

ResiBil – Wasserressourcenbilanzierung und -resilienzbewertung
im Ostteil des sächsisch-tschechischen Grenzraumes

Hydrogeologie des Sächsisch-Böhmischen Kreidebeckens zwischen Erzgebirge und Jeschken



Z. Hrkal, D. Rozman und P. Eckhardt (eds)



Europäische Union. Europäischer
Fonds für regionale Entwicklung.
Evropská unie. Evropský fond pro
regionální rozvoj.



Ahoj sousede. Hallo Nachbar.
Interreg VA / 2014–2020

**Hydrogeologie
des Sächsisch-Böhmischen Kreidebeckens
zwischen Erzgebirge und Jeschken**





Europäische Union. Europäischer
Fonds für regionale Entwicklung.
Evropská unie. Evropský fond pro
regionální rozvoj



Ahoj sousede. Hallo Nachbar.
Interreg VA / 2014–2020

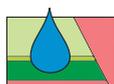
ResiBil – Wasserressourcenbilanzierung und -resilienzbewertung
im Ostteil des sächsisch-tschechischen Grenzraumes

Hydrogeologie des Sächsisch-Böhmischen Kreidebeckens zwischen Erzgebirge und Jeschken

Zbyněk Hrkal, David Rozman und Pavel Eckhardt (eds.)

O. Nol, Š. Mrázová, V. Nakládal, M. Pohle,
F. Mihm, S. Mittag, A. Rommel

2020



ResiBil

LANDESAMT FÜR UMWELT,
LANDWIRTSCHAFT
UND GEOLOGIE



CZECH
GEOLOGICAL
SURVEY



Výzkumný ústav
vodohospodářský
T. G. Masaryka
veřejná výzkumná instituce

ResiBil ist ein vom Europäischen Fonds für regionale Entwicklung unterstütztes, internationales Projekt aus dem Programm zur Förderung der grenzübergreifenden Zusammenarbeit zwischen der Tschechischen Republik und dem Freistaat Sachsen (Laufzeit 2014–2020), registriert unter der Nummer 100267011.

Als Leadpartner beteiligte sich auf deutscher Seite das Sächsische Landesamt für Umwelt, Landwirtschaft und Geologie (LfULG) und auf tschechischer Seite die Projektpartner des Tschechischen Geologischen Diensts (ČGS/Česká geologická služba) und des Wasserforschungsinstituts T.G. Masaryk, öffentliches Forschungsinstitut (VÚV TGM, v.v.i./Výzkumný ústav vodohospodářský).

Titelseite: Blick ins Elbtal, Sächsisch-Böhmische Schweiz (Foto K. Motyčková & J. Šír 2013)

Titelbild: König-Johann-Quelle
(Foto P. Tomanová Petrová 2017)

© Zbyněk Hrkal a kol., 2020

ISBN 978-80-87402-89-4

Inhalt

1 Einleitung	7
2 Schwerpunkte der Bearbeitung	10
3 Geländearbeiten	11
3.1. Übersicht der geologischen Vorarbeiten	11
3.2. Hydrogeologische Bohrarbeiten	14
3.3. Geophysikalische Bohrlochmessungen	16
3.4. Abflussmessungen	22
3.5. Kartierung und Bemessung von Quellen	24
4 Mathematische Modellierung	28
4.1. Hydrologische Bilanzmodellierung	28
4.1.1. Wasserhaushaltsmodellierung im Gebiet Lückendorf	28
4.1.2. Wasserhaushaltsmodellierung in den Gebieten Děčínský Sněžník und Kirnitzsch-Hřensko	30
4.2. Konzeptionelles Modell	32
4.2.1. Allgemeine hydrogeologische Bedingungen	32
4.2.2. Klimatische Grundlagen	33
4.2.3. Modellgebiet Děčínský Sněžník	35
4.2.4. Modellgebiet Kirnitzsch-Hřensko	39
4.2.5. Modellgebiet Lückendorf	43
4.3. Hydraulische Modelle	46
4.3.1. Kirnitzsch-Hřensko	47
Konzeptionelles Modell	47
Geometrie und Schichttypen	48
Eingangsparameter	49
Kalibrierung	49
Simulierte Grundwasserströmung	50
Einfluss der Grundwasserentnahmen und der Grundwasserneubildung auf den Grundwasserhaushalt und dessen Zustand	51
Berechnung der natürlichen Grundwasserressourcen und des nutzbaren Grundwasserdargebots	52
4.3.2. Děčínský Sněžník	54
Konzeptionelles Modell	54
Geometrie und Schichttypen	56

Eingangsparameter	56
Kalibrierung	57
Simulierte Grundwasserströmung	57
Berechnung der natürlichen Grundwasserressourcen und des nutzbaren Grundwasserdargebots	57
4.3.3. Lückendorf	59
Konzeptionelles Modell	59
Geometrie und Typen der Schichten	60
Eingangsparameter	60
Kalibrierung	61
Simulierte Grundwasserströmung	63
Berechnung der natürlichen Grundwasserressourcen und des nutzbaren Grundwasserdargebots	64
4.4. Ergebnisse der Modellsimulationen	65
4.4.1. Modellszenarien für die Modellgebiete Děčínský Sněžník und Kírnitzsch-Hřensko	65
4.4.2. Modellszenarien für das Modellgebiet Lückendorf	72
5 Zusammenfassung	77
Glossar	79
Literatur	84

1 | Einleitung

Das Projekt ResiBil ist ein vom Europäischen Fonds für regionale Entwicklung unterstütztes, internationales Projekt aus dem Programm zur Förderung der grenzübergreifenden Zusammenarbeit zwischen der Tschechischen Republik und dem Freistaat Sachsen (Laufzeit 2014–2020), registriert unter der Nummer 100267011. Das Projekt wurde in den Jahren 2016–2020 bearbeitet.

An der Bearbeitung der geologischen und hydrogeologischen Fragestellung beteiligte sich auf deutscher Seite als Leadpartner das Sächsische Landesamt für Umwelt, Landwirtschaft und Geologie (LfULG) und auf tschechischer Seite die Projektpartner des Tschechischen Geologischen Diensts (ČGS/Česká geologická služba) und des Wasserforschungsinstituts T.G. Masaryk, öffentliches Forschungsinstitut (VÚV TGM, v.v.i./Výzkumný ústav vodohospodářský).

Thema des Projektes war der gemeinsame Schutz der Grundwasserressourcen im sächsisch-böhmischen Grenzraum. Die Fläche des Projektgebietes umfasst 1.890 km². Auf dieser Fläche wurden drei Fokusgebiete abgegrenzt: Děčínský Sněžník, Kirmitzsch-Hřensko und Lückendorf (Abb. 1-1; schwarz umrandete Flächen). Für die Anfertigung eines umfangreicheren hydrogeologischen Modells wurden die Gebiete erweitert (Abb. 1-1; Flächen mit roter, blauer und gelber Schraffur).

Das Ziel des Projektes ResiBil war die Bilanzierung und Bewertung der langfristigen Nutzung der Grundwasserressourcen in der Sächsisch-Böhmischen Schweiz. Weiterhin sollte die nachhaltige Bewirtschaftung des Grundwassers unter Berücksichtigung des Klimawandels untersucht werden. Aus zuvor durchgeführten Studien (z.B. Projekt „GRACE“; Kalinová et al. 2014a) ergab sich, dass der sinkende Grundwasserspiegel im Projektgebiet sowohl auf klimatische Einflüsse (niederschlagsarme Jahre) als auch auf anthropogene Eingriffe (erhöhte Grundwasserentnahmen) zurückgeführt werden kann. Im Rahmen des Projektes wurde in einigen Gebieten ebenfalls der Einfluss des Bodenwasserhaushalts auf die Speicherung des Grundwassers untersucht. Auf Grundlage bisheriger Erfahrungen und Erkenntnisse, die bei der Erforschung der Klimaveränderung und ihrer Folgen für die Umwelt gewonnen wurden, ist langfristig mit einem Rückgang der Grundwasserneubildung zu rechnen. Eine detaillierte Analyse und Auswertung der Resilienz der Grundwasserressourcen fand in den drei o.g. Fokusgebieten statt.

Innerhalb des Projektes kamen verschiedene Instrumente zur Abschätzung des (nutzbaren) Grundwasserdargebotes und dessen effiziente (nachhaltige) Nutzung sowie zur wasserwirtschaftlichen Planung zum Einsatz.

Geologische und hydrogeologische Verhältnisse

Das Projektgebiet liegt am nordwestlichen Rand des Sächsisch-Böhmischen Kreidebeckens. Es handelt sich um ein mächtiges Sedimentationsbecken mit einem System aus mehreren getrennt vorliegenden Grundwasserleitern und besitzt ein großes Potenzial für die örtliche Wasserwirt-

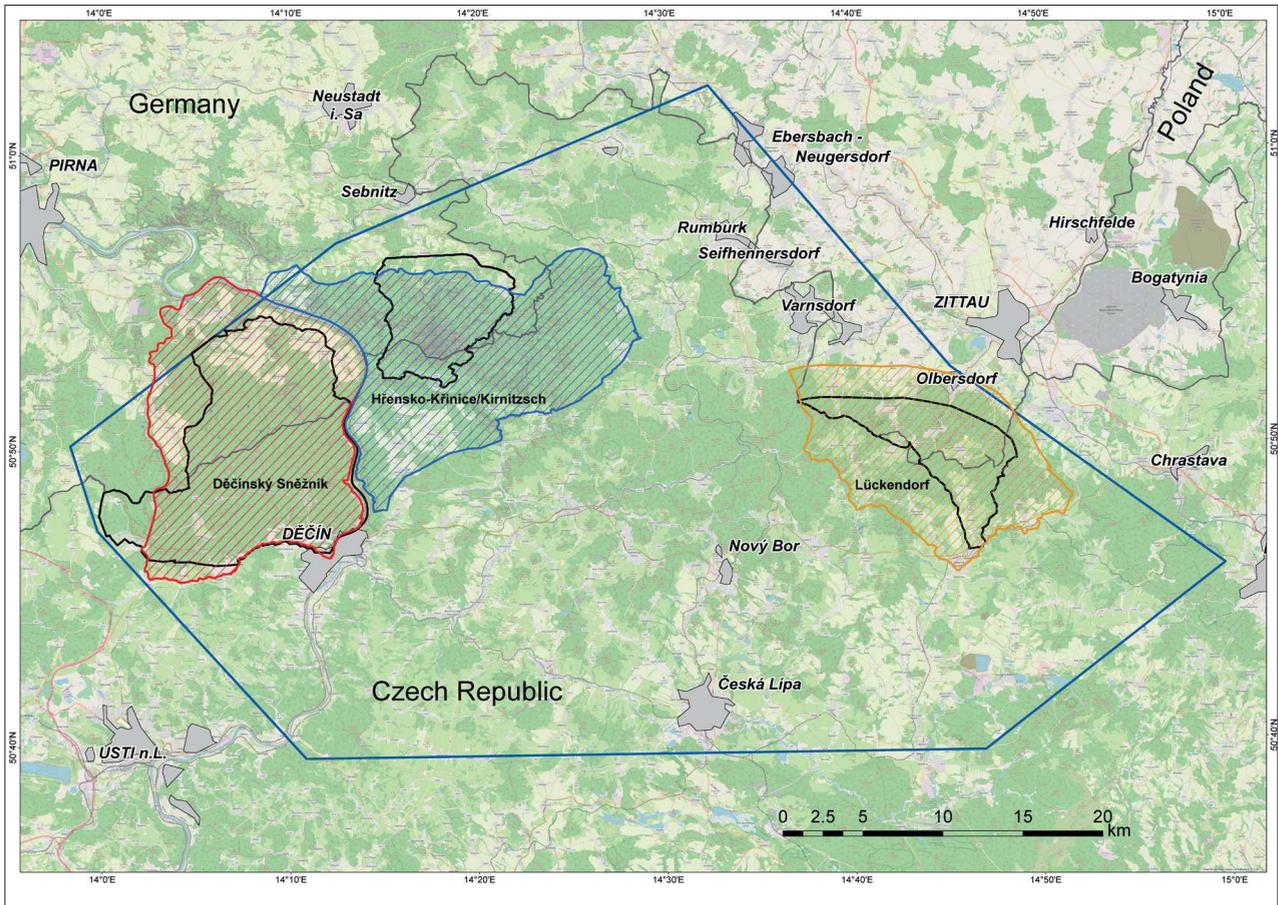


Abb. 1-1: Projektgebiet ResiBil (dunkelblau) mit den Grenzen der ursprünglichen (schwarz umrandet) und für die hydrogeologische Modellierung erweiterten Fokusgebiete (farbige Schraffur) (Mrázová et al. 2020).

schaft (Herčík et al. 2003). Das Auftreten von Grundwasser ist in den sedimentären Abfolgen an Bruchzonen und Störungen sowie an Poren im Gestein geknüpft. Ein kleiner Teil des Projektgebietes ist wiederum durch oberflächennah anstehende, kristalline Gesteine des magmatischen und metamorphen Untergrunds gekennzeichnet. In diesen Gebieten tritt das Grundwasser hauptsächlich in Bruchzonen, in oberflächlich verwitterten Gesteinsschichten sowie quartären Sedimenten auf. Im Bereich der kristallinen Gesteine entstanden flache Grundwasserleiter von geringer Mächtigkeit und nur lokaler Ausdehnung. Das Projekt ResiBil konzentriert sich daher auf wichtige, sedimentäre Grundwasserleiter im Bereich des Sächsisch-Böhmischen Kreidebeckens mit einem grenzüberschreitenden Umfang.

Aus geologischer Sicht betrachtet bestehen die Fokusgebiete Dėčinský Sněžník und Kirnitzsch-Hřensko aus kreidezeitlichen, sedimentären Ablagerungen (überwiegend diverse Sandsteintypen, seltener treten Mergelsteine mit Kalksteinlagen und kalkige Schluffsteine auf). Das Fokusgebiet Lückendorf liegt in einem Bereich entlang der Lausitzer Überschiebung, welche die kreidezeitlichen Sedimentgesteine im Süden von den proterozoischen und altpaläozoischen magmatischen Gesteinen des Lausitzer Massivs trennt.

Aus hydrogeologischer Sicht ist das Projektgebiet in mehrere Einheiten unterteilt, die hauptsächlich tektonisch definiert sind. Die detaillierte Untersuchung konzentriert sich auf drei

grenzüberschreitende Fokusgebiete (Abb. 1-1), für die jeweils ein Grundwasserströmungsmodell erstellt wurde:

- Děčínský Sněžník (Hoher Schneeberg)
- Kirnitzsch-Hřensko
- Lückendorf (im Zittauer Gebirge).

Eine wichtige Begrenzung im Projektgebiet stellt die Elbe dar. Diese teilt die benachbarten Fokusgebiete Děčínský Sněžník am linken Ufer (westlich der Elbe) und Kirnitzsch-Hřensko am rechten Ufer (östlich der Elbe). Gleichzeitig ist die Elbe die Hauptentwässerungsbasis in der Region. Das Děčínský Sněžník-Gebiet wird durch den NO-SW-streichenden Erzgebirgsabbruch in einen kleineren (südlichen) Bereich und einen größeren (nördlichen) Bereich oberhalb der Bruchzone unterteilt. Eine weitere wichtige, tektonische Struktur stellt die Děčín-Doubice Störung dar, die als Verlängerung des Erzgebirgsabbruchs gesehen werden kann (Abb. 3-2). Im nordöstlichen Teil des Projektgebietes liegt das Fokusgebiet Lückendorf im Zittauer Gebirge, in der Nähe der Gemeinden Lückendorf, Oybin und Petrovice.

Abgrenzung der Grundwasserleiter (Aquifer) und Grundwasserstauer (Aquitard/Aquiclude)

Die Grundwasserleiter (Aquifere) setzen sich im Sächsisch-Böhmischen Kreidebecken meist aus Sandsteinen und Konglomeraten zusammen, während andere lithologische Typen mit einem höheren Feinkornanteil (Ton und Schluff) Grundwasserstauern und -geringleitern (Aquitarde/Aquiclude) entsprechen. Das hydrogeologische Konzeptmodell im Kreidebecken unterscheidet bis zu vier getrennt vorkommende Aquifere. Die Benennung als auch die räumliche Abgrenzung ist auf deutscher und tschechischer Seite unterschiedlich. In Deutschland werden die Aquifere von oben nach unten nummeriert (1-4), die tschechische Terminologie klassifiziert die Aquifere wiederum alphabetisch (a-d) von unten nach oben. Zwischen den Grundwasserleitern treten teilweise markante, meist jedoch nur schlecht ausgebildete Schichten aus feinkörnigen Lagen (Tonsteine und Schluffsteine) auf. Diese trennenden Schichten werden im hydrogeologischen Sinne mit einem „ / „ dargestellt. So wird beispielsweise die stauende Schicht zwischen den Aquiferen A und B als „Stauerhorizont A/B“ bezeichnet. In diesem Text wird eine Benennung nach dem tschechischen System angewandt. Nachfolgend werden die Grundwasserleiter kurz beschrieben, eine umfassendere Darstellung ist in Kap. 4.2.1 zu finden.

- Aquifer 4 bzw. Aquifer A: Unterster Leiter bestehend aus wechselnden Lagen von Sandstein mit einer Mächtigkeit bis 140 m.
- Aquifer 3 bzw. Aquifer B (der Hauptaquifer): Wichtigster Aquifer für die Grundwasserentnahme in dem Gebiet. Ein Stauerhorizont existiert nur im Norden, im Süden liegen Aquifer B und C kombiniert vor.
- Aquifer 2 bzw. Aquifer C: Bildet mit Aquifer B im Süden einen kombinierten Grundwasserleiter mit hohem Wasserpotential.
- Aquifer 1 bzw. Aquifer D: Kleine und hydrogeologisch eher unwichtige Vorkommen, die an der Oberfläche anstehen.

Weitere Informationen zu den regionalgeologischen Einheiten, dem Aufbau und der Zusammensetzung der einzelnen Gesteinsschichten sowie der tektonischen Situation im Projektgebiet kann der Veröffentlichung „*Geologie des Sächsisch-Böhmischen Kreidebeckens zwischen Erzgebirge und Jeschken*“ (Mrázová et al. 2020) unter [1] entnommen werden.

2 | Schwerpunkte der Bearbeitung

Der Aufbau eines einheitlichen, grenzübergreifenden geologischen 3D-Modells bildet die Grundlage für die hydrogeologischen und wasserwirtschaftlichen Analysen. Die Korrelation der voneinander abweichenden geologischen Lagerungsmodelle auf deutscher wie tschechischer Seite stellte dazu eine notwendige Voraussetzung für die anschließende Erstellung eines konzeptionellen, hydrogeologischen 3D-Modells dar.

Im Rahmen des Projekts wurden zur genaueren Untersuchung der kreidezeitlichen Gesteinseinheiten Geländearbeiten genutzt, die sich auf die geometrische Abgrenzung der Hauptgrundwasserleiter und -stauer sowie auf die Ermittlung der quantitativen Kenngrößen konzentrierten. Für diese Zwecke wurden zwei hydrogeologische Erkundungsbohrungen realisiert, die – nach der Auswertung mit komplexen Bohrlochmessmethoden – zu Grundwassermessstellen ausgebaut wurden, um den Grundwasserspiegel kontinuierlich zu erfassen.

Weiterhin erfolgte eine detaillierte Bestandsaufnahme der Quellen sowie Durchflussmessungen für ausgewählte Fließgewässer. Für die Erstellung des hydraulischen Modells wurde ein hydrologisches Bilanzmodell aufgebaut und eine umfassende Datenbasis aller wasserwirtschaftlichen Grundwasserentnahmestellen, einschließlich der Zeitreihen ihrer Entnahmemengen, angefertigt. Mithilfe dieser Datengrundlage wurden hydraulische Modelle für die jeweiligen untersuchten Fokusgebiete aufgebaut, die anhand historischer Daten kalibriert wurden.

Der letzte Schritt umfasst numerische Simulationen verschiedener Entwicklungen der untersuchten Entnahmeszenarien und die Berechnung des nutzbaren Grundwasserdargebots.

3 | Geländearbeiten

3.1. Übersicht der geologischen Vorarbeiten

Das Ziel der geologischen Arbeit war es, eine gemeinsame geologische Karte zu erstellen, die sowohl den böhmischen als auch den sächsischen Teil des Projektgebietes umfasst (Abb. 3-1). Die Arbeiten lieferten unter anderem neue Daten und Informationen über die regionale Geologie, zur Petrographie und zur Tektonik. Diese geologischen Untersuchungen dienten als Basis für die nachfolgenden hydrogeologischen Arbeiten, insbesondere zur Erstellung der konzeptionellen Modelle.

Für die geologischen Untersuchungen der Hauptgrundwasserleiter kamen weiterhin eine Reihe wissenschaftlicher Methoden zum Einsatz. Insbesondere durch geophysikalische Messungen konnten neue Erkenntnisse über die Verbreitung der Gesteine im Projektgebiet gewonnen werden. Ein wichtiges Vorgehen war dabei die Korrelation zwischen den bestehenden geologischen Systemen und die anschließende Überführung in eine einheitliche Karte.

Geophysikalische Untersuchungen ermöglichen es, größere tektonische Störungen (Brüche, Verwerfungen, Überschiebungen) nachzuweisen und zu präzisieren sowie die Tiefenlage von unterschiedlichen Gesteinen zu ermitteln. Zu den verwendeten geophysikalischen Messmethoden gehören die Gravimetrie (Schweremessung) sowie seismische, geoelektrische und elektromagnetische Untersuchungen, welche im Folgenden kurz dargestellt werden. Allgemein werden bei geophysikalischen Untersuchungen die Änderungen der spezifischen geophysikalischen Eigenschaften der einzelnen Gesteine, wie Dichte oder elektrischer Widerstand, zur Unterscheidung genutzt.

Mithilfe der Gravimetrie konnte z.B. flächendeckend Tiefe und Charakter der einzelnen Gesteinsschichten und Störungen im Maßstab 1:100.000 bestimmt werden. Für die regionale Untersuchung des geologischen Aufbaus wurden bereits existierenden Schweredaten (mehr als 400.000 Werte mit einer Punktdichte von 2-4 Punkten pro km²) genutzt und für das gesamte Projektgebiet eine flächendeckende gravimetrische Karte der Bouguer-Anomalie erstellt (Abb. 3-2).

Die anschließende Korrelation der gravimetrischen mit der geologischen Karte ermöglichte es u.a. die Grenzen von Granitkörpern zu definieren, die Oberfläche des von Kreidesedimenten überdeckten kristallinen Grundgebirges abzuschätzen und bedeutsame vulkanische Zonen sowie mögliche hydrologische Verbindungen zwischen regionalgeologischen Einheiten zu finden. Weiterhin konnten tektonische Bereiche, wie Störungssysteme und Überschiebungen, genauer nachvollzogen werden.

Weitere Untersuchungen erfolgten mit Hilfe von geoelektrischen, seismischen und elektromagnetische Methoden an ausgewählten Standorten, die entweder einen bedeutenden, hydrogeologischen Bereich darstellten oder den Verlauf einer geologischen Störung untersuchen sollten.

Für eine umfassendere Beschreibung der einzelnen geophysikalischen Untersuchungsmethoden im Projekt ResiBil wird auf Kap. 2 im Bericht „*Geologie des Sächsisch-Böhmischen Kreidebeckens zwischen Erzgebirge und Jeschken*“ (Mrázová et al. 2020) unter [1] verwiesen.

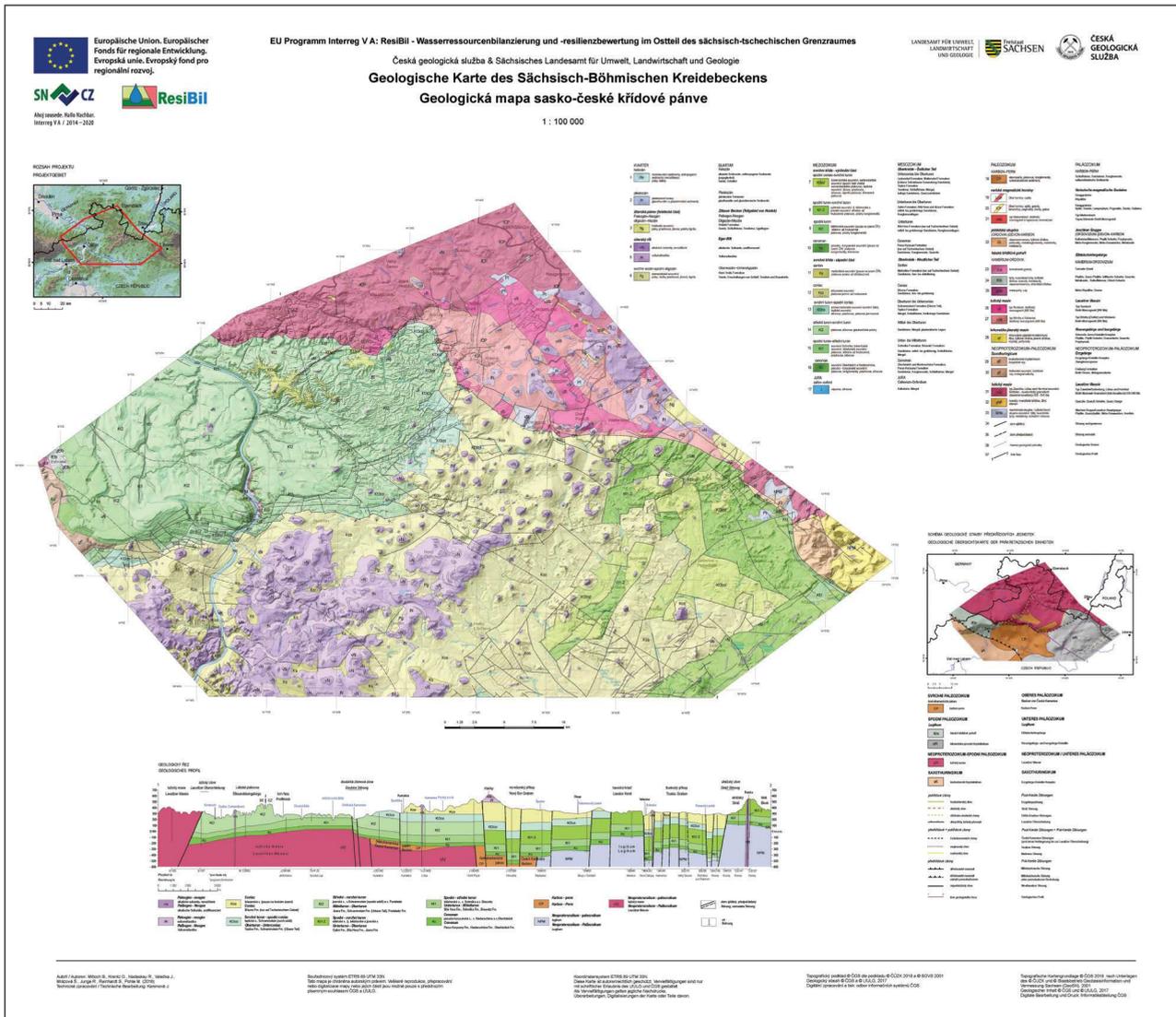
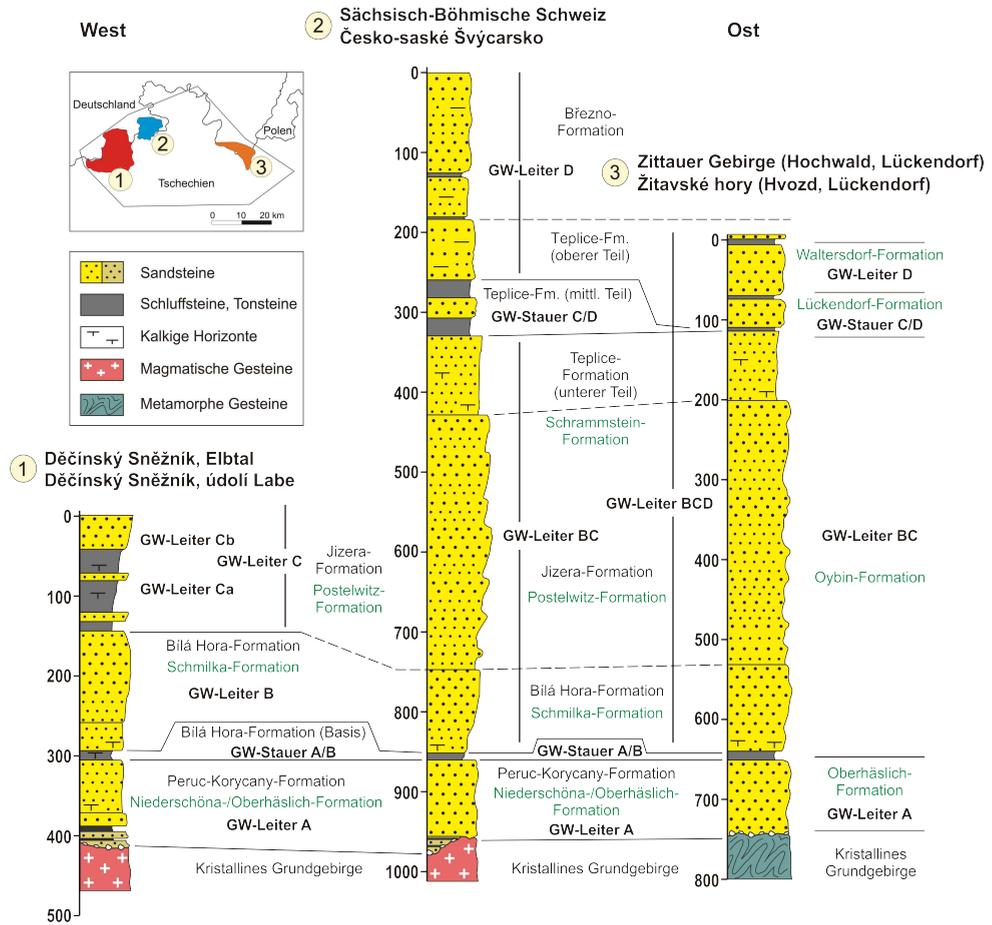


Abb. 3-1:
 Geologische Karte
 des Projektgebietes
 im Maßstab
 1 : 100.000 (Mitte)
 mit geologischem
 Profil (unten),
 der geologischen
 Übersichtskarte der
 präkretazischen
 Gesteine (rechts) und
 einer zweisprachigen
 Legende (Mlčoch et al.
 2018).

Im Rahmen der Projektumsetzung wurden zwei hydrogeologische Erkundungsbohrungen realisiert. Die Bohrung 4650_Y bei Jedlová und die Bohrung 6412_L bei Lesné befinden sich beide in unmittelbarer Nähe zur Lausitzer Überschiebung westlich bzw. östlich des Fokusgebietes Lückendorf. Die Erkundungen umfassten die Bohrarbeiten, die geologische Dokumentation des erbohrten Gesteinsmaterials und die Bohrlochmessungen einschließlich der Untersuchung der Grundwasserleiter. Die Bohrung 4650_Y erreichte eine Endteufe von 200,2m und die Bohrung 6412_L eine Endteufe von 101,25m. Das primäre Ziel der Erkundungsbohrung 4650_Y bei Jedlová war die Überprüfung und Anpassung des vorhandenen geologischen Profils durch die Abfolge der Teplice- und Březno-Formation (kreidezeitliche Sedimente des Coniacs), die im Bereich der Lausitzer Überschiebung eine Gesamtmächtigkeit von ca. 300 m erreicht.

Ziel der Erkundungsbohrung 6412_L bei Lesné war der Nachweis der Existenz einer vermuteten Abfolge von permokarbonen Gesteinen an der Lausitzer Überschiebung, welche die

Abb. 3-3:
Schematisierte
geologische Profile für
die drei Fokusgebiete
mit Bezeichnung
der Formationen
und Angaben der
hydrogeologischen
Korrelationen der
Einheiten (Nádaskay
2020).



3.2. Hydrogeologische Bohrarbeiten

Im Rahmen der hydrogeologischen Untersuchungen wurde zunächst eine detaillierte Recherche aller bisher durchgeführten hydrogeologischen Bohrarbeiten vorgenommen. Als Grundlage hierfür erfolgte die Analyse von Bestandsdaten aus der Geodatenbank des ČGS. Aufgrund der hohen Bohrungsdichte konnten Bereiche mit einer geringeren Datenlage statistisch interpoliert werden. Zu diesen Gebieten zählt v.a. der nördliche Bereich im tschechischen Teil des Fokusgebietes Děčínský Sněžník (Ortschaften Maxičky und Sněžník). Ergänzend wurden zwei hydrogeologische Untersuchungsbohrungen geplant, die im September 2017 durch die Firma Advera realisiert wurden.

Die Bohrung RE001 Sněžník wurde durch kernloses Bohrverfahren bis zu einer Teufe von 99 m gebohrt. Die obersten 4 m weisen dabei einen Durchmesser von 245 mm auf, der darunterliegende Bereich der Bohrung wurde mit einem Durchmesser von 187 mm gebohrt. Der Grundwasserspiegel wurde in einer Tiefe von 78 m unter Geländeoberkante (GOK) erreicht.

Im Anschluss an die Bohrarbeiten wurde das Bohrloch bis zur Sohlteufe verrohrt. Ab einem Tiefenniveau von 60 m unter der Geländeoberkante bis zur Endteufe von 99 m ist das Bohrloch



Abb. 3-4: Blick in das unverschlossene Standrohr der Grundwassermessstelle RE001 bei Sněžník zur Aufzeichnung des Grundwasserspiegels.



Abb. 3-5: Blick auf offenes Standrohr der Grundwassermessstelle RE002 bei Maxičky.

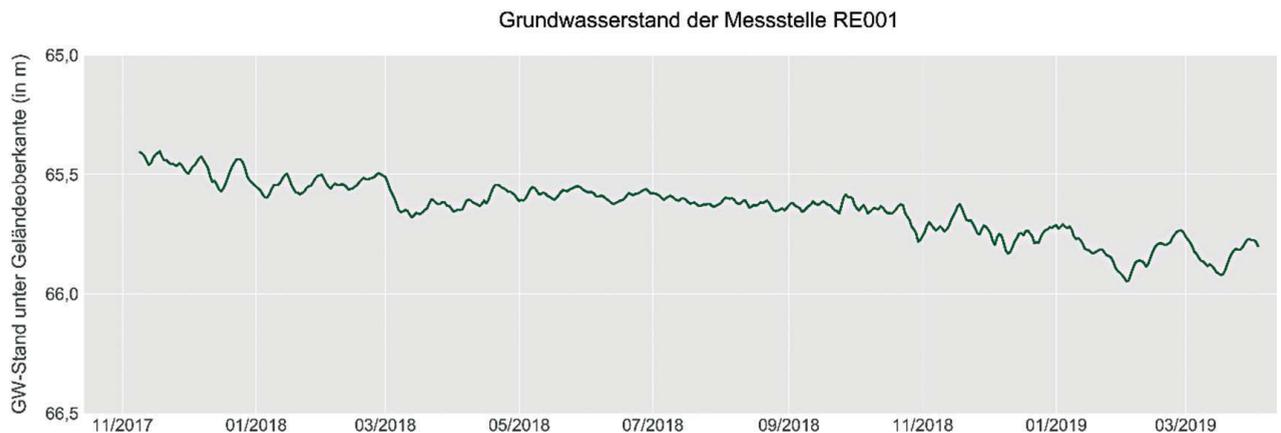


Abb. 3-6: Die Abnahme des Grundwasserstandes in der Grundwassermessstelle RE001 bei Sněžník im Zeitraum November 2017 bis Oktober 2019.

mit perforierten Rohren ausgestattet. Eine Verfüllung mit Filterkies wurde bis zu einer Tiefe von 45 m realisiert. Nach Überprüfung des Füllstandes mittels Bohrlochmessverfahren wurde der verfilterte Teil des Ringraumes mit Tonpellets aufgefüllt und der darüber liegende Bereich mit Beton abgedichtet. Zur Sicherung der verbauten Technik und gegen ungewolltes Verfüllen des Brunnenraumes erhielt die Bohrung einen abschließbaren Brunnenkopf (sichtbar in Abb. 3-4).

Beide Bohrungen wurden mit automatisierten Datenloggern für kontinuierliche Messung des Grundwasserspiegels ausgestattet. Die erhobenen Wasserstandsdaten fanden anschließend Anwendung bei der Kalibrierung der numerischen Strömungsmodelle.

Abb. 3-6 zeigt beispielhaft die gemessene Absenkung des Grundwasserstandes in der Grundwassermessstelle RE001 bei Sněžník.

Die Bohrung RE002 Maxičky wurde, vergleichbar mit der Bohrung RE001 Sněžník, ebenfalls durch das kernlose Bohrverfahren bis zu einer Teufe von 102 m gebohrt. Die obersten 4 m wurden – wie auch bei der Bohrung RE001 – mit einem Durchmesser von 245 mm gebohrt, der darunterliegende Bereich mit einem Durchmesser von 187 mm. Der Grundwasserspiegel wurde in einer Tiefe von 91 m erreicht.

Im Anschluss wurde das Bohrloch mit einem PVC-Rohr bis zur Sohlteufe verrohrt. Ab einem Tiefenniveau von 60 m unter der Geländeoberkante bis zur Endteufe von 102 m ist das Bohrloch mit perforierten Rohren ausgestattet. Eine Verfüllung mit Filterkies wurde bis zu einer Tiefe von 45 m realisiert. Nach Überprüfung des Füllstandes mittels Bohrlochmessverfahren wurde der verfilterte Teil des Ringraumes mit Tonpellets aufgefüllt und der darüber liegende Bereich zu zementiert. Auf der Bohrung wurde ebenso ein abschließbarer Brunnenkopf installiert (Abb. 3-5).

3.3. Geophysikalische Bohrlochmessungen

In beiden Bohrungen wurden durch die Firma AQUATEST zwei Arten von Bohrlochmessungen durchgeführt. Die erste Messkampagne erfolgte vor dem abschließenden Ausbau zur Grundwassermessstelle, die zweite nach Fertigstellung des Messstellenausbaus (Procházka 2017).

Das Ziel der ersten Messkampagne war die detaillierte Gliederung der durchbohrten Gesteinsabfolge, das Einmessen des Bohrverlaufs (Abweichung der Bohrung von der Lotsenkrechten), die Ermittlung der Abschnitte mit kavernen (ausgehöhlten) Gesteinen, die Identifizierung offener Klüfte sowie die Ermittlung grundlegender physikalischer Eigenschaften der Gesteine.

