interpolierten Eichpotentiale

1.1.4.3 Kalibrierung mit dem Gradientenverfahren

Mit den vorhandenen (Start-)K-Werten wird zunächst ein Iterationslauf gerechnet: *Berechnung* → *Modellkalibrierung (Gradientenverfahren)*.... Es erscheint folgendes Eingabefenster:

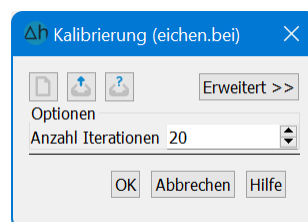


Abb. 35: Kalibrierung

Nach dem Öffnen der "Erweiterten Einstellungen" lassen sich weitere Einstellungen vornehmen.

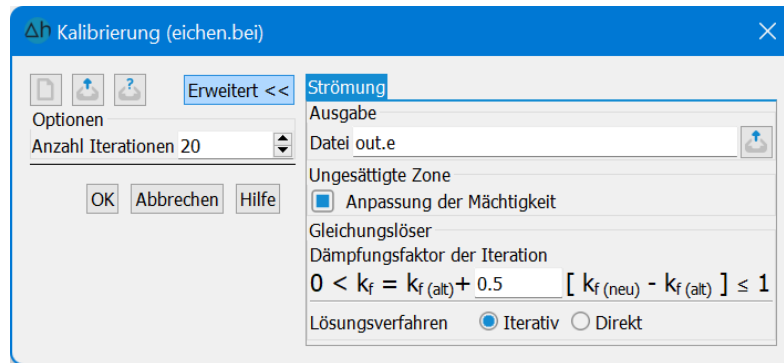


Abb. 36: Erweiterte Einstellungen (2D)

Nach dem Rechenlauf können die aus den Messwerten interpolierten Isolinien den Isolinien, die sich aus den berechneten K-Werten ergeben, gegenübergestellt werden.

Hierzu werden unter *Datei* → *Ploterstellung* → *Draufsicht/Kartenerstellung...* im Eingabefenster die Modelldatenart EICH und die Ergebnispotentiale nach der Kalibrierung dargestellt (rot). Beim Schließen des Moduls werden die Einstellungen für diesen Plot in der Batchdatei "plo.bpl" (voreingestellt) abgespeichert.

Der folgende Plot zeigt das Ergebnis der ersten Kalibrierung:

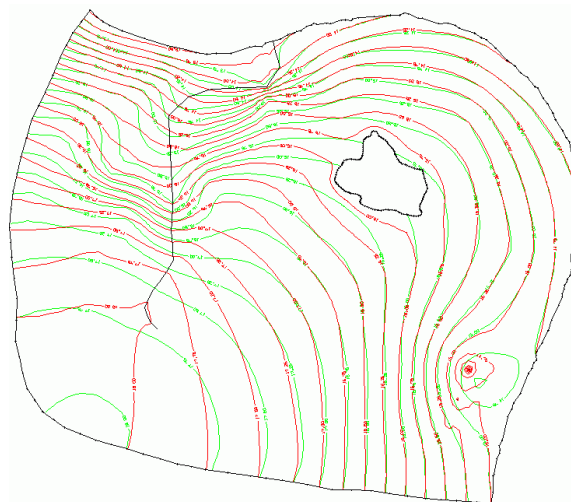


Abb. 37: der Soll- (grün) und Ist-Potentiale (rot) nach der 20. Iteration

1.1.4.4 Erstellen eines Messdaten-Differenzenplots und Abspeichern der Daten

Wenn eine Messdaten-Datei vorhanden ist, können an den Messpunkten (in der Regel Grundwassermessstellen) die Differenzen zwischen den gemessenen und berechneten Grundwasserständen durch "*Differenzen als Kreise*" dargestellt werden.

Dies geschieht im Rahmen der Plotdarstellung, indem bei der Datenherkunft "Messdaten" gewählt werden. Es erscheint ein Eingabefenster, in dem die Datei mit den Messwerten und die zu verrechnenden Daten definiert werden:

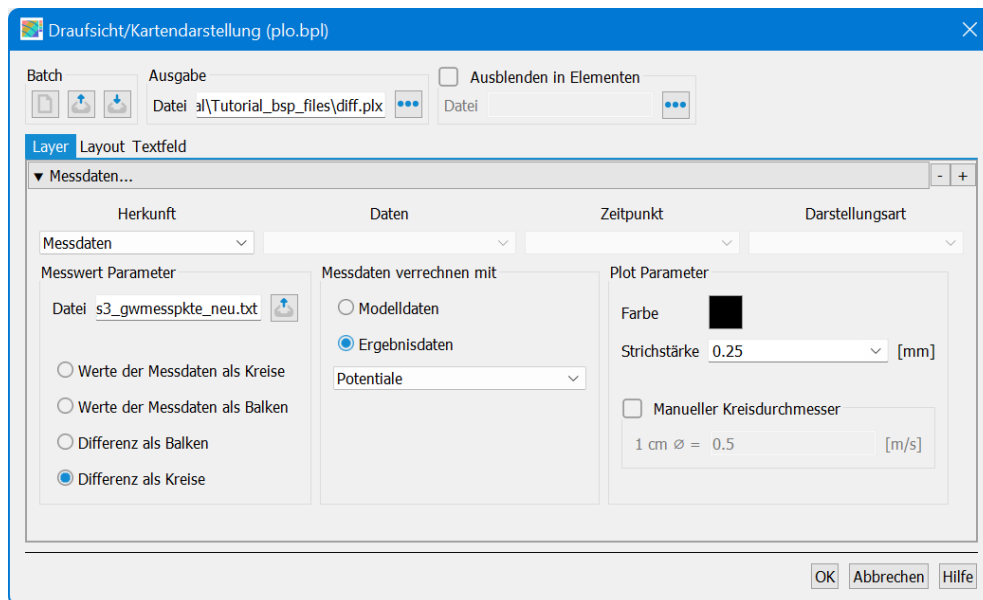


Abb. 38: Erstellen eines Differenzenplots

Die Datei mit den Messdaten wurde bereits in Schritt 3: Durch Interpolation.... zum Download zur Verfügung gestellt. Im Eingabefenster werden Differenzen als Kreise ausgewählt, und es wird folgendes Bild erstellt:

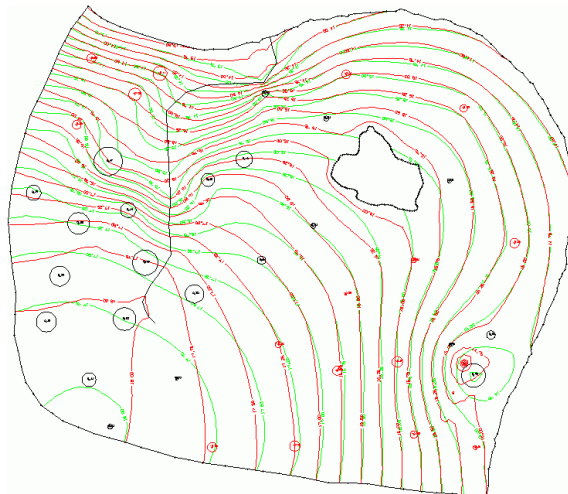


Abb. 39: Isolinien mit Differenzen-Plot

Die berechneten Isolinien besonders im östlichen Teil spiegeln schon recht gut den Verlauf der durch Messung ermittelten Isolinien wider. Die Abweichung an den Messstellen liegt bei maximal 0.47 m, im Mittel liegt sie bei 0.10 m. (Diese Abweichungen werden im Protokollfenster der Plotdarstellung angezeigt, die Abweichungen im Protokollfenster der Kalibrierung beziehen sich auf alle Knoten und liegen max. bei 1.24 m, im Mittel bei 0.11 m.). Die berechneten Differenzen sind an jedem Messpunkt dargestellt:

Positive Werte (schwarz) bedeuten: die Modellberechnung liefert größere Werte als die Messung, in diesem Beispiel heißt das: im Modell ist an dieser Stelle zu viel Wasser. Bei negativen Werten (rot) liefert die Berechnung kleinere Werte als die Messung, das heißt in diesem Fall: im Modell ist an dieser Stelle zu wenig Wasser.

Anmerkung: Sollen die berechneten Differenzen für eine spätere Auswertung als Datei abgespeichert werden, ist dies unter *Datei* → *Exportieren* → *Differenz zu Messdaten* möglich:

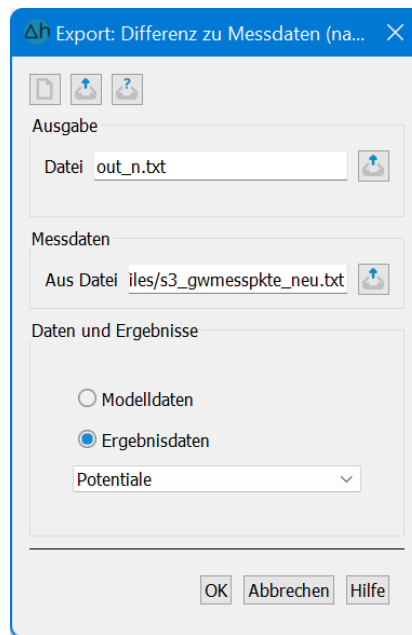


Abb. 40: Export von Messdaten-Differenzen

1.1.4.5 Kalibrierung des Beispiels in 3 Schritten

Die erste Kalibrierung liefert eine gute Ausgangsbasis für die K-Werte. Diese werden über *Attribute* → *Modelldaten/Berechnungsergebnisse importieren...* in die Modell-Datei übernommen:

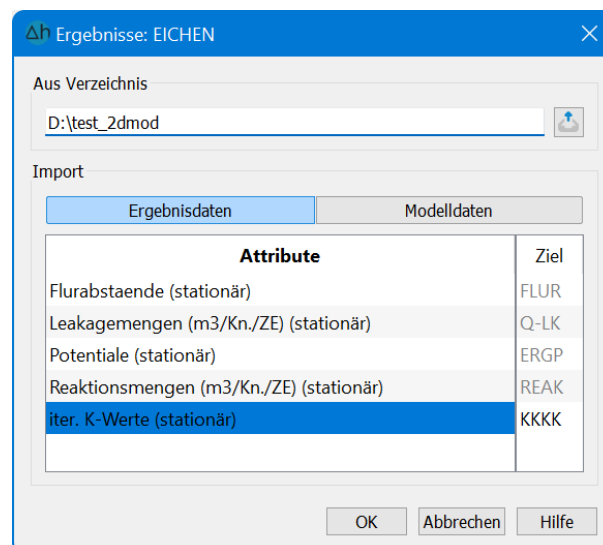


Abb. 41: Einlesen von Ergebnisdaten

Bei Wahl der Kennung "KWER", werden die vorhandenen K-Werte überschrieben. Um große Sprünge der K-Werte in benachbarten Elementen zu vermeiden, werden die K-Werte folgendermaßen geglättet:

Attribute → *Berechnen* → *Glätten*: Kennung: "KWER", der Wichtungsfaktor wird auf 0.5 gesetzt, die Wichtungsart ist voreingestellt auf "linear". Die Modell-Datei wird gespeichert. Anschließend wird das Modell geprüft (*Berechnung* → *Modellprüfung*), eine Strömungsberechnung (*Berechnung* → *Stationäre Strömung*) mit 5 Iterationen und Modul GEONEU (→ *Erweiterte Einstellungen*) gerechnet und ein neuer Plot mit der zuvor gespeicherten "plo.bpl"-Batchdatei erstellt. Das Ergebnis zeigt das folgende Bild:

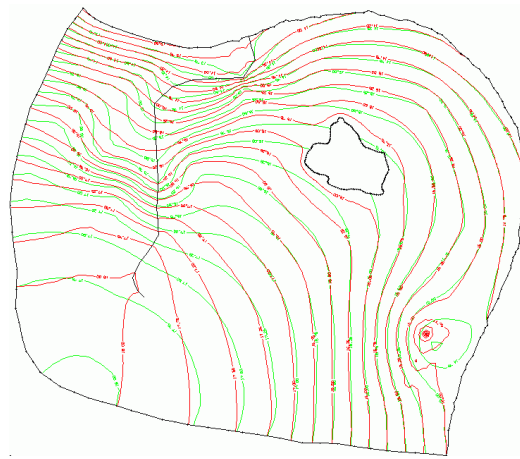


Abb. 42: Isolinien mit Differenzen-Plot nach Glätten der K-Werte

Die maximale Abweichung an den Messpunkten beträgt 0.50 m, die durchschnittliche liegt bei 0.09 m. Der Verlauf der Isolinien im Oberlauf des Baches deutet auf eine Infiltration des Bachwassers ins Grundwasser hin. Die Isolinie "17.75 (rot)" bildet beim "Überqueren" des Baches eine Spitze in Fließrichtung aus.

Da dies hier nicht den tatsächlichen Gegebenheiten entspricht (Bachbett ist wahrscheinlich trocken), wird an den letzten 14 Knoten der Parameter $MXKI = 0.0$ zugewiesen, d.h., eine Infiltration wird unterbunden (*Attribute* → *Zuweisen* → *Direkt...*).

Nach Durchlauf der *Modellprüfung*, einer *stationären Strömungsberechnung* und der *Plotterstellung* bietet sich das folgende Bild:

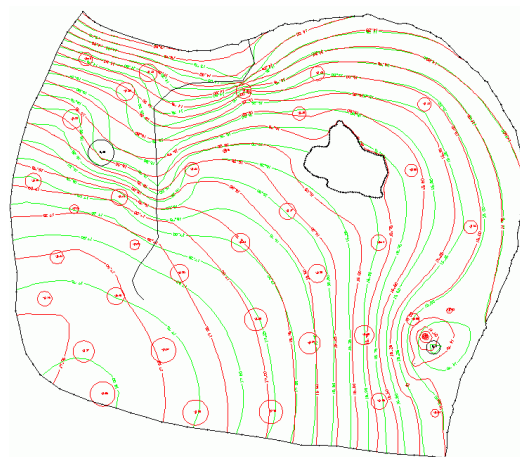


Abb. 43: Isolinien mit Differenzen-Plot nach Einführen von "MXKI" an 14 Knoten

Die Infiltration im Oberlauf des Baches ist beseitigt. Der Verlauf der Isolinien ist plausibler, jedoch hat sich die mittlere Abweichung der Messstellen verschlechtert. Die maximale Abweichung liegt nun bei 0.39 m und die mittlere bei 0.17 m. In einem Großteil des Modells scheint zu wenig Wasser vorhanden zu sein!

Es bietet sich an, mit den bis hierher veränderten Parametern noch einmal eine Kalibrierung zu starten. Das Ergebnis ist folgendes Bild:

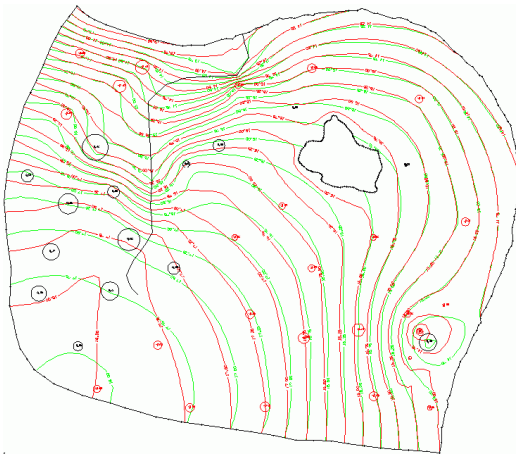


Abb. 44: Isolinien mit Differenzen-Plot nach erneuter Kalibrierung

Zu guter Letzt werden die iterierten K-Werte in die Modell-Datei übernommen und eine neue Strömungsberechnung durchgeführt. Mit der aktuellen Netz-Datei „s4_kalibriert“ ergibt sich dieses Bild („s4_kalibriert.zip“):

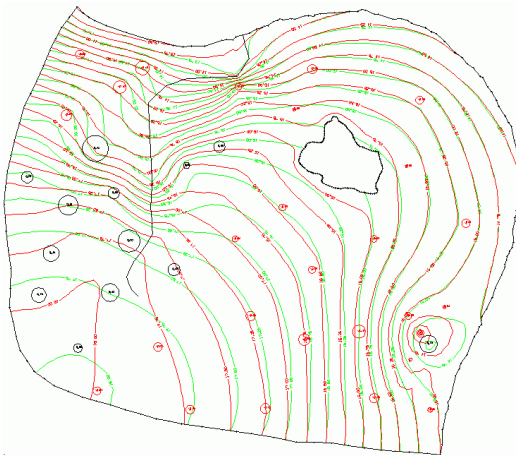


Abb. 45: Isolinien mit Differenzen-Plot des kalibrierten Modells

Die Abweichungen an den Messpunkten liegen bei maximal 0,41 m und im Durchschnitt bei 0,08 m. Dies wird für das Beispielmodell als ausreichend genau beurteilt.

Die Verteilung der Durchlässigkeiten sieht jetzt folgendermaßen aus:

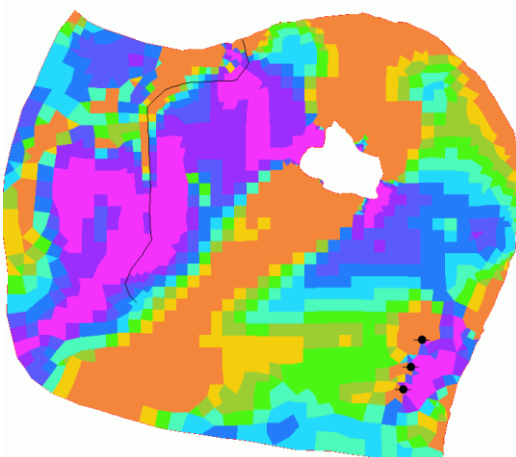


Abb. 46: Verteilung der kalibrierten Durchlässigkeiten

Die Durchlässigkeiten wurden (über *Ansicht* → *Attribute darstellen* → *Isolinien/Flächenplots/Werte*) im Intervall $1.0e-06$ bis 0.002 innerhalb von 10 Wertebereichen dargestellt. Durch Öffnen des Projektmanagers  erscheint in einem neuen Fenster die Layerliste, in der durch Drag&Drop die Anordnung der einzelnen Layer geändert

werden kann (**Hinweis:** "Oben" in der Layerliste entspricht ganz hinten, "Unten" in der Layerliste entspricht ganz vorn). Durch Anklicken des Kontrollkästchens wird die Legende des entsprechenden Layers eingeblendet.

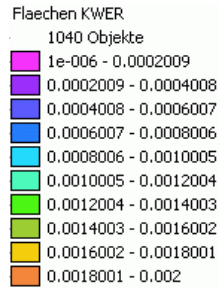


Abb. 47: Legende der Durchlässigkeitswerte [m/s]

Wie beschrieben kann eine schrittweise Modellkalibrierung aussehen, sie erfordert jedoch immer Kenntnisse des Anwenders über die örtlichen Gegebenheiten und lässt sich nicht nach Schema F abwickeln. Zudem sollte am Ende einer Kalibrierung eine Plausibilitätsprüfung der (iterierten) Parameter stehen.

1.1.4.6 Allgemeine Hinweise zur Kalibrierung

Die während der Modellkalibrierung iterierten K-Werte werden in der Ausgabedatei out.e im Dateiformat der *.net-Datei gespeichert und können von dort in die Modelldatei übernommen werden. Die Vorgehensweise (*Attribute* → *Modelldaten/Berechnungsergebnisse importieren ...*) wurde am Anfang von Kapitel "Kalibrierung des Beispiels in 3 Schritten" auf S. 29 erläutert.

Aufgrund der Komplexität eines Grundwassersmodells führt die automatische Veränderung der Durchlässigkeiten nicht unbedingt zu einem plausibel kalibrierten Modellzustand. Daher muss das Modell "per Hand" nachkalibriert werden. Die grundsätzliche Vorgehensweise sieht folgendermaßen aus:

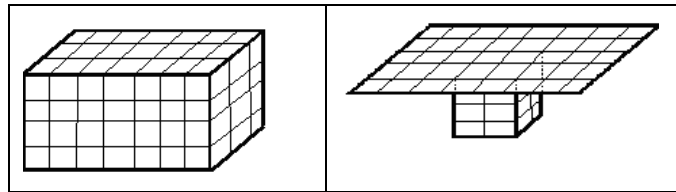
1.1.4.7 Schematisches Vorgehen bei der Kalibrierung

1. Übernehmen der automatisch iterierten K-Werte in die Modelldatei
2. Modellprüfung
3. Strömungsberechnung
4. Gegenüberstellung der Grundwassergleichen aus Messdaten mit den berechneten Grundwassergleichen,
 - wenn vorhanden, mit Darstellung der Differenzen (Kreisseplot) an den Messstellen
5. Bereichsweise Veränderung der Durchlässigkeiten entsprechend dem Verlauf der Isolinien:
 - liegen die berechneten Potentiale zu hoch, ist der Boden zu undurchlässig, d.h., die K-Werte müssen möglicherweise vergrößert werden
 - sind die berechneten Potentiale zu niedrig, staut der Boden zu wenig Wasser, und die K-Werte müssen möglicherweise undurchlässiger angesetzt werden
6. Zusätzlich gibt es natürlich andere Parameter, die ebenfalls bereichsweise verändert werden können:
 - Leakageanbindung der Vorfluter erhöhen oder reduzieren
 - Randzuflüsse überprüfen
 - Glätten der K-Werte über *Attribute* → *Berechnen* → *Glätten*: KWER auswählen und Wichtungsfaktor z.B. auf 0,5 setzen. Dadurch werden Sprünge in den benachbarten Netzelementen ausgeglichen.

Nach Veränderung der Parameter (Tipp: man sollte nicht zu viele Parameter auf einmal verändern!) wird das Modell geprüft und anschließend eine Strömungsberechnung durchgeführt. Danach beginnt man wieder bei Schritt 4. der schematischen Vorgehensweise. Dieser Vorgang wird so oft wiederholt, bis sich ausreichend genaue Abweichungen ergeben und der Verlauf der Isolinien plausibel erscheint.

1.2 Aufbau eines 3D-Modells

Die benötigten Dateien „s4_2D_schulung3D.zip“ stehen auf unserer Homepage: „<https://spring.delta-h.de/de/downloadandsupport-tools.html>“ zum Download bereit unter: Download – TOOLS – SPRING helferlein und Beispieldateien.



Im Rahmen einer Modelluntersuchung kann es vorkommen, dass die Fragestellungen innerhalb des Projekts aufgrund der örtlichen Verhältnisse (z.B. geologische Störungen, mehrere Grundwasserleiter, Wasserentnahmen aus tieferen Stockwerken, uvm.) eine dreidimensionale Modellbildung notwendig machen. Unabhängig davon, ob ursprünglich ein Horizontalmodell geplant war oder im Projekt von Anfang an ein dreidimensionales Modell konzipiert war, werden 3D-Modelle in SPRING auf Grundlage eines Horizontalmodells erstellt. Dabei ist es zweckmäßig, die 3D-Erweiterung erst nach vollständiger geometrischer Überprüfung des Horizontalmodells durchzuführen.

Anhand des Schulungsbeispiels wird hier das Vorgehen zum Aufbau eines 3D-Modells auf der Basis des vorhandenen Modells beschrieben.

1.2.1 Aufbau eines vollständigen 3D-Modells

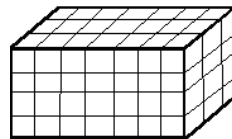


Abb. 48: Beispiel eines gleichförmigen 3D-Modells

1.2.1.1 Theoretische Grundlagen

Alle 3D-Elemente besitzen denselben Grundriss. Die Systematik bei der Zuweisung der Knoten- und Elementnummerierung ermöglicht eine schnelle Identifikation aller Elemente und Knoten auf Grundlage des 2D-Netzplanes.

- Ausgangspunkt ist das 2D-Netz eines Horizontalmodells
- alle Knoten über die Tiefe haben die gleichen x- und y- Koordinaten

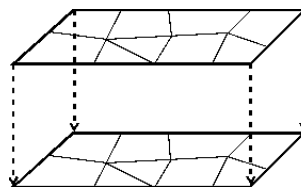


Abb. 49: Projektion des Horizontalnetzes in die Tiefe

Zur Vereinfachung der Netzerstellung bietet sich die Entkopplung der ebenen und der räumlichen Netzerzeugung an. Zunächst wird wie bei einem horizontal ebenen Modell ein 2D-Finite-Elementnetz erzeugt. Dabei ist darauf zu achten, dass alle Zwangspunkte wie Förderbrunnen und Messpegel oder Schichtgrenzen auch in der Tiefe berücksichtigt werden. In einem zweiten Schritt wird dieses 2D-Netz in die Vertikale projiziert.

Von einem bestehenden Horizontalmodell auszugehen, bringt zwei Vorteile mit sich: Bei der Erstellung eines 3D-Modells ist es für den Anwender einfacher und übersichtlicher, zunächst wie gewohnt ein 2D-Modell komplett fertig zu stellen und auf Eingabefehler zu testen.

Bei schon bestehenden Modellen erlaubt dieses Vorgehen eine schnelle Erweiterung auf die dritte Dimension, wenn sich z.B. bei der Kalibrierung oder der Simulationsrechnung herausstellt, dass ein Horizontalmodell nicht ausreicht, um die wirklichen Verhältnisse widerzuspiegeln.

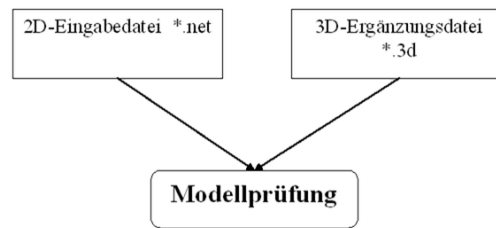


Abb. 50: Datenverarbeitung

Die über die Ergänzungsdatei der 3D-Daten gesteuerte Generierung des Netzes in die Tiefe findet während der Modellprüfung statt. Die Projektion des Horizontalnetzes auf tiefere Schichten erlaubt dabei ein automatisiertes Vorgehen mit sehr wenig zusätzlichen Eingaben. Es sind prinzipiell zwei Wege möglich:

- 3D-Erweiterung über Schichtenzahl und Teilung (3DSH)
- 3D-Erweiterung über Vorgabe der Z-Koordinaten (ZKOR)

1.2.1.2 3D-Erweiterung über Schichtenanzahl und Teilung (3DSH)

Die in der Modelldatei vorhandene Unterfläche des Grundwasserleiters bildet die unterste Knotenschicht. Die Geländeoberfläche (GELA) oder - falls keine vorhanden ist - ein eingegebener Grundwasserstand (EICH) oder - falls beide nicht vorhanden sind - die auf Knoten interpolierten Modelloberflächen (OBER) definieren die oberste Knotenschicht. Durch Angabe des Teilungsverhältnisses der gewünschten Schichten werden die dazwischenliegenden Knotenschichten generiert.

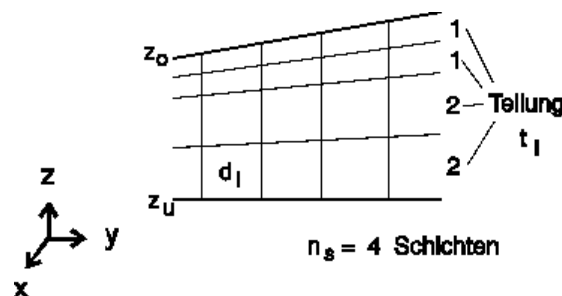


Abb. 51: Generierung des 3D-Netzes durch Angabe der Teilung

Die in der Regel an jedem Punkt unterschiedliche Mächtigkeit zwischen Oberfläche und Unterfläche wird im angegebenen Verhältnis geteilt und so die entsprechende z-Koordinate ermittelt:

$$d_i = \frac{z_0 - z_u}{\sum_{j=1}^{n_s} t_j} \cdot t_i$$

Dieses Vorgehen bietet sich bei Grundwasserleitern ohne ausgeprägte geologische Schichtung an, bei denen das räumliche Fließen des Grundwassers durch äußere Ursachen (z.B. unvollkommener Brunnen oder Unterströmung eines Bauwerks oder Flusses) bedingt ist.

1.2.1.3 Umsetzung in SPRING

Im bestehenden Modell wird zunächst der Rand des 3D-Gebiets definiert. Mit *Netz* → *3D* → *Rand* → *Netzrand* = *3D-Rand* wird automatisch der neue 3D-Rand zugeordnet. Über *Ansicht* → *Projektinformationen* erscheint mit den Eigenschaften des Projekts jetzt der Modelltyp "3D-Modell".

Projektinformation	
	Witten_modell.net
Typ	3D-Modell
Zeiteinheit	Jahr
	EPSG:25832
Maßstab	1 : 25000
Ausdehnung in x	343250 bis 347612
Ausdehnung in y	5.67531e+06 bis 5.67831e+06
 Knoten	19778
 Elemente	23405
Knotenschichten	10
Elementschichten	9
3D-Offset	440000
3D-Ränder	1

Abb. 52: Projektinformation

Nach Auswahl von *Netz* → *3D* → *Neue Schichteinteilung* erscheint folgendes Fenster, in dem die gewünschte Schichteinteilung festgelegt werden kann:

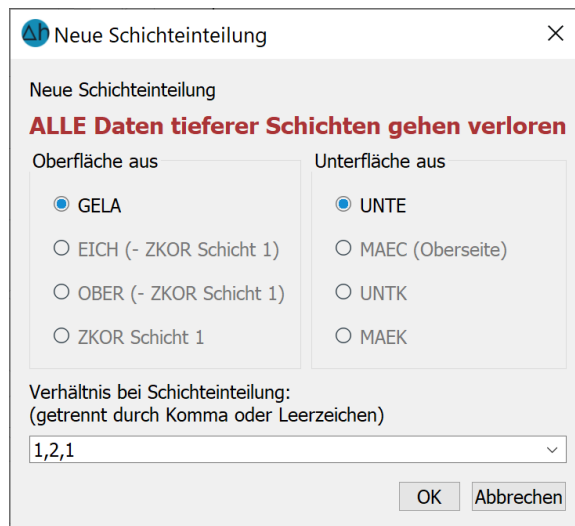


Abb. 53: Neue Schichteinteilung

Im untersten Feld werden Anzahl und Mächtigkeit der Elementschichten entsprechend der geologischen Verhältnisse definiert.

Die im Beispiel angegebenen Zahlen haben folgende Bedeutung:

- Die **Anzahl** der Zahlen (hier: 3) bestimmt die Zahl der Elementschichten.
- Die **Summe** der Zahlen (hier: $1+2+1=4$) bestimmt die Teilmächtigkeiten der einzelnen Elementschichten. Im Beispiel wird die vorhandene Mächtigkeit (= Geländeoberkante - Modellunterkante) durch 4 geteilt und mit den angegebenen Verhältniszahlen der einzelnen Schichten multipliziert. Daraus ergibt sich für die erste Schicht eine Schichtdicke von $1/4$ der gesamten Mächtigkeit, für die zweite Schicht eine Schichtdicke von $1/2$ und für die dritte Schicht wiederum eine Schichtdicke von $1/4$ der Gesamtmächtigkeit.

Im folgenden Vertikalschnitt lässt sich das Verhältnis der Schichtdicken zueinander deutlich erkennen:

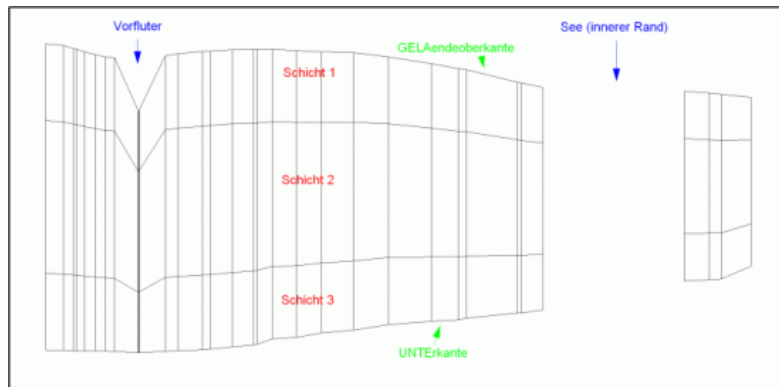


Abb. 54: Vertikalschnitt des neuen 3D-Modells (100-fache Überhöhung in Y-Richtung)

Bereits während der Netzbearbeitung ist es in SPRING möglich, sich einen beliebigen Schnitt durch das Modell anzuschauen. Über *Ansicht* → *Vertikalschnitt* werden zwei beliebige Punkte (Drücken der linken Maustaste) gewählt, die den zugehörigen Vertikalschnitt durch das Modell definieren. Dieses Feature ist unabhängig von der Modellart, es funktioniert auch bei Horizontalmodellen.

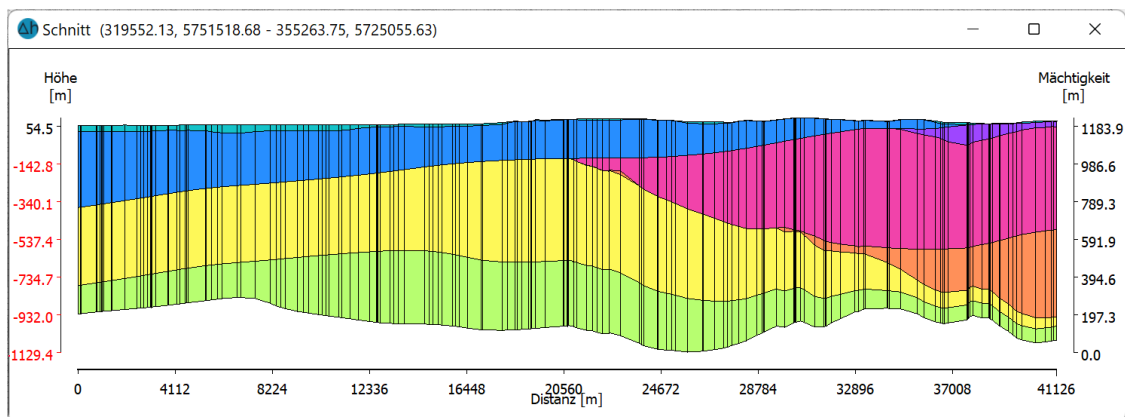


Abb. 55: Beliebiger Vertikalschnitt durch das 3D-Modell

Die Schichten des 3D-Modells können über *Ansicht* → *3D-Netz* dargestellt werden. Es öffnet sich ein weiteres Fenster (3D-Ansicht), in dem das Modell durch Drücken der linken Maustaste beliebig in alle Richtungen gedreht werden kann:

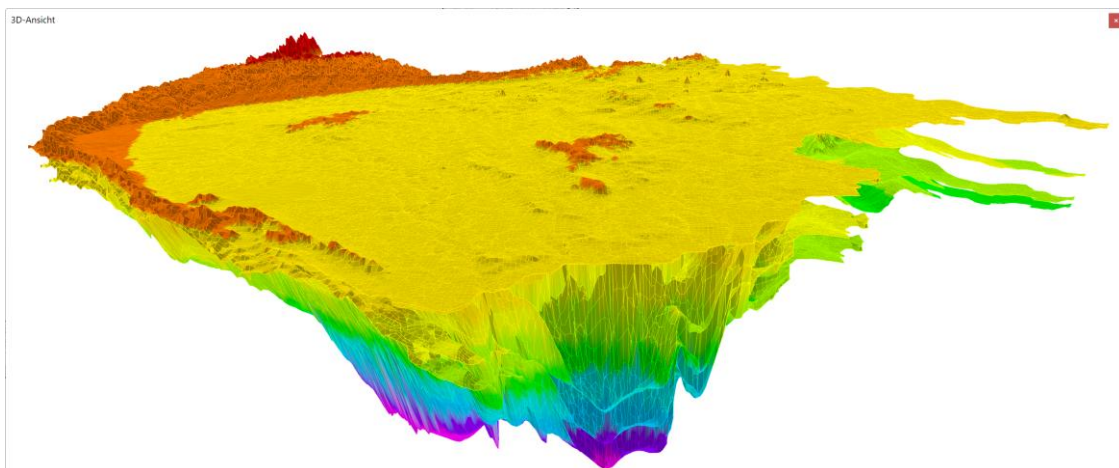


Abb. 56: Dreidimensionale Ansicht eines Modells

Für eine einfache Strömungsberechnung reicht es aus, den unteren Schichten über *Attribute* → *Zuweisen* → *Direkt...* einen Durchlässigkeitswert zuzuweisen. Bei komplexen hydrogeologischen Verhältnissen muss für tiefere Schichten bzw. Grundwasserleiter gegebenenfalls eine schichtweise Kalibrierung durchgeführt und weitere notwendige Attribute eingeführt werden (Sättigungsparameter, undurchlässige Schichten, etc.).

1.2.1.4 3D-Erweiterung über Vorgabe der Z-Koordinaten (ZKOR)

Bei diesem Vorgehen muss, außer für die oberste Knotenschicht (= Gelände- oder Grundwasseroberfläche), für jeden Knoten der z-Wert angegeben werden. Das Interpolationswerkzeug in SPRING kann bei der Konstruktion der z-Koordinaten-Schichten genutzt werden. Die x- und y-Koordinaten ergeben sich aus dem 2D-Netz. Die horizontalen Elementgrenzen können Bodenschichtungen folgen oder der vertikalen Verfeinerung dienen.

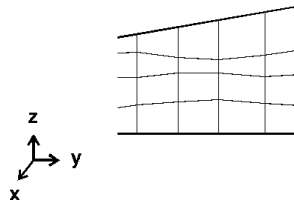


Abb. 57: Generierung des 3D-Netzes durch Vorgabe der Z-Koordinaten

1.2.2 Einbau von auslaufenden Schichten in das 3D-Modell

In SPRING besteht die Möglichkeit, lokale vertikale Netzverfeinerungen durchzuführen oder auslaufende Schichten in das Modell einzubauen.

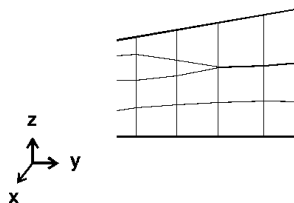


Abb. 58: Auslaufende Schichten

1.2.2.1 Theoretische Grundlagen

Um z.B. Details wie lokale geologische Störungen, Tonlinsen, örtlich begrenzte Grundwassergeringleiter o.ä. in einem 3D-Modell abzubilden, ist oftmals eine vertikale Netzverfeinerung erforderlich (auslaufende Schichten).

Soll eine Elementschicht auslaufen, müssen die Z-Koordinaten der unteren Knotenschicht und der oberen Schicht für alle entsprechenden Knoten identisch sein.

Mit welcher Genauigkeit die Z-Koordinaten als identisch gelten und damit zusammengelegt werden, bestimmt der Parameter ZEPS, der in der 3d-Datei abgelegt ist. Voreingestellt ist ein Wert von 0.01 m (haben die Z-Koordinaten zweier untereinander liegender Knoten also einen Abstand kleiner oder gleich 1 cm, so werden die Knoten zu einem Knoten zusammengelegt.) Der Wert kann im Menü *Netz → 3D → Schwellwert für zusammenfallende Schichten...* vom User geändert werden.

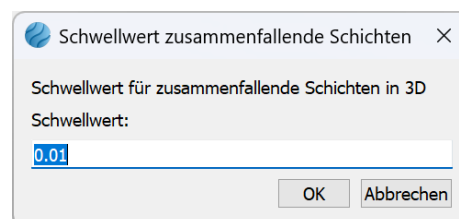


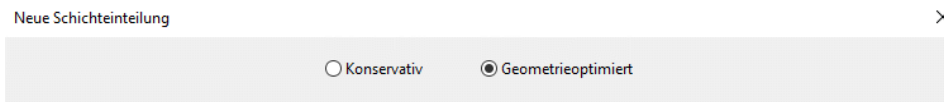
Abb. 59: Schwellwert für zusammenfallende Schichten

Die *Modellprüfung* erkennt wegfallende Knoten und Elemente, so dass die Berechnungsprogramme nur die übrig gebliebenen Daten bearbeiten.

1.2.2.2 Umsetzung in SPRING

Die Umsetzung lokaler vertikaler Netzverfeinerungen in SPRING geschieht mithilfe des Menüpunktes *Netz → 3D → Schicht teilen*. Dabei werden die Daten für die neuen Knoten und Elemente automatisch (wie bei der horizontalen Netzverfeinerung) mitgeneriert.

