

# Společně využívané vody na česko-saském pomezí (GRACE)

## Matematický model proudění podzemní vody v oblasti Petrovice-Lückendorf-Jonsdorf- Oybin

### *Závěrečná zpráva*

Praha, květen 2014



Europäische Union. Europäischer Fonds für  
regionale Entwicklung: Investition in Ihre  
Zukunft / Evropská unie. Evropský fond pro  
regionální rozvoj: Investice do vaší budoucnosti



## AQUATEST a. s.

Geologická 4, 152 00 Praha 5

IČO 44 79 48 43

zapsána v obchodním rejstříku Městského soudu v Praze, oddíl B, vložka 1189

Název a kód zakázky:	<b>Matematický model proudění podzemní vody v oblasti Petrovice – Lückendorf – Jonsdorf – Oybin</b> č. zakázky 253120037000
Popis zakázky:	<b>Numerický model</b>
Pořadové č.:	1
Objednatel:	<b>VÚV TGM, v.v.i.</b>

## Společně využívané vody na česko-saském pomezí (GRACE)

Matematický model proudění podzemní vody v oblasti Petrovice-Lückendorf-Jonsdorf-Oybin  
Závěrečná zpráva

Řešitel: **Mgr. Jiří Vaněk** .....

Schválil: **RNDr. Jiří Šíma**  
technický ředitel .....

Za statutární orgán: **Ing. Martin Plšek**  
ředitel společnosti a člen představenstva .....

**RNDr. Jiří Jelínek**  
místopředseda představenstva .....



## OBSAH:

<b>1. ÚVOD A CÍLE PRACÍ.....</b>	<b>6</b>
<b>2. CHARAKTERISTIKA OBLASTI .....</b>	<b>7</b>
2.1. VYMEZENÍ ZÁJMOVÉ OBLASTI .....	7
2.2. HYDROLOGICKÁ CHARAKTERISTIKA.....	7
2.3. GEOLOGICKÉ POMĚRY ÚZEMÍ .....	8
2.4. HYDROGEOLOGICKÉ POMĚRY ÚZEMÍ .....	9
2.5. PROBLEMATIKA POKLESŮ HLADINY PODZEMNÍ VODY V TLUSTECKÉM BLOKU .....	15
2.6. PROBLEMATIKA TĚŽBY URANU VE STRÁŽSKÉM BLOKU .....	20
2.6.1 <i>Obecně o těžbě uranu ve strážském bloku.....</i>	<i>20</i>
2.6.2 <i>Geologické a hydrogeologické poměry strážského zlomového pásma.....</i>	<i>21</i>
<b>3. METODIKA.....</b>	<b>25</b>
3.1. POUŽITÝ SOFTWARE.....	25
3.2. POSTUP A KONCEPCE ŘEŠENÍ .....	26
<b>4. HYDRAULICKÝ MODEL .....</b>	<b>29</b>
4.1. KONCEPČNÍ MODEL .....	29
4.2. OKRAJOVÉ PODMÍNKY .....	29
4.3. GEOMETRIE A TYP VRSTEV .....	33
4.4. VSTUPNÍ PARAMETRY .....	38
4.5. KALIBRACE .....	41
4.6. SIMULOVANÉ PROUDĚNÍ PODZEMNÍ VODY .....	52
4.7. VLIV ČERPÁNÍ PODZEMNÍ VODY A INFILTRACE NA REŽIM A STAV PODZEMNÍCH VOD ...	55
4.8. PREDIKCE VÝVOJE HLADINY PODZEMNÍ VODY .....	62
4.9. STANOVENÍ VYUŽITELNÝCH ZDROJŮ PODZEMNÍ VODY – STACIONÁRNÍ PREDIKCE.....	87
4.10. NEJISTOTY MODELU A CITLIVOSTNÍ ANALÝZY.....	93
<b>5. ZÁVĚR.....</b>	<b>96</b>
<b>6. POUŽITÉ PODKLADY .....</b>	<b>98</b>



## Seznam obrázků v textu:

Obr. 1: Pozice kolektorů a izolátorů podle českého členění (Valečka, Herčík, Herrmann, 1999).....	9
Obr. 2: Srovnání stratigrafického členění křídvy v zájmovém území podle německého a českého přístupu (Voight, 2013).....	11
Obr. 3: Vymezení zájmového území v projektu GRACE a modelové oblasti hydraulického modelu....	12
Obr. 4: Mapa povrchových toků.....	13
Obr. 5: Základní tektonické a strukturní schéma modelové oblasti.....	14
Obr. 6: Vývoj hladin v pozorovacích vrtech v lokalitě Petrovice-Lückendorf.....	15
Obr. 7: Vývoj hladin v pozorovacích vrtech v mezipovodí Panenského potoka (Jitrava – Velký Valtíov).....	16
Obr. 8: Vývoj hladin v pozorovacích vrtech ČHMÚ.....	16
Obr. 9: Zaznamenané čerpání podzemní vody na českém a německém území.....	17
Obr. 10: Lokalizace kontinuálně sledovaných vrtů nacházejících se v modelové oblasti, kolektor 2+3 (turon).....	18
Obr. 11: Lokalizace kontinuálně sledovaných vrtů nacházejících se v modelové oblasti, kolektor 4 (cenoman).....	19
Obr. 12: Schematická mapka těžby ve strážském bloku a její poloha vůči tlusteckému bloku (Ekert, 2008).....	20
Obr. 13: Schematický geologický řez přes strážský zlom.....	21
Obr. 14: Schematický hydrogeologický řez přes strážský zlom.....	22
Obr. 15: Vývoj hladiny podzemní vody ve strážském a tlusteckém bloku.....	23
Obr. 16: Porovnání hladiny podzemní vody v tlusteckém a strážském bloku.....	24
Obr. 17: Diskretizace modelové sítě.....	32
Obr. 18: Mapa báze kolektoru 4 a okrajové podmínky.....	34
Obr. 19: Mapa báze izolátoru 3/4 a okrajové podmínky.....	35
Obr. 20: Mapa báze kolektoru 2+3 a okrajové podmínky.....	36
Obr. 21: Mapa báze kolektoru 1 a okrajové podmínky.....	37
Obr. 22: Lokalizace odběrných míst podzemní vody uvažovaných v hydraulickém modelu.....	40
Obr. 23: Grafické porovnání pozorovaných a vypočtených absolutních hladin podzemní vody (modelový stav v roce 2012).....	43
Obr. 24: Kalibrace na kolísání hladiny podzemní vody – kolektor 2+3 na německém území.....	43
Obr. 25: Kalibrace na kolísání hladiny podzemní vody – kolektor 2+3 na německé straně a státní hranici.....	44
Obr. 26: Kalibrace na kolísání hladiny podzemní vody – kolektor 2+3 v drenážní oblasti podél Panenského potoka.....	44
Obr. 27: Kalibrace na kolísání hladiny podzemní vody – kolektor 2+3 v okrajových částech modelové oblasti.....	45
Obr. 28: Kalibrace na kolísání hladiny podzemní vody – kolektor 2+3 v povodí Heřmanického potoka a Valchy.....	45
Obr. 29: Kalibrace na kolísání hladiny podzemní vody – kolektor 2+3.....	46
Obr. 30: Kalibrace na kolísání hladiny podzemní vody – kolektor 4.....	46
Obr. 31: Zóny s odlišnou hydraulickou vodivostí – Kolektor 1.....	48
Obr. 32: Zóny s odlišnou hydraulickou vodivostí – Kolektor 2.....	49
Obr. 33: Zóny s odlišnou hydraulickou vodivostí – Poloizolátor 3/4.....	50
Obr. 34: Zóny s odlišnou hydraulickou vodivostí – Kolektor 4.....	51
Obr. 35: Vodní bilance hydraulického modelu v závislosti na čase, 1971–2012, kalibrační stav.....	53
Obr. 36: Graf závislosti velikosti modelové drenáže podzemní vody do Panenského potoka na čase, profil Velký Valtíov, lg.....	54
Obr. 37: Modelové hladiny podzemní vody a směry proudění v kolektoru 1.....	56
Obr. 38: Modelové hladiny podzemní vody a směry proudění v kolektoru 2+3.....	57