Folgende Messmethoden wurden eingesetzt:

- **Gamma-Gamma-Dichtemessung:** Bei dieser Methode wird eine künstliche radioaktive Quelle in das Bohrloch herabgelassen und die Wechselwirkung mit den umgebenden Gesteinen gemessen. Aus den gewonnenen Daten können Aussagen zur Lithologie und zur Porosität getroffen werden.
- **Kaliber-Messung:** Messung des tatsächlichen Bohrlochdurchmessers, da dieser in Abhängigkeit des durchbohrten Gesteins variieren kann.
- **Natürliche Gamma-Messung:** Messung der natürlich auftretenden Radioaktivität in einem Gestein. Es kann damit vor allem zwischen sandigen oder tonigen Sedimenten unterschieden werden.
- **Neutron-Neutron-Messung:** Neutronen werden von einem im Bohrloch herabgelassenen Sender abgegeben und von dem umliegenden Gestein teilweise absorbiert und anschließend zurückgeschickt. Mit dieser Methode kann die relative Porosität innerhalb des Gesteins abgeschätzt werden.
- **Messung der magnetischen Suszeptibilität:** Dabei wird die magnetische Wirksamkeit der Gesteine gemessen. Anhand dieser Messung kann zwischen verschiedenen Gesteinen (z.B. zwischen magmatischen und sedimentären Gesteinen) unterschieden und Abgrenzungen vorgenommen werden.

- Messung des spezifischen elektrischen Widerstands: Der elektrische Widerstand der Gesteine wird beim Herablassen einer Messeinrichtung im Bohrloch ermittelt. Hierbei können vor allem Aussagen über die Korngröße von Sedimentgesteinen und die Wassersättigung getroffen werden.
- Induktionsmessung im Bohrloch: Ähnlich der Methode der elektrischen Widerstandsmessung wird hier die elektrische Leitfähigkeit der Gesteine ermittelt. Die Ergebnisse geben einen Hinweis auf das Vorhandensein von Grundwasser.
- Inklinometermessung: Während dieser Messung wird die Lage der Schieferung bzw. Schichtung senkrecht zur Achse eines Bohrlochs erfasst.

Nach Fertigstellung der Grundwassermessstellen erfolgte in der zweiten Messkampagne eine Untersuchung der hydrodynamischen Verhältnisse in den Bohrlöchern, der physikalisch-chemischen Eigenschaften des Wassers sowie einer etwaigen Schichtung. Weiterhin wurde der Verbau des Bohrlochs kontrolliert. Dabei lag besonderes Augenmerk auf der Verfüllung zwischen Rohr und Gestein und auf dem Ringraum der Bohrung (Lage der Perforation, die Rohrverbindungen, auf die Bohrlochsohle nachgefallenes Material, Fremdkörper in der Bohrung u.Ä.).

Nach Fertigstellung der Bohrung wurden folgende Messmethoden eingesetzt:

- Kameraerfahrung im Bohrloch
- sensible Temperaturmessungen
- Widerstandsmessungen unter Anwendung eines Tracer-Stoffes
- Gamma-Gamma-Dichtemessung
- Kaliber-Messung
- tiefenverbundene Messungen der physikalisch-chemischen Eigenschaften: Dazu wurde die

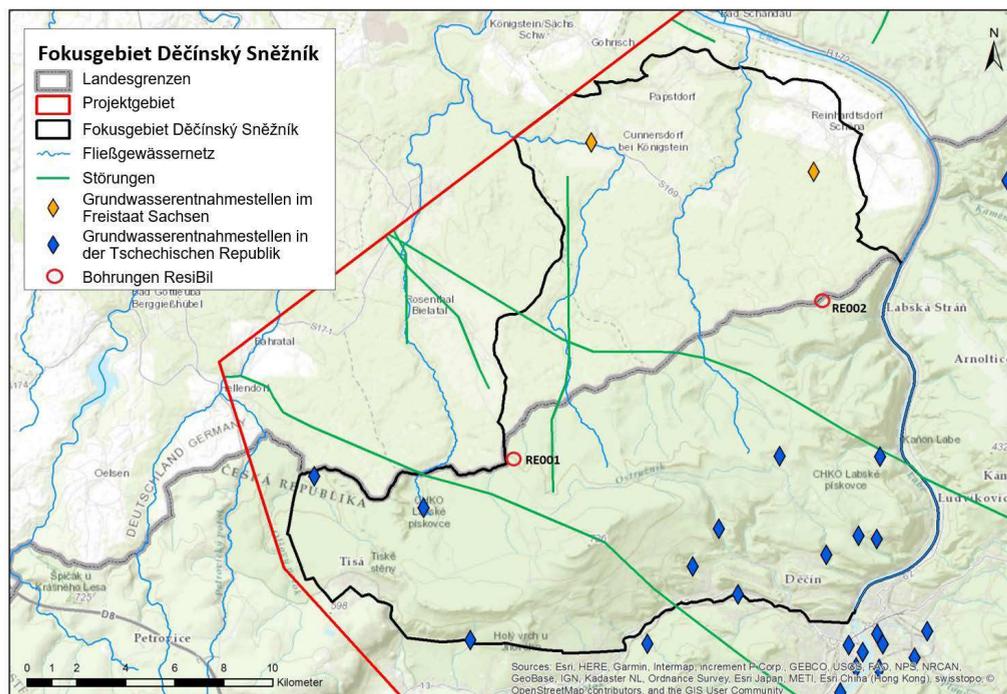


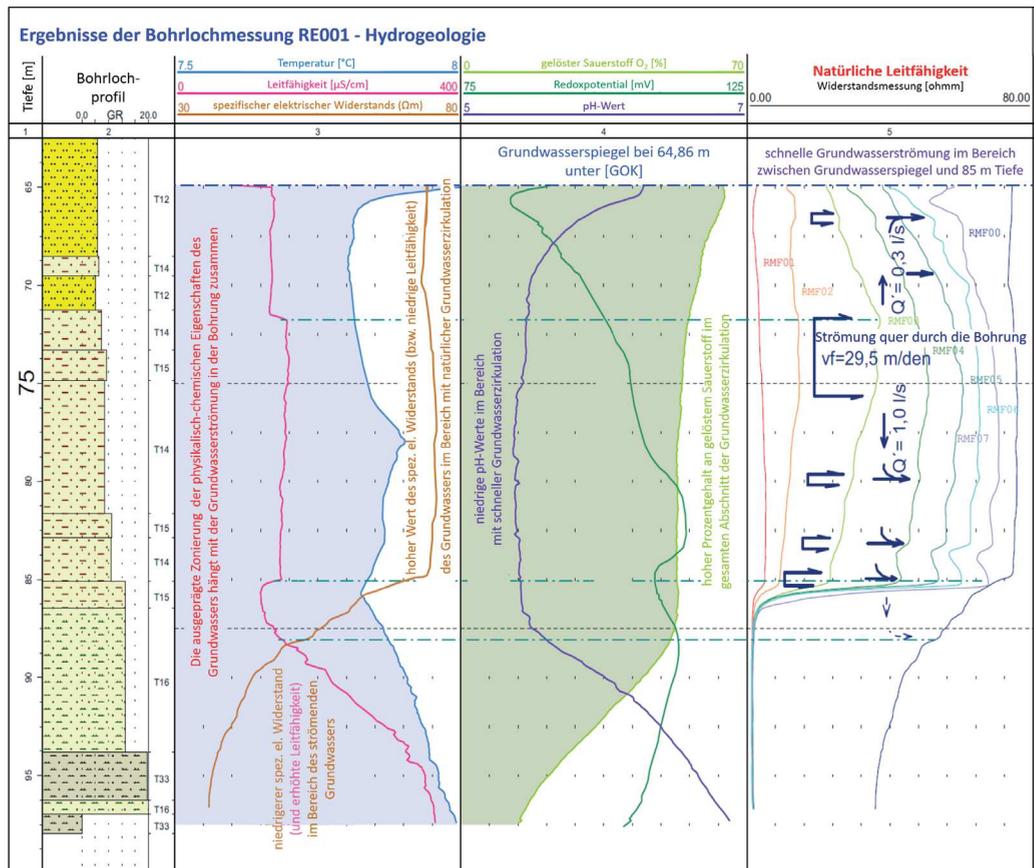
Abb. 3-7: Lage der beiden hydrogeologischen Bohrungen RE001 und RE002 im Westen des Projektgebietes ResiBil.

Multiparametersonde OCEAN zur Ermittlung von Leitfähigkeit, Temperatur, pH-Wert, Redoxpotential und Sauerstoffgehalt im Grundwasser verwendet.

Basierend auf den verschiedenen Messverfahren konnte das bereits existierende lithologische Profil – bestehend aus verschiedenen Sedimenten der Kreide – detailliert angepasst werden. Die Bohrung 4630B (Prostřední Žleb) konnte als weitere Hilfestellung für die detaillierte Beschreibung der Schichtenfolge verwendet werden. Sie liegt in einem nahegelegenen Wald östlich der Gemeinde Maxičky und wurde im Rahmen des tschechischen Projekts „Rebilance“ im Jahre 2015 abgeteuft. Bei einem Vergleich mit den Messergebnissen aus der Bohrung RE001 ist zu sehen, dass die Sedimentschichten nach Osten hin schwach einfallen. In beiden Bohrungen konnten vergleichbare Sedimentabfolgen festgestellt werden, in der Bohrung RE002 tritt jedoch ein Versatz von 58,5 m auf. Die Schichten liegen in dieser Bohrung um knapp 60 m tiefer als in Bohrung RE001 (Abb. 3-7).

Das hydrodynamische Regime ist in beiden Bohrungen unterschiedlich. Die horizontale Grundwasserströmung in der Bohrung RE001 erreicht eine Geschwindigkeit von 29,5 m/Tag, die vertikale Komponente der Strömung 1,0 l/s (Abb. 3-8 und Abb. 3-10). Die ermittelte Strömung beschränkt sich dabei auf den Bereich von 66,9 m bis 85,0 m (bzw. 88 m) unter Geländeoberkante. In der Bohrung RE002 ist wiederum nur eine sehr geringe vertikale Strömung (0,002 l/s) in Richtung Sohle messbar (Abb. 3-9 und Abb. 3-11).

Abb. 3-8:
Hydrogeologische
Ergebnisse der
Bohrlochmessungen
an der Bohrung RE001
bei Sněžník.



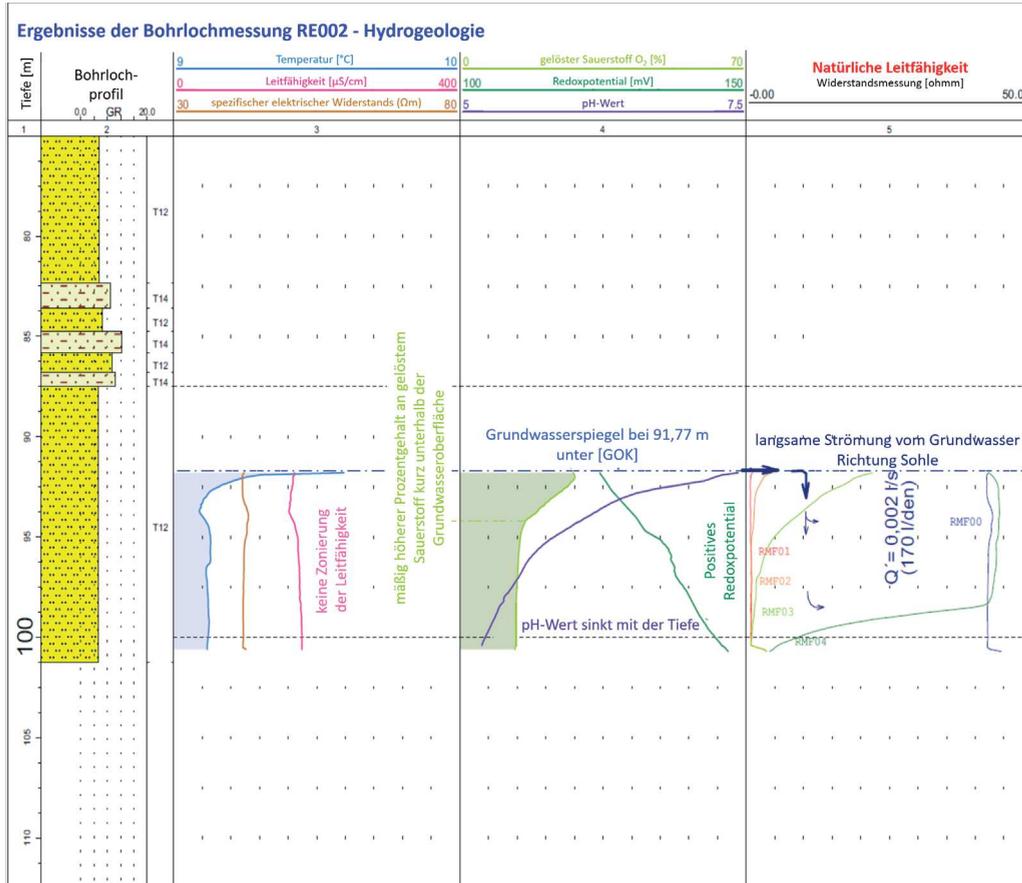


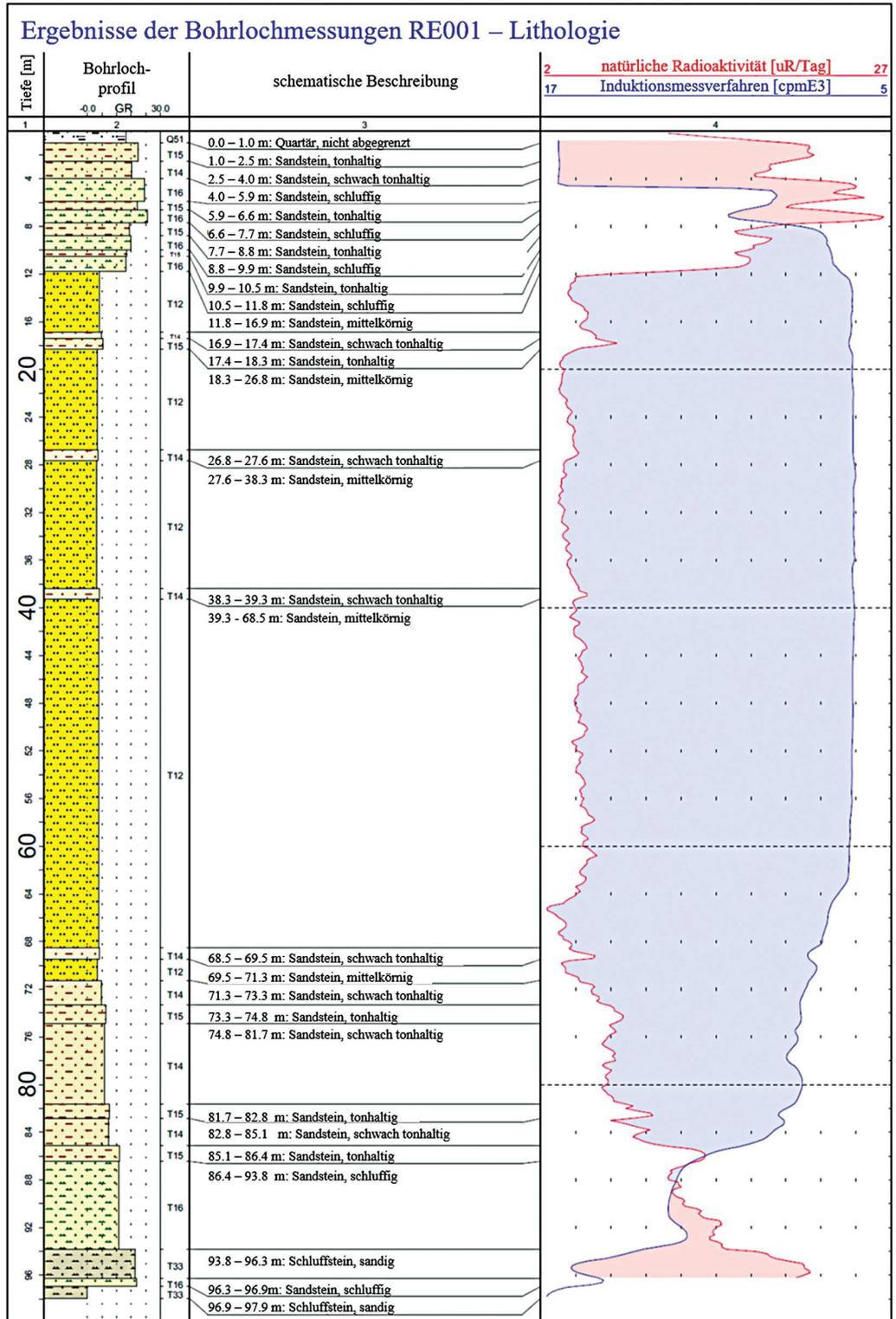
Abb. 3-9: Hydrogeologische Ergebnisse der Bohrlochmessungen bei der Bohrung RE002 Maxičky.

Die physikalisch-chemischen Eigenschaften des Wassers sind in beiden Bohrungen ähnlich. Typisch ist der sehr niedrige pH-Wert (bis 5,3), positive Redoxpotentiale und elektrische Leitfähigkeiten zwischen 120 und 170 $\mu\text{S}/\text{cm}$. Die Temperatur an der Sohle der Bohrung RE001 liegt um etwa 1 °C niedriger als in der Bohrung RE002. Der Grund dafür ist, dass in der Bohrung RE001 die Temperatur an der Sohle durch die Strömung des relativ kalten Grundwassers beeinflusst wird. Die Temperatur an der Sohle der Bohrung RE002 entspricht der natürlichen Temperatur des Gesteinsmassivs.

Im intensiv durchströmten Bereich der Bohrung RE001 (66,9 – 88 m unter GOK) wurde eine hohe Konzentration an gelöstem Sauerstoff festgestellt, was auf geringe Verweilzeiten des Grundwassers im Gesteinsmassiv hindeutet. Aufgrund der recht geringen Durchströmung des Untergrunds um Bohrung RE002 wäre mit einem niedrigen Sauerstoffgehalt im Grundwasser zu rechnen. Jedoch weisen die Messungen eine leicht erhöhte Sauerstoffkonzentration auf. Eine mögliche Erklärung hierfür ist ein potentieller Zustrom aus Bereichen mit oxidierenden (sauerstoffreichen) Verhältnissen, wie sie in Klüften oberhalb der Grundwasseroberfläche vermutet werden.

Beide Bohrungen wurden nahezu Lotrecht abgeteuft. Alle Rohrverbindungen und Perforationen sind ohne erkennbare Schäden eingebracht. Die Verfüllung mit Filterkies erfolgte im Bereich der perforierten Rohrstrecke sowie, in Richtung Sohle, etwas darüber hinaus.

Abb. 3-10: Geologische Ergebnisse der Bohrlochmessungen an der Bohrung RE001 bei Sněžník.



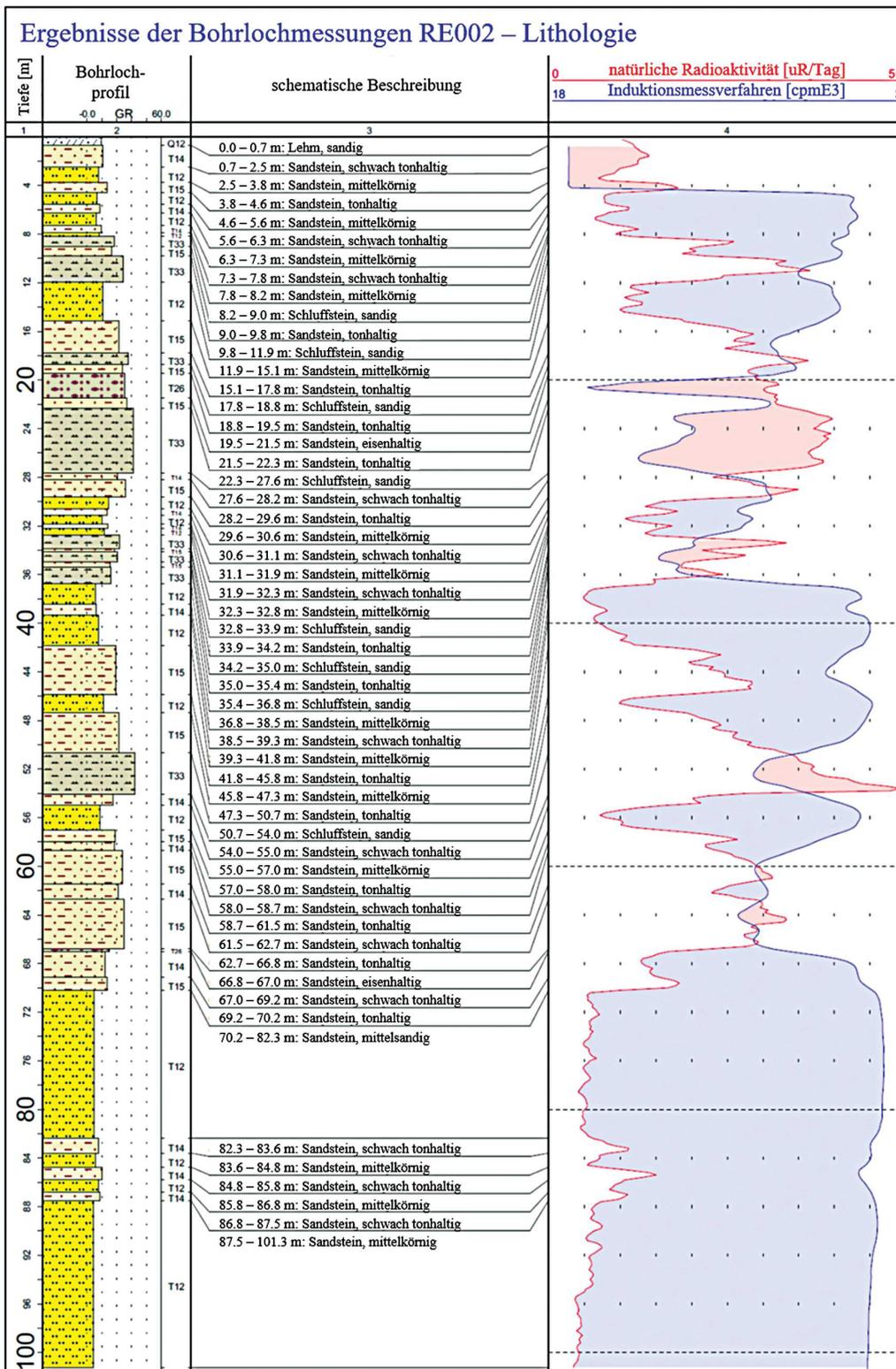


Abb. 3-11: Geologische Ergebnisse der Bohrlochmessungen an der Bohrung RE002 bei Maxičky.

3.4. Abflussmessungen

Die hydrogeologischen Verhältnisse können aufgrund der Charakterisierung der Oberflächengewässer (oberirdische Vorfluter) präzisiert werden. Die Grundwasserleiter sind für gewöhnlich mit den Bächen und Flüssen hydraulisch verbunden, wobei das Grundwasser entweder in diese Vorfluter entwässert oder Wasser aus diesen in die Bodenzone infiltriert. Dabei gilt die Regel: Wenn der Grundwasserspiegel im Grundwasserleiter höher als der Wasserspiegel im Vorfluter liegt, dann kommt es zur Entwässerung des Grundwasserleiters (effluente Verhältnisse). Liegt der Grundwasserspiegel wiederum niedriger als der Wasserspiegel im Vorfluter, so wird der Grundwasserleiter vom Oberflächengewässer gespeist (influente Verhältnisse).

Das abgeführte Wasser einer Vorflut unterteilt sich in die Komponenten „Direktabfluss“ und „Basisabfluss“. Der Direktabfluss besteht mehrheitlich aus oberflächlich abfließendem Niederschlagswasser sowie schnell abfließenden, lateralen Abflussanteilen in den oberen, ungesättigten Bodenschichten. Der Basisabfluss hingegen speist sich aus den zeitlich verzögert abfließendem Zwischenabfluss und dem Grundwasser. Tritt eine längere Zeitspanne ohne Niederschläge auf, spricht man vom Trockenwetterabfluss. Hierbei entstammt der Basisabfluss fast ausschließlich dem Zufluss aus dem Grundwasser. Wird der Basisabfluss an mehreren Profilen entlang des Vorfluters gemessen, kann die Intensität der Entwässerung (Grundwasserabfluss) oder Speisung (Grundwasserneubildung) des Grundwasserleiters für jeden Abschnitt zwischen zwei Messungen ermittelt werden. Derartige Messungen werden als sequenzielle Längsprofilmessungen bezeichnet. Auf diese Art können die Zu- und Abflüsse der jeweiligen hydrogeologischen Struktur im Umfeld der Vorfluter gut abgeschätzt werden.

Für das Modellgebiet Kirnitzsch-Hřensko ist der rechtselbische Fluss Kamenice (deutsch Kamnitz) bestimmend. Die Kamenice wurde in der Vergangenheit bereits mehrfach mittels Längsprofilmessung untersucht, zuletzt im Jahr 2013 im Zuge des Projektes „Rebilance“ (Kadlecová et al. 2015). Die Untersuchungen ergaben, dass der Unterlauf der Kamenice ab der Ortschaft Dolní Kamenice bis nach Hřensko durch Grundwasser gespeist wird. Die Gesamtentwässerung des Grundwassers aus dem turonischen Grundwasserleiter beträgt in diesem Abschnitt ca. 900 l/s (50 l/s pro Kilometer des Flusses).

Innerhalb des Projektes ResiBil lag der Fokus auf der Bemessung der linkselbisch verlaufenden Bäche, wo Längsprofilmessungen in der Vergangenheit in keinem größeren Umfang vorgenommen wurden. Die Messungen fanden im Juli und August 2018 statt, als die ganze Region von Trockenheit geprägt und der oberirdische Abfluss vernachlässigbar gering war. Der Abfluss wurde an ausgewählten Standorten hydrometrisch (mittels Flügelmessung) bestimmt. Gemessen wurden die im Fokusgebiet Děčínský Sněžník entspringenden Bäche, die nach Norden zur Elbe hinabfließen und den Großteil des turonischen Grundwasserleiters nördlich der Erzgebirgsstörungszone entwässern.

Die Untersuchungen der Abflussverhältnisse werden im Folgenden an den Beispielen der Gewässer Biela, Cunnersdorfer Bach und Krippenbach dargelegt (Abb. 3-13). Der Abfluss entlang der Biela wurde an 6 Profilen, beginnend an der Deutsch-Tschechischen Staatsgrenze, flussabwärts bis nach Königstein, ca. 1,5 km vor der Mündung in die Elbe, gemessen. Am ersten (höchstliegenden) Profil lag der Wert bei 13 l/s, am letzten Profil bei 275 l/s. Des Weiteren wurden zwei Nebenflüsse, der Bach Biela (2 l/s) und der Cunnersdorfer Bach (122 l/s), bemessen. Über den gesamten gemessenen Abschnitt entlang der Biela wurde ein Gesamtzufluss von 138 l/s ermittelt. Dieser Wert ergibt sich als Differenz von Biela (zwischen erstem und letztem Profil) und

den Zuflüssen zur Biela. In dem zwei km langen Abschnitt zwischen den Profilen Ottomühle (20 l/s) und Schweizermühle (113 l/s) ist die Abflusszunahme (um 93 l/s) sehr deutlich. Dieses Phänomen kann mit der Höhenlage des Grundwasserleiters BC erklärt werden. Die Basis des Leiters befindet sich an diesen Stellen nur wenige Meter unter der Geländeoberkante, darunter lagert der Grundwasserstauer A/B, welcher eine vertikale Bewegung des Grundwassers verhindert. Der Aquifer entwässert somit zu einem großen Teil in den Vorfluter. Der letzte zwei km lange Abschnitt ist gemäß der Messungen durch leichte Verluste (-19 l/s) gekennzeichnet.

Der Abfluss am Cunnersdorfer Bach (Zufluss der Biela) wurde ebenfalls an sechs Profilen bestimmt, wobei an vier Profilen hydrometrische Untersuchungen vorgenommen wurden (Abb. 3-13). Am obersten Profil, an der Staatsgrenze unterhalb des Fuchsteiches, wurde kein Abfluss verzeichnet, der Zufluss vom Lampertsbach wurde mit 6 l/s bemessen. In Trockenperioden kommt es vermutlich zu ersten Zuflüssen ca. 2 km südlich

der Gemeinde Cunnersdorf im Tal unterhalb der Gipfel Rotstein und Katzstein, wo zahlreiche Quellen entspringen. Aus diesem Gebiet stammt der gesamte Abfluss (28 l/s), der in dem höchstgelegenen, bemessenen Profil in der Gemeinde Cunnersdorf gemessen wurde. Am Profil im Ort Cunnersdorf konnten 33 l/s ermittelt werden. Die größten Abflüsse mit einer Höhe von 148 l/s wurden im unteren Teil des Wasserlaufs, im Abschnitt zwischen der Mündung und etwa 3,5 km stromaufwärts des Baches, festgestellt. Im gesamten gemessenen Bachabschnitt entlang des Cunnersdorfer Baches wurde ein Gesamtzufluss von 181 l/s ermittelt.

Entlang des Krippenbaches wurde der Abfluss an drei Profilen gemessen, vom höchstliegenden an der Staatsgrenze (Králův mlýn 8 l/s) bis zu dem niedrigsten im Ort Krippen (102 l/s), etwa 700 m oberhalb der Mündung in die Elbe. Entlang des ca. 9 km langen bemessenen Bachabschnittes wurde ein Gesamtzufluss von 94 l/s ermittelt.

Gemäß den Ergebnissen entwässern alle 3 Hauptvorfluter (Biela, Cunnersdorfer Bach und Krippenbach) im Gebiet Děčínský Sněžník durchschnittlich etwa 400 l/s. Bei einer Fläche von ca. 136 km² entspricht dies einem spezifischen Abfluss von 3 l/(s × km²). Es wurden während der Arbeiten auch Abschnitte mit einer intensiveren Entwässerung des Grundwassers in die Vorfluter identifiziert. Anhand dieser Erkenntnisse konnten die Grundwasserstandskarten präzisiert werden, die anschließend zur Kalibrierung des numerischen Grundwasserströmungsmodells eingesetzt wurden. Die über die Abflussbestimmung ermittelten Werte für Grundwasserabfluss bzw. -zufluss wurden bei der Erstellung der numerischen Modelle entsprechend als Randbedingung berücksichtigt.

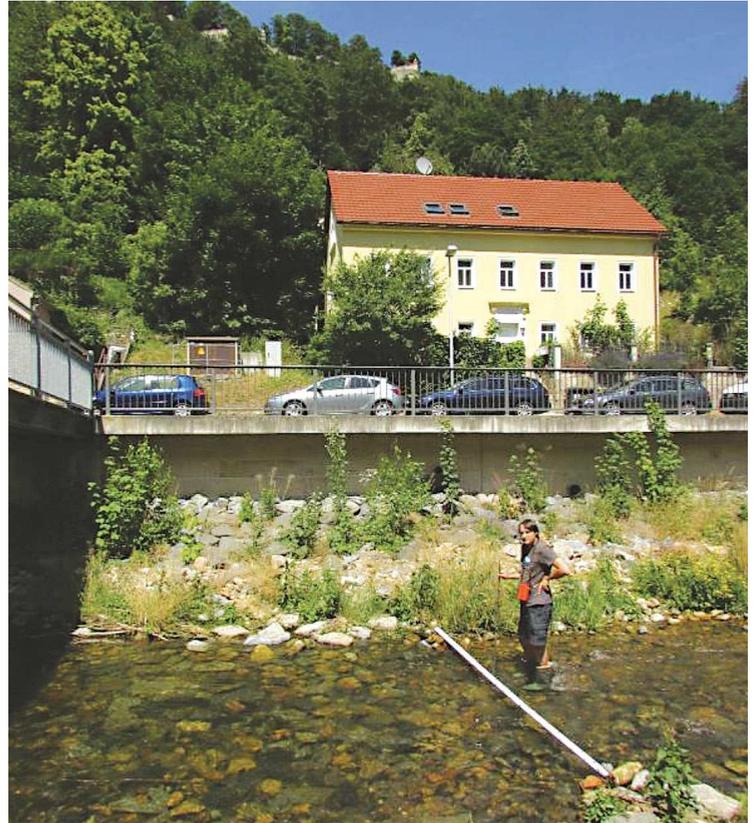
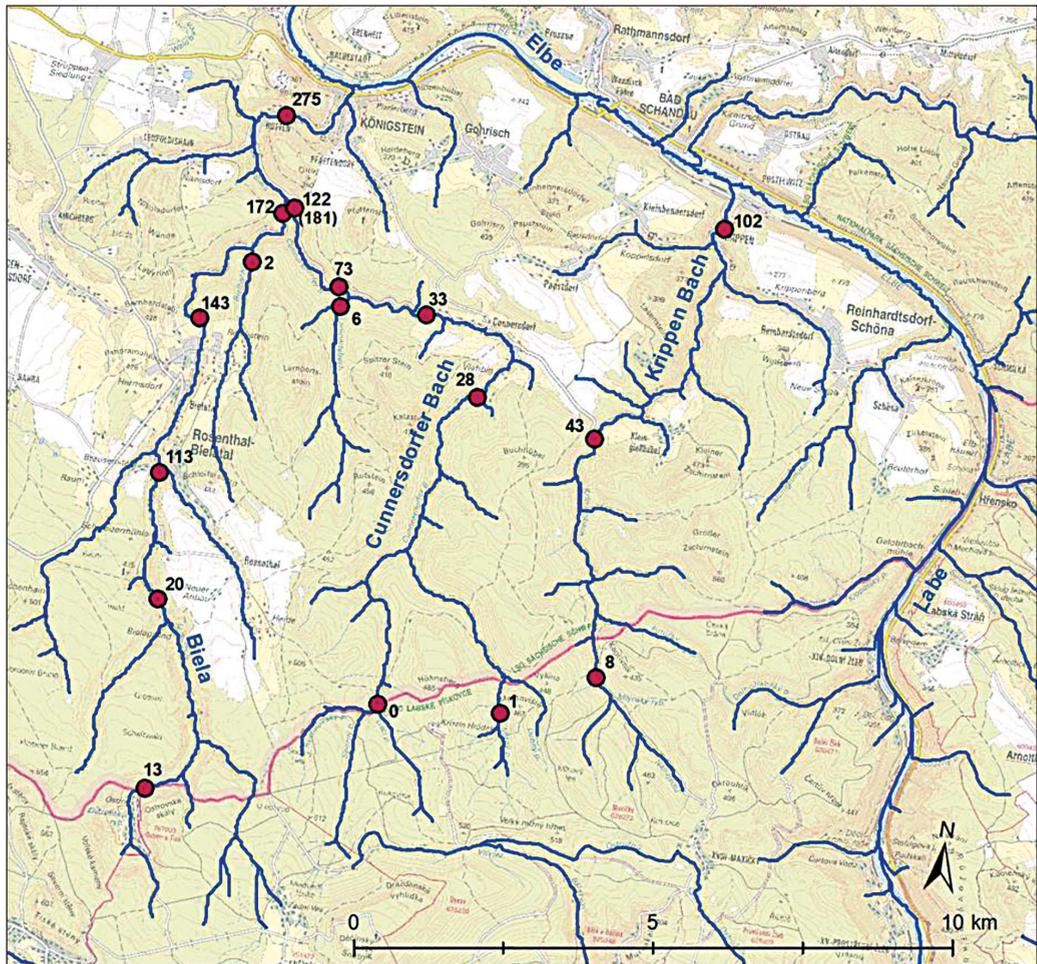


Abb. 3-12: Das unterste mit einer Messlatte eingemessene Profil im Bach Biela, ca. 1700 m vor der Mündung in die Elbe. Es wurde ein Abfluss von 275 l/s ermittelt.

Abb. 3-13:
Übersicht der
Messprofilstandorte
an den Bächen Biela
(links), Cunnersdorfer
Bach (Mitte) und
Krippenbach (rechts)
mit Angaben des
ermittelten Abflusses
in [l/s] im Modellgebiet
Děčínský Sněžník.



3.5. Kartierung und Bemessung von Quellen

Der natürliche Austritt des Grundwassers an der Erdoberfläche wird als Quelle bezeichnet. Die Kartierung und die Bemessung von Quellen (Quellschüttungsmessung) gehören zu den fundamentalen Möglichkeiten, hydrogeologische Informationen im Gelände zu erfassen. Die Quellen liefern wichtige Angaben zum aktuellen Zustand und zu Änderungen der hydrogeologischen Situation. Im Modellgebiet Děčínský Sněžník existieren wesentlich mehr Quellen als auswertbare hydrogeologische Bohrungen.

Die Kartierung und Bemessung der Quellen in den Fokusgebieten Kirnitzsch-Hřensko und Lückendorf wurde bereits im Vorgängerprojekt GRACE umgesetzt. Die dabei gewonnenen Informationen wurden im Projekt ResiBil verwendet. Eine Übersicht der entsprechenden Untersuchungen finden sich in Kalinová et al. (2014a).

Für die numerische Modellierung zeigen Quellen Stellen bzw. Linien der Entwässerung einzelner Grundwasserleiter an. Vor allem können sie jedoch als Grundlage für eine genauere Abgrenzung der Grundwasserleiter und -stauer dienen. Quellen können ebenfalls auf einige sonst schwierig erfassbare Erscheinungen im Gelände hinweisen, wie z.B. eine detailliertere

Stratifizierung (Schichtabfolge) der Grundwasserleiter oder Störungen.

Quellschüttungen können sensibel auf Änderungen der Umgebung reagieren. Oft ist es schwierig festzustellen, welche Art der Umweltveränderung die jeweilige Änderung der Quellschüttung hervorgerufen hat. Der Nachteil von Quellschüttungsmessungen gegenüber der Bemessung von Grundwassermessstellen besteht vor allem in der größeren Anzahl an Einflüssen, die auf die Quellen wirken können. Die Schüttung einer Quelle kann in hohem Maße abhängig von Art (Tümpelquelle, Schichtenquelle etc.) und Zustand (frei, gefasst) des Quellaustrittes sein (Abb. 3-14). Quellen sind oft unmittelbar von den Niederschlägen (Menge und Intensität) abhängig. Es ist möglich, dass ein kleiner Abfall des Grundwasserstandes eine starke Abnahme der Quellschüttung zur Folge hat. Anthropogene Einflüsse wie Grundwasserentnahmen, Dränagen im Grundwasserleiter, Verbindung von mehreren Grundwasserleitern infolge von Bohrarbeiten oder anderen Erdarbeiten (Kanalisationbau, Erdaushebung für Wasserleitungen, Gasleitungen bzw. sonstige Mediennetze) – also Arbeiten, bei denen es zur Beschädigung bzw. Störung der Grundwasserstauer und zur Ableitung des Wassers durch den unterirdischen Abfluss kommen kann – können auch wesentliche Auswirkungen auf die Quellschüttungen haben. Negative Auswirkung auf die Quellschüttungen können auch Nutzungsänderungen im Grundwasserneubildungsgebiet, z.B. durch Versiegelung von Oberflächen, haben. Durch eine zu intensive Nutzung bzw. durch zu viele negative Einwirkungen kann die Quelle schließlich versiegen.