Nach Aufruf des Menüpunktes erscheint ein Eingabefenster, in dem zunächst entschieden wird, nach welcher Methode die Teilung erfolgt:



1.2.2.2.1 Konservative Schichteinteilung

Bei Auswahl der *konservativen* Schichteinteilung erscheint das folgende Eingabefenster:

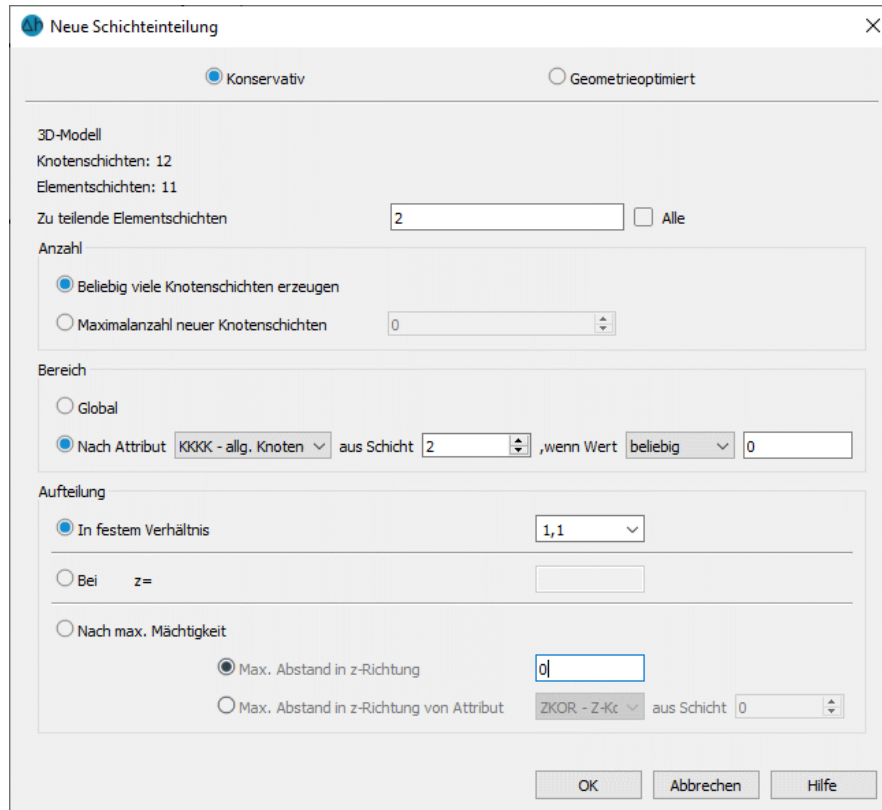


Abb. 60: Schicht teilen für eine lokale vertikale Netzverfeinerung

Zur Veranschaulichung der Schicht-Teilung nach Attributeigenschaften wurde in dem oben erstellten 3D-Modell einer Gruppe von Knoten das Attribut KKKK in der zweiten Elementschicht zugewiesen.

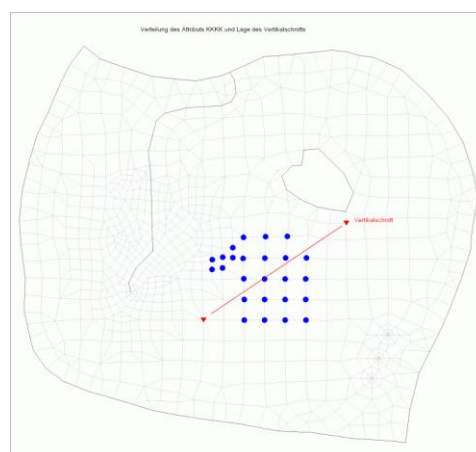


Abb. 61: Horizontale Ansicht der Knoten mit Attribut "KKKK" sowie Lage des Vertikalschnittes

Zuerst muss die Elementschicht festgelegt werden, die geteilt werden soll, da immer nur das Teilen einer einzelnen Schicht möglich ist. Im Beispiel wird Schicht 2 gewählt. Durch die Auswahl von "KKKK" werden die Knoten definiert, an denen nun eine weitere Elementschicht generiert wird. In welcher Form dies geschieht, wird durch Auswahl des Buttons *Teilen in festem Verhältnis*, *bei z = ?* oder *Teilen nach max. Mächtigkeit* entschieden.

Wird das *Teilungsverhältnis* definiert, ist die Anzahl der neu einzuziehenden Schichten an allen Knoten identisch.

Beim *Teilen nach maximaler Mächtigkeit* wird die Anzahl der neu einzuziehenden Schichten von der jeweiligen Schichtmächtigkeit abhängig gemacht.

Im vorliegenden Beispiel wurde *Teilen in festem Verhältnis* gewählt mit der Eingabe "1, 1". Dies bewirkt eine gleichmäßige Teilung der 2. Elementschicht in 2 Schichten mit der halben Mächtigkeit der Ausgangsschicht.

Nach Speichern des Projekts kann mit *Ansicht* → *Vertikalschnitt* die neue Schichteinteilung dargestellt werden. Das folgende Bild zeigt das Ergebnis der Schichtteilung:

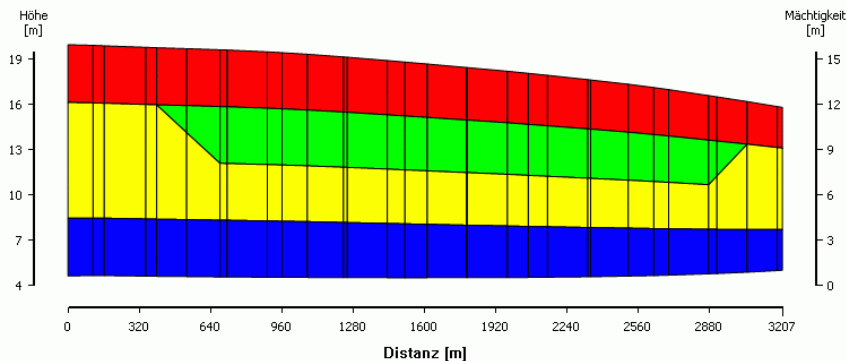


Abb. 62: Lokale vertikale Netzverfeinerung der 2. Elementschicht, wo Attribut "KKKK" vorhanden ist (grüner Bereich)

Falls die gewählten Attribute einer Knotenschicht nur vereinzelt vorkommen, ergibt sich folgender Vertikalschnitt an den Knoten mit dem entsprechenden Attribut (gewählt wurde ein Verhältnis von "1, 3"):

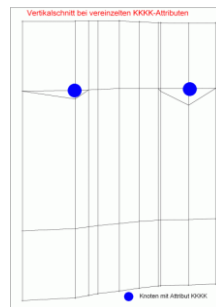


Abb. 63: Lokale vertikale Netzverfeinerung der 2. Elementschicht, wenn Attribut "KKKK" nur vereinzelt vorhanden ist

Das letzte Bild zeigt, dass die Definition über Attributeigenschaften nicht immer sinnvoll ist. Sind auslaufende Schichten in einem 3D-Modell einzubauen, ist meistens eine manuelle Knoten- bzw. Netzbearbeitung anhand vorhandener Bohrprofile und geologischer Aufschlüsse erforderlich.

1.2.2.2.2 Geometrieoptimierte Schichteinteilung

Bei Auswahl der *geometrieoptimierten* Schichteinteilung erscheint das folgende Eingabefenster:

Das Eingabefenster 'Neue Schichteinteilung' zeigt die Auswahl zwischen 'Konservativ' und 'Geometrieoptimiert'. Die 'Geometrieoptimiert'-Option ist ausgewählt. Die Eingabefelder sind:

- Min. GELA: 27.84
- Max ZKOR (Schicht 12): -13.9302
- Schichtanzahl: [Eingabefeld]
- z zwischen z: [Eingabefeld] und [Eingabefeld]
- Bereich:
 - ☒ Global
 - ☐ Nach Attribut: ZKOR - Z-Koordinat, aus Schicht: 0, wenn Wert: beliebig, 0

Das folgende Bild zeigt ein 3D-Modell mit mehreren auslaufenden Schichten, um die Komplexität solcher geologischer Verhältnisse zu verdeutlichen.

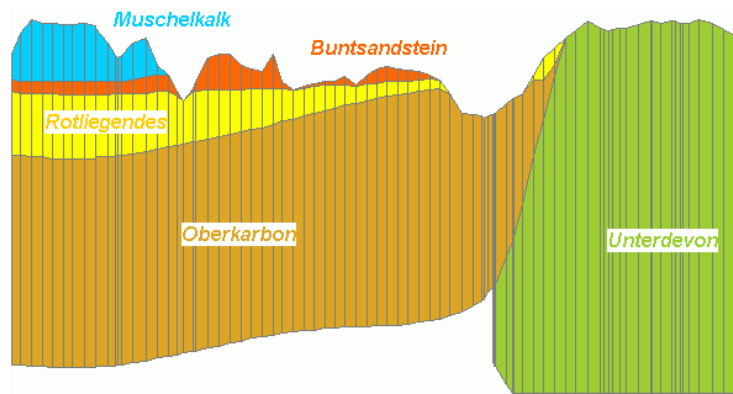


Abb. 64: Auslaufende Schichten bei komplexen geologischen Verhältnissen

Verfeinerung die Schichtoberkante erhalten, jedoch nicht die geologische Schichtzuordnung. Die schichtspezifischen Attribute sollten bei dieser Teilungsvariante vorher gesichert werden.

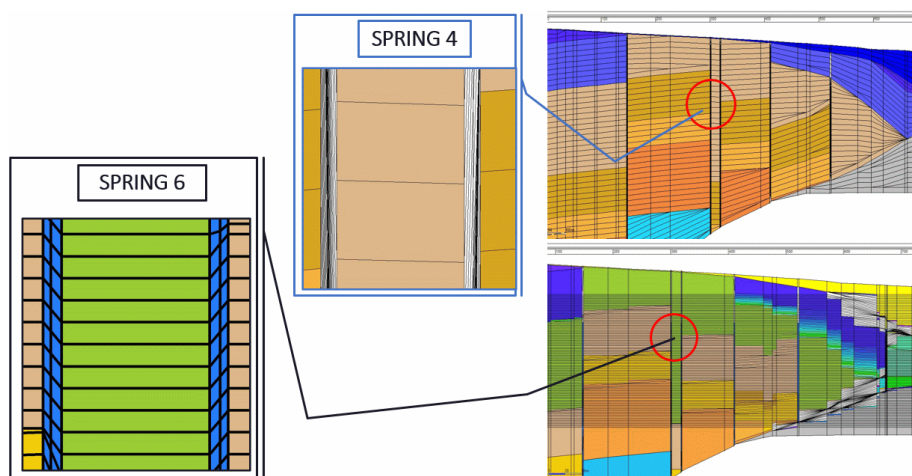


Abb. 65: Schichtteilung in SPRING6

1.2.3 Aufbau eines 3D-Teilmodells

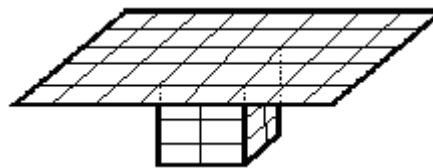


Abb. 66: Beispiel eines Horizontalmodells mit 3D-Teilbereich

1.2.3.1 Theoretische Grundlagen

Die Bereiche des oder der Grundwasserleiter mit ausgeprägt dreidimensionaler Strömung sind häufig von lokalem Charakter (oder haben meist eine relativ kleine Ausdehnung). Bei kleinräumigen Modellen sinnvolle Randbedingungen zu definieren, die durch das lokale Strömungsgeschehen nicht beeinflusst werden, ist meist schwierig. Bei dreidimensionalen Modellen ist die Vergrößerung der Modelle zu sinnvollen Modellgrenzen bezüglich des Speicherplatzes, der Übersichtlichkeit und Rechenzeit teuer.

Die eleganteste Lösung ist in diesen Fällen ein großräumiges 2D-Modell mit einem 3D-Teilgebiet.

Die oben erläuterte automatische Netzgenerierung ist auch hierbei anwendbar. Als zusätzliche Information ist lediglich die Eingabe eines oder mehrerer geschlossener Gebietsränder durch Knotennummern nötig (3DRA). Das Programm erkennt nun die 2D-Elemente innerhalb des 3D-Gebietes und projiziert die entsprechenden Elemente automatisch in die Tiefe.

1.2.3.2 Übergang von 2D-Gebiet auf 3D-Gebiet

Der Übergang zwischen 2D- und 3D-Modellbereichen erfordert besondere Berücksichtigung in der Berechnung.

Die Voraussetzung für ein zweidimensionales Horizontalmodell ist nach der Dupuit-Annahme ausschließlich horizontales Fließen. An der Übergangsstelle zwischen 2D-Modell und 3D-Teilbereich darf also keine Geschwindigkeit in Z-Richtung auftreten.

Eine gute Methode, diese Übergangsbedingung zu definieren, ist das Gleichsetzen der Potentiale über die Höhe. Bei Verwendung der Datenart GLEI wird eine Nebenbedingung für das Gleichungssystem definiert, die die Potentiale (hier: der übereinander liegenden Knoten) auf einen gleichen, vor der Berechnung nicht bekannten Wert setzt.

Anhand des eingegebenen Randes des 3D-Gebiets (3DRA) wird festgestellt, ob ein vollständig dreidimensionales Gebiet gerechnet wird oder ein 3D-Teilgebiet. Da im ersten Fall die 3D-Randknoten gleichzeitig Randknoten des Modells sind, ist das Gleichsetzen nicht möglich. An diesen Knoten müssen Randbedingungen entweder 1. Art (Potential) oder 2. Art (Durchfluss) explizit vorgegeben werden.

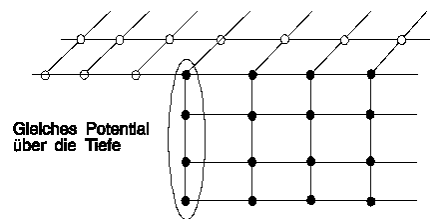


Abb. 67: Übergangsbedingungen vom 2D- zum 3D-Bereich

1.2.3.3 Umsetzung in SPRING

Bei der Umsetzung für das Beispiel wird über *Netz* → *3D* → *Rand* → *Rand neu erzeugen* → *3D-Rand fangen* der dreidimensionale Teilbereich bestimmt. Hierbei müssen alle Randknoten des Teilbereiches „eingefangen“ werden.

Nach Bestätigen des Randes mit der rechten Maustaste muss (wie im Kapitel "3D-Erweiterung über Schichtenanzahl und Teilung (3DSH)" auf S. 34 beschrieben) eine *Neue Schichteinteilung* vorgenommen werden. Gewählt wurde die Eingabe: 1, 3, 2. Das ergibt 3 Schichten mit einer jeweiligen Mächtigkeit von 1/6, 1/2, 1/3.

Über *Ansicht* → *3D-Rand* wird der neu definierte 3D-Rand eingeblendet. Über *Layer* → *Farbe ändern* kann dem 3D-Rand eine andere Farbe (grün), so dass der 3D-Rand deutlicher hervorgehoben wird. Man erhält folgendes Bild:

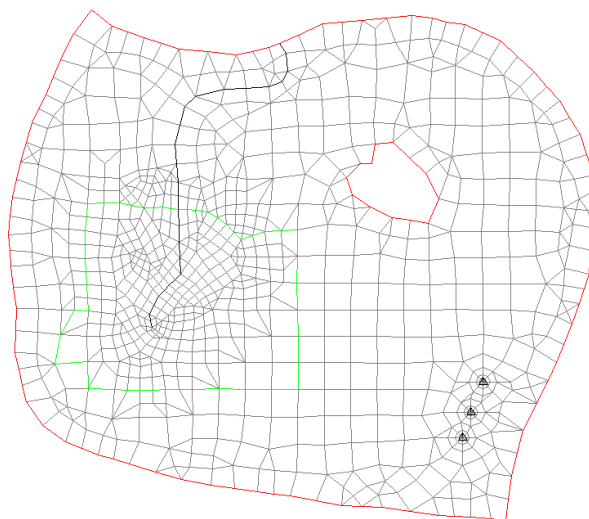


Abb. 68: Darstellung des 3D-Randes in SPRING

Danach müssen den neuen Elementen für eine Strömungsberechnung mindestens die K-Werte zugewiesen werden.

Das Erstellen eines Plots des neuen Modells ist bereits nach der *Modellprüfung* möglich.

Man erhält folgendes Bild des 3D-Teilmodells:

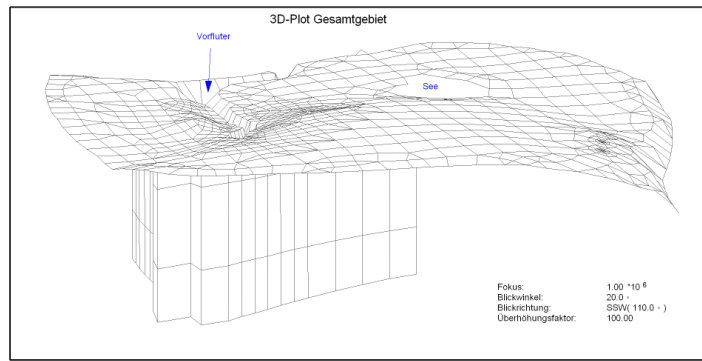


Abb. 69: Netzplot mit 3D-Teilbereich

1.2.3.4 Automatische Nummerierung

Die Nummerierung der Knoten und Elemente in den tieferen Schichten geschieht automatisch. Durch die Verwendung von Indexfeldern sind die Nummern in SPRING beliebig wählbar d.h. es ist keine fortlaufende Nummerierung notwendig. Im Normalfall beträgt der Offset für die 3D-Nummerierung 10.000. Beschränkt man sich auf maximal 9.999 Knoten bzw. Elemente in einer Schicht, kann die automatische Nummerierung durch Addition von 10.000 zu jeder Knoten- und Elementnummer erfolgen.

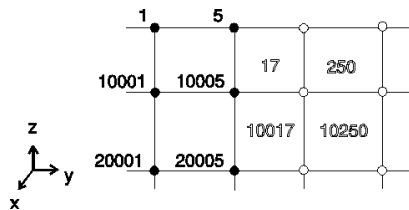


Abb. 70: Beispiel für die Knoten- und Elementnummerierung

Der Vorteil für den Anwender liegt darin, dass er nur einen Netzplan der obersten (bzw. 2D-) Schicht mit Knoten- und Elementnummern zur Identifikation jedes beliebigen Punktes benötigt. Für die n-te Schicht ist lediglich $(n-1) \cdot 10.000$ zur Nummer zu addieren.

Sollte bei einem großen Modell das Offset von 10.000 nicht ausreichen, kann über die Datenart 3DNR in der Netzdatei ein anderer (beliebiger) Wert eingestellt werden. Im Sinne der Übersichtlichkeit sollten möglichst glatte Werte verwendet werden.

1.2.3.5 Automatische Nachbelegung der Daten

Um den Eingabeaufwand so gering wie möglich zu halten, erfolgt während der *Modellprüfung* eine automatische Nachbelegung der meisten erforderlichen Daten. Dabei werden die Daten für eine Schicht mit denen der nächsthöheren Schicht nachbelegt.

Die Vorbelegung erstreckt sich auf folgende Datenarten:

- EICHpotentiale
- Durchlässigkeiten (KWER, KWEV, KFBH)
- Beschränkung der Durchlässigkeiten (KMIN, KMAX)
- Dispersivitäten (DISP)
- Porositäten (PORO)
- Speicherkoeffizienten (SPEI, KSPE)
- Anfangskonzentrationen (AKON)
- Anisotrope K-Werte (Z-KA)
- Kompressibilität des Gesamtsystems (KOMP)

Wenn z.B. bei einem 3D-Modell mit 6 Knotenschichten die Eichpotentiale für die 1. und 3. Knotenschicht in den Netzdateien stehen, erhält die 2. Schicht die Werte der ersten und die 4., 5. und 6. Schichten erhalten die Werte der dritten Schicht.

Werden keine vertikalen K-Werte angegeben und kein Verhältnis zu den horizontalen K-Werten definiert (KFVH), wird das Verhältnis auf den Wert 0.1 gesetzt, d.h. $K_{WEV} = 0.1 * K_{WER}$.

1.2.4 Import eines Teilmodells in das Gesamtmodell

Bei vielen Projekten lautet die Aufgabe, zunächst ein großräumiges Gesamtmodell zu erstellen und später für Detailfragen Teilmodelle auszuschneiden, zu verfeinern und zu bearbeiten. Im Anschluss sollen die Detailergebnisse wieder in das Gesamtmodell importiert werden. Die folgenden Kapitel geben eine Anleitung, welche Arbeitsschritte am Teilmodell und am Gesamtmodell vor und nach dem Rückimport durchzuführen sind.

1.2.4.1 Löschen des Teilmodellgebiets aus dem Gesamtmodell

Im ersten Arbeitsschritt werden die Modellknoten, die innerhalb des Teilmodellrands liegen, aus dem Gesamtmodell gelöscht. Die folgende Abbildung (Abb. 146) zeigt das Gebiet des Teilmodells vor dem Import in das Gesamtmodell.

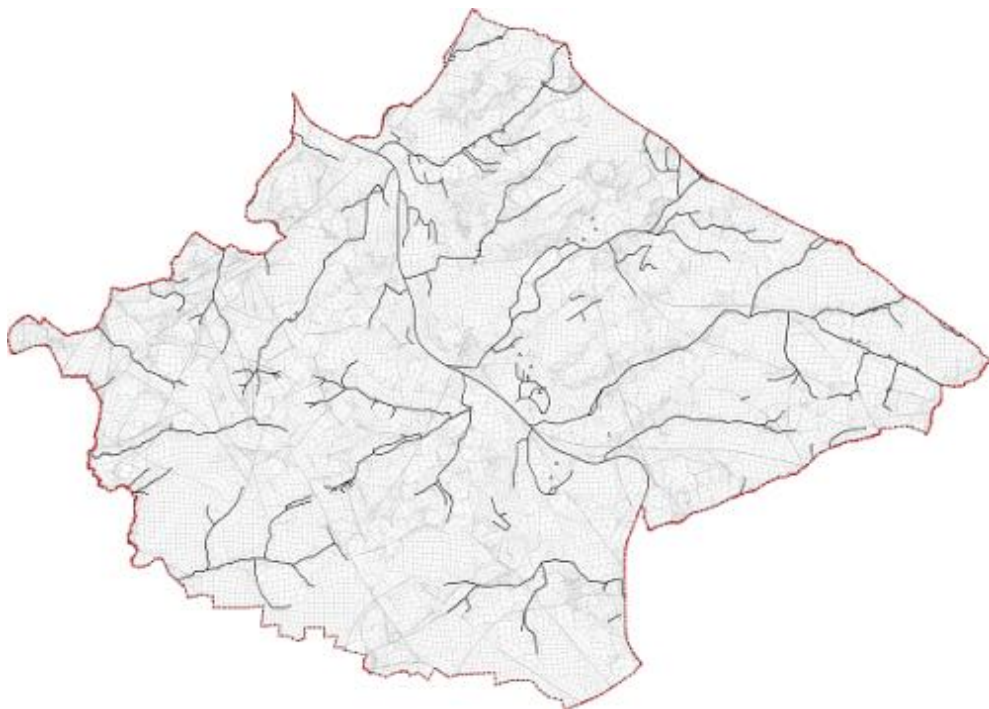


Abb. 71: Modellgebiet des Teilmodells vor der Integration in das Gesamtmodell

Entlang des Außenrands dieses Modells werden die Knoten und Elemente aus dem bestehenden Gesamtmodell entfernt (*Netz → Knoten löschen → Innerhalb selektierter Strukturen* bzw. *Netz → Elemente löschen → Innerhalb selektierter Strukturen*). Die folgende Abbildung (Abb. 147) zeigt das verbleibende Netz des Gesamtmodells.

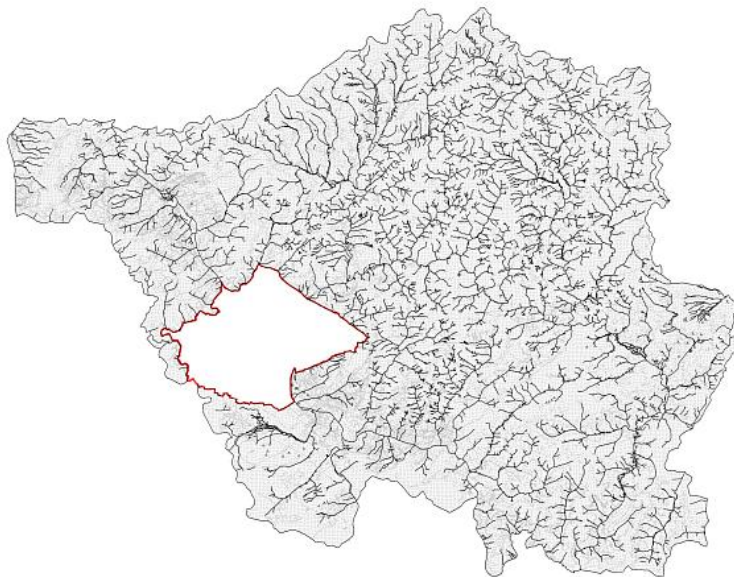


Abb. 72: Aus dem Gesamtmodell entfernter Bereich des Teilmodells (rot umrandet)

Bei konkaven Randverläufen können dabei in Einzelfällen Elemente erhalten bleiben, die auf der Fläche des Teilmodells liegen, also entfernt werden müssen (Abb. 148, cyan unterlegte Elemente, die außerhalb der roten Randlinie liegen). Diese Situation entsteht, weil alle Eckknoten dieser Elemente beim Löschen erhalten bleiben. Diese Elemente sind manuell zu entfernen.

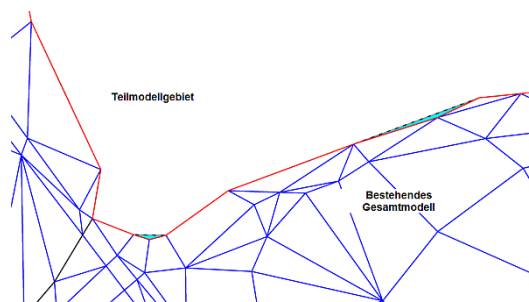


Abb. 73: Beispiel für Elemente, die beim Löschen des Teilmodellgebiets nicht entfernt werden

Ein zweiter Arbeitsschritt besteht darin zu prüfen, ob linienförmige Datenstrukturen (z.B. Gewässerlinien) den ausgeschnittenen Modellrand mehrfach schneiden. Wenn dies der Fall ist, müssen die Linien zwischen dem Punkt, an dem die Linie das verbleibende Modellgebiet verlässt und dem Punkt, an dem sie wieder in das Modellgebiet hineinläuft, aufgetrennt werden. Die folgende Abbildung (Abb. 149) zeigt eine derartige Situation. Das Bild (a) stellt die Ausgangssituation im Gesamtnetz dar. Im Bild (b) wurde das Netz entlang der unterbrochenen roten Linie ausgeschnitten. Dabei verläuft eine blaue Linie aus dem verbleibenden Restnetz heraus und an einer anderen Stelle wieder hinein. Die Stellen, an denen eine derartige Situation auftritt, sind manuell für jede linienbezogene Datenart zu identifizieren und durch Auftrennen dieser Linien zu bereinigen (c). Dieser Schritt ist nicht nur für eine korrekte Darstellung (z.B. Markierungen), sondern beispielsweise auch für eine korrekte Berücksichtigung der linienbezogenen Leakage-Randbedingung erforderlich.

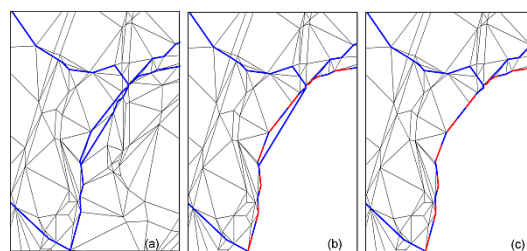


Abb. 74: Korrektur von Liniendaten, die den Rand eines ausgeschnittenen Netzes mehrfach schneiden

1.2.4.2 Horizontale Randanpassung

Da das Netz eines Teilmodells in der Regel für Detailfragen verfeinert wird, ist eine Anpassung der Randknoten zwischen Teil- und Gesamtmodell durchzuführen. Hierzu werden die Randknoten des Teilmodells auf die Randknoten des Gesamtmodells reduziert. Der Vorteil dieses Vorgehens ist, dass entweder aus Viereckselementen Dreieckselemente entstehen oder Elemente ganz entfallen. Es ergibt sich in diesem Fall keine Notwendigkeit, ein neues Element zu erstellen, das dann auch neu zu parametrisieren wäre. Die folgende Abbildung verdeutlicht diesen Arbeitsschritt:

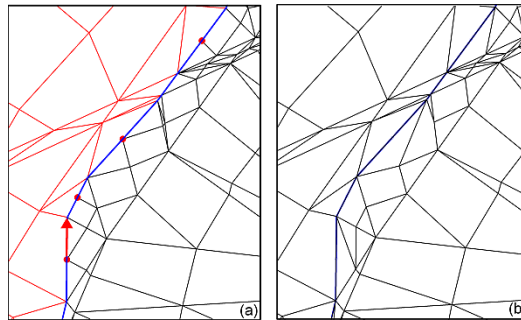


Abb. 75: Anpassung der Randknoten von Teil- und Gesamtmodell

Bild (a) zeigt in schwarz die Elemente des verfeinerten Teilmodells und in rot die Elemente des bestehenden Gesamtmodells. Die blaue Linie markiert den Außenrand des Teilmodells, also die Nahtlinie der beiden zusammenzuführenden Netze. Durch rote Punkte sind diejenigen verfeinerten Randknoten des Teilnetzes markiert, die im Gesamtnetz keine Entsprechung haben. Daher sind diese Knoten vor der Integration der beiden Netze zu eliminieren. Ein reines Löschen dieser Knoten ist nicht sinnvoll, da auch die angrenzenden Elemente gelöscht werden. SPRING unterstützt das manuelle Verschieben von Knoten auf benachbarte Knoten (roter Pfeil). Bei der Menüabfolge *Netz* → *Knoten* → *Zusammenlegen* → *Zwei fangen* wird einer der beiden Knoten und die dabei ggf. entfallenden Elemente automatisch entfernt. Das Bild (b) zeigt die bereinigten Netze.

Bei diesem Arbeitsschritt ist darauf zu achten, dass keine für die numerische Berechnung ungünstigen Elementgeometrien auftreten oder unzulässige Elemente verbleiben (Abb. 151).

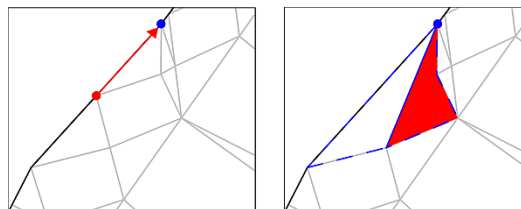


Abb. 76: Beispiel für das Entstehen unzulässiger Elemente bei der Reduktion von Randknoten

Diese Zusammenhänge sind beim Zusammenlegen für jeden einzelnen Knoten zu beachten. In ganz wenigen Einzelfällen, wenn beide möglichen Verschiebungsrichtungen zu unzulässigen Elementen führen, ist eine manuelle Verschiebung einzelner Netzknoten im Modellinneren oder das Teilen von Viereckselementen unumgänglich.

Anmerkung:

Um diesen Arbeitsschritt zu vermeiden, ist es generell zu empfehlen, auf eine Netzverfeinerung an den Randknoten sowohl horizontal als auch vertikal zu verzichten!

1.2.4.3 Vertikale Randanpassung

Je nach Fragestellung und Datenlage kann sich bei der Bearbeitung eines Teilmodells die Notwendigkeit ergeben, Änderungen am Schichtenaufbau des Modells durchzuführen. Die Gründe hierfür können unterschiedlicher Natur sein:

- Neuere Untersuchungen und Bohrergebnisse erfordern eine Veränderung der Tiefenlage von Schichtgrenzen.

- Die Bearbeitung von Detailfragen im Teilmodell erfordert eine differenziertere Betrachtung von einzelnen geologischen Einheiten, wodurch eine weitere Unterteilung bestimmter Modellschichten erforderlich wird.
- Zur korrekten Abbildung z.B. von unvollkommenen Brunnen oder von eingebrachten Bauelementen (Spundwände, Tunnel etc.) ist eine weitere vertikale Unterteilung einzelner Modellschichten notwendig.

Da die durch die vertikale Verfeinerung hinzugekommenen Schichten des Teilmodells im Gesamtmodell keine Entsprechung besitzen, ist beim Rückpflegen des Teilmodells in das Gesamtmodell eine solche Zuordnung zu erstellen. Hierbei sind folgende Fälle zu unterscheiden:

- Im Teilmodell hat keine vertikale Netzveränderung stattgefunden. In diesem Fall stimmen die Randknoten auf der Schnittfläche der beiden Netze überein und die Schichtzuordnung erfolgt bei der Rückkoppelung automatisch korrekt. Teilbild (a) der folgenden Abbildung stellt diese Situation dar.
- Im Teilmodell wurde die Tiefenlage von Schichtgrenzen z.B. aufgrund neuer Bohrdaten verändert. Es wurde aber keine vertikale Netzverfeinerung durchgeführt, d.h. die Zahl der Schichten sowie die Zuordnung zwischen Teil- und Gesamtmodell ist identisch. In diesem Fall führt die Rückkoppelung automatisch zu einem korrekten Ergebnis. Falls die Höhenlage von Schichtgrenzen auf dem Rand des Teilmodells ebenfalls verändert wurde, führt die Rückkoppelung dennoch zu einem korrekten Ergebnis. Da es eine eindeutige Schichtzuordnung gibt, wird die Tiefenlage der Schichtgrenzen auf der Grenzfläche zwischen den Modellen durch den importierten Modellteil definiert. Das bedeutet, falls man in SPRING zunächst das ausgeschnittene Gesamtnetz öffnet und dann das Teilnetz importiert, wird die Tiefenlage der Randknoten des Teilnetzes in das integrierte Gesamtnetz übernommen. Diese Situation ist im Teilbild (b) dargestellt.
- Eine oder mehrere Schichten im Teilnetz wurden vertikal verfeinert, sei es zur Abbildung eines differenzierteren geologischen Aufbaus oder zur hydraulisch richtigen Berücksichtigung von Maßnahmen (z.B. unvollkommene Brunnen, Vertikalfilterbrunnen, Spundwände, Tunnel etc.). Eine derartige Situation ist im Teilbild (c) schematisch dargestellt. In diesem Fall muss bei der Rückkoppelung der beiden Modellteile eine Schichtzuordnung durchgeführt werden. Im allgemeinen Fall wird die vertikale Verfeinerung bis zum Rand des Teilmodells durchgeführt, und die Tiefenlage der in beiden Modellen vorhandenen Schichtgrenzen hat sich auf dem Rand des Teilmodells verändert. In diesem Fall ist eine automatische Zuordnung der Modellschichten nicht eindeutig möglich.

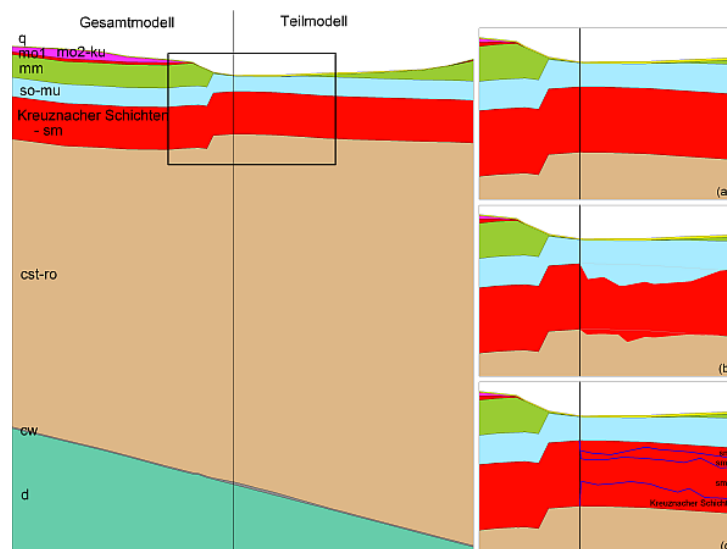


Abb. 77: Zuordnung von Schichten zwischen Teilmodell und Gesamtmodell an der Schnittfläche

Im dritten Fall verändert sich die Anzahl der Schichten im Teilmodell. Die hinzugekommenen Schichtflächen des Teilmodells müssen nach dem Import formal im Gesamtmodell vorhanden sein, d.h. außerhalb des Teilgebiets fallen sie mit bis dahin bereits vorhandenen Schichtflächen geometrisch zusammen. Dies wird beim Import durch die Zuordnung auf den Randknoten des Teilnetzes gesteuert.

Auch wenn diese wegfallenden Schichten bei den Simulationsrechnungen tatsächlich nicht berücksichtigt werden, müssen sie bei der Netzbearbeitung und für die Knoten- und Elementnummerierung stets mitgeführt werden.

Wird also ein weiteres Teilmodell in ein Gesamtmodell importiert, in dem aufgrund eines früheren Imports eine vertikal verfeinerte Schicht bereits existiert, sollten möglichst viele der bereits vorhandenen zusammenfallenden Schichtflächen genutzt werden.

Fazit: Generell sollte die Verfeinerung der Schichten des Teilmodells nicht bis zum Modellrand durchgeführt werden. Dadurch lässt sich die Tiefenlage der hinzugekommenen Schichtgrenzen zum Modellrand hin sinnvoll auf die Schichtgrenzen des Gesamtmodells zurückführen.

1.2.4.4 Einbau des Teilmodells in das Gesamtmodell

In den bisherigen Arbeitsschritten wurde sichergestellt, dass die Randknoten des Teilmodells geometrisch mit den inneren Randknoten des Gesamtmodells übereinstimmen. Nun wird die Attributierung der Randknoten des Teilmodells im Hinblick auf die Wirkung im zusammengeführten Modell untersucht:

- Auf den Randknoten des Teilmodells ist der aus dem Gesamtmodell ermittelte Fluss über den Modellrand vorgegeben. Diese Randbedingungen sind aus dem Teilmodell zu entfernen, da ansonsten nicht vorhandene Zu- oder Abflüsse simuliert werden.
- Formal ist auch für das Teilmodell zu prüfen, ob Liniendaten über den Rand hinauslaufen.
- Ferner ist zu prüfen, ob gleiche Attribute auf sich entsprechenden Knoten im Teil- wie im Gesamtmodell definiert sind. Bei Datenarten, die nur einmal auf einem Knoten vorhanden sein können, ist dieser Schritt von untergeordneter Bedeutung, da in diesem Fall der Wert des importierten Netzes den bereits vorhandenen Wert des Ausgangsnetzes überschreibt.
- Bei Attributen, die mehrfach auf einem Knoten erlaubt sind (z.B. linienbezogene Leakage-Koeffizienten), ist das entsprechende Attribut in einem der beiden Netze zu entfernen. Sonst hat z.B. ein Vorfluter, der auf dem Rand verläuft, nach der Integration des Teilmodells eine doppelte Leakage-Wirkung. Dies muss im Sinne der Datenkonsistenz in jedem Fall vermieden werden.
- Es ist vorteilhaft, sich einen Überblick über die vorhandenen Attribute auf den zusammenfallenden Rändern zu schaffen, um vorliegende Widersprüche zu erkennen und die Ursache klären zu können, bevor bestimmte Daten auf dem Gesamtnetz endgültig verloren gehen.

Sind die Knoten der zusammenfallenden Ränder in den beiden Modellen sowohl in Bezug auf die geometrische Lage als auch auf die Attributierung bereinigt, werden die Modelle mit SPRING zusammengeführt. Folgende Strategie ist dabei vorteilhaft:

Zunächst wird das Netz des Gesamtmodells geöffnet, aus dem der Bereich des Teilmodells entfernt ist. In dieses wird dann das Netz des Teilmodells importiert (*Datei → Importieren → Teilnetz...*). Falls bei diesem Import ein Attribut auf einem Randknoten bereits definiert ist, überschreibt der Wert aus dem Teilmodell den vorhandenen Wert aus dem Gesamtmodell. Da das Teilmodell in der Regel auf dem neueren Stand ist, ist diese Zuordnung wünschenswert.

Falls Knoten- und Elementnummern in einem der Modellteile unverändert erhalten bleiben sollen, ist dieser Modellteil in jedem Fall zuerst einzulesen und dann der andere Teil zu importieren, da die Knotennummerierung des importierten Teils geändert wird.

Wird zuerst das Teilmodell geöffnet und das Gesamtmodell importiert, ist der 3D-Rand neu zu berechnen (*Netz → 3D → 3D-Rand → Netzrand=3D-Rand*).

Nach Speichern des integrierten Modells existiert ein neues Modellnetz ohne innere Ränder.

1.2.4.5 Durchführung von Konsistenz- und Plausibilitätsprüfungen

1.2.4.5.1 Geometrie- und Datenkontrollen

Nach dem Import des Teilmodells ist es sinnvoll, das integrierte Netz einer Geometrie-Kontrolle zu unterziehen (*Netz → Kontrollen...*). Treten Netzfehler auf, ist dies in der Regel darauf zurückzuführen, dass einer der oben beschriebenen Schritte nicht korrekt durchgeführt wurde.

Die häufigste Fehlerquelle resultiert daraus, dass zwei Knoten auf dem inneren Rand nicht exakt zusammenfallen und damit nicht als ein Knoten im integrierten Netz erkannt werden. Besonders bei großen Netzen kann es auch vorkommen, dass ein Randknoten des verfeinerten Netzes bei der manuellen Korrektur nicht entfernt wurde. Dieser liegt dann auf dem Modellrand des einen Netzes, hat aber keine Entsprechung in dem anderen. Diese Stellen werden durch die Geometriekontrollen erkannt und können dann korrigiert werden.

Es hat sich bewährt, die aufgetretenen Fehler in den jeweiligen Netzen zu korrigieren und den Import anschließend erneut durchzuführen. Dadurch ergeben sich zwei intakte Ausgangsnetze. Vorteil dieser Methode ist, dass das detaillierte Teilnetz auch für spätere Betrachtungen weiter genutzt werden kann und ein erneuter Import in das Gesamtnetz mit vermindertem Aufwand möglich ist. Für eine erneute Simulation mit dem Teilmodell ist zu beachten, dass die bereits gelöschte Mengenrandbedingung neu zu ermitteln und zuzuweisen ist.

Die vorläufige Modellprüfung (*Berechnung* → *Modellprüfung*) gibt ggf. Hinweise auf Inkonsistenzen in den Modelldaten, die bei der reinen Geometriekontrolle nicht erkennbar sind. Werden hier keine relevanten Datenfehler erkannt, kann die eigentliche Modellrechnung durchgeführt werden.