Obr. 39: Modelové hladiny podzemní vody a směry proudění v kolektoru 4.....	58
Obr. 40: Rozdíl mezi modelovou hladinou podzemní vody s čerpáním a bez čerpání podzemní vody – kolektor 2+3 .....	59
Obr. 41: Rozdíl mezi modelovou hladinou podzemní vody s čerpáním a bez čerpání podzemní vody – kolektor 4 .....	60
Obr. 42: Časové porovnání mezi modelovou hladinou podzemní vody s čerpáním a bez čerpání podzemní vody – vybrané vrty s kontinuálním sledováním .....	61
Obr. 43: Modelová infiltrace pro predikce .....	62
Obr. 44: Porovnání modelových predikcí pro scénáře V2S1-1 až V2S3-6 na vrtu 2/77 (SRN) .....	65
Obr. 45: Porovnání modelových predikcí pro scénáře V2S1-1 až V2S3-6 na vrtu 1/63 (SRN) .....	65
Obr. 46: Porovnání modelových predikcí pro scénáře V2S1-1 až V2S3-6 na vrtu 6/77 (SRN) .....	66
Obr. 47: Porovnání modelových predikcí pro scénáře V2S1-1 až V2S3-6 na vrtu RP-5 (ČR).....	66
Obr. 48: Porovnání modelových predikcí pro scénáře V2S1-1 až V2S3-6 na vrtu PL-1 (ČR) .....	67
Obr. 49: Porovnání modelových predikcí pro scénáře V2S1-1 až V2S3-6 na vrtu RP-4 (ČR).....	67
Obr. 50: Porovnání modelových predikcí pro scénáře V2S1-1 až V2S3-6 na vrtu RH-1 (ČR) .....	68
Obr. 51: Porovnání modelových predikcí pro scénáře V2S1-1 až V2S3-6 na vrtu RH-2 (ČR) .....	68
Obr. 52: Porovnání modelových predikcí pro scénáře V2S1-1 až V2S3-6 na vrtu LO12t (ČR) .....	69
Obr. 53: Porovnání modelových predikcí pro scénáře V2S1-1 až V2S3-6 na vrtu HP23t (ČR) .....	69
Obr. 54: Porovnání modelových predikcí pro scénáře V2S1-1 až V2S3-6 na vrtu RP20 (ČR).....	70
Obr. 55: Porovnání modelových predikcí pro scénáře V2S1-1 až V2S3-6 na vrtu RH-5 (ČR) .....	70
Obr. 56: Rozdíl hladin podzemní vody scénářů V2S1-1 a V2S1-2, kolektor 2, rok 2043 .....	71
Obr. 57: Rozdíl hladin podzemní vody scénářů V2S1-1 a V2S1-3, kolektor 2, rok 2043 .....	72
Obr. 58: Rozdíl hladin podzemní vody scénářů V2S1-1 a V2S1-4, kolektor 2, rok 2043 .....	73
Obr. 59: Rozdíl hladin podzemní vody scénářů V2S1-1 a V2S2-1, kolektor 2, rok 2043 .....	74
Obr. 60: Rozdíl hladin podzemní vody scénářů V2S1-1 a V2S2-2, kolektor 2, rok 2043 .....	75
Obr. 61: Rozdíl hladin podzemní vody scénářů V2S1-1 a V2S2-3, kolektor 2, rok 2043 .....	76
Obr. 62: Rozdíl hladin podzemní vody scénářů V2S1-1 a V2S2-4, kolektor 2, rok 2043 .....	77
Obr. 63: Rozdíl hladin podzemní vody scénářů V2S1-1 a V2S2-5, kolektor 2, rok 2043 .....	78
Obr. 64: Rozdíl hladin podzemní vody scénářů V2S1-1 a V2S2-6, kolektor 2, rok 2043 .....	79
Obr. 65: Rozdíl hladin podzemní vody scénářů V2S1-1 a V2S3-1, kolektor 2, rok 2043 .....	80
Obr. 66: Rozdíl hladin podzemní vody scénářů V2S1-1 a V2S3-2, kolektor 2, rok 2043 .....	81
Obr. 67: Rozdíl hladin podzemní vody scénářů V2S1-1 a V2S3-3, kolektor 2, rok 2043 .....	82
Obr. 68: Rozdíl hladin podzemní vody scénářů V2S1-1 a V2S3-4, kolektor 2, rok 2043 .....	83
Obr. 69: Rozdíl hladin podzemní vody scénářů V2S1-1 a V2S3-5, kolektor 2, rok 2043 .....	84
Obr. 70: Rozdíl hladin podzemní vody scénářů V2S1-1 a V2S3-6, kolektor 2, rok 2043 .....	85
Obr. 71: Rozdíl hladin podzemní vody scénářů V2S1-1 a V2S1-5, kolektor 2, rok 2043 .....	90
Obr. 72: Rozdíl hladin podzemní vody scénářů V2S1-1 a V2S1-6, kolektor 2, rok 2043 .....	91
Obr. 73: Rozdíl hladin podzemní vody scénářů V2S1-1 a V2S1-7, kolektor 2, rok 2043 .....	92
Obr. 74: Citlivostní analýza.....	95



## Seznam tabulek v textu:

Tab. 1: Stratigrafický profil křídy oblasti Petrovice-Lückendorf a korelace s českým názvoslovím (převzato ze zprávy Kahnt et al. 2014, upraveno).....	27
Tab. 2: Geometrie modelových vrstev .....	33
Tab. 3: Odběry podzemní vody uvažované v hydraulickém modelu .....	39
Tab. 4: Kalibrační body .....	42
Tab. 5: Přijaté hydraulické parametry nakalibrovaného modelu.....	47
Tab. 6: Vodní bilance kalibrovaného modelu, stav k r. 2012 .....	53
Tab. 7: Scénáře V2S0 až V2S3.....	63
Tab. 8: Vodní bilance stacionárních prognóz – scénáře V2S1-5 až V2S1-7 .....	88
Tab. 9: Porovnání výsledků stacionárních prognóz s limitními hodnotami .....	88
Tab. 10: Seznam parametrů testovaných citlivostní analýzou.....	94

## Seznam příloh za textem:

*Příloha 1: Přehled geologických vrstev z geologického modelu (Voight, 2013)*

## Seznam elektronických příloh (na CD):

*Příloha 2: Časové řady čerpání podzemní vody použité v hydraulickém modelu*

*Příloha 3: Detailní vodní bilance vybraných modelových scénářů*

*Příloha 4: Vybrané modelové mapové vrstvy ve formátu \*.shp*

## 1. Úvod a cíle prací

Na základě Smlouvy o Dílo č. 12CDSD100 s VÚV TGM, v.v.i., (dále jen „objednatel“) ze dne 7. 3. 2012 předkládá společnost AQUATEST a.s. (dále jen „zhotovitel“) zprávu za 2. etapu matematického modelování v oblasti Petrovice-Lückendorf-Jonsdorf-Oybin. Dílo je součástí projektu s názvem *Společně využívané podzemní vody na česko-saském pomezí (GRACE)* dotovaného z programu Cíl 3 na podporu přeshraniční spolupráce mezi Českou republikou a Svobodným státem Sasko.