Als Grundlage der Untersuchungen war die Recherche fachlicher Dokumente zur Quellenkartierung nötig. Für das Modellgebiet Děčinský Sněžník konnten hilfreiche Informationen vor allem aus den Archiven der Projektpartner VÚV und ČGS (Geofonds), aus einzelnen fachbezogenen Kartenwerken sowie aus der öffentlich zugänglichen Datenbank [2] zusammengetragen werden.

Im Fokusgebiet Děčinský Sněžník stammen viele Quellen aus den oberen Grundwasserleitern, die oft nach sehr kurzer Entfernung zurück in den Untergrund versickern. Diese Versickerung deutet auf das Vorkommen von stark durchlässigen Grundwasserleitern (z.B. poröse Sandsteine) mit einem Grundwasserspiegel tief unter der Erdoberfläche hin.

Für alle aufgefundenen Quellen wurden die Schüttung, die Leitfähigkeit sowie die aktuelle Wasser- und Lufttemperatur gemessen.

Die Schüttungen der Quellen und Einzugsgebiete wurden überwiegend mit der Volumen-Füllzeit-Messmethode gemessen. Nur in Ausnahmefällen wurde eine Messung mit Hilfe von hydraulischen Messflügeln oder durch fachkundige Abschätzung (z.B. im Gelände unzugängliche Quellen) vorgenommen. Im Falle ungenügender Messbedingungen (beispielsweise durch das Fehlen eines Messwehrs, Durchlasses an einem Weg bzw. einer Straße oder eines

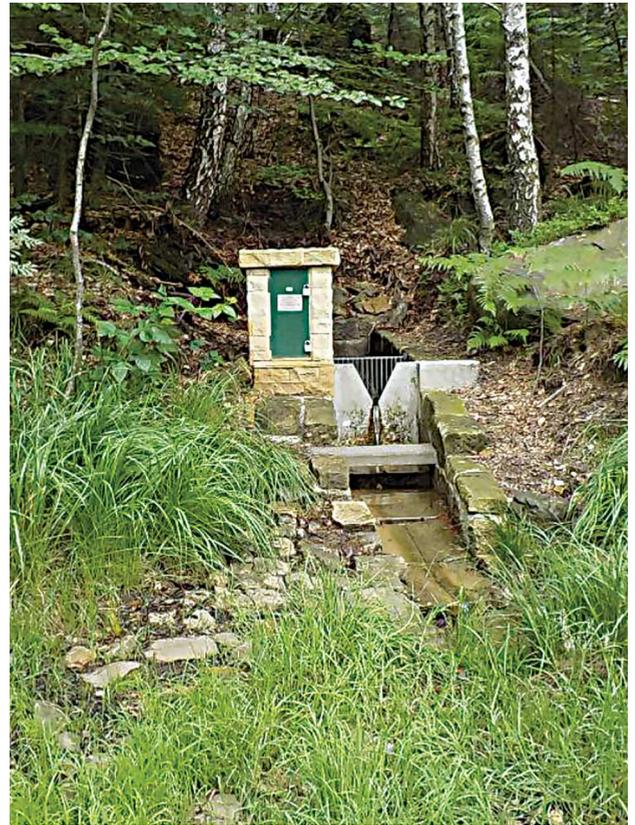


Abb. 3-14: Gefasste Quelle im Modellgebiet Děčinský Sněžník, überwacht durch das Tschechische Hydrometeorologische Institut (ČHMÚ).



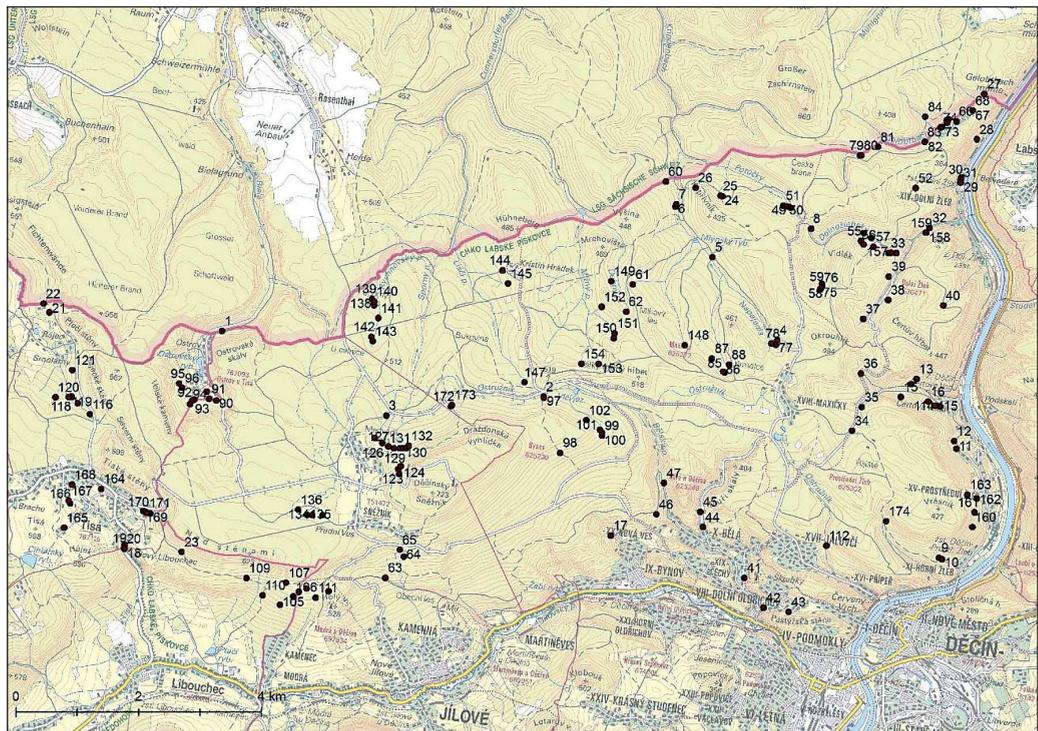
Abb. 3-15: Natürlicher Quellaustritt (Gebiet Děčínský Sněžník), der für die Schüttungsmessung temporär mit einem mobilen Rohr gefasst wurde.

Abb. 3-16: Lage der bemessenen Quellen im tschechischen Teil des Modellgebietes Děčínský Sněžník.

verrohrten (gefassten) Austritts der Quelle) wurde vor Ort ein temporäres Messprofil mit Hilfe eines mobilen Rohres mit geeignetem Durchmesser errichtet (Abb. 3-15). Die temporären Volumen-Füllzeit-Messungen verliefen dann mithilfe eines kalibrierten Messgefäßes mit entsprechendem Volumen und einer Stoppuhr. Die Schüttungsmessungen wurden standardmäßig dreimal hintereinander an derselben Stelle durchgeführt und der Mittelwert aller drei Messungen errechnet. Jede Quelle und jedes Profil wurden im Gelände mit einem GPS-Gerät vermessen und mittels Fotodokumentation festgehalten.

In der ersten Arbeitsphase der Bemessung wurden vorwiegend Quellen im tschechischen Teil des Modellgebietes Děčínský Sněžník untersucht (Abb. 3-16). Anschließend wurden ergänzende Kartier- und Messarbeiten auch in den Gebieten Kitzsch-Hřensko und Lückendorf (Zittauer Gebirge) durchgeführt. Hier konzentrierten sich die Geländearbeiten vor allem auf die Standorte, die außerhalb der Modellgrenzen des Vorgängerprojektes GRACE lagen (Kalinová et al. 2014a) sowie auf die Verifizierung der Lage und Schüttungen bedeutsamer Quellen.

Ein Teil der ergiebigsten Quellen wird für die Trinkwasserversorgung der Bevölkerung gefasst. Im Gebiet Děčínský Sněžník werden beispielsweise mehrere solcher Quellen (z.B. Studený



pramen, eine gefasste Quelle im Tal des Bělský potok) für die Wasserversorgung der Stadt Děčín verwendet. Im Fokusgebiet Kirnitzsch-Hřensko werden unter anderem zwei Quellen im Einzugsgebiet Hřensko und ein Teil der Ilmenquelle in Schmilka gefasst. Im Fokusgebiet Lückendorf werden mehrere Quellen gefasst, darunter die Weißbachquellen und König-Johann-Quelle.

Mittels der Kartierung und Bemessung der Quellen ist es gelungen, die wichtigsten hydrogeologischen Strukturen für die Modellierung abzugrenzen und zu präzisieren. Dadurch wurden beispielsweise die Lagen einzelner Grundwasserstauer (wie von Grundwasserstauer A/BC) in einem Teil der Fokusgebiete Děčínský Sněžník und Kirnitzsch-Hřensko verifiziert. Im Fokusgebiet Kirnitzsch-Hřensko wurden mit Hilfe der kartierten Quellaustritte die Mächtigkeit des Grundwasserleiters BC bzw. die Grenzen der Grundwasserleiter B und C in den turonischen Sedimenten geklärt. Im Fokusgebiet Lückendorf (Zittauer Gebirge) konnte mit Hilfe der kartierten Quellaustritte der Verlauf des Grundwasserstauers BC/D zumindest teilweise abgegrenzt werden.

4| Mathematische Modellierung

Die Grundlage des hydrogeologischen Modells ist das konzeptionelle Modell, welches die Raumcharakteristik im Fokusgebiet, d.h. die Geometrien der Grundwasserleiter und der Grundwasserstauer sowie vorhandene tektonische Störungen, abgrenzt. Das konzeptionelle Modell basiert auf den neuesten geologischen Erkenntnissen. Auf Grundlage dieser Daten stellt es in einer schematisierten Form die hydrogeologische Funktionsweise der vorhandenen Strukturen dar. Das darauf aufbauende hydraulische Modell definiert diese hydrogeologischen Beziehungen als mathematische Funktionen. Weitere Eingangsparameter liefern ein hydrologisches Modell, welches die Klimadaten samt ihren Wechselwirkungen mit den Oberflächenabflüssen beschreibt.

Das hydrogeologische Modell ermöglicht die räumliche Visualisierung der Grundwasserströmungen, die Berechnung des Wasserhaushalts der Gebiete und die Prognose des nutzbaren Grundwasserdargebotes. Weiterhin kann man mit diesem Modell das Verhalten des hydrodynamischen Systems, welches auf menschliche Einwirkungen (Wasserentnahme durch Pumpen) und natürliche Veränderungen (Klimawandel) reagiert, abschätzen. So können auch Einflüsse von Trockenperioden berechnet und alternative Bedarfsszenarien dargestellt werden.

4.1. Hydrologische Bilanzmodellierung

4.1.1. Wasserhaushaltsmodellierung im Gebiet Lückendorf

Als Grundlage für die Ermittlung des räumlichen und zeitlichen Grundwasserdargebotes bedarf es einer bilanztreuen Abschätzung der Transport- und Umsetzungsvorgänge auf und im Bodenkörper. Neben den Wasserhaushaltsgrößen *Niederschlag*, *Verdunstung* und *Abfluss* stellt die *Grundwasserneubildungsrate* im Projekt die maßgebliche Haushaltsgröße für die Ermittlung des Grundwasserdargebotes dar. Die für das Fokusgebiet Lückendorf verwendeten Grundwasserneubildungsraten wurden unter Verwendung des Wasserhaushaltsmodells ArcEGMO berechnet und über das Wasserhaushaltsportal des Freistaates Sachsen bereitgestellt. Der Modellaufbau sowie die Gebietsparametrisierung, inklusive Kalibrierung und Validierung der Modellanwendung, erfolgte im Rahmen des Kooperationsprojektes **KLIWES**, welches seit dem Jahr 2008 durch das Sächsische Landesamt (LfULG) und die Technische Universität Dresden bearbeitet wird.

Kernprozesse, Eingangs- und Ausgabedaten von ArcEGMO

ArcEGMO ist ein variables, öko-hydraulisches Niederschlag-Abfluss-Modell, welches durch Einbindung von Modulen eine Beschreibung hydrologischer Teilprozesse ermöglicht. Durch Verknüpfung von Teilprozessen können spezifische Fragestellungen bearbeitet und in variabler räumlicher und zeitlicher Auflösung ausgegeben werden. Art und Verfügbarkeit der Ausgangsdaten bedingen dabei das Maß der Genauigkeit für die Modellierung. Für die Beschreibung

der Teilprozesse werden Module verwendet, welche auf physikalisch begründeten konzeptionellen Modellansätzen beruhen. Einen Überblick über die Kernprozesse des Programmes sowie die Modellebenen (z.B. Klima- und hydrologische Daten für das Fokusgebiet Lückendorf) zeigt Abb. 4-1.

Für die Modellierung benötigt ArcEGMO Eingangsdaten, die je nach Art der Daten als Zeitreihen oder Rauminformationen (Daten mit räumlichem Bezug) bereitgestellt werden. Für die Ausgabe der berechneten Daten ist eine Zeitaggregation von Stundenwerten bis hin zum Gesamtzeitraum (mehrere Jahre) wählbar. Für statistische Betrachtungen ist es zudem möglich, den Modelloutput zu analysieren und als statistische Größe (Summe, Mittelwert, Minimum, Maximum) für die jeweils gewählte Zeitaggregation ausgeben zu lassen. Die Ausgabe der Wasserhaushaltskomponenten für das Fokusgebiet Lückendorf erfolgte als aufsummierte Mittelwerte für jeden Monat des betrachteten Zeitraumes.

Für die räumliche Darstellung der Ergebnisse bietet ArcEGMO die Möglichkeit, die errechneten Daten entsprechend raumbezogen auszugeben. Diese Daten können anschließend in einem Geoinformationssystem (z.B. ArcGIS) räumlich miteinander verknüpft und visualisiert werden. Des Weiteren können die Daten raumaggregiert ausgegeben werden. Folgende Raumeinheiten sind dabei möglich: Fließgewässerabschnitte, Elementarflächen, Hydrotope,

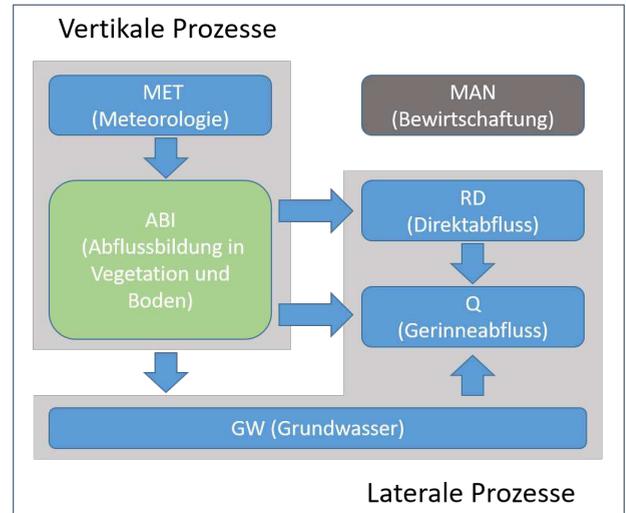


Abb. 4-1:
Schematischer Aufbau
des Niederschlag-
Abfluss-Modells
ArcEGMO [3].

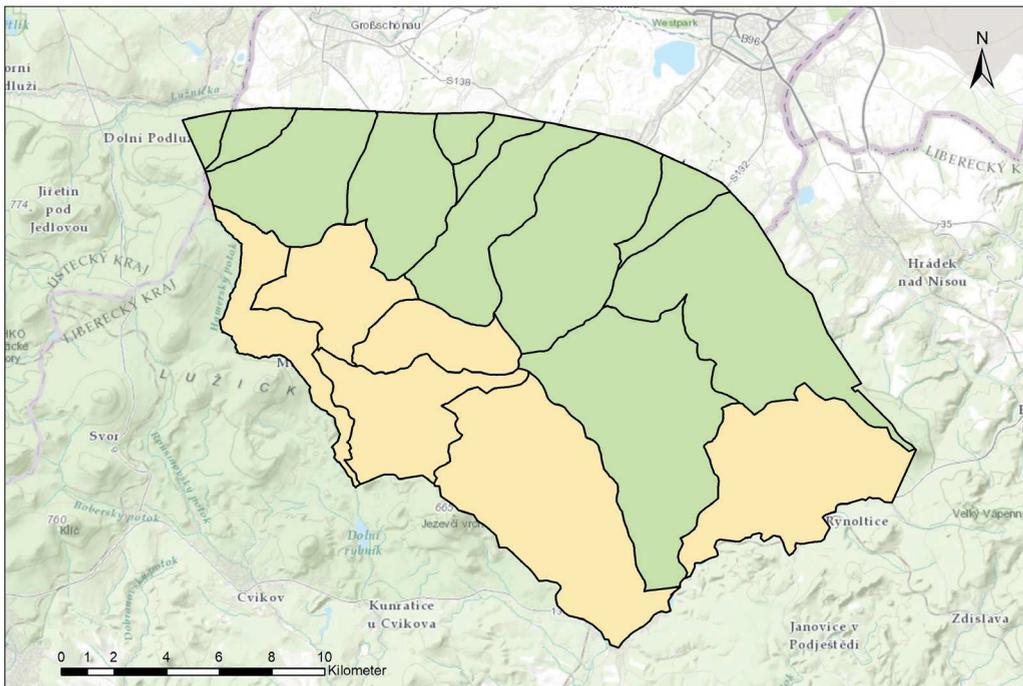


Abb. 4-2: Nach dem
Wasserhaushalts-
Portal angepasste
(grün) und neu
erstellte (gelb)
Teilinzugsgebiete
im Fokusgebiet
Lückendorf.

Kaskaden, Teileinzugsgebiete (TEZG), Regionen und das Gesamtgebiet. Für das Fokusgebiet Lückendorf erfolgte die Berechnung für einzelne Teileinzugsgebiete, wie sie in Abb. 4-2 abgebildet sind.

Umsetzung im Modell Lückendorf

Die Modellsimulation für das Fokusgebiet Lückendorf verlief in drei Phasen. Im ersten Schritt erfolgte die Initialisierung, bei welcher das hydrologische Modell Lückendorf generiert wurde. Dabei wurden alle relevanten raum- bzw. zeitbezogenen Daten eingelesen und über Verbindungen untereinander zu einem geologischen Datenmodell verknüpft. Für die Kalibrierung und Validierung der Abflüsse im Modell wurden sächsische Pegelraten (soweit verfügbar) für die Jahre 1951 bis 2005 verwendet. Zur Ergänzung dieser Daten wurden die Zeitreihen zudem entsprechend bis in das Jahr 2010 verlängert. Des Weiteren umfasste der erste Schritt die Initialisierung der einzelnen Modellebenen und der Ergebnisauswertung auf Hydrotopeebene. Die zweite Phase umfasste die eigentliche Modellbearbeitung. Dazu wurden die zugrundeliegenden meteorologischen Daten auf das Abflussbildungsmodul übertragen und anschließend Schritt für Schritt durch die nachgeschalteten Module (Abb. 4-1) verarbeitet. Nach Abschluss der Modellsimulation erfolgte die Ergebnisauswertung auf Basis räumlicher Aggregation für die TEZG des Modellgebietes Lückendorf. Für eine problemlose Weiterverarbeitung wurden alle Ergebnisse im ASCII-Format abgelegt.

Die im Wasserhaushaltsportal Sachsen bereitgestellten Daten wurden für das Fokusgebiet Lückendorf analysiert und entsprechend angepasst. Eine ausführliche Beschreibung der Kriterien und Datengrundlagen zur Wasserhaushaltsberechnung im Projekt KLiWES findet sich in der Schriftenreihe des LfULG (Schwarze et al. 2011). Da die Modellgrenzen auch tschechisches Staatsgebiet einschließen und dieses über die im Wasserhaushaltsportal verfügbaren Einzugsgebietsgrenzen hinausreicht, musste für die Flächen ohne verfügbare Wasserhaushaltsdaten eine händische Anpassung vorgenommen werden. So erfolgte zunächst die Identifikation dieser Flächenanteile. Die Fläche wurde entsprechend anhand der Kriterien Topographie, Fließgewässernetz und Hangneigung in neue Teileinzugsgebiete unterteilt (Abb. 4-2). Anhand von Nachbarschafts- und Ähnlichkeitsanalysen wurde diesen neu erstellten TEZG eine Grundwasserneubildungsrate, relativ zu den an sie grenzenden TEZG, zugewiesen.

4.1.2. Wasserhaushaltsmodellierung in den Gebieten Děčínský Sněžník und Kirnitzschtal

Die Grundwasserneubildung (Versickerung) in den Grundwasserleitern wurden anhand des hydrologischen Modells BILAN ausgewertet, welches die Wasserhaushaltskomponenten definierter Einzugsgebiete simuliert. Das Modell wurde vom Wasserforschungsinstitut T.G. Masaryk entwickelt und beschrieben (Tallaksen & van Lannen 2004). Im letzten Jahrzehnt wurde dieses Modell weiterentwickelt und konnte unter lokalen Bedingungen zuverlässige Ergebnisse liefern (Vizina et al. 2015; Hanel et al. 2012; Horáček et al. 2008). Die Modellstruktur basiert auf einem Gleichungssystem, das den Wasserhaushalt beschreibt.

Das hydrologische Modell wurde für einzelne Flusseinzugsgebiete erstellt, die nach den verfügbaren Zeitreihen der Abflüsse abgegrenzt werden. Für ausgewählte Flussprofile werden die Flächen der jeweiligen Flusseinzugsgebiete mit Hilfe eines digitalen Geländemodells abgegrenzt. Für jedes Einzugsgebiet werden folglich Niederschlags- und Temperaturzeitreihen erstellt. Die für die einzelnen Einzugsgebiete repräsentativen Werte sind Ergebnis einer Interpolation der Daten

aus meteorologischen Stationen, die innerhalb des Einzugsgebietes oder in seiner Umgebung liegen. Abb. 4-3 zeigt die Verteilung der meteorologischen Stationen im Fokusgebiet Děčínský Sněžník.

Die Eingangsdaten für das BILAN-Modell umfassen Niederschlags-, Temperatur- und Abflusswerte. Die Lufttemperaturdaten dienen als Indikator für die Energiebedingungen, die den Wasserhaushalt wesentlich beeinflussen. Die Zeiteinteilung des Modells beträgt 1 Monat. Das Modell simuliert die Überläufe und Wassermengen an der Oberfläche, in der ungesättigten Zone sowie im Grundwasserleiter. Die Prozesse werden durch folgende sechs Parameter gesteuert:

1. Koeffizient für die Menge an flüssigem Wasser, welches während Winterbedingungen an der Oberfläche verfügbar ist
2. Parameter für das Verhältnis zwischen Niederschlag und Direktabfluss (Abflussbeiwert)
3. Parameter, der die Versickerung in den hypodermischen Abfluss und in die Grundwasserneubildung während Sommerbedingungen,
4. bei Schneeschmelze und
5. bei Winterbedingungen festlegt
6. Parameter, der den Abfluss aus dem Grundwasserleiter (Basisabfluss) bestimmt.

Die Kalibrierung der Parameter erfolgte durch den statistischen Vergleich der beobachteten und simulierten Abflussreihen unter Anwendung des MAPE-Kriteriums (Mittlerer absoluter prozentualer Fehler). Die Parameter wurden im Modell so festgelegt, dass eine bestmögliche Übereinstimmung zwischen der Beobachtung und der Simulation erreicht werden konnte. Die Ergebnisse des hydrologischen BILAN-Modells sind Zeitreihen der potenziellen und realen Evapotranspiration, der Bodeninfiltration und der Grundwasserneubildung in der gesättigten

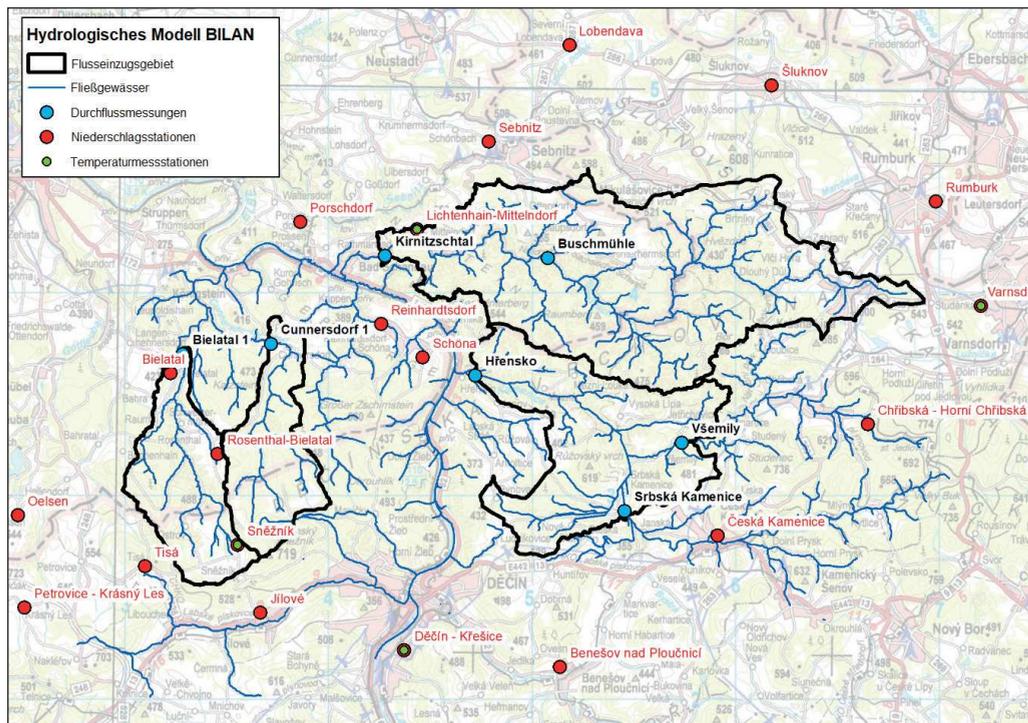


Abb. 4-3: Darstellung des westlichen Teils des Projektgebietes ResiBil mit den für das BILAN-Modell untersuchten Flusseinzugsgebieten.

Zone. Diese Ausgabedaten gelten immer für einzelne Einzugsgebiete und werden anschließend entsprechend der Gebietsbedingungen auf das gesamte Areal des hydrogeologischen Modells neu berechnet.

Für das Flusseinzugsgebiet von Kirnitzsch und Biela wurde die Kalibrierung für den gesamten Beobachtungszeitraum 1961 – 2017 bzw. 1964 – 2017 durchgeführt. Im Falle des Cunnersdorfer Bachs wurde – angesichts der variierenden Qualität der Eingangsdaten – für das Einzugsgebiet der Zeitraum 1990-2010 als Kalibrierungsperiode gewählt. Derselbe Zeitraum wurde zur Kalibrierung auch im Falle des Flusseinzugsgebietes der Kamenice verwendet. Für das Einzugsgebiet Kamenice wurde das Modell, mit Hinblick auf den Erhalt der durchschnittlichen jährlichen Abflussmenge des Gebietes, kalibriert. Hinsichtlich des modellierten Gebietes und dem großen Grundwasserangebot wurde anschließend eine Separation des Basisabflusses vorgenommen, dem im Rahmen der Kalibrierung eine bedeutende Rolle zugeschrieben wurde.

Für beide Fokusgebiete – Děčínský Sněžník als auch Kirnitzsch-Hřensko – wurden je zwei Flusseinzugsgebiete bearbeitet (siehe Abb. 4-3). Anschließend wurden für beide Gebiete die relevanten Zeitreihen der Grundwasserneubildung als gewichteter Mittelwert der zwei untersuchten Einzugsgebiete berechnet.

4.2. Konzeptionelles Modell

Das konzeptionelle Modell ist der letzte Schritt vor dem Aufbau des eigentlichen hydraulischen, numerischen Modells. Es vereinigt die hydrogeologischen sowie die kombinierten geologischen, geomorphologischen, hydrochemischen und klimatischen Verhältnisse in einem Modell. Weiterhin stellt es die hydrogeologischen Einheiten und die Grundwasserströmungsrichtungen dar und legt Grundwasserneubildungs- und Entwässerungsstandorte sowie Randbedingungen fest.

4.2.1. Allgemeine hydrogeologische Bedingungen

Im Projektgebiet setzen sich die Grundwasserleiter (Aquifere) meist aus Sandsteinen und Konglomeraten zusammen, während andere lithologische Gesteinstypen mit einem höheren Ton- und Schluffanteil die Grundwasserstauer bilden. Das hydrogeologische, konzeptionelle Modell des Projektgebietes unterscheidet vier voneinander getrennte Grundwasserleiter, wobei in einigen Bereichen nicht alle im Folgenden genannten Grundwasserleiter (beginnend von der Basis) vorkommen:

- Grundwasserleiter A (Grundwasserleiter 4), ist der am tiefsten vorkommende Grundwasserleiter aus dem Cenoman, bestehend aus wechselnden Lagen aus Sandsteinen, Brekzien und Sandsteinen mit schluff- bis tonhaltigen Anteilen. Die Mächtigkeit erreicht bis zu 80 m im Gebiet Děčínský Sněžník und bis zu 140 m an der Lausitzer Überschiebung im Norden des Projektgebietes.
- Hauptgrundwasserleiter B (Grundwasserleiter 3), mit den bedeutendsten Grundwasserentnahmen des Gebietes, besteht aus unterturonischen Sandsteinen, die teilweise auch tonig bis mergelig ausgebildet sein können. Der Grundwassernichtleiter zwischen den Grundwasserleitern B und C (Grundwasserstauer B/C) ist im Norden – im sächsischen Teil des Einzugsgebietes der Kirnitzsch – stärker ausgebildet. Im zentralen Bereich des Projektgebietes verliert der Grundwassernichtleiter allmählich seine Funktion. Südlich des Flusses Kamenice und im Gebiet Děčínský Sněžník ist die Funktion dieses Stauers stark limitiert und kann nicht

adäquat definiert werden. Daher nimmt das konzeptionelle Modell in diesen Bereichen einen vereinigten Grundwasserleiter BC an. Seine Mächtigkeit erreicht bis zu 230 m.

- Grundwasserleiter C (Grundwasserleiter 2), setzt sich aus mittelturonischen Sandsteinen zusammen. Er wird im nordwestlichen Bereich des Gebietes Kirnitzsch-Hřensko durch den Grundwasserstauer B/C von dem Grundwasserleiter B abgegrenzt.
- Grundwasserleiter D (Grundwasserleiter 1) umfasst kleinere, nicht zusammenhängende Vorkommen, die aufgrund fehlender Bohrdaten nicht genau abgegrenzt werden können. In einigen Teilen des Modellgebietes werden die oberen drei Grundwasserleiter als kombinierter Grundwasserleiter BCD interpretiert und modelliert.

4.2.2. Klimatische Grundlagen

Als Basis für die klimatische Betrachtung im Projekt ResiBil wurden verschiedene Datengrundlagen und Herangehensweisen angewendet. Prinzipiell dienen hierbei bestehende Klima-Datenreihen als Grundlage zur Kalibrierung und Validierung der Wasserhaushaltsmodelle BILAN und ArcEGMO. Je länger und lückenloser diese Datenreihen sind, umso besser lassen sich genannte Modelle an die realen klimatischen Bedingungen anpassen.

Die für die Untersuchung benötigten Klimaelemente beruhen auf den Daten des Deutschen Wetterdienstes (DWD). Die Datenreihen sind Grundlage für zwei verwendete Klimadatensätze: den Klima-Basisdatensatz (Schwarze et al. 2014) und den Klima-Referenzdatensatz Sachsen (Bernhofer et al. 2019).

Der Basisdatensatz wurde im Rahmen des Projektes KliWES durch die Technische Universität Dresden und das LfULG erarbeitet. Der Klima-Referenzdatensatz stellt eine Aktualisierung des Klima-Basisdatensatzes dar. Die Daten des DWD wurden hierfür noch einmal hinsichtlich Konsistenz und Plausibilität entsprechend überprüft, Lücken in den Datenreihen geschlossen und Anpassungen hinsichtlich geodätischer Höhenabhängigkeiten und Nebelkorrekturen berücksichtigt. Beide Datensätze wurden mit Hilfe des webbasierten Regionalisierungs-Werkzeuges RaKliDa (Rasterklimadaten) erzeugt. Sie unterscheiden sich hinsichtlich der angewendeten Methode der Regionalisierung. Beide Datensätze werden über das Regionale Klima-Informationssystem für Sachsen, Sachsen-Anhalt und Thüringen (ReKIS) bereitgestellt. Für nähere Informationen zum jeweiligen Verfahren wird an dieser Stelle auf die weiterführende Literatur verwiesen (Schwarze et al. 2014; Bernhofer et al. 2019).

Durch Anwendung der beiden Klimadatensätze wurden in ResiBil folgende Klimaelemente berücksichtigt:

- Tagesmaximum-Temperatur in 2 m Höhe
- Tagesmittel-Temperatur in 2 m Höhe
- Tagesminimum-Temperatur in 2 m Höhe
- Niederschlagshöhe korrigiert (Richter 1995)
- Relative Luftfeuchtigkeit
- Sonnenscheindauer
- Globalstrahlung
- Windgeschwindigkeit in 2 m Höhe

Klimaelemente im Modell BILAN

Für die Fokusgebiete Děčínský Sněžník und Kirnitzsch-Hřensko erfolgt die Ermittlung des Wasserhaushaltes über das Modell BILAN (Kap. 4.1). Als klimatische Grundlage für Kalibrierung

und Validierung dient hierbei der Klima-Referenzdatensatz. Dieser umfasst Zeitreihen der Klimaelemente, in Abhängigkeit vom jeweiligen Messzeitraum jeder Station, für die Jahre von 1951–2015, welche für die Untersuchungen durch Daten des DWD um die Jahre 2016 und 2017 ergänzt wurden. Das Modell BILAN stellt ein Bilanzmodell dar, welches für die Ermittlung des Wasserhaushaltes nur die Klimaelemente Niederschlag und Temperatur verwendet. Weitere Klimaelemente werden bei dieser Methode nicht berücksichtigt.

Die Berücksichtigung der zukünftig möglichen, klimatischen Veränderungen erfolgte für die Fokusgebiete Děčínský Sněžník und Kirnitzsch-Hřensko über eine entsprechende Anpassung der Grundwasserneubildungsraten in den Gebieten, wie sie im Kap. 4.4.1 aufgeführt und erläutert ist.

Klimaelemente im Modell ArcEGMO

Für das Fokusgebiet Lückendorf erfolgte die Ermittlung des Wasserhaushaltes über das Modell ArcEGMO (Kap. 4.1). Als klimatische Grundlage zum Anlernen des Modells dient hierbei der Klima-Basisdatensatz. Dieser umfasst Zeitreihen der Klimaelemente, in Abhängigkeit vom jeweiligen Messzeitraum jeder Station, für die Jahre 1961–2010, welche für die Untersuchungen durch Daten des DWD um die Jahre 2011–2019 ergänzt wurden.

Für das Fokusgebiet Lückendorf erfolgte die Berücksichtigung der potentiellen klimatischen Veränderungen über die Anwendung von Klimaszenarien, welche als Antrieb für das Modell ArcEGMO im Projekt KliWES genutzt wurden. Diese Klimaprojektionen dienen der Darstellung möglicher Änderungen des Wasserhaushaltes sächsischer Gewässereinzugsgebiete unter dem Einfluss variierender Klima- und Landnutzungsbedingungen. Die Ergebnisse der Untersuchungen von KliWES werden über das Wasserhaushaltsportal Sachsen bereitgestellt. Für das Projekt ResiBil wurden diese Ergebnisse übernommen und als Grundlage für die numerische Strömungsmodellierung verwendet. Alle Grundlagen und methodischen Bearbeitungsschritte der Szenarien sind ausführlich in Veröffentlichungen zum Projekt KliWES beschrieben (Schwarze et al. 2016; Hauffe et al. 2016).

Über das Wasserhaushaltsportal Sachsen werden insgesamt 13 verschiedene Projektionen der Wasserhaushaltskomponenten für den Zeitraum von 1961–2100 bereitgestellt (3 Realisierungen WETTREG sowie 10 Realisierungen WEREX V). Für die Auswahl der im Projekt ResiBil verwendeten Projektionen wurden diese Datensätze zunächst für die räumliche Ausdehnung des Fokusgebietes Lückendorf selektiert und hinsichtlich der Entwicklung der maßgeblichen Wasserhaushaltsgröße der Grundwasserneubildung untersucht. Folgende Auswahl für die weitere Nutzung im Projekt wurde getroffen:

WEREX V – Realisierung 11

Realisierung 11 des WEREX-Datensatzes aus dem Wasserhaushaltsportal Sachsen stellt für das Fokusgebiet Lückendorf die Auswahl einer geringeren Abnahme der Grundwasserneubildung im Vergleich zum Ist-Wert dar. Dieses Szenario beschreibt somit eine weniger starke Reaktion des Klimas auf den Wasserhaushalt.

WEREX V – Realisierung 77

Realisierung 77 des WEREX-Datensatzes aus dem Wasserhaushaltsportal Sachsen stellt für das Fokusgebiet Lückendorf die Auswahl einer größeren Abnahme der Grundwasserneubildung im Vergleich zum Ist-Wert dar. Dieses Szenario beschreibt somit eine stärkere Reaktion des Klimas auf den Wasserhaushalt.

WEREX V – Median

WEREX V Median stellt für das Fokusgebiet Lückendorf die Auswahl einer mittleren Entwicklung der Grundwasserneubildung im Vergleich zum Ist-Wert dar. Diese Realisierung wird nicht über das Wasserhaushaltsportal Sachsen bereitgestellt, sondern wurde manuell für das Projekt erarbeitet. Sie bildet den Median-Wert über die 10, im Wasserhaushaltsportal Sachsen verfügbaren, Realisierungen des WEREX V Datensatzes dar.

Ausgehend von diesen drei Szenarien wurde die berechnete Grundwasserneubildung für die Berechnungen des numerischen Grundwassermodells verwendet.