1.2.4.5.2 Vergleich der Berechnungsergebnisse

Im nächsten Schritt wird mit dem geometrisch korrekten Gesamtnetz eine Modellrechnung durchgeführt. Um vergleichbare Ergebnisse zu erhalten, ist darauf zu achten, dass bei der Berechnung des Teilmodells und des Gesamtmodells die gleiche Programm-/Parameterkombination verwendet wird.

Die Plausibilitätsprüfung erfolgt über den Vergleich der Grundwassergleichen der berechneten freien Grundwasseroberfläche des integrierten Gesamtmodells mit denen, die mit dem alten Gesamtmodell sowie dem Teilmodell berechnet wurden.

Erwartungsgemäß werden Unterschiede in einer Zone um den Modellrand des Teilgebiets auftreten. Da die Nachkalibrierung eines Teilmodells in der Regel nicht auf das Modellinnere beschränkt bleibt, ergeben sich Veränderungen in der Strömungssituation, die auch einen Einfluss auf den Modellrand haben.

Der aus dem alten Gesamtmodell ermittelte und im Teilmodell als Randbedingung konstant gehaltene Randfluss führt unter den im Laufe der Teilmodell-Kalibrierung durchgeführten Anpassungen auch zu Veränderungen der Grundwasserstände im Randbereich. Bei der Berechnung mit dem integrierten Gesamtmodell entfällt nun der Zwang durch die vorgegebene Randbedingung und das Modell kann einen Ausgleich zwischen der Situation im Gesamttraum und der neuen Situation im verbesserten Teilmodellraum schaffen.

Eine bilanzierende Gegenüberstellung der als Randbedingung vorgegebenen Randflüsse des Teilmodells mit den Mengen, die im integrierten Gesamtmodell über diese Fläche fließen, kann ebenfalls durchgeführt werden.

1.2.4.6 Hinweise und Empfehlungen

In einem großräumigen Prinzipmodell lassen sich Detailfragen nicht immer effizient und wirtschaftlich bearbeiten. Durch die Größe des Modells entstehen hohe Rechenzeiten und die Diskretisierung ist häufig nicht fein genug.

Ein Lösungsweg besteht darin, den interessierenden Bereich als Teilgebiet abzutrennen und erst dann verfeinert zu betrachten. Die Kopplung des Teilmodells an das Gesamtmodell geschieht durch die Vorgabe von Randbedingungen, in der Regel durch Massenflüsse. Die Vorteile dieser Vorgehensweise lassen sich in folgenden Punkten zusammenfassen:

- Große Flexibilität der Teilgebietsabgrenzung
- Netzänderungen und das Variieren von Parametern können effizient gehandhabt werden.

Um den Einfluss der Modellanpassungen im Inneren des Teilgebiets auf die Randbedingungen gering zu halten, sollten die Grenzen des Teilgebiets weitab vom Untersuchungsbereich definiert werden. Bei der Festlegung des Randes ist außerdem auf folgende Kriterien zu achten:

- Ränder so weit wie möglich entlang von Stromlinien definieren,
- ausreichende Entfernung von Grundwasserentnahmen,
- keine offenen Wasserflächen auf dem Rand,
- der Modellrand des Teilmodells muss stets auf Elementkanten des Gesamtmodells liegen, es dürfen keine Viereckselemente zerschnitten werden,
- das Teilmodellgebiet muss groß genug sein, damit Veränderungen, die im Übergangsbereich zwischen Teil- und Gesamtmodell bei der Rückpflege i.d.R. nicht vollständig vermeidbar sind, keinen Einfluss auf die Ergebnisse des zentralen Aussagebereichs des Teilmodells haben.
- Um eine reibungslose Rückpflege eines bearbeiteten Teilmodells in das Gesamtmodell zu ermöglichen, muss der Modellrand des Teilmodells nach dem Ausschneiden geometrisch unverändert bleiben. Er darf weder horizontal noch vertikal verfeinert werden. Wird diese Bedingung nicht beachtet, entsteht bei der Rückpflege nicht nur ein zusätzlicher Arbeitsaufwand durch die Notwendigkeit einer Randknotenbereinigung, sondern auch ein interpretativer Aufwand im Fall einer vertikalen Verfeinerung. In diesem Fall ist nämlich zu entscheiden, wie die verfeinerten Schichten mit den Schichten des Gesamtmodells zu

korrelieren sind. Vertikale Netzverfeinerungen, die sich auf lokale Erfordernisse beziehen (z.B. Einbau von Spundwänden, Tunnelbauwerke, Brunnen oder lokal verbreitete hydrogeologische Inhomogenitäten) sollten generell nur im Umfeld des betroffenen Teilbereichs durchgeführt werden.

- Das Teilmodell sollte stets mit dem gleichen Programmmodul berechnet werden, wie das Gesamtmodell. Außerdem sollten Berechnungsparameter, wie die Zahl der Iterationsschritte oder der Dämpfungsfaktor beibehalten werden.

1.2.5 Erzeugen von Klüften in einem 3D-Netz

Mit dem Menüpunkt *Extras* → *Klüfte* → *2D-Klüfte aus LERAs* lassen sich senkrechte und waagerechte Klüfte in ein 3D-Modell einfügen. Zugrunde liegt das Python-Script "lera2kluft.py", welches nach Anklicken dieses Menüpunktes automatisch ausgeführt wird. Wenn die Datenart LERA (Leakage für einen Polygonzug) vorhanden ist, werden die 2D-Klüfte mit ihren Öffnungsweiten in die *.3d-Datei des Modells geschrieben. Die Öffnungsweiten entsprechen den Werten des jeweiligen LERA-Bereiches und müssen anschließend noch vom Anwender mit den passenden Werten belegt werden.

1.2.5.1 Attribut LERA zuweisen

Jeder zukünftigen Kluftlinie wird das Attribut LERA zugewiesen. Am einfachsten lassen sich die Klüfte anschließend wieder finden, wenn man sie durchnummeriert und der Wert des entsprechenden LERA-Attributs diese Nummer wiedergibt. Sinnvollerweise sollten vorher alle LERA-Attribute, die nicht zur Kluftgenerierung dienen, entfernt bzw. als andere Datenart gespeichert werden.

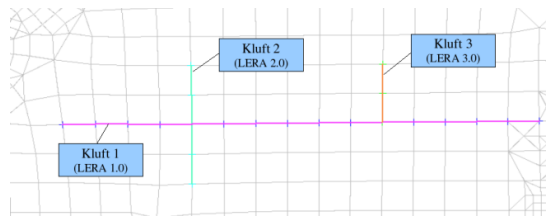


Abb. 78: Abbilden des Kluftsystems als LERA-Attribute

1.2.5.2 Ausgabe der Klüfte in *.3d-Datei bearbeiten

Nach Ausführen des Menüpunktes befinden sich die so generierten 2D-Klüfte (Attribut 2DEL) in der *.3d-Datei des Modells.

Die Kluftöffnungsweiten sind noch anzupassen (Datenart 2DBR), indem das Attribut 2DBR mit den tatsächlichen Kluftöffnungsweiten belegt wird.

Da die LERA-Attribute nur als Hilfsattribute gebraucht wurden, sollten sie nach erneutem Start von SPRING wieder gelöscht und gegebenenfalls vorher vorhandene LERA-Attribute wieder zugewiesen werden.

1.3 Aufbau eines instationären Transportmodells

Die benötigten Dateien „s4_2D_schulung3D.zip“ stehen auf unserer Internetpräsenz: „<https://spring.delta-h.de/de/downloadandsupport-tools.html>“ zum Download bereit unter: „Download – TOOLS – SPRING Helferlein und Beispieldateien“

In diesem Kapitel werden die modelltechnischen Schritte vorgestellt, die zur Erstellung eines instationären Transportmodells erforderlich sind. Ein Grundwassermodell wird zu einem Stofftransportmodell, sobald Stoffkonzentrationen als Attribute vorliegen (Attribute 1KON, AKON oder KONZ).

In diesem Kapitel werden die modelltechnischen Schritte vorgestellt, die zur Erstellung eines instationären Transportmodells erforderlich sind. Ein Grundwassermodell wird zu einem Stofftransportmodell, sobald Stoffkonzentrationen als Attribute vorliegen (Attribute 1KON, AKON oder KONZ).

1.3.1 Modellbeschreibung

Bei dem Modell handelt es sich um einen homogenen, isotropen und gespannten Grundwasserleiter. Gesucht ist die Ausbreitung des Schadstoffs über die Zeit. Die Länge des Modells beträgt $L = 300$ m, und es hat eine Breite von $B = 100$ m. Das Beispielmmodell soll des Weiteren folgende Eigenschaften aufweisen:

Durchlässigkeitsbeiwert	$k_f = 5 \cdot 10^{-4} \text{ m/s}$	KWER
Mächtigkeit	$m = 18 \text{ m}$	MAEC
Porosität	$n_e = 0.2$	PORO
Dispersivitäten	$\alpha_L = 7 \text{ m}$ $\alpha_T = 0.7 \text{ m}$	DISP (sitr-Parameter)
Anfangspotentiale	$H_l = 36.0 \text{ m}$ $H_r = 30.0 \text{ m}$	POTE
Schadstoffkonzentration	$c_0 = 240 \text{ mg/m}^3$	1KON
Verzögerungsfaktor	$R = 1$	-
Abbaukonstante	$\lambda = 0$	-

Der Schadstoffeintrag erfolgt permanent und konstant. Der Ort des Eintrags liegt am Modellrand (Knotennr. 156), deswegen wurde dort eine besonders feine Diskretisierung gewählt.

Das folgende Bild zeigt das Modellnetz mit der Schadstoffquelle:

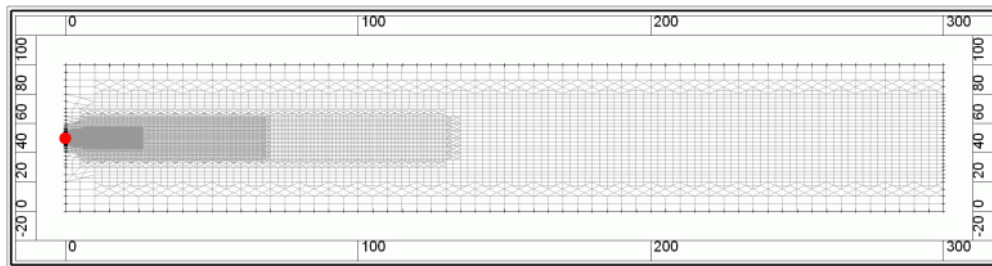


Abb. 79: FE-Modell mit Schadstoffquelle

1.3.2 Notwendige Angaben für den Stofftransport

Rand- und Anfangsbedingungen

- Feste Konzentrationen: Attribut 1KON, Randbedingung 1. Art, gibt eine feste Konzentration vor. Im Beispiel ist die Wahl dieser Randbedingung erforderlich, um die permanente konstante Schadstoffquelle darzustellen.
- Zufluss-Konzentrationen: Attribut KONZ [kg/kg]: Mit der Datenart KONZ können eingegebenen Zuflüssen (aus KNOT, FLAE, RAND, RANQ, RANX) und berechneten Zuflussmengen (Leakagemengen, Reaktionsmengen aus festen Potentialen) Konzentrationen (knotenweise) zugeordnet werden. Beispiel: In der Oberfläche einer Deponie befindet sich eine bekannte Menge an Schadstoff (KONZ), der aber erst durch eine bestimmte Menge Niederschlag (FLAE) gelöst wird.
- Anfangskonzentration: Attribut AKON [kg/kg]: Hiermit wird ein Anfangszustand (knotenweise) für eine instationäre Berechnung festgelegt. AKON funktioniert analog zu den Anfangs-Potentialen (EICH) der Strömungsberechnung.

Materialkennwerte

- Porosität: Wenn die Porosität PORO in der Netzdatei nicht explizit angegeben wird, wird mit dem voreingestellten Wert $\text{PORO} = 0.2$ gerechnet.
- Dispersivität: Die longitudinale Dispersivität α_L kann zusammen mit der transversalen Dispersivität α_T im Menü der *Stofftransportberechnung* unter "Erweitert" → "Transport" explizit eingegeben werden.

Das folgende Eingabefenster zeigt die möglichen Eingaben in den erweiterten Einstellungen des Stofftransports:

Ausgabe Strömung **Transport** Adsorption Produktion/Abbau RUBINFLEX

Gleichungslöser

Lösungsverfahren ☐ Iterativ ☒ Direkt

☐ Gleiche Konzentrationen bei GLEI

Randbedingungen Zwischenzeitpunkte

☐ Interpolation von KONZ ☐ Interpolation von 1KON

Anfangsbedingungen

☒ Keine Startkonzentrationen (0) ☐ Initialisierung mit Startkonzentrationen (AKON)

Diffusionskonstante

Molekularer Diffusionskoeffizient d_m 0.00 [m² / s]

Skalierungsfaktoren für Dispersivität

transversal, vertikal (α_{TV}) 0.01

Transversal, horizontal α_{TH} 0.10

Abb. 80: Stofftransport-Parameter

Die Attribute 1KON (oder KONZ), DISP und PORO sind **notwendig** für eine Transportberechnung.

1.3.3 Instationäre Eingaben für den Stofftransport

Nach der *Modellprüfung* erfolgt die Berechnung des *Stofftransports*. Es erscheint folgendes Eingabefenster:

Stofftransportberechnung (sitra.bsi) X

Erweitert >>

Berechnungsparameter

☒ Teilgesättigte Berechnung

Dämpfungsfaktor 0.5

Anzahl Iterationen 5

Zustand von Strömung und Transport

Strömung ☐ Stationär ☒ Instationär

Transport ☐ Stationär ☒ Instationär

Instationäre Eingabedatei

☐ Ohne ☒ Datei Datei auswählen

Zeitschritte

Anzahl Zeitschritte 1

Zeitschrittverfeinerung (Transport) 2000

☐ Zeitschritte aus der instationären Eingabedatei

Verkleinerungsfaktor 1

☒ Feste Zeitschrittweite in [Tagen] Zeitschrittweite 200

OK Abbrechen Hilfe

Abb. 81: Instationäre Parameter (3D)

Erläuterungen zu den eingegebenen Zeitschrittweiten:

Rote Markierung: Die Anzahl Zeitschritte, hier 1, bestimmt die Gesamtdauer der Transportberechnung. Gesamtdauer = Anzahl Zeitschritte * Zeitschrittweite (hier: 200 Tage).

Blaue Markierung: Zeitschrittverfeinerung, gibt die Unterteilung der Zeitschrittweite in Zeitschritte der Transportberechnung an (hier: 200 Tage/ 2000 = 1/10 Tag).

Gelbe Markierung: Die Zeitschrittweite gibt die Dauer eines Zeitschrittes der zugrunde liegenden Strömungsberechnung an.

Die mengenbezogenen Ergebnisse werden zu den gleichen Zeitschritten, an denen auch die Potentiale in den Hintergrunddateien gesichert werden, gespeichert ("Erweitert" → Ausgabe):

Ausgabe Strömung Transport Adsorption Produktion/Abbau RUBINFLUX

Ausgabe

Datei out.s

☒ Detailliertes Protokoll
☐ Ausgabe der Courantzahl
☒ Abspeichern für Fortsetzen (out66)
☒ Geschwindigkeitsfeld für STRING speichern
☐ Erweitertes Geschwindigkeitsfeld für das Postprocessing von Bahnlinien speichern
☐ Konditionszahl berechnen

Kontrolllinien

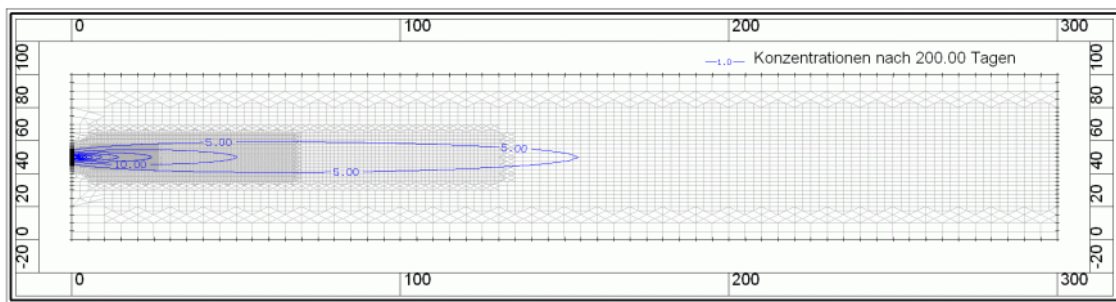
☐ Kontrolllinienberechnung
 Auswertung ☐ links ☒ Mitte ☐ Rechts

Abspeichern von Zwischenergebnissen

☒ Für jeden 1 .ten Zeitschritt
☐ Für bestimmte Zeitschritte
☐ Ganglinien für bestimmte Knoten

Abb. 82: Ausgabe-Parameter

Nach Durchführung der *Modellprüfung*, *Strömungsberechnung* und *Ploterstellung* erhält man folgende Konzentrationsverteilung nach 200 Tagen:

Abb. 83: Konzentrationsverteilung nach 200 Tagen, Isolines im Intervall 5 bis 50 mg/m^3 mit einem Abstand von 5 mg/m^3

1.4 Aufbau eines 3D-Vertikalmodells

Bei einem Vertikalmodell liegen die geometrisch zu erfassenden Elemente im Unterschied zu einem Horizontalmodell in der Vertikalen. Der Aufbau eines Vertikalmodells erfolgt jedoch nach den gleichen Regeln wie der eines Horizontalmodells. Typische Beispiele für die Anwendung eines Vertikalmodells sind Staudämme, Staumauern von Talsperren oder eine strömungsrelevante Betrachtung von Tunnel- oder Leitungsquerschnitten in der Vertikalen.

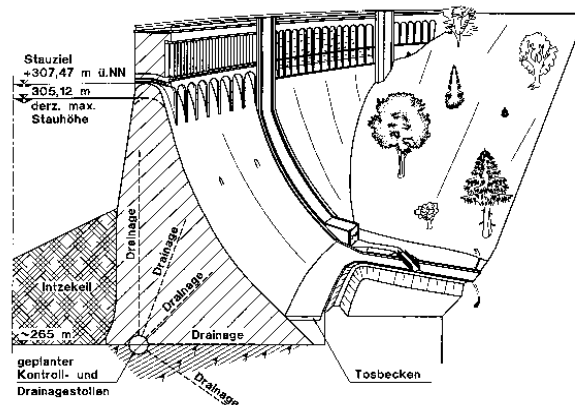


Abb. 84: Querschnitt einer Staumauer

Die Diskretisierung dieser Staumauer als zweidimensionales Vertikalmodell in SPRING sieht folgendermaßen aus:

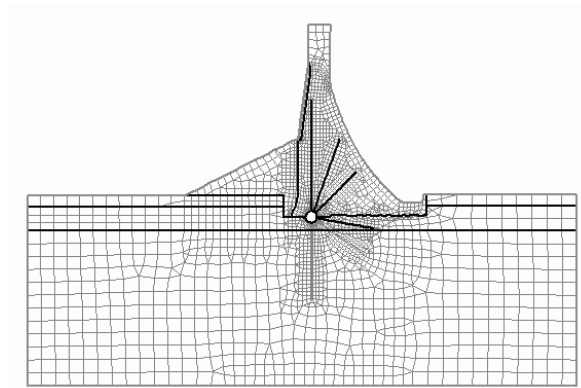


Abb. 85: Diskretisierung eines Vertikalmodells in SPRING

Zur Erzeugung des 3D-Netzes wird das 2D-Netz in die dritte Dimension ("nach hinten") projiziert:

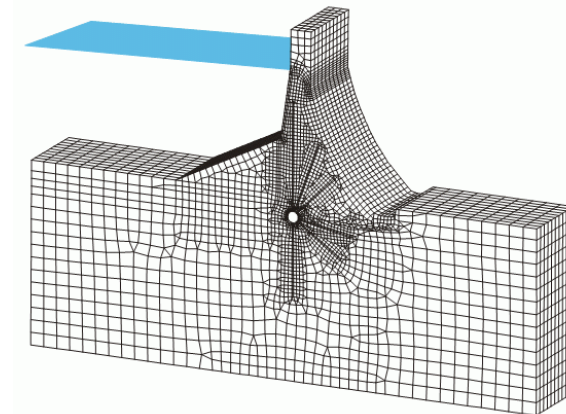


Abb. 86: Diskretisierung eines vertikalen 3D-Modell (Modelltyp V-3D)

Die zugehörigen Randbedingungen sehen im vorliegenden Fall so aus:

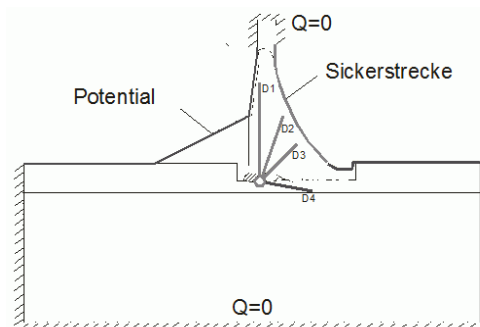


Abb. 87: Randbedingungen einer Staumauer

1.4.1 Besonderheiten im 2D-Vertikalmodell

Im Vertikalmodell bezeichnet die X-Koordinate die Position auf der Schnittlinie. Die Y-Koordinate beschreibt die Lagehöhe. Die Angabe einer flächenhaften Neubildung (Attribut FLAE) macht bei diesem Modelltyp keinen Sinn, stattdessen werden die Attribute RAND oder RANX verwendet. Die Mächtigkeit (MAEC) beschreibt die Tiefenlage senkrecht zum Vertikalnetz.

Die beiden folgenden Abbildungen zeigen, wie die Koordinatensysteme in der Realität (links) und in SPRING im Vertikalmodell (rechts) definiert sind:

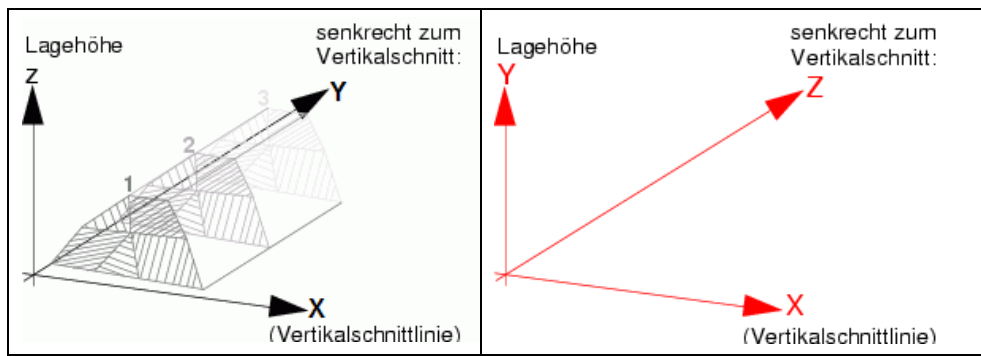


Abb. 88: Koordinatensystem in der Realität (links) und im Vertikalmodell in SPRING (rechts)

1.4.1.1 Erstellen eines 2D-Vertikalmodells aus einem bestehenden 3D-Modell

IN SPRING besteht die Möglichkeit, ein 2D-Vertikalmodell aus einem vorhandenen 3D-Horizontalnetz zu "extrahieren". Dazu werden die Hintergrunddateien des 3D-Modells sowie eine bereits erstellte *name.bpl*-Datei eines Vertikalschnitts passend zum Modell benötigt. Daraus werden die Informationen über die Knotenkoordinaten entnommen. In einer DOS-Shell kann mit dem Befehl:

```
plogeo -mesh name.bpl
```

das 2D-Vertikalnetz erstellt werden. Durch Zuweisen des Attributes MAEC und der eventuell erforderlichen neuen Zuweisung der strömungsrelevanten Attribute entsteht dann ein vollständiges 2D-Vertikalmodell.

1.4.2 Erweiterung ins Dreidimensionale

Senkrecht zur Schnittfläche wird das 2D-Vertikalmodell in die dritte Dimension erweitert. Dann wird die Mächtigkeit in 3D-Schichten unterteilt (*Netz → 3D → Schicht teilen...*), so dass die Z-Koordinate (Attribut ZKOR) die Tiefenlage darstellt. Im Gegensatz zu 3D-Horizontalmodellen liegen die Z-Koordinaten der Knotenschichten im 3D-Vertikalmodell nicht übereinander, sondern nebeneinander.

Daraus ergibt sich, dass die Z-Koordinaten im 3D-Vertikalmodell von oben nach unten größer werden, während sie in einem 3D-Horizontalmodell mit zunehmender Schichtnummer kleiner werden.

Beispiel 3D-Vertikalmodell: GELA (= 0.0), ZKOR2 = 1.0, ZKOR3 = 2.0, ZKOR4 = 4.0, usw. Eine Nicht-Beachtung dieser Anordnung führt zu einem Fehler in der Berechnung!

Die beiden folgenden Abbildungen zeigen die unterschiedliche Schichtanordnung sowie das zugehörige Koordinatensystem:

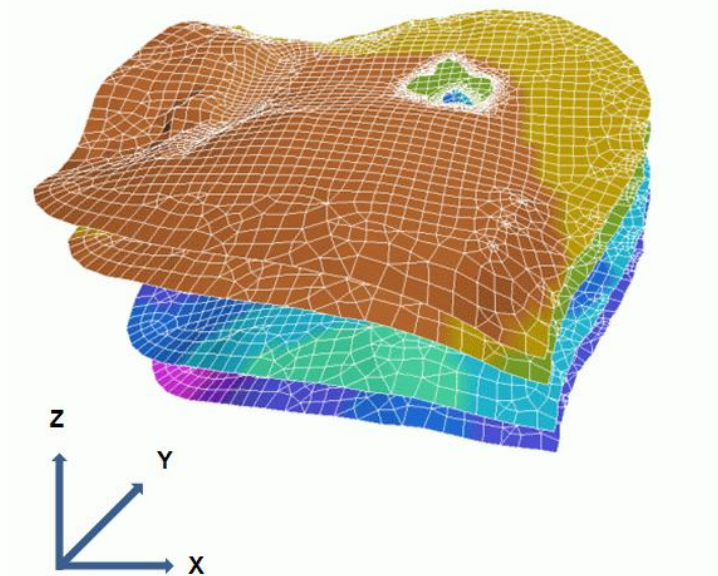


Abb. 89: Schichtung und Koordinatenachsen im 3D-Horizontalmodell

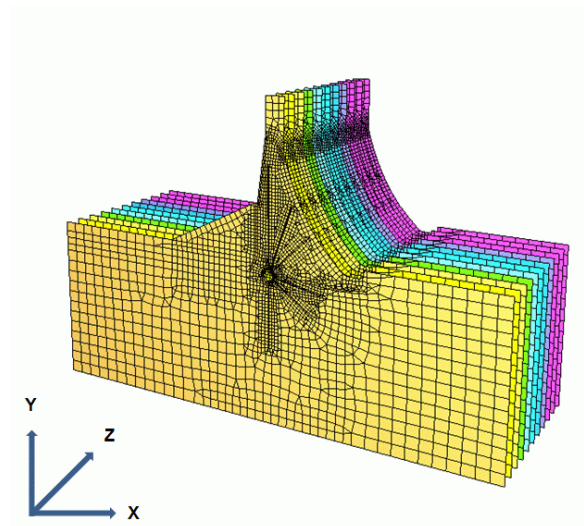


Abb. 90: Schichtung und Koordinatenachsen im 3D-Vertikalmodell

Die erste Knotenschicht der Z-Koordinaten (= GELA) liegt auf der Vertikalschnittlinie und hat den Wert GELA = 0.0. Nach Abspeichern des fertigen 3D-Vertikalmodells ist mit einem beliebigen Editor in der Modelldatei die Kennung des Modelltyps auf "V-3D" zu setzen. Dies ist erforderlich, da nur der Anwender (und nicht die Software) entscheiden kann, ob es sich um ein 3D-Horizontalmodell oder um ein 3D-Vertikalmodell handelt. Da ein 3D-Vertikalmodell eine sehr spezielle Anwendung ist, erfolgt beim Speichern eines 3D-Modells keine Abfrage, um welchen Modelltyp es sich handelt. Diese manuelle Änderung des Modelltyps ist nur einmal nötig.

1.4.3 Darstellung von Schnitten in einem 3D-Vertikalmodell

Die übliche Darstellung von Daten und FE-Netz erfolgt bei 3D-Modellen in einer horizontalen Draufsicht/Kartenerstellung oder durch eine vertikale Ansicht/Profildarstellung (→ Ploterstellung). Diese gestalten sich bei 3D-Vertikalmodellen in SPRING wie folgt:

1.4.3.1 Draufsicht/Kartenerstellung im 3D-Vertikalmodell

Will man in einem 3D-Vertikalmodell die Daten einer tieferliegenden Schicht darstellen, entspricht dies der Draufsicht ("Horizontalschnitt") in einem 3D-Horizontalmodell. Das FE-Netz ist in solchen Schnitten identisch!

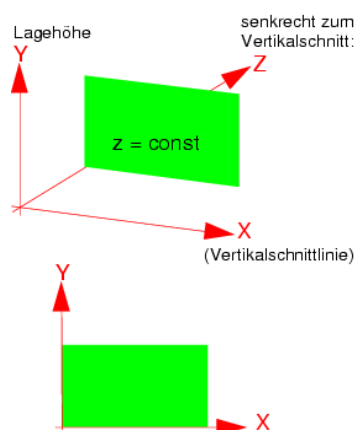


Abb. 91: Schnitt parallel zur X-Achse

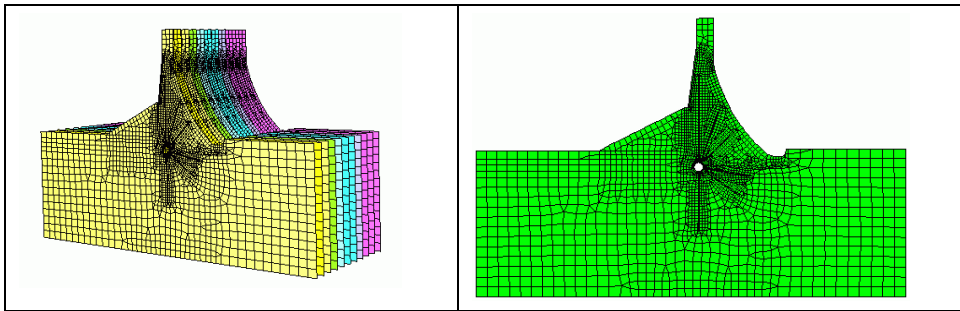


Abb. 92: Schnitt parallel zur X-Achse in SPRING

Die Angabe der Schichtnummer "4" in der *Ploterstellung* → *Draufsicht/Kartenerstellung* (grüne Schicht in der linken Abbildung) ergibt die Draufsicht auf die Daten der 4. Schicht in der Koordinatenebene X-Y (Abbildung rechts).

1.4.3.2 Ansicht/Profildarstellung im 3D-Vertikalmodell

Will man in einem 3D-Vertikalmodell einen Schnitt in der X-Z- bzw. Y-Z-Ebene erstellen, entspricht dies der Ansicht ("Vertikalschnitt") in einem 3D-Horizontalmodell. Welche Koordinatenebene dargestellt wird, ergibt sich allein durch die Lage der vom Anwender zu definierenden Schnittlinie.

Ein Schnitt in der X-Z-Ebene sieht theoretisch folgendermaßen aus:

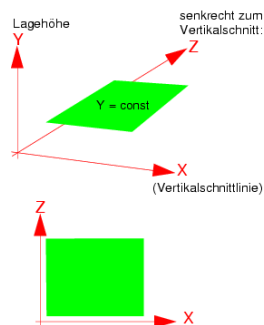


Abb. 93: Darstellung in der X-Z-Ebene

Die Umsetzung in SPRING erfolgt in der *Ploterstellung* → *Ansicht/Profildarstellung* durch Auswahl einer Schnittlinie, die etwa parallel zur X-Achse verläuft (grüne Linie in der oberen Abbildung). Das Ergebnis (untere Abbildung) ist eine Darstellung der Daten (hier: Z-Koordinaten von 0 bis 2m) in der X-Z-Ebene ("Blick von oben auf die Stau-mauer").

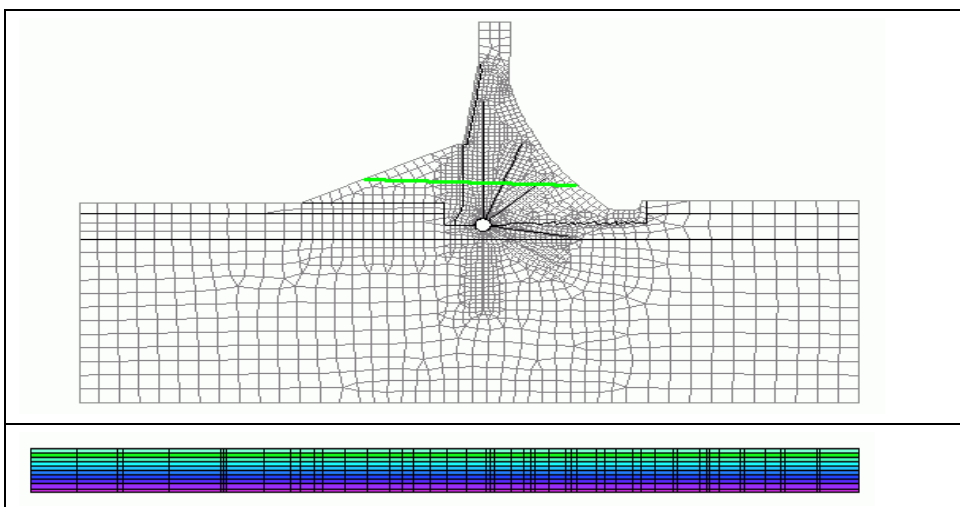


Abb. 94: Darstellung in der X-Z-Ebene in SPRING

Ein Schnitt in der Y-Z-Ebene sieht theoretisch folgendermaßen aus:

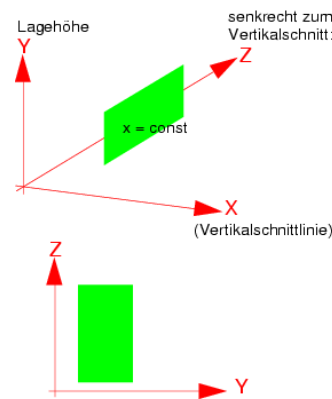


Abb. 95: Darstellung in der Y-Z-Ebene

Die Umsetzung in SPRING erfolgt in der *Ploterstellung* → *Ansicht/Profildarstellung* durch Auswahl einer Schnittlinie, die etwa senkrecht zur X-Achse verläuft (grüne Linie in der linken Abbildung). Das Ergebnis (rechte Abbildung) ist eine Darstellung der Daten (hier: K-Werte) in der Y-Z-Ebene ("Blick von rechts auf die Staumauer"). Zur besseren Vorstellung wurde der resultierende Plot um 90° nach links gedreht.

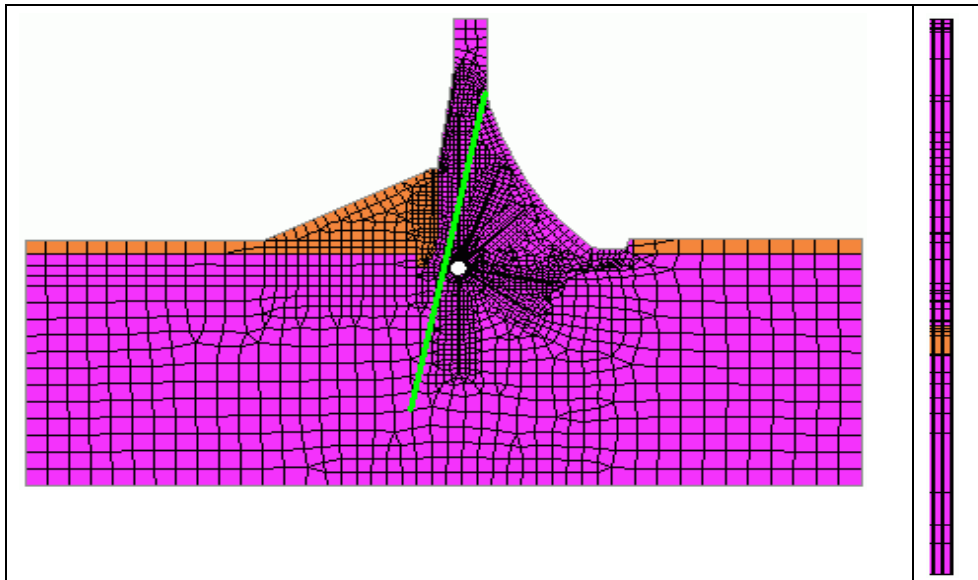


Abb. 96: Darstellung in der Y-Z-Ebene in SPRING

1.4.4 Besonderheiten in der Ploterstellung

Bei der Darstellung von Modell- und Ergebnisdaten eines 3D-Vertikalmodells ist die unterschiedliche Zuordnung der Koordinatenachsen zu beachten. Zudem werden nicht alle Schnitte so dargestellt, wie intuitiv vielleicht erwartet wird.

Da die sonst übliche Darstellung der freien Oberfläche im Ploterstellungsmenü bei einem 3D-Vertikalmodell nicht sinnvoll ist, erfordert die Darstellung der freien Oberfläche in einem 3D-Vertikalmodell einen Umweg über folgendes Verfahren:

- Die Y-Koordinaten (= Lagehöhe) werden auf das Attribut KKKK gespeichert (*Attribute* → *kopieren* → *Attributweise...*).
- Dann wird das Attribut KKKK von den berechneten Potentialen (*Attribute* → *Modelldaten/Berechnungsergebnisse importieren...*) subtrahiert und auf einem beliebigen Knotenattribut abgespeichert (*Attribute* → *Berechnen* → *Attribute verrechnen...*). Die freie Oberfläche ergibt sich als Isoliniendarstellung dieses Attributs mit Wert = 0.0.
- Ein Ausblenden von Ergebnissen oberhalb der freien Oberfläche ist nicht möglich.

2 How To

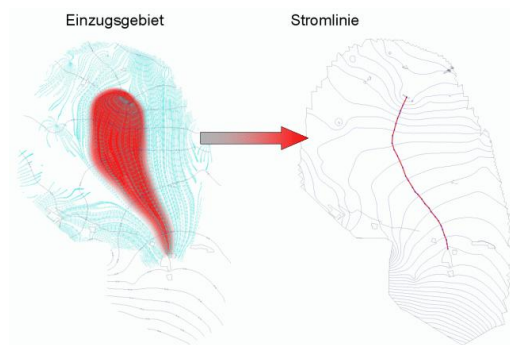
In diesem Kapitel werden spezielle Vorgehensweisen beschrieben, die bei der Erstellung von Grundwassermodellen immer wieder vorkommen.

2.1 Ermittlung von Einzugsgebieten

Ein Einzugsgebiet ist das gesamte Gebiet, aus dem die ober- und unterirdischen Zuflüsse einem bestimmten Punkt zufließen. Dieser Punkt kann ein Entnahmebrunnen oder auch die Mündung eines Vorfluters in ein Hauptgewässer sein. Der Rand eines Einzugsgebietes ist die Wasserscheide.

Das Gebiet wird vor allem durch die topographischen und geologischen Verhältnisse bestimmt.

Im Grundwassermodell lässt sich ein Einzugsgebiet z.B. über Bahnlinien, Stromlinien oder Schlieren bestimmen, bei einem Stofftransportmodell auch durch die invertierte Strömung. Die Vorgehensweisen werden im Folgenden erläutert.



2.1.1 Theoretische Grundlagen der Bahnlinienberechnung

Eine Bahnlinie ist diejenige Linie, die den Weg eines Wasserteilchens über eine Fließzeit t beschreibt. Die Berechnung von Bahnlinien erfolgt durch die Verfolgung des Weges eines imaginären Wasserteilchens durch das Strömungsfeld. Die Ableitung der Potentiale ergibt die Filtergeschwindigkeiten, die mittels folgender Gleichung in Abstandsgeschwindigkeiten umgerechnet werden:

$$v_a = \frac{v_f}{n_d}$$

mit

v_a = Abstandsgeschwindigkeit

v_f = Filtergeschwindigkeit

n_d = durchflusswirksames Porenvolumen

Dabei spielen zwei Dinge eine wichtige Rolle für die Genauigkeit der Linien:

- Da je Element eine konstante Geschwindigkeit berechnet wird (bei einem linearen Ansatz für die Potentiale), muss die Diskretisierung des Modellgebiets in Bereichen mit wechselnden Gradienten entsprechend fein sein.
- Für die Interpolation zwischen den Elementmittelpunkten geltenden Geschwindigkeiten muss ein gleichmäßiger Übergang gewährleistet sein.

In der praktischen Berechnung wird die Bahnlinie eine bestimmte Wegstrecke (s) weit mit der Anfangsgeschwindigkeit verfolgt, dann eine neue Geschwindigkeit interpoliert und weiterverfolgt. Die Wegabschnitte s müssen je nach Inhomogenität des Strömungsfeldes durch den Benutzer gewählt werden.