V rámci předchozí první etapy (Vaněk, 2012) byl sestaven „národní“ model proudění podzemní vody opírající se zejména o data z české části území. Cílem první etapy bylo vypracování stacionárního modelu proudění podzemních vod v dané oblasti, vytipování míst pro doplnění dat pro snížení nejistoty matematického modelu a definice dat a informací, které byly požadovány od německých partnerů, nutných pro zpracování komplexní transienční simulace ve druhé etapě. Ta měla za cíl odpovědět na otázku o původu poklesů hladiny podzemní vody v minulosti a v současnosti a prognózu režimu podzemních vod v budoucnosti.

Po předání geologického modelu od firmy G.E.O.S. v prosinci 2013 byl stacionární model z první etapy aktualizován. Pro vytvoření přeshraničního hydrogeologického modelu bylo přejato německé členění kolektorů a izolátorů a německá terminologie. Vzhledem k tomu, že větší část modelové oblasti se rozkládá na české části území, byly pro definice bází kolektorů a geometrie modelových vrstev primárně používány podklady z českých zdrojů. Německé údaje z geologického modelu byly použity pro vymezení geometrie na německé části území.

Aktualizovaný stacionární model byl překalibrován obdobným způsobem jako v první etapě a následně přeložen do transienčního modelu, který byl kalibrován podle kolísání dlouhodobě pozorovaných hladin podzemní vody. V poslední fázi byl schválený kalibrováný model použit pro predikci vývoje hladin podzemní vody podle objednatelově sestavených prognózních scénářů s proměnnými odběry podzemní vody a infiltrací.

## 2. Charakteristika oblasti

### 2.1. Vymezení zájmové oblasti

Zájmové území (oblast Petrovice-Lückendorf-Jonsdorf-Oybin) tak, jak bylo vymezeno pro účely projektu GRACE objednatelem, je znázorněno na **Obr. 3**. Zájmové území zabírá plochu cca 85 km<sup>2</sup> v příhraniční oblasti států ČR a SRN při severním okraji české křídové pánve. Z geologického hlediska náleží k tzv. tlusteckému bloku.

Na severu je území ohraničeno lužickou poruchou probíhající zhruba přes obce Jitrava, Horní Sedlo, Olbersdorf, Hänischmühle, Waltersdorf a dále na západ k vrchu Ptačinec. Západní omezení území pak sleduje státní hranice k vrchu Luž a odtud pokračuje po toku Svitávky do Mařenic. Jižní hranice pokračuje z Mařenic po orografické rozvodnici přes Jezevčí vrch k Jablonnému v Podještědí a odtud dále na severovýchod k lužické poruše.

Pro účely matematického modelu byla pro snazší definici okrajových podmínek modelová oblast rozšířena jižním směrem až ke strážskému zlomu, který odděluje pokleslý tlustecký blok od strážského bloku. Rozdíl mezi vymezením zájmového území podle projektu GRACE a modelové oblasti je dobře patrný z **Obr. 3**. V textu je rozlišována „zájmová oblast“ a „modelová oblast“. Zatímco zájmovou oblastí (nebo zájmovým územím) se rozumí oblast Petrovice-Lückendorf-Jonsdorf-Oybin tak, jak je vymezena v zadání projektu GRACE, modelová oblast představuje širší území definované z hlediska možnosti přiřazení jeho hranicím vhodné okrajové podmínky. Celková plocha modelové oblasti zaujímá rozlohu 202 km<sup>2</sup>.

### 2.2. Hydrologická charakteristika

Z hydrologického hlediska spadá zájmové území do horního povodí řeky Ploučnice. Hlavním tokem odvodňujícím zájmovou oblast je Panenský potok s jeho přítoky (Valcha, Heřmanický potok, Kněžický potok), Svitávka, Krompašský potok a přítoky Ploučnice (Ještědský potok a Dubnický potok) – viz **Obr. 4**.

Panenský potok reprezentuje hlavní drenáž podzemních vod středního turonu. Jeho přítoky pak v závislosti na výšce hladiny podzemní vody mohou lokálně drénovat turonský i coniacský obzor. Panenský potok pramení ve východní části území poblíž lužické poruchy a teče západo-jih-západním směrem, přičemž modelovou oblast opouští mezi obcemi Velký Valtínov a Brniště. Z hlediska drenáže podzemních vod se částečně uplatňují zejména pravostranné přítoky Panenského potoka – Kněžický potok, Heřmanický potok a Valcha, které stékají z úbočí Lužických hor směrem k drenážní bázi tvořené plochým údolím Panenského potoka. Velikost povodí Panenského potoka v rámci modelové oblasti činí cca 121 km<sup>2</sup> a zasahuje až na území SRN. To je však z větší části odvodňováno k severu přes Lužickou poruchu drobnými vodotečemi zařízlymi do relativně hlubokých údolí v turonských páskovcích.

Jižní část modelového území je odvodňována Ještědským, Dubnickým a Zdislavským potokem, které tvoří pravostranné přítoky Ploučnice. Toto území zaujímá plochu necelých 40 km<sup>2</sup>. Úzký pruh území podél západní hranice modelové oblasti spadá do povodí Hamerského potoka.



### 2.3. Geologické poměry území

Území zahrnuje složitou tektonicky exponovanou část české křídové tabule s oproti sobě různě vyzdviženými bloky a s různě vyvinutými kolektory a izolátory spočívajícími na permokarbonském a krystalinickém podloží. Díky poklesu některých ker se svrchní křída místy zachovala v celém rozsahu od cenomanu až po santon.

Horniny cenomanu vyplňují deprese v předkřídovém reliéfu, místy je zachován sladkovodní cenoman, přes který transgreduje cenoman mořský. Cenomanské sedimenty mají převážně psamitický vývoj. Mocnost je proměnná a pohybuje se od 40 do 70 m, v blízkosti lužické poruchy nabývá až 100 m.