4.2.3. Modellgebiet Děčínský Sněžník

Das Modellgebiet umfasst das gesamte Fokusgebiet und definiert darüber hinaus die Randbedingungen mit möglichst geringen Unsicherheiten (Tab. 4-1). Gemäß der verfügbaren Datengrundlage wurde für das Gebiet ein „Zwei-Grundwasserleiter-System“ angenommen. Dieses umfasst die beiden Grundwasserleiter A (bestehend aus cenomanen Sandsteinen, welche auf dem kristallinen Grundgebirge lagern) und den kombinierten Grundwasserleiter BC (bestehend aus turonen Sandsteinen).

Das Modellgebiet wird durch folgende Randbedingungen abgegrenzt:

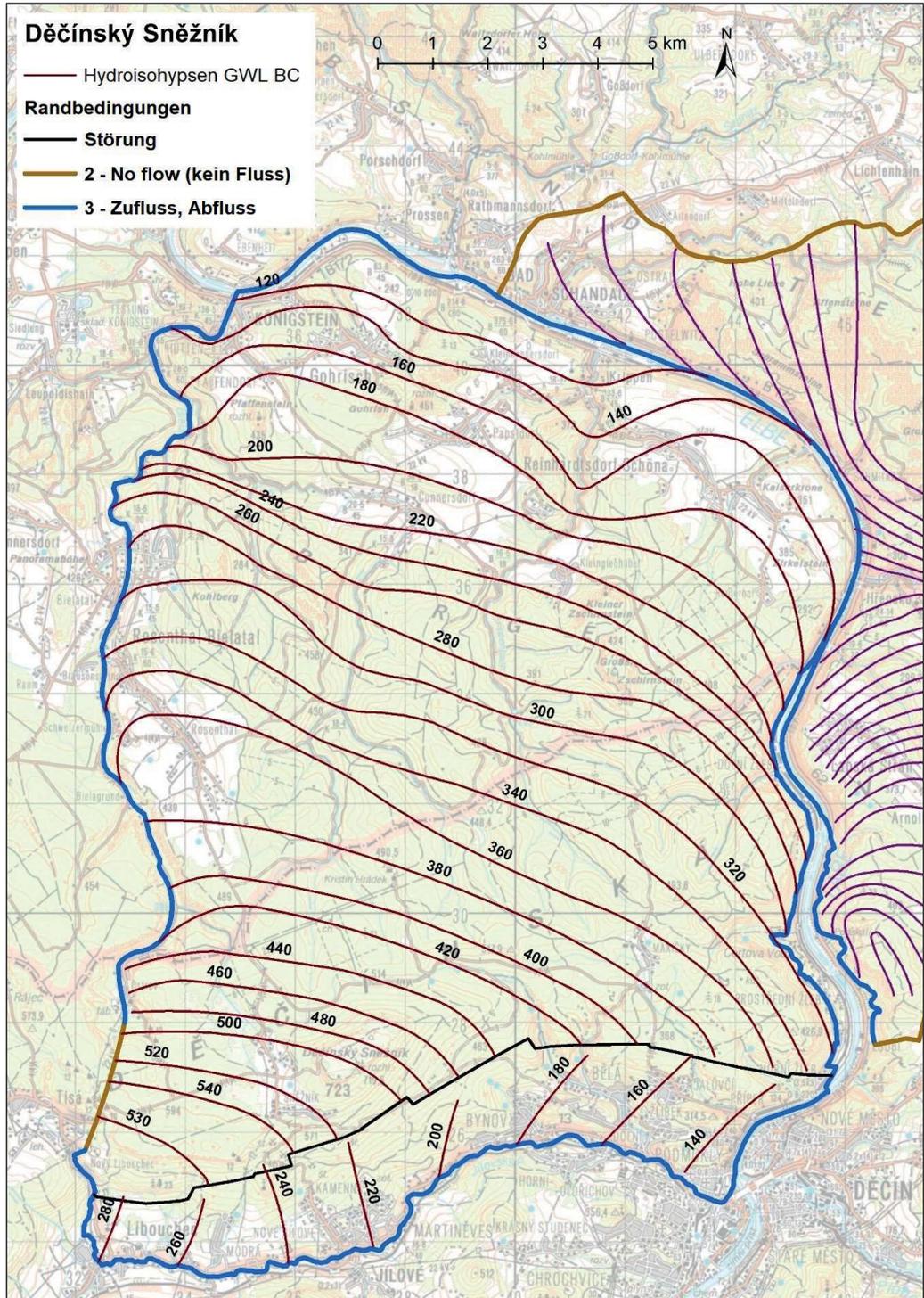
Tab. 4-1: Festgelegte Randbedingungen für das Modellgebiet Děčínský Sněžník.

Bedingung	Grundwasserleiter BC	Grundwasserleiter A
Zufluss	Entlang der Elbe im Norden und Nordosten und entlang des Baches Ostrovská Bělá/Biela im Westen	Im Südwesten im Bereich des Aufschlusses des Grundwasserleiters A bei der Ortschaft Ostrov
Drainage (Abfluss)	Entlang der Aufschlüsse des liegenden Grundwasserstauer im Osten des Elbtals	Entlang der Aufschlüsse des Grundwasserleiters im Osten des Elbtals zwischen Horní Žleb und der Staatsgrenze
No Flow	Wasserscheide im Südwesten	Entlang des Baches Ostrovská Bělá/Biela (entspricht der Wasserscheide) im Westen
Festpotential (Fester Grundwasserspiegel)	Keine Angaben	Im Norden und Osten ist der Grundwasserleiter nicht begrenzt, sondern verläuft unterhalb der Elbe in das angrenzende Gebiet Kírnitzsch-Hřensko weiter

Auf Grundlage der sächsischen und tschechischen Bohrungsdatensätze modellierte der ČGS die Top- und Basisprofile der Grundwasserleiter und -stauer zur Beschreibung der Geometrien. Diese Flächen entstanden durch Interpolation der verfügbaren Bohrdaten. Tektonische Verwerfungen, wo Horizonte durch Verschiebungen unterbrochen sind und ausgeprägte Höhenänderungen verursachen, wurden als Störungen definiert. Es wurden folgende Schichten modelliert:

- Top kristallines Grundgebirge bzw. Basis Kreideeinheiten
- Top Grundwasserleiter A
- Basis Grundwasserleiter BC
- Top Grundwasserleiter BC
- Top Grundwasserleiter Ca
- Basis Grundwasserleiter Cb

Abb. 4-4: Übersicht der Randbedingungen und der Grundwasserstände vom Grundwasserleiter BC im Modellgebiet Děčínský Sněžník.



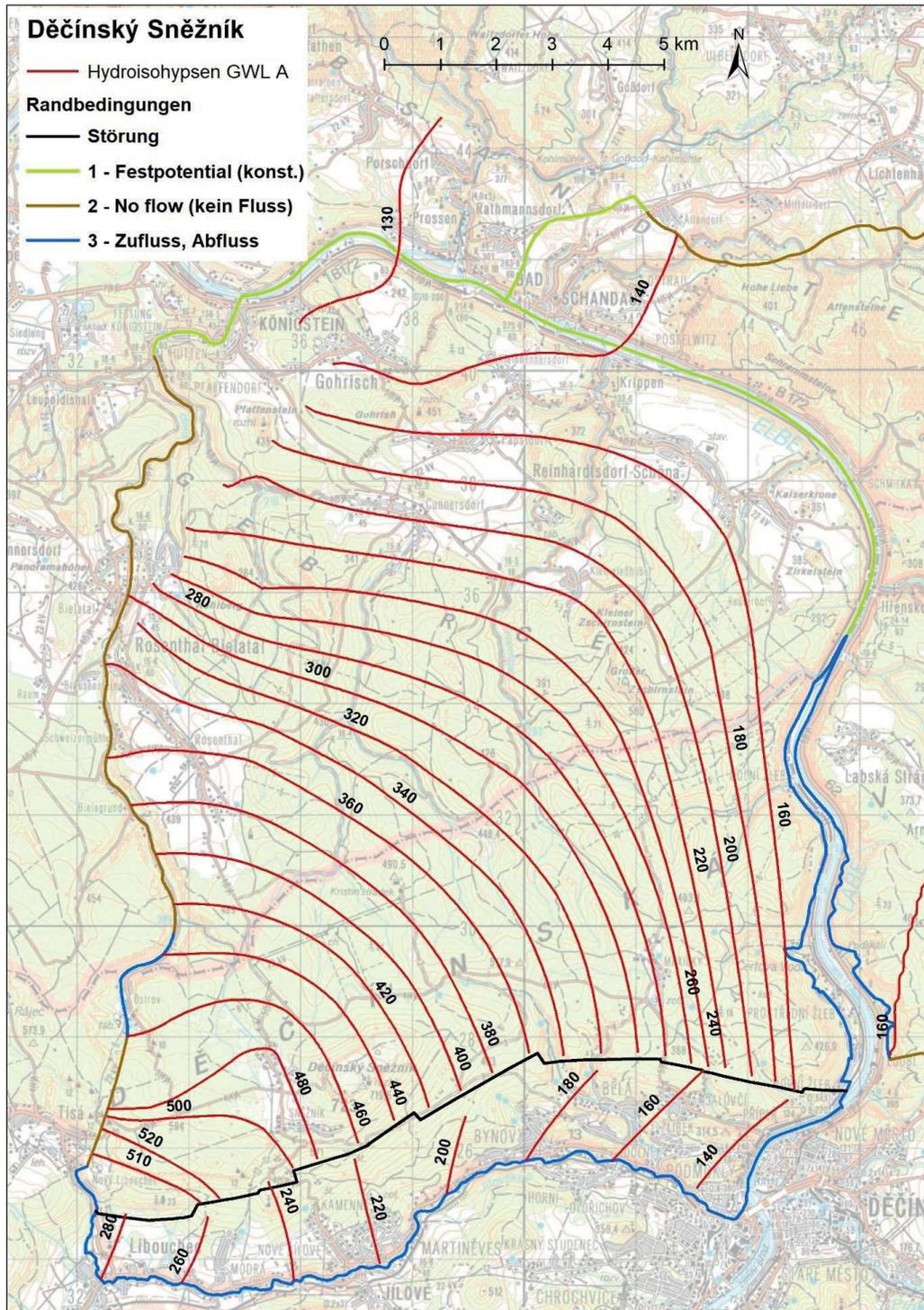


Abb. 4-5: Übersicht der Randbedingungen und der Grundwasserstände vom Grundwasserleiter A im Modellgebiet Děčinský Sněžník.

Weiterhin wurde für die Grundwasserleiter A und BC jeweils eine Grundwasserstandskarte erstellt. Die bereits existierenden Grundwasserstandskarten aus dem Projekt Rebilance (2016) sowie aus der vorangegangenen Studie „Hydrogeologische Synthese des Böhmisches Kreidebeckens – Bilanzkomplex 3“ von 1987 dienten als Grundlage für die Erstellung der aktuellen Karten. Diese Daten konnten jedoch nur für einen kleineren Teil des jetzigen (auf tschechischem Gebiet liegenden) Fokusgebietes benutzt werden. Für den deutschen Teil standen keine archivierten Grundwasserstandskarten zur Verfügung. Für dieses Gebiet konnte ein Datensatz von 13 hydrogeologischen Bohrungen verwendet werden, aus dem der Grundwasserstand berechnet wurde.

Die Erstellung der Grundwasserstandskarte des Grundwasserleiters BC (Abb. 4-4) basiert auf historischen Hydroisohypsenplänen der Tschechischen Republik, auf Daten aus den zwei neuen Untersuchungsbohrungen RE001 und RE002 (Kap. 3.2) sowie auf Daten ausgewählter Grundwasserbohrungen, die von den sächsischen Projektpartnern zur Verfügung gestellt wurden. Die sächsischen Bohrungen wurden auf Grundlage des Standortes, der jeweiligen Tiefe des Brunnens und des genutzten Bereiches im Grundwasserleiters BC ausgewählt.

Die Grundwasserstandskarte für den Grundwasserleiter A (Abb. 4-5) wurde mit einer vergleichbaren Herangehensweise angefertigt. Dabei wurde festgestellt, dass der Grundwasserleiter A mit hoher Wahrscheinlichkeit nicht vollständig in das Flussbett der Elbe entwässert und dementsprechend mit dem Gebiet am rechten Ufer unterhalb der Elbe in Verbindung steht (zu erkennen an der 130 und 140-m-Isohypse in Abb. 4-5). Die neuerstellte Karte bildet die verbundenen Isolinien quer durch das Elbtal ab. Eine signifikante Entwässerung des Grundwasserleiters A in die Elbe erfolgt demnach hauptsächlich im Bereich der cenomanen Gesteine sowie im Grundgebirge des Elbtals zwischen Horní Žleb und der Staatsgrenze.

Hydrogeologischer Schnitt

Zur genaueren Untersuchung des hydrogeologischen Aufbaus wurde zu Beginn eine Analyse der bereits existierenden Bohrlochmessungen im Gebiet durchgeführt. Basierend auf den Messwerten der natürlichen Radioaktivität, des spezifischen elektrischen Widerstandes der Gesteine sowie den Neutronenmessungen wurden die Positionen der wasserleitenden und der wasserundurchlässigen Schichten ermittelt. Aus den Ergebnissen der Bohrlochmessungen wurden räumliche Vergleiche gezogen und Höhenprofile sowie hydrogeologische Schnitte durch die turonischen Sandsteine erstellt.

Im Bereich von Děčínský Sněžník wurde ein Schnitt erstellt, der die Bohrungen 4630-A (Sněžník), DS-1-Nc (Kristín Hrádek), DS-2-Nc (Maxičky) und 4630-B (Říjiště) verbindet (Abb. 4-6).

Die Bohrung 4630-A bei Sněžník durchteuft lediglich die höheren Lagen des mittleren Turons, wo ein Wechsel von bis zu 15 m mächtigen Schichten aus wasserdurchlässigerem Sandstein mit weniger wasserdurchlässigem, tonhaltigem Sandstein angetroffen wurde. Mit Hilfe weiterer Bohrungen und deren geophysikalischen Messungen wurde ein kontinuierlicher Profilschnitt durch den turonischen Hauptgrundwasserleiter BC angefertigt. Dieser reicht von Kristín Hrádek (360 m ü. NN) bis östlich von Maxičky bei Říjiště (320 m ü. NN.). Ergebnis ist, dass die Basis des Grundwasserleiters BC nach Auswertung des Profils etwa 15 m tiefer angenommen werden muss, als gegenwärtig vermutet wird. Der Grundwasserleiter BC ist laut Bohrlochmessungen durch zwei weniger wasserdurchlässige Sandsteinschichten mit einem höheren Anteil feinkörniger Fraktionen unterbrochen. Die erste Schicht kommt etwa 6 bis 13 m über der BC-Basis vor und erreicht eine Mächtigkeit von ca. 3 m. Die Zweite tritt etwa 53 m über der BC-Basis auf und erreicht

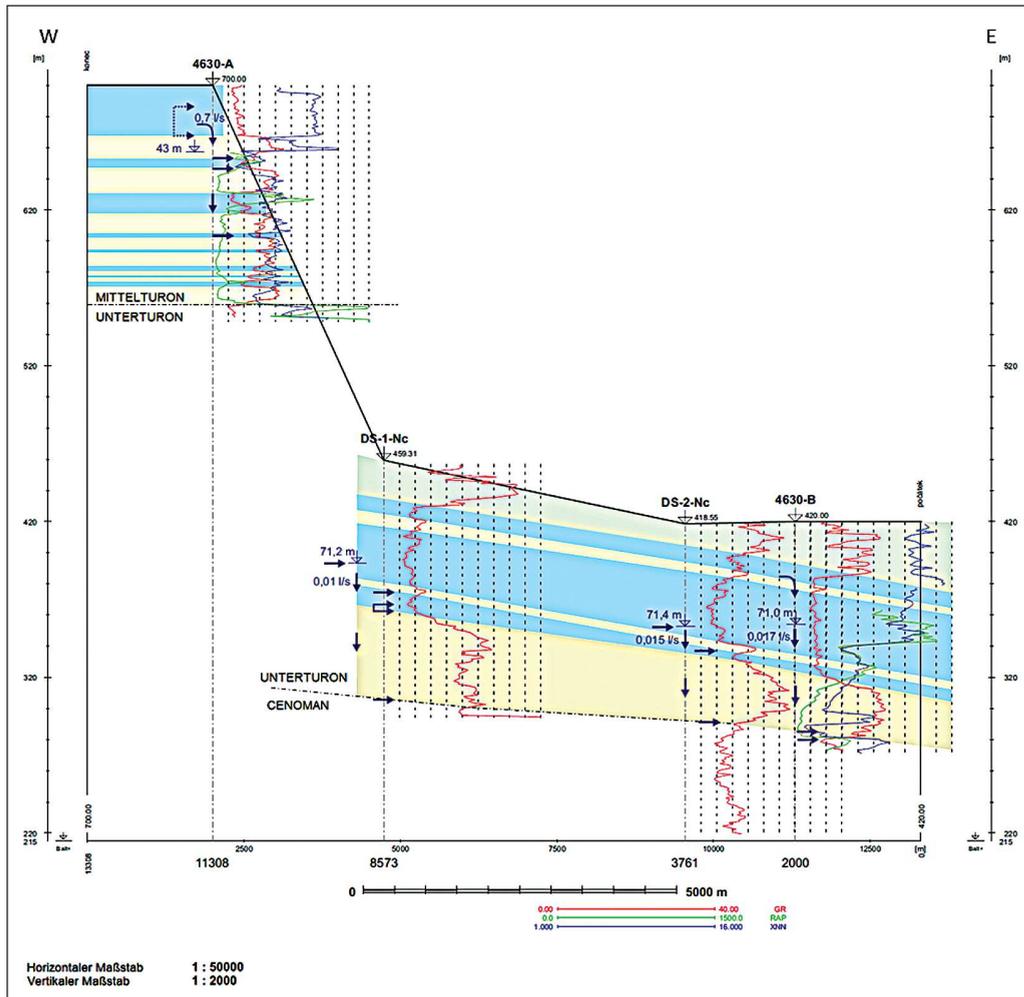


Abb. 4-6:
Hydrogeologischer
Schnitt durch das
Modellgebiet
Děčinský Sněžník.

eine Mächtigkeit von ca. 6 m. In diesem Höhenhorizont wurde nur eine sehr geringe Anzahl von Quellen kartiert, weshalb die hydrogeologische Funktion dieser Lagen nicht durch Erscheinungen im Gelände bestätigt werden kann.

4.2.4. Modellgebiet Kirnitzsch-Hřensko

Das Modellgebiet umfasst das gesamte Fokusgebiet und definiert darüber hinaus die Randbedingungen mit möglichst geringen Unsicherheiten (Tab. 4-2). Auf Grundlage der verfügbaren Daten wurde – vergleichbar mit dem Modellgebiet Děčinský Sněžník – für das Gebiet Kirnitzsch-Hřensko ein „Zwei-Grundwasserleiter-System“, bestehend aus dem cenomanen Grundwasserleiter A und dem turonen Grundwasserleiter BC, definiert. Im nordwestlichen Bereich – überwiegend auf deutschem Gebiet – wurde ein Leitersystem mit drei Grundwasserleitern festgelegt. Der turonische Grundwasserleiter BC wurde in diesem Fall in den unterturonischen Grundwasserleiter B und den mittelturonischen Grundwasserleiter C separiert. Die beschriebene Unterteilung erfolgt durch einen abgrenzbaren Stauer B/C.

Das Modellgebiet wird durch folgende Randbedingungen abgegrenzt:

Tab. 4-2: Festgelegte Randbedingungen für das Modellgebiet Kirnitzsch-Hřensko.

	Grundwasserleiter BC	Grundwasserleiter A
Zufluss	Entlang der Kamenice und Chřibská Kamenice im Südosten	Kein Zufluss
Drainage (Abfluss)	Entlang der Aufschlüsse des liegenden Grundwasserstauers A im Westen des Elbtals	Entlang der Aufschlüsse des Grundwasserleiters im Westen des Elbtals zwischen Suchá Kamenice und Děčín
No Flow	<ul style="list-style-type: none"> • Entlang der Lausitzer Überschiebung im Norden • Entlang der Děčín-Doubice Störung im Osten • Entlang der hydrogeologischen Wasserscheide im Süden 	<ul style="list-style-type: none"> • Entlang der Lausitzer Überschiebung im Norden • Entlang der Děčín-Doubice Störung im Osten • Entlang der hydrogeologischen Wasserscheide im Süden
Festpotential (Fester Grundwasserspiegel)	Keine Angaben	Im Nordwesten ist der Grundwasserleiter nicht begrenzt, sondern verläuft unterhalb des Flusses weiter in das Gebiet Děčínský Sněžník und flussabwärts der Elbe

Die Geometrien der Grundwasserleiter basieren auf den Daten, die aus den vorherigen Projekten GRACE und Rebalance stammen. Es wurden folgende Schichten für die Modellierung verwendet:

- Top kristallines Grundgebirge bzw. Basis der Kreidesedimente
- Top des Grundwasserleiters A
- Basis des Grundwasserleiters B
- Top des Grundwasserleiters B
- Basis des Grundwasserleiters C
- Digitales Geländemodell

Die Erstellung der Grundwasserstandskarten der Grundwasserleiter A und BC basiert auf historischen Hydroisohypsenplänen der Tschechischen Republik (Projekt Rebalance) und aus den neuen Untersuchungsbohrungen 4660_2T und 4660_2C, die im Rahmen des Projektes Rebalance im Jahre 2015 errichtet wurden, sowie den Ergebnissen des Projektes GRACE (Kalinová et al. 2014a). Für den deutschen Teil des Gebietes existieren bisher noch keine Isolinienkarten, die für die Modellierung verwendet werden konnten. Anhand von 10 hydrogeologischen Bohrungen aus diesem Gebiet konnten die Lagerungsverhältnisse der Grundwasserleiter jedoch dargestellt werden.

Im Nordwesten des Gebietes wurden Grundwasserstandskarten für das „Drei-Grundwasserleiter-System“ (zwei turone Grundwasserleiter B und C sowie den cenomanen Grundwasserleiter A) erstellt. Die sächsischen Bohrungen wurden aufgrund ihrer Lage und der jeweiligen erreichten Tiefe des Brunnens sowie der Ausrüstung ausgewählt und eingeteilt. Die Isolinien für den Grundwasserleiter B wurden auf Grundlage der folgenden Bohrlochdaten konstruiert:

- Schmilka, Nasser Grund HySca 21/82/2
- Schmilka, Wurzelweg HySmil 4/81
- Hinterhermsdorf, Großer Zschand 1a/95 Mitte.
- Die Isolinien für den Grundwasserleiter C wurden auf Grundlage der folgenden Bohrlochdaten konstruiert:

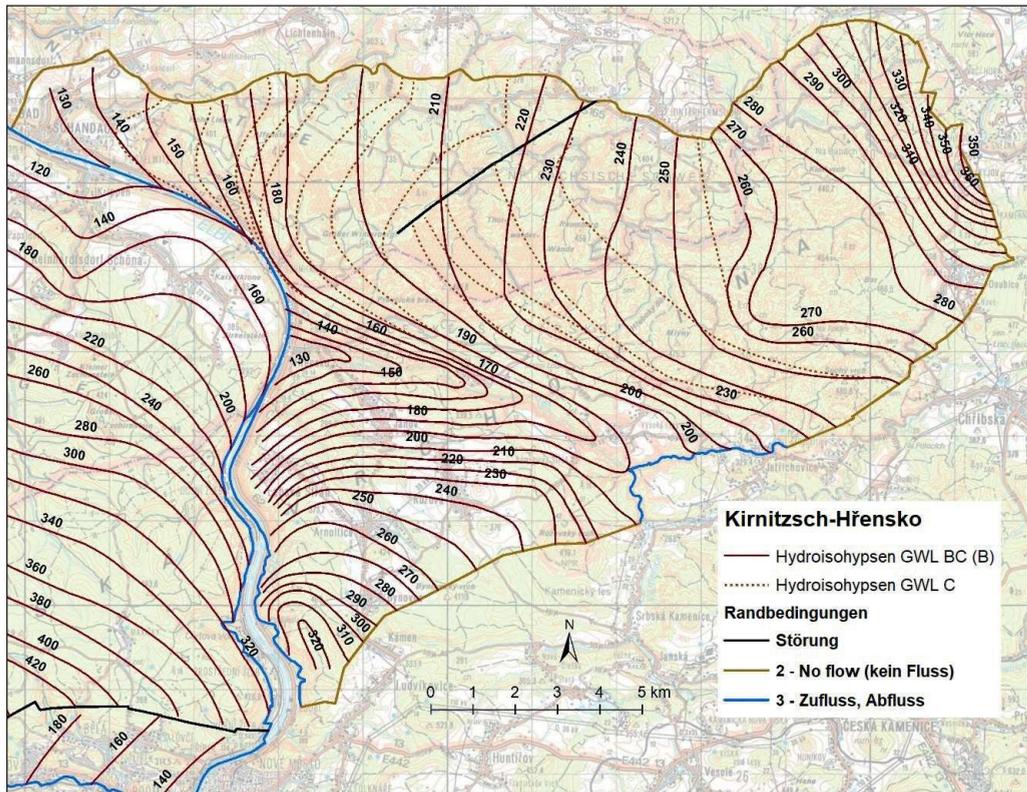
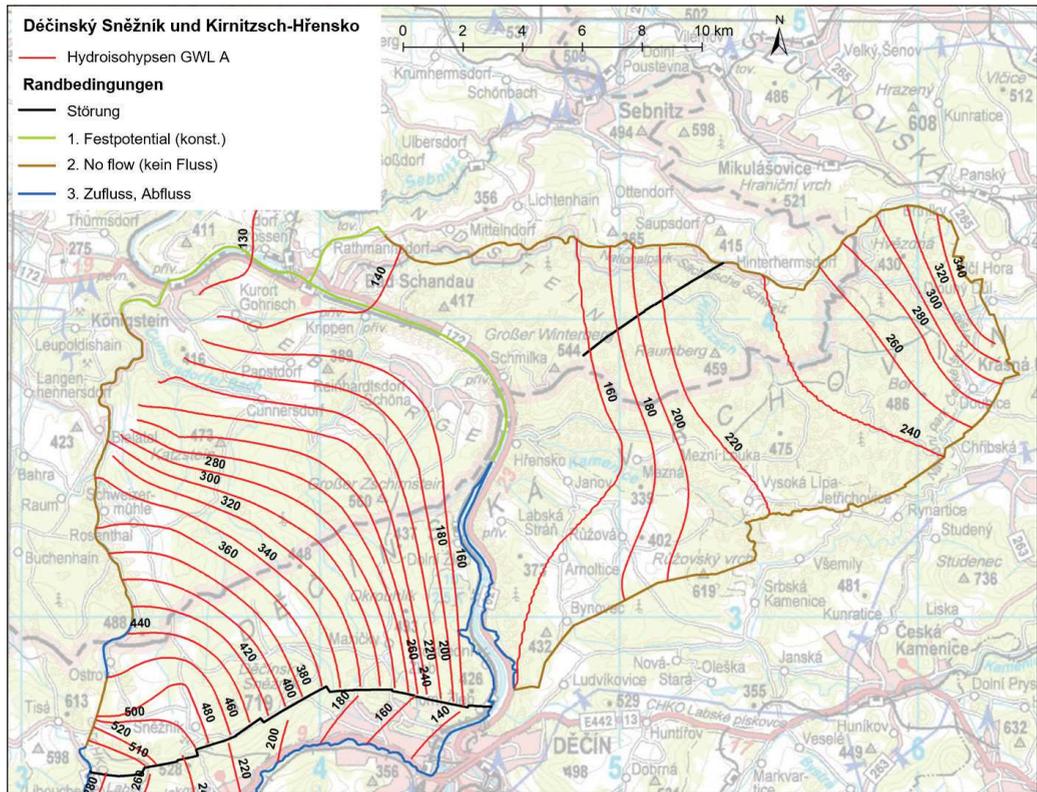


Abb. 4-7: Übersicht der Randbedingungen und der Grundwasserstände im Grundwasserleiter BC im Modellgebiet Kirnitzsch-Hřensko.

- Schmilka, Nasser Grund HySca 21/82/4
- Schmilka, Wurzelweg HySmil 2/81
- Schmilka, Quenenwiese 13Z/65
- Ottendorf, Zeughausstr. 11Z/65
- Ottendorf, Zschand HySml 6/81
- Ottendorf, Zschand HySml 5/81
- Hinterhermsdorf, Großer Zschand 1a/95 oben

Der südwestliche Bereich des Gebietes zwischen der Gemeinde Růžová und dem Elbtal wurde aus hydrogeologischer Sicht bisher nicht ausreichend untersucht. Gleichzeitig befindet sich in diesem Gebiet im turonischen Grundwasserleiter die Wasserscheide zwischen den Einzugsgebieten der Flüsse Kamenice und Elbe. Angesichts der fehlenden Grundwasserstandsdaten aus den Grundwassermessstellen wurden in diesem Gebiet die Quellen untersucht. Die kartierten Quellen wurden in zwei Gruppen unterteilt: Quellen aus flachliegenden Grundwasserleitern sind durch schwankende Abflussmengen und Leitfähigkeiten charakterisiert und befinden sich in größeren Höhenlagen. Quellen im Elbtal, welche sich zwischen den turonischen Sandsteinaufschlüssen und der kristallinen Obergrenze befinden, wurden dem tiefer liegenden turonischen Grundwasserleiter BC zugeordnet (Abb. 4-7). Die Höhenlagen entsprechen im Allgemeinen der vermuteten Basis des turonischen Grundwasserleiters, welcher nach Norden hin abfällt. Diese Erkenntnisse wurden für eine neue Interpretation der Grundwasserstände im südwestlichen Bereich des Gebietes genutzt.

Abb. 4-8: Übersicht der Randbedingungen und der Grundwasserstände im Grundwasserleiter A im Modellgebiet Kirnitzsch-Hřensko und Děčinský Sněžník.



Im nördlichen Bereich wird der Grundwasserleiter A teilweise in das Flussbett der Elbe entwässert und ist mit dem Gebiet am linksufrigen Flussbereich der Elbe verbunden. Die neue Karte (Abb. 4-8) stellt die verbundenen Isolinien quer durch das Tal dar.

Hydrogeologische Schnitte:

Im Bereich von Hřensko wurden vier Schnitte erstellt, welche die folgenden Bohrungen verbinden.

- 4660-2C (Hřensko), DKP-25 (Zámeček), K-II-c (Vysoká Lípa) und 2H-304 (Jeřichovice)

Nach Auswertung der geophysikalischen Bohrlochmessungen ist der Grundwasserleiter BC im Bereich zwischen Hřensko und Jeřichovice von vereinzelt Sandsteinlagen mit erhöhtem Feinkornanteil (Ton und Schluff) unterbrochen. Dieser basale Bereich ist etwa 55 m mächtig und wirkt wasserstauend. Über diesem Abschnitt lagern gut wasserdurchlässige Sandsteine, die stellenweise von 5 und 18 m mächtigen tonigen Bereichen durchzogen werden. Diese stauenden Bereiche sind nicht kompakt ausgebildet, wodurch Grundwasser zwar vermindert, aber dennoch passieren kann. Dieser Bereich kann allgemein als Schicht mit niedrigerer Wasserdurchlässigkeit betrachtet werden. Diese Schichtenfolge fungiert als Barriere für die darüber lagernden turonischen Grundwasserleiter.

- K-II-c (Vysoká Lípa), VP8462N, K-1-c, J-167222, KO-1 (Richtung nach NO)

Nordöstlich von Vysoká Lípa ist der Grundwasserleiter BC gleichmäßig von mehreren feinkörnigen Schichten durchzogen. Die wasserdurchlässigen Sandsteine erreichen eine Mächtigkeit

von ca. 25 m und sind durch eine etwa 5 m mächtige Schicht aus weniger wasserdurchlässigen, tonigen Sandsteinen getrennt. In den Bohrungen wurden vier (weiter entfernt von Vysoká Lípa drei) solcher Sequenzen vorgefunden. Die durchschnittliche Mächtigkeit des gesamten Grundwasserleiters BC liegt in diesem Profil zwischen 125 m in Vysoká Lípa und 180 m bei der Bohrung VP-8462N. In der Bohrung J-167222 wurde eine ähnliche Entwicklung in einer etwas tieferen Lage verzeichnet. Die beschriebenen Sequenzen treten nur in den untersten 150 m über der Basis des Aquifers BC auf, darüber folgen kompakte Sandsteine. Nach Analyse der Bohrung J-167222 kann die Gesamtmächtigkeit des Grundwasserleiters BC auf etwa 300 m geschätzt werden.

- J-139165 (Hadí Pramen), KO-1, J-123254 (Doubice), J-123319 (Chřibská)

Die im vorherigen Absatz beschriebenen Schichten der weniger wasserdurchlässigen Sandsteine im unteren Bereich des Grundwasserleiters BC wurden auch in diesem hydrogeologischen Schnitt wiedergefunden. In der Bohrung J-139165 liegt über der Basis des Aquifers BC eine etwa 75 m mächtige Schicht aus wasserdurchlässigen Sandsteinen. Darüber wechseln sich die 5-10 m mächtigen, weniger wasserdurchlässigen Sandsteine mit 10-30 m mächtigen wasserdurchlässigen Sandsteinschichten ab. Dieser Wechsel erstreckt sich über eine Mächtigkeit von etwa 100 m. Darüber befinden sich wiederum wasserdurchlässige Sandsteine. Der Grundwasserleiter BC erreicht eine Gesamtmächtigkeit von ca. 350 m. In der Nähe von Doubice ist die Entwicklung ähnlich, die gesamte Mächtigkeit erreicht hier ca. 420 m.

- J-139165 (Hadí pramen), Lo-7-Jc, J-087183, J-060173 (Vlčí Hora)

Die gering wasserdurchlässigen Sandsteinschichten, die an der Basis des Grundwasserleiters BC vorkommen und bereits in den anderen hydrogeologischen Schnitten beschrieben wurden, treten auch in diesem hydrogeologischen Schnitt auf. Über der Basis des Grundwasserleiters BC liegt eine 40 bis 55 m mächtige Schicht aus wasserdurchlässigen Sandsteinen.

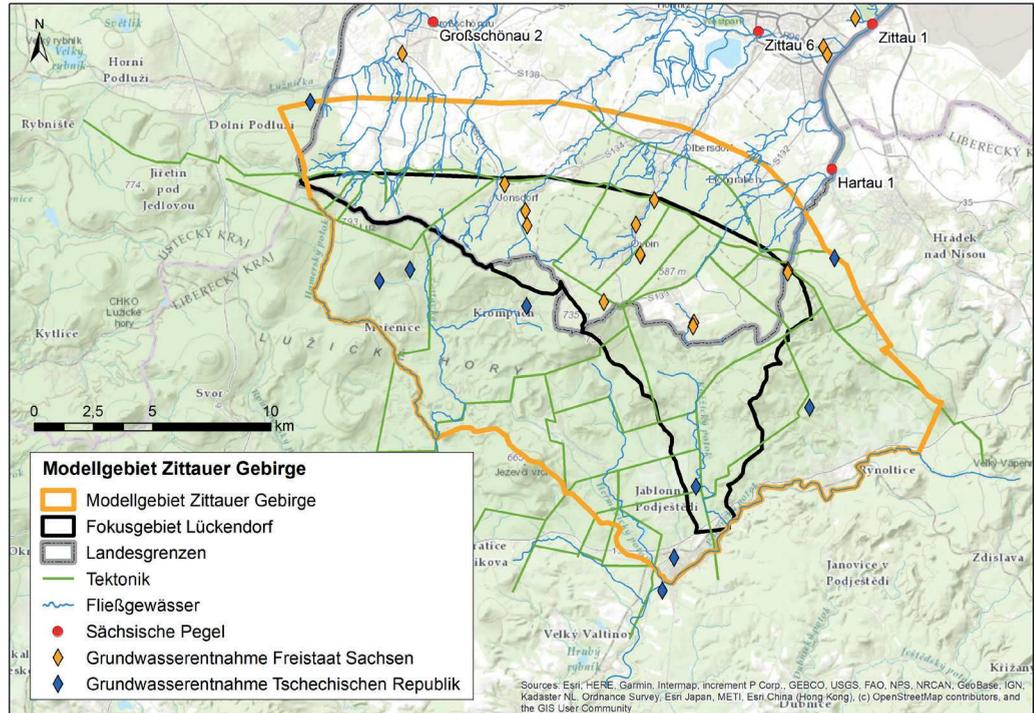
4.2.5. Modellgebiet Lückendorf

Das Modellgebiet Zittauer Gebirge beinhaltet das Fokusgebiet Lückendorf (Abb. 4-9) und reicht darüber hinaus bis an die nächsten, hydrogeologisch sinnvollen Randbedingungen heran, welche die Grenzen des Modells bilden. Dafür wurden die Grundwasserleiter durch hydraulische Beurteilung der vorhandenen geologischen Einheiten, identifiziert. Sie werden im Nachfolgenden näher beschrieben.

Grundwasserleiter A (Oberhäslich- / Peruc-Korycany-Formation)

Der unterste Grundwasserleiter A besteht aus cenomanem Sandstein und lagert auf dem kristallinen Grundgebirge, welches im Modell als Grundwassernichtleiter definiert wird. Die konzeptionellen Randbedingungen dieses vierten Grundwasserleiters bilden im Norden und Osten die Lausitzer Überschiebung, welche als hydraulisch „nicht-leitend“ angenommen wird und im Westen und Süden die Begrenzungen durch eine Randbedingung 1. Art (konstante Potentialhöhe). Der Aquifer wird durch vertikale Versickerung über den Grundwasserleiter BC mit Wasser versorgt. Die Versickerung wird jedoch durch den darüber liegenden Grundwasserstauer A/BC gehemmt. Die Wasserbewegung (Fließrichtung) erfolgt in diesem Grundwasserleiter in Richtung Süden bis Südwesten, dem Gefälle des kristallinen Grundgebirges folgend.

Abb. 4-9:
Konzeptionelles
Modell des
Modellgebietes
Lückendorf.



Grundwasserstauer A/BC (Pennrich- / Peruc-Korycany-Formation)

Der darüber vorkommende Grundwasserstauer A/BC erstreckt sich im Modell über den gesamten Grundwasserleiter A, mit Ausnahme im östlichen Teil des Gebietes. Dort streichen Teile des vierten Grundwasserleiters an der Oberfläche aus, wodurch aufgrund der fehlenden Überdeckung durch den Stauer A/BC eine erhöhte Grundwasserneubildung auftritt.