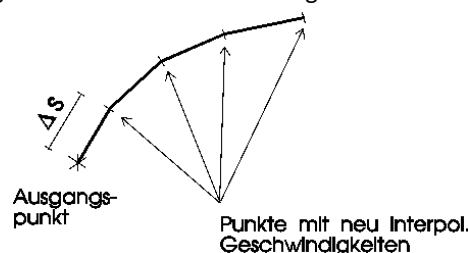


Abb. 97: Berechnung einer Bahnlinie

Eine Problemstelle bei der Berechnung von Bahnlinien sind die Entnahmebrunnen. Wird diese Tatsache nicht als Nebenbedingung mit berücksichtigt, ergeben sich durch die wechselnden Strömungsrichtungen überschießende Zickzacklinien:

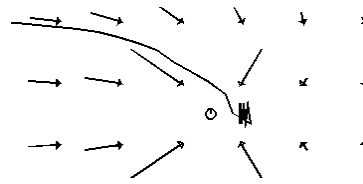


Abb. 98: Bahnlinienberechnung an einem Brunnen ohne Nebenbedingung

Bessere Ergebnisse werden erzielt, wenn stattdessen überprüft wird, ob der neu berechnete Bahnlinienpunkt nahe an einem Förderbrunnen liegt. Ist dies der Fall, kann die Bahnlinie „gefangen“ werden:

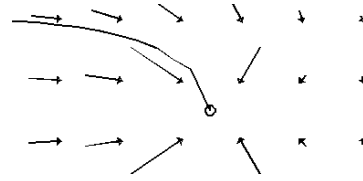


Abb. 99: Bahnlinienberechnung mit nach Entnahmemenge und Abstand eingestelltem "Fang"-Kriterium

Die Bahnlinienverfolgung endet, wenn eines der folgenden Kriterien erfüllt ist:

- ein vorgegebener Zeitpunkt oder eine Wegstrecke wird erreicht,
- es wird der Rand des Modellgebietes oder eine offene Wasserfläche erreicht,
- die Bahnlinie wird von einem Knoten mit Entnahmemenge "eingefangen",
- die Entfernung zwischen zwei aufeinander folgenden Bahnlinienpunkten unterschreitet eine vorgegebene Schranke.

Die Umsetzung bzw. die erforderlichen Eingaben in SPRING werden im Kapitel "Berechnen und Darstellen von Bahnlinien" auf S. 59 erläutert.

Die Startpunkte für Bahnlinien können um Knoten, in Elementmittelpunkten oder auf beliebigen Koordinaten x , y , (z) liegen. Die Richtung der Bahnlinienverfolgung kann in Fließrichtung oder entgegengesetzt gewählt werden. Die zweite Möglichkeit bietet sich zur Bestimmung einer Schutzzone um einen Brunnen an (z.B. 50-Tage-Grenze). Auf den Bahnlinien können im Eingabedialog der Ploterstellung Zeitmarkierungen gesetzt werden, anhand derer dann manuell Isochronen konstruiert werden können.

Die Berechnung von instationären Bahnlinien unterscheidet sich nur dadurch, dass sich das Geschwindigkeitsfeld zu jedem Zeitschritt ändert. Zusätzlich zu den Bahnlinienabschnitten s wird deshalb überprüft, ob die verfolgte Fließzeit t nicht größer ist als die Zeitschrittlänge T .

2.1.2 Berechnen und Darstellen von Bahnlinien

Zur Darstellung von Bahnlinien wird bei der stationären Strömungsberechnung mit dem Modul GEONEU bzw. IN-STAT (instationär) die Bahnlinienberechnung durch Aktivieren des entsprechenden Kontrollkästchens berücksichtigt. Dabei erscheint folgendes Fenster, in dem die Kriterien für die Bahnlinien festgelegt werden:

Abb. 100: Eingaben für Bahnlinien

Das Eingabefenster beim Modul INSTAT unterscheidet sich durch die fehlenden Eingabemöglichkeiten in den Blöcken „Beschränkungen“ und „Bahnlinienrichtung“.

Im Modul SITRA wird die Bahnlinienberechnung durch Aktivieren des Buttons *"Erweitertes Geschwindigkeitsfeld für das Postprocessing von Bahnlinien speichern"* gestartet. Das obige Eingabefenster erscheint dann über den Menüpunkt *Datei → Exportieren → Bahnlinien...*.

Bei der stationären Berechnung mit dem Modul SITRA kann, ebenso wie beim Modul GEONEU, die Bahnlinienberechnung im Strömungsdialog direkt aktiviert werden, so dass das obige Dialogfenster sofort erscheint.

Unterschied der beiden Methoden ist folgender:

- Bei direkter Aktivierung der Bahnlinienberechnung im Berechnungsmodul SITRA oder GEONEU werden die Ergebnisdaten für die Plotdarstellung gespeichert und können erst nach einer erneuten Strömungsberechnung verändert werden.
- Bei Berechnung der Bahnlinien über den Button *"Erweitertes Geschwindigkeitsfeld für das Postprocessing von Bahnlinien speichern"* besteht die Möglichkeit, die Ausgabe der Bahnlinien für den Plot zu verändern, ohne dass eine erneute Strömungsberechnung (die manchmal sehr lange dauern kann) erforderlich ist.

Fangradius

Bei der Bahnlinienverfolgung anhand der berechneten Geschwindigkeiten wird eine Linie nur in Ausnahmefällen direkt auf einen Entnahmestruen zulaufen. Um ein "Herumirren" um den Knoten zu vermeiden, wird bei Entnahmeknoten geprüft, ob eine Bahnlinie in den Bereich eines Struens kommt. Ist dies der Fall, wird die Linie auf den Knotenpunkt gezogen. Es werden nur Linien gefangen, die in einem Element landen, das den entsprechenden Struenknoten als Eckknoten hat.

Der Fangradius ist eigentlich kein Radius, sondern ein Skalierungsfaktor für die Schwerpunktkoordinaten des aktuellen Bahnlinienpunktes bzgl. des Struenknotens. Die "Fangbedingung" ist demnach abhängig von der jeweiligen Elementgröße und wird außerdem noch mit der relativen Entnahme- bzw. Zuflussmenge im Struen gewichtet. Wenn der voreingestellte Wert keine befriedigenden Resultate liefert, kann hier ein anderer Wert > 0 angegeben werden.

Beschränkungen

Es kann eine maximale Wegstrecke (m) und/oder eine maximale Fließzeit (in der jeweiligen Zeiteinheit der Netzdatei) als Abbruchkriterium für die Bahnlinienverfolgung angegeben werden.

Bahnlinienrichtung

Die Bahnlinienrichtung kann gegen die Fließrichtung oder in Fließrichtung der Strömung gewählt werden.

Startpunkte für Bahnlinien

Bei Wahl der Menüpunkte "Startpunkte für Bahnlinien", öffnen sich die Eingabefenster, in denen die Startpunkte festgelegt werden können. Durch die Button  bzw.  kann eine interaktive Auswahl in der Benutzeroberfläche erfolgen. Eine Kombination aller drei Startpunkt-Arten ist möglich.

Bei der Bahnlinienberechnung wird eine Porosität von 0.2 berücksichtigt. Diese kann über die Batch-Datei der Strömungsberechnung geändert werden.

Eine typische Anwendung der Bahnliniendarstellung ist die Frage nach Einzugsgebieten von Entnahmebrunnen, z.B. welcher Bereich im Umkreis des Brunnens als Wasserschutzzone ausgewiesen werden muss (z.B. 50-Tage-Schutzzone). Hierfür bietet sich die Darstellung entgegen der Fließrichtung an.

Nach der Strömungsberechnung muss der Plot erstellt werden, um die Bahnlinien darzustellen. Dazu muss *Datei* → *Ploterstellung* → *Draufsicht/Kartenerstellung* gewählt werden und im Eingabefenster *Ergebnisdaten -- Bahnlinien* eingegeben werden. Es öffnet sich folgendes Fenster:

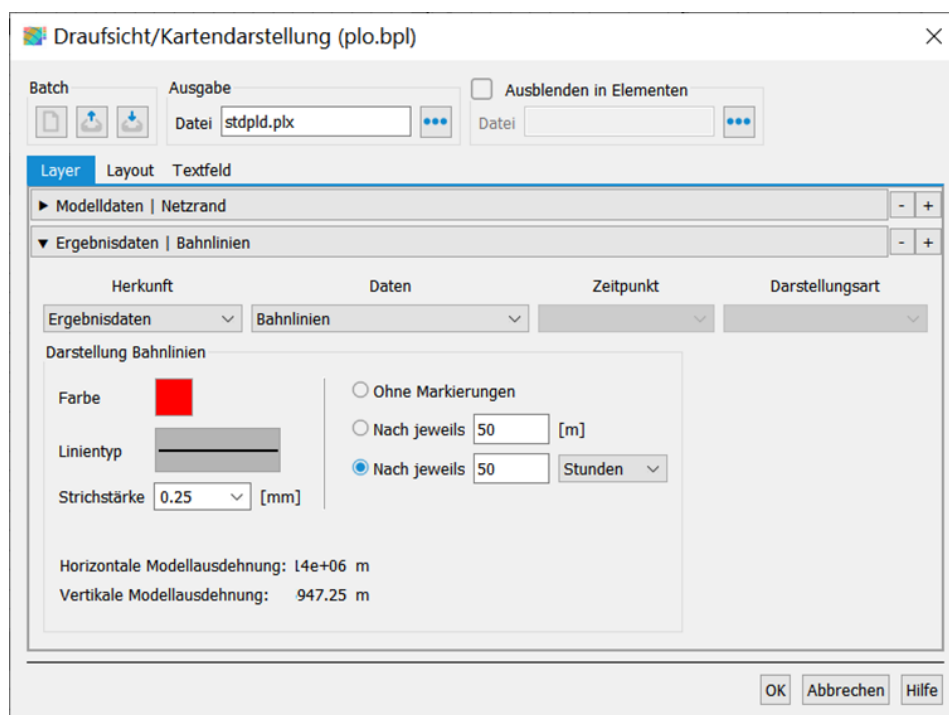


Abb. 101: Bahnlinien-Kriterien bei der Ploterstellung

Die Angabe "Markierungen nach jeweils = 50" bedeutet bei der Auswahl von "Tagen", dass auf der Wegstrecke der Bahnlinie nach jeweils 50 Tagen eine Markierung gesetzt wird. Zur Kennzeichnung der 50-Tage-Schutzzone eines Brunnens kann anhand der Zeitmarkierungen die entsprechende 50-Tage-Isochrone manuell konstruiert werden. Für das folgende Bild wurden die oben angegebenen Parameter und die Knotennummern der Brunnen (1, 2, 3) eingesetzt.

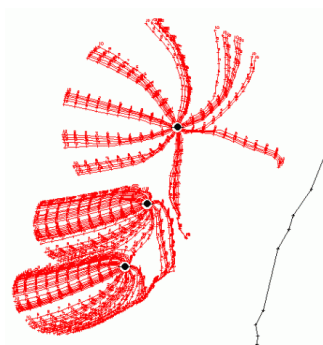


Abb. 102: Bahnlinien mit einer Länge von 500 m und einer Markierung nach jeweils 50 Tagen

An diesem Bild sind die in der Strömungsberechnung eingestellten Parameter erkennbar. Die Bahnlinie endet nach Erreichen der 500-m-Grenze, der Abstand um den Brunnen entspricht "dem Radius für Startpunkte um Knoten = 25 m", und es sind 50 Bahnlinien.

Es erfordert jedoch ein wenig Übung, um ein für sein Problem aussagekräftiges Bild zu erhalten.

2.1.3 Theoretische Grundlagen der Stromlinien

Eine Stromlinie beschreibt die Grenze, über die kein Wasser transportiert wird, d.h. die Wassermenge zwischen zwei Stromlinien bleibt konstant (solange keine Zusickerung von oben erfolgt). Von der Theorie her bedingt, ist eine solche Berechnung nur für **2D-Horizontalmodelle** möglich.

Bei der Stromlinienberechnung wird in jedem Knoten die Massenbilanz aufgestellt. Durch Lösung des entstehenden Gleichungssystems werden die Stromlinien ermittelt. Die Startpunkte für die Stromlinien werden ebenfalls aus den Knotenbilanzen ermittelt. Vom Benutzer wird ein Schwellenwert für die Wassermenge definiert, ab der pro Brunnenknoten eine Stromlinie startet.

Die Stromlinien werden dann entsprechend den über die anliegenden Elementseiten zufließenden Wassermengen verteilt, indem die Mengen aufsummiert werden, bis der gewählte Schwellenwert erreicht ist. Von den so gefundenen Stellen auf den Elementseiten können dann die Stromlinien durch das nächste Element und dann über die nächste Kante verfolgt werden. Ebenso können die Startpunkte entlang des Randes oder entlang von Vorflutern ermittelt werden.

Rückwärts berechnete Stromlinien enden an einer Elementseite zu einem Knoten, der eine Zusickerung größer als der Schwellenwert aufweist. Dies kann entweder ein Randknoten sein, an dem Zuflüsse über den Rand errechnet wurden, oder ein beliebiger Knoten im Gebiet mit einer Infiltration (auch aus GW-Neubildung).

In der Regel ist bei einem Horizontalmodell die Grundwasserneubildung zu berücksichtigen. Sie wird als geringe Zusickerung auf alle Knoten des Netzes verteilt. Hierdurch erhält jeder Knoten einen Zufluss und kann damit Endpunkt für die Rückwärtsverfolgung einer Stromlinie sein. Dies führt zu einer Ausdünnung der Bahnlinien z.B. entlang des Einzugsgebietes eines Brunnens und repräsentiert so die Verteilung der Grundwasserneubildung. Dieser Effekt wird nur dann deutlich sichtbar, wenn eine größere Anzahl von Stromlinien je Brunnen erzeugt wurde.

Die so berechneten Stromlinien geben neben den Fließwegen des Grundwassers auch einen Überblick über die fließenden Mengen, so dass bei dicht liegenden Stromlinien von großen Mengen, bei vereinzelt liegenden Stromlinien von geringen Mengen ausgegangen werden kann. Ein Stromlinienbild ist auch eine gute Überprüfung einer Kalibrierung. Ist in einzelnen Elementen der K-Wert gegenüber der Umgebung sehr klein oder sehr groß geraten, zeigt sich dies in einem scharfen Abknicken der Stromlinien.

Die Darstellung der Stromlinien wird stark von der Qualität des FE-Netzes beeinflusst, da große Diskontinuitäten an den Elementrändern zu einem großen seitlichen Versatz der Linien führen. Ein wichtiger Effekt, der bei der Bahnlinienverfolgung nicht berücksichtigt wird, ist die Querverteilung beim Übergang zwischen zwei Elementen mit verschiedenen Mächtigkeiten. Zur Erhaltung der Masse müssen die Stromlinien im Element mit der größeren Mächtigkeit enger beieinander liegen als im Element mit der geringeren Mächtigkeit.

2.1.4 Erzeugen und Darstellen von Stromlinien

Die Berechnung von Stromlinien ist nur im Anschluss an eine zweidimensionale horizontale Strömungsberechnung (stationär oder instationär) möglich. Zur Darstellung der Stromlinien (= mengenbezogene Bahnlinien) müssen diese exportiert werden: *Datei* → *Exportieren* → *Stromlinien...*. Es erscheint folgendes Eingabefenster:

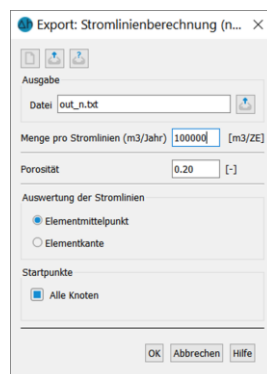


Abb. 103: Stromlinienberechnung

Die Eingabeblöcke sind ausführlich im Kapitel "Datenexport - Ausgabe von Stromlinien" im Benutzer_Handbuch erläutert.

Die Angabe der "Menge pro Stromlinien (m^3/Jahr)" erfordert ein bisschen Feingefühl für die vorhandenen Wassermengen im Modell. Im Beispiel wird mit 10.000 m^3 pro Jahr gerechnet, und es werden Stromlinien in allen Knoten gestartet (die Angabe einzelner Knotennummern ist nur bei Entnahmebrunnen zulässig). Nach der Berechnung kann unter *Ploterstellung* der Punkt: *Ergebnisdaten: Stromlinien* gewählt werden. Das Eingabefenster ist identisch mit dem für die Bahnlinien und erfordert die gleichen Parameter. Hier wurde "Markierungen nach: 100 m" gesetzt, das Ergebnis ist folgendes Bild:

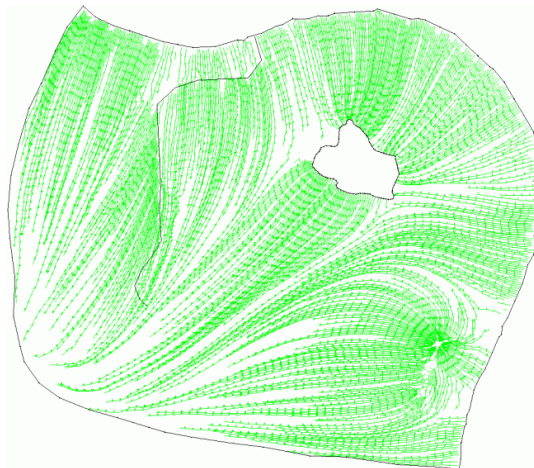


Abb. 104: Stromlinienmenge 10.000 m^3 pro Jahr

Nahe bei einander liegende Stromlinien bedeuten große Wassermengen, in Gebieten mit vereinzelt Stromlinien fließt nur wenig Wasser. Scharfe Knicke im Stromlinienverlauf sind ein Hinweis auf Sprünge in den K-Werten der benachbarten Elemente.

2.1.5 Einzugsgebietsermittlung mit Schlieren (FLIC)

Oftmals stellt sich die Frage nach den Einzugsgebieten von Vorflutern oder Brunnen, z.B. bei der Beurteilung und Festlegung von Trinkwasserschutzzonen oder dem Einflussbereich eines Entnahmebrunnens.

Mit dem Programm *FLIC* (Konrad-Zuse-Zentrum für Informationstechnik Berlin) ist es möglich, nach einer Strömungsberechnung die berechneten Geschwindigkeiten als "Schlieren" darzustellen. Diese Visualisierungstechnik liefert eine wesentlich bessere Vorstellung über die Fließwege als die sonst üblichen Fließpfeile der Geschwindigkeiten, insbesondere bei 3D-Modellen, wo per Definition keine Stromlinienberechnung möglich ist.

Im modifizierten Beispielmmodell existieren nun zwei Brunnenbereiche, die sich durch die Schlierendarstellung deutlich voneinander abgrenzen lassen.

Das Vorgehen zur Schlierendarstellung ist folgendes:

Nach erfolgreicher Strömungsberechnung erfolgt die Berechnung für die Darstellung durch *Datei* → *Exportieren* → *Schlierendarstellung*. Danach erscheint folgendes Eingabefenster:

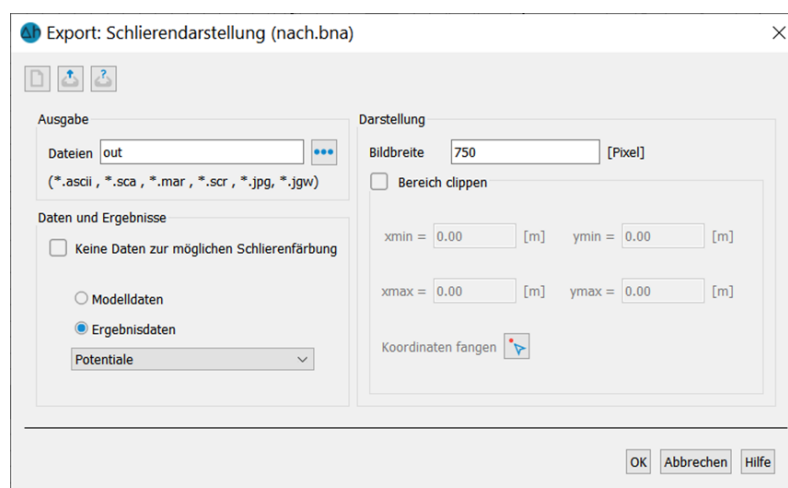


Abb. 105: Eingaben für die Schlierendarstellung

Die Ausgabedateien sind mit dem Namen "out" vorbelegt, der Name kann vom Anwender geändert werden. Angehängt werden die sechs Ausgabe-Extensions .ascii, .sca, .mar, .scr, .jpg und .jwg.

Die Darstellung der Schlieren erfolgt im Format ".jpg" mit der zur Georeferenzierung erforderlichen World-Datei ".jgw". Die Farbe der Schlieren kann durch die Wahl einer Datenart (Modell- oder Ergebnisdaten) verändert werden. Im Beispiel wurden die Potentiale als Farbgeber gewählt.

Man erhält das folgende Bild:

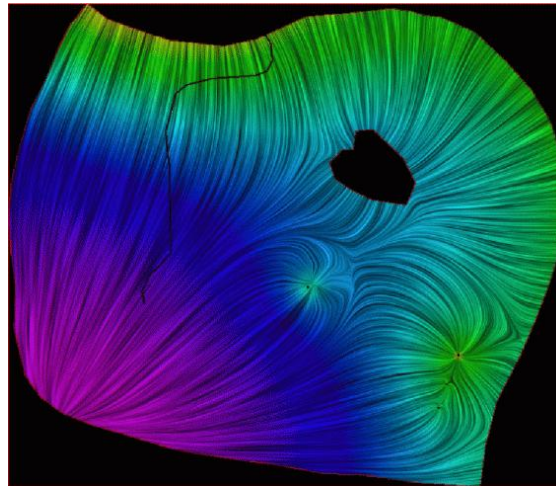


Abb. 106: Schlierendarstellung der Potentiale

Entlang des Schlierenverlaufs können z.B. mit dem Strukturmenü in SPRING (Modus Modelldatei) die Einzugsgebiete der Brunnen-(galerie) als Flächen- oder Linienstruktur digitalisiert werden. Die jpg-Datei kann auch im Plotmodus geöffnet werden, die Linien- oder Flächenobjekte dort gezeichnet und als plx-Datei gespeichert werden.

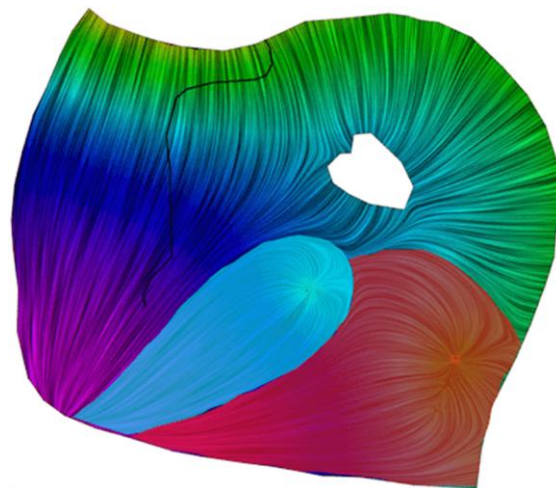


Abb. 107: Digitalisierte Ränder der Einzugsgebiete des Einzelbrunnens (türkis) und der Brunnengalerie (rot)

Um die ermittelten Einzugsgebiete mit FLIC mit den berechneten Bahn- und Stromlinien zu vergleichen, wird eine der plx-Dateien (z.B. die Bahnliniendarstellung) geöffnet und die plx-Datei der Stromliniendarstellung und die Schlierendarstellung überlagert (Datei → Importieren → Datei überlagern... → Auswahl des entsprechenden Dateityps).

Man sieht deutlich, dass der Verlauf der Schlieren dem der Bahn- und Stromlinien entspricht. Die übrigen Dateien können in anderen Geoinformationssystemen (z.B. ARC INFO) weiter verwendet werden.

Nach Löschen der Schlierendarstellung können die Einzugsgebiete mit der topografischen Karte überlagert und so der Bezug vor Ort hergestellt werden. Hierfür ist ggf. zunächst eine Änderung der Darstellung der Flächenstrukturen von einer Umrandung in eine gefüllte Fläche vorzunehmen.

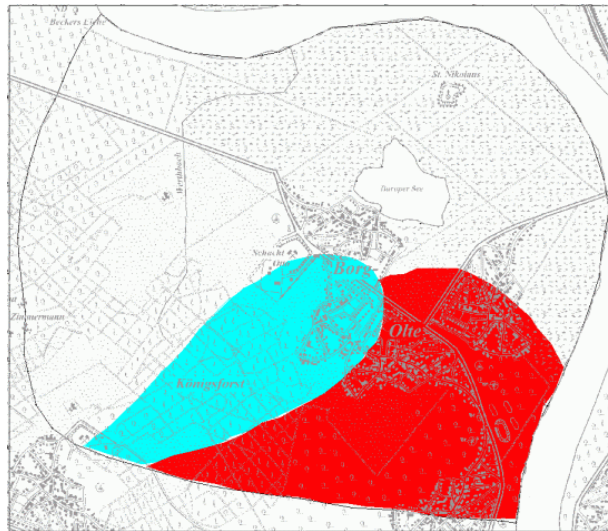


Abb. 108: Einzugsgebiete der Brunnen

2.1.6 Transport bei invertierter Strömung

Es ist möglich, Einzugsgebiete unter Berücksichtigung von Advektions- und Dispersions-/ Diffusionsprozessen darzustellen. Somit können auch lokale Heterogenitäten über den Dispersionsterm abgebildet werden, die über die herkömmlichen Methoden der Geschwindigkeitsverfolgung nicht bzw. nur beschränkt ermittelbar sind.

Grundlage dieser Vorgehensweise ist in Uffink, F., *Application of Kolmogorovs backward equation in random walk simulations of groundwater contaminant transport; Contaminant Transport in Groundwater*, Kobus & Kinzelbach, 1986 und Wilson, J.L. and J. Liu, *Backward particle tracking to find the source of pollution in waste management. Waste Management: From Risk to Reduction*, 1995 näher erläutert.

Wird die Konzentration in einem Brunnen mit 1,0 belegt, werden Wahrscheinlichkeiten des eintreffenden Partikels in den Brunnen als Konzentrationswerte berechnet. Mit der Darstellung von Isokonzentrationsflächen von 0,05 bis 1,0 wird eine 95%-Wahrscheinlichkeit des Eintreffens eines Partikels in den Entnahmebrunnen berechnet.

In den Bildern ist ein 3D-Beispiel dargestellt, in dem zwei Grundwasserleiter durch einen Stauer getrennt sind. Die Entnahmebrunnen fördern aus dem unteren Grundwasserleiter. Es ist die 50 Tagefläche im Vertikal- und Horizontalschnitt dargestellt:

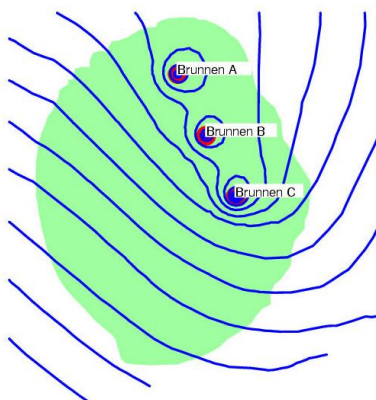


Abb. 109: Horizontales Strömungsbild

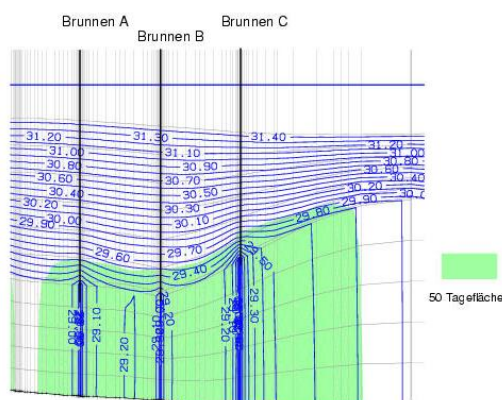


Abb. 110: Vertikales Strömungsbild

Eine detaillierte Beschreibung des Vorgehens bei einer invertierten Strömung sprengt den Rahmen dieses Handbuchs. Während einer Schulung kann auf Wunsch auf die Berechnung von Transportprozessen bei invertierter Strömung eingegangen werden.

2.2 Massenbilanzen

Eine Massenbilanz ist die volumenmäßige Erfassung der Wassermenge, die während eines bestimmten Zeitraumes in ein Untersuchungsgebiet ein- und ausströmt. Zuflüsse werden mit einem positiven Vorzeichen, Abflüsse

mit einem negativen Vorzeichen belegt. Innerhalb des Modellgebiets definieren Kontrolllinien Linien bzw. Flächen, auf denen der Volumenstrom berechnet werden kann.

2.2.1 Grundlagen der Kontrolllinien

Ein Strömungsbild gibt die Richtung wieder, aus der z.B. ein Brunnen angeströmt wird. Mit Hilfe von Kontrolllinien können zusätzlich Aussagen über die aus einer bestimmten Richtung zuströmenden Wassermengen gemacht werden. Die Menge errechnet sich aus der Fließgeschwindigkeit und der zugehörigen durchströmten Fläche. Die dreidimensionale Berechnung liefert abhängig von der Schichteinteilung tiefendifferenzierte Mengen.

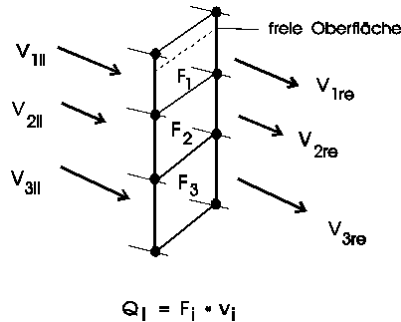


Abb. 111: Berechnung der über einen vertikalen Schnitt strömenden Mengen

2.2.2 Allgemeine Hinweise zur Nutzung von Kontrolllinien

Die Festlegung der Kontrolllinien erfolgt in der Modelldatei (*.net) mit Hilfe der Datenart KONT. Die Datenart KONT ist unabhängig vom Modelltyp (2D oder 3D).

Die Linien können sich von einem 2D-Gebiet in ein 3D-Gebiet erstrecken; sie dürfen jedoch nicht entlang der 2D/3D-Grenze verlaufen.

Um Mengen über einen Gebietsrandabschnitt zu erhalten, sollten statt Kontrolllinien besser die Reaktionsmengen (bei Potentialrandbedingungen) der entsprechenden Knoten aufsummiert werden (Attribut BILK), da diese genauer sind.

Die Kontrolllinien müssen immer auf den Elementseiten verlaufen, damit stehen zur Berechnung immer die Geschwindigkeiten und durchströmten Flächen von zwei Elementen zur Verfügung. Die Flächen werden gemittelt, da die Unterschiede in der Regel nicht so groß sind. Bei den Geschwindigkeiten hat der Benutzer die Wahl, ob eine Mittelung stattfinden oder ob der Wert des links bzw. rechts anliegenden Elementes verwendet werden soll. Die Genauigkeit der Mengenberechnung ist von der FE-Diskretisierung und der Diskontinuität der Elemente abhängig.

Bei der Anwendung des Attributs KONT sind außerdem folgende Punkte zu beachten:

- Die Berechnung der Kontrolllinien wird im Hauptmenü des jeweiligen Strömungsmoduls aktiviert, sobald das Attribut KONT in der Modelldatei vorhanden ist.
- Die Ergebnisse für die einzelnen Knoten sowie die Gesamtmenge der Kontrolllinie werden in die Ausgabedatei der Strömungsberechnung geschrieben. Der Wert der Kontrolllinie in der Modelldatei entspricht der Nummer der Linie in der Ausgabedatei.
- Wird in SPRING eine geschlossene Kontrolllinie erstellt, z.B. um einen Brunnen, muss der letzte (= erster Knoten) Knoten manuell in der Modelldatei eingefügt werden, damit die Linie geschlossen ist.
- Kontrolllinien können auch über die Elementdiagonalen zugewiesen werden. Bei einer späteren Netzverfeinerung kommt es an diesen Stellen jedoch zu einer "unsauberen" Linienführung, und in der Strömungsberechnung wird eine Warnung ausgegeben. Hier ist eine manuelle bzw. erneute Zuweisung des Attributs KONT erforderlich.
- Mit dem Modul SITRA ist die Berechnung nur über die Elementkanten möglich!
- Das Vorzeichen der Kontrolllinienmengen an den einzelnen Abschnitten ist abhängig von der Zuweisungsrichtung: Ein Fließen über die Kontrolllinie von RECHTS nach LINKS in Zuweisungsrichtung ist positiv definiert, ein Fließen über die Kontrolllinie von LINKS nach RECHTS in Zuweisungsrichtung ist negativ definiert.
- Im Dreidimensionalen erfolgt die Berechnung der Mengen über die Tiefe, beginnend in der Schicht, auf die das Attribut KONT zugewiesen wurde, bis zur Modellbasis.

Die folgenden Kapitel beschreiben konkrete Anwendungsbeispiele von Kontrolllinien.

2.2.3 Verwendung von Kontrolllinien zur Ermittlung des Zustroms zu einem Entnahmebrunnen (KNOT)

Zur Berechnung des Zustroms zu einem Entnahmebrunnen wird eine geschlossene Kontrolllinie um einen Brunnen gelegt. Im Beispiel wird ein Brunnen (KNOT) mit einer Entnahme von $-800000.0 \text{ m}^3/\text{Jahr}$ in der Modellmitte definiert.

Die Kontrolllinie (rot) liegt in einem Radius von ca. 400 m um den Entnahmebrunnen. Die Fläche des Kontrollvolumens (= umschriebene Fläche der Kontrolllinie) beträgt 560505 m^2 , was zu einer Grundwasserneubildung (FLAE = $0.200 \text{ m}^3/\text{m}^2/\text{Jahr}$) in diesem Bereich von $112101 \text{ m}^3/\text{Jahr}$ führt. Das FE-Netz sieht im Ausgangszustand im Bereich des Brunnens folgendermaßen aus:

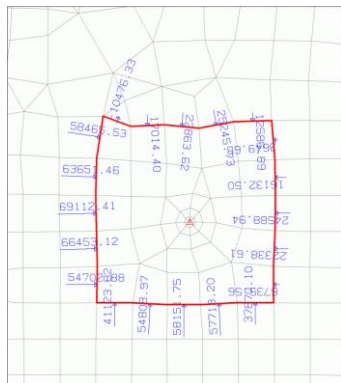


Abb. 112: Ausgangszustand der Brunnenberechnung

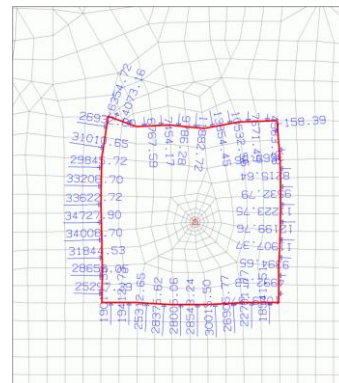


Abb. 113: Einfache Netzverfeinerung im Untersuchungsraum

Nach einer Strömungsberechnung mit dem Modul SITRA (Teilsättigung, 5 Iterationen) erhält man eine in das Kontrollvolumen einströmende Menge von $702533 \text{ m}^3/\text{Jahr}$ (Ausgabedatei der Strömungsberechnung *out.**). Zusammen mit der Neubildungsmenge ergibt sich ein Zufluss von $814634 \text{ m}^3/\text{Jahr}$, was einer prozentualen Abweichung von 1.8 % entspricht.

Durch eine Netzverfeinerung kann die prozentuale Abweichung weiter verringert werden.

Nach einer bereichsweisen Verfeinerung um das Kontrollvolumen errechnet sich die Zuflussmenge zu $112101 + 690024 = 802125 \text{ m}^3/\text{Jahr}$. Damit hat sich die Abweichung bereits auf 0.3 % verringert.

2.2.4 Verwendung von Kontrolllinien zur Ermittlung von Uferfiltratmengen eines großen Hauptvorfluters (POTE)

Wenn Entnahmebrunnen in der Nähe eines großen Vorfluters liegen, fließt ein gewisser Prozentsatz Uferfiltrat in die Brunnen. Um diesen Anteil zu ermitteln, kann den Elementkanten parallel zum Vorfluter das Attribut KONT zugewiesen und eine Strömungsberechnung durchgeführt werden. Durch Darstellung der berechneten Kontrolllinienmengen können anhand der Pfeilrichtung die zu den Brunnen strömenden Mengen ermittelt werden. Das folgende Bild zeigt einen Ausschnitt:

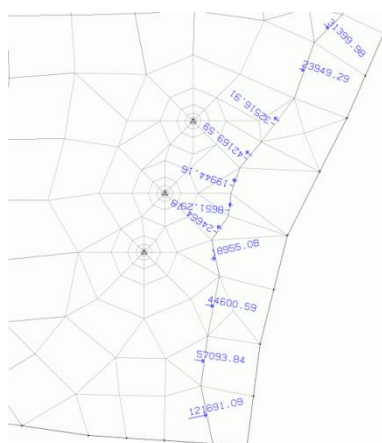


Abb. 114: Uferfiltratmengen des Hauptvorfluters

Durch Addition der zu den Brunnen strömenden Mengen wird die Uferfiltratmenge zu $127946 \text{ m}^3/\text{a}$ ermittelt. Bei einer Entnahmemenge der gesamten Brunnengalerie von $1450000 \text{ m}^3/\text{a}$ entspricht die Uferfiltratmenge einem Anteil von ca. 9 %.

2.2.5 Verwendung von Kontrolllinien zur Ermittlung des grundwasserbürtigen Zustroms zu einem Vorfluter (VORF)

Liegt ein Gewässer im Untersuchungsgebiet, das durch die Attribute VORF und LERA (oder LEKN) abgebildet wird, kann mit Hilfe der Kontrolllinien eine Massenbilanz im Umfeld des Gewässers aufgestellt werden. Dazu wird der Bereich um das Gewässer ein- bis zweimal verfeinert. Dann werden etwa parallel zum Gewässerverlauf auf beiden Seiten Kontrolllinien erzeugt.

Im Beispiel wird das Kontrollvolumen durch die beiden seitlichen Kontrolllinien im Westen und Osten, durch den Hauptvorfluter im Norden und eine gedachte Verbindung der Kontrolllinien im Süden gebildet. Die Massenbilanz muss im stationären Zustand identische Ein- und Ausflüsse ergeben.

Folgende Mengen müssen ermittelt werden:

- Einstrom (+) und Ausstrom (-) über die Kontrolllinien in das Kontrollvolumen (über KONT)
- Neubildung im Kontrollvolumen (über FLAE)
- Leakageentnahme über das Gewässer (über Leakagemengen)
- Ausstrom über die Potentiale im Mündungsbereich (über Reaktionsmengen)

Erzeugen der Kontrolllinien

Die Wassermenge, die bei der Kontrolllinienberechnung ermittelt wird, entspricht dem grundwasserbürtigen Zu- und Abstrom des Gewässers. Im Schlierenbild des Beispiels ist erkennbar, dass das Gewässer nur eine sehr geringe Anbindung hat, da die Schlieren hauptsächlich parallel und nicht zu dem Gewässer hinströmen.

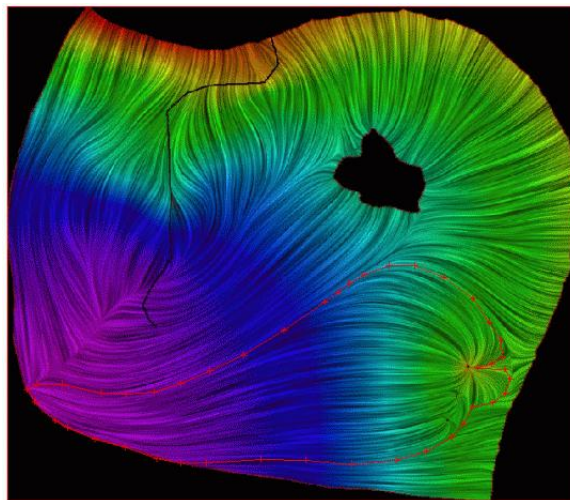


Abb. 115: Schlierenbild des Beispielsmodells

Die Kontrolllinien werden erzeugt mit *Attribute* → *Zuweisen* → *Direkt* und Auswahl der Datenart "KONT". Nach der Strömungsberechnung lassen sich die Mengen, die über jede Elementkante strömen, sowie die Gesamtmenge einer Kontrolllinie, in der Ausgabedatei out.* ablesen.

Die Vorzeichen der angegebenen Mengen lassen sich am besten in einem Plot der Kontrolllinienberechnung ablesen, da sie von der Zuweisungsreihenfolge abhängen: Schaut man **IN** Zuweisungsrichtung, ist die Strömung von **rechts nach links** positiv!