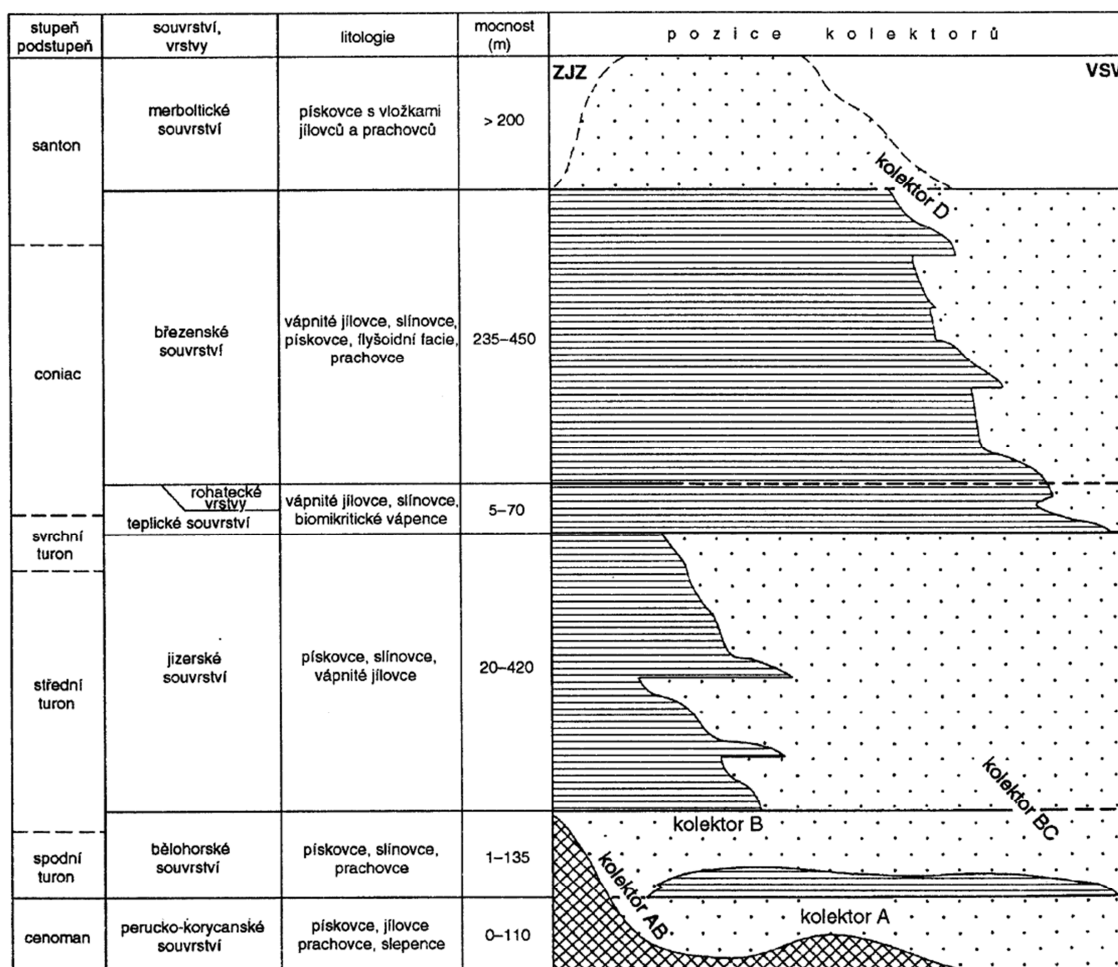
Nástup spodního turonu je detekován rychlou změnou psamitů v prachovce (potažmo jílovce a slínovce), které tvoří prakticky celé sedimentační těleso spodního turonu. Slinito-prachovitá sedimentace zde pokračovala až do středního turonu.

Sedimenty středního turonu jsou téměř v celé mocnosti tvořeny kvádrovými pískovci, převážně středně zrnitými. Jen při bázi mohou být pískovce prachovité. Při detailnějším rozboru je však v zájmovém území možné ve středně turonských pískovcích vyčlenit několik negativně gradačně zvrstvených jednotek začínajících jemnozrnnými pískovci a končících pískovci hrubozrnnými. Mocnosti pískovců středního turonu dosahují v širším zájmovém území značných hodnot (v závislosti na poklesu jednotlivých ker). Ve vrtu Lo-12Jc severozápadně od Jablonného v Podještědí byla zjištěna mocnost 455 m (Jetelová, 1972).

Svrchnoturonské sedimenty jsou zastoupeny pouze místy a jsou obtížně doložitelné. Báze svrchního turonu bývá tvořena pelity, do nadloží přibývá psamitická složka, a tudíž je obtížné vést přesnou hranici mezi svrchním turonem a spodním coniakem. Místy transgredují peliticko-psamitické sedimenty coniaku přímo na pískovce středního turonu.

Do severozápadní části území pronikají terciérní eruptiva Českého středohoří prorážející křídový pokryv. Jedná se zejména o pyroklastika zastoupená čedičovými tufy oligocénního až miocénního stáří.

V zájmovém území se uplatňují hlavní saxonské tektonické směry, které se projevují nejen v průběhu významných tektonických poruch, ale i v průběhu vodních toků. Zdaleka nejvýznamnější tektonickou linií je lužická porucha. Jedná se o poruchu přesmykového charakteru oddělující sedimenty křídové pánve od okolních geologických jednotek, podél níž jsou vztyčeny cenomanské pískovce při styku s krystalinikem. Porucha představuje relativně široké pásmo, kde se směrem do centra pánve nalézá množství sub-paralelně orientovaných dislokací poklesového charakteru. Celé toto pásmo je silně tektonicky postiženo, což má za následek vymizení izolačního účinku nevodivých hornin mezi jednotlivými kolektory. Obecně se předpokládá, že v pruhu podél lužické poruchy jsou všechny kolektory spojeny do jednoho.



Obr. 1: Pozice kolektorů a izolátorů podle českého členění (Valečka, Herčík, Herrmann, 1999)

Dalším významným zlomem je zlom strážský oddělující zapadlý tlustecký blok od bloku strážského (ten se nalézá již mimo zájmové území i modelovou oblast), ve kterém byla od poloviny 60. let prováděna otvírka a těžba uranových rud. Problematika hydraulických zásahů ve strážském bloku a jejich možný vliv na hydrogeologické poměry v modelové oblasti je řešena v rámci samostatné kapitoly (Kap. 2.6.).

O existenci tzv. „lückendorfské poruchy“, kterou v minulosti někteří němečtí geologové považovali za původce poklesů hladiny podzemní vody v tusteckém bloku (údajně měla umožňovat spojení tlusteckého bloku s hnědouhelným polským dolem Turów), nebyly získány žádné podklady a to ani z německé strany. Žádný z geologických podkladů předaných německou stranou v rámci projektu GRACE (Voight 2013, Kahnt 2014) se o „lückendorfské poruše“ nezmiňuje.

## 2.4. Hydrogeologické poměry území

Z hlediska rajonizace spadá modelové území do hydrogeologických rajonů 4640 – Křída Horní Ploučnice, 4720 – Bazální křídový kolektor východně od Hamru po Labe a 4730 – Bazální křídový kolektor v benešovské synklinále.

V zájmovém území se vyskytují dva hlavní křídové kolektory. Označení kolektorů se však ne vždy přesně kryje s jejich stratigrafickou příslušností v důsledku nestálé úrovně přechodu



spodnoturonských prachovců v kvádrové pískovce středního turonu, jelikož hranice tohoto přechodu, která zároveň reprezentuje bázi střednoturonského kolektoru, je stratigraficky proměnná. Stejně tak báze cenomanu nemusí vždy odpovídat bázi kolektoru.