Grundwasserleiter BC (Oybin- / Bila Hora- und Jizera-Formation)

Der hangende, turone Aquifer BC ist im gesamten Modellgebiet verbreitet und stellt in der Region den wasserwirtschaftlich am intensivsten genutzten Grundwasserleiter für die Entnahme von Grundwasser dar. Er wird im Norden und Nordosten von der Lausitzer Überschiebung begrenzt. Darüber hinaus wird er im Süden vom Fluss *Panenský potok*, im Nordwesten vom Fluss *Hamerský potok* und im Südwesten von der Einzugsgebietsgrenze des *Heřmanický potok* begrenzt. Der Grundwasserleiter BC liegt zu 2/3 der betrachteten Gebietsfläche oberflächennah unter einer nur geringmächtigen Bodenschicht. In diesem Bereich liegt der Grundwasserleiter ungespannt vor. Die Grundwasserneubildung erfolgt in diesem Gebiet über die ungesättigte Bodenzone. Der Aquifer BC wird von dem lokalen Fließgewässersystem, wie in Abb. 4-10 dargestellt, und zwei größeren, wasserwirtschaftlich genutzten Quellen entwässert. Die wasserwirtschaftliche Nutzung des Aquifers erfolgt mehrheitlich über Entnahmehrunden.

Grundwasserstauer BC/D (Lückendorf- / Teplice-Formation)

Der Grundwasserstauer BC/D bedeckt den liegenden Grundwasserleiter BC zu 1/3 der Gebietsfläche, wodurch dieser an den überdeckten Stellen gespannt ist. Weiterhin wird durch die

Überdeckung dessen Grundwasserneubildung vermindert. Nur an den Rändern des Stauers BC/D führen Quellen dem Aquifer BC Wasser zu.

Grundwasserleiter D (Waltersdorf- / Teplice-Formation)

Der Grundwasserleiter D ist im Nordwesten des Fokusgebietes verbreitet und grenzt im Norden an die Lausitzer Überschiebung. Er wird im Nordwesten vom Fluss *Hamerský potok* begrenzt und reicht bis an die Grenze der Ortschaft Jonsdorf. Die Neubildung erfolgt wiederum über seine Oberfläche.

Tertiärbecken

Das Zittauer Tertiärbecken liegt an der nördlichen Grenze des Modells auf dem kristallinen Grundgebirge. Es ist im Modell als eigenständiger Grundwasserleiter angelegt und hat keinen lokalen Kontakt zum Grundwasserleitersystem der Kreidesandsteine. Um mögliche Einflüsse einer Verbindung beider Systeme durch eine hypothetische Störung zu untersuchen, wurde diese Störung (an der König-Johann-Quelle, welche nördlich der Lausitzer Überschiebung liegt) im Modell mitberücksichtigt. Da nur ein Teil des Zittauer Beckens, aufgrund der definierten Fokusgebietsgrenzen modelliert werden konnte, ist das Tertiärbecken vereinfacht mit einem Potentialgradienten als Randbedingung abgegrenzt. Die Grundwasserneubildung erfolgt ebenfalls über die ungesättigte Bodenzone.

Die Geometrie des oben beschriebenen Aquifersystems wurde mit Hilfe der geologischen Karte (Mlčoch et al. 2018), tschechischen Datensätzen zur Höhe der einzelnen geologischen

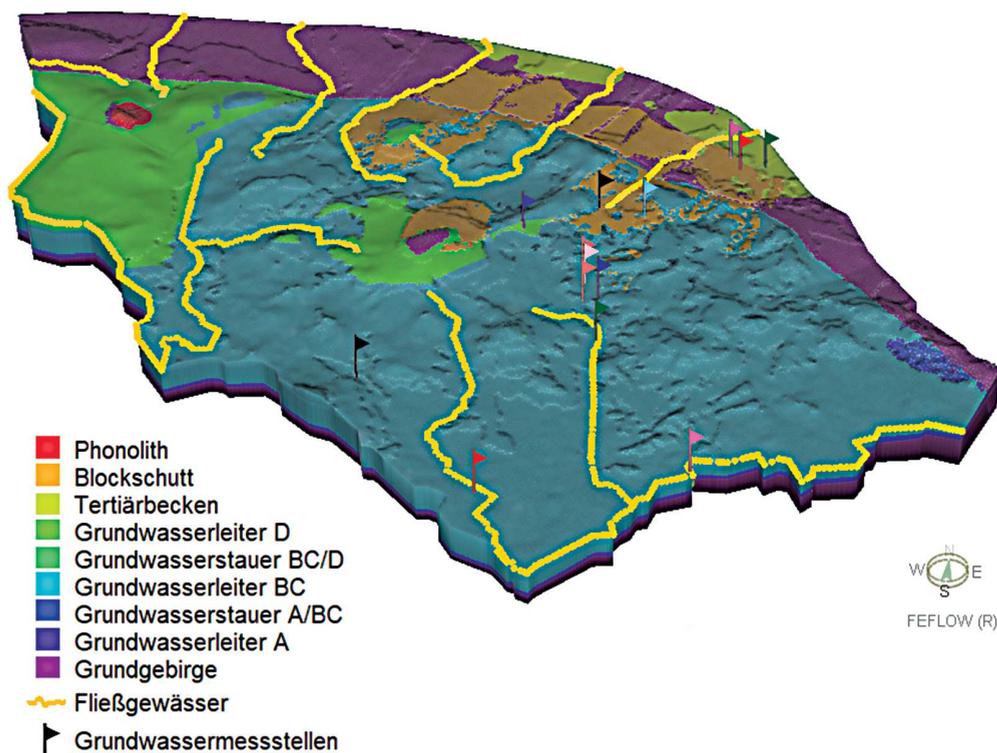


Abb. 4-10: Drainagesystem und Grundwassermessstellen des Modells Zittauer Gebirge. Die eingefärbten Körper repräsentieren die verschiedenen Stauer und Leiter.

Schichten, sächsischen Bohrdaten, der Geologischen Karte (GK 50) „Eiszeit“ und dem digitalen Geländemodell von der Firma G.E.O.S. (Wenderholm et al. 2019) als digitales 3D-Säulenmodell modelliert. Das Modell beinhaltet die räumlichen Informationen der vorhandenen Leiter und Stauer sowie im Gebiet auftretende Störungen und Verwerfungen.

Auf folgend aufgeführten Grundlagen wurde das konzeptionelle Modell zu einem numerischen Grundwasserströmungsmodell aufgebaut und kalibriert:

- der oben beschriebenen, räumlichen Informationen
- den Materialeigenschaften aus dem Vorgängerprojekt GRACE (Vaněk 2013)
- Detailuntersuchungen zur Wasserversorgung aus den Jahren 1976 bis 1978
- Grundwassergleichenplänen aus dem Übersichtsgutachten von G.E.O.S. (Mibus 1998)
- Messkampagnen des Projektpartners VÚV
- Wasserstandsdaten der in Abb. 4-10 dargestellten Grundwassermessstellen.

4.3. Hydraulische Modelle

Als Werkzeug für die mathematische Modellierung wurde für die Fokusgebiete Děčinský Sněžník und Kimitzsch-Hřensko der Modellansatz nach MODFLOW (Harbaugh & McDonald 1996) verwendet. Es ist ein dreidimensionales Modell, welches auf der Finite-Differenzen-Methode basiert. Das jeweilige Modellgebiet wird zuerst in vertikale Ebenen unterteilt. Im Anschluss daran werden innerhalb dieser Ebenen Elemente mit rechteckiger Grundfläche definiert. Im Modellgebiet können Quellen und Wasserentnahmen wie Brunnen, Flächenquellen aus Niederschlägen, Evapotranspiration, Pumpbrunnen, Dränagen und Wasserläufe definiert werden.

Das Programm MODFLOW selbst ist Bestandteil des Programmpaketes VISUAL MODFLOW PRO, das als Anwenderumgebung zur Konvertierung der Eingabedaten in die Modellierungsalgorithmen und zur graphischen Interpretation der Ergebnisse dient. Vorteilhaft ist der modulare Aufbau der Software, bei dem neben dem Hauptprogramm eine Vielzahl an unabhängigen Unterprogrammen existieren, die für die Lösung von spezifischen Anwendungsaufgaben verwendet werden können.

Für die mathematische Modellierung des Fokusgebietes Lückendorf wurde die Software FEFLOW (Diersch 2013) verwendet. Damit kann ein dreidimensionales Modell, das auf der Finite-Elemente-Methode basiert, aufgebaut werden. Das jeweilige Modellgebiet wird zuerst – ähnlich wie bei MODFLOW auch – horizontal in Ebenen (meist hydro-/geologische Schichten) unterteilt. Weiterhin werden alle entscheidenden inneren und äußeren Randbedingungen des Modellgebietes, welche von geometrischer Relevanz sind, als Kartengeometrien in das Programm geladen. Dazu zählen Quellen und Wasserentnahmen wie Brunnen, Flächenquellen aus Niederschlägen, Evapotranspiration, Dränagen und Wasserläufe. Aus den selektierten Geometrien wird anschließend durch einen Netzgenerator ein dreidimensionales Netz aus Dreiecks-Elementen berechnet, welches vorgegebene Stabilitätskriterien einhalten muss.

Das Programm FEFLOW selbst ist Bestandteil des Programmpaketes *Groundwater modelling* von DHI WASY, das als Anwenderumgebung zur Konvertierung der Eingabedaten in die Modellierungsalgorithmen und zur graphischen Interpretation der Ergebnisse dient. Vorteilhaft ist die Möglichkeit einer genaueren geometrischen Anpassung des Netzes an die vorgegebene räumliche Lage verschiedener Objekte, welche von hydraulischem Interesse bei der Berechnung sind.

In den nachfolgenden Kapiteln erfolgt eine kompakte Darstellung der Methodik sowie der erzielten Modelliererergebnisse. Für ausführlichere Informationen wird auf die entsprechenden

Abschlussberichte zur mathematischen Modellierung verwiesen (Navrátilová & Nol 2019a, b; Pohle 2020).

4.3.1. Kirnitzsch-Hřensko

Konzeptionelles Modell

Ein Hauptbaustein des mathematischen Modells war die Erstellung eines gemeinsamen, grenzüberschreitenden hydrogeologischen (konzeptionellen) Modells, in dem Geometrie sowie Ausdehnung aller bedeutsamen Grundwasserleiter und Grundwassergeringleiter/-nichtleiter definiert werden sollte. Zu Beginn wurden Grundprinzipien für den Modellaufbau festgelegt. Nachfolgende Regeln dienten somit als Richtlinie für die anschließende Modellierung des konzeptionellen Modells:

1. Das grenzüberschreitende hydrogeologische Modell (d.h. die Abgrenzung der Grundwasserleiter) muss an den Modellgrenzen einheitlich sein. Dies bedeutet, dass die hydrogeologischen Strukturen sowohl auf dem tschechischen als auch auf dem deutschen Gebiet vorhanden sein müssen.
2. Die Modellschichten, die im mathematischen Modell den Grundwasserleitern sowie Grundwasserstauern entsprechen, sind kontinuierlich und müssen im gesamten Modellgebiet in beiden Ländern vorkommen. Ist der Grundwasserleiter C oder D auf deutscher Seite vorhanden, so muss er auch auf tschechischem Gebiet modelliert werden.
3. Um eine einheitliche Benennung zu gewährleisten, wurde die tschechische Gliederung der Grundwasserleiter übernommen. Die Grundwasserleiter werden als A, B, C und D benannt; die Grundwassergeringleiter zwischen den Grundwasserleitern werden als Grundwasserstauer A/B, B/C und C/D bezeichnet.
4. Das bereits existierende, grenzüberschreitende hydrogeologische Modell für das Fokusgebiet Kirnitzsch-Hřensko wurde nach der Anpassung des geologischen Modells durch die Firma G.E.O.S. (Voigt et al. 2013; Kahnt et al. 2014; Nol 2014) erstellt. Dafür mussten auf deutschem Territorium 14 geologische Schichten der Kreidesedimente weiter abgegrenzt werden. Nach Rösner et al. (2008) wurden die einzelnen geologischen Schichten zu hydrogeologischen Grundwasserleitern und Grundwasserstauern zusammengefasst.

Auf deutschem Gebiet wurden 7 hydrogeologische Schichten abgegrenzt, die vier Grundwasserleitern und drei Grundwasserstauern entsprechen. Den zuvor definierten Grundprinzipien folgend, müssen die Schichten durchgehend vorhanden sein.

Die Abgrenzung der auf tschechischer Seite liegenden Grundwasserleiter A und B wurde gemäß Herčík & Nakládal (1987), den Daten aus dem ČGS-Geofonds, aus Archivdaten der Projektpartner sowie nach den in Patzeltová & Patzelt (2004) angegebenen Bohrdaten durchgeführt. Die von Herčík & Nakládal (1987) abgegrenzten, einzelnen Basislagen der Grundwasserleiter A und B/C sowie die Oberfläche (Top) des Grundwasserleiters A wurden digitalisiert, an die neuen Daten angepasst und mit dem deutschen hydrogeologischen Modell korreliert.

Der Top des Grundwasserleiters B und die Basis des Grundwasserleiters C wurden auf der tschechischen Seite anhand von kartierten Quellen (in m ü. NN) abgeleitet, die von Eckhardt (2013) dokumentiert wurden. Die Basis des Grundwasserleiters C Richtung Dlouhá Bela, wurde auf 220 m ü. NN festgelegt. Von der Basis des Grundwasserleiters C wurden 20 m (kartierte Mächtigkeit des Grundwasserstauers B/C) abgezogen, wodurch der Top des Grundwasserleiters B definiert werden konnte. Top und Basis des Grundwasserstauers B/C wurden schließlich mit den äquivalenten Stauern des deutschen hydrogeologischen Modells verbunden.

Im zugrundeliegenden Konzept wurde die Geometrie des Grundwasserstauers C und die Randbedingungen folgendermaßen definiert: Der Grundwasserstauer C ist zu allen Seiten durch eine Grenze mit einem „No Flow“ definiert. Der potentielle Zufluss aus dem kristallinen Grundgebirge entlang der Lausitzer Überschiebung wurde vernachlässigt. Die No Flow-Randbedingung entlang der Lausitzer Überschiebung wurde auf deutscher Seite vom bereits existierenden geologischen Modell der Firma G.E.O.S. (Kahnt et al. 2014) und auf tschechischem Gebiet anhand der Verbreitung der Kreidesandsteine bei Dolní Kamenice und Kírnitzsch festgelegt. Im Grundwasserleiter C wurde dem Gewässer Kírnitzsch die Randbedingung „Zufluss“ zugeordnet. Im Bereich der Kreuzung von Kírnitzsch, Lausitzer Überschiebung und der Gemeinde Zadní Doubice wurde die Randbedingung „Dränage“ gewählt.

An den Stellen, wo der Grundwasserleiter C erodiert ist, wurde die Randbedingung Dränage definiert, die den Abfluss des Grundwassers aus dem Modellgebiet ermöglicht, oder aber der Grundwasserleiter C wurde mittels vertikaler hydraulischer Leitfähigkeit mit dem darunterliegenden Grundwasserleiter B verbunden. Beide Lösungen besitzen ihre Vor- sowie Nachteile. Die Randbedingung Dränage sorgt für eine stabile hydraulische Abflusshöhe am Rande des Grundwasserleiters C, das Grundwasser verlässt das Modell jedoch außerhalb des simulierten Systems und reichert nicht den darunterliegenden Grundwasserleiter B an, wie es in der Realität wahrscheinlich der Fall ist.

Um die numerische Richtigkeit des Modells zu gewährleisten, wurde die Basis des Grundwasserleiters C unter das Höhenniveau des Talbodens versetzt. Damit wird sichergestellt, dass sowohl die Zellen am Rand von Aquifer C nicht „trockenfallen“, Grundwasserhaushalt und Grundwasserstand korrelieren als auch die Verbindung zwischen dem Grundwasserleiter C und dem Grundwasserleiter B durch die horizontale hydraulische Leitfähigkeit vorhanden ist. Dieses Vorgehen wurde ebenfalls für das Gebiet südlich der Kamenice angewandt.

Die Basis des Grundwasserleiters auf tschechischer Seite wurde, ausgehend vom ermittelten Gefälle auf deutscher Seite, extrapoliert und lokal an die Höhen der Quellen des Grundwasserleiters D angepasst. Die Ausdehnung des Grundwasserleiters D wurde auf tschechischer Seite mit Hilfe des digitalen Geländemodells angepasst. Von der Basis des Grundwasserleiters D wurden 10 m (kartierte Mächtigkeit des Grundwasserstauers C/D) abgezogen, wodurch der Top des Grundwasserleiters C definiert werden konnte.

Durch die Implementierung der neuen Geometrien wurde das stationäre Modell in der zweiten Etappe aktualisiert und zu einem transienten (instationären) Grundwasserströmungsmodell überarbeitet. Dieses wurde anschließend mit Hilfe manuell durchgeführter Grundwasserstandsmessungen und Zeitreihen der Beobachtungsbrunnen des deutschen und tschechischen Messnetzes kalibriert. Während der Kalibrierung wurden die hydraulischen Parameter so angepasst, dass eine gute Übereinstimmung zwischen den gemessenen und den simulierten Grundwasserständen erreicht wurden.

Geometrie und Schichttypen

Das hydraulische Modell setzt sich aus sieben Schichten zusammen. Alle Schichten fallen in etwa gleichmäßig nach Norden ein. Die Gesamtmächtigkeit der cenomanen Korycany-Schichtenfolge (entspricht etwa Aquifer A) beträgt in der Umgebung von Hřensko und Bad Schandau sowie in der Nähe der Lausitzer Überschiebung 100–115 m. In den Bereichen, in denen das Grundgebirge zur Zeit der Ablagerung eine Erhebung darstellte, treten Mächtigkeiten unter 10 m auf. Nordöstlich von Děčín wurden beispielsweise die Korycany-Schichten mit einer Mächtigkeiten von nur 5 m

erkundet. In den Aquiferen B und C wird der Grundwasserleiter vermutlich eher durch Klüfte im Gestein als durch einen reinen Wassertransport im Sandstein definiert. Dies würde auch die Häufigkeit von auftretenden Quellen erklären. Die Modellebenen wurden als Typ Grundwasserleiter mit freiem oder gespanntem Grundwasserspiegel definiert.

Eingangsparameter

Die im Gebiet der Kirnitzsch durch Jetelová (1972) ermittelte durchschnittliche hydraulische Leitfähigkeit von 2×10^{-5} m/s wurde im Modell für den Grundwasserleiter B verwendet. Die hydrodynamischen Messungen, die im Rahmen der Untersuchungen des Einzugsgebiet Hřensko (Nakládal 1989) durchgeführt wurden, geben Werte zwischen 1×10^{-5} und 7×10^{-4} m/s an, wobei die Werte der hydraulischen Leitfähigkeit mit einer Größenordnung von $n \times 10^{-4}$ m/s den stark tektonisch gestörten Sandsteinen des Grundwasserleiters B entsprechen. Rösner et al. (2008) geben für die hydraulische Leitfähigkeit der sächsischen Sandsteine (Grundwasserleiter B und C) einen repräsentativen Wert von 1×10^{-5} m/s an.

Aufgrund dieser Werte wurde zu Beginn der Kalibrierung eine horizontale hydraulische Leitfähigkeit von 2×10^{-5} m/s im gesamten Modellgebiet für beide Grundwasserleiter sowie ein zehnfach höherer Wert in tektonisch geprägten Bereichen (z.B. Klüfte) des Einzugsgebietes Hřensko verwendet. Weiterhin wurden beide Grundwasserleiter durch eine vertikale hydraulische Leitfähigkeit von 2×10^{-6} m/s charakterisiert. Für den Grundwasserstauer B/C wurde (nach den Ergebnissen der ersten Etappe der Modellierung) eine horizontale hydraulische Leitfähigkeit von 1×10^{-8} m/s und eine vertikale hydraulische Leitfähigkeit von 1×10^{-9} m/s festgelegt. An den Rändern des Grundwasserstauers B/C wurde die vertikale hydraulische Leitfähigkeit auf 1×10^{-6} m/s reduziert, wodurch der Überfluss vom Grundwasserleiter C in den Grundwasserleiter B gewährleistet wird. Während des Kalibriervorgangs wurden die hydraulischen Parameter so angepasst, dass eine gute Übereinstimmung zwischen den simulierten und den beobachteten Grundwasserständen erzielt wurden.

Der Speicherkoeffizient wurde für Grundwasserleiter mit freiem (ungespanntem) Grundwasserspiegel mit 0,05 und für Grundwasserstauer mit 0,01 angenommen. Basierend auf Interpretationen der laufenden Modellergebnisse sowie nach Übermittlung der auf deutscher Seite üblichen Werte, wurde für die Grundwasserleiter B und C ein Speicherkoeffizient von 0,1 verwendet. Dieser Wert stimmt mit dem von Nakládal (1975) ermittelten Wert überein. Ein spezifischer Speicherkoeffizient von 0,0001 (1/m) wurde für alle Modellebenen verwendet.

Herčík & Nakládal (1987) geben für die gesamte Kreideeinheit einen spezifischen Basisabfluss von $8,361/(s \times km^2)$ an. Die abgeleitete Grundwasserneubildung erreicht 264 mm/Jahr, was etwa 29% der durchschnittlichen jährlichen Niederschlagssumme (gemessen an der Niederschlagsstation Chřibská mit 912 mm/Jahr) entspricht. Die von Herčík & Nakládal (1987) abgeleiteten 264 mm/Jahr stehen in guter Übereinstimmung mit den Ergebnissen des Projektes KliWES, bei dem eine durchschnittlicher Grundwasserneubildung von 253 mm/Jahr ermittelt wurde.

Kalibrierung

Die gesamte hydrogeologische Struktur wird kontinuierlich von insgesamt 20 Bohrungen überwacht, von denen 2 Messstellen das Verhalten der Grundwasserstände seit 1967 beschreiben. Die kontinuierlich messenden Beobachtungsbrunnen bieten jedoch keine ausreichende Darstellung der weiträumigen piezometrischen Verhältnisse in den einzelnen Grundwasserleitern. In der Tschechischen Republik gibt es jedoch eine Reihe von historischen sowie einmalig

bemessenen Bohrungen. Die Messungen an diesen Bohrungen sind weniger repräsentativ, da sie Schwankungen der Grundwasserstände nicht widerspiegeln und nur schwer miteinander vergleichbar sind. Die Grundwasserstände wurden zudem oft zu unterschiedlichen Zeitpunkten erhoben. Diese einmaligen Messwerte ermöglichen durch die Kalibrierung dennoch eine Präzisierung des Modells.

Die Grundwasserstandsdaten wurden in insgesamt 7 Kalibrierungsgruppen eingeteilt, die für die Zuverlässigkeit und Plausibilität des hydraulischen Modells von unterschiedlicher Bedeutung sind. Die ersten vier Kalibrierungsgruppen basieren auf Bohrungen, die in der Tschechischen Republik innerhalb folgender Zeitperioden gebohrt und gemessen wurden:

- 1961–1979 (Kalibrierungsgruppe 1)
- 1980–1990 (Kalibrierungsgruppe 2)
- 1991–2007 (Kalibrierungsgruppe 3)
- einmalige Grundwasserstandsmessungen im Jahre 2007 (Kalibrierungsgruppe 4)
- Grundwasserstandsmessungen auf deutschem Territorium (Kalibrierungsgruppe 5; Rösner et al. 2008)
- ermittelte Abhängigkeiten von Grundwasserneubildung und Grundwasserstandsänderung mit und ohne Grundwasserentnahme (Kalibrierungsgruppen 6 und 7).

Die Kalibrierung des mathematischen Modells wurde in zwei Phasen eingeteilt. In der ersten Phase wurde eine konstante Grundwasserneubildungsrate angenommen. Sobald eine passende Übereinstimmung zwischen den gemessenen und den modellierten Grundwasserständen erzielt wurde, folgte die zweite Phase, bei der eine zeitlich variable Grundwasserneubildungsrate verwendet wurde.

Simulierte Grundwasserströmung

Das Strömungsmodell beschreibt die piezometrischen Verhältnisse im Fokusgebiet Kirnitzsch-Hřensko. Das Grundwasser in den Grundwasserleitern A bis C strömt von Osten nach Westen.

Aus dem Grundwasserleiter D fließt das Grundwasser in den darunterliegenden Grundwasserleiter C. Die Grundwasserströmung im Grundwasserleiter C wird hauptsächlich durch die Kirnitzsch, durch das Auftreten von vulkanischen Gesteinen (Schlote und Decken) sowie durch die Ausdehnung des Grundwasserstauers B/C gesteuert. Im östlichen Teil des Modellgebietes ist der Grundwasserstand im Grundwasserleiter C identisch mit dem Grundwasserstand im Grundwasserleiter B. Bohrungen zeigten weiterhin keine flächendeckenden feinkörnigen Schichten zwischen den Grundwasserleitern, weshalb sie in diesem Gebiet einen vereinigten Grundwasserleiter BC bilden.

Anhand der Hydroisohypsen kann eine Entwässerung in Richtung der Kamenice erkannt werden. (Abb. 4-11). Im westlichen Teil des Gebietes kommt es, infolge der Anwesenheit des Grundwasserstauers B/C, zu einer Differenz zwischen den Grundwasserständen in Grundwasserleiter B und C.

Der Grundwasserstand im Grundwasserleiter C liegt um etwa 5 bis 20 m höher als der im Grundwasserleiter B. Annähernd entlang der Staatsgrenze bildet sich eine Wasserscheide und die Hauptströmung des Grundwassers gliedert sich in einen nördlichen und einen südlichen Teil. Die nördliche Grundwasserströmung fließt in Richtung Kirnitzsch, die südliche Strömung läuft zu den Rändern des Grundwasserleiters C, wo das Grundwasser in den Grundwasserleiter B übergeht. In der Klamm von Elbe und Kamenice wird der Grundwasserleiter C aufgrund der

der Grundwasserentnahmen und Änderungen in der Grundwasserneubildungsrate. Während die Wasserentnahmen dank der Aufzeichnung der Fördermengen einen leicht definierbaren Faktor darstellen, ist die tatsächliche Grundwasserneubildung über die Zeit nur mit eingeschränkter Genauigkeit festzustellen. Die Grundwasserentnahmen werden als Durchschnittsmengen für jedes registrierte Jahr in das hydraulische Modell eingegeben und nicht weiter angepasst. Je nach Kalibrierung des hydraulischen Modells verändert sich die Grundwasserneubildungsrate bei Schwankungen des Grundwasserspiegels an den Dauerbeobachtungsstellen (Kalibrierungsgruppen 6 und 7).

Wurde das hydraulische Modell gut auf die beobachteten Grundwasserstände kalibriert, kann es zur Quantifizierung beider Faktoren der Grundwasserspiegelschwankungen (Grundwasserentnahmen und Grundwasserneubildung) eingesetzt werden. Dazu werden zwei Szenarien betrachtet und untersucht. Das erste Szenario vernachlässigt die Entnahme von Grundwasser an den Brunnen. Das zweite Szenario berücksichtigt die Entnahme hingegen vollumfänglich. Der Vergleich beider Szenarien bietet die Möglichkeit der Beurteilung des Einflusses der Grundwasserentnahme auf die Entwicklung des Wasserstandes.

Die modellierte Differenz zwischen beiden Szenarien ist im Grundwasserleiter B im Einzugsgebiet Hřensko deutlicher ausgeprägt als im Einzugsgebiet von Felsenmühle und Neumannmühle, in welchen das Grundwasser auf natürliche Weise in die Kimitzsch strömt. Die Differenz der Grundwasserspiegel erreicht bis zu 8 m im Einzugsgebiet Hřensko und 4 m an der Grundwassermessstelle 51516006_2 (Abb. 4-17), was jedoch nicht durch direkte Beobachtung bestätigt werden kann, da die Aufzeichnungen erst 1998 begannen und demzufolge nicht den Zeitraum der größten Rückgänge (GRACE; Kalinová et al. 2014a) der Grundwasserstände abdecken.

Im Grundwasserleiter C, in welchem der Rückgang vor allem durch das Absinken des Grundwasserstandes im Grundwasserleiter B verursacht wird, sinkt der Grundwasserspiegel maximal um 2,2 m ab. Auf tschechischem Gebiet kommt es gemäß dem Modell auch im Grundwasserleiter C zum Absinken des Grundwasserspiegels, obwohl lediglich vom Grundwasserleiter B eine Grundwasserentnahme erfolgt. Die Ursache hierfür liegt im Übergang des Grundwassers vom Grundwasserleiter B in den Grundwasserleiter C an vorhandenen Störungen oder am Randbereich des Modells, wo sich die beiden Aquifere B und C vereinigen.

Dies bedeutet: sinkt der Grundwasserspiegel im Grundwasserleiter B infolge der Wasserentnahmen, erhöht sich der Grundwasserstrom von Leiter C nach B, was ebenfalls ein Absinken des Grundwasserspiegels im Grundwasserleiter C zur Folge hat.

Berechnung der natürlichen Grundwasserressourcen und des nutzbaren Grundwasserangebots

Vom Gesamtdargebot der natürlichen Grundwasserressourcen kann nur ein bestimmter Anteil genutzt werden, ohne dass negative Auswirkungen, wie z.B. anhaltende Grundwasserabsenkungen auftreten. Vor allem in den Trockenperioden ist eine nachhaltige und geplante Nutzung nötig. Die maximal zu entnehmende Menge an Grundwasser kann, basierend auf entsprechenden Kriterien, bestimmt werden. Würde als Kriterium beispielsweise die Anforderung an einen konstanten Grundwasserstand ohne weitere Absenkung festgelegt werden, dann könnten die nutzbaren Grundwasserressourcen mit der Höhe der gegenwärtigen Entnahmen identifiziert werden, da jede zusätzliche (wenn auch nur geringfügige) Erhöhung der Förderung zu einer Absenkung des Grundwasserspiegels im Modell führt (statischer Ansatz). Vergleichbar ist auch die Annahme

eines Volumenkriteriums bezogen auf den Basisabfluss. Eine Veränderung dessen schlägt sich in der Bilanz des Grundwasserleiters nieder.

Es ist daher notwendig, bestimmte Grenzwerte festzulegen, entweder in Form eines Mindestgrundwasserspiegels in bestimmten Brunnen oder eines minimalen Basisabflusses, mit denen definiert wird, dass eine weitere Senkung des Grundwasserspiegels negative Auswirkungen auf die Umgebung hervorrufen können. Diese negativen Auswirkungen besitzen dabei einen sehr allgemeinen Charakter und können z.B. eine Beeinträchtigung der wassergebundenen Ökosysteme, die Einhaltung des ökologischen Mindestabflusses der Oberflächengewässer oder die Aufrechterhaltung der Ergiebigkeit wichtiger Wasserfassungen betreffen.

Für die Modellierung wurde das sog. „Prinzip der minimalen Wasserspiegeländerung“ genutzt. Hierbei wird nach der maximal möglichen Entnahmemenge gesucht, bei der sich an den Beobachtungspunkten entweder ein stationärer Grundwasserspiegel (kein Absinken des Grundwasserstandes) einstellt oder aber der Wasserstand um einen bestimmten vorgegebenen Wert sinkt und es zugleich zu einer Grundwasserströmung (Zustrom zum Entnahmehrunnen) kommt.

Für die Modelllösungen mit oben genannter Vorgabe wurde ein Szenario verwendet, das eine konstante Grundwasserneubildungsrate sowie Wasserentnahme während des gesamten Prognosezeitraums vorsieht. Ein Simulationszeitraum von 30 Jahren (bis zum Jahr 2045) wird dabei als ausreichend lang angenommen, um die Grundwasserströmung zu stabilisieren und einen stationären Zustand zu erzielen.

Wenn als Kriterium eine Nulländerung des Grundwasserspiegels bei konstanter Grundwasserneubildungsrate gewählt wird, dann erfüllen die bestehenden Entnahmen auf tschechischem und deutschem Territorium dieses Kriterium. Die größten prognostizierten Grundwasserabsenkungen treten im Brunnen 51516006_2 auf (Abb. 4-17; Grundwasserleiter B). Dies ist durch das gespannte Grundwasserregime im Grundwasserleiter B, durch die schnellen Änderungen des Grundwasserstandes sowie durch die Reichweite beider Absenktrichter im tschechischen und im deutschen Fassungsgebiet gegeben. Wählt man die Bohrung 51516006_2 als Bezugspunkt, können entsprechend der Höhe der Grundwasserstandsabsenkung mehrere Stufen des nutzbaren Grundwasserdargebotes festgelegt werden (Tab. 4-3).

Unter Berücksichtigung der vorgegebenen Bedingungen zur Bewertung des nutzbaren Grundwasserdargebotes kann festgestellt werden, dass bei einer Absenkung des Grundwasserspiegels im Modellgebiet um maximal 2 m, das nutzbare Grundwasserdargebot der Summe der gegenwärtigen zugelassenen Entnahme (Jahresdurchschnitt) entspricht. Dabei muss berücksichtigt werden, dass die Menge des festgelegten nutzbaren Grundwasserdargebotes innerhalb des Modellgebietes nicht nur durch die Modellunsicherheiten beeinflusst wird, sondern insbesondere durch die Wahl der Kriterien, welche es einzuhalten gilt. Für alle Modelldurchläufe wurde das Prinzip der konstanten Wasserspiegellage angewendet. Es ist anzumerken, dass das Ergebnis des ermittelten nutzbaren Grundwasserdargebotes deutlich von den realen Werten abweichen kann, wenn andere Kriterien ausgewählt bzw. andere Grenzwerte festgelegt werden.

Die natürlichen Grundwasserressourcen (Grundwasserneubildung) wurden mit 250 mm pro Jahr modelliert, was 1481 l/s entspricht. Das nutzbare Grundwasserdargebot, welches sicherstellt, dass die hydrogeologische Struktur nicht überbelastet wird, beträgt 623 l/s. Abzüglich der gegenwärtig entnommenen Menge von 105 l/s verbleibt ein nutzbares Grundwasserdargebot von 518 l/s.

Tab. 4-3: Nutzbares Grundwasserdargebot und Grundwasserabsenkung im Brunnen 51516006_2. Jedes Szenario wurde bis zum Jahr 2045 berechnet.

Szenario	Beschreibung	Grundwasserentnahmen entsprechend dem nutzbaren Dargebot [l/s]		Grundwasserabsenkung im Brunnen 51516006_2 in [m]	Stationärer Zustand
		CZ	DE		
01 (Ausgangsszenario)	Ist-Entnahmemenge (im Jahr 2012, konstant bis 2043)	74,30	38,7	0	ja
02	Erhöhung der Entnahmemenge auf 115 % vom Ist-Wert des Jahres 2012 – zur Ermittlung des nutzbaren Dargebots	85,45	44,49	bis zu 1 m	ja
03	Maximale Entnahme laut Wasserrecht (Jahresmittelwert)	103	70	bis zu 2 m	ja
04	Reduzierung auf 85 % der bisher registrierten maximalen Entnahmemenge – zur Ermittlung des nutzbaren Dargebots	118,30	51,85	bis zu 3 m	ja
05	Aufgezeichnete maximale Entnahmemenge	139,18	61	bis zu 4 m	ja
06	Erhöhung der aufgezeichneten maximalen Entnahmemenge auf 115 % im Jahre 2012 – zur Ermittlung des nutzbaren Dargebots	160,06	70,15	bis zu 5 m	Annäherung an stationären Zustand

4.3.2. Děčínský Sněžník

Konzeptionelles Modell

Das Modell für das Gebiet Děčínský Sněžník ist schematisch wie folgt aufgebaut: Die Kreidesandsteine bedecken das gesamte Modellgebiet fast flächendeckend, Ausnahmen bilden die Bereiche, an denen die Elbe und ihre Nebenflüsse die Kreidesedimente erodiert haben und das kristalline Grundgebirge an der Oberfläche ansteht. Diese Stellen werden im Modell in Form von Polygonen abgegrenzt, der Verlauf der Isolinien wird so dargestellt, als ob an dieser Stelle die Schichten weiterlaufen. Im Falle eines an der Oberfläche anstehenden Kristallinorkommens wird eine abweichende horizontale und vertikale hydraulische Leitfähigkeit angenommen, die den Kristallinkomplex hydraulisch von den umliegenden Kreidesedimenten, welche die Grundwasserleiter A und BC sowie den Grundwasserstauer A/BC bilden, abgrenzt.

Das Modellgebiet wurde zunächst in vertikale Einheiten unterteilt, die den einzelnen hydrogeologischen Schichten entsprechen. Diese entsprechen dem Grundwasserleiter A, dem Grundwasserleiter BC, welcher sich wiederum aus den Grundwasserleitern B und C zusammensetzt und dem dazwischen gelegenen Grundwasserstauer A/BC.

Der Grundwasserleiter A liegt im direkten Kontakt auf dem kristallinen Grundgebirge und wird am Top von feinkörnigen Sedimenten des Grundwasserstauers A/BC überlagert. Der Grundwasserleiter BC (genauer der obere Abschnitt, welcher dem Grundwasserleiter C zugerechnet wird) bildet die Geländeoberfläche.

Die importierten Daten wurden in der Umgebung VISUAL MODLOW PRO insbesondere auf mögliche Überschneidungen der Modellschichten geprüft. Besonderer Wert wurde dabei

auf die NO-SW-verlaufende Děčín-Doubice Störung gelegt (Abb. 3-2). Der Versatz erreicht hier bis zu 300 m und unterbricht die Kontinuität der geologischen Schichten vollständig. Gegenwärtig wird kein Grundwasserübergang zwischen dem Gebiet nördlich und südlich der Děčín-Doubice Störung vermutet. Dieser Übergang ist jedoch nicht auszuschließen und wurde bei der Konstruktion des transienten Modells weiter untersucht. Aus diesem Grund wurde die Möglichkeiten einer Verbindung der Modellschichten über die Děčín-Doubice Störung hinaus geprüft. Im Ergebnis dieser Untersuchung ergab sich, dass ein kontinuierlicher Übergang der Modellschichten ungeeignet erscheint. Die numerischen Lösungen der Grundwasserströmung waren instabil, da es zur Austrocknung von Modellzellen an der Děčín-Doubice Störung sowie am südlichen Rand des nördlichen Fokusgebietes von Kírnitzsch-Hřensko kam.