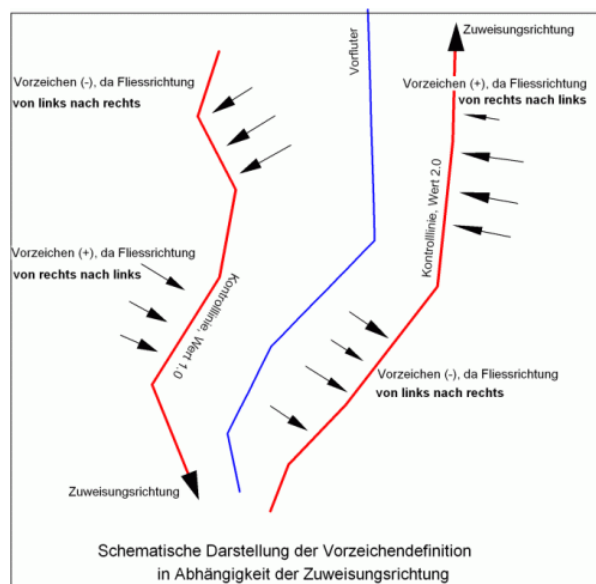


Abb. 116: Schema der Fließrichtung in Abhängigkeit der Zuweisungsrichtung

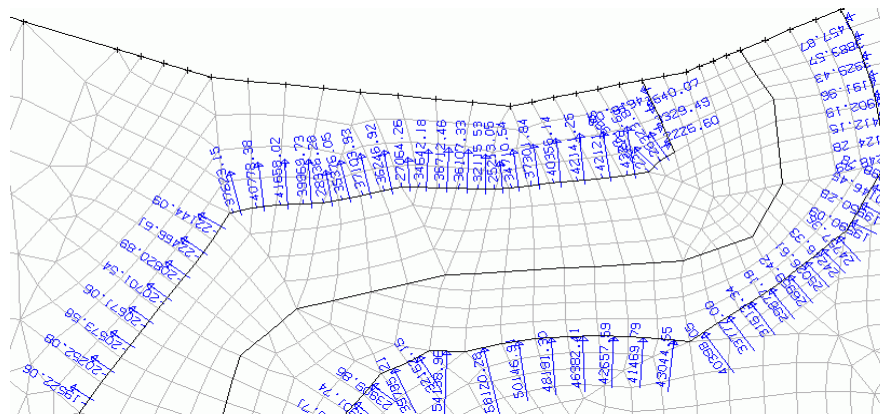


Abb. 117: Lage der Kontrolllinien und -mengen (Ausschnitt)

Auf der östlichen Seite gibt es einen Zustrom (+) in das Kontrollvolumen, und auf der westlichen Seite einen Abstrom (-) aus dem Kontrollvolumen.

Da die Gesamtmengen beider Kontrolllinien positiv sind, muss der Wert der westlichen Linie als Ausstrom und damit negativ in der Massenbilanz angesetzt werden. Nach einer stationären Berechnung mit dem Modul SITRA (Teilsättigung, 5 Iterationen) ergibt sich der Wert der westlichen Linie zu (-) 740284 m³/Jahr und die Menge der östlichen Linie zu (+) 808193 m³/Jahr.

Neubildungsberechnung

Nach Erzeugung der Kontrolllinien links und rechts des Gewässers, wird eine Flächenstruktur (*Struktur* → *Neu* → *Fläche*) definiert, die das gesamte Kontrollvolumen abdeckt. Mit *Ansicht* → *Fläche* berechnen (oder dem entsprechenden Button ) wird in der Statusleiste der SPRING-Oberfläche die Größe der ausgewählten Fläche angezeigt. Im Beispiel liegt sie bei ca. 1975284 m². Dieser Wert wird mit der Neubildungsrate von 0.200 m³/m²/Jahr multipliziert, was eine Neubildungsmenge von ca. 395057 m³/Jahr ergibt.

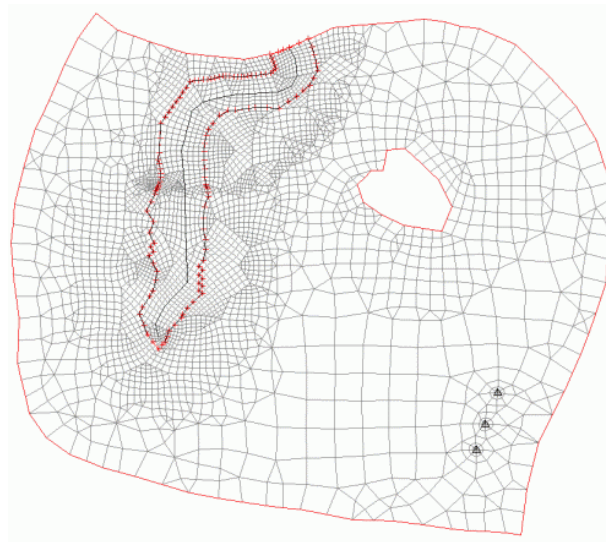


Abb. 118: Flächenstruktur für die Neubildungsberechnung

Ermittlung der Leakagemengen

Für die Ermittlung der Leakagemenge des Gewässers wird den Gewässerknoten das Attribut BILK zugewiesen. Dann wird die Leakagemenge in der Ausgabedatei bei den Massenbilanzen angegeben: sie beträgt - 209405 m³/Jahr.

Ermittlung der Reaktionsmengen

Da das betrachtete Gewässer in einen Hauptvorfluter mit Festpotentialen mündet, muss der Ausstrom über den Potentialrand oder die Potentialrandbedingung im Kontrollvolumen ebenfalls berücksichtigt werden. Die Mengen werden in SPRING über *Attribute → Modelldaten/Berechnungsergebnisse importieren... → Reaktionsmengen → auf KKKK* eingelesen. Über *Attribute → Berechnen → Attribute Summieren...* werden die Reaktionsmengen der Knoten im Kontrollvolumen aufaddiert. Die Reaktionsmengen des linken und rechten "Randknotens" des Kontrollbereichs werden gemittelt und nur einmal addiert, da sie jeweils die halbe Reaktionsmenge der angrenzenden Elemente abdecken. So ergibt sich eine Reaktionsmenge von -260292 m³/Jahr.

Nachdem alle Werte ermittelt sind, kann die Massenbilanz für das Kontrollvolumen [m³/Jahr] aufgestellt werden:

395057	+ 808193	- 740284	- 209405	- 260292	=	-6731 [m ³ /Jahr]
Neubildung	Einstrom	Ausstrom	Leakagemenge	Reaktionsmenge	=!	0

Die Abweichung von -6731 m³ entspricht 0.6 % der negativen Wassermengen.

Mit einem solchen Bilanztest kann die Lage von Kontrolllinien überprüft werden. Die Genauigkeit einer Kontrolllinie hängt erheblich von der Diskretisierung und der Anströmrichtung ab: je senkrechter der Anstrom, desto genauer die aus der Geschwindigkeit abgeleitete Menge ($Q = V * K * I$).

2.2.6 Durchströmende Wassermenge in einem See (GLEI)

In einem Grundwassermodell können Situationen entstehen, bei denen bekannt ist, dass eine gewisse Anzahl von Knoten das gleiche Potential haben muss, der Wert aber unbekannt ist. Dies tritt z.B. auf bei:

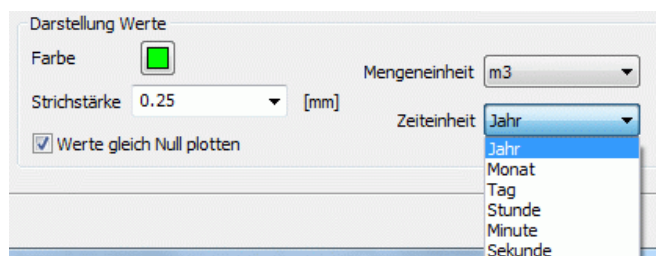
- offenen Gewässern bei einem Horizontal- oder 3D-Modell,
- entlang der benetzten Berandung eines Vertikalbrunnens bei einem Vertikalmodell,
- als Randbedingung für den Übergang von einem 2D- auf ein 3D-Gebiet,
- an den untereinander liegenden Brunnenknoten bei einem 3D-Modell.

Sind die Knoten unter der Datenart GLEI in der Netzdatei angegeben, ergibt sich bei der Strömungsberechnung für alle diese Knoten derselbe Potentialwert. Numerisch wird dies durch Addition der Gleichungen der entsprechenden Knoten realisiert; sie werden als eine Unbekannte behandelt.

Bei einem Vertikalbrunnen in einem 3D-Modell entfällt die Aufteilung der Entnahmemenge auf die vertikalen Knoten (sofern nicht wirklich z.B. durch mehrere Pumpen verschiedene Mengen über die Tiefe entnommen werden). Werden die untereinander liegenden Knoten gleichgesetzt, kann die gesamte Brunnenentnahme an irgendeinem dieser Knoten angesetzt werden.

2.2.6.1 Umsetzung in SPRING

Wird ein See mit dem Attribut GLEI charakterisiert, können die zu- und abfließenden Wassermengen nicht direkt aus der Ausgabedatei bzw. aus den Ergebnisdaten gelesen werden. Zunächst muss eine Modellberechnung (stationär oder instationär) durchgeführt werden. Im Anschluss werden über den Menüpunkt *Attribute → Modelldaten/Berechnungsergebnisse importieren...* die Ergebnisdaten (Potentiale) auf eine beliebige Kennung eingelesen. Über *Attribute → Knoten* bearbeiten kann der berechnete Potentialwert abgelesen werden. Dieser Wert wird als Attribut POTE den Seerandknoten zugewiesen, das Attribut GLEI wird gelöscht. Zum Ablesen der Reaktionsmengen in der Ausgabedatei wird den Seerandknoten zusätzlich das Attribut BILK (ganzzahliger Wert, dient zur Identifizierung der Bilanzgruppe) zugewiesen. Nach erfolgter Strömungsberechnung werden die Ergebnisdaten als "Werte" dargestellt. Bei dieser Darstellungsart können die Reaktionsmengen an den Knoten in eine gewünschte Mengeneinheit umgerechnet werden:



Gewählt wird die Einheit m^3/Jahr . Das folgende Bild zeigt den See mit den berechneten Reaktionsmengen an den Knoten.

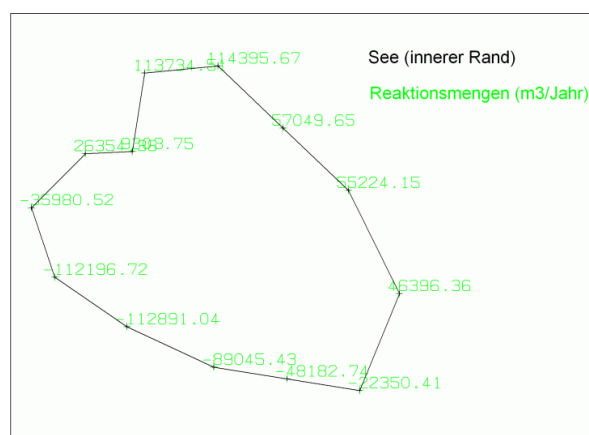


Abb. 119: Zu- und Abfluss in bzw. aus dem See

Die Durchstrommenge $Q_{\text{ein}} = Q_{\text{aus}}$ ergibt sich durch Addition der negativen oder positiven Werte. Je nach Diskretisierung des FE-Netzes weichen diese Werte zu einem geringen Prozentsatz voneinander ab:

Die Summe der Zuflüsse in den See (= negatives Vorzeichen → Abfluss aus dem Modell wegen des inneren Randes) ergibt eine Menge von $430646 \text{ m}^3/\text{Jahr}$, die Summe der Abflüsse aus dem See (= positives Vorzeichen → Zufluss in das Modell) ergibt sich zu $422458 \text{ m}^3/\text{Jahr}$. Die Gegenüberstellung ergibt eine Differenz von $-8188 \text{ m}^3/\text{Jahr}$, dies entspricht einer prozentualen Abweichung von 0,5% der Durchstrommenge. Nach einer einmaligen Netzverfeinerung verringert sich die Abweichung auf $-1032 \text{ m}^3/\text{Jahr}$ bzw. auf 0,2%, die Durchstrommenge beträgt ca. $416790 \text{ m}^3/\text{Jahr}$.

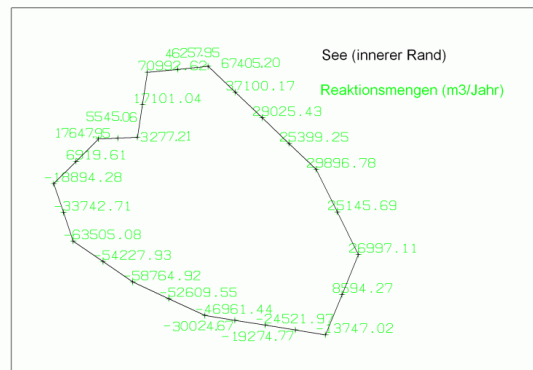


Abb. 120: Zu- und Abfluss in bzw. aus dem See nach einer Netzverfeinerung

2.3 Berechnung mittlerer Neubildungsraten

Zur Berücksichtigung mittlerer Grundwasserneubildungsraten stehen in SPRING vier Verfahren, teilweise für Nordrhein-Westfalen entwickelt, zur Verfügung:

- Neubildungsberechnung nach Schroeder und Wyrwich, ursprünglich entwickelt für das Münsterland [Schroeder und Wyrwich (1990): "Eine in Nordrheinwestfalen angewendete Methode zur flächendifferenzierten Ermittlung der Grundwasserneubildung" - Deutsche Gewässerkundliche Mitteilungen, 34, Koblenz 1990.]
- Verfahren zur Grundwasserneubildungsberechnung nach Meßer, ursprünglich entwickelt für die Emischerregion [Meßer (2008): „Ein vereinfachtes Verfahren zur Berechnung der flächendifferenzierten Grundwasserneubildung in Mitteleuropa“]
- Neubildungsberechnung mit dem Verfahren nach Bodenwasserbilanz
- Neubildungsberechnung nach der Methode RUBINFLUX

Die elementweise Berechnung der Neubildung erfolgt in SPRING über den Menüpunkt *Attribute* → *Berechnen...* → *Neubildung...*

2.3.1 Neubildungsberechnung nach Schroeder und Wyrwich

Das Verfahren nach Schroeder und Wyrwich basiert auf der umgestellten Wasserhaushaltsgleichung:

Grundwasser-Neubildung = Niederschlag - Gesamtverdunstung - Direktabfluss.

- **Grundwasser-Neubildung:** Sie wird aus allen eingegebenen Daten in SPRING berechnet und auf das Attribut FLAE (Spalte 16 "*") in der Einheit $\text{m}^3/\text{m}^2/\text{a}$ zugewiesen. Voraussetzung ist die Zeiteinheit „Jahr“ in der Modelldatei.
- **Niederschlag:** Niederschlagsmenge, die in der Einheit m/Jahr für alle Elemente bzw. $\text{m}^3/\text{m}^2/\text{ZE}$ elementweise (Spalte 16: „*“) eingegeben wird (Attribut NIED).
- **Gesamtverdunstung:** Die mittlere Gesamtverdunstungshöhe wird in Abhängigkeit vom Bodentyp und der Flächennutzungsklasse nach folgender Tabelle berücksichtigt (Werte in mm/Jahr , N steht für Niederschlag):

Flächennutzung Bodentyp	Acker, Grünland	Laubwald	Mischwald	Nadelwald	Bebaute Fläche	Wasserflächen
Terrestrische Sandböden	380	480	540	600	$0.2 \cdot N$	$1.0 \cdot N$
Terrestrische Lehm Böden	440	540	600	660	$0.2 \cdot N$	$1.0 \cdot N$

Semiterrestrische Böden	550	650	700	750	0.2*N	1.0*N
--------------------------------	-----	-----	-----	-----	-------	-------

- **Direktabfluss:** Das noch verfügbare Wasser aus der Differenz zwischen Niederschlag und Verdunstung wird zusätzlich um den Direktabfluss reduziert. Dazu wird neben den Parametern Bodentyp und Flächennutzung auf Acker und Grünland die Reliefenergie bzw. das Gefälle benötigt. Als maßgebendes Gefälle im betroffenen Finiten Element wird das maximale Gefälle zwischen den Knoten (ggf. auch über die Diagonale) des Elements angesetzt, was das Programm automatisch aus der Geländehöhe an den einzelnen Knoten berechnet.

Der Direktabfluss ergibt sich in Abhängigkeit der Flächennutzung bei **Acker und Grünland** zu:

Bodentyp \ Reliefenergie [m/km²]	Reliefenergie [m/km²]	Gefälle [%]	Direktabfluss [%]
Terrestrische Sandböden	0 - 20	0 - 2	0
	21 - 90	2 - 9	0 - 100
	> 90	> 9	100
Terrestrische Lehm Böden	0 - 60	0 - 6	0 - 100
	> 60	> 6	100
Semiterrestrische Böden	Ohne Bedeutung	Ohne Bedeutung	50

Bei den übrigen Flächennutzungen ist der Direktabfluss unabhängig vom Bodentyp und dem Gefälle:

Flächennutzung	Direktabfluss [%]
Laub-, Misch-, Nadelwald	0
Bebauung	90*
Wasserflächen	0

*: Abweichend von Schroeder und Wyrwich wird der Anteil des Direktabflusses auf bebauten Flächen mit 90% statt 100% angesetzt.

2.3.1.1 Eingangsdaten

Folgende Daten müssen für alle Elemente bzw. Knoten in der Modelldatei vorliegen:

- Geländehöhen (Attribut GELA). Zur Berechnung der Reliefenergie bzw. des Gefälles
- Niederschlag (Attribut NIED).
- Bodentyp (Attribut NSBT). Der Bodentyp muss entsprechend der folgenden Klassifizierung in der Modelldatei angegeben werden:

Bodentyp	Klassifizierung (= NSBT)
Terrestrische Sandböden	0
Terrestrische Lehm Böden	10
Semiterrestrische Böden	20, 21, 22

- Flächennutzung (Attribut NSFN): Die Flächennutzung muss für alle Elemente entsprechend der folgenden Klassifizierung in der Modelldatei angegeben werden:

Flächennutzung	Klassifizierung (= NSFN)
----------------	--------------------------

Acker, Grünland	0
Laubwald	1
Mischwald	2
Nadelwald	3
Bebauung	4
Wasserflächen	5

Zur Ermittlung des Attributs NSFN kann auch die digitale Flächennutzungskarte des Regionalverbands Ruhr (RVR) genutzt werden. Je nach Format können die Daten als Struktur importiert und in SPRING zugewiesen werden.

Die Transformation des RVR-Codes (Stand: 07/2002) in den Nutzungsschlüssel für das Verfahren nach Schroeder und Wyrwich kann ohne zusätzliche Modelldaten über den Menüpunkt *Attribute → Berechnen → Neubildung → Nach Schroeder&Wyrwich → Flächennutzung nach RVR-Code ermitteln (KVRN → NSFN)* durchgeführt werden.

Nach dieser Methode kann für jedes Finite Element die Grundwasserneubildung gemäß oben beschriebener, umgestellter Wasserhaushaltsgleichung bestimmt werden über:

Attribute → Berechnen → Neubildung → Nach Schroeder&Wyrwich → Neubildung berechnen.

2.3.2 Neubildungsberechnung nach Meßer 2008

Das Verfahren nach Meßer basiert auf der umgestellten Wasserhaushaltsgleichung

$$\text{Grundwasser-Neubildung} = \text{Niederschlag} - \text{reale Verdunstung} - \text{Direktabfluss.}$$

- **Grundwasser-Neubildung:** Sie wird aus den Eingabedaten in SPRING berechnet und auf das Attribut FLAE (Spalte 16 "*") in der Einheit $\text{m}^3/\text{m}^2/\text{a}$ zugewiesen. Voraussetzung ist die Zeiteinheit „Jahr“ in der Modelldatei.
- **Niederschlag:** Niederschlagsmenge, die in der Einheit m/Jahr für alle Elemente bzw. $\text{m}^3/\text{m}^2/\text{ZE}$ elementweise (Spalte 16: „*“) eingegeben wird (Attribut NIED).
- **Reale Verdunstung:** Die reale Verdunstungshöhe wird in Abhängigkeit von der Klimazone, der Flächennutzung, des Bodentyps und der Flurabstandsklasse berücksichtigt.
- **Direktabfluss:** Das noch verfügbare Wasser aus der Differenz zwischen Niederschlag und Verdunstung wird anschließend um den Direktabfluss reduziert. Dazu wird neben den Parametern Bodentyp, Flurabstand und Flächennutzung die Reliefenergie bzw. das Gefälle benötigt. Als maßgebendes Gefälle im betroffenen Finiten Element wird das maximale Gefälle zwischen den Knoten (ggf. auch über die Diagonale) des Elements angesetzt, was das Programm automatisch aus der Geländehöhe an den einzelnen Knoten berechnet.

Eine ausführliche Beschreibung dieses Verfahrens findet sich auf dieser Website (<http://www.gwneu.de>):

"Ein vereinfachtes Verfahren zur Berechnung der flächendifferenzierten Grundwasserneubildung in Mitteleuropa".

2.3.2.1 Eingangsdaten

Folgende Daten müssen für alle Elemente bzw. Knoten in der Modelldatei vorliegen:

- Geländehöhen (Attribut GELA): Zur Berechnung der Reliefenergie bzw. des Gefälles
- Flurabstände (Attribut FLUR): Zur Bestimmung der Verdunstung und des Direktabflusses. Der Flurabstand kann in SPRING als Differenz aus GELA – EICH berechnet werden (*Attribute → Berechnen → Attribute verrechnen... → GELA – EICH*).
- Niederschlag (Attribut NIED).
- Bodentyp (Attribut NMBT): Der Bodentyp muss entsprechend der folgenden Klassifizierung in der Modelldatei angegeben werden (nFK = nutzbare Feldkapazität):

Bodentyp	Klassifizierung (= NMBT)
----------	--------------------------

Sand nFK gering	1
lehmiger Sand nFK mittel	2
schluffiger Lehm nFK hoch	3
Lössböden	4
Pseudogley	5

- Flächennutzung (Attribut NMFN): Die Flächennutzung muss entsprechend der folgenden Klassifizierung in der Modelldatei angegeben werden:

Flächennutzung	Klassifizierung (= NMFN)
Landwirtschaftliche Nutzung	11
Acker	12
Grünland	13
Brache	14
vegetationslos	15
Laubwald	21
Mischwald	31
Nadelwald	41
Mischvegetation, Versiegelungsanteil 0%	51
Mischvegetation, Versiegelungsanteil 1-20%	52
Mischvegetation, Versiegelungsanteil 21-40%	53
Mischvegetation, Versiegelungsanteil 41-60%	54
Mischvegetation, Versiegelungsanteil 61-80%	55
Mischvegetation, Versiegelungsanteil 81-100%	56
Wasserflächen mit Ablauf	61
Wasserflächen ohne Ablauf	62
Halden, Deponie undifferenziert	71
Deponie in Betrieb (unbewachsen), nFK gering	72
Deponie rekultiviert (Mischvegetation), nFK gering	73
Halde in Schüttung (unbewachsen), nFK gering	74
Halde rekultiviert (Mischvegetation) nFK gering	75
Schlammteich vegetationslos, hohe nFK	76
Dachflächen entwässert	81
Asphalt, Beton entwässert	82
Betonverbund (neu), entwässert	83
Mosaik-/Kleinpflaster, entwässert	84
Rasengittersteine, entwässert	85
verdichtet, entwässert	86
versiegelt, nicht entwässert	91
Asphalt, Beton nicht entwässert	92
Betonverbund (neu), nicht entwässert	93
Mosaik-/Kleinpflaster, nicht entwässert	94

Zur Ermittlung der Datenart NMFN können standardisierte Flächennutzungskodierungen wie RVR-Code (Attribut KVNR), CORINE land use Daten (Attribut NCLC) oder ATKIS-Daten (Attribut NATK) verwendet werden. Je nach Format können die Daten als Struktur importiert und in SPRING zugewiesen werden.

- **Gefälleklasse (Attribut NMKG):** Als maßgebendes Gefälle im betroffenen Finiten Element wird das maximale Gefälle zwischen den Knoten (ggf. auch über die Diagonale) des Elements angesetzt, was das Programm automatisch aus der Geländehöhe an den einzelnen Knoten berechnet. Die Gefälleklasse muss entsprechend der folgenden Klassifizierung in der Modelldatei angegeben werden:

Gefälleklasse (NMKG)	Reliefenergie [m/km ²] bzw. Gefälle [%]
1	0 - 20 bzw. 0 - 2
2	21 - 40 bzw. 2 - 4
3	41 – 100 bzw. 4 -10
4	> 100 bzw. > 10

Über den Menüpunkt *Attribute* → *Berechnen...* → *Neubildung* → *Nach Meßer 2008* → *Gefälleklassen ermitteln* kann die Gefälleklasse automatisch in SPRING ermittelt werden.

- **Flurabstandsklasse (Attribut NMFK):** Die Flurabstandsklasse wird anhand der Flurabstände bestimmt und muss entsprechend der folgenden Klassifizierung in der Modelldatei angegeben werden:

Flurabstandsklasse [m]	Klassifizierung (= NMFK)
Flurabstand 0 -1	1
Flurabstand 1.0 – 2.0	2
Flurabstand 2.0 - 3.0	3
Flurabstand > 3.0	4

Über den Menüpunkt *Attribute* → *Berechnen...* → *Neubildung* → *Nach Meßer 2008* → *Flurabstandsklassen ermitteln* können die Flurabstandsklassen automatisch in SPRING ermittelt werden.

- **Klimazonen (Attribut NMKL):** Die Klimazonen können entsprechend der folgenden Klassifizierung in der Modelldatei angegeben werden:

Klimazone, abh. von pot. Evapotranspiration (ETpot)	Klassifizierung (= NMKL)
ETpot 400 – 480 mm/a	1
ETpot 480 – 500 mm/a	2
ETpot 500 – 520 mm/a	3
ETpot 520 – 540 mm/a	4
ETpot 540 – 580 mm/a	5
ETpot 580 – 640 mm/a	6

Sie können auch durch Eingabe der potentiellen Verdunstung (Attribut NETP Eingabe in [m/a]) über den Menüpunkt *Attribute* → *Berechnen* → *Neubildung* → *Nach Meßer 2008* → *Klimatop aus ETpot ermitteln* automatisch in SPRING ermittelt werden.

2.3.2.2 Ermittlung der realen Verdunstungshöhe

Sind alle Eingangsdaten für die Ermittlung der realen Verdunstungshöhe vorhanden (Attribute: NMKL, NMBT, NMFK, NMFN), wird in SPRING die reale Verdunstung NMET über den Menüpunkt *Attribute* → *Berechnen...* → *Neubildung* → *Nach Meßer 2008* → *Verdunstung berechnen* automatisch berechnet.

2.3.2.3 Ermittlung des Direktabflusses

Sind alle Eingangsdaten für die Ermittlung des Direktabflusses vorhanden (Attribute: NMGK, NMBT, NMFK, NMFN), wird in SPRING der Direktabfluss NMAD über den Menüpunkt *Attribute* → *Berechnen...* → *Neubildung* → *Nach Meßer 2008* → *Direktabfluss berechnen* automatisch berechnet.

Nach dieser Methode kann für jedes Finite Element die Grundwasserneubildung gemäß oben beschriebener, umgestellter Wasserhaushaltsgleichung bestimmt werden über:

Attribute → *Berechnen...* → *Neubildung* → *Nach Meßer 2008* → *Neubildung berechnen*.

2.3.3 Flächennutzungsclassen aus RVR-Code

Für weite Teile des Ruhrgebiets liegen detaillierte digitale Flächennutzungsdaten des Regionalverbands Ruhr (RVR) als sog. Nutzungsartenkatalog der Flächennutzungskarte vor. Dieser Flächennutzungsschlüssel kann in die für SPRING erforderlichen Flächennutzungskennungen NSFN, für die Neubildungsberechnung nach Schroeder und Wyrwich, bzw. NMFN für die Neubildungsberechnung nach Meßer überführt werden. Dazu ist der RVR-Code über das Elementattribut KVRN bereitzustellen.

Anmerkung: Es sei ausdrücklich darauf hingewiesen, dass die hier aufgeführte Transformation zwischen den einzelnen Nutzungsklassifizierungen auf Erfahrungswerten beruht, von denen im Einzelfall möglicherweise abzuweichen ist. Eine Überprüfung auf plausible Grundwasserneubildungsraten unter Zuhilfenahme einer zum RVR-Code passenden topographischen Karte wird daher empfohlen.

2.3.3.1 RVR-Code mit Flächennutzung nach Schroeder und Wyrwich

- RVR-Code 0 – 99, Flächennutzung (NSFN) nach Schroeder und Wyrwich

RVR-Code	RVR-Beschreibung	NSFN-Klassifizierung	NSFN-Flächennutzung
10	Bebaute Flächen, dem Wohnen dienend, bis 3 Geschosse	4	Bebauung
20	Bebaute Flächen, dem Wohnen dienend, bis 5 Geschosse	4	Bebauung
30	Bebaute Flächen, dem Wohnen dienend, über 5 Geschosse	4	Bebauung
40	Mischbauflächen	4	Bebauung
50	Gewerbeflächen	4	Bebauung
51	Gebäude / Anlagen	4	Bebauung
52	Lagerflächen	4	Bebauung
53	betriebliche Freiflächen (mögliche Reserveflächen)	4	Bebauung
54	Parkplatzflächen in Gewerbeflächen	4	Bebauung
55	städtischer Bauhof/Fuhrpark, Stadtwerke, Autobahnmeisterei, TÜV	4	Bebauung
56	Bus- und Straßenbahndepot	4	Bebauung
57	Messe- und Ausstellungsgelände	4	Bebauung
58	Fernmeldewesen	4	Bebauung
59	sonstige Flächen	4	Bebauung
60	Industrieflächen	4	Bebauung

RVR-Code	RVR-Beschreibung	NSFN-Klassifizierung	NSFN-Flächennutzung
61	Gebäude / Anlagen	4	Bebauung
62	Lagerflächen	4	Bebauung
63	betriebliche Freiflächen (mögliche Reserveflächen)	4	Bebauung
64	Parkplatzflächen	4	Bebauung
65	Lagerflächen für Rohstoffe (Kohle, Erz, etc.)	4	Bebauung
66	Sonstige Flächen	4	Bebauung
70	Bauflächen des Sports und der Erholung	4	Bebauung
71	Hallenbäder	4	Bebauung
72	Turn-, Tennis-, Eissport-, Reithallen	4	Bebauung
73	Mehrzweck- und Veranstaltungshallen	4	Bebauung
74	Stadion	4	Bebauung
75	bauliche Anlagen zu Sport- u. Freizeitstätten	4	Bebauung
76	Sonstige Flächen	4	Bebauung
80	Gemeindebedarfsflächen	4	Bebauung
81	öffentliche Verwaltungen, Strafvollzug	4	Bebauung
82	Gesundheitswesen (Krankenhäuser, Kliniken)	4	Bebauung
83	öffentliche, private Bildungseinrichtungen, Ausbildungszentren, Bibliotheken	4	Bebauung
84	Kindergärten, Hort, Jugend- u. Altenheime / Wohnanlagen	4	Bebauung
85	Kirchen u. Gemeindehäuser, Klöster	4	Bebauung
86	Polizei, Feuerwehr, Rettungsstationen, Bunkeranlagen	4	Bebauung
87	Post	4	Bebauung
88	Kulturstätten (Museen, Theater)	4	Bebauung
89	Sonstige Flächen (z.B. Tierheime)	4	Bebauung
90	Landwirtschaftliche Hof- und Gebäudeflächen	4	Bebauung
91	Gebäude u. Anlagen	4	Bebauung
92	Zuchtbetriebe, Geflügelfarmen, Legebatterien	4	Bebauung
93	Sonstige Flächen	4	Bebauung

- RVR-Code 100 – 199, Flächennutzung (NSFN) nach Schroeder und Wyrwich

RVR-Code	RVR-Beschreibung	NSFN-Klassifizierung	NSFN-Flächennutzung
100	Sonstige Bauflächen (militärisches Gelände)	4	Bebauung
101	Gebäude u. Anlagen	4	Bebauung
102	Freiflächen innerhalb des Geländes	4	Bebauung
103	Sonstige Flächen	4	Bebauung
110	Autobahn u. autobahnähnliche Straßen	4	Bebauung
140	Übergeordnete Straßen u. Hauptstraßen	4	Bebauung
150	Wohn- und Erschließungsstraßen	4	Bebauung
151	Wohn - und Erschließungsstraßen	4	Bebauung
152	Sonstige Wege / Straßen	4	Bebauung
160	Fußgängerzonen	4	Bebauung
170	Parkplatzflächen	4	Bebauung
171	Parkplatzflächen	4	Bebauung
172	Parkhäuser	4	Bebauung
173	Busbahnhöfe	4	Bebauung
174	Sonstige Flächen (z. B. Garagenhof nicht zu 10-40 gehörend)	4	Bebauung
180	Schienenverkehrsflächen und Nebenanlagen	4	Bebauung
181	Bahnhöfe	4	Bebauung
182	Betriebsgebäude (Güterbahnhöfe, Ausbesserungswerke, Lokschuppen)	4	Bebauung
183	Gleisanlagen (Stadtbahn, Straßenbahn)	0	Acker, Grünland
184	Sonstige Flächen	4	Bebauung
190	Flug- und Landeplätze	4	Bebauung
191	Gebäude und Anlagen	4	Bebauung
192	Landebahnen	4	Bebauung
193	Freiflächen	0	Acker, Grünland
194	Sonstige Flächen	4	Bebauung

■ RVR-Code 200 – 299, Flächennutzung (NSFN) nach Schroeder und Wyrwich

RVR-Code	RVR-Beschreibung	NSFN-Klassifizierung	NSFN-Flächennutzung
200	Sonstige öffentliche Plätze	4	Bebauung
210	Energieversorgung	4	Bebauung

RVR-Code	RVR-Beschreibung	NSFN-Klassifizierung	NSFN-Flächennutzung
211	Gebäude und Anlagen	4	Bebauung
212	Lagerflächen	4	Bebauung
213	Umspannanlagen	4	Bebauung
214	Parkplatzflächen	4	Bebauung
215	Sonstige Flächen, z. B. Freiflächen	0	Acker, Grünland
220	Wasserversorgung	4	Bebauung
221	Gebäude und Anlagen, z. B. Pumpstationen, Wassertürme	4	Bebauung
222	Wassergewinnungsanlagen (Brunnen, Anreicherungsbecken, Brunnengalerien)	5	Wasserflächen
223	Sonstige Flächen, z. B. Freiflächen	0	Acker, Grünland
230	Abwasserbeseitigung	4	Bebauung
231	Gebäude und Anlagen	4	Bebauung
232	Klärteiche und -becken	5	Wasserflächen
233	Regenrückhaltebecken	5	Wasserflächen
234	Sonstige Flächen, z. B. Freiflächen	0	Acker, Grünland
240	Abfallbeseitigung	4	Bebauung
241	Müllverbrennungsanlagen, Rückgewinnungsanlagen	4	Bebauung
242	Gebäude und Anlagen	4	Bebauung
243	Deponieflächen	4	Bebauung
244	Rekultivierte Deponieflächen	4	Bebauung
245	Schlammablagerungen	4	Bebauung
246	Sammelstellen für Recycling / Kompostierungsflächen	4	Bebauung
247	Sonstige Flächen	0	Acker, Grünland
250	Schüttungsflächen für Erde, Schutt	0	Acker, Grünland
260	Abgrabungsflächen	0	Acker, Grünland
261	Gebäude und Anlagen (Förderanlagen, Umladestationen)	4	Bebauung
262	Abgrabungsflächen einschließlich der Sicherheitsstreifen und Randgrün	0	Acker, Grünland
263	Ausgebeutete, z. Z. ruhende, nicht verfüllte Flächen	0	Acker, Grünland
264	Ausgebeutete, verfüllte Flächen, wenn keine anderweitige Nutzung vorliegt	0	Acker, Grünland
270	Öffentliche und private Grün- und Parkanlagen	0	Acker, Grünland
271	Gestaltete Grünflächen im hausnahen Bereich (Kriterien 10, 20, 30, 40)	0	Acker, Grünland

RVR-Code	RVR-Beschreibung	NSFN-Klassifizierung	NSFN-Flächennutzung
272	Grünanlagen (Parks, botanische Gärten, Zoo)	0	Acker, Grünland
273	Sonstige Grünflächen	0	Acker, Grünland
280	Friedhof	0	Acker, Grünland
281	Bauliche Anlagen	0	Acker, Grünland
282	Belegungs- und Grünflächen	0	Acker, Grünland
283	Erweiterungsflächen	0	Acker, Grünland
284	Sonstige Flächen	0	Acker, Grünland
290	Kleingärten	0	Acker, Grünland
291	Freiflächen im hausnahen Bereich (Kriterien 10, 20, 30, 40, 91)	0	Acker, Grünland
292	Dauerkleingärten, Kleingartenanlagen, Schrebergärten	0	Acker, Grünland
293	Grabeland	0	Acker, Grünland
294	Sonstige Flächen	0	Acker, Grünland

■ RVR-Code 300 – 399, Flächennutzung (NSFN) nach Schroeder und Wyrwich

RVR-Code	RVR-Beschreibung	NSFN-Klassifizierung	NSFN-Flächennutzung
300	Spiel- und Sportanlagen	0	Acker, Grünland
301	Sportplätze	0	Acker, Grünland
302	Frei-, Strandbäder	4	Bebauung
303	Tennisplätze	4	Bebauung
304	Anlagen für den Wassersport (Sportbootliegeplätze, Stege)	4	Bebauung
305	Hundedressurplätze	0	Acker, Grünland
306	Reit-, Rennplätze	0	Acker, Grünland
307	Golfplätze	0	Acker, Grünland
308	Spiel-, und Bolzplätze	0	Acker, Grünland
309	Sonstige Freizeitanlagen (Minigolf, Schießstand, Freizeitpark, Autokino, Motocross, Verkehrsübungsplatz, Modellflugplatz)	4	Bebauung
310	Campingplätze	0	Acker, Grünland
311	Dauercamping, Wohnwagenstellplätze	0	Acker, Grünland
312	Zeltplätze	0	Acker, Grünland

RVR-Code	RVR-Beschreibung	NSFN-Klassifizierung	NSFN-Flächennutzung
313	Sonstige Flächen	0	Acker, Grünland
320	Begleitgrün	1	Laubwald
321	Gehölze	1	Laubwald
322	Rasen, Kleingehölze	1	Laubwald
323	Sonstige Flächen	0	Acker, Grünland
330	Fließende Gewässer	5	Wasserflächen
331	Fließgewässer	5	Wasserflächen
332	Ausgebaute Gewässer	5	Wasserflächen
333	Sonstige Gewässer	5	Wasserflächen
340	Kanäle und Häfen	5	Wasserflächen
341	Schleusenanlagen	5	Wasserflächen
342	Kanäle	5	Wasserflächen
343	Hafengewässer	5	Wasserflächen
344	Sonstige Flächen	5	Wasserflächen
350	Seen und Teiche	5	Wasserflächen
351	naturnahe, stehende Gewässer	5	Wasserflächen
352	Ausgebaute, stehende Gewässer (Bade-, Boot- und Surfgewässer)	5	Wasserflächen
353	Abtragungsgewässer	5	Wasserflächen
354	Teiche in Parkanlagen	5	Wasserflächen
355	Fischzuchtgewässer	5	Wasserflächen
356	Sporthäfen	5	Wasserflächen
357	Sonstige Flächen	5	Wasserflächen
360	Dauerwiesen und Weiden	0	Acker, Grünland
361	Wiesen und Weiden	0	Acker, Grünland
362	Obstwiesen und Obstweiden	0	Acker, Grünland
363	Sonstige Flächen	0	Acker, Grünland
370	Ackerflächen	0	Acker, Grünland
380	Erwerbsgartenbau	0	Acker, Grünland
381	Bauliche Anlagen (Treibhäuser)	4	Bebauung
382	Anbauflächen, Sonderkulturen, Baumschulen	0	Acker, Grünland
383	Sonstige Flächen	0	Acker, Grünland

- RVR-Code 400 – 499, Flächennutzung (NSFN) nach Schroeder und Wyrwich

RVR-Code	RVR-Beschreibung	NSFN-Klassifizierung	NSFN-Flächennutzung
400	Laubwald	1	Laubwald
410	Nadelwald	3	Nadelwald
420	Mischwald	2	Mischwald
430	Gehölzbestände	1	Laubwald
431	Gehölzbestände	1	Laubwald
432	Baumgruppen und Baumreihen	1	Laubwald
433	Sonstige Flächen	1	Laubwald
440	Aufforstungsflächen	2	Mischwald
441	Aufforstungen und Anpflanzungen	2	Mischwald
442	Kahlschlag	0	Acker, Grünland
450	Wohnbrache	0	Acker, Grünland
451	Ungenutzte Flächen innerhalb von Wohnbereichen (Baulücken)	0	Acker, Grünland
452	z. Z. ungenutzte Flächen mit erkennbaren Erschließungsmaßnahmen	0	Acker, Grünland
453	z. Z. ungenutzte Flächen, die im FNP für Wohnbebauung vorgesehen sind	0	Acker, Grünland
454	Sonstige Flächen, die z. B. im FNP für andere Nutzungen vorgesehen sind	0	Acker, Grünland
460	Gewerbliche und industrielle Brachflächen	0	Acker, Grünland
461	z. Z. ungenutzte Flächen mit erkennbaren Erschließungsmaßnahmen	0	Acker, Grünland
462	z. Z. ungenutzte Flächen, die im FNP für Gewerbe- und Industrieansiedlungen vorgesehen sind	0	Acker, Grünland
463	Sonstige Flächen, die z. B. im FNP für andere Nutzungen vorgesehen sind	0	Acker, Grünland
470	Nichtgenutzte Flächen der Land- und Forstwirtschaft	0	Acker, Grünland
471	Landwirtschaftliche Brachen	0	Acker, Grünland
472	Verbuschte Brachflächen	2	Mischwald
473	Sonstige Flächen, die z. B. im FNP für Grünflächen vorgesehen sind	0	Acker, Grünland
480	Zechenbrachen	0	Acker, Grünland
481	Gebäude und Anlagen	4	Bebauung
482	Geräumte, ungenutzte Betriebsflächen	0	Acker, Grünland
483	Sonstige Flächen	0	Acker, Grünland
490	Nichtgenutzte Verkehrsflächen	4	Bebauung

- RVR-Code 500 – 510, Flächennutzung (NSFN) nach Schroeder und Wyrwich

RVR-Code	RVR-Beschreibung	NSFN-Klassifizierung	NSFN-Flächennutzung
500	Halden	4	Bebauung
501	Halden, in Schüttung oder Abtragung befindlich	4	Bebauung
502	Rekultivierte Halden, auch Teile einer Halde	4	Bebauung
503	Sonstige Flächen	4	Bebauung

Literatur: [Regionalverband Ruhr, Abt. Karten-/Luftbildwesen und Stadtklimatologie (Hrsgb., 2002): "Nutzungsartenkatalog der Flächennutzungskartierung / FNK", Stand der Daten: 10.07.2002, RVR, Essen]

2.3.3.2 RVR-Code mit Flächennutzung nach Meßer

Für das Verfahren nach Meßer, Version 2008 ist kein Versiegelungsanteil für die Umrechnung des RVR-Codes (Stand: 07/2002) in die Flächennutzung nach Meßer mehr erforderlich.