Jako bazální kolektor či kolektor A (ve starších zprávách  $k\alpha$ , dle německého členění kolektor 4) bývá označován kolektor vyvinutý v cenomanských pískovcích, případně spojených s podložními karbonskými sedimenty. Hladina podzemní vody je v celé ploše kolektoru A napjatá. Výjimkou jsou výchozy kolektoru v úzkém pruhu podél lužické poruchy, kde dochází k infiltraci srážek. Odtud směřuje proud podzemní vody jižním až jihozápadním směrem k Labi, které kolektor A drénuje. Propustnost kolektoru A je převážně puklinová.

Horniny spodního turonu jsou z regionálního hlediska většinou pojímány jako izolátor oddělující cenomanský kolektor od nadložního kolektoru střednoturonského označovaného jako kolektor C (ve starších pracích  $k\gamma$ , dle německého členění kolektor 2). V novějších pracích (Herčík, Herrmann, Valečka, 2003) autoři popisují spojený kolektor BC vytvářející se v horninách spodního a středního turonu (bělohorské a jizerské souvrství) téměř v celé ploše zájmového území (v německé terminologii kolektor 2+3).

Nepropustnost meziložního izolátoru A/C (2+3/4) je pravděpodobně na mnoha místech porušena zlomy, které způsobují vzájemný posuv proti sobě různě vyzdvižených ker. Situaci dále komplikuje tektonická stavba podél lužické poruchy, kde se vlivem silného tektonického porušení hornin vytváří jediný spojený kolektor ABC s volnou hladinou podzemní vody.

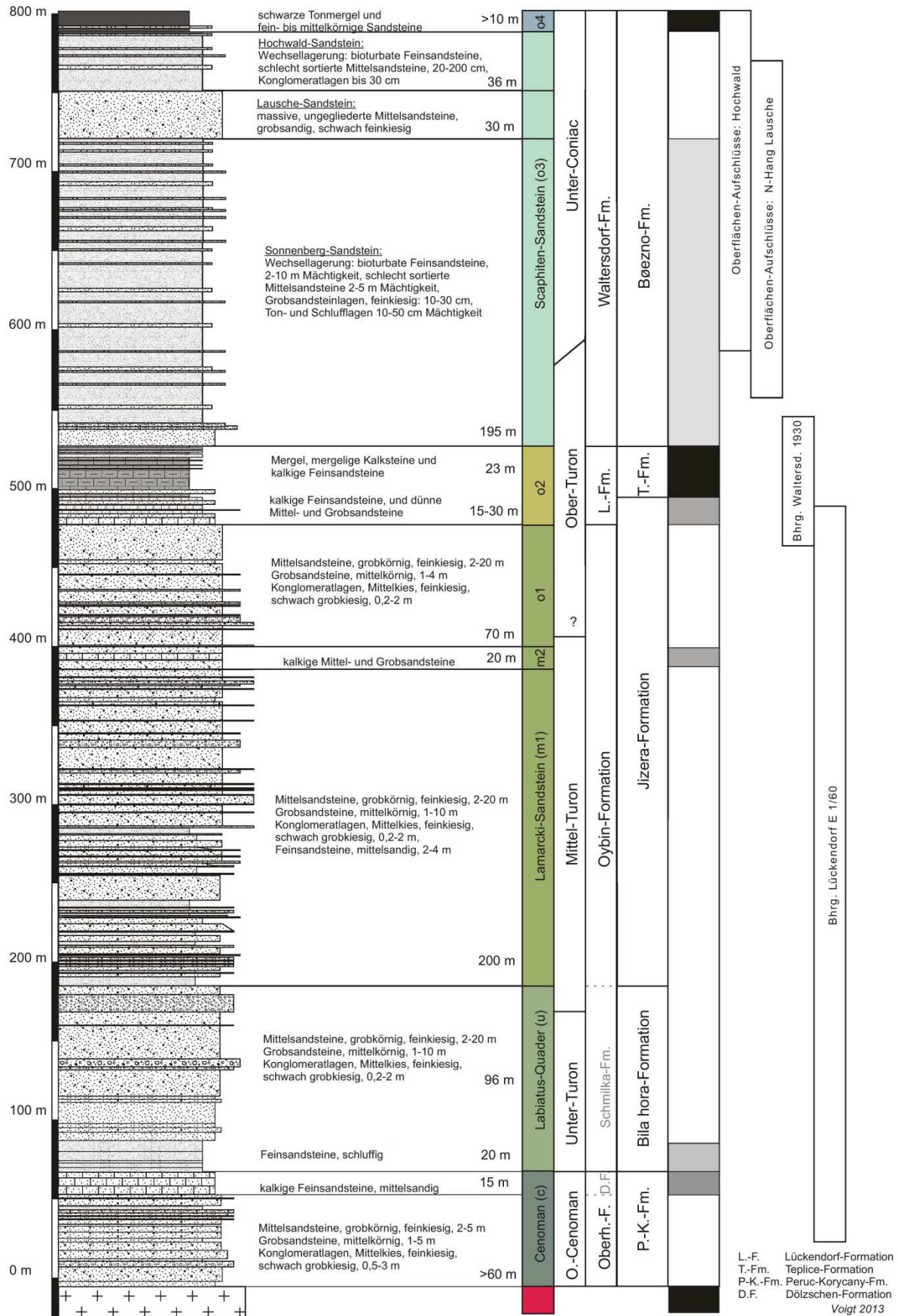
Kolektor 2+3 je dotován srážkami v celé ploše zájmového území s výjimkou míst, kde je překryt méně propustnými sedimenty svrchního turonu nebo coniauku. Hladina podzemní vody je volná, při existenci nadložního izolátoru napjatá.

Hlavní drenáží kolektoru v zájmovém území je Panenský potok a jeho pravostranné přítoky. V menší míře se drénuje ve formě menších roztržitých pramenních vývěřů ve dnech údolí. Na německé části území se kolektor 2+3 místy intenzivně odvodňuje pramenními vývěry v zařízklých údolích u lužické poruchy. Vodohospodářsky významné jsou jímací území Weissbachtal a Johanquelle ležící na lužické poruše, kde jsou zachyceny prameny o vydatnosti až 40 l/s.

Horniny coniauku (kolektor D, dle německého členění kolektor 1) bývají označovány jako komplex s přechodnou hydrogeologickou funkcí. Vlivem litofaciálních změn se v coniauku vytváří několik kolektorů drobnějšího rozsahu, které mohou být vzájemně oddělené jak v horizontálním, tak i vertikálním směru. Kolektor 1 je napájen atmosférickými srážkami a z velké míry odvodňován pramenními vývěry nad místními erozními bázemi, méně pak skrytými výrony do toků prořezávajících sedimenty coniauku.

Podle německého členění lze vymezit 2 hlavní kolektory: spojený kolektor 2+3 ve spodním a středním turonu a kolektor 4 v cenomanu (Mibus et al., 1998). Lokálně jsou nejsvrchnější výchozy křídly tvořeny kolektorem 1, který je tvořen svrchním středním turonem nebo svrchním turonem anebo coniakem (Mibus et al., 1998). Pro přehlednost při sestavování matematického modelu je používána německá terminologie (kolektor 1, 2+3 a 4, poloizolátory mezi kolektory se označují jako poloizolátor 1/2+3, 2+3/4). Spojený kolektor 2 a 3 se označuje jako kolektor 2+3. Na následujícím obrázku (**Obr. 2**) je zobrazeno srovnání stratigrafického členění křídly podle českého a německého přístupu.