Aus diesem Grund wurde ein Modellkonzept mit 6 Modellebenen gewählt (Abb. 4-12), wobei die drei obersten Ebenen dem Grundwasserleiter A, dem Grundwasserstauer A/BC und dem Grundwasserleiter BC nördlich der Störung entsprechen. Diese drei Ebenen liegen im Gebiet südlich der Děčín-Doubice Störung über dem Gelände (modellerte GOK) und sind demzufolge im Modell inaktiv. Die drei unteren Modellebenen sind südlich der Děčín-Doubice Störung hingegen aktiv (d.h. sie beteiligen sich an der Modellberechnung). Im nördlichen Modellgebiet befindet sich ihre fiktive Geometrie unterhalb der drei obersten Modellebenen und alle drei unteren Ebenen sind als inaktiv definiert. An der Děčín-Doubice Störung ist der Übergang zwischen dem Grundwasserleiter A im nördlichen und dem Grundwasserleiter BC im südlichen Modellgebiet zulässig.

Im östlichen Teil des Gebietes wurde in der 3. Modellebene, welche im nördlichen Gebiet dem Grundwasserleiter A entspricht, eine sog. Übergangszone geschaffen. Hier entspricht die 3. Modellschicht dem Grundwasserleiter BC. Das heißt, dass in dieser Übergangszone das Grundwasser horizontal vom Grundwasserleiter A zum Grundwasserleiter B (BC) strömt.

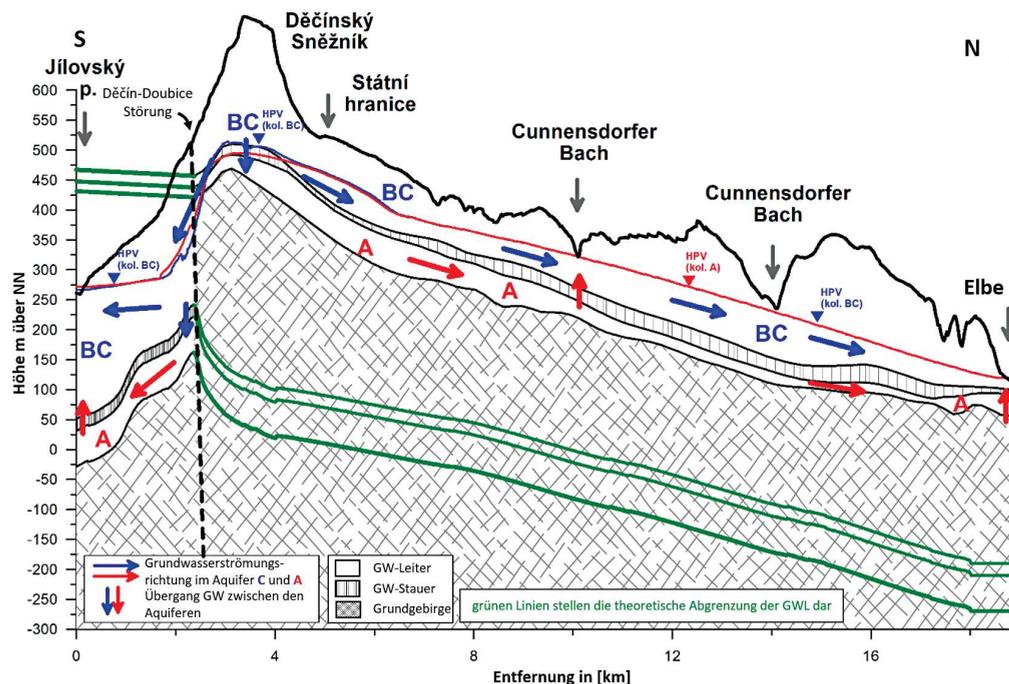


Abb. 4-12: Hydrogeologischer Schnitt durch das Gebiet Děčínský Sněžník.

Durch die Implementierung der neuen Geometrie wurde das stationäre Modell aktualisiert und zum transienten Modell der Grundwasserströmung erweitert. Dieses wurde anschließend mit Hilfe manuell durchgeführter Grundwasserstandsmessungen und Zeitreihen der Beobachtungsbrunnen des deutschen und tschechischen Messnetzes kalibriert. Während der Kalibrierung wurden die hydraulischen Parameter so angepasst, dass eine gute Übereinstimmung zwischen den gemessenen und den simulierten Grundwasserständen erreicht wurde.

Geometrie und Schichttypen

Das hydraulische Modell wurde mit sechs aushaltbaren Schichten entworfen. Alle Schichten auf deutschem Gebiet und in der Tschechischen Republik nördlich der Děčín-Doubice Störung fallen gleichmäßig nach Norden hin ein, wohingegen südlich der Děčín-Doubice Störung der Grundwasserleiter A sowie der Grundwasserleiter BC nach Süden geneigt sind. Die Modellebenen wurden als Grundwasserleiter mit freiem oder gespanntem Grundwasserspiegel definiert.

Eingangsparameter

Die von Jetelová (1972) aus dem Gebiet Kirnitzsch-Hřensko ermittelten durchschnittlichen hydraulischen Leitfähigkeiten werden auch für das Gebiet Děčínský Sněžník verwendet. Für den Grundwasserleiter B wurde im Modell eine hydraulische Leitfähigkeit von 2×10^{-5} m/s angesetzt. Die hydrodynamischen Messungen, die im Rahmen der Untersuchungen des Einzugsgebietes Hřensko (Nakládal 1989) durchgeführt wurden, geben Werte zwischen 1×10^{-5} und 7×10^{-4} m/s an, wobei die Werte der hydraulischen Leitfähigkeit mit einer Größenordnung von $n \times 10^{-4}$ m/s den stark tektonisch gestörten Sandsteinen des Grundwasserleiters B entsprechen. Der Wert der hydraulischen Leitfähigkeit stimmt sehr gut mit den deutschen Daten überein, wobei Rösner et al. (2008) für die hydraulische Leitfähigkeit einen repräsentativen Wert von 1×10^{-5} m/s (für die Grundwasserleiter B und C) angibt.

Zu Beginn der Kalibrierung wurde eine horizontale hydraulische Leitfähigkeit von 2×10^{-5} m/s im gesamten Modellgebiet für beide Grundwasserleiter sowie ein zehnfach höherer Wert in tektonisch überprägten Zonen festgelegt. Weiterhin wurden beide Grundwasserleiter durch eine vertikale hydraulische Leitfähigkeit von 2×10^{-6} m/s charakterisiert. Für den Grundwasserstauer A/B wurde eine horizontale hydraulische Leitfähigkeit von 1×10^{-8} m/s und eine vertikale hydraulische Leitfähigkeit von 1×10^{-9} m/s festgelegt. In der Grundwasserneubildungszone zwischen Děčínský Sněžník und Tisá reduziert sich die vertikale Leitfähigkeit des Grundwasserstauers A/B auf 1×10^{-6} m/s, wodurch der Überlauf vom Grundwasserleiter BC in den Grundwasserleiter A ermöglicht wird. Während des Kalibrierungsvorgangs wurden die hydraulischen Parameter so angepasst, dass eine gute Übereinstimmung zwischen den simulierten und den beobachteten Grundwasserständen erzielt wurden.

Der Speicherkoeffizient wurde für Grundwasserleiter mit freiem Grundwasserspiegel mit 0,05 und für Grundwasserstauer mit 0,01 angenommen. Basierend auf der Interpretation der laufenden Modellergebnisse sowie nach Vergleich der auf deutscher Seite üblichen Werte wurde für die Grundwasserleiter C und B ein Speicherkoeffizient von 0,1 übernommen. Dieser Wert stimmt mit dem von Nakládal (1975) im Gebiet Hřensko ermittelten Wert überein. Ein spezifischer Speicherkoeffizient von 0,0001 (1/m) wurde für alle Modellebenen verwendet. Burda & Venera (2016) geben für die gesamte Kreideeinheit einen spezifischen Basisabfluss von 6,95 l/(s \times km²) an. Die abgeleitete Grundwasserneubildung erreicht 188 mm /Jahr, was etwa 23 % der durchschnittlichen jährlichen Niederschlagssumme, gemessen an der Niederschlagsmessstation

in Tisá (824 mm/Jahr), entspricht. Die Grundwasserneubildung wurde als Monatssummen in das transiente Modell eingegeben.

Kalibrierung

Die Kalibrierung des Modells erfolgte für das Gebiet Děčínský Sněžník analog zur Kalibrierung des Modells Kirnitzsch-Hřensko.

Die gesamte hydrogeologische Struktur wird kontinuierlich von insgesamt 19 Beobachtungsbrunnen überwacht, von denen die tschechischen Bohrungen das Verhalten der Grundwasserstände seit 1993 aufzeichnen.

Die kontinuierlich messenden Beobachtungsbrunnen bieten jedoch keine ausreichende Darstellung der weiträumigen piezometrischen Verhältnisse in den einzelnen Grundwasserleitern (insbesondere im Bereich südlich der Störung sowie in der Übergangszone). In der Tschechischen Republik gibt es jedoch eine Reihe von Altbohrungen sowie einmalig bemessenen Bohrungen. Die Messungen an diesen Bohrungen sind weniger repräsentativ, da sie Schwankungen der Grundwasserstände nicht widerspiegeln und nur schwer miteinander vergleichbar sind. Grund hierfür ist, dass die Messwerte der Grundwasserstände oft zu unterschiedlichen Zeiten erhoben wurden. Diese einmaligen Messwerte ermöglichen durch die Kalibrierung dennoch eine Präzisierung des Modells. Weiterhin wurden zur Kalibrierung die Ansatzhöhen von erfassten Quellen und von Brunnen genutzt.

Alle Grundwasserstandsdaten wurden in insgesamt 2 Kalibrierungsgruppen eingeteilt, die für die Zuverlässigkeit und Plausibilität des hydraulischen Modells von unterschiedlicher Bedeutung sind. Die Kalibrierungsgruppe 1 bilden Bohrlochgruppen, die in der Tschechischen Republik im Zeitraum 1961-2007 gebohrt und einmalig gemessen wurden.

Die Kalibrierungsgruppe 2 stellt Messwerte unterschiedlichem Datums (regelmäßige und unregelmäßige Messreihen) dar und wird zur Kalibrierung des Modells für langfristige Grundwasserstandsschwankungen verwendet.

Die Kalibrierung des mathematischen Modells wurde in zwei Phasen eingeteilt. In der ersten Phase wurde eine konstante Grundwasserneubildung angenommen. Sobald eine relativ deckungsgleiche Übereinstimmung zwischen den gemessenen und den modellierten Grundwasserständen erzielt wurde, folgte die zweite Phase, bei der eine zeitlich variable Grundwasserneubildung verwendet wurde.

Simulierte Grundwasserströmung

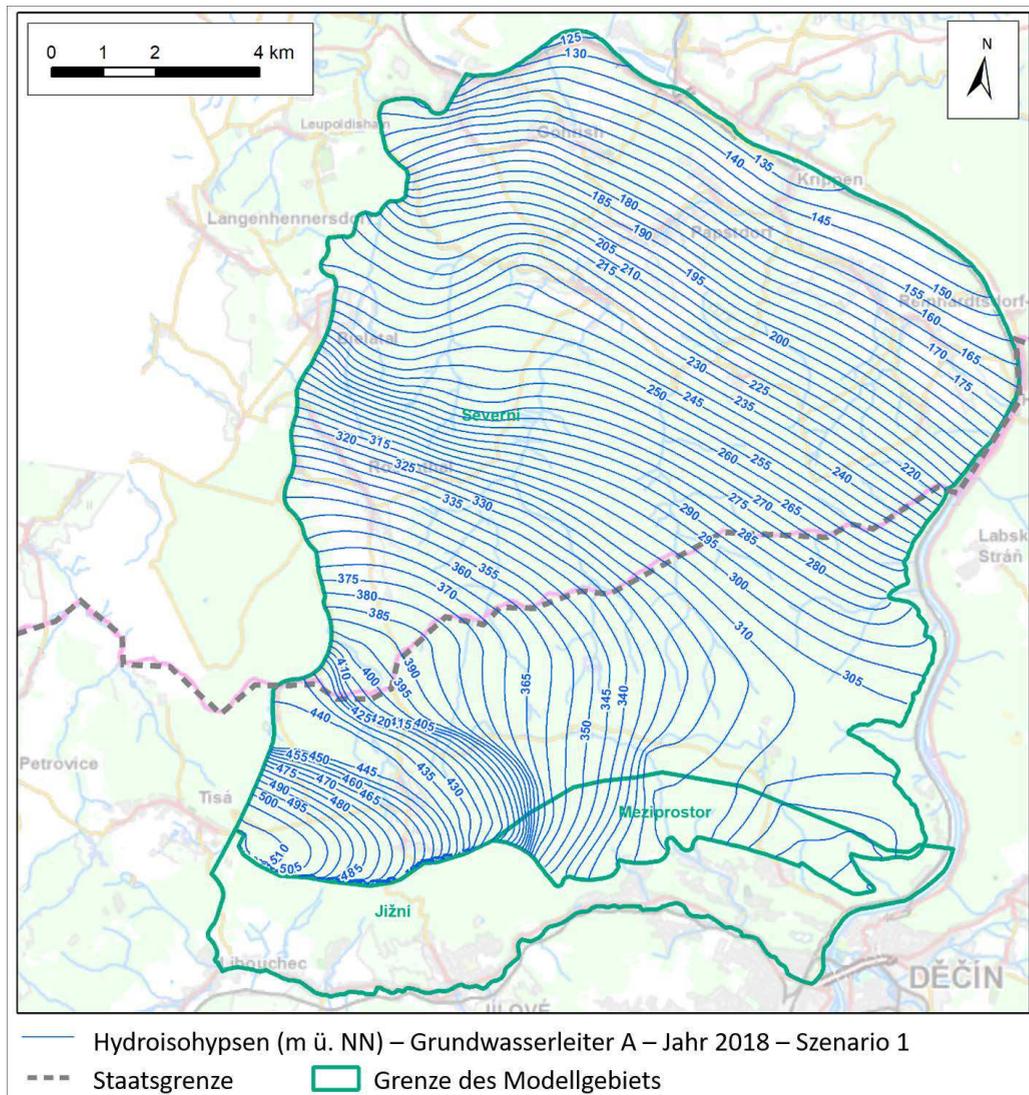
Das Strömungsmodell beschreibt die piezometrischen Verhältnisse im Fokusgebiet Děčínský Sněžník. Das Grundwasser beider Grundwasserleiter strömt im nördlichen Gebiet nach Norden. Im Grundwasserleiter BC fließt das Grundwasser im südlichen Bereich des Gebietes teilweise in den darunterliegenden Grundwasserleiter A und zum Bach Jílovský potok bzw. zur Elbe hin.

Im östlichen Gebiet strömt das Grundwasser im Grundwasserleiter A aus dem Versickerungsgebiet weiter Richtung Osten zur Elbe, wo es jedoch zu keiner Entwässerung kommt. Dort geht das Grundwasser in den Grundwasserleiters BC über (Abb. 4-13).

Berechnung der natürlichen Grundwasserressourcen und des nutzbaren Grundwasserdargebots

Die Berechnung des natürlichen Grundwasservorkommens im Gebiet Děčínský Sněžník erfolgte nach denselben Prinzipien wie für das Gebiet Kirnitzsch-Hřensko. Für die Modellierung und

Abb. 4-13: Darstellung der modellierten Hydroisohypsen des Grundwasserleiters A für das Jahr 2018.



anschließende Bewertung wurde erneut das sog. „Prinzip der minimalen Änderung des Grundwasserspiegels“ genutzt. Hierbei wird nach der maximal möglichen Entnahmemenge gesucht, bei der sich an den Beobachtungspunkten entweder ein stationärer Grundwasserspiegel (kein Absinken des Grundwasserstandes) einstellt oder aber der Wasserstand um einen bestimmten, vorgegebenen Wert sinkt und es zugleich zu einer Grundwasserströmung kommt. Auch hier gilt, dass die Wahl des Bewertungskriteriums sowie der Grenzwerte einen entscheidenden Einfluss auf die zu ermittelnden nutzbaren Grundwasserdarangebote haben können.

Die natürlichen Grundwasserressourcen wurden mit 130 mm pro Jahr modelliert, was 724 l/s entspricht. Das nutzbare Grundwasserdarangebot, das sicherstellt, dass die hydrogeologische Struktur nicht überlastet wird, beträgt 321 l/s. Bei den gegenwärtigen Wasserentnahmen in Höhe von 78 l/s verbleibt ein nutzbares Grundwasserdarangebot von 243 l/s.

4.3.3. Lückendorf

Konzeptionelles Modell

Das Modell für das Gebiet Lückendorf basiert auf folgenden Annahmen: Die Kreidesandsteine bedecken das gesamte Modellgebiet fast flächendeckend. Ausnahmen bilden die Bereiche im Osten des tschechischen Modellteils, wo die Kreidesedimente erodiert sind und das kristalline Grundgebirge an der Oberfläche ansteht. Die in etwa horizontal liegenden Sandsteinschichten des Cenomans, Turons und Coniacs lagern dabei dem kristallinen Grundgebirge als Grundwasserleiter A, Stauer A/BC, Grundwasserleiter BC, Stauer BC/D und Grundwasserleiter D auf. Im Norden des Modellgebietes hat das kristalline Grundgebirge, an der Lausitzer Überschiebung, einen Versatz von bis zu 1000 m (Krentz & Stanek 2015) und ist dabei teilweise auf die Sandsteine aufgeschoben. Am Nordostrand liegen die Ausläufer des Tertiärbeckens mit Wechsellagen von Braunkohle- und Sand-/Kiesschichten über dem kristallinen Grundgebirge. Die Überführung der geologischen Schichten des Sandsteins in die beschriebenen Grundwasserleiter und -stauer wird dabei anhand ihrer jeweiligen hydraulischen Eigenschaften vorgenommen. Der Grundwasserleiter A liegt direkt auf dem kristallinen Grundgebirge und wird an seiner oberen Schichtgrenze von den feinkörnigen Sedimenten des Grundwasserstauers A/BC überlagert. Der Grundwasserleiter BC bildet für 2/3 der Modellfläche die Geländeoberfläche. Die verbleibenden 1/3 werden von dem feinkörnigen Stauer BC/D bedeckt, welcher wiederum vom Grundwasserleiter D überlagert ist. Der Grundwasserleiter D besteht aus Wechsellagen von mittel- und feinkörnigen Schichten. Die Sandsteinschichten im Modellgebiet werden von einer Vielzahl von Störungen durchzogen, welche möglicherweise den horizontalen, hydraulischen Kontakt der Sandsteine beeinflussen.

Für die Modellierung mit FEFLOW wurden im ersten Schritt alle Geometrien der Schichtenverbreitung, Störungen, Flüsse, Teileinzugsgebiete der Grundwasserneubildung und Brunnen über georeferenzierte Karten in das Programm geladen und mit Hilfe eines programminternen Generators zu einem 2D-Netz aus Dreiecks-Elementen vermascht.

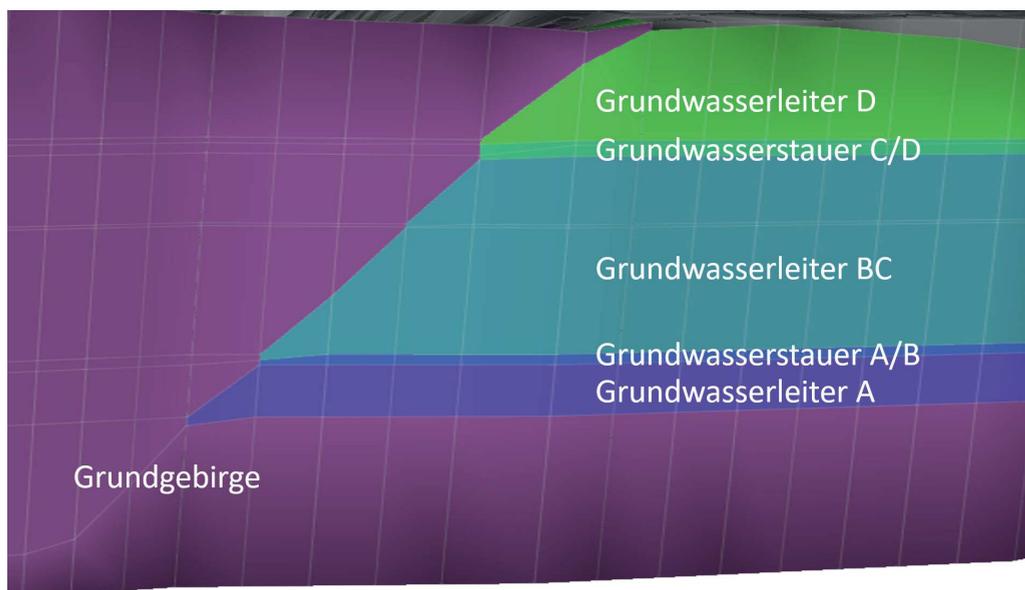


Abb. 4-14:
Modellebenen des
FEFLOW-Modells
Lückendorf.

Danach wurde das Modellgebiet den vertikalen Schichten der Leiter und Stauer folgend unterteilt. Somit konnte in der Software FEFLOW ein dreidimensionales Netz mit allen wichtigen Randbedingungen für das Gebiet erstellt werden. Ein besonderer Untersuchungsschwerpunkt wurde dabei auf die vertikalen Störungen im Modellgebiet gelegt. Vor allem die Störungen, welche die Lausitzer Überschiebung schneiden, können theoretisch hydraulisch aktiv sein und daher eine Verbindung zwischen den nördlichen Kristallingesteinen/Tertiärbecken und den südlich gelegenen kreidezeitlichen Sandsteinaquiferen herstellen.

Basierend auf den beschriebenen Annahmen wurde das Modell Lückendorf aus 10 Ebenen (Layern) aufgebaut. Fünf der Modellebenen werden in den oberen Bereichen inaktiv (graue Bereiche in Abb. 4-14), da die repräsentierten Sandstein- oder Grundgebirgsschichten nicht weiterverbreitet sind. Aufgrund der Überschiebung des Sandsteins durch das Grundgebirge (Kristallin) wird die erste Ebene an der Lausitzer Überschiebung in ihrem weiteren Verlauf nach Süden inaktiv. Gleiches gilt für die Ebenen, welche die Grundwasserleiter D, den Stauer BC/D und Teile des Grundwasserleiters BC abbilden.

Nach der Implementierung der Modellebenen wurde das stationäre Modell anhand langjähriger Mittelwerte der Grundwasserstände des tschechischen und deutschen Messnetzes kalibriert. Dabei wurden die hydraulischen Parameter so angepasst, dass eine gute Übereinstimmung zwischen den gemessenen und den simulierten Grundwasserständen erreicht wurde.

Geometrie und Typen der Schichten

Das hydraulische Modell wurde, wie beschrieben, mit zehn Modellebenen (Layern) entworfen. Alle Layer auf deutschem und tschechischem Gebiet neigen sich in Richtung Süden, mit Ausnahme im unmittelbaren Bereich der Lausitzer Überschiebung. In diesem Bereich fallen die Sandsteinschichten aufgrund der Überschiebung durch die kristallinen Gesteine Richtung Norden ein. Für alle Modellebenen wurde ein gespannter Grundwasserspiegel angenommen, da die Kalibrierung der Materialeigenschaften und Randbedingungen mit der Software FEPEST in diesem Fall geringere Unsicherheiten aufweist.

Eingangsparameter

Das Modell wurde durch den Programm-eigenen Netzgenerator in Dreieckselemente aufgeteilt. Es entstanden somit 482.594 aktive Elemente und 378.609 Knoten. Die aktive Fläche beträgt 135 km². Die Geometrien der generierten Elemente werden auf ihre Stabilitätskriterien (max. Dihedralwinkel, Kantenlängenverhältnis) untersucht, welche für geringere Unsicherheiten der numerischen Berechnung wichtig sind.

Die Grundwasserneubildung wurde über ein Bodenwasserhaushaltsmodell berechnet (Kap. 4.1). Die so für einzelne Teileinzugsgebiete erhaltenen Ergebnisse in mm/Jahr werden durch eine GIS-Karte der Grundwasserneubildung über die Teileinzugsgebietsflächen in das Modell integriert. Da nicht alle tschechischen Teileinzugsgebiete im Bodenwasserhaushaltsmodell berechnet wurden, sind die Grundwasserneubildungsraten dieser Gebiete mit einem Wichtungsfaktor so angepasst worden, dass die Wasserhaushaltsbilanz für das Modellgebiet korrekt aufgeht.

Für das numerische Modell wurden Materialeigenschaften der beschriebenen, hydrogeologischen Schichten recherchiert. Dafür wurden sowohl Literaturwerte, als auch die Daten der Aufschlussdatenbank von Sachsen verwendet. Als Anfangswerte wurden die von Vaněk (2014) kalibrierten Leitfähigkeiten und Speicherkoeffizienten verwendet, da diese gut mit denen der

Tab. 4-4: Hydraulische Parameter des kalibrierten Modells von Vaněk (2014).

Schicht	Hydrogeologische Einordnung	Horizontale hydraulische Leitfähigkeit k_h [m/s]		Vertikale hydraulische Leitfähigkeit k_z [m/s]		Porosität [%]	Storrativität [-]
		min.	max.	min.	max.		
1	GWL 1	$4,3 \cdot 10^{-6}$		$3,5 \cdot 10^{-8}$	$6,7 \cdot 10^{-7}$	8	8
2	GWL 2+3	$1,7 \cdot 10^{-9}$	$1,3 \cdot 10^{-4}$	$2,1 \cdot 10^{-7}$	$5,8 \cdot 10^{-5}$	10	10
3	GW-Hemmer 3/4	$3,5 \cdot 10^{-9}$		$3,5 \cdot 10^{-9}$		2	$1 \cdot 10^{-4}$
4	GWL 4	$1,6 \cdot 10^{-6}$	$8,1 \cdot 10^{-6}$	$1,2 \cdot 10^{-8}$	$1,7 \cdot 10^{-4}$	10	$1 \cdot 10^{-4}$

Aufschlussdatenbank von Sachsen und den anderen Literaturwerten (Mibus 1978; Herčík et al. 2003) übereinstimmen. Der Wert für die horizontale hydraulische Leitfähigkeit des Aquifers A wurde allerdings durch den Literaturwert $0,98 \times 10^{-5}$ von Mibus (1978) ersetzt (Tab. 4-4).

Während der Kalibrierung wurden diese Werte so angepasst, dass sich die simulierten Grundwasserstände den gemessenen möglichst annähern. Die dadurch entstandene Zonierung und die Ergebnisse für die kalibrierten Leitfähigkeiten werden im nachfolgenden Kapitel „Kalibrierung“ erläutert.

Die in Kap. 4.2. für das Fokusgebiet Lückendorf beschriebenen Randbedingungen der einzelnen Grundwasserleiter wurden entsprechend umgesetzt. Die Randbedingungen 1. Art des Aquifers A im Süden und Westen wurden aus dem Modell von Vaněk (2014) übernommen. Im Aquifer BC wurden die Randbedingungen entlang der Flüsse angesetzt. Aufgrund des stationären Modellaufbaus werden hier die Durchflüsse (m^3/d) als Randbedingung 2. Art für die Flüsse *Panenský potok*, *Hamerský potok* und *Heřmanický potok* implementiert. Die Werte wurden, wie in Kap. 3.4 beschrieben, durch saisonale Messkampagnen ermittelt.

Die Entnahmen der Trinkwasserbrunnen im Gebiet des Zittauer Gebirges wurden durch die regionalen Wasserversorger bereitgestellt und gingen als Randbedingung 3. Art in das Modell ein. Es wurden dabei die in der nachfolgenden Tab. 4-5 aufgeführten Brunnen berücksichtigt.

Kalibrierung

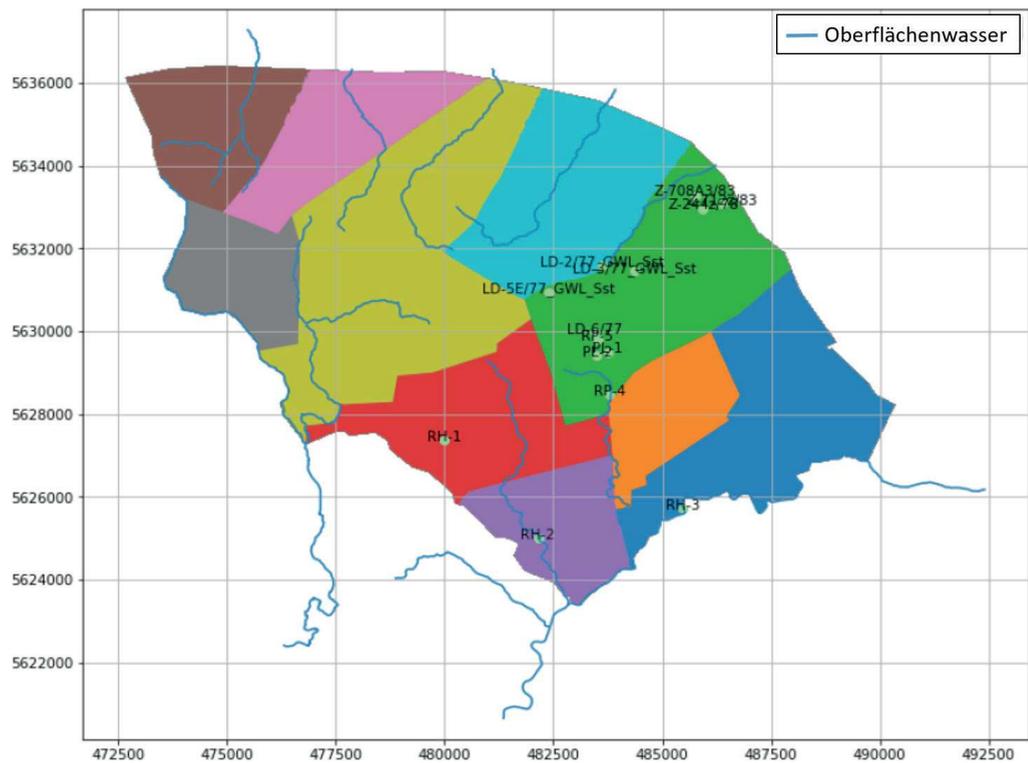
Die Kalibrierung der Leitfähigkeiten anhand von Grundwassermessstellen wurde für das beschriebene Modell mit der Software FEPEST von DHI WASY durchgeführt. Das Modellgebiet Zittauer Gebirge hat auf deutscher Seite insgesamt 430 Aufschlüsse (Aufschlussdatenbank Sachsen), von denen 8 als Messstellen ausgebaut sind. Im tschechischen Teil des Gebietes wurden 7 Messstellen für das Modell verwendet, welche nachfolgend zusammen mit den deutschen Grundwasserbeobachtungspunkten aufgeführt sind (Tab. 4-5).

Mit diesen kontinuierlich messenden Beobachtungsbrunnen können keine sicheren Aussagen über die Grundwassergleichen der einzelnen Grundwasserleiter für das gesamte Modellgebiet gemacht werden. Vor allem im Nordwesten des Modellgebietes sind keine Messstellen vorhanden, wie aus Abb. 4-15 ersichtlich wird. Weiterhin ist für den untersten Grundwasserleiter A nur eine Messstelle vorhanden. Dadurch sind die Simulationsergebnisse in diesem Teil des Gebietes sowie für den untersten Grundwasserleiter unsicher. Der östliche Teil des Gebietes, im Bereich der Ortschaft Lückendorf, verfügt im Gegensatz dazu über ausreichend Messstellen. Die Messstelle LD GWBr 1/63 wurde nur zum internen Vergleich berücksichtigt, da bei einer Kamerabefahrung vom Vorgängerprojekt GRACE eine Auflandung in der Messstelle festgestellt

Tab. 4-5: Messstellen im Modellgebiet Zittauer Gebirge.

Messstellenbezeichnung	Messzeitraum	Stratigraphie
PL-1	1977	Turon
PL-2	1977	Turon
RH-1	1974	Turon
RH-2	1974	Turon – Coniac
RH-3	1974	Turon
RP-4	1974	Turon
RP-5	1973	Turon
LD-1/63	1970 – 2020	Cenoman – Turon
LD-3/77	2003 – 2020	Turon
LD-5E/77	2003 – 2020	Turon
LD-6/77	1998 – 2020	Turon
LD-2/77	2003 – 2020	Turon
Z-244z/78	1985 – 2020	Tertiärbecken
Z-708A3/83	1985 – 2020	Tertiärbecken
Z-712z/83	1985 – 2020	Tertiärbecken

Abb. 4-15:
Kalibrierzonen und
Grundwassermess-
stellen des Grund-
wasserströmungs-
modells Zittauer
Gebirge (DHI WASY
2020).



wurde. Die Messstellen RH-2, RH-3 und Z-712z/83 wurden während der Kalibrierung mit einem geringeren Wichtungsfaktor in der Modellberechnung berücksichtigt. Ihre großen Abweichungen bei den Wasserspiegelresiduen im Vergleich zum Rest der Messstellen sind durch ihre Nähe zu den jeweiligen Fließgewässern erklärbar.

In der Abb. 4-15 sind weiterhin die Kalibrierzonen der lateralen Leitfähigkeit abgebildet. Sie orientieren sich an größeren, tektonischen Störungen der Sandsteine. Der Einfluss dieser Störungen auf die horizontale hydraulische Leitfähigkeit wurde während der Kalibrierung getestet und war somit ein Schwerpunkt der detaillierten Untersuchung (Pohle 2020).

Das Modell Zittauer Gebirge wurde stationär kalibriert, mangels kontinuierlicher Abflussmessungen der Fließgewässer im Gebiet konnte keine Wasserbilanz für ein instationäres Modell aufgestellt werden.

Simulierte Grundwasserströmung

Im Grundwasserströmungsmodell Zittauer Gebirge wurden die Grundwasserspiegellagen des Fokusgebietes Lückendorf für das Jahr 2019 berechnet. In den Grundwasserleitern A und BC strömt das Wasser im untersuchten Gebiet in Richtung Süden und Südwesten. Das Grundwasser im Aquifer D strömt dem Gefälle nach zu dessen Verbreitungsgrenzen und geht dort in den liegenden Aquifer BC, in Form von erneuter Versickerung oder Quellen, über.

Die Hydroisohypsen des Grundwasserleiter BC zeigen nur geringfügig die Drainagewirkung der kleinen Bäche und Flüsse auf sächsischer und tschechischer Seite. Die Grundwasserströmung wird vor allem von Phonolithschloten, einer tektonischen Zerblickung des Gebietes

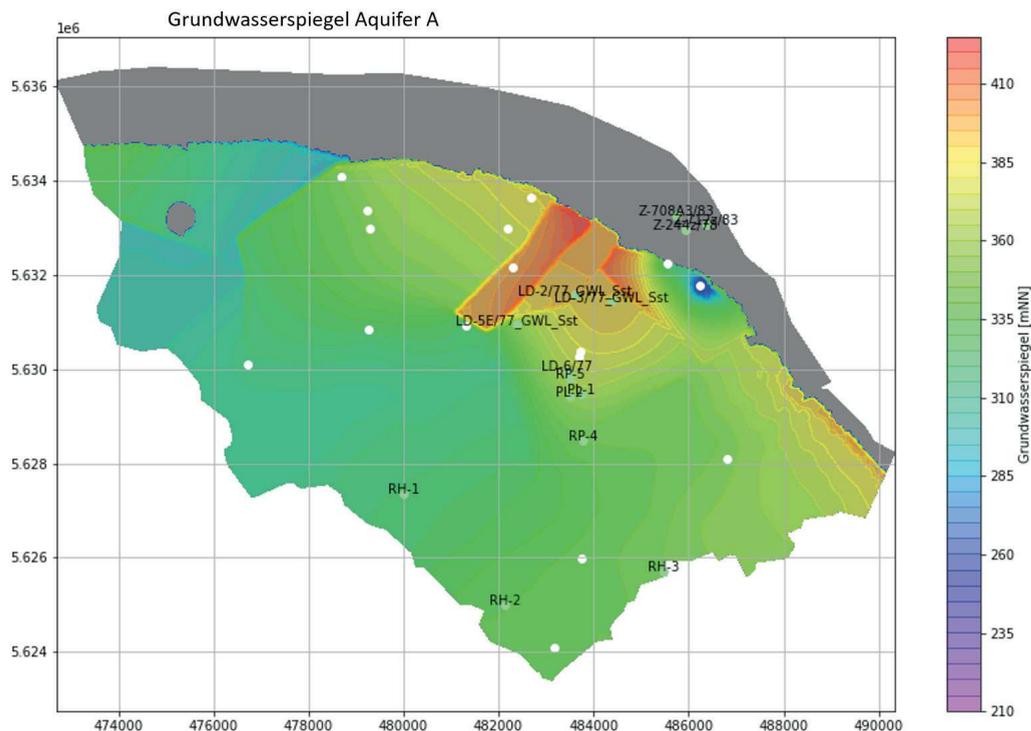


Abb. 4-16: Darstellung der modellierten Hydroisohypsen des Grundwasserleiters A für das Jahr 2019. Man erkennt deutlich den herausgehobenen Block im Bereich der Ortschaft Oybin.

und dazugehörigen Störungen beeinflusst, welche durch rasche Änderung der Hydroisohypsen (durch Störungen) und erhöhte Wasserspiegellagen (aufgrund der Zerböckung) erkennbar sind. Im östlichen Teil, im Bereich des Neubildungsgebietes des Grundwasserleiters A, sind auch im darüber liegenden Aquifer BC erhöhte Grundwasserstände zu verzeichnen. In diesem Teil der sächsisch-böhmischen Sandsteinvorkommens gibt es keinen Grundwasserstauer zwischen Aquifer B und C, weshalb dieser im Zittauer Gebirge als Grundwasserleiter BC zusammengefasst wird.

Im südöstlichen Teil des tschechischen Gebietes wird der Aquifer A durch Grundwasserneubildung über die Geländeoberfläche gespeist, welches in Richtung Süden und Südwesten strömt. Im östlichen Gebiet strömt das Grundwasser im Grundwasserleiter A aus dem Versickerungsgebiet in Richtung Süden zur Elbe, wo es jedoch zu keiner Entwässerung kommt. Dort wird das Grundwasser des Grundwasserleiters BC dem Oberflächenwasser zugeleitet. Der Hydroisohypsenplan (Abb. 4-16) zeigt die beschriebenen Neubildungsgebiete im Osten und die Horst- und Verwerfungszonen zwischen Oybin und Lückendorf sowie im Norden von Lückendorf. Die Grundwasserabsenkung im nordöstlich gelegenen Weißbachtal hat einen ersichtlichen Einfluss auf den Aquifer A, hier kann eine Drainage durch eine mögliche, weitere Störung vermutet werden (Krentz & Rommel 2020). Im Westen werden die Grundwassergleichen erheblich von den Störungen beeinflusst, was aufgrund der geringen Anzahl von Beobachtungsbrunnen aber nicht sicher belegbar ist.