Für die Überführung der Flächennutzungsdaten aus dem RVR-Code bzw. aus anderen Flächenkodierungen wie CORINE land use Daten oder ATKIS-Daten in das Attribut NMFN wurde von Meßer eine Berechnungsroutine entwickelt. Diese Umrechnung basiert auf dbase-Dateien, die während der Installation von SPRING im Verzeichnis „C:\Users\Public\Documents\SPRING\Konfig“ (Windows 10) abgelegt werden. Dieser Pfad kann je nach Betriebssystem oder Festplattenpartitionierung variieren.

Bei Flächennutzungsdaten im Format RVR-Code werden die Daten als Struktur importiert und auf das Attribut KVRN zugewiesen. Anschließend wird über *Attribute* → *Berechnen* → *Neubildung* → *Nach Meßer 2008* → *Flächennutzung aus RVR-Code ermitteln* mit Hilfe der dbase-Datei das für die Berechnung der Verdunstung und des Direktabflusses notwendige Attribut NMFN erzeugt.

Liegen Flächennutzungsdaten im ATKIS Format vor, so ist wie bei den Daten im RVR-Code zu verfahren, allerdings müssen die ATKIS Daten auf das Attribut NATK zugewiesen werden.

2.3.4 Neubildungsberechnung nach Bodenwasserbilanz

Das Verfahren der (instationären) Berechnung der Neubildungsraten auf Landflächen nach Bodenwasserbilanz beruht auf den theoretischen Grundlagen, die im DVWK-Merkblatt 238/1996 „Ermittlung der Verdunstung von Land- und Wasserflächen“ detailliert beschrieben sind.

Bei der Neubildungsberechnung nach Bodenwasserbilanz wird die maßgebliche Rolle des Bodens als Wasserspeicher durch Einbeziehung der folgenden Komponenten berücksichtigt:

- potentielle Verdunstung (ET_p): Verdunstung von Oberflächen bei gegebenen meteorologischen Bedingungen und unbegrenzt verfügbarem Wasser. Die mögliche Verdunstung ist eine Rechengröße, die aus gemessenen meteorologischen Werten bestimmt wird (aus: DVWK-Merkblatt 238/1996).
- Feldkapazität (FK): Die Feldkapazität ist das Wasserhaltevermögen des Bodens gegenüber der Schwerkraft. Die Feldkapazität ist der maximale Wassergehalt, den ein Boden unter natürlichen Bedingungen halten kann.
- permanenter Welkepunkt (PWP): Der permanente Welkepunkt beschreibt den pflanzenartabhängigen Wassergehalt eines Bodens, bei dessen Unterschreitung kein pflanzenverfügbares Wasser mehr vorhanden ist (aus: Müller, Tibor: „Wörterbuch und Lexikon der Hydrogeologie“). Er ist daher der niedrigste Wassergehalt, den ein Boden unter natürlichen Bedingungen erreicht. Er ist von der Boden- und Pflanzenart abhängig.
- nutzbare Feldkapazität (nFK): Der Teil der Feldkapazität, der von den Pflanzen durch die Wurzeln aufgenommen werden kann, wird nutzbare Feldkapazität genannt (aus: Müller, Tibor: „Wörterbuch und Lexikon der Hydrogeologie“). Die nutzbare Feldkapazität ergibt sich somit aus der Differenz Feldkapazität – permanenter Welkepunkt ($nFK = FK - PWP$).

- effektive Wurzeltiefe (W_e): Die effektive Wurzeltiefe liegt etwa bei 50 – 60 % der maximalen Wurzeltiefe. Sie kennzeichnet das Bodenvolumen, in dem der Bodenwasserhaushalt intensiv durch pflanzlichen Wasserverbrauch beeinflusst ist.

Da sich die Neubildungsberechnung nach Bodenwasserbilanz in erster Linie auf natürliche unbebaute Flächen bezieht, ein Grundwassermodell in der Regel aber auch bebaute Flächen umfasst, werden diese Flächen in SPRING weiterhin durch die Methode der Neubildungsberechnung nach Schroeder und Wyrwich berücksichtigt.

Das Neubildungsberechnungsverfahren nach Bodenwasserbilanz, so wie es derzeit in SPRING implementiert ist, befindet sich in einer Entwicklungsphase. Daher können sich in Zukunft durchaus Änderungen hinsichtlich der benötigten Daten und Eingabedateien ergeben. Die aktuellste Programmbeschreibung findet sich immer in der Webhilfe auf unserer Homepage unter dem Menüpunkt „Download&Support: Handbuch SPRING 7“.

2.3.4.1 Eingangsdaten in der Modelldatei

Folgende Daten müssen für alle Elemente bzw. Knoten flächendeckend für die oberste Element- bzw. Knotenschicht in der Modelldatei vorliegen:

- Geländehöhen (Attribut GELA): Zur Berechnung der Reliefenergie bzw. des Gefälles zur Berücksichtigung des neigungsbedingten Oberflächenabflusses nach Schroeder und Wyrwich.
- Eichpotentiale: Zur Berechnung des Flurabstands. Die Umrechnung von Knoten- in Elementwerte erfolgt automatisch innerhalb der Neubildungsberechnung.
- Bodentyp (Attribut NSBT): Der Bodentyp muss entsprechend der folgenden Klassifizierung in der Modelldatei als Elementattribut angegeben werden:

Bodentyp	Klassifizierung (= NSBT)
Terrestrische Sandböden	0
Terrestrische Lehmböden	10
Semiterrestrische Böden	20, 21, 22

- Versiegelungsgrad (Attribut VERS): Der Versiegelungsgrad wird elementweise in der Einheit [%] angegeben. Er ist erforderlich zur Berechnung des versiegelungsbedingten Oberflächenabflusses.
- Flächennutzungs-kategorie (Attribut NSFN): Die Flächennutzungs-kategorie muss für alle Elemente entsprechend der folgenden Klassifizierung in der Modelldatei angegeben werden:

Flächennutzung	Klassifizierung (= NSFN)
Acker, Grünland	0
Laubwald	1
Mischwald	2
Nadelwald	3
Bebauung	4
Wasserflächen	5

2.3.4.2 Instationäre Klimadaten

Zunächst ist eine Datei mit Tageswerten zu Niederschlag, potentieller Verdunstung (Einheit [mm]) und Temperatur bereitzustellen. Die Spalte mit den Temperaturen wird zwar zurzeit nicht genutzt, wird aber vom Programm erwartet. Die Datei ist als "formatierter Text (Leerzeichen getrennt)" mit dem Dateinamen "niedevap.prn" im Verzeichnis der Modelldatei bereitzustellen. Jede Spalte der Datei muss 10 Zeichen breit sein.

Beispiel der Datei "niedevap.prn":

```

      1      2      3      4
1234567890123456789012345678901234567890
-----
Datum      N [mm]      ETp(Haude)T [14:30h]
01.11.2004      0.0      0.67170      11.2
02.11.2004      0.0      0.36714      9.8
03.11.2004      1.4      0.66568      13.5
04.11.2004      3.3      0.18652      13.2
05.11.2004      1.2      0.81364      10.7
06.11.2004      2.2      0.62583      10.6
07.11.2004      0.0      0.81942      9.8
08.11.2004      0.0      1.03164      9.6
-----
      1      2      3      4
1234567890123456789012345678901234567890

```

2.3.4.3 Globale Bodenparameter

Globale Bodenparameter können in der Datei "bopa.txt" definiert werden. Die Datei ist im Verzeichnis der Modelldatei bereitzustellen. Ist eine solche Datei vorhanden, werden die Standardparameter durch diese ersetzt. Befindet sich keine Datei "bopa.txt" erstellt, werden folgende Standwerte benutzt.

Aufbau der Bodenparameterdatei "bopa.txt" mit Standardwerten:

Zeile	Bedeutung	Standardwerte
1	Mittlere Feldkapazität in [%]: 1. Wert: Sandböden, 2. Wert: Lehmböden	10., 15.
2	Effektive Wurzeltiefe in [dm]: 1. Wert: Acker/Grünland, bebaute Bereiche, 2. Wert: Wald	3., 6.
3	Permanenter Welkepunkt in[%]: 1. Wert: Sandböden, 2. Wert: Lehmböden	3., 4.
4	Korrekturfaktor möglicher Übersättigung über Feldkapazität	1., 1.

Beispiel einer Bodenparameterdatei "bopa.txt":

```

20., 40
3., 6
4., 10
1.0, 1.2

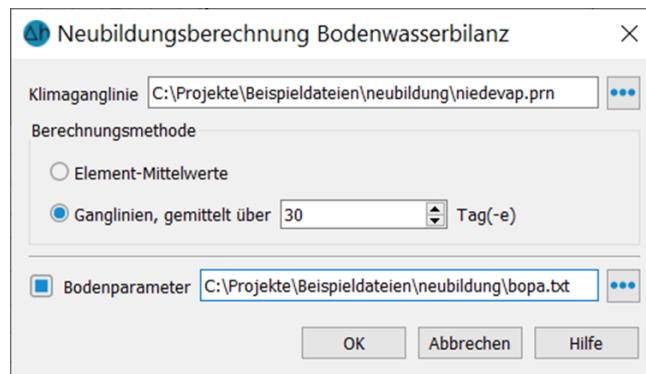
```

Mit dem Korrekturfaktor kann eine Übersättigung des Bodens über die Feldkapazität berücksichtigt werden, die möglicherweise bei schweren Böden erst nach 1 bis 2 Tagen abgebaut ist. Bei Sand ist der Korrekturfaktor mit 1, bei schweren Böden ist er maximal mit 1,2 anzusetzen (aus: DVWK 238/1996).

Es wird keine kapillare Aufstiegsrate angesetzt.

2.3.4.4 Eingabedialog in SPRING

Im Gegensatz zu den Berechnungsmethoden nach Schroeder und Wyrwich bzw. nach Meßer 2008 öffnet sich nach Anklicken des Menüpunkts "Neubildung berechnen" ein weiterer Dialog, der folgende Eingaben erfordert:



Klimaganglinie

Im Eingabefenster wird der Name der Datei mit den instationären Klimadaten eingegeben.

Berechnungsmethode

Bei Aktivierung des Buttons "Element-Mittelwerte" wird die mittlere Grundwasserneubildung (FLAE) für jedes Element berechnet.

Bei Aktivierung des Buttons "Ganglinien, gemittelt über" wird für alle x Tage die jeweils über das Intervall gemittelte Neubildung für jedes Element berechnet.

Die instationären Werte werden während des Berechnungsvorgangs intern abgelegt und können über *Extras* → *Instationär* → *Instationäre Eingabedatei exportieren...* in einer instationären Eingabedatei gespeichert werden.

Bodenparameter

Bei Aktivierung des Kontrollkästchens kann eine Datei mit benutzerspezifischen Bodenparametern angegeben werden. Ansonsten wird die Datei "bopa.txt" mit den voreingestellten Werten bei der Berechnung berücksichtigt.

2.4 Berechnung einer instationären Neubildungsrate

Im Rahmen der Forschungsarbeit *"Grundwasserstandsentwicklung infolge des Klimawandels am Beispiel der Stadt Düsseldorf"* (delta h Ingenieurgesellschaft mbH / Institut für Angewandte Physische Geographie RUB, 2014) wurde ein Verfahren zur Ermittlung instationärer flächen-differenzierter Grundwasserneubildungsraten entwickelt, welches auf Grundlage eines Bodenwasser-Haushaltsmodells basiert (vgl. „Zepp, H., König, C., Kranl, J. et al.: „Implizite Berechnung der Grundwasserneubildung (RUBINFLUX) im instationären Grundwasserströmungsmodell SPRING. Eine neue Methodik für regionale, räumlich hochaufgelöste Anwendungen“. *Grundwasser* (2017) 22: 113.<https://doi.org/10.1007/s00767-017-0354-3>“).

Das Verfahren ist unter dem Menüpunkt RUBINFLUX in SPRING integriert.

Die folgende Abbildung zeigt die relevanten Bilanzkomponenten zur Ermittlung der täglichen Sickerwassermenge in Abhängigkeit der Niederschlagsmenge, die im Grundwassermodell als "Grundwasserneubildung" angesetzt wird.

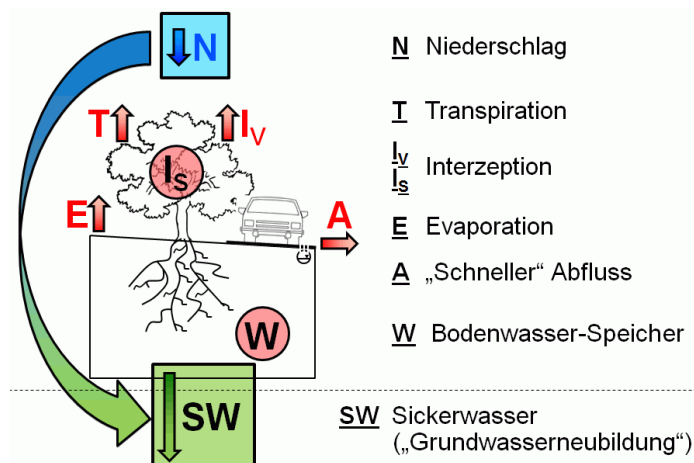


Abb. 121: Bilanzgrößen zur Ermittlung der Grundwasserneubildung

- Transpiration, Interzeption und Evaporation sind die Komponenten der tatsächlichen ("aktuellen") Verdunstung. Sie werden durch physikalische (z.B. Wärmeabstrahlung), astronomische (z.B. Sonnenstand) und klimatische (z.B. aktuelle Temperatur) Zwänge sowie standort-bedingte Einschränkungen (z.B. Nutzung, Bewuchs, Boden) limitiert.
- "Schnelle" Abflusskomponenten werden durch die Faktoren Gefälle, Bodennutzung, -klasse und -feuchte (Anteil A_{SCS}^1) sowie dem Befestigungs- bzw. Versiegelungsgrad am betrachteten Standort (Anteil A_{VERS}) bestimmt. Die Niederschlagsmenge N wird dabei um den Anteil des schnellen Abflusses aus bodenabhängigen Parametern und Gefälle (A_{SCS}) reduziert.
- Bodenwasser-Speicher: Seine Größe setzt sich zusammen aus den Anteilen der (nutzbaren) Feldkapazität und des permanenten Welkepunkts des Bodens.

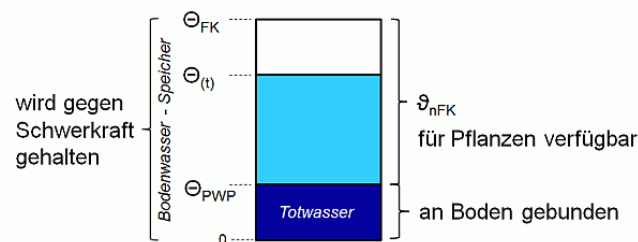


Abb. 122: Wasser-Anteile im Bodenwasserspeicher

2.4.1 Eingangsdaten in der Modelldatei

Folgende Daten müssen für alle Elemente in der Modelldatei vorliegen:

- Versiegelungsgrad (Attribut **VERS**, optional): Der Versiegelungsgrad wird in der Einheit [%] angegeben. Er ist erforderlich zur Berechnung des versiegelungsbedingten "schnellen" Abflusses.
- Geländehöhe (Attribut **GELA**): Aus der Geländehöhe wird automatisch die Lagehöhe der Elemente berechnet (früher: Attribut **NKLH**). Die Lagehöhe ist für die Berechnung der Grasreferenzverdunstung erforderlich und bezieht sich auf das Niveau des Meeresspiegels (z.B. m NN, m NHN, mamsl).
- Geographische Breite (Attribut **NKBR**): **NKBR** ist für die Berechnung der Grasreferenzverdunstung erforderlich. Die Einheit ist [°]. Falls ein Koordinatenbezugssystem definiert ist, wird die geographische Breite automatisch berechnet.
- Flächennutzung (Attribut **NKFN**) [Nr.]: Die Angabe der Flächennutzung erfolgt über die ID-Zuordnung gemäß den Definitionen in den Dateien für die globalen Standortparameter (s.u.). Sofern keine eigenen Definitionen vorgenommen werden, entsprechen die Nutzungsarten folgender Tabelle:

ID	Nutzung
1	Grünland
2	Acker

¹ nach Soil Conservation Service (U.S. Department of Agriculture), modifiziert nach WILLIAMS

ID	Nutzung
3	Gartenland
4	Baumschule / Obstplantage
5	Fließgewässer
6	Stehendes Gewässer
7	Wohnbau, Industrie, Gewerbe, Schiffsverkehr, Flughafen, öffentliche Einrichtungen, sonstige Flächen mit Gebäuden
8	Gemischte Nutzung (Versiegelt + zugehörige Freifläche, z.B. Bauernhof), Brachflächen
9	Halde
10	Tagebau, Grube, Steinbruch
11	Sport-, Freizeit- und Erholungsfläche, Friedhof, Spielplätze
12	Verkehrsflächen
13	Nadelwald, Baumbestand/Baumreihe aus Nadelholz
14	Laubwald, Baumbestand/Baumreihe aus Laubholz
15	Hecken, Gebüsch, Streuobst
16	Mischwald, Baumbestand/Baumreihe aus Laub- und Nadelholz bzw. ohne Differenzierung
17	Röhricht, Schilf
18	unbekannte Nutzung
19	vegetationslose Fläche
20	Heide

Die Definition und Bezeichnung der Bodenarten nach Bodenkundlicher Kartieranleitung (KA) und der Bodenartengruppe des Geologischen Dienstes NRW ist in der folgenden Tabelle aufgezeigt (Quelle: Geologischer Dienst NRW):

Bodenarten gruppe	Bodenarten nach KA4 und KA5			Bodenartengruppe GD NRW	
	Sande nach KA5			substantivische Bezeichnung	attributive Bezeichnung
1	T	Ton		lehmgige Tone	lehmig-tonig
	Tl	lehmgiger Ton			
	Ts4	stark sandiger Ton			
	Ts3	(mittel) sandiger Ton			
	Ts2	schwach sandiger Ton			
	Tu2	schwach schluffiger Ton			
2	Lt2	schwach toniger Lehm		tonige Lehme	tonig-lehmig
	Lt3	(mittel) toniger Lehm			
	Lts	sandg-toniger Lehm			
	Tu3	(mittel) schluffiger Ton			
3	Lu	schluffiger Lehm		tonige Schluffe	tonig-schluffig
	Ut2	schwach toniger Schluff			
	Ut3	(mittel) toniger Schluff			
	Ut4	stark toniger Schluff			
	Uls	sandig-lehmiger Schluff			
	Tu4	stark schluffiger Ton			
4	Ls2	schwach sandiger Lehm		sandige Lehme	sandig-lehmig
	Ls3	(mittel) sandiger Lehm			
5	Ls4	stark sandiger Lehm		stark lehmige Sande	stark lehmig-sandig
	Sl4	stark lehmiger Sand			
6	St3	toniger Sand		sandige Schluffe	sandig-schluffig
	U	Schluff			
	Us	sandiger Schluff			
	Su3	(mittel) schluffiger Sand			
	Su4	schwach schluffiger sand			
	Slu	schwach toniger Sand			
7	Sl3	(mittel) lehmiger Sand		lehmgige Sande	lehmig-sandig
	Sl2	schwach lehmiger Sand			
	Su2	schwach schluffiger Sand			
	St2	schwach toniger Sand			
8	S	Sand mit		Sande	sandig
	FFS	Feinstsand			
	FS	Feinsand			
	Fsms	mittelsandiger Feinsand			
	FSgs	grobsandiger Feinsand			
	MS	Mittelsand			
	MSfs	feinsandiger Mittelsand			
	MSgs	grobsandiger Mittelsand			
GS	Grobsand				
9	Grobbodenarten (Skelettbodenarten)			Skelettböden	feinbodenarm
	Kl	Kies			
	GR	Grus			
	X	Steine			
	O	Schotter			
0	organogene Bodenarten			Torfe	organogen
	H	Torf mit			
	HM	Feinhumus			
	HN	Niedermoortorf			
	Hnu	Übergangsmoortorf			
	HH	Hochmoortorf			

Abb. 123: Bodenartengruppen des Geologischen Dienstes NRW

Die Einteilung der Bodenarten bezieht sich auf die oberen 40 cm der oberen Bodenschicht.

- Bodenklasse (Attribut NKBT) [Nr.]: Die Angabe der Bodenklasse erfolgt über die ID-Zuordnung gemäß den Definitionen in den Dateien für die globalen Standortparameter (s.u.). Sofern keine eigenen Definitionen vorgenommen werden, wird die Verschlüsselung nach BK50 zugrunde gelegt mit der Ausnahme, dass das **Attribut NKBT in der Modelldatei NICHT = 0 sein darf!** In dem Fall sollte der Anwender NKBT = 1 setzen.

Bodenartengruppe der obersten Bodenartenschicht in SPRING in Anlehnung an die Definitionen des Geologischen Dienstes NRW:

ID	Bodenart	ID	Bodenart
0	Torf, Feinhumus, künstliches Material	4	sandig-lehmig
1	lehmig-tonig	5	stark lehmig-sandig
2	tonig-lehmig	6	sandig-schluffig
3	tonig-schluffig	7	lehmig-sandig
4	sandig-lehmig	8	sandig
9	feinbodenarm		

- Klimadaten-ID (Attribut NKID) [Nr.]: Für die Zuordnung der Klimadaten-Zeitreihen ist den Elementen eine Klimadaten-ID zuzuordnen. Die Klimadaten-ID ist Teil des Namens der Datei, welche die zugehörigen Klimadaten für das entsprechende Element enthält. Beispiel: Klimazone 1008 → NKID = 1008 → Dateiname = input_id1008.csv. Die erste Spalte enthält immer das Datum, danach gibt es folgende Möglichkeiten:

Spaltenname	Bedeutung	Einheit
P	Niederschlag	[mm]
T	Temperatur	[°C]
S	Sonnenscheindauer	[h/d]
Statt Sonnenscheindauer auch Globalstrahlung möglich		
RG	Globalstrahlung	[kWh/m²]
ea	Dampfdruck	[hPa]
Statt Dampfdruck auch relative Luftfeuchte möglich		
RH	Rel. Luftfeuchtigkeit	[%]
u2	Windgeschwindigkeit in 2 m Höhe	[m/s]
ET0	Grasreferenzverdunstung	[mm/d]

Die Spaltenreihenfolge ist bei Einhaltung dieser Bezeichnungen beliebig.

Bei abweichenden Spaltennamen muss Kompatibilität erhalten bleiben, daher ist die Reihenfolge in dem Fall wichtig:

- Datum + zwei Spalten: P und ET0
- Datum + fünf Spalten: P, T, S oder RG, ea oder RH, u2

Die Auswahl zwischen S oder RG bzw. ea oder RH erfolgt in den „Erweiterten Einstellung“ des jeweiligen Dialogs.

- Im RUBINFLUX-Dialog für die input_ids lässt sich über einen Rechtsklick der Faktor für die Windgeschwindigkeit bestimmen.

Diese Zeitreihen müssen durch den Anwender bereit gestellt werden. Alle Klima-Zeitreihen müssen mit dem gleichen Anfangsdatum beginnen und in Tagesschritten aufgelöst sein. Das Datei-Verzeichnis wird innerhalb des Eingabe-Menüs abgefragt.

- Wassergehalt bei Feldkapazität (Attribut NKFK): Der Wassergehalt bei Feldkapazität kann z.B. anhand der BK50 ermittelt werden. Die Einheit des Attributs NKFK ist [Vol.-%].
- Wassergehalt bei permanentem Welkepunkt (Attribut NKWP): Der Wassergehalt bei permanentem Welkepunkt kann z.B. anhand der BK50 ermittelt werden. Die Einheit des Attributs NKWP ist [Vol.-%].
- Nutzbare Feldkapazität (Attribut NNFK): Das Attribut kann alternativ zu den beiden vorgenannten Attributen NKFK und NKWP oder in Kombination verwendet werden. Die Einheit des Attributs NNFK ist [Vol.-%].

Für die Berechnung gilt folgendes:

NKFK und NKWP definiert --> bevorzugte Verwendung

NKFK und NNFK definiert --> Automatische Berechnung von NKWP = NKFK - NNFK

NNFK und NKWP definiert --> Automatische Berechnung von NKFK = NNFK + NNWP

nur NNFK definiert --> es wird NNFK direkt benutzt

Das Berechnungsergebnis ist bei allen 4 Varianten gleich.

Für die Wassergehalt-Attribute NKWP und NKFK gilt entgegen der BK50-Einordnung (z.B. bei Wasserflächen oder Auffüllungen):

$$0 < NKWP < NKFK$$

2.4.2 Eingabedialog in SPRING

Über den Menüaufruf *Attribute* → *Berechnen* → *Neubildung* → *RUBINFLUX...* erscheint zunächst folgendes Untermenü:



Die ersten drei Menüpunkte ermöglichen eine dialogbasierte Erstellung der Klimazeitreihen (*input_idNummer.csv*) aus den verschiedensten Wetter- und Klimadaten wie z.B. HYRAS-Rasterdaten oder DWD-Stationsdaten.

Jeder dieser drei Menüpunkte wird aufgrund seiner Komplexität in einem eigenen Kapitel beschrieben.

- **NKBR aus Koordinaten:** Über diesen Menüpunkt lässt sich das Attribut NKBR (geographische Breite) direkt anhand der georeferenzierten Knotenkoordinaten ermitteln. Die Datenart wird den Elementen direkt zugewiesen.
- **Neubildung berechnen...** Grundeinstellungen: Liegen alle Eingangsdaten (erforderliche Modelldaten und Klimazeitreihen) vor, werden hier die instationären Neubildungsraten entweder für eine instationäre Eingabedatei oder als mittlere Neubildung für die Modelldatei berechnet. Alternativ kann während einer instationären Strömungsberechnung mit den gleichen Eingabeparametern eine „on-the-fly“-Berechnung der täglichen Neubildungsraten durchgeführt werden. Näheres dazu findet sich im Kapitel „Instationäre Strömungsberechnung – RUBINFLUX“ im Benutzer-Handbuch.

Es erscheint das Eingabefenster "Grund-Einstellungen":

Klimazeitreihen - Dateien

Hier wird festgelegt, in welchem lokalen Ordner sich die Klima-Zeitreihen-Dateien befinden. Das Datei-Präfix muss für alle Klima-Dateien identisch sein. Beispiel:

Präfix = input_id, dann lauten die Dateinamen: input_id501.csv (für Elemente mit NKID=501), input_id50.csv (für Elemente mit NKID=50) usw. Alle Klima-Zeitreihen müssen mit dem gleichen Anfangsdatum beginnen. Im Normalfall werden die input_id-Einstellungen anhand der Spaltennamen automatisch erkannt. Daher ist die Aktivierung des Buttons „Erweiterte Einstellungen“ nur erforderlich, wenn die Spaltennamen uneindeutig sind.

Typisierte Standortparameter

In SPRING werden Dateien mit voreingestellten Standard-Standortparametern bezüglich Bodentyp (`_soil`), Vegetationsperiode (`_season`), Blattflächenindex (`_lai`), SCS-Parametern (`_cn2`), Simulationstiefe (`_simdepth`) und Bestandskoeffizienten (`_kc_season`, `_kc_month`) mitgeliefert. Sie finden sich im Verzeichnis "C:\Users\Public\Documents\SPRING\Konfig" (Windows 10).

Diese Dateien können jedoch auch projekt- oder benutzerspezifisch zur Verfügung gestellt werden und sollten dann im zugehörigen Projektordner/-Verzeichnis abgelegt werden. Der zugehörige Pfad kann an dieser Stelle gewählt werden.

Für das Format der *.csv-Dateien gilt: Spalten-Trennzeichen = Semikolon, Dezimal-Trennzeichen = Punkt oder Komma.

Während der Berechnung der instationären Neubildung erfolgt schlussendlich eine "on-the-fly"-Verlinkung der zugrunde gelegten Tabellen anhand der im Modell vorhandenen Elementdaten

Grundwasser

Durch Aktivieren der Buttons *fest* oder *Jahresgang* kann gewählt werden, welcher Grundwasserstand in der Neubildungsberechnung berücksichtigt werden soll. In diesem Fall wird die in den Standortparametern festgelegte Simulationstiefe überschrieben, wenn der vorgegebene Wert erreicht wird. Bei Austritt des Grundwassers an der Geländeoberfläche (Flurabstand ≥ 0) geht der Neubildungsanteil in den direkten Abfluss über. Bei der Auswahl des Buttons *fest* werden die EICH-Potentiale der Modelldatei zur Berechnung verwendet. Bei Auswahl des Buttons *Jahresgang* werden die minimalen und maximalen auftretenden Flurabstände für die Berechnung zugrunde gelegt. Der minimale Flurabstand entspricht dem Flurabstand bei hohen Grundwasserständen (Attribut FHGW). Der maximale Flurabstand entspricht dem Flurabstand bei niedrigen Grundwasserständen (Attribut FNGW). Die Attribute müssen vom Anwender zuvor aus entsprechenden Zeitreihen oder Grundwassergleichenplänen ermittelt und den Modellknoten zugewiesen werden.



Abb. 124: Beispiel eines konstruierten Grundwasser-Jahresgangs

Zur Berücksichtigung des *Kapillaren Aufstiegs* ist die Aktivierung von *fest* oder *Jahresgang* zwingend erforderlich.

Zeitsteuerung

Zunächst wird das Bezugsdatum für die instationäre Datei festgelegt.

Mit der Eingabe „Anzahl Tage für Initialisierung“ lässt sich der Abschnitt einer Zeitreihe festlegen, welcher in der Berechnung **vor** dem Bezugsdatum berücksichtigt werden soll.

Mit der Angabe „Anzahl Tage für die Auswertung“ wird festgelegt, über welchen Zeitraum die Daten ab dem Bezugsdatum berechnet oder exportiert werden sollen.

In den erweiterten Einstellungen muss der Anwender über die Art der Mittelung festlegen, ob die instationäre Neubildung für jeden Tag (Mittelung = 1) oder z. B. nur für jeden 10. Tag (Mittelung = 10, entspricht dem Mittelwert über 10 Tage) berechnet wird.

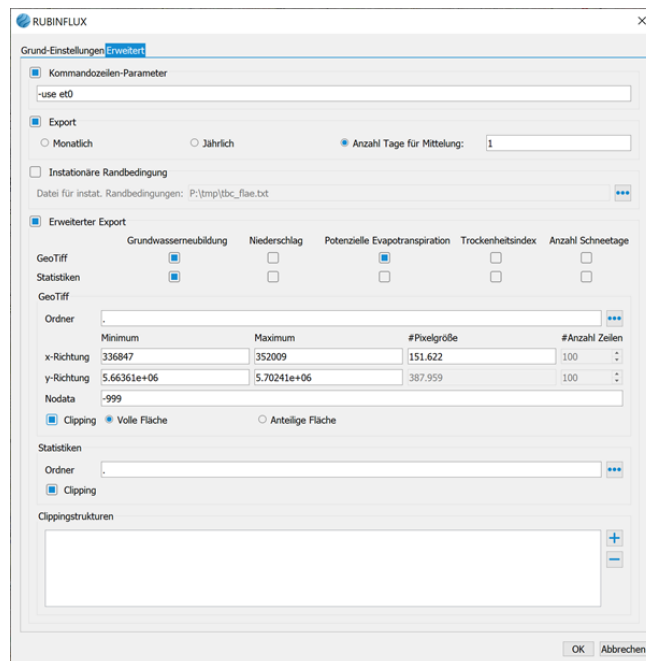
Ausgabe

Durch Aktivieren der ersten Checkbox werden die Element-Mittelwerte der Neubildung (Attribut GW-N) und der schnellen Abflusskomponenten, die sich aus der angegebenen Zeitsteuerung ergeben, berechnet. Die schnelle Abflusskomponente aus bodenabhängigen Parametern A_{SCS} wird auf das Attribut NKAG und die versiegelungsabhängige Abflusskomponente A_{VERS} wird auf das Attribut NKAV zugewiesen.

Anhand der übrigen Checkboxen können wahlweise andere Ergebnisdaten der Neubildungsberechnung den Elementen zugewiesen werden.

- Neubildung berechnen...Erweitert

Es erscheint das folgende Eingabefenster:



Kommandozeilen-Parameter

Die Programmsteuerung über die Kommandozeilen-Parameter dient derzeit ausschließlich zu Weiterentwicklungszwecken. Die Benutzung ist den Entwicklern vorbehalten.

Export

Hier muss der Anwender über die Art der Mittelung festlegen, ob die instationäre Neubildung für jeden Tag (Mittelung = 1) oder z. B. nur für jeden 10. Tag (Mittelung = 10, entspricht dem Mittelwert über 10 Tage) oder monatlich oder jährlich berechnet wird.

Instationäre Randbedingung

Soll eine instationäre Eingabedatei mit der Grundwasserneubildung erstellt werden, wird diese hier festgelegt. Die berechnete Grundwasserneubildung wird dann gemäß dem gewählten Mittlungsfaktor z.B. für jeden Tag oder nur für jeden 10. Tag als instationäre Randbedingung weggeschrieben.

Erweiterter Export

Die berechneten Daten können als GeoTiff-Dateien exportiert werden. Hierfür kann auch ein Ausschnitt definiert werden.

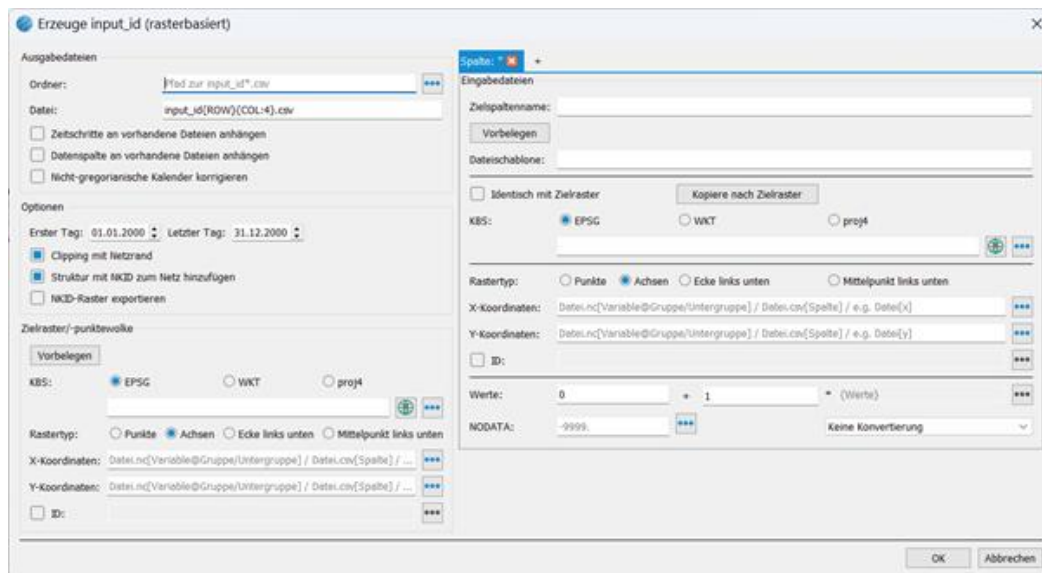
Die Ausgabe von Statistiken ist ebenfalls möglich.

Durch die Angabe eines Clipping-Bereichs (Einlesen vorhandener (Flächen-/Polygon-)Strukturen) können die Daten auch abschnittsweise exportiert werden. Es kann definiert werden, ob ein durch die Struktur "angeschnittenes" Element trotzdem mit seiner *vollen* Fläche oder nur mit seiner *anteiligen* Fläche berücksichtigt werden soll.

2.4.2.1 Erzeugen von input_ids (rasterbasiert)

Aufruf durch *Attribute* → *Berechnen* → *Neubildung* → RUBINFLUX → *Erzeuge input_id (rasterbasiert)*...

Es erscheint folgendes Eingabefenster:



Anmerkung:

Die rechte Seite des Dialogfensters dient der Definition der Eingangsdaten (Klimazeitreihen z.B. aus HYRAS oder anderen Wetter-/Klimarasterdaten).

Die linke Seite des Dialogs beschreibt die Ausgabemechanismen für die in SPRING für die Neubildungsberechnung mit RUBINFLUX benötigten *input_idNr.csv*-Dateien.

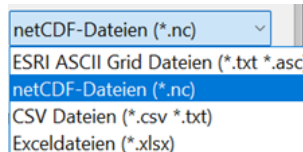
Angaben in geschweiften Klammern können vom Anwender editiert werden oder die Zellen werden vom Programm automatisch ausgefüllt. Sie beschreiben eine Maske zum Einlesen von Daten.

Eingabedaten (rechte Seite)

Die Vorgehensweise wird anhand von HYRAS-Niederschlagsrastern in Kombination mit EVAPO-P-Rastern und HYRAS-Temperaturrastern (alle vom DWD) beschrieben. Für jede zu importierende Datenart wird rechts oben ein eigener Reiter angelegt. Ihre Reihenfolge entspricht der Reihenfolge der Spalten in den Ausgabedateien. Die Reihenfolge kann per drag&drop verändert werden.

(1) Die erste Spalte sollte für die gezeigte Kombination immer der Niederschlag P sein, dafür im Feld **Zielspaltenname: P** eingeben.

(2) Dann mit der Taste **Vorbelegen** zu einer *.nc-Datei (NETCDF-Format) z.B. *pr_hyras_1_1931_v5-0_de.nc* mit HYRAS-Niederschlags-Daten navigieren und diese auswählen. Da das NETCDF-Format umfangreiche Metadaten enthält, füllen sich weitere Felder auf der rechten Seite automatisch.



(3) Jetzt muss die eingegebene Dateischablone verallgemeinert werden, damit das Programm die Dateien aller gewünschten Jahre finden kann. HYRAS-Daten sind als Jahresdaten in jeweils einer Datei gespeichert. Die Jahreszahl der Dateischablone wird manuell in {YYYY} geändert.

Beispiel:

Dateischablone vorher:

..\Hyras\pr_hyras_1_1931_v5-0_de.nc

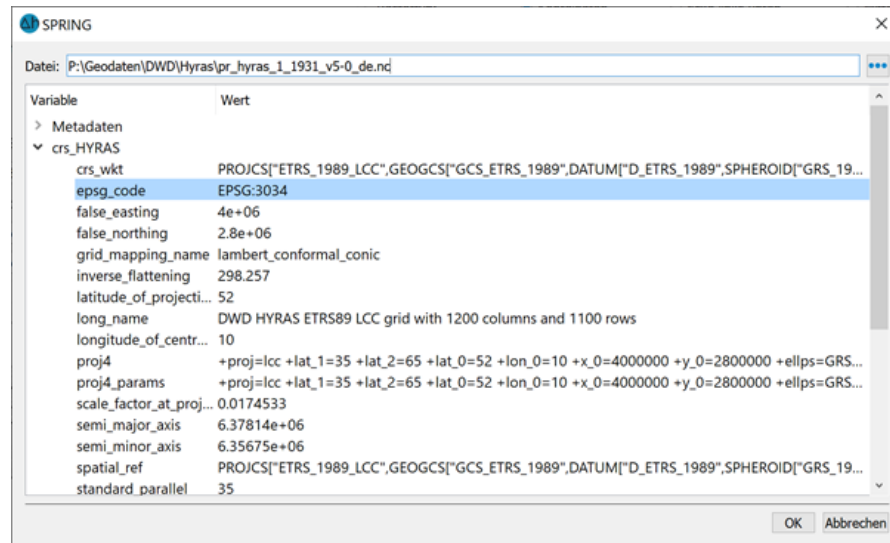
Dateischablone nachher (verallgemeinert):

..\Hyras\pr_hyras_1_{YYYY}_v5-0_de.nc

Hinweis: Es gibt bei Zeitreihen für Klimaprojektionen manchmal Rasterdateien, die jeweils 5 Jahre enthalten. Die Eingabe in der Dateischablone muss dann wie folgt angepasst werden:

- {YYYY%5} bedeutet gerundet auf "Rest 5", z.B. 2020, 2025, 2030, ...
- {YYYY%5+1} berechnet erst "Rest 5" und addiert dann 1, z.B. 2021, 2026, 2031, ...
- Diese Methode funktioniert nur bei Jahren und nur wenn 4 Ziffern für das Jahr verwendet werden.