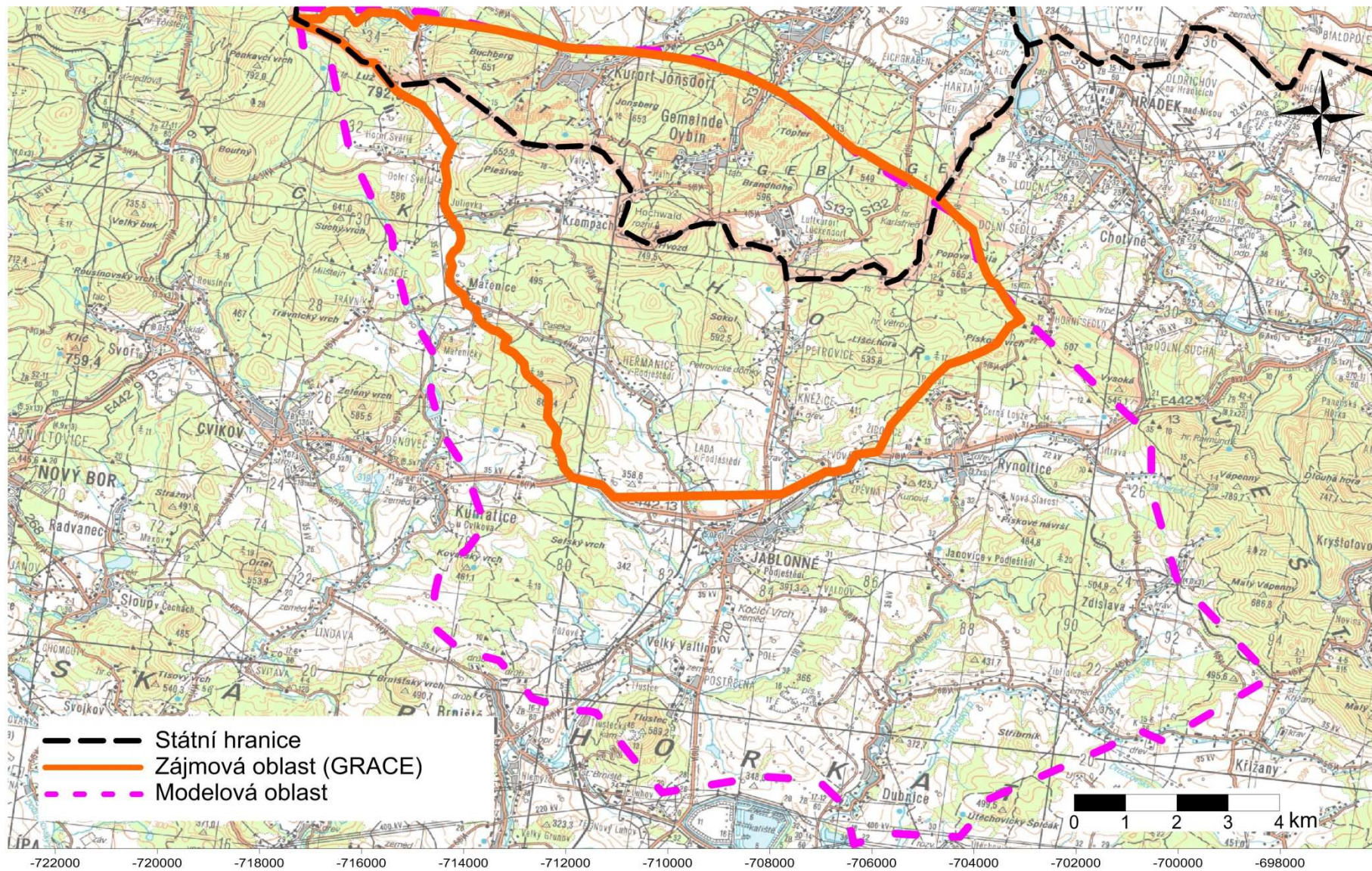
Matematický model oblasti Petrovice-Lückendorf-Jonsdorf-Oybin, 2. etapa



Obr. 2: Srovnání stratigrafického členění křídvy v zájmovém území podle německého a českého přístupu (Voigt, 2013)