Berechnung der natürlichen Grundwasserressourcen und des nutzbaren Grundwasserdargebots

Für die Abschätzung des nutzbaren Grundwasserdargebotes im Zittauer Gebirge, speziell für das Fokusgebiet Lückendorf, wurde das natürliche Grundwasservorkommen im Modellgebiet berechnet. Hierbei wurde die Grundwasserneubildung, wie in Kap. 4.1.2 beschrieben, aus dem Projekt KliWES übernommen, wo diese mit Hilfe des Bodenwasserhaushaltsmodells ArcEGMO berechnet wurde. Das verfügbare Grundwasserdargebot ergibt sich somit aus dem Produkt der Grundwasserneubildung und der unterirdischen Einzugsgebietsfläche. Das Ergebnis für das natürliche Grundwasservorkommen wurde mit 263 mm (858 l/s) für das Jahr 2019 berechnet.

Da für das Modellgebiet nur ein stationäres Grundwassermodell erstellt werden konnte, sind nur die Ergebnisse des kalibrierten Lastfalls (Entnahmen 2019 – 91 l/s) belastbar. Die Ergebnisse der nicht kalibrierten Lastfälle können für qualitative Aussagen verwendet werden, sind jedoch für quantitative Aussagen nicht aussagefähig (DHI WASY 2020). Die Auswertung der simulierten Grundwasserspiegel zeigen für die Entnahmen von 2019 im Bereich der Ortschaft Lückendorf, dass die Fördermenge kaum Einfluss auf den Grundwassermessstand der Messstellen 6/77 und 1/63 haben. Der nicht kalibrierte Lastfall wasserrechtlich genehmigter Entnahmen vor 2018 im Gesamtgebiet (230 l/s) zeigt, dass eine deutliche Absenkung der Hydroisohypsen in Richtung Petrovice im Süden und der Weißbachtalquellen im Norden stattfindet. Das nutzbare Grundwasserdargebot liegt somit zwischen beiden Lastfällen, welches durch eine transiente Kalibrierung des Modells quantitativ ermittelt werden kann. Für eine allgemeinere Abschätzung wurde die nutzbare Grundwasserneubildung nach Hölting & Coldewey (2009) über den mittleren Niedrigwasserabfluss des Gebietes abgeschätzt und beträgt 350 l/s. Die derzeitigen Wasserentnahmen in Höhe von 91 l/s, lassen ein verfügbares Grundwasserdargebot von 259 l/s zur Bewirtschaftung im Fokusgebiet übrig.

4.4. Ergebnisse der Modellsimulationen

4.4.1. Modellszenarien für die Modellgebiete Děčínský Sněžník und Kirnitzsch-Hřensko

Die letzte Etappe der Bearbeitung war die Verwendung der mathematisch-hydraulischen Modelle für die Simulation der weiteren Entwicklung aller drei Modellgebiete. Es standen Klimaszenarien auf Grundlage der IPCC-Berichte (Berichte des Zwischenstaatlichen Ausschusses für Klimaänderung) zur Verfügung, die von der Annahme einer dauerhaften Erwärmung der Lufttemperatur bis in das Jahr 2100 ausgehen. Nach Implementierung dieser Klimateingangsgrößen in die Niederschlags-Abfluss-Modelle ergeben sich Modellvorhersagen, die eine Abnahme der Grundwasserneubildung prognostizieren. Bedingt wird dies teils auch durch die temperaturbedingte Steigerung der (Evapo-)Transpiration. Für den Fall, dass die Verdunstungswerte abnehmen, wäre die Eingabe einer kontinuierlichen und linearen Abnahme des effektiven Niederschlags notwendig. Eine solche Situation ist jedoch unwahrscheinlich, da in der Natur solch lineare Entwicklungen nicht existieren. Aus diesem Grund wurden für die, vom tschechischen Partner VÚV bearbeiteten, Modellgebiete Děčínský Sněžník und Kirnitzsch-Hřensko Modellsimulationen bis zum Jahr 2048 vorgenommen. Das Ende der Modellsimulation entspricht dabei einem Jahreswert, bei dem noch eine realitätsnahe Kalkulation berechnet werden kann. Als Input für die Modellierung wurden die folgenden Szenarien vorbereitet, die in den Tabellen 4-6 und 4-7 zusammengefasst sind.

- **Szenario 01** beschreibt als Referenzszenario den aktuellen Zustand der derzeitigen Grundwasserentnahmen, gekoppelt mit der langjährigen, mittleren monatlichen Grundwasserneubildung (Niederschlag, der zur Grundwasserneubildung beiträgt).
- Die **Szenarien 02 bis 04** simulieren die Entwicklungen für eine Annahme der konstanten (derzeitigen) Grundwasserentnahmen mit variierenden Intensitäten der Grundwasserneubildung.
- Die **Szenarien 05 und 06** gehen von den wasserrechtlich genehmigten Grundwasserentnahmen aus.
- **Szenario 07** entspricht dem Referenzszenario 01 und dient als Ausgangszustand für die **Szenarien 08, 09 und 10**. Sie stellen Belastungstests der Modellstrukturen dar und beschreiben die jeweiligen Entwicklungen für den Fall, dass die Grundwasserneubildung in Zukunft dem heutigen langjährigen Mittel entspricht, die Grundwassernutzung jedoch variiert. Die Ergebnisse aller Szenarien quantifizieren die simulierten Folgen des Grundwasserspiegels und die möglichen Veränderungen zum Ausgangszustand.

Für jedes Szenario wurde eine Grundwasserstandskarte für jeden einzelnen Grundwasserleiter mit den Grundwassermessstellen erstellt. Die Karten sind Bestandteil der Modellierberichte für die einzelnen Modelle (Navrátilová & Nol 2019a, b).

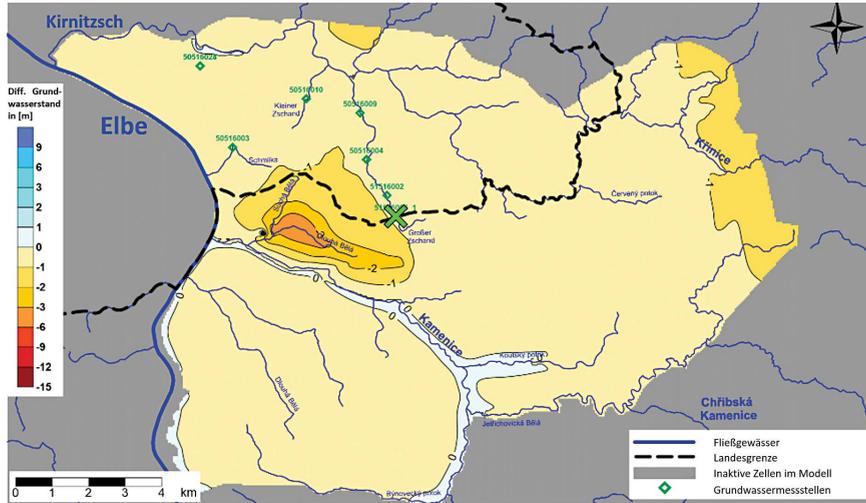
In dieser Publikation wird eine repräsentative Auswahl dargestellt, um beispielhaft die charakteristischen Entwicklungstrends aufzuzeigen. Abb. 4-17 und Abb. 4-18 zeigen die Absenkung des Grundwasserstandes für das Jahr 2048 für die Szenarien 3 und 6 im Vergleich zum Szenario 1 (aktueller Zustand der derzeitigen Entnahmen), jeweils für die beiden westlich liegenden Gebiete.

Tab. 4-6: Übersicht der im Modellgebiet Kírnitzsch-Hřensko verwendeten Modellszenarien. Messstelle 51516006_1 = Grundwasserneubildungsgebiet, Wasserscheide zwischen den Wasserläufen Kamenice und Kírnitzsch. Messstelle V-7 = Fassungsgebiet Hřensko.

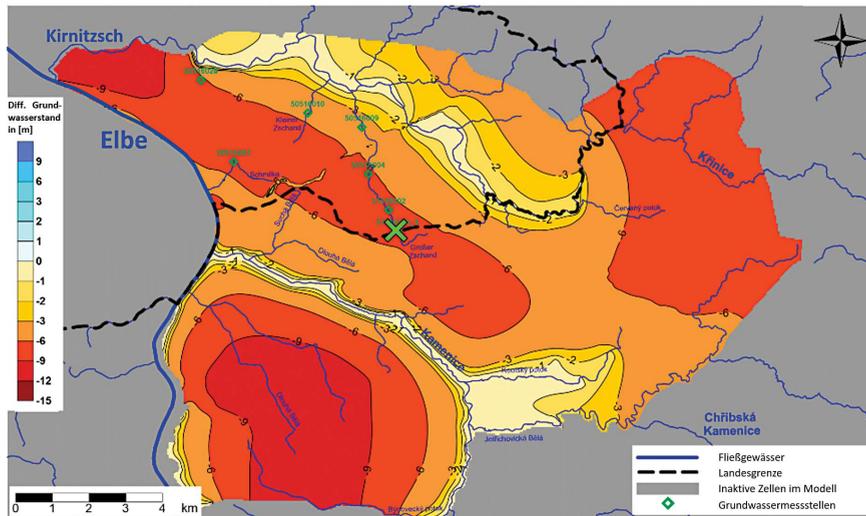
Szenario	Grundwasserentnahmeraten [l/s]			Grundwasserneubildung [mm/Jahr]	Ergebnisse und Veränderungen gegenüber dem Ausgangszustand
	Charakteristik	Tsch. Rep.	SN		
01	Konstante Entnahmerate für Zeitraum 2018–2048 (Rate von 2017)	63,4	41,1	Modell-Grundwasserneubildung entsprechend den Ergebnissen des BILAN-Modells mit einer mittleren monatlichen Grundwasserneubildung für jeden Kalendermonat des Zeitraumes 1967–2017 (Jahresmittelwert 246,79 mm/Jahr)	Ausgangszustand für den Vergleich mit den Szenarien 02 bis 06
02	Analog Szenario 01	63,4	41,1	Grundwasserneubildung analog Szenario 01; Verringerung der Grundwasserneubildung linear um 2 mm pro Jahr (entspricht 2048 dem Wert 186,79 mm)	Aufgrund der verminderten Grundwasserneubildung sinkt der Grundwasserspiegel an der Messstelle 51516006_1 um 4,5 m und an der Messstelle V-7 um 2,3 m
03	Analog Szenario 01	63,4	41,1	analog Szenario 01, Verringerung um jährlich 3 mm (2048: 156,79 mm/Jahr)	analog Szenario 2; Grundwasserspiegel an Messstelle 51516006_1 sinkt um 6,2 m, an Messstelle V-7 um 2,3 m
04	Analog Szenario 01	63,4	41,1	Die Grundwasserneubildungswerte der Jahre 2013–2017 wurden auf die darauffolgenden Fünfjahreszeiträume bis 2048 übernommen. Für jeden weiteren Fünfjahreszeitraum wurde die Grundwasserneubildung um weitere 5 mm gemindert, d. h. 30 mm in 30 Jahren	Aufgrund der verminderten Grundwasserneubildung sinkt der Grundwasserspiegel an der Messstelle 51516006_1 um 4,4 m und an der Messstelle V-7 um 2,3
05	Für die Modellierung der Jahre 2018–2048 wurden die maximal genehmigten Entnahmeraten herangezogen	109,5	70,0	Modell-Grundwasserneubildung entsprechend den Ergebnissen des BILAN-Modells mit einer mittleren monatlichen Grundwasserneubildung der entsprechenden Kalendermonate im Zeitraum 1967–2017 (Jahresmittelwert 246,79 mm/Jahr)	Aufgrund der höheren Entnahmen sinkt der Grundwasserspiegel an der Messstelle 51516006_1 um 2,5 m und an der Messstelle V-7 um 7,3 m

Szenario	Grundwasserentnahmeraten [l/s]			Grundwasserneubildung [mm/Jahr]	Ergebnisse und Veränderungen gegenüber dem Ausgangszustand
	Charakteristik	Tsch. Rep.	SN		
06	analog Szenario 05	109,5	70,0	Analog Szenario 04	Aufgrund der höheren Entnahmen sinkt der Grundwasserspiegel an der Messstelle 51516006_1 um 6,2 m und an der Messstelle V-7 um 9,0 m
07	Analog Szenario 01	63,4	41,1	analog Szenario 05	Ausgangszustand für den Vergleich mit den Szenarien 08 bis 10
08	Analog Szenario 05	109,5	70,0	analog Szenario 05	Aufgrund der höheren Entnahmen sinkt der Grundwasserspiegel an der Messstelle 51516006_1 um 1,4 m und an der Messstelle V-7 um 5,9 m
09	Für die Modellierung der Jahre 2018–2048 wurden 85 % der maximal genehmigten Entnahmeraten herangezogen	93,1	59,5	analog Szenario 05	Aufgrund der höheren Entnahmen sinkt der Grundwasserspiegel an der Messstelle 51516006_1 um 0,75 m und an der Messstelle V-7 um 3,5 m
10	Für die Modellierung der Jahre 2018–2048 wurden 115 % der genehmigten Entnahmeraten herangezogen	125,9	80,5	analog Szenario 05	Aufgrund der höheren Entnahmen sinkt der Grundwasserspiegel an der Messstelle 51516006_1 um 2,0 m und an der Messstelle V-7 um 8,5 m

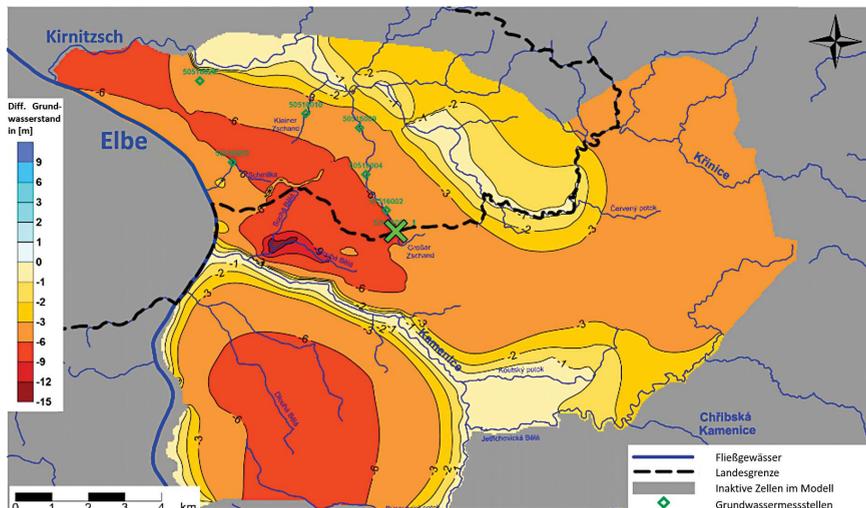
Abb. 4-17: Simulierte Entwicklung der Grundwasserstände ausgewählter Szenarien im Modellgebiet Kirnitzsch-Hřensko für das Jahr 2048. Grünes Kreuz: Lage der Messstellen 51516006_1 und 51516006_2.



Szenario 01



Szenario 03



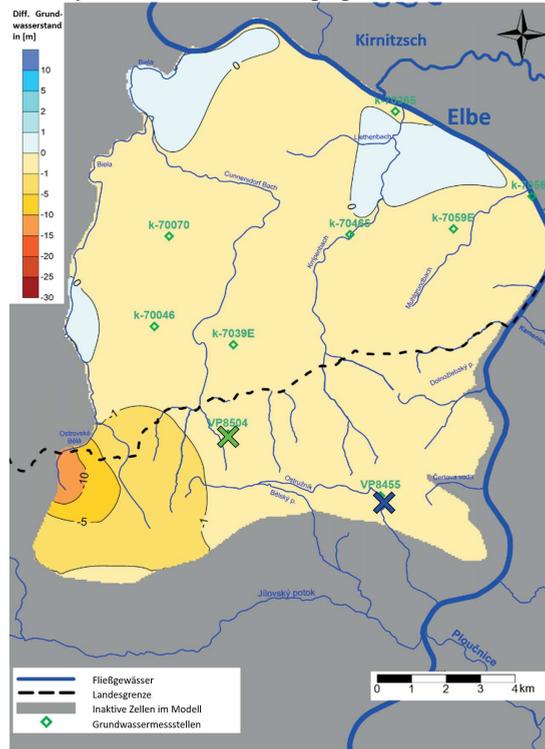
Szenario 06

Tab. 4-7: Übersicht über die im Modellgebiet Děčinský Sněžník verwendeten Modellszenarien.

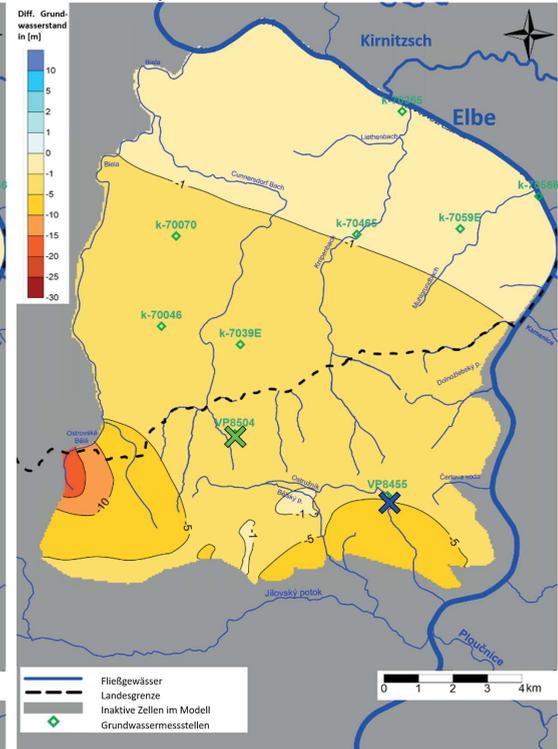
Szenario	Grundwasserentnahmeraten [l/s]			Grundwasserneubildung [mm/Jahr]	Beschreibung der Ergebnisse, wichtigste Veränderungen gegenüber dem Ausgangszustand
	Charakteristik	Tsch. Rep.	SN		
01	Konstante Entnahmerate für Zeitraum 2018 – 2048 (Rate von 2017)	59,0	5,6	Modell-Grundwasserneubildung entsprechend den Ergebnissen des BILAN-Modells mit einer mittleren monatlichen Grundwasserneubildung für jeden Kalendermonat im Zeitraum 1967–2017 (Jahresmittelwert 130,53 mm/Jahr).	Ausgangszustand für den Vergleich mit den Szenarien 02 bis 06.
02	analog Szenario 01	59,0	5,6	Grundwasserneubildung analog Szenario 01; Verringerung der Grundwasserneubildung um 1 mm (Jahresmittelwert für das Jahr 2048: 100,53 mm/Jahr)	Aufgrund der verminderten Grundwasserneubildung sinkt der Grundwasserspiegel an der Messstelle VP8505 (Turon) um 3,5 m und an der Messstelle VP8504 (Cenoman) um 1,9 m
03	analog Szenario 01	59,0	5,6	Grundwasserneubildung analog Szenario 01; Verringerung der Grundwasserneubildung um 3 mm (Jahresmittelwert für das Jahr 2048: 70,53 mm/Jahr)	Aufgrund der verminderten Grundwasserneubildung sinkt der Grundwasserspiegel an der Messstelle VP8505 (Turon) um 6,5 m und an der Messstelle VP8504 (Cenoman) um 3,8 m
04	analog Szenario 01	59,0	5,6	Für die Jahre 2019–2023 wurde die mittlere monatliche Grundwasserneubildung im Zeitraum 2013–2017 verwendet (Jahresmittelwert 130,53 mm/Jahr), die für diesen Zeitraum um 5 mm verringert wurde. Für jeden weiteren Fünfjahreszeitraum wurde die Grundwasserneubildung um weitere 5 mm gemindert, d. h. 30 mm in 30 Jahren	Aufgrund der verminderten Grundwasserneubildung sinkt der Grundwasserspiegel an der Messstelle VP8505 (Turon) um 3,5 m und an der Messstelle VP8504 (Cenoman) um 1,2 m
05	Für die Modellierung der Jahre 2018–2048 wurden die genehmigten (maximalen) Entnahmeraten verwendet	92,9	12,0	Modell-Grundwasserneubildung entsprechend den Ergebnissen des BILAN-Modells mit einer mittleren monatlichen Grundwasserneubildung für jeden Kalendermonat im Zeitraum 1967–2017 (Jahresmittelwert 130,53 mm/Jahr)	Aufgrund der höheren Entnahmen sinkt der Grundwasserspiegel an der Messstelle VP8505 (Turon) um 0,2 m und an der Messstelle VP8504 (Cenoman) um 0,4 m

Szenario	Grundwasserentnahmeraten [l/s]			Grundwasserneubildung [mm/Jahr]	Beschreibung der Ergebnisse, wichtigste Veränderungen gegenüber dem Ausgangszustand
	Charakteristik	Tsch. Rep.	SN		
06	analog Szenario 05	92,9	12,0	Analog Szenario 04	Aufgrund der höheren Entnahmen sinkt der Grundwasserspiegel an der Messstelle VP8505 (Turon) um 6,6 m und an der Messstelle VP8504 (Cenoman) um 4,1 m
07	analog Szenario 05	59,0	5,6	Analog Szenario 05	Ausgangszustand für den Vergleich mit den Szenarien 08 bis 10
08	analog Szenario 05	92,9	12,0	Analog Szenario 05	Aufgrund der höheren Entnahmen sinkt der Grundwasserspiegel an der Messstelle VP8456 (Turon) um 1,3 m und an der Messstelle VP8455 (Cenoman) um 5,2 m. Die VP8505 (Turon) und VP8504 (Cenoman) erreichen den niedrigsten zu messenden Grundwasserstand und fallen damit nahezu trocken
09	Für die Modellierung der Jahre 2018–2048 wurden 85 % der genehmigten Entnahmeraten herangezogen.	80,0	10,2	Analog Szenario 05	Aufgrund der höheren Entnahmen sinkt der Grundwasserspiegel an der Messstelle VP8456 (Turon) um 1,1 m und an der Messstelle VP8455 (Cenoman) um 3,3 m. Die Messstelle VP8505 (Turon) und VP8504 (Cenoman) erreichen den niedrigsten zu messenden Grundwasserstand und fallen damit nahezu trocken
10	Für die Modellierung der Jahre 2018–2048 wurden 115 % der genehmigten Entnahmeraten herangezogen.	106,8	13,8	Analog Szenario 05	Aufgrund der höheren Entnahmen sinkt der Grundwasserspiegel an der Messstelle VP8504 (Cenoman) um 1,5 m, an der Messstelle VP8456 (Turon) um 1,5 m und an der Messstelle VP8455 (Cenoman) um 7,6 m. Die Messstelle VP8505 (Turon) und VP8504 (Cenoman) erreichen den niedrigsten zu messenden Grundwasserstand und fallen damit nahezu trocken

Děčínský Sněžník Szenario 01 – Ausgangszustand



Děčínský Sněžník Szenario 03



Děčínský Sněžník Szenario 06

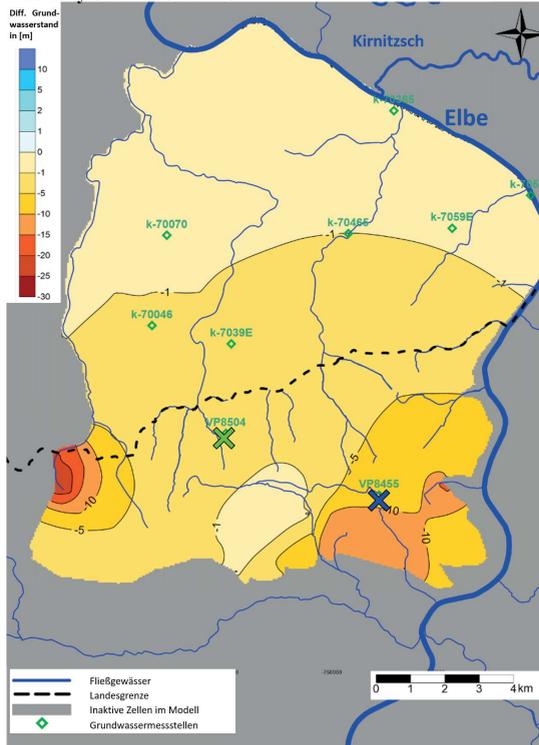


Abb. 4-18: Simulierte Entwicklung der Grundwasserstände ausgewählter Szenarien im Modellgebiet Děčínský Sněžník für das Jahr 2048. Grünes Kreuz: Messstelle VP8504. Blaues Kreuz: Messstelle VP8455.

4.4.2. Modellszenarien für das Modellgebiet Lückendorf

Für das stationäre Grundwasserströmungsmodell des Gebietes Lückendorf wurden 10 Szenarien für unterschiedliche Entnahmen und Grundwasserneubildung simuliert. Die dafür verwendete Grundwasserneubildung wurde dem Sächsischen Wasserhaushaltsportal (KliWES) entnommen (vgl. Kap. 4.2.2.). Über das Portal können die für Sachsen angepassten Klimaprojektionen des WEREX V Datensatzes nutzerspezifisch selektiert und skalenvariabel als Datensatz heruntergeladen werden. Die für das Fokusgebiet Lückendorf verwendeten Klimaszenarien (WEREX 11, WEREX 77 und WEREX Median) bilden eine mögliche Bandbreite der zu erwartenden klimatischen Entwicklungen ab, wobei WEREX 11 eine schwächere Änderung und WEREX 77 eine stärkere Änderung des Temperatursignals darstellt. WEREX Median bildet den Mittelwert der im Wasserhaushaltsportal Sachsen verfügbaren WEREX-Projektionen ab und ist somit als mittlere Änderung des Temperatursignals zu verstehen. Die aus den beschriebenen Klimaszenarien ableitbaren Temperaturanstiege gehen in das verwendete, numerische Bodenwasserhaushaltsmodell des Wasserhaushaltsportals Sachsen ein, wobei unter Berücksichtigung der Niederschlags-Abfluss-Modellierung, der Bewirtschaftung und des Pflanzenwachstums die Wasserhaushaltskomponenten des Modellgebietes bestimmt wurden. Die daraus resultierenden, verschiedenen Grundwasserneubildungen wurden als obere Randbedingung für die beschriebenen Klimaszenarien der Jahre 2038 und 2047 in das Modell eingegeben. Ausgehend von der projizierten Temperatur- und Niederschlagsentwicklung wurde das Jahr 2038 als „trockenes Jahr“ ausgewählt. Das Jahr 2047 wurde demgegenüber als „feuchteres Jahr“ selektiert, da die Projektionen hier von einer geringeren Zunahme der Temperatur und einer geringeren Abnahme der Niederschlagssumme ausgehen. Weiterhin werden verschiedene Entnahmeszenarien betrachtet, welche sich an der genehmigten, durchschnittlichen Entnahme und der genehmigten, maximalen Entnahme sowie der 2019 entnommenen Menge an Grundwasser, also dem aktuellen Entnahmewert, orientieren. Aus den nachfolgend zusammengefassten Input-Szenarien ergaben sich für das Jahr 2038 die in Tab. 4-8 zusammengefassten Simulationsszenarien.

- **Szenario 01** beschreibt als Referenzszenario den aktuellen Zustand der Grundwasserentnahmen im Jahr 2019, gekoppelt mit der langjährigen, mittleren monatlichen Grundwasserneubildung.
- Die **Szenarien 02 bis 04** simulieren die Entwicklungen für die Annahme der konstanten (derzeitigen) Grundwasserentnahmen mit variierenden Intensitäten der Grundwasserneubildung (WEREX 11, 77, Median).
- Die **Szenarien 05 bis 07** gehen von den wasserrechtlich genehmigten, durchschnittlichen Grundwasserentnahmen mit variierenden Intensitäten der Grundwasserneubildung (WEREX 11, 77, Median) aus.
- **Szenarien 08 bis 10** stellen Belastungstests der Modellstruktur dar und beschreiben die jeweiligen Entwicklungen für den Fall, dass die Grundwasserneubildung den Klimaszenarien (WEREX 11, 77, Median) und die Grundwassernutzung 110% der genehmigten Entnahme entspricht.

Die Ergebnisse der Szenarien sollen die simulierten Folgen des Grundwasserspiegels und die möglichen Veränderungen im Vergleich zum Ausgangszustand quantifizieren. Da für das Modellgebiet nur eine stationäre Kalibrierung für die Entnahmen 2019 erfolgt ist, sind alle Szenarien welche sich von dem beschriebenen Ausgangszustand unterscheiden qualitativ aber nicht quantitativ aussagefähig.

Tab. 4-8: Übersicht über die im Modellgebiet Lückendorf verwendeten Modellszenarien.

Szenario	Grundwasserentnahmeraten [l/s]			Grundwasserneubildung [mm/Jahr]	Ergebnisse und Veränderungen gegenüber dem Ausgangszustand
	Charakteristik	Tsch. Rep.	SN		
01	Entnahmeraten des Jahres 2019	9,79	81,99	Modell-Grundwasserneubildung entsprechend den IST-Ergebnissen des KliWES-Modells mit einer mittleren jährlichen Grundwasserneubildung für das Jahr 2019 (Jahresmittelwert 263 mm/Jahr)	Ausgangszustand für den Vergleich mit den Szenarien
02	Analog Szenario 01	9,79	81,99	Modell-Grundwasserneubildung entsprechend den WEREX11-Ergebnissen des KliWES-Modells mit einer mittleren jährlichen Grundwasserneubildung für das Jahr 2038 (Jahresmittelwert 120,59 mm/Jahr)	Aufgrund geringerer Neubildungsraten sinken der Grundwasserspiegel an der Grundwassermessstelle LD – 6/77 um 7,51 m und an der Grundwassermessstelle LD – 2/77 um 28,28 m im Vergleich zur Referenz. Die Grundwassermessstelle LD – 2/77 fällt unter den niedrigsten zu messenden Stand
03	Analog Szenario 01	9,79	81,99	Modell-Grundwasserneubildung entsprechend den WEREX77-Ergebnissen des KliWES-Modells mit einer mittleren jährlichen Grundwasserneubildung für das Jahr 2038 (Jahresmittelwert 53,61 mm/Jahr)	Die Absenkung an der Grundwassermessstelle LD – 6/77 beträgt 56 m, an der Grundwassermessstelle LD – 2/77 57 m im Vergleich zur Referenz, aufgrund von geringen Grundwasserneubildungsraten. Beide Messstellen fallen unter den niedrigsten zu messenden Grundwasserstand
04	Analog Szenario 01	9,79	81,99	Modell-Grundwasserneubildung entsprechend den WEREX MEDIAN-Ergebnissen des KliWES-Modells mit einer mittleren jährlichen Grundwasserneubildung für das Jahr 2038 (Jahresmittelwert 72,24 mm/Jahr)	Die Absenkung an der Grundwassermessstelle LD – 6/77 beträgt 45 m, an der Grundwassermessstelle LD – 2/77 46 m im Vergleich zur Referenz, aufgrund von geringen Grundwasserneubildungsraten. Beide Messstellen fallen unter den niedrigsten zu messenden Grundwasserstand
05	wasserrechtlich genehmigte, durchschnittliche Grundwasserentnahmen	10,53	221,53	Analog Szenario 02	Die Absenkung an der Grundwassermessstelle LD – 6/77 beträgt 44 m, an der Grundwassermessstelle LD – 2/77 47 m im Vergleich zur Referenz, aufgrund von hoher Entnahmen und geringen Neubildungsraten. Beide Messstellen fallen unter den niedrigsten zu messenden Grundwasserstand

Szenario	Grundwasserentnahmeraten [l/s]			Grundwasserneubildung [mm/Jahr]	Ergebnisse und Veränderungen gegenüber dem Ausgangszustand
	Charakteristik	Tsch. Rep.	SN		
06	Analog Szenario 05	10,53	221,53	Analog Szenario 03	Die Absenkung an der Grundwassermessstelle LD – 6/77 beträgt 74 m, an der Grundwassermessstelle LD – 2/77 77 m im Vergleich zur Referenz, aufgrund zu hoher Entnahmen und geringen Neubildungsraten. Der Grundwasserstand fällt somit unter die Ausbautiefe, wodurch beide Messstellen trockenfallen.
07	Analog Szenario 05	10,53	221,53	Analog Szenario 04	Die Absenkung an der Grundwassermessstelle LD – 6/77 beträgt 63 m, an der Grundwassermessstelle LD – 2/77 66 m im Vergleich zur Referenz, aufgrund zu hoher Entnahmen und geringen Neubildungsraten. Der Grundwasserstand fällt somit unter die Ausbautiefe, wodurch beide Messstellen trockenfallen.
08	maximale, genehmigte Entnahme	16,20	244,68	Analog Szenario 02	Die Absenkung an der Grundwassermessstelle LD – 6/77 beträgt 48 m, an der Grundwassermessstelle LD – 2/77 51 m im Vergleich zur Referenz, aufgrund zu hoher Entnahmen und geringen Neubildungsraten. Der Grundwasserstand fällt somit unter die Ausbautiefe, wodurch beide Messstellen trockenfallen.
09	Analog Szenario 08	16,20	244,68	Analog Szenario 03	Die Absenkung an der Grundwassermessstelle LD – 6/77 beträgt 77 m, an der Grundwassermessstelle LD – 2/77 81 m im Vergleich zur Referenz, aufgrund zu hoher Entnahmen und geringen Neubildungsraten. Der Grundwasserstand fällt somit unter die Ausbautiefe, wodurch beide Messstellen trockenfallen.
10	Analog Szenario 08	16,20	244,68	Analog Szenario 04	Die Absenkung an der Grundwassermessstelle LD – 6/77 beträgt 66 m, an der Grundwassermessstelle LD – 2/77 70 m im Vergleich zur Referenz, aufgrund zu hoher Entnahmen und geringen Neubildungsraten. Der Grundwasserstand fällt somit unter die Ausbautiefe, wodurch beide Messstellen trockenfallen.

Grundwasserabsenkung Aquifer BC (Szenario 01)

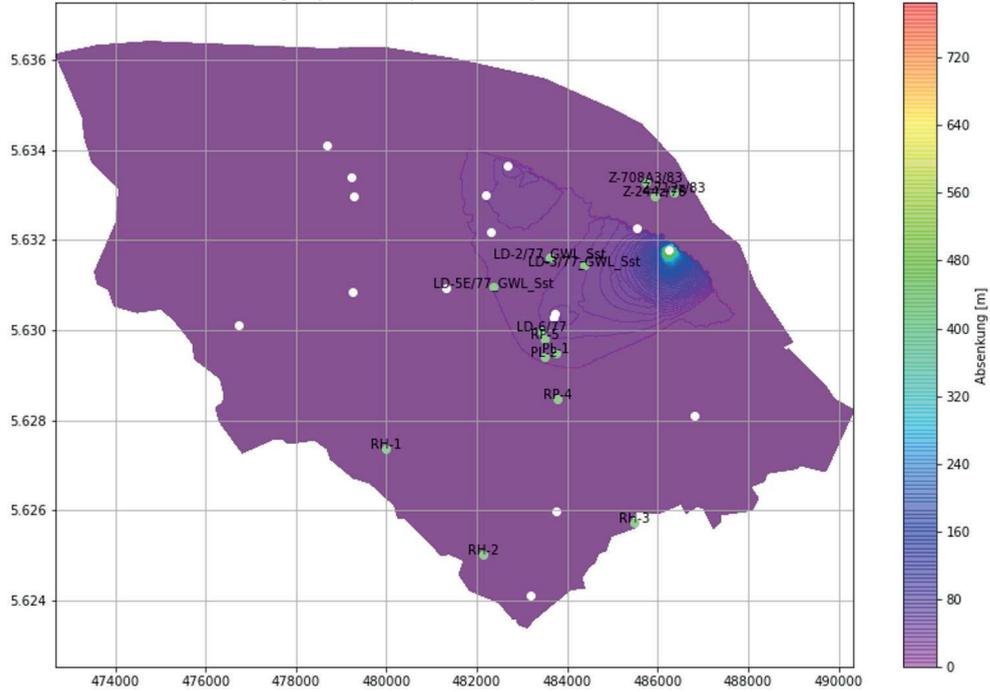


Abb. 4-19:
Grundwasser-
absenkung im
Gebiet Lückendorf
für das Jahr 2038 –
Szenario 01.