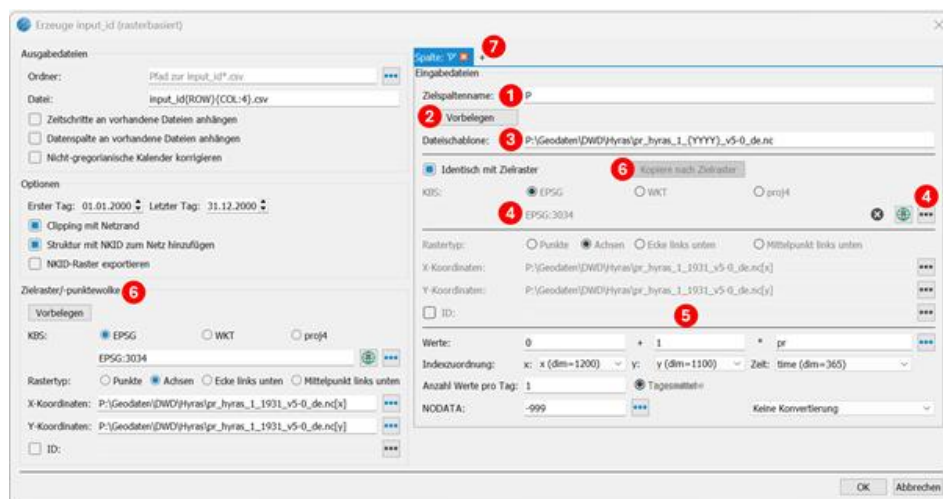
(4) Das Koordinatenbezugssystem (**KBS**) der HYRAS-Daten wird ausgefüllt, indem man  drückt (nur bei NETCDF-Dateien) und dort die Zeile **epsg_code** auswählt. Alternativ kann es mit  manuell ausgewählt werden:



(5) Alle weiteren Parameter, die für das korrekte Einlesen der HYRAS-Daten benötigt werden, wurden bereits automatisch belegt. Über den Rastertyp **Achsen** und die Definition der **X- und Y-Koordinaten** erfolgt der räumliche Bezug. Bei den HYRAS-Werten sind keine Korrekturfaktoren notwendig. Der **NODATA-Wert** wird ebenfalls aus den Metadaten eingelesen.

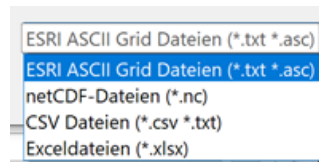
(6) Die Zeitreihen verwenden verschiedene Rastergrößen. Die HYRAS-Niederschlagsdaten liegen in einem 1x1 km-Raster vor, während die Evapotranspirationsdaten in einem 5x5-km-Raster vorliegen. Es wird empfohlen, das feinere HYRAS-Raster als Zielraster für die Ausgabe nach SPRING zu verwenden. Dies geschieht automatisch über die Taste **Kopiere nach Zielraster**. Dadurch wird automatisch der Bereich **Zielraster/-punktewolke** auf der linken Seite der Eingabemaske ausgefüllt und das Kästchen **Identisch mit Zielraster** aktiviert.

Die Eingabemaske sieht jetzt so aus:



(7) Die zweite Spalte wird mit der potentiellen Evapotranspiration über Gras belegt. Mit „+“ wird eine neue Spalte erzeugt. Der **Zielspaltenname** ist **ETO**.

(8) Mit der Taste **Vorbelegen** zu einer *.asc-Datei z.B. *grids_germany_daily_evapo_p_19910101.asc* mit EVAPO-P-Daten navigieren und diese auswählen. Auch das ESRI-ASCII-Grid-Format enthält Metadaten und es füllen sich weitere Felder auf der rechten Seite automatisch.



(9) Jetzt muss die eingegebene Dateischablone verallgemeinert werden, damit das Programm die Dateien aller gewünschten Tage finden kann. EVAPO-P-Daten sind als Tagesdaten in jeweils einer Datei gespeichert und in Unterordnern nach Jahren und Monaten sortiert. Entsprechend müssen alle Datumsangaben im Dateipfad und im Dateinamen verallgemeinert werden.

Dateischablone vorher:

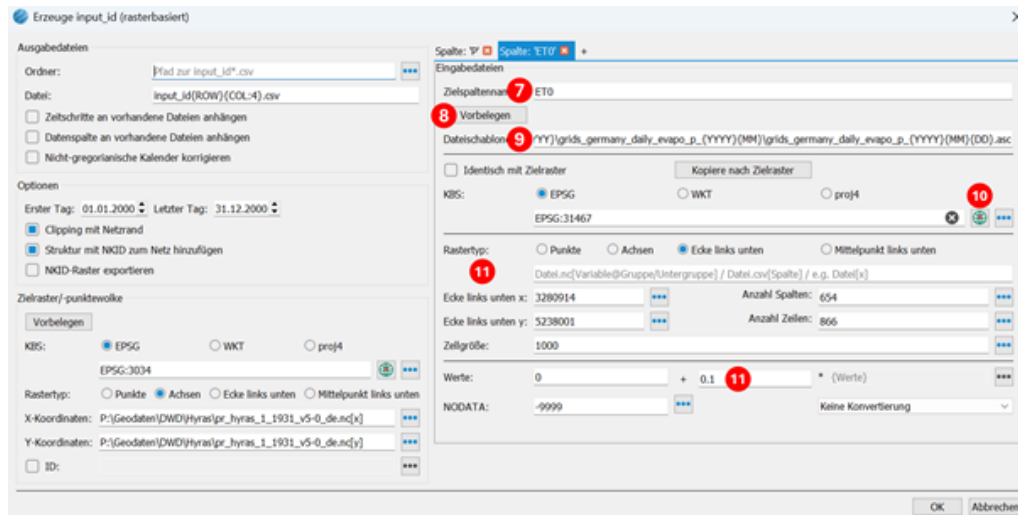
..\grids_germany_daily_evapo_p_1991\grids_germany_daily_evapo_p_199101\grids_germany_daily_evapo_p_19910101.asc

Dateischablone nachher (verallgemeinert):

..\grids_germany_daily_evapo_p_{YYYY}\grids_germany_daily_evapo_p_{YYYY}{MM}\grids_germany_daily_evapo_p_{YYYY}{MM}{DD}.asc

(10) Das Koordinatenbezugssystem (KBS) der EVAPO-P-Daten wird ausgefüllt, indem man  drückt und **EPSG: 31467** manuell auswählt.

(11) Die Parameter zum **Rastertyp** wurden bereits automatisch belegt: Ecke links unten, entsprechende Koordinaten sowie Anzahlen Spalten und Zeilen, Zellgröße. EVAPO-P-Werte liegen in der Einheit cm vor und müssen deshalb mit dem **Korrekturfaktor 0.1** multipliziert werden. Der **NODATA-Wert** wird aus den Metadaten eingelesen.



(12) Da das feinere HYRAS-Raster als Zielraaster verwendet werden soll, muss im Reiter **ET0** keine Angabe zum Zielraaster gemacht werden. Die größeren EVAPO-P-Rasterdaten werden bei der Ausgabe automatisch auf das feinere Raster konvertiert.

(13) Die dritte Spalte wird mit der Mittleren Lufttemperatur belegt. Sie wird benötigt, wenn bei der Neubildungsberechnung Schnee berücksichtigt werden soll. Mit „+“ wird eine neue Spalte erzeugt. Der **Zielspaltenname** ist **T**.

(14) Dann mit der Taste **Vorbelegen** zu einer *.nc-Datei (NETCDF-Format) z.B. *tas_hyras_1_1970_v6-1_de.nc* mit HYRAS-Temperatur-Daten navigieren und diese auswählen. Da das NETCDF-Format umfangreiche Metadaten enthält, füllen sich weitere Felder auf der rechten Seite automatisch.

(15) Jetzt muss die eingegebene Dateischablone verallgemeinert werden, damit das Programm die Dateien aller gewünschten Jahre finden kann. HYRAS-Daten sind als Jahresdaten in jeweils einer Datei gespeichert. Die Jahreszahl der Dateischablone wird manuell in {YYYY} geändert.

Beispiel:

Dateischablone vorher:

..\Hyras\Temperatur\tas_hyras_1_1970_v6-1_de.nc

Dateischablone nachher (verallgemeinert):

..\Hyras\Temperatur\tas_hyras_1_{YYYY}_v6-1_de.nc

- (16) Das Koordinatenbezugssystem (**KBS**) der HYRAS-Daten wird ausgefüllt, indem man  drückt (nur bei NETCDF-Dateien) und dort die Zeile **epsg_code** auswählt. Alternativ kann es mit  manuell ausgewählt werden.
- (17) Alle weiteren Parameter, die für das korrekte Einlesen der HYRAS-Daten benötigt werden, wurden bereits automatisch belegt. Über den Rastertyp **Achsen** und die Definition der **X- und Y-Koordinaten** erfolgt der räumliche Bezug. Temperatur-Werte müssen mit dem **Korrekturfaktor 0.1** multipliziert werden. Der **NODATA-Wert** wird ebenfalls aus den Metadaten eingelesen.

- (18) Das HYRAS-Temperatur-Raster liegt in 5x5km-Rastern vor. Da das feinere HYRAS-Niederschlags-Raster als Zielraster verwendet werden soll, muss im Reiter T keine Angabe zum Zielraster gemacht werden. Die gröberen Temperatur-Rasterdaten werden bei der Ausgabe automatisch auf das feinere Raster konvertiert.

Ausgabeformat (linke Seite)

Abschließend erfolgen die Einstellungen zu den Ausgabedateien für SPRING auf der linken Seite der Eingabemaske.

- (19) Es wird ein **Ordner** angegeben, in den die *input_idNr.csv*-Dateien geschrieben werden. Dieser Ordner ist leer, für den Fall, dass ganz neue *input_idNr.csv*-Dateien erzeugt werden sollen. Der **Datei**-Name wird jeweils automatisch aus der Zeilen- und Spaltennummer des Rasters gebildet. Diese Nummer entspricht auch dem Attribut NKID, das später jedem Netzelement für die Verknüpfung zugewiesen wird.

- (20) Der Datumsbereich für die Auswertung muss angegeben werden. Es sollte vorher sichergestellt werden, dass die entsprechenden Zeitreihenraster für diesen Zeitraum vorliegen.

- (21) Als Standard werden die Raster in Abhängigkeit vom Netzrand des Modells ausgewählt (Funktion: **Clipping mit Netzrand**). Außerdem wird eine Struktur erzeugt, mit der man das Attribut NKID einfach zuweisen kann (Funktion: **Struktur mit NKID zum Netz hinzufügen**). Zusätzlich kann man diese Struktur als separate Datei exportieren lassen (Funktion: **NKID-Raster exportieren**).

Die fertige Eingabemaske sieht so aus:

Spezielle Funktionen

(22) Die Auswahl **Nicht-gregorianische Kalender korrigieren** wird aktiviert, wenn Zeitreihen in abweichenden Kalenderformaten (ohne Schaltjahre, 30-Tage-Monate o.ä.) vorliegen. Durch Aktivierung des Kontrollkästchens werden die fehlenden Tage eingefügt (Mittelung der Daten) oder überzählige entfernt (z.B. 30. Februar).

(23) Will der Anwender eigene NKID-Nummern vergeben, kann er durch Aktivieren des Kontrollkästchens **ID**: eine eigene Datei angeben, in der individuelle Nummern abgelegt sind. Im Feld für den Namen der Ausgabedateien muss dann **{ID}** statt **{ROW}{COL:4}** eingesetzt werden.

(24) Liegen z.B. Loggerdaten des Niederschlags mit stündlichen Werten vor, wird hier festgelegt, wie Tageswerte ermittelt werden, also z.B. aufsummiert (z.B. beim Niederschlag) oder gemittelt (z.B. Temperatur).

(25) Hier wird für Zeitreihen, bei denen der Parameter Sonnenscheindauer zu Globalstrahlung wechselt oder umgekehrt, ausgewählt, welche Umrechnung stattfinden soll. Im Regelfall ist keine Konvertierung erforderlich.

(26) Die erzeugten Daten können an bereits bestehende Zeitreihendaten angehängt werden oder es kann bestehenden Dateien eine weitere Datenspalte hinzugefügt werden.

2.4.2.2 Erzeugen von input_ids (stationsbasiert)

Aufruf durch *Attribute* → *Berechnen* → *Neubildung* → *RUBINFLUX* → *Erzeuge input_id (stationsbasiert)*...

Es erscheint folgendes Eingabefenster:

Anmerkung:

Die rechte Seite des Dialogfensters dient der Einlesen und Definieren der Eingangsdaten (Klimazeitreihen aus Stationsdaten, z.B. vom Climate Data Center (CDC) des DWD).

Die linke Seite des Dialogs beschreibt die Ausgabemechanismen für die in SPRING benötigten *input_idName.csv*-Dateien.

Eingabedaten (rechte Seite)

Zeitreihen

☐ Vorgabe ETo

Parameter	Spalte	Einheit	Modifikator
Niederschlag (P)		[mm/d]	
Temperatur (T)		[°C]	
Windgeschwindigkeit 2m über Gelände (u2)		[m/s]	
Sonnenscheindauer (S)		[h/d]	
Dampfdruck (ea)		[hPa]	
NODATA:	-999		

- Zeitreihen

Falls die Stationsdaten Werte für ETO statt Temperatur, Sonnenscheindauer, etc. enthalten, wird das Kontrollkästchen aktiviert. In dem Fall muss lediglich für den Parameter "Niederschlag" der zugehörige Spaltenname der Eingabedatei zugewiesen werden.

- Parameter

An dieser Stelle werden den für RUBINFLUX notwendigen Parametern die in der Eingabedatei zugehörigen Spaltennamen zugewiesen.

Für die RUBINFLUX-Methode muss für jeden Kalendertag ein physikalisch gültiger Satz der fünf Parameter vorliegen:

	A	B	C	D	E	F
1	Datum	P	T	S	RH	U2
2	01.01.1990	0	-3	0	86	0,5804528
3	02.01.1990	0,3	-2,4	0	98	0,2902264
4	03.01.1990	0	-3,8	1,4	83	0,725566
5	04.01.1990	0	-2,7	6,1	81	1,2697405
6	05.01.1990	2,3	-2,4	0	93	0,9069575
7	06.01.1990	0	-6,4	5,7	94	1,088349
8	07.01.1990	0	-5,4	6,9	80	1,451132
9	08.01.1990	0,2	1	5,1	78	1,0520707
10	09.01.1990	0	2,5	0	95	0,9795141

Über den Modifikator kann jeder einzelne Parameter mit einem Faktor belegt werden, z.B. um den Niederschlag für einen bestimmten Zeitraum zu erhöhen. Notwendig ist die Faktorisierung bei dem Parameter "Windgeschwindigkeit", da die Werte in den Eingabedateien in der Regel die Windgeschwindigkeit in 10 m Höhe angeben und diese auf den Wert in 2 m Höhe korrigiert werden muss.

Der NODATA-Wert wird ausgelesen.

Ausgabedaten (linke Seite)

 Erzeuge input_id (stationsbasiert)

Eingabe

Stammdaten:

Zeitreihenordner:

Ausgabe

Ordner:

Dateien-Präfix: </Nr>.csv

☐ Zeitschritte an vorhandene Dateien anhängen

☐ Zeitreihen korrigieren

☐ Nicht-gregorianische Kalender korrigieren

Optionen

Erster Tag: Letzter Tag:

☒ Clipping mit Netzrand

☒ Struktur mit NKID zum Netz hinzufügen

☐ NKID-Raster exportieren

■ Eingabe

Hier wird anfangs die Datei mit den Stations-Stammdaten eingelesen (x-, y-, ID-Name) und der Pfad zu den Klimazeitreihen gesetzt.

■ Ausgabe

Es wird der Dateipfad für die zu erzeugenden Dateien festgelegt sowie das Präfix des Dateinamens. Die ID-Nummern werden dem Präfix automatisch hinzugefügt.

Die erzeugten Daten können an bereits bestehende Zeitreihendaten angehängt werden, allerdings erfolgt keine Kontrolle, ob die End- und Anfangsdaten zueinander passen.

Beim Aktivieren des Kontrollkästchen "Zeitreihen korrigieren" können Parameter mit Datenlücken durch den Parameter der jeweils nächstgelegenen, vollständig vorhandenen Messstelle ersetzt werden.

NODATA-Werte werden durch Interpolation mit der Nearest-Neighbour-Methode ersetzt.

Da Kontrollkästchen "nicht-gregorianischen Kalender korrigieren" kann angewendet werden, wenn Zeitreihen z.B. aus Klimamodellen pauschal mit 365 Tagen pro Jahr oder 30 Tagen pro Monat vorliegen. Durch Aktivierung des Kontrollkästchens werden die fehlenden Tage eingefügt (Mittelung der Daten) oder entfernt (z.B. 30. Februar).

■ Optionen

Hier wird der zu exportierende Zeitraum festgelegt.

Die zu exportierenden Daten können auf das innere Modellgebiet begrenzt werden.

Die erstellten NKID-Daten können direkt als Struktur in dem geöffneten Modell gespeichert werden und/oder zusätzlich als eigene Datei exportiert werden (Format: x, y, NKID-Nummer).

2.4.2.3 Erzeugen von Interpolationsgewichten für die input_ids

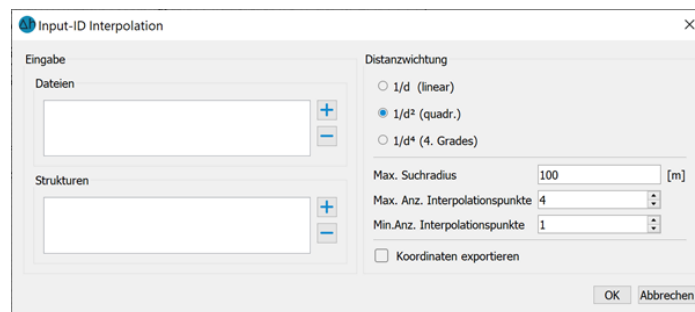
Aufruf durch *Attribute* → *Berechnen* → *Neubildung* → *RUBINFLUX* → *Erzeuge input_id Interpolationsgewichte ...*

Theorie

Bereits in den ersten Berechnungen zur Ermittlung der Grundwasserneubildungsraten wurde immer wieder festgestellt, dass es sowohl bei der direkten Verwendung der Stationsdaten als auch der 1×1 km² oder größer aufgelösten Klimadaten aufgrund der deutlich höheren räumlichen Auflösung des Grundwassermodells (Elementkanten oft < 100×100 m) zu bereichsweise sehr scharfen Grenzen bei den Ergebnissen kommt.

Um diese Effekte zu minimieren, wurde in einer Untersuchung geprüft, ob eine Interpolation der Klimaparameter auf die Stützpunkte des Modellnetzes machbar ist. Die Anwendung verschiedener Interpolationsmethoden ergab,

dass die Methode der inversen Distanzwichtung (IDW) auf Basis der neun nächstgelegenen Nachbarpunkte und einer Berücksichtigung des quadratischen Abstands zum Zielpunkt als am besten geeignet einzustufen ist. Für die Eignung der Methode spricht zusätzlich, dass sie in ähnlicher Weise vom Deutschen Wetterdienst bei der Interpolation von Niederschlagsdaten aus Stationsmessungen verwendet wird. Daher werden im Dialog die drei Wichtungsmethoden angeboten:

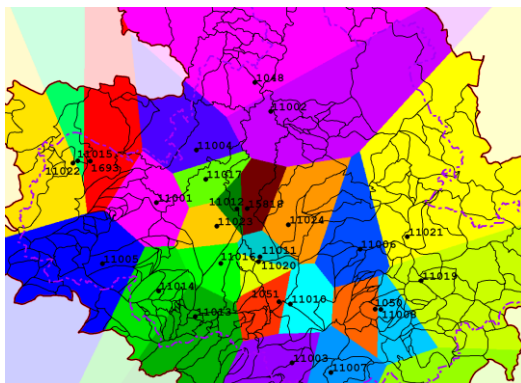


Über die Eingabefelder Dateien/Strukturen können wie bei dem Menüpunkt *Attribute* → *zuweisen* → *Durch Interpolation* Dateien im *.txt oder vergleichbaren Formaten oder im Strukturdatenformat eingelesen werden. Die Dateien enthalten die Information x, y, und input_id-Nummer der Stationen oder der Rasterpunkte.

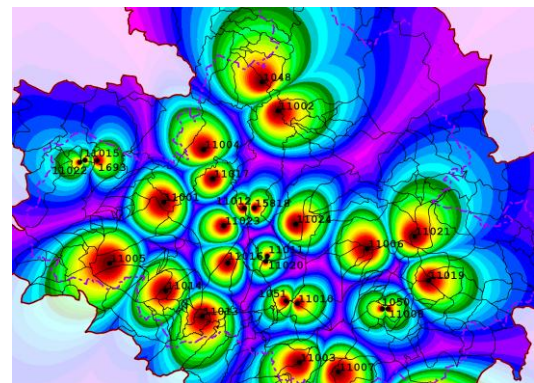
Gleichzeitig werden in der Modelldatei nur Elemente mit einer NKID-Nummer belegt, wenn die Station/Rasterpunkt im Element oder an seinen Knoten liegt. Allen anderen Elementen wird NKID = 0 zugewiesen.

Voreingestellt ist die inverse quadratische Wichtung, da hier gilt: je größer die Entfernung des Elements zum Datenpunkt, umso weniger Einfluss hat dieser Datenpunkt auf das Element. Der Suchradius sollte dem Abstand der Rasterpunkte angepasst werden, ebenso wie die Anzahl der zu berücksichtigenden Interpolationspunkte.

Die Ausgabedatei *input_id_weight.csv* enthält für jedes Element (wahlweise mit x-, y-Koordinaten des Mittelpunktes) die NKID-Nummer und deren Wichtung. Wenn diese Datei im Modellverzeichnis vorhanden ist, wird diese Wichtung in der Berechnung mit dem Modul *Sitra* automatisch berücksichtigt. Die folgende Abbildung zeigt die Wirkung der Wichtung von Stations-/Rasterparametern.



Parameter ohne Wichtung



Parameter mit inverser quadratischer Wichtung

Eine resultierende "input_id_weights.csv" (mit Ausgabe der Koordinaten) hat folgendes Aussehen:

elementID	X	Y	NKID	weight	NKID	weight	NKID	weight	NKID	weight	NKID	weight	NKID	weight	NKID	weight	NKID	weight
1	394513	5.65e+06	1702412	0.786595	1702512	0.0571111	1702413	0.0472995	1702411	0.0301107	1702513	0.0207744	1702511	0.020715	1702612	0.0116636	1702414	0.0107749
2	394538	5.65e+06	1702412	0.783745	1702512	0.0580653	1702413	0.0477983	1702411	0.0301485	1702513	0.027147	1702511	0.0204888	1702612	0.0118183	1702414	0.0108975
3	394563	5.65e+06	1702412	0.780877	1702512	0.0590302	1702413	0.0462927	1702411	0.0307989	1702513	0.0275423	1702511	0.0205943	1702612	0.0119801	1702414	0.0110704
4	394588	5.65e+06	1702412	0.777992	1702512	0.0600058	1702413	0.0457957	1702411	0.0311258	1702513	0.0270899	1702511	0.0210413	1702612	0.0121455	1702414	0.0111438
5	394613	5.65e+06	1702412	0.775091	1702512	0.0609924	1702413	0.0452941	1702411	0.031465	1702513	0.0265252	1702511	0.0211399	1702612	0.0123109	1702414	0.0112609
6	394638	5.65e+06	1702412	0.772173	1702512	0.0619896	1702413	0.0447921	1702411	0.0318046	1702513	0.0259611	1702511	0.0215899	1702612	0.0124779	1702414	0.0113805
7	394663	5.65e+06	1702412	0.769229	1702512	0.0629875	1702413	0.0442897	1702411	0.0321445	1702513	0.0254953	1702511	0.0218815	1702612	0.0126459	1702414	0.0115142
8	394688	5.65e+06	1702412	0.766289	1702512	0.0640161	1702413	0.0437866	1702411	0.0324842	1702513	0.0249419	1702511	0.0222644	1702612	0.0128149	1702414	0.0116389
9	394713	5.65e+06	1702412	0.763325	1702512	0.0650454	1702413	0.0432829	1702411	0.0328241	1702513	0.0243938	1702511	0.0226488	1702612	0.0129848	1702414	0.011762
10	394738	5.65e+06	1702412	0.760345	1702512	0.0660854	1702413	0.0427782	1702411	0.0331641	1702513	0.0238433	1702511	0.0227342	1702612	0.0131559	1702414	0.011886
11	394763	5.65e+06	1702412	0.757351	1702512	0.067136	1702413	0.0422726	1702411	0.0335039	1702513	0.0232857	1702511	0.0230211	1702612	0.0133277	1702414	0.0120101
12	394788	5.65e+06	1702412	0.754343	1702512	0.0681972	1702413	0.0417659	1702411	0.0338436	1702513	0.0227897	1702511	0.0233891	1702612	0.0135005	1702414	0.0121243
13	394813	5.65e+06	1702412	0.751321	1702512	0.0692682	1702413	0.0412579	1702411	0.034183	1702513	0.0223391	1702511	0.0236984	1702612	0.0136742	1702414	0.0122585



Die Wichtung wird für ALLE Berechnungsparameter, die in der input_id*.csv vorhanden sind (z.B. P, ET0, Wind, Temperatur, etc.) angewendet!

2.5 Leakage-Beziehungen und Vorflutinteraktionen

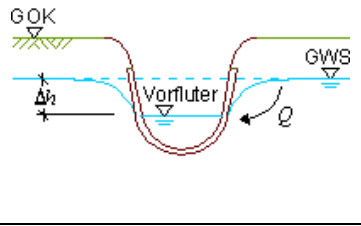
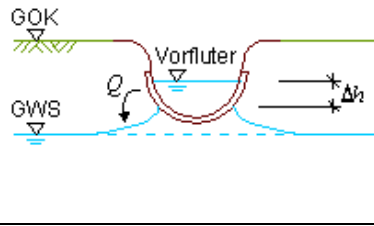
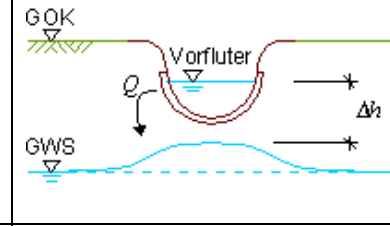
Befindet sich ein großer Vorfluter im Modellgebiet oder am Gebietsrand, besteht oft ein direkter Kontakt mit dem Grundwasser. Die Wasserspiegelhöhe kann dann als festes Potential (POTE) an den entsprechenden Knoten angesetzt werden. Die resultierende Ein- oder Ausflussmenge ergibt sich als Reaktionsmenge. Wenn das Oberflächengewässer Wasser aus dem Grundwasserleiter aufnimmt, spricht man von Exfiltration. Wenn das Oberflächengewässer Wasser in den Grundwasserleiter abgibt, bezeichnet man dies als Infiltration.

Kleinere Gewässer haben meistens keinen direkten Grundwasserkontakt. Aufgrund von Sohldichtungserscheinungen (Kolmation) oder der Ausbildung einer ungesättigten Zone zwischen Gewässer und Grundwasseroberfläche ist die Austauschströmung behindert.

Die Richtung der Austauschströmung und die Wassermenge werden durch eine - meist lineare - Beziehung zwischen Wasserstand im Oberflächengewässer und dem Grundwasserstand ausgedrückt und als Leakage-Funktion bezeichnet.

Der Leakagekoeffizient [1/s] ist der Quotient aus der In- bzw. Exfiltrationsmenge Q (bezogen auf die Gewässerbreite und die Länge eines Gewässerabschnittes) und der mittleren Potentialdifferenz.

Die folgenden Bilder verdeutlichen die einzelnen Begriffe bezogen auf den Grundwasserleiter:

		
Exfiltration des Grundwassers in den Vorfluter	Infiltration des Gewässers in das Grundwasser	Infiltration mit Abrissbeschränkung

Insbesondere für die Infiltration gibt es in der Praxis einen Maximalwert, der auch bei einer Erhöhung der Potentialdifferenz nicht mehr überschritten wird. Aber auch bei der Exfiltration kann bei bestimmten Problemstellungen ein Grenzwert sinnvoll sein.

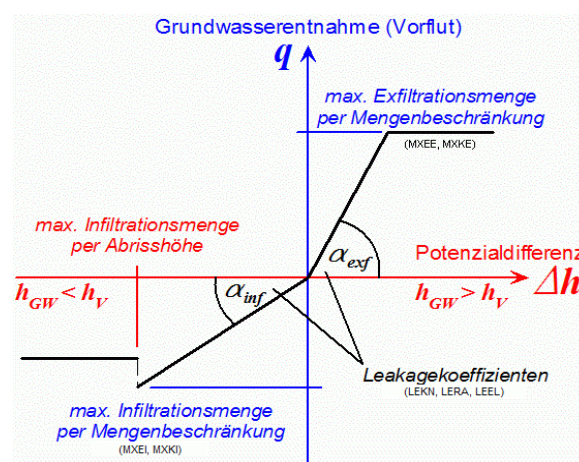


Abb. 125: Prinzipielle Darstellung der Leakage-Funktion

Eine Leakage-Beziehung kann nicht nur bei einem linienbezogenen Gewässer, sondern auch für flächenhafte Bereiche sinnvoll sein. In SPRING gibt es zur Eingabe der Leakage-Beziehung folgende Datenarten:

- VORF: knotenbezogene Höhe des Wasserstandes im Oberflächengewässer
- ABRI: Potentialdifferenz zwischen Vorflut- und Grundwasserstand, ab der keine Zunahme der Infiltrationsmenge mehr stattfindet (Abrisshöhe)
- LEKN: Leakagekoeffizient eines Knotens
- LERA: längenbezogener Leakagekoeffizient für einen Polygonzug
- LEEL: Leakagekoeffizient für Elemente

- LKFA: Verhältnis zwischen Exfiltration und Infiltration an Knoten (LEKN) bzw. Polygonen (LERA)
- LEFA: Verhältnis zwischen Exfiltration und Infiltration in Elementen (LEEL)
- MXKE: max. Exfiltrationsmenge für einen Polygonzug
- MXEE: max. Exfiltrationsmenge für Elemente
- MXKI: max. Infiltrationsmenge für einen Polygonzug
- MXEI: max. Infiltrationsmenge für Elemente

Für eine Leakage-Berücksichtigung zwingend erforderlich sind Angaben der Datenart VORF sowie eine der drei Datenarten LEKN, LERA oder LEEL.

Leakage-Beziehung bei undurchlässigen Schichten

Ein Sonderfall einer flächenhaften Leakage-Beziehung ist der Wasseraustausch durch eine stauende oder gering-durchlässige Schicht. Diese Schicht über dem Grundwasserleiter behindert zwar den Anstieg des Grundwassers (vgl. max. Mächtigkeit des Grundwasserleiters), erlaubt aber - insbesondere bei stationären Betrachtungen - doch einen bedingten Wasseraustausch.

Die Eingaben für dieses Phänomen erfolgen durch folgende Datenarten:

- UNDU: Mächtigkeit der undurchlässigen Schicht (Voraussetzung ist die Eingabe der Geländeoberfläche mit GELA)
- LEEL: Die Interpretation des Wertes ist abhängig von der Eingabe für UNDU: UNDU>0: LEEL = vertikaler K-Wert der undurchlässigen Schicht in m/s; UNDU=0 bzw. keine Eingabe: LEEL = direkter Leakagekoeffizient in 1/Zeiteinheit.
- VORF: Wasserstand des Oberflächengewässers (kann auf Geländehöhe gesetzt werden, falls keine offene Wasserfläche vorhanden ist)

In den folgenden Kapiteln wird die praktische Umsetzung einzelner Vorflutinteraktionen im Grundwassermodell anhand von typischen Beispielen erläutert.

2.5.1 Flurabstandsregulierung durch einen Polderbrunnen

In vielen vom Bergbau geprägten Gebieten steht das Grundwasser in bebauten Bereichen heute relativ oberflächennah an. Bei bestehenden Gebäuden lassen sich für die Bausubstanz schädliche Grundwasseranstiege häufig nur durch flurabstandsregulierende Maßnahmen, wie z.B. Polderbrunnen, vermeiden. Im Gegensatz zu Förderbrunnen, die der Wassergewinnung dienen, sind zwar die Standorte, aber die Entnahmemengen zur lokalen Flurabstandsregulierung häufig nicht bekannt und können somit nicht als Randbedingung (KNOT = Quellen/Senken) im Modell angesetzt werden. Bei der Flurabstandsregulierung mit Brunnen steht vielmehr das Absenkenziel im Vordergrund. Im Folgenden wird der in SPRING typische Modellansatz einer solchen Situation beschrieben.

Das folgende Bild zeigt schematisch die Problemstellung:

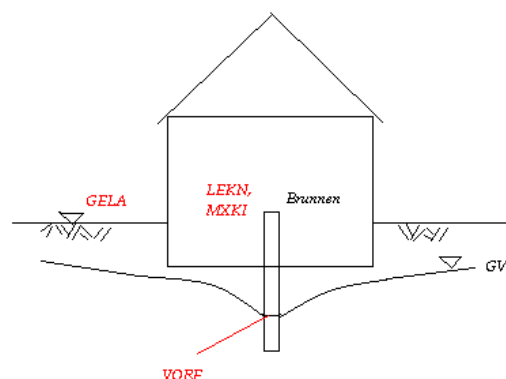


Abb. 126: Schema einer Sumpfungsmäßnahme im Gebäudekeller

- VORF

Der Netzknoten des Brunnens erhält ein Vorflutpotential, dessen Wert dem maximal zulässigen Grundwasserstand entspricht (z.B. Kellerfundament - 0.80 m). Handelt es sich um ein 3D-Modell, kann es je nach vertikaler Netzdiskretisierung notwendig sein, die Knoten im Bereich der Verfilterung des Brunnens mit einer Gruppe von GLEI-Attributen zu belegen. Das Vorflutpotential ist dann auf einen dieser Knoten zu setzen.

- LEKN

Zusätzlich ist, wie bei jedem Knoten mit Vorflutpotential, ein Leakagekoeffizient anzusetzen (hier: LEKN). Ein sehr großer Knotenleakage wirkt dabei wie ein Festpotential und stellt sicher, dass das Absenkziel im Brunnen (Vorflutpotential) erreicht wird. Liegen gemessene Entnahmemengen für den Brunnen vor, kann durch einen Vergleich der gemessenen mit der vom Programm berechneten Vorflutmenge der Leakagekoeffizient kalibriert werden. Die berechneten Vorflutmengen können z.B. in SPRING über *Attribute → Modelldaten/Berechnungsergebnisse importieren...*, (Hintergrunddatei "aaa", "Leakagemengen", gewünschte Attributkennung, z.B. KKKK) eingelesen werden. Mit dem Menüpunkt *Attribute → Knoten bearbeiten* kann die Vorflutmenge (in $\text{m}^3/\text{Kn.}/\text{ZE}$) am Brunnenknoten abgelesen werden.

- MXKI

Liegt der Grundwasserstand am Brunnen unterhalb des definierten Vorflutpotentials, gibt der Vorflutknoten, Wasser in das Grundwasser ab. Um diesen hier unerwünschten Effekt zu verhindern, muss über das Attribut $\text{MXKI} = 0.0$ eine Infiltration in das Grundwasser unterbunden werden (die maximale Infiltrationsmenge wird auf 0.0 begrenzt).

- MXKE

Zur Limitierung der Entnahmemenge aufgrund technischer Zwänge (Leistungsfähigkeit der Pumpe) ist die Definition einer maximalen Entnahme am Vorflutknoten mit dem Attribut MXKE zu empfehlen (Vorzeichenkonvention beachten: Für die Begrenzung der Entnahmemenge muss hier ein negativer Wert eingegeben werden).

2.5.2 Modellierung einer Dränage

Vielfach werden in Gegenden mit hohen Grundwasserständen flächendeckende Maßnahmen zur Flurabstandsregulierung benötigt. Insbesondere in bebauten Gebieten werden dazu Dränagen verlegt, die das überschüssige Wasser schadlos zum nächsten Vorfluter abführen.

Die folgenden Bilder zeigen schematisch die Problemstellung:

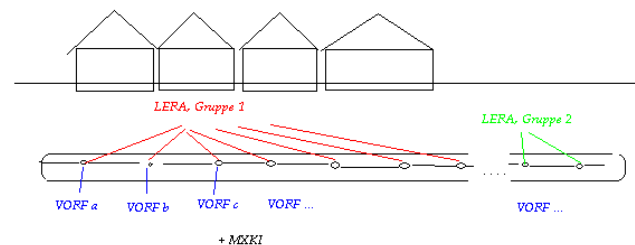


Abb. 127: Längsschnitt einer Dränage im Straßenbereich

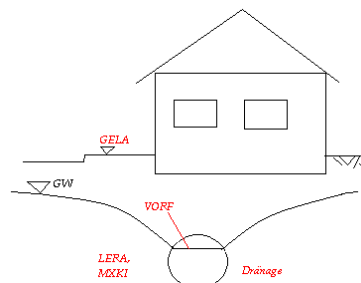


Abb. 128: Querschnitt einer Dränage im Straßenbereich

Die Umsetzung in einem mit SPRING erstellten Grundwassermodell sieht folgendermaßen aus:

- VORF

Die Netzknoten der Dränage erhalten ein Vorflutpotential, dessen Wert dem gewünschten Grundwasserstand entspricht (z.B. Kellerfundamente - 0.80 m).

- LERA

Bei einer Dränage wird im Gegensatz zum Sumpfungsbrunnen ein polygonzugbezogener Leakage (LERA, [m/ZE]) angesetzt. Hierbei sind die Zugehörigkeit und die Reihenfolge der Knoten eines bestimmten Dränagestrangs einzuhalten, da die "LERA"-Daten gruppenweise verwaltet werden. Liegen Abflussmessungen für die Dränage vor, kann durch einen Vergleich der gemessenen und der vom Programm berechneten Leakagemenge der Leakagekoeffizient kalibriert werden. Die berechneten Vorflutmengen können z.B. in SPRING über *Attribute* → *Modelldaten/Berechnungsergebnisse importieren...* (Hintergrunddatei "aaa", "Leakagemengen", gewünschte Attributenennung, z.B. KKKK) eingelesen werden. Mit *Attribute* → *Knoten bearbeiten* kann die Leakagemenge (in m³/Kn./ZE) an den einzelnen Dränageknoten ermittelt werden. Durch eine Aufsummierung der einzelnen Knotenmengen erhält man die gesamte, vom Modell berechnete Abflussmenge in der Dränage.

- MXKI

Um zu verhindern, dass die (leere) Dränage bei einem tiefer liegenden Grundwasserstand in das Grundwasser infiltriert, wird über das Attribut MXKI die mögliche Infiltrationsmenge an den zugehörigen Knoten auf den Wert 0.0 gesetzt.

- MXKE

Zur Limitierung der Entnahmemenge aufgrund technischer Zwänge (max. Abflussvolumen der Dränage) ist die Definition einer maximalen Entnahme am Vorflutknoten mit dem Attribut MXKE zu empfehlen (Vorzeichenkonvention beachten: Für die Begrenzung der Entnahmemenge muss hier ein negativer Wert eingegeben werden). Die Einheit für eine polygonzugbezogene Beschränkung ist m³/ZE/m, d.h. für den jeweiligen Polygonzug ist eine Gesamtmenge anzugeben (Knotenreihenfolge beachten!). Der endgültige Maximalwert für den einzelnen Knoten wird im Programm durch Multiplikation mit der anteiligen Strecke zwischen dem linken und rechten Nachbarknoten gebildet.

2.5.3 Sickerlinie in einem Damm

Die Modellierung eines Damms zur Berechnung einer Sickerlinie erfordert eine sorgfältige Diskretisierung. Der Dichtungskern eines Damms weist in der Regel einen Durchlässigkeitswert auf, der um mehrere Zehnerpotenzen geringer ist als der des ihn umgebenden Dammmaterials. Dies kann zu Oszillationen in der Strömungsberechnung führen, wenn die Elementgröße nicht schrittweise angepasst wird.

Das folgende Bild zeigt die mindestens notwendigen Modelldaten für einen Damm:

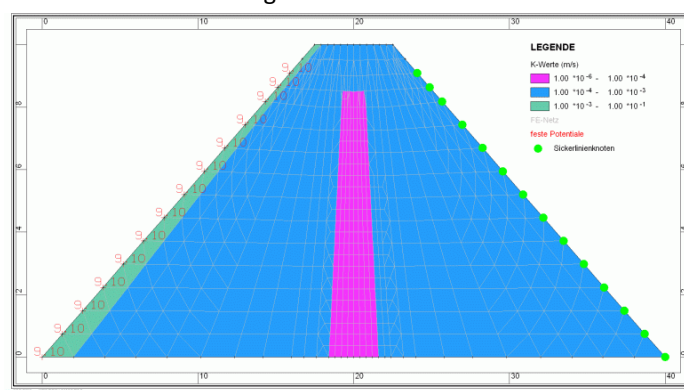


Abb. 129: Modelldaten eines Damms (Zweifache Überhöhung in Y-Richtung!)

Folgende Parameter gehen in die Strömungsberechnung ein:

- POTE: an den wasserseitigen Randknoten in m NN (Höhe des Wasserspiegels)
- KWER: grün = 0.001 m/s, blau = 0.0001 m/s, pink = 0.000001 m/s
- MAEC: horizontale Ausdehnung (beliebig)
- SICK: an den landseitigen Randknoten bis zur Höhe des Wasserspiegels (Wert = 0.0)

Nach einer stationären Strömungsberechnung (10 Iterationen) erhält man folgendes Strömungsbild:

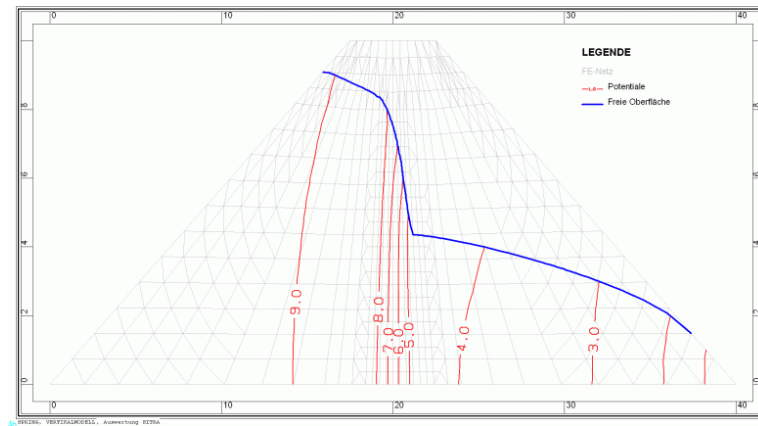


Abb. 130: Ergebnisdaten Potentiale und Sickerlinie des Damms

Die Lage der Sickerlinie (blau) entspricht der berechneten freien Oberfläche.