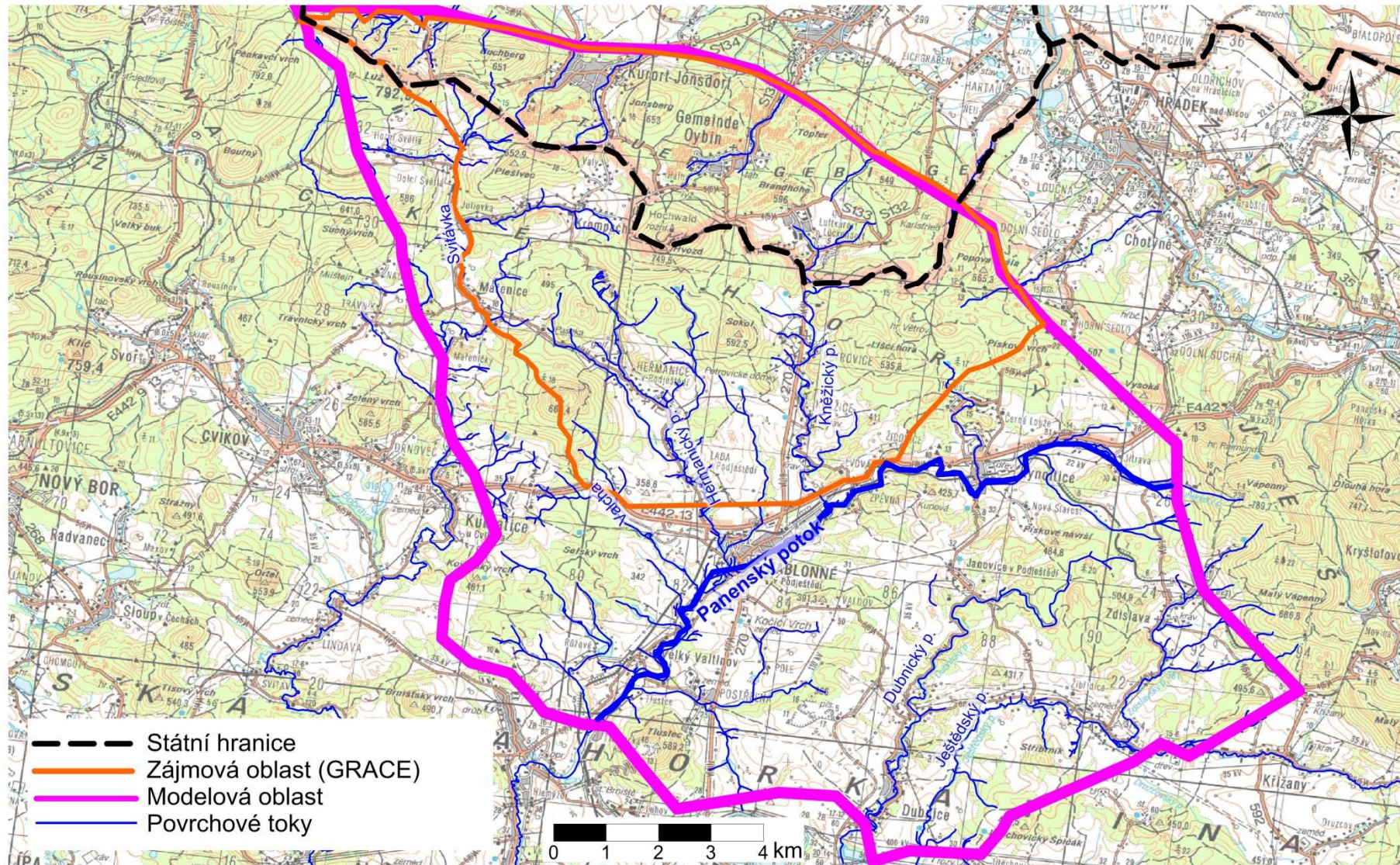






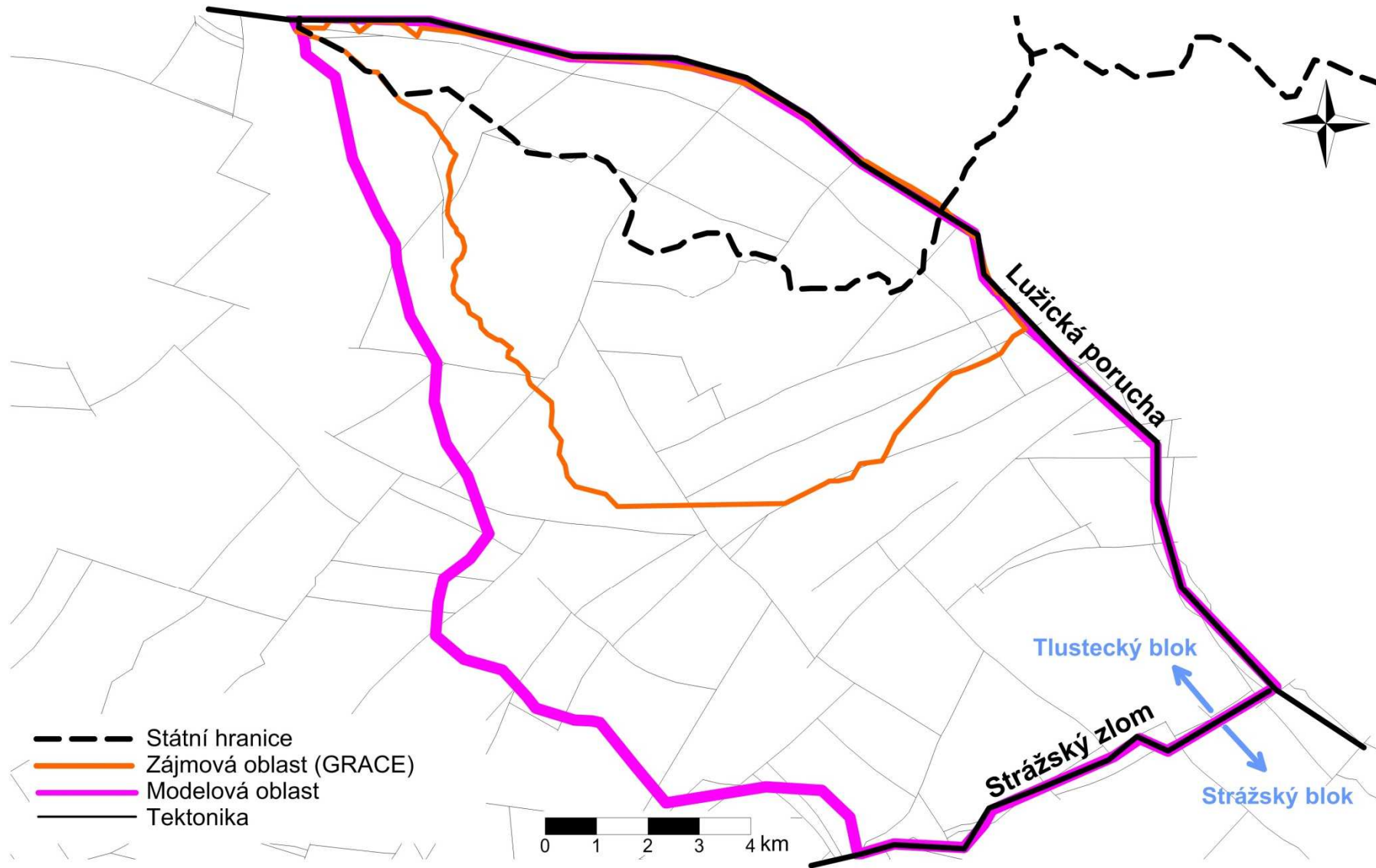
Obr. 3: Vymezení zájmového území v projektu GRACE a modelové oblasti hydraulického modelu