Grundwasserabsenkung Aquifer BC (Szenario 02)

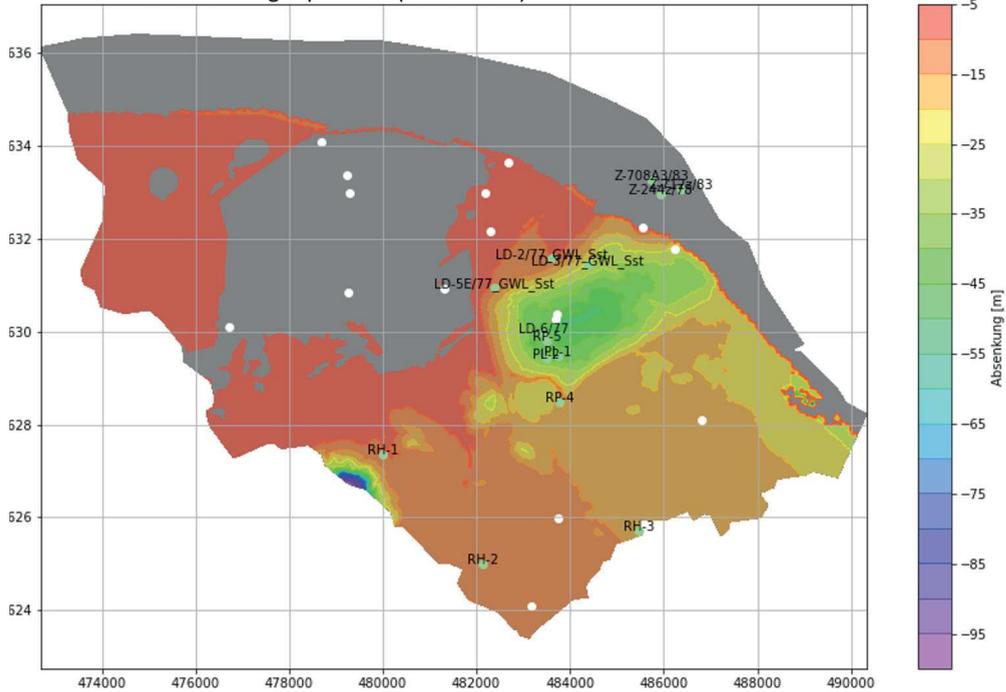
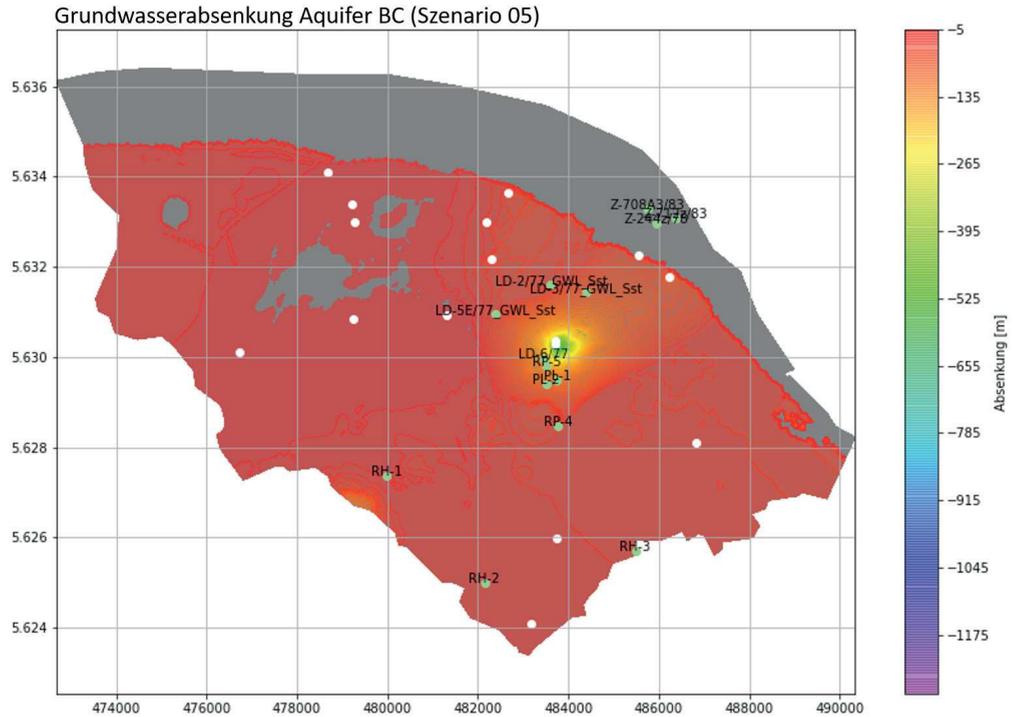


Abb. 4-20:
Grundwasser-
absenkung im
Gebiet Lückendorf
für das Jahr 2038 –
Szenario 02.

Abb. 4-21:
Grundwasser-
absenkung im
Gebiet Lückendorf
für das Jahr 2038 –
Szenario 05.



Für jedes Szenario der simulierten Jahre 2038 und 2047 wurde eine Grundwasserstandskarte und Differenzkarten zum Referenzszenario für jeden einzelnen Grundwasserleiter samt Grundwassermessstellen erstellt. Die Karten sind Bestandteil des Modellierberichtes Lückendorf (Pohle 2020). In dieser Publikation wird eine repräsentative Auswahl an Karten und Szenarien des Jahres 2038 dargestellt, um beispielhaft die charakteristischen Entwicklungstrends aufzuzeigen. Die Abb. 4-19, 4-20 und 4-21 zeigen qualitativ die Absenkungen des Grundwasserstandes für das Jahr 2038 für die Szenarien 02 und 05 im Vergleich zum Szenario 01 (aktueller Zustand der derzeitigen Entnahmen).

5 | Zusammenfassung

Das Ziel des Projektes ResiBil bestand darin, das wasserwirtschaftliche Potential des sächsisch-tschechischen Grenzgebietes zu beurteilen. Der Schwerpunkt lag vor allem auf der Bewertung der strategischen Grundwasserressourcen unter den Bedingungen der steigenden Anforderungen an die Sicherstellung des Wasserdargebots für die Trinkwasserversorgung in Zeiten des Klimawandels. Zur Erreichung dieses Ziels wurden geologische, hydrologische und hydrogeologische Methoden verwendet, die es ermöglichten, für die drei Fokusgebiete Děčínský Sněžník, Kirnitzsch-Hřensko und Lückendorf hydraulische 3D-Modelle zu entwickeln. Diese Modelle ermöglichten es, die nutzbaren Grundwasserressourcen zu ermitteln und verschiedene Szenarien der weiteren Entwicklung der Grundwassernutzung zu simulieren.

- Für das konzeptionelle Eingangsmodell wurde in allen Fokusgebieten eine detaillierte geologische und hydrologische Erkundung durchgeführt. Weiterhin wurden in den Gebieten Děčínský Sněžník und Kirnitzsch-Hřensko zwei hydrogeologische Tiefbohrungen abgeteuft.
- Auf Grundlage der gewonnenen Erkenntnisse wurden die Modelle Děčínský Sněžník und Kirnitzsch-Hřensko zunächst als stationäres und anschließend als transientes (instationäres) Modell erstellt. Das Modell für das Fokusgebiet Lückendorf wurde einzig als stationäres Modell angefertigt, da nicht ausreichend Abflusswerte zur Validierung des instationären Modells verfügbar sind.
- Die natürlichen Grundwasservorkommen im Fokusgebiet Kirnitzsch-Hřensko wurden mittels hydraulischem Modell auf 250 mm/Jahr ermittelt, was 1481 l/s entspricht. Die nutzbare Menge, die verwendet werden kann, ohne dass die hydrogeologischen Strukturen überlastet werden, beträgt 623 l/s. Bei den derzeitigen Entnahmen in Höhe von 105 l/s belaufen sich die aktuell zur Verfügung stehenden und bisher nichtverwendeten nutzbaren Grundwasserressourcen auf 518 l/s.
- Die modellierten Belastungstests (Szenarien 08, 09 und 10) haben gezeigt, dass im Fokusgebiet Kirnitzsch-Hřensko die Möglichkeit besteht, die maximal zulässigen Entnahmemengen bis auf 115 % zu erhöhen, ohne ein Trockenfallen der Brunnen zu riskieren; auf tschechischer Seite entspricht dies einer Erhöhung auf 125,9 l/s und auf deutscher Seite eine Erhöhung auf 80,5 l/s. Aufgrund der höheren Entnahmen sinkt der Grundwasserspiegel an der Messstelle 51516006_1 im Grundwasserneubildungsgebiet an der Wasserscheide zwischen den Wasserläufen Kamenice und Kirnitzsch um 2,0 m und an der Messstelle V-7 im Einzugsgebiet Hřensko um 8,5 m.
- Die natürlichen Grundwasservorkommen im Fokusgebiet Děčínský Sněžník wurden mittels hydraulischen Modells mit 130 mm/Jahr nachgewiesen, was 724 l/s entspricht. Die nutzbare Menge, die gewährleistet, dass die hydrogeologischen Strukturen nicht überbelastet werden, beträgt 321 l/s. Bei den derzeitigen Entnahmen in Höhe von 78 l/s liegen die zur Verfügung stehenden Grundwasserressourcen bei 243 l/s.

- Die modellierten Belastungstests (Szenarien 08, 09 und 10) haben bewiesen, dass es auch im Fokusgebiet Děčínský Sněžník möglich wäre, die maximal zulässigen Entnahmemengen bis auf 115 % zu erhöhen; auf tschechischer Seite würde dies auch bei verminderter Grundwasserneubildung (also in Trockenzeiten) eine Erhöhung auf 106,8 l/s und auf deutscher Seite gleichzeitige eine Erhöhung auf 13,8 l/s bedeuten. In einem solchen Fall sinkt der Grundwasserspiegel an der Messstelle VP8505 (Turon) bis auf 0,1 m, an der Messstelle VP8504 (Cenoman) um 0,15 m, an der Messstelle VP8456 (Turon) um 1,5 m und an der Messstelle VP8455 (Cenoman) um 7,6 m.
- Die natürlichen Grundwasservorkommen im Fokusgebiet Lückendorf wurden mittels Bodenwasserhaushaltsmodell mit 263 mm für das Jahr 2019 nachgewiesen, was 858 l/s entspricht. Die nutzbare Menge, die gewährleistet, dass die hydrogeologischen Strukturen nicht überlastet werden, beträgt 350 l/s. Bei den derzeitigen Entnahmen in Höhe von 91 l/s liegen die zur Verfügung stehenden Grundwasserressourcen bei 259 l/s.
- Die qualitative Auswertung der modellierten Belastungstests für die Jahre 2038 und 2047 (Szenarien 03 bis 10) zeigen, dass es im Fokusgebiet Lückendorf im Jahr 2038 nicht möglich wäre, die wasserrechtlich zulässigen Entnahmemengen (vor 2018) zu fördern bzw. diese zu erhöhen. In einem solchen Fall fällt der Grundwasserspiegel an der Messstelle LD - 6/77 (Turon) und an der Messstelle LD - 2/77 (Turon) unter die niedrigsten zu messenden Werte und unter den Filterausbau des Brunnen 1/48.

Glossar

In der folgenden Tabelle sind Fachbegriffe samt Erläuterungen aufgeführt, welche häufig in dieser Arbeit verwendet wurden. Das Glossar kann in seinem vollständigen Umfang unter [1] eingesehen werden.

Basis | Untere abschließende Begrenzung

Abfluss | Wasservolumen, das pro Zeiteinheit den Querschnitt eines Gewässers durchfließt und einem Einzugsgebiet zugeordnet ist

Absenkung | Absenkung des Grundwasserspiegels oder des Druckspiegels durch Wasserentnahme mittels Pumpen, bei einem artesischen System mittels eines Bohrloches oder durch eine aus einem Grundwasserleiter austretende Quelle

Absenkrichter | Trichterartige Absenkung der Grundwasserdruckfläche, die den Einflussbereich eines Brunnens bestimmt

Aufschluss | Stelle an der Erdoberfläche, an dem Gestein unbedeckt zu Tage tritt

Aquiclude | Gesättigte Schicht, Formation oder Gruppe von Formationen mit niedriger hydraulischer Leitfähigkeit, die nur unbedeutende Wassermengen an Drainagen, Brunnen, Quellen und Sickerstellen liefern

Aquifer, Grundwasserleiter | Unter der Erdoberfläche liegendes lockeres oder festes Gestein, dessen zusammenhängende Hohlräume (Poren, Klüfte) groß genug sind, dass Wasser leicht hindurchströmen kann

Aquitard | Teildurchlässige geologische Formation, die verglichen mit einem Grundwasserleiter nur sehr gering durchlässig ist

Basisabfluss | Teil des Abflusses, der einem Gerinne hauptsächlich aus dem Grundwasser zufließt, aber auch von Seen und Gletschern, wenn über längere Zeit kein Zufluss aus Niederschlag oder Schneeschmelze auftritt

Becken | ausgedehnter, in Bezug zur Umgebung tiefer liegender Ablagerungsraum, in dem aufgrund von Absenkung z.T. mächtige Sedimentpakete abgelagert werden

ČGS | Tschechischer Geologischer Dienst

Direktabfluss | Summe aus Abfluss über die Bodenoberfläche und zeitversetztem Abfluss oberflächennaher Bodenschichten

Durchfluss(mess)querschnitt | Ausgewählter Querschnitt eines Fließgewässers normal zur Hauptströmungsrichtung, in dem Fließgeschwindigkeiten zur Ermittlung des Abflusses bzw. Durchflusses bestimmt werden

Drainage | Entwässerung einer Schicht oder eines Gewässers

Effektiver Niederschlag | Teil des Gebietsniederschlags, der als Direktabfluss wirksam wird. In einigen Verfahren wird der unterirdische Abfluss vom direkten Abfluss ganz abgenommen, dann entspricht der effektive Abfluss dem Regenüberschuss

Einzugsgebiet | Gebiet mit einem gemeinsamen Ausfluss für Oberflächenabfluss

Evaporation, Verdunstung | Verdunstung von Wasser an freien Wasseroberflächen (See,

- Meer) und vegetationsfreien Flächen. Ausgelöst durch Wärme der Sonneneinstrahlung, wird Wasser vom flüssigen in den gasförmigen Aggregatzustand überführt
- Evapotranspiration | (1) Wassermenge, die durch Evaporation vom Boden und Transpiration von den Pflanzen in die Atmosphäre gebracht wird (2) Summe aus Bodenverdunstung, Interzeptionsverdunstung und Transpiration
- Flügelmessung | Messung des Abflusses mit hydrometrischen Flügel
- Geofonds | Geologisches Archiv des Tschechischen Geologischen Diensts
- Gesamtabfluss | Gesamtabfluss setzt sich aus dem Oberflächenabfluss, dem Zwischenabfluss und dem Basis- oder Grundwasserabfluss zusammen
- Gespanntes Grundwasser | Grundwasser, dessen Grundwasseroberfläche und Grundwasserdruckfläche in dem betrachteten Bereich nicht identisch sind
- GOK | Abkürzung für Geländeoberkante
- Grundwasser | Unterirdisches Wasser, das die Hohlräume der Gesteine zusammenhängend ausfüllt und dessen Bewegung ausschließlich oder nahezu ausschließlich durch die Schwerkraft und den durch die Bewegung selbst ausgelösten Reibungskräften bestimmt wird
- Grundwasserabsenkung | (1) Absenkung einer Grundwasserdruckfläche als Folge technischer Maßnahmen (2) Absenkung des Grundwasserspiegels oder des Druckspiegels durch Wasserentnahme mittels Pumpen, bei einem artesischen System mittels eines Bohrloches oder durch eine aus einem Grundwasserleiter austretende Quelle
- Grundwasseraustritt | Natürliches Zutage treten von Wasser, das dabei von Grundwasser zu oberirdischem Wasser wird
- Grundwasserbilanz | Bilanzartige Erfassung der Grundwasserzuflüsse (Grundwasserneubildung, zufließendes Uferfiltrat, oberstromiger Zufluss, künstliche Grundwasseranreicherung) und der Grundwasserabflüsse (Grundwasserabstrom, kapillarer Aufstieg und Evapotranspiration, künstliche Grundwasserentnahme) sowie der Vorratsänderung für ein Betrachtungsgebiet innerhalb einer Betrachtungszeitspanne
- Grundwassermessstelle | Messstation oder Anlage, an der Grundwasserdaten über einen oder mehrere der folgenden Variablen erhoben werden: Wasserstand, Wassertemperatur und andere physikalische und chemische Eigenschaften des Wassers sowie Verhältnis und Menge der Entnahme und/oder Neubildung
- Grundwasserneubildungsrate | Volumen des auf einer bestimmten Fläche infiltrierten Wassers während einer bestimmten Zeitspanne
- Grundwasseroberfläche | (1) Obere Grenzfläche eines Grundwasserkörpers (2) Oberfläche eines ungespannten Grundwasserleiters innerhalb der Sättigungszone, oberhalb derer der Druck dem atmosphärischen Druck entspricht
- Grundwasserregime | Variationen im Zustand und in den Merkmalen des Grundwasserstroms, die sich in Bezug auf Zeit und Raum regelmäßig wiederholen und die bestimmte Phasen, z.B. jahreszeitlich, durchlaufen
- Grundwasserrückgang | Abnahme des Grundwasserabflusses zu Oberflächengewässern in Zeiten, in denen keine Neubildung erfolgt, verbunden mit einer Abnahme der Grundwasserspeicherung und dargestellt durch eine Grundwasserrückgangskurve
- Hydraulische Leitfähigkeit | (1) Eigenschaft eines gesättigten porösen Mediums, welche die Beziehung (das sogenannte Darcy-Gesetz) zwischen dem spezifischen Abfluß und dem, diesen verursachenden, hydraulischen Gefälle bestimmt (2) Quotient aus Filtergeschwindigkeit und zugehörigem Standrohrspiegelgefälle

- Hydrogeologische Einheit | Unter Berücksichtigung wasserwirtschaftlicher Aspekte und anhand hydraulischer und geologischer Eigenschaften abgeleitete Gebiete
- Hydrogeologische Struktur | Der für die Grundwasserbewegung relevante Teil des geologischen Systems
- Hydroisohypsen | Grundwassergleichen; Verbindungslinien bzw. Höhenlinien, die Punkte zwischen gleicher hydropotentieller Höhe verbinden
- hypodermischer Abfluss | Bodenwasserabfluss unterhalb der Oberfläche bzw. der Geländeoberkante
- Infiltration | Zugang von Wasser durch enge Hohlräume in den Gesteinskörper
- Konzeptionelles Modell | Ein Modell, das sich auf physikalische Gesetze in vereinfachter Näherung stützt und ein gewisses Maß an Empirie enthält. Hierzu gehören die meisten, auf der Basis der Einzelspeicher oder Speicherkaskadenansätzen beruhenden Niederschlags-Abfluss-Modelle und die Wasserhaushaltsmodelle
- Kristallin, Kristallingestein | Bezeichnung für Magmatite und Metamorphite zur Unterscheidung von Sedimenten
- Langjährige mittlere Entnahmeraten | Stellt die Wasserentnahmerate als Mittel über einen definierten Zeitraum an Jahren dar
- Langjährige mittlere Niederschlagsrate | Menge des Niederschlages pro Zeiteinheit, gemittelt über einen definierten Zeitraum an Jahren
- Lastfall | Der Lastfall liegt an, wenn (real oder simuliert) eine definierte Menge/Rate von Grundwasser aus dem Grundwassersystem entnommen wird
- LfULG | Landesamt für Umwelt, Landwirtschaft und Geologie
- Mergelstein | Verfestigtes Sedimentgestein, welches aus feinem Material (Ton und Schluff) und Kalk besteht
- Numerisches Modell | Ein mathematisches Werkzeug zum Studium von Vorgängen in der realen Welt, bestehend aus einer Modellkonzeption, einem geschlossenen physikalischen Gleichungssystem und einem numerischen Lösungsverfahren
- Nutzbare Grundwasserdargebot | Teil des gewinnbaren Grundwasserdargebots, der für die Wasserversorgung unter Einhaltung bestimmter Randbedingungen genutzt werden kann
- Oberflächenabfluss | Teil des Abflusses, der dem Vorflutel als Reaktion auf ein auslösendes Ereignis (Niederschlag oder Schneeschmelze) über die Bodenoberfläche unmittelbar zugeflossen ist
- Quellschüttung | auch Abfluss genannt; das aus einer Quelle austretende Wasservolumen während einer bestimmten Zeit in [l/s]
- Permeabilität | Beschreibt die Durchlässigkeit eines porösen Mediums für Flüssigkeiten und Gase
- Phonolith | Vulkanisches Gestein von grünlicher bis grauer Farbe
- Pilotgebiet | Ein in seiner räumlichen Ausdehnung exakt festgelegtes Gebiet, welches für die Erarbeitung fachlicher Grundlagen im Projekt betrachtet wird
- Piezometrische Verhältnisse | Äquivalenter Druck der durch die Höhe der Wassersäule verursacht wird
- Porosität | Porenvolumen im Gestein, Sediment oder Boden
- Randbedingungen eines (Grundwasser)Modells | Definition für den Austausch von Wasser an den Grenzen zwischen betrachtetem Untergrundkörper und seiner angrenzenden Umgebung

- ResiBil | Wasserressourcenbilanzierung und -resilienzbewertung im Ostteil des sächsisch-tschechischen Grenzraumes
- Schlot | Mehr oder weniger senkrechten Aufstiegskanal von vulkanischen Produkten aus dem Erdinneren zu einem Eruptionszentrum an der Erdoberfläche oder am Meeresboden
- Schluff (verfestigt Schluffstein) | Feinkörniges bis sehr feinkörniges, dichtes Sedimentgestein. Der Name geht darauf zurück, dass dieses Gestein aus einem entsprechend feinkörnigen – schlammigen – Lockersediment hervorgegangen ist (Korngröße 0,002–0,063 mm)
- Speicherkoeffizient | Wasservolumen, das ein Grundwasserleiter pro Flächeneinheit Grundwasserleiter pro Einheit der Druckhöhenänderung abgibt oder aufnimmt
- Spezifischer Speicherkoeffizient | Das Wasservolumen, das pro Einheitsvolumen bei einer Spiegeländerung um 1 m abgegeben oder aufgenommen werden kann. Diese Definition gilt für gespannte und ungespannte Aquifere gleichermaßen
- Störungszone | tektonische oder atektonische Unterbrechung oder Veränderung des primären Gesteinsverbandes an Fugen, Brüchen, Klüften oder Verwerfungen oder aber auch weiträumige bruchlose Verbiegungen. Diese Bereiche können mehrere Meter bis 100 m breit sein
- Ton | Natürlich vorkommendes Material, das hauptsächlich aus Tonmineralteilchen besteht. Nach der Norm EN ISO 14688 werden alle Partikel $< 2 \mu\text{m}$ (0.002 mm) als Ton definiert
- Top | Oberste Lage/Bereich einer Gesteinseinheit
- Ungesättigte Zone | Gesteinskörper, der zum Betrachtungszeitpunkt nicht vollständig mit Wasser gefüllt ist. Die ungesättigte Zone umfasst den Sickerraum ohne den geschlossenen Kapillarraum
- Ungespanntes / freies Grundwasser | Grundwasser, dessen Grundwasseroberfläche und Grundwasserdruckfläche in dem betrachteten Bereich identisch sind
- Unterirdisches Einzugsgebiet | Gebiet, aus dem unterirdisches Wasser einem bestimmten Ort zufließt. Die Begrenzung ist durch geologische, hydrologische und anthropogene Einflussgrößen (z.B. Entnahmen) gegeben. In der Regel sind die Begrenzungen zeitlich veränderlich
- VÚV | Wasserforschungsinstitut T. G. Masaryk (Výzkumný ústav vodohospodářský), öffentliches Forschungsinstitut (VÚV TGM, v.v.i.)
- Wasserbilanz | Bestandsaufnahme des Wassers nach dem Prinzip, dass in einer bestimmten Zeitspanne der gesamte Eintrag in ein Einzugsgebiet oder ein Gewässer gleich dem gesamten Wasserverlust plus der Vorratsänderung im Einzugsgebiet bzw. Gewässer sein muss
- Wasserhaushaltskomponente | Der Gesamtwasserhaushalt setzt sich aus verschiedenen Komponenten zusammen, Niederschlag, Abfluss, Verdunstung und Grundwasserneubildung
- Wasserscheide | Gipfelinie oder Grenzlinie, die benachbarte Einzugsgebiete trennt
- WEREX | Wetterlagenbedingte Regression für Extremwerte, speziell für Sachsen entwickeltes Klimamodell
- WETTREG | statistische Wetterlagen-basierte Regionalisierungsmethode
- Zeitreihen | eine kontinuierliche Reihe von Messungen
- Zonierung | Variation der Chemischen Zusammensetzung, Porosität, Einschlüsse oder

anderer physikalischer Eigenschaften innerhalb eines einzelnen Mineralkorns oder einer Gesteinseinheit

Zwischenabfluss | Teil des Abflusses, der dem Vorfluter als Reaktion auf ein auslösendes Ereignis (Niederschlag oder Schneeschmelze) aus den oberflächennahen Bodenschichten zugeflossen ist. Der Zwischenabfluss ist gegenüber dem Oberflächenabfluss zeitlich verzögert

Literatur

- [1] <https://www.resibil.sachsen.de/downloads-4111.html>; 19.10.2020; 14:27 Uhr.
[2] <https://www.estudanky.eu/mapa>; 13.10.2020; 12:43 Uhr.
[3] <http://www.doku.arcegmo.de/>; 13.10.2020; 12:45 Uhr.

- Bernhofer, C., Pluntke, T., Barfus, C., Heidenreich, M., Kronenberg, R., Hauffe, C., Wagner, M., Schwarze, R. & Gutzmann, B. (2019): Analyse und Bewertung der gemessenen meteorologischen Datengrundlage im Freistaat Sachsen sowie Erzeugung eines Klima-Referenzdatensatzes. Schriftenreihe, Heft 7/2019. Landesamt für Umwelt, Landwirtschaft und Geologie – LfULG, Dresden.
- Burda, J. & Venera, Z. (2016): ID EIS 10051606-SFŽP Rebilance zásob podzemních vod. Závěrečná zpráva. Příloha č. 2/41. Stanovení zásob podzemních vod. Hydrogeologický rajon 4630 Děčínský Sněžník. – ČGS, Prag.
- Diersch H.-J.G. (2013): FEFLOW – Finite Element Modeling of Flow, Mass and Heat Transport in Porous and Fractured Media. 10.1007/978-3-642-38739-5.
- DHI WASY (2020): Beratung zum Grundwassermodell ResiBil – Etappe 4 Kalibrierung, Sensitivitäts – und Szenarienanalyse. DHI WASY, 08.10.2020. Berlin.
- Eckhardt P. (2013): Vývoj vydatnosti pramenů a pramenných oblastí v oblasti Hřensko-Křinice/Kirnitzsch. Závěrečná zpráva. – VÚV TGM, Prag.
- Hanel, M., Vizina, A., Máca, P. & Pavlásek, J. (2012): A Multi-Model Assessment of Climate Change Impact on Hydrological Regime in the Czech Republic. Journal of Hydrology and Hydromechanics, 60(3), 152-161. doi: <https://doi.org/10.2478/v10098-012-0013-4>.
- Harbaugh, A.W. & McDonald, M.G. (1996): User's documentation for MODFLOW- 96, an update to the U.S. Geological Survey modular finite-difference ground-water flow model, USGS Open-File Report 96-485.
- Hauffe, C., Müller, R., Winkler, P., Baldy, A., Schwarze, R. & Schütze, N. (2016): Strategie zur Kalibrierung großräumiger Wasserhaushaltsmodelle sowie Ergebnisse für Ist-Zustand und Klimaszenarien in Sachsen. Hydrologie und Wasserbewirtschaftung. Heft 1 (2016).
- Herčík F. & Nakládal V. (1987): Hydrogeologická syntéza české křídové pánve – BILANČNÍ CELEK 3, Stavební geologie n.p. Prag.
- Herčík, F., Hermann, Z. & Valečka, J. (2003): Hydrogeology of the bohemian cretaceous basin. Ceska geologická služba 91 S + Anlagen. Prag.
- Höltig, B. & Coldewey, W. (2009): Hydrogeologie – Einführung in die Allgemeine und Angewandte Hydrogeologie. 10.1007/978-3-662-59667-8.
- Horáček S., Kašpárek L. & Novický O. (2008): Estimation of climate change impact on water resources by using BILAN water balance model. IOP Conf. Ser.: Earth Environ. Sci. 4, 012023.

- Jetelová, D. (1972): Regionální hydrogeologický průzkum v povodí Ploučnice, Kamenice a Křinice. Stavební geologie n.p., Prag.
- Kadlecová, R. et al. (2015): Rebilance zásob podzemních vod – rozšířený abstrakt. – Bericht, Česká geologická služba, 18 S., Prag.
- Kahnt, R., Löser, R., Gabriel, A., Hermann, D., Renker, S., Helbig, M. & Kutzke, A. (2014): Abschlussbericht Entwicklung zweier 3D-Modelle hydrogeologischer Körper im sächsisch-böhmischen Grenzgebiet im Rahmen des Ziel 3-Projektes GRACE. G.E.O.S. Ingenieurgesellschaft mbH, Freiberg/Halsbrücke.
- Kalinová, M., Eckhardt, P., Martínková, M., Simek, P., Bílý, M., Koubková, L., Böhm, A.-K., Börke, P. & Schulz, C. (2014a): Grundwasserressourcen im Tschechisch-Sächsischen Grenzraum – II. Gebiet Petrovice-Lückendorf-Jonsdorf-Oybin.– Ergebnisse des EU-Projektes „Gemeinsam genutzte Grundwasserressourcen im tschechisch-sächsischen Grenzgebiet (GRACE)“, Wasserforschungsinstitut T.G. Masaryk, Prag; Sächsisches Landesamt f. Umwelt, Landwirtschaft, Geologie, 91 S., Dresden/Freiberg.
- Krentz, O. & Rommel, A. (2020): Das Zittauer Gebirge im Kreuzungsbereich der Elbezone und des Egergrabens – Tektonik und Strukturbau – Geologisch-geophysikalische Ergebnisse aus dem EU-Projekt ResiBil. Geoprofil LfULG, Heft XX/2020, (eingereicht).
- Krentz, O. & Stanek, K. (2015): Die Lausitzer Überschiebung zwischen Meißen und Jeschken – neue Aspekte. – Bericht der Naturforschenden Gesellschaft der Oberlausitz, Band 23, Seite 123 – 137, Görlitz.
- Mibus, H.-P. (1978): Hydrogeologischer Ergebnisbericht mit Grundwasservorratsberechnung – Detailerkundung Lückendorf. Dresden. 58 Seiten [138 Blatt]: 9 Anl. – 8 Lit. – Ergebnisbericht, Erkundungsbericht. – unveröffentlicht
- Mibus, H.P. (1998): Modell Übersichtsgutachten des Grundwasserdargebotes und dessen Nutzung im Zittauer Gebirge unter Berücksichtigung der Grundwassernutzungen auf tschechischem Gebiet. – Gutachten im Auftrag des Sächsischen Landesamtes für Umwelt und Geologie. G.E.O.S. Ingenieurgesellschaft mbH, 68 S. + Anlagen. Freiberg/Halsbrücke.
- Mlčoch B., Krentz O., Nadaskay R., Valečka J., Mrázová Š., Junge R., Reinhardt S. & Pohle M. (2018): Geologische Karte des Sächsisch-Böhmischen Kreidebeckens/Geologická mapa sasko-české křídové pánve M 1 : 100 000. – Czech Geological Survey, Prague; Sächsisches Landesamt für Umwelt, Landwirtschaft und Geologie, Dresden/Freiberg.
- Mrázová, S., Tomanová Petrová, P. & Krentz, O. (eds.) (2020): Geologie des Sächsisch-Böhmischen Kreidebeckens zwischen Erzgebirge und Jeschken.- Ergebnisse des EU-Projektes „Wasserressourcenbilanzierung- und resilienzbewertung im Ostteil des sächsisch-böhmischen Grenzraumes (ResiBil)“. Czech Geological Survey, Wasserforschungsinstitut T.G. Masaryk, Prag; Sächsisches Landesamt für Umwelt, Landwirtschaft und Geologie, Dresden/Freiberg, 103 S., Prag.
- Nádaskay, R (2020): (Hydro)geologie. – Roll up; Wanderausstellung Projekt ResiBil; <https://www.resibil.sachsen.de/downloads-4111.html>; 28.08.2020, 09:57 Uhr.
- Nakládal, V. (1975): Tlustecký blok – hydrogeologický průzkum. Zpráva z 1. etapy a ideový projekt II. etapy, Stavební geologie, Prag.
- Nakládal, V. (1989): Hřensko – prameniště. Zpráva o výsledcích geologickoprůzkumných prací. Stavební geologie. Prag.

- Navrátilová, V. & Nol, O. (2019a): Hřensko-Křinice. Transientní model podzemní vody (II). Závěrečná zpráva za 2. etapu prací.
- Navrátilová, V. & Nol, O. (2019b): Děčínský Sněžník. Transientní model podzemní vody (II). Závěrečná zpráva za 2. etapu prací. AQUATEST. Prag.
- Nol, O. (2014): Společně využívané vody na česko-saském pomezí (GRACE). Matematický model proudění podzemní vody v oblasti Hřensko-Křinice/Kirnitzsch. AQUATEST. Prag
- Patzeltová, B. & Patzelt Z. (2004): Požadavky na vstupní data pro matematické modelování proudění podzemních vod a transportu kontaminantů. – Sborník Ekomonitor.
- Pohle, M. (2020): Dokumentation Grundwassermodell Zittauer Gebirge. Sächsisches Landesamt f. Umwelt, Landwirtschaft, Geologie. Dresden (in Präparation).
- Procházka M. (2017): Karotážní měření pro objasnění geologické stavby a hydrodynamických poměrů v nových pozorovacích vrtech RE001, RE002. AQUATEST. Prag.
- Richter, D. (1995): Ergebnisse methodischer Untersuchungen zur Korrektur des systematischen Meßfehlers des Hellmann-Niederschlagsmessers. Nr. 194, Selbstverlag des Deutschen Wetterdienstes, Offenbach am Main.
- Rösner, S., Szymczak, P. & Höhn, R. (2008): Zustandsüberwachung Grenzgrundwasser / Operatives Messnetz. G.E.O.S. Ingenieurgesellschaft mbH. Freiberg/Halsbrücke.
- Schwarze, R., Dröge, W., Hofmann, J., Maleska, V., Lünich, K., Schönfeld, M. & Spitzer, S. (2011): KliWES – Abschätzung der für Sachsen prognostizierten Klimaänderungen auf den Wasser- und Stoffhaushalt in den Einzugsgebieten sächsischer Gewässer Teil 1: Wasserhaushalt, Kernkomponente – LfULG Schriftenreihe, Heft 44/2011.
- Schwarze, R., Gurova, A., Röhm, P., Hauffe, C., Baldy, A., Winkler, P., Müller, R., Dröger, W. & Wagner, M. (2016): Analyse möglicher Änderungen des Wasserhaushalts sächsischer Gewässereinzugs-gebiete unter dem Einfluss variierender Klima- und Landnutzungsbedingungen. Schriftenreihe, Heft 8/2016. Landesamt für Umwelt, Landwirtschaft und Geologie – LfULG, Dresden.
- Schwarze, R., Hauffe, C., Baldy, A. & Wagner, M. (2014): Regionalisierung meteorologischer Stati-onsdaten mit einem geeigneten Regionalisierungstool im Rahmen des FuE-Projekts KliWES – Kli-mawandel und Wasserhaushalt (Klimaprojektionen). Endbericht, (Hrsg.) Landesamt für Umwelt, Landwirtschaft und Geologie – LfULG, Dresden.
- Sedlák, J., Skacelova, Z., Mlcoch, B. & Krentz, O. (2019): Gravimetrická mapa hraniční oblasti Saska a České republiky/Gravimetrische Übersichtskarte im Grenzgebiet Sachsen-Tschechische Republik M 1:100 000. – Miligal s.r.o., Brno; Czech Geological Survey, Prague; Sächsisches Landesamt für Umwelt, Landwirtschaft und Geologie, Dresden/Freiberg.
- Tallaksen L. M. & van Lannen H. A. J. (2004): Hydrological Drought – Process and Estimation Methods for Streamflow and Groundwater. Elsevier, Amsterdam.
- Voigt T., Franke, J. & Franke, S. (2013): Grundlagen für ein geologisch-tektonisches Modell der Kreideablagerungen im Sächsisch-Böhmischen Grenzbereich im Rahmen des Ziel 3 – Projektes GRACE. Abschlussbericht. Jena.
- Vaněk J. (2013): Společně využívané vody na česko-saském pomezí (GRACE) – Matematický model proudění podzemní vody v oblasti Petrovice-Lückendorf-Jonsdorf-Oybin 1. etapa. AQUATEST. Prag.
- Vaněk (2014): Gemeinsam genutzte Grundwasserressourcen im tschechisch-sächsischen Grenzgebiet (GRACE) – Mathematisches Modell der Grundwasserströmung im Gebiet Petrovice – Lückendorf – Jonsdorf – Oybin 2. Etappe. AQUATEST. Prag.

-
- Vizina, A., Horáček, S. & Hanel, M. (2015): Recent developments of the BILAN model. *Water Management Technical and Economical Information Journal*, 2015, vol. 57, No. 4-5, p. 7-10. ISSN 0322-8916.
- Wenderholm, S., Gabriel, A. & Kutzke, A. (2019): Anpassung und Bereitstellung von 3D-Strukturdaten in FEFLOW-kompatiblen volumenbasierten Datenformat auf der Grundlage der laufenden Bearbeitung der Hydrogeologischen Spezialkartierung Sachsen (HyK50) für das Projekt ResiBil – Teilgebiet Zittauer Gebirge – Abschlussbericht. G.E.O.S. Ingenieurgesellschaft mbH, Freiberg/Halsbrücke – unveröffentlicht.

Hydrogeologie des Sächsisch-Böhmischen Kreidebeckens zwischen Erzgebirge und Jeschken

Zbyněk Hrkal, David Rozman und Pavel Eckhardt (eds.)

Herausgegeben vom Tschechischen Geologischen Dienst (ČGS/Česká geologická služba) / Wasserforschungsinstituts (Výzkumný ústav vodohospodářský) T.G. Masaryk, öffentliches Forschungsinstitut (VÚV TGM, v.v.i.), Prag 2020.

Diese Publikation entstand im Rahmen des Projektes ResiBil, welches ein vom Europäischen Fonds für regionale Entwicklung unterstütztes, internationales Projekt aus dem Programm zur Förderung der grenzübergreifenden Zusammenarbeit zwischen der Tschechischen Republik und dem Freistaat Sachsen ist (Laufzeit 2014–2020), registriert unter der Nummer 100267011.

Satz und Gestaltung Oleg Man
Druck PBTisk, a. s., Dělostřelecká 344
261 01 Příbram

1. Auflage, 88 Seiten

ISBN 978-80-87402-89-4

EU Projekt: ResiBil – Wasserressourcenbilanzierung
und -resilienzbewertung im Ostteil
des sächsisch-tschechischen Grenzraumes

Das Projekt ResiBil ist ein vom Europäischen Fonds für regionale Entwicklung unterstütztes, internationales Projekt aus dem Programm zur Förderung der grenzübergreifenden Zusammenarbeit zwischen der Tschechischen Republik und dem Freistaat Sachsen mit einer Laufzeit von 2014 bis 2020. Das Projekt ist unter der Nummer 100267011 registriert.

PROJEKTPARTNER

Tschechischer Geologischer Dienst
Sächsisches Landesamt für Umwelt, Landwirtschaft und Geologie
Wasserforschungsinstitut T.G. Masaryk (öffentliches Forschungsinstitut VÚV TGM)

ResiBil befasst sich mit dem gemeinsamen Schutz der Grundwasserressourcen im deutsch-tschechischen Grenzgebiet. Ziel des Projektes ist die Ableitung von Handlungsempfehlungen für eine nachhaltige Nutzung der Grundwasserressourcen und deren Bewertung im Hinblick auf den Klimawandel. Wie aktuelle Studien zeigen, ist der Rückgang der Grundwasserneubildung sowohl auf klimatische Effekte (höhere Durchschnittstemperaturen, vermehrt niederschlagsarme Jahre) als auch auf anthropogene Einflüsse (Entnahme von Grundwasser) zurückzuführen.

Der Schwerpunkt dieser Publikation liegt auf den geologischen Verhältnissen im Projektgebiet. Es werden u. a. die geologischen Einheiten und tektonischen Strukturen vorgestellt sowie interessante Lokalitäten im sächsisch-böhmischen Grenzraum präsentiert.