Ab dem Schnittpunkt der Sickerlinie mit der Landseite des Damms tritt Sickerwasser aus. Im Beispiel geschieht dies an den unteren drei Knoten über dem rechten Dammfuß. Die Sickermenge an den Knoten lässt sich in SPRING über *Attribute* → *Modelldaten/Berechnungsergebnisse importieren...* → *Sickermengen [m³/Kn./ZE]* auf eine beliebige Kennung einlesen, über *Ansicht* → *Attribute darstellen* → *Isolinien/Flächenplots/Werte* visualisieren und mit *Attribute* → *Knoten bearbeiten* → *Fangen* ablesen. Die Gesamtmenge berechnet sich pro laufenden Damm-Meter.

2.6 Flutungssimulation von Grubenbauwerken

Vereinbarungen

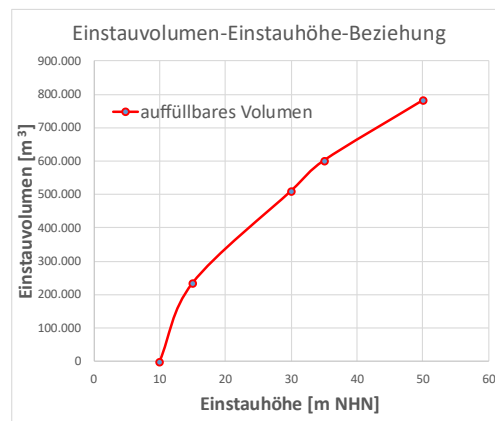
Eine Grube ist zu Beginn der Flutungssimulation ein vollständig ungesättigter, 3-dimensionaler Bereich, der vollständig oder teilweise unterhalb der Geländeoberfläche liegt. Des Weiteren gilt:

- Die zu einer Grube gehörenden Knoten sind durch eine eindeutige Zonennummer gekennzeichnet (Datenart GRUB, Nummerierung > 0).
- Für alle FE-Netz-Knoten der betrachteten Grube, an denen ein Einstrom möglich ist, muss die Randbedingung "freie Aussickerung" (Datenart SICK) definiert sein. Sind zur Wasserhaltung des Grubenbauwerks Dränagen vorhanden, die in die Grube entwässern, können die entsprechenden Knoten mit der Randbedingung "Vorflutpotential und Leakage" zusätzlich mit dem Attribut zur Zonennummerierung der Grube (Datenart GRUB, s.o.) versehen werden.
- Zum Zeitpunkt $t=t_0$ befindet sich kein Wasser in der Grube (kein Anfangsvolumen).
- Für eine instationäre Berechnung liegt für die betrachtete Grube eine stetig steigende Kurve zur Beschreibung des Verhältnisses des eingestauten Volumens (m^3/s) zur Einstauhöhe (m NN) vor.
-

Zeitlicher Verlauf des Einstaus einer Grube

Nach jedem Zeitschritt $t = t_i$ wird der Volumenstrom bilanziert, der vom Zeitpunkt $t = t_0$ bis zum Zeitpunkt $t = t_i$ in die Grube eingeströmt ist. Das Volumen setzt sich zusammen aus dem im betrachteten Zeitschritt $t = t_i - t_{i-1}$ eingeströmten Volumen an den Gruben-Knoten und dem bis zum Zeitpunkt $t = t_{i-1}$ eingestauten Volumen. Sind Dränagen an die Grube angeschlossen und gemäß der oben geschilderten Definition gekennzeichnet, wird die zugeströmte Menge aus der Dränage zu der Menge in der Grube hinzuaddiert.

Aus dem Volumen $V(t_i)$ wird mit Hilfe der Einstauvolumen-Einstauhöhe-Beziehung die für den betrachteten Zeitpunkt resultierende Einstauhöhe $h(V_i)$ abgeleitet.



Für jeden Knoten mit der Randbedingung "freie Aussickerung" kann nun über seine vertikale Lage z beurteilt werden, ob dieser noch oberhalb der freien Oberfläche $h(V_i)$ liegt. Für einen Knoten, der unterhalb der freien Oberfläche liegt, wird die Randbedingung von "freie Sickerrandbedingung" in "festes Potential" oder wahlweise in "Vorflut mit Leakage" mit der Höhe $h(V_i)$ geändert. Für alle weiteren Knoten mit der Randbedingung "festes Potential" bzw. "Vorflut mit Leakage" wird die Höhe auf $h(V_i)$ aktualisiert.

Dieses Vorgehen garantiert, dass die durch die Randbedingung "freie Aussickerung" aus dem Modell entnommene Menge durch Definition von Festpotentialen oder Vorflutknoten vollständig wieder zugeführt wird und die Massenerhaltung im Modell somit gegeben bleibt.

Ob die Umänderung von "Sickerknoten" in "Festpotentialknoten" oder in die gedämpfte Randbedingung "Vorflutknoten" erfolgen soll, wird während der Strömungsberechnung festgelegt.

Grubenbauwerke

Randbedingungen für Flutung

☐ Festpotential

☒ Vorflutpotential mit Leakage 600.0 m2/Jahr

Bei Wahl der Vorflutrandoedingung ist die Eingabe eines Knoten-Leakagewertes (Attribut LEKN) erforderlich.

Überstau einer Grube

Gilt zu einem Zeitpunkt für alle Knoten einer Grube die Randbedingung "festes Potential", gilt die Grube als überflutet. In diesem Fall werden alle (Potential-) Randbedingungen "deaktiviert", so dass die Grube wie ein vollständig gesättigter Teilbereich des Aquifers in die Strömungsberechnung einfließt.

Absenkung des Wasserstandes einer Grube

Sinkt der Wasserstand in der Grube, werden umgekehrt zum Einstauvorgang die über der freien Oberfläche liegenden Knoten von der Randbedingung "festes Potential" zurück auf die Randbedingung "freie Aussickerung" gesetzt.

Im Falle des Absenkens des Wasserstandes nach einem Überstau der Grube werden in dem Moment, in dem die Wassermenge aufgrund der Einstauvolumen-Einstauhöhe-Beziehung nicht mehr die Grube ausfüllt, alle Gruben-Knoten je nach ihrer vertikalen Lage zurück auf die Randbedingung "festes Potential" (unterhalb) bzw. "freie Aussickerung" (oberhalb der freien Oberfläche) gesetzt.

Begrenzung des Stauziels

Wird für eine Grube ein maximales Stauziel definiert, so wird ab dem Erreichen dieser Höhe dasjenige Volumen aus dem Modell entnommen, das für jeden Zeitschritt das Einhalten des Einstauzieles gewährleistet. Die Berechnung der zu sumpfenden Menge wird mit Hilfe der Einstauvolumen-Einstauhöhe-Beziehung durchgeführt. Das Stauziel muss somit innerhalb des Wertebereiches der Funktion liegen.

Eine zeitliche Veränderung des Stauzieles ist über den üblichen Weg mit Hilfe der instationären Eingabedatei möglich. Die Datenart wird mit HMAX beschrieben, die Werte sind auf die Zonennummer der jeweiligen Grube zu beziehen.

Wasserzugabe von außerhalb des Modells

Sollen während der Flutungsphase Wasser von außerhalb des Modells in die Grube eingeleitet werden, so können diese als Volumenstrom definiert werden. Wurde für einen Zeitschritt eine solche Menge definiert, wird diese bei der Berechnung der Einstauhöhe mit Hilfe der Einstauvolumen-Einstauhöhe-Beziehung eingerechnet. Dabei gilt eine mathematisch positive Menge als Zugabemenge in die Grube, eine negative als Entnahme von Flutungswasser.

Eine zeitliche Veränderung der Zugabemengen ist über den üblichen Weg mit Hilfe der instationären Eingabedatei möglich. Die Datenart wird mit MENG beschrieben, Werte sind auf die Zonennummer der jeweiligen Grube zu beziehen.

Definition der Flutungsparameter in SPRING

Für die Durchführung einer Flutungssimulation nach dem oben beschriebenen Verfahren ist zunächst allen FE-Netz-Knoten, die eine Grube beschreiben, eine eindeutige Nummer auf die Datenart GRUB zuzuweisen. Diese Nummer wird im weiteren Vorgehen als Zonennummer (X) der Grube verwendet.

Wurden Knoten als Grube gekennzeichnet, können über den Menüpunkt *Attribute* → *Extras* → *Flutungsparameter* die erweiterten Flutungsparameter "Stauziel" und "Zugabemenge" definiert werden. Soll ein gesetzter Parameter gelöscht werden, ist der Eintrag im entsprechenden Feld zu löschen (Feld bleibt leer).

Definition der Einstauvolumen-Einstauhöhe-Beziehung für eine instationäre Berechnung

Bei einer instationären Berechnung muss für jede Grube eine stetige Funktion definiert werden, die die Abhängigkeit zwischen eingestautem Volumen und dem Wasserstand in der Grube beschreibt. Dies ist die Einstauvolumen-Einstauhöhe-Beziehung einer Grube:

Die Funktion sollte über das gesamte Intervall des Einstauvorgangs, d.h. für alle in der Simulation auftretenden Werte für Volumen und Höhe, definiert sein.

Für die Flutungsberechnung ist die Einstauvolumen-Einstauhöhe-Beziehung für jede Grube im Format CSV (Trennzeichen getrennt) in einer Datei mit der Bezeichnung "grubeX.hv" im Arbeitsverzeichnis bereitzustellen, wobei X die Zonennummer darstellt. Die Datei wird vom Berechnungsmodul automatisch gelesen.

Die erste Spalte enthält die Einstauhöhe, die zweite Spalte enthält das Einstauvolumen:

```
10.0,0.0
15.0,234900.0
30.0,511600.0
35.0,602800.0
50.0,783000.0
```

Ergebnisse

Neben den bekannten Ergebnissen (Potentiale, Freie Oberfläche, Ganglinien, usw.) aus der instationären Strömungsberechnung wird bei der Flutungssimulation für jede Grube eine Volumenganglinie erzeugt, die für jeden Zeitschritt das aktuelle Einstauvolumen beschreibt und bei Definition des Stauziels eine Volumenganglinie, die die

zu sumpfende Menge beschreibt. Darüber hinaus werden die Mengen für die einzelnen Randbedingungsarten für jeden Zeitschritt gespeichert. Die Datei wird mit der Bezeichnung "gruben.csv" im Arbeitsverzeichnis erzeugt.

2.6.1 Beispiel einer Realisierung in SPRING

SPRING bietet die Möglichkeit, Flutungsprozesse in Gruben oder Talsperren zu simulieren. Die folgenden Kapitel beschreiben in Form eines Tutorials, wie die Flutungsprozesse einer Grube in SPRING umgesetzt werden.

Die zugehörigen Dateien des Beispielsmodells und der Simulationen stehen auf unserer zum Download bereit unter "TOOLS – SPRING Helferlein und Beispieldateien. Die Datei "Tutorial_bsp_files.zip" beinhaltet ein Verzeichnis "HowTo_Grube", in welchem sich die Zip-Dateien "f10.zip", "f11.zip" und "f12.zip" befinden.

Das Beispielsmodell besteht aus drei geologischen Schichten, die durch zwei Grundwasserleiter und einen Grundwasserstauer gekennzeichnet sind. Die Grube befindet sich im zweiten Grundwasserleiter. Das Modell ist durch neun Knotenschichten diskretisiert und in den folgenden Abbildungen dargestellt:

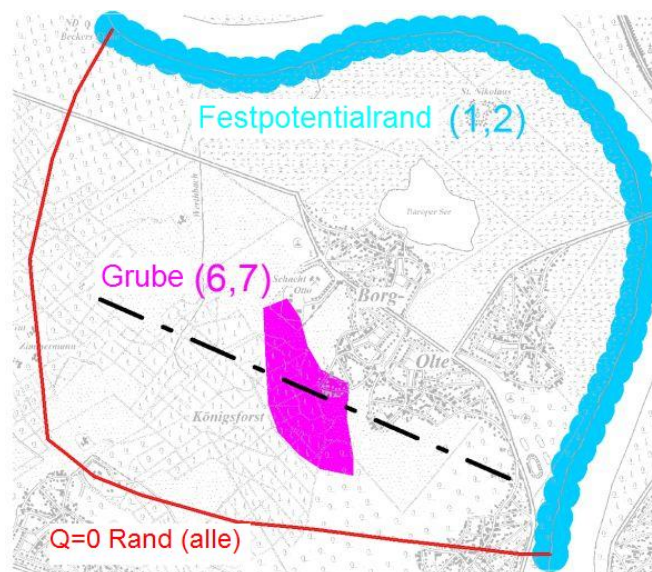


Abb. 131: Draufsicht des Modells mit den Randbedingungen der einzelnen Schichten

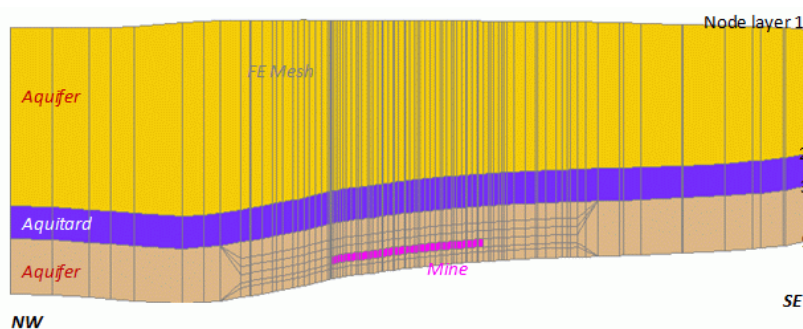


Abb. 132: Vertikalschnitt des Modells (20-fache Überhöhung)

2.6.1.1 Anfangsbedingungen

Da es sich bei der Grubenflutung um einen instationären Prozess handelt, müssen zunächst die Anfangsbedingungen festgelegt werden. Den Modellknoten, welche die Grube definieren, muss eine Sickerrandbedingung zugewiesen werden. Das Beispielarchiv "f10.zip" enthält hierzu eine Strukturdatei mit der entsprechenden Struktur (Attribut SICK), die der Knotenschicht 6 und 7 zugewiesen wird.

Nach Speichern der Modelldatei wird die Modellprüfung (Schritt 1) mit *Berechnung* → *Modellprüfung* gestartet und anschließend eine stationäre Strömungsberechnung (Schritt 2) mit *Berechnung* → *Stationäre Strömung* durchgeführt.

Die Berechnungsergebnisse sind in der folgenden Abbildung dargestellt. Dieser Vertikalschnitt kann mithilfe der Plot-Batchdatei "cs.bpl" erstellt werden (Archiv "f10.zip").

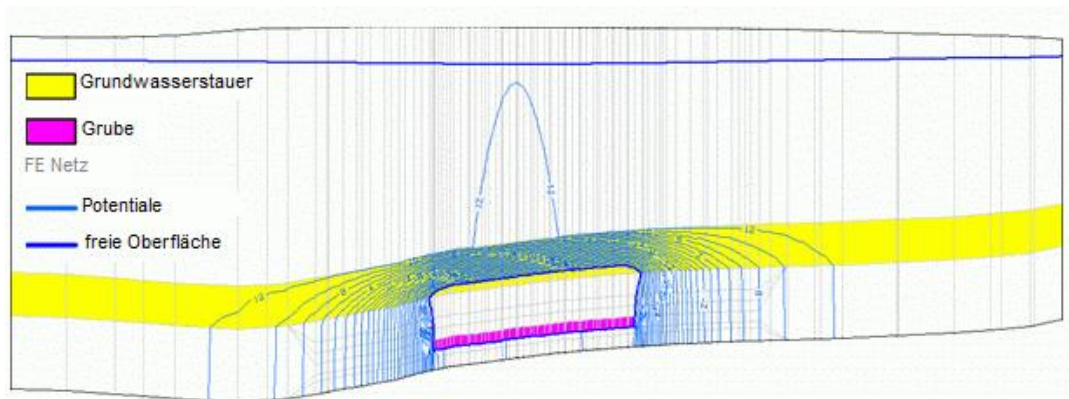


Abb. 133: Vertikalschnitt mit den Ergebnissen der stationären Strömungsberechnung

2.6.1.2 Simulation 1: Natürliche Flutung

(Archiv fl1.zip)

Natürliche Flutung bedeutet, dass die Dränagen der Grube abgestellt werden und sich die Grube aufgrund des natürlichen Grundwasserzustroms bis zum Erreichen des vorhandenen Grundwasserspiegels mit Wasser füllt.

Für die Simulation ist es erforderlich, die Modellknoten der Grube zu definieren und die Beziehung zwischen dem Grubenwasserstand und dem Wasservolumen innerhalb der Grube zu beschreiben ("h-V-Beziehung").

Die Definition der Grubenknoten erfolgt mit dem Attribut GRUB. Diese Randbedingung wird mittels der vorhandenen Struktur den Knotenschichten 6 und 7 zugewiesen.

Das Attribut GRUB enthält die Zonennummer der Grube, im Beispiel ist dies die Nummer "1". Die zugehörige h-V-Beziehung wird in einer ASCII-Datei definiert, deren Name "grube1.hv" lautet. (Der Dateiname setzt sich aus dem Wort "grube", der Zonennummer (hier: "1") und der Endung *.hv zusammen, enthalten im Beispielarchiv "fl1.zip".) Die folgende Abbildung zeigt die h-V-Beziehung des Beispiels. Zum besseren Verständnis der späteren Simulationsschritte ist der Gradient des Kurvenverlaufs ebenfalls dargestellt.

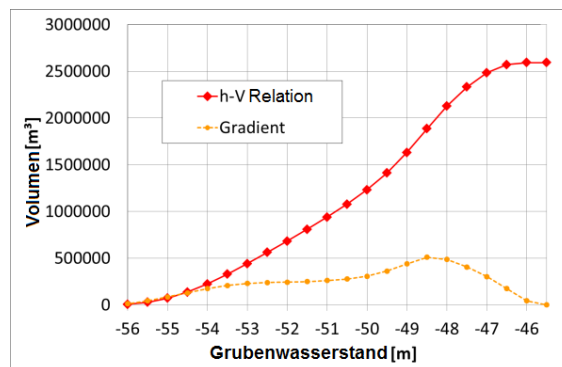


Abb. 134: Beziehung zwischen dem Wasserstand und dem Wasservolumen in der Grube

Für instationäre Strömungsberechnungen in SPRING wird eine instationäre Eingabedatei benötigt, welche die entsprechenden instationären Randbedingungen enthält.

Da die instationären Randbedingungen in dem vorliegenden Beispiel nicht geändert werden, besteht die instationäre Eingabedatei lediglich aus folgenden Zeilen (siehe Datei "trans.txt" in "fl1.zip").

Instationäre Eingabedatei (Simulation 1):

```
# SPRING Tutorial
# Grubenflutung
# Simulation 1

ZEITEINHEIT MENG JAHR
BEZUGSDATUM 01.01.2012

DATUM
02.01.2012
```

Vor dem Start der instationären Berechnung müssen allen Knoten Startpotentiale (Attribut EICH) zugewiesen werden. Hierfür werden die in der stationären Berechnung (aus Verzeichnis fl0) ermittelten Potentiale auf die Kennung EICH eingelesen mit *Attribute* → *Modelldaten/Berechnungsergebnisse importieren...*:

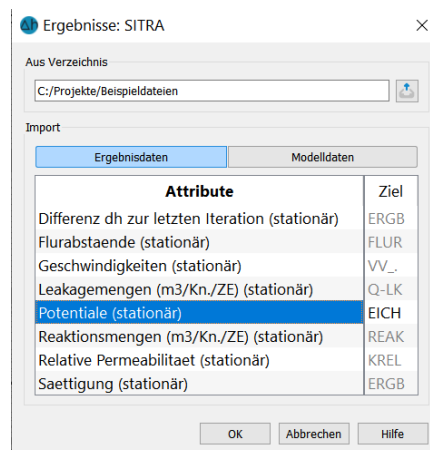


Abb. 135: Definition der Startpotentiale

Nach Speichern der Modelldatei und Durchführen der Modellprüfung (Schritt 1) (*Berechnung* → *Modellprüfung...*) wird nun die instationäre Berechnung (Schritt 2) gestartet mit *Berechnung* → *instationäre Strömung...*:

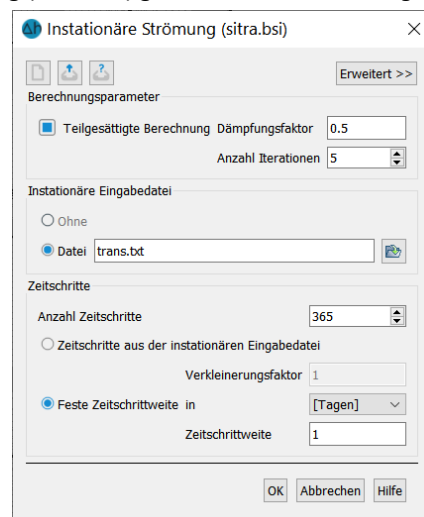


Abb. 136: instationäre Strömungsparameter (Schritt 2)

Bei den erweiterten Strömungsparametern muss die Anfangsbedingung auf die Initialisierung der Startpotentiale mit "EICH" gesetzt werden.

Der Vertikalschnitt zeigt die Ergebnispotentiale und kann mittels der Plot-Batchdatei "cs.bpl" erstellt werden. Die horizontale Abbildung stellt die Potentiale im 56. Zeitschritt in der Schicht 7 dar und kann mit Hilfe der Plot-Batchdatei "pot56-7.bpl" erstellt werden. Im Horizontalschnitt sind zusätzlich Ganglinien von bestimmten Knoten der Grubensohle dargestellt. Der Knick in den Kurven kennzeichnet das Ende des Flutungsprozesses, wenn die Grube komplett mit Wasser gefüllt ist. Danach steigen die Potentiale bis zum Erreichen der stationären Bedingungen an.

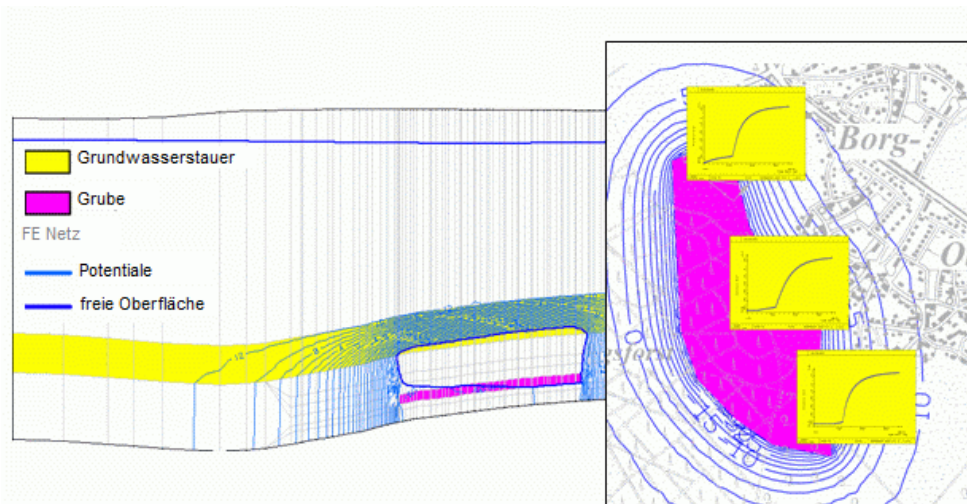


Abb. 137: Vertikal- (links) und Horizontalschnitt durch Schicht 7 (rechts) mit Ergebnissen nach 56 Tagen Flutung (Flutung 1)

Bei der Simulation einer Grubenflutung wird neben den üblichen Ergebnisdateien zusätzlich eine Datei namens "gruben.csv" erzeugt. Diese Datei enthält eine Tabelle mit sämtlichen Ergebnissen der Grubenflutung für jeden Zeitschritt und ermöglicht somit die grafische Auswertung derselben. Im vorliegenden Beispiel wurde die Auswertung mit MS Excel (Datei "gruben1.xls" in "fl1.zip") durchgeführt und in den folgenden Abbildungen dargestellt.

Die erste Abbildung zeigt den resultierenden Grubenwasserspiegel und die Anteile der einzelnen Randbedingungen an der Massenbilanz. In Abhängigkeit ihrer aktuellen vertikalen Position werden die Grubenknoten in jedem Zeitschritt entweder auf die Randbedingung "Versickerung" oder "Festpotential" gesetzt:

- "Versickerung": Die vertikale Position des Knotens (z-Koordinate) liegt über dem aktuellen Grubenwasserspiegel (ungesättigt).
- "Festpotential": Die vertikale Position des Knotens (z-Koordinate) liegt unter dem aktuellen Grubenwasserspiegel (gesättigt).

Beide Randbedingungen verursachen einen Massenfluss, der zu einem Austausch zwischen dem Grundwasserleiter und der Grube führt. Im aktuellen Beispiel entspricht die Summe des Massenflusses der beiden Randbedingungen dem Grundwasserzufluss (siehe Grafik).

Der Knick in den Massenfluss-Kurven wird durch die Veränderung des Gradienten in der h-V-Beziehung verursacht. Nach 124 Tagen ist die Grube gefüllt.

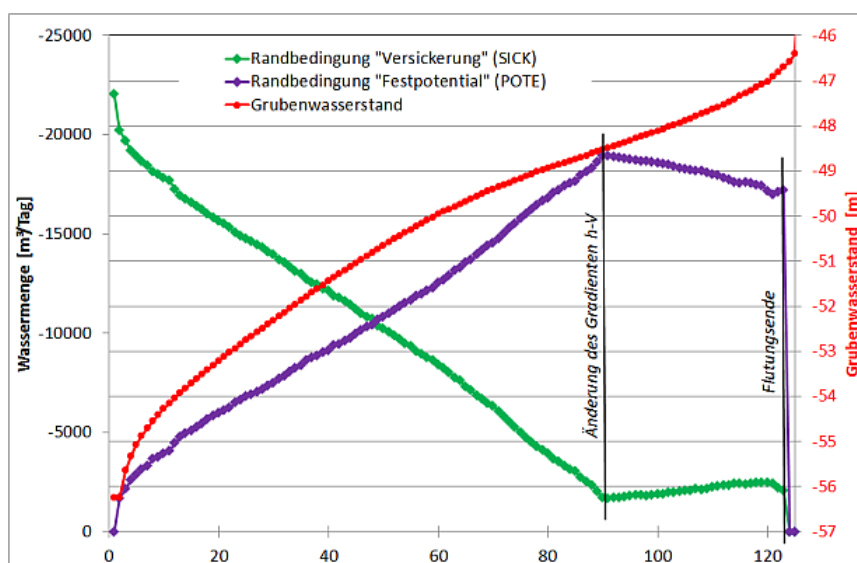


Abb. 138: Wasserstand und Wassermenge bis zum Ende der Flutung (Flutung 1)

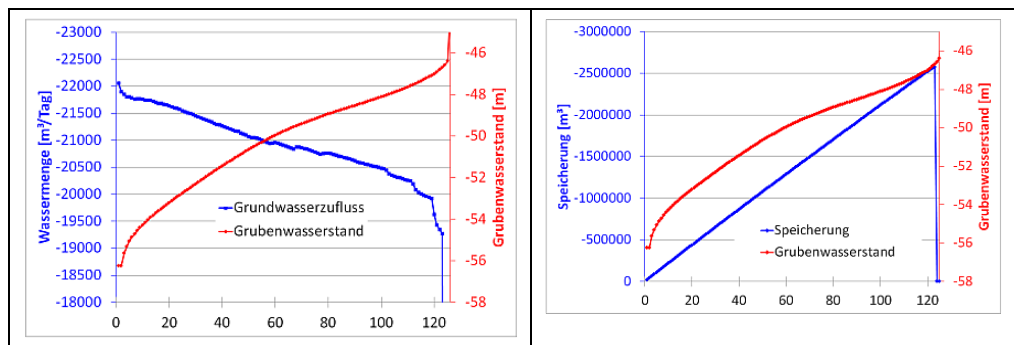


Abb. 139: Grundwasserzufluss (links) und Speicherung (rechts) bis zum Ende der Flutung (Flutung 1)

2.6.1.3 Simulation 2: Kontrollierte Flutung

(Archiv fl2.zip)

Das zweite Beispiel zeigt die Anwendung einer grubenspezifischen instationären Randbedingung.

Dazu werden für jede Grube ein Stauziel (HMAX) und eine externe Wassierzugabemenge (MENG) definiert. Beide Parameter können in der instationären Eingabedatei geändert werden. Wird zur Beschleunigung der Flutung von außen Wasser zugeführt, muss der Wert der externen Zugabemenge positiv angegeben werden. Bei einem negativen Wert wird Wasser aus der Grube entnommen.

Die Parameter werden im Dialog *Attribute* → *Extras* → *Flutungsparameter* festgelegt.

Soll ein Parameter während einer Simulation geändert werden, muss dieser zunächst hier initialisiert werden.

Abb. 140: SPRING Dialog zur Bearbeitung der Flutungsparameter

Um die Wirkung dieser Parameter zu verdeutlichen, werden die folgenden instationären Randbedingungen festgelegt:

Tabelle 1: Instationäre Randbedingungen (Flutung 2)

Datum	Zeitschritt	Randbedingung	Beschreibung
01.01.2012	0	HMAX = -50 m MENG = 3068100 m³/a	Beginn der Flutung bis zum Grubenwasserspiegel auf -50 m mit einer Wasserzufuhr von ca. 8400 m³/Tag,
01.03.2012	60	MENG = -13149000 m³/a	Leerpumpen der Grube mit einer Pumpleistung von 1500 m³/h = 3600m³/Tag
01.07.2012	182	HMAX = -46.5 m MENG = 5259600 m³/a	Weitere Flutung bis zum Grubenwasserstand von -46.5 m mit einer Zufuhr von ca. 14400 m³/Tag
01.09.2012	244	MENG = 0 m³/a	Flutung ohne weitere Zugabe
31.12.2012	365		Ende der Simulation

Die Datei mit den instationären Randbedingungen findet sich im Archiv "fl2.zip" und hat folgenden Aufbau (Flutung 2):

```
# SPRING Tutorial
# Flutung
# Simulation 2

ZEITEINHEIT MENG JAHR
BEZUGSDATUM 01.01.2012

DATUM
01.03.2012

MENG #Leerung der Grube mit einer Pumprate von 1500 m3/h
1-13149000.

DATUM
01.07.2012

HMAX #erneutes Fluten der Grube bis Stauziel -46.5m
1 -46.5

MENG # Wasserzufuhr ca. 600 m3/h
1 5259600.

DATUM
01.09.2012

MENG #Fortsetzen der Flutung ohne Wasserzugabe
1 0.5
```

Die Ergebnisse dieser Simulation sind in den folgenden Abbildungen dargestellt. Sie basieren auf den Dateien "gruben.csv" bzw. "gruben2.xls" ("fl2.zip").

Die Randbedingung der externen Wasserzufuhr wird durch die Kurve "Potential der ext. Wasserzufuhr" abgebildet (entspricht der Definition des Attributes MENG). Die Kurve "aktuelle Wasserzufuhr" stellt das Wasservolumen dar, welches in Abhängigkeit der physikalischen Gegebenheiten der Grube hinein- oder hinaus gepumpt wird. Insbesondere unterscheiden sich die aktuelle und mögliche Wasserzufuhr zwischen dem Erreichen des Abpump-Endes der Grube und dem Fortsetzen der Flutung.

Dies liegt an der fest gelegten Wasserzufuhr ($MENG = 36000 \text{ m}^3/\text{a}$), die nach Entleerung der Grube nicht mehr verfügbar ist.

Daher ist die aktuelle Pumprate nach Entleerung der Grube geringer (etwa $22.000 \text{ m}^3/\text{Tag}$).

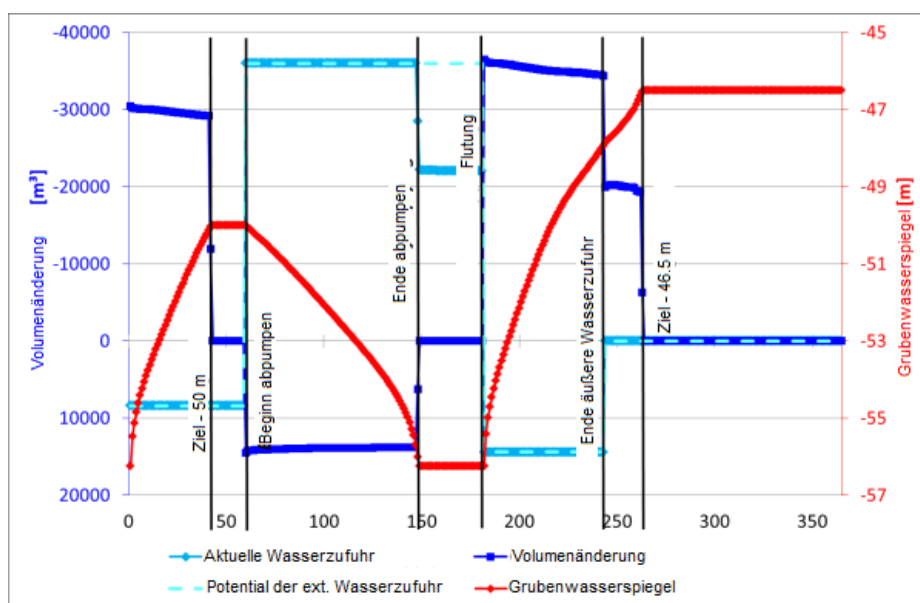


Abb. 141: Grubenwasserstand, Volumenänderung und externe Wasserzufuhr (Flutung 2)

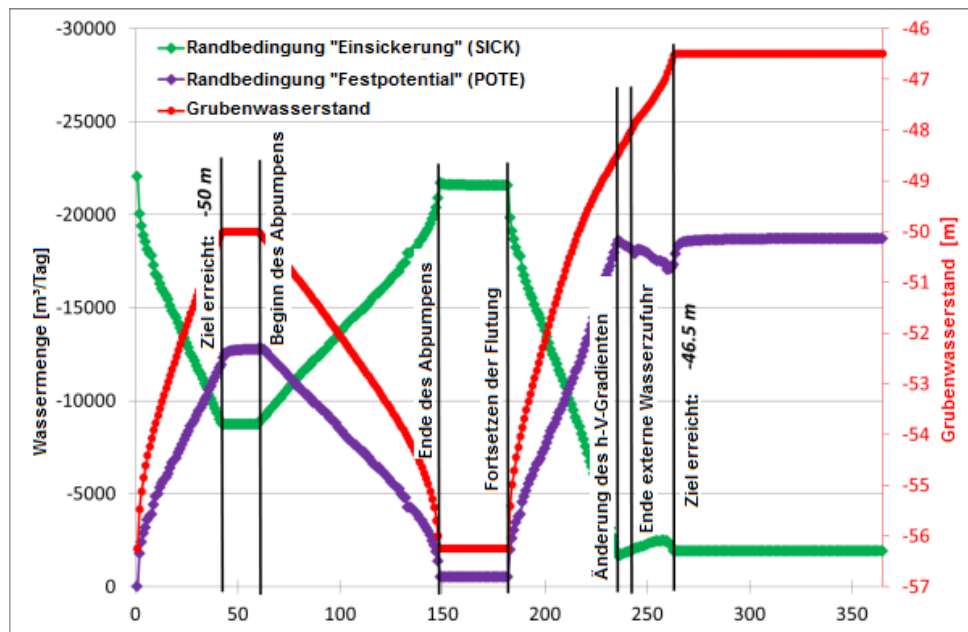


Abb. 142: Randbedingungsabhängige Massenflüsse (Flutung 2)

3 Index

3D-Erweiterung	
über Schichtenanzahl.....	34
Vorgabe von Z-Koordinaten.....	37
3D-Teilmodell	
Aufbau	40
ATKIS-Daten	76
Attribut FHGW	
minimaler Flurabstand.....	94
Attribut FNGW	
maximaler Flurabstand	94
Attributzuweisung	
manuell	24
auslaufende Schichten.....	37
Aussickerung	
freie.....	109
Bahnlinie	
Darstellung.....	60
Eingabedialog.....	60
Startpunkte	62
Theorie.....	59
Bodenklasse	
RUBINFLUX, Attribut NKBT	91
Bodenparameter	
globale	87
Bodentyp	
nach Meßer.....	75
nach Schroeder&Wyrwich	74
Brunnenparameter	
zuweisen	11
CORINE land use Daten.....	76
Datenbeschaffung.....	7
Direktabfluss	
nach Schroeder&Wyrwich	74
Dränage	
Modellierung	107
Dupuit-Annahme	41
Einstauhöhe	109
Einstauvolumen	109
Einzugsgebiet	
Ermittlung	59
Element	
erzeugen	13
Exfiltration	105
Fangradius	
für Bahnlinien	61

Feldkapazität	85
nutzbare.....	85
FE-Netz	
erstellen	4
regelmäßig	5
unregelmäßig.....	6
Flächennutzung	
nach Meßer.....	76
nach Schroeder&Wyrwich	74
RUBINFLUX, Attribut NKFN	89
Flächennutzungsklasse	
aus RVR-Code.....	78
Flächennutzungskarte	78
Flächennutzungsklasse	
nach Schroeder&Wyrwich	73
Flächennutzungskodierung.....	76
Flurabstandsklasse	
nach Meßer.....	77
Flurabstandsregulierung.....	106
Flutung.....	109
natürliche.....	113
Flutungsparameter	111
Gefälleklasse	
nach Meßer.....	77
Genauigkeitsparameter	
Datenzuweisung	19
geographische Breite	
Ermittlung aus Koordinaten.....	93
GeoTiff-Dateien	
Export.....	96
Gesamtverdunstungshöhe	
nach Schroeder&Wyrwich	73
GLEI	
Anwendungsbeispiel.....	71
Grubenbauwerke	109
Grundwassermodell	
Fragestellungen	7
Import	
Teilmodell	43
Infiltration.....	105
inst. Eingabedatei	
Neubildung	96
Isochrone	62
Kalibrierung	
Beispiel.....	29
Hinweise	32
schematisches Vorgehen	32
Klimadaten	

instationär.....	86
Klima-Zeitreihen	
instationäre Neubildung	94
Klimazonen	
nach Meßer.....	77
Klimazonen-ID	
Attribut NKID	92
Klüfte	
erzeugen mit LERA	49
Knoten	
erzeugen	12
Knotenabstand	
durchschnittlicher	13
Kolmation	105
Kontrolllinie	
Nutzungshinweise.....	67
Sortierung	67
Theorie.....	67
Zuweisungsrichtung.....	69
Kontur	
erzeugen	10
Leakage	
bei undurchlässiger schicht	106
Beziehungen	105
Massenbilanz	66
im Kontrollvolumen	71
Modellart	
Aufbau	4
Modelldatei	
Zeiteinheit festlegen	7
Nachbelegung der Daten	
automatisch	42
Netzgenerator	
TRIANGLE	13
Netzgenerierung	
automatisch	4
Netzrand	
definieren.....	5
Netzverfeinerung	
vertikal	37
Neubildungsberechnung	
nach Bodenwasserbilanz	85
nach Meßer 2008.....	75
nach Schroeder&Wyrwich	73
Neubildungsrate	
Berechnung.....	73
instationäre, Berechnung	88
Nummerierung	

automatisch	42
Nutzungsartenkatalog	78
Polderbrunnen.....	106
Reale Verdunstung	75
reale Verdunstungshöhe	
Ermittlung	77
Reliefenergie	
für Neubildungsberechnung	74
RUBINFLUX	
Berechnung.....	93
instationäre Neubildungsberechnung	88
RVR-Code	
Flächennutzung	75
Schlieren	
Darstellung.....	64
Einzugsgebietsermittlung	64
See	
durchströmende Wassermenge	71
Sickerlinie	
im Damm	108
Stauziel	
einer Grube	110
Flutungsparameter	111
Stofftransport	
notwendige Angaben.....	50
Stromlinie	
darstellen	63
Theorie.....	63
Strömung	
invertiert	66
Struktur	
Einbau in bestehendes Modell	15
erstellen, importieren.....	8
modifizieren.....	9
Strukturdaten	
direkte Zuweisung	17
Sümpfungsbrunnen	108
Teilmodell	
importieren.....	43
löschen.....	43
Transportmodell	
erstellen	49
Uferfiltratmenge	
Ermittlung	68
Verdunstung	
potentielle	85
Versiegelungsgrad	86, 89
Vorflutinteraktion	105

Wassergehalt	
bei Feldkapazität (NKFK)	92
bei permanentem Welkepunkt (NKWP)	92
Wasserhaushaltsgleichung	73
Wasserschutzzone	
Ausweisung von	62
Welkepunkt	
permanenter	85
Wurzeltiefe	
effektive	86
Zeitschrittweite	
Erläuterung	51
ZEPS	
Zusammenfallende Schichten, Schwellwert	37
Zugabemenge	111
Zustrom	
grundwasserbürtig	69
Zwangsgeometrie	6

4 Notizen