Obr. 4: Mapa povrchových toků

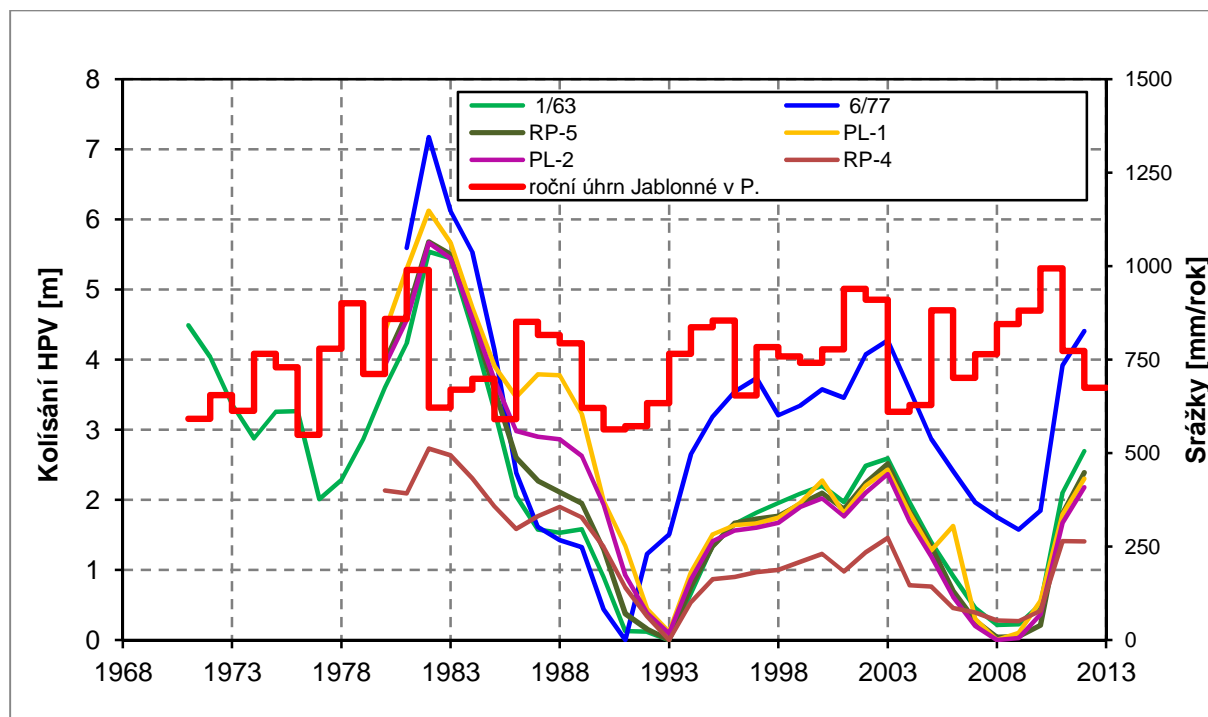




Obr. 5: Základní tektonické a strukturní schéma modelové oblasti

## 2.5. Problematika poklesů hladiny podzemní vody v tlusteckém bloku

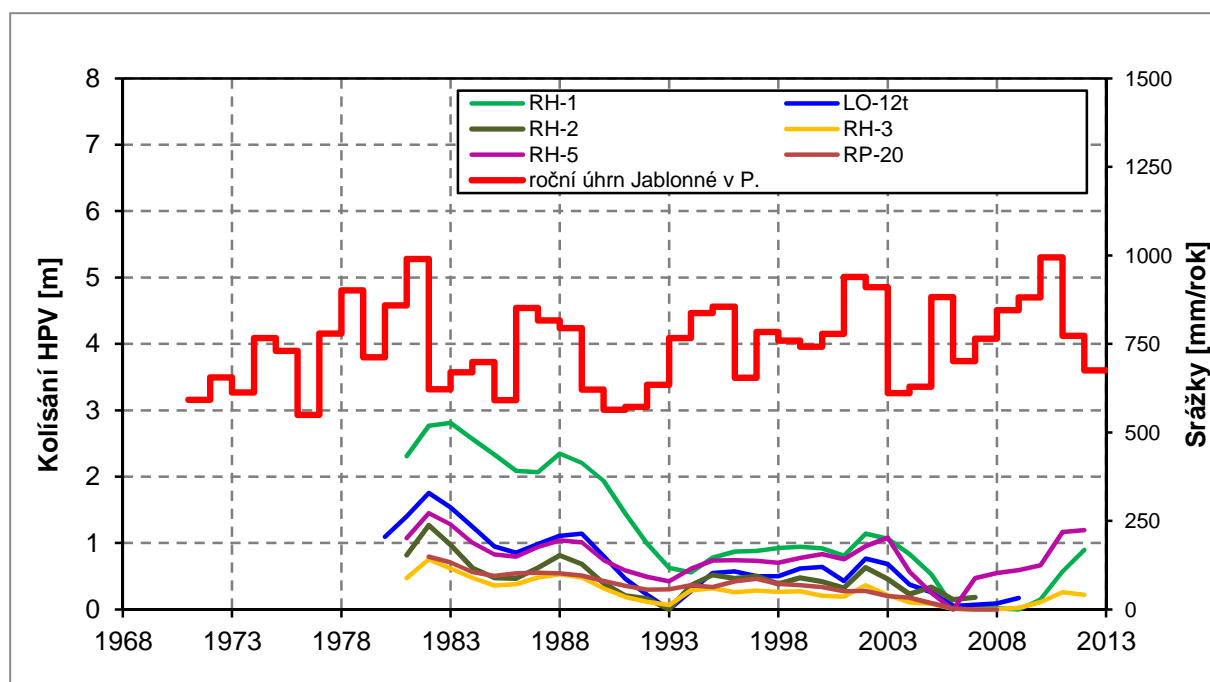
V minulosti bylo na pozorovaných vrtech v modelové oblasti dokumentováno významné kolísání hladiny podzemní vody středoturonského kolektoru (kolektor 2+3). V grafu na **Obr. 6** je toto kolísání vyjádřené ve formě změn průměrné roční hladiny podzemní vody na vrtech v oblasti Petrovice-Lückendorf. Na **Obr. 7** a jsou vyneseny taktéž změny hladiny podzemní vody zaznamenané ve vrtech tlusteckého bloku v mezipovodí Panenského potoka od Jitavy po Velký Valtínov. Na obou grafech jsou patrná dvě minima v obdobích 1991 až 1993 a 2006 až 2009. Lokalizace vrtů je vynesena do mapy na **Obr. 10**.



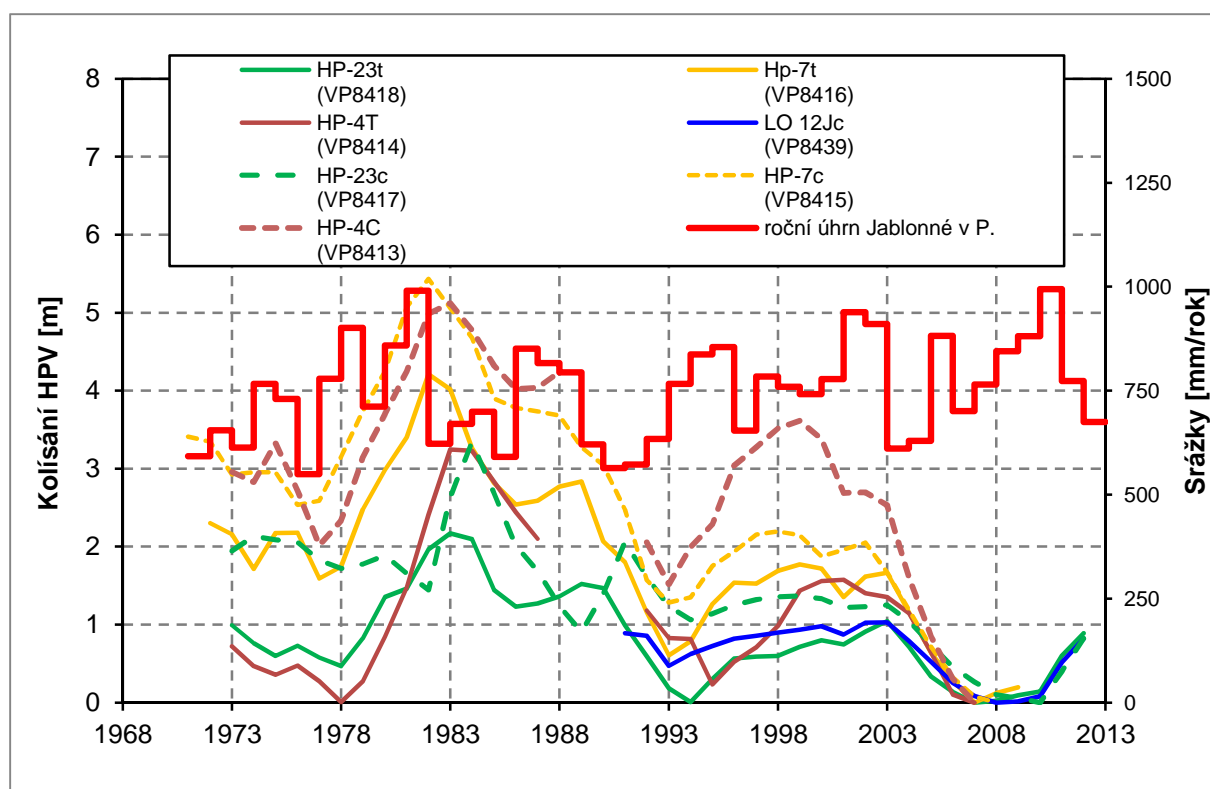
**Obr. 6:** Vývoj hladin v pozorovacích vrtech v lokalitě Petrovice-Lückendorf

V grafu na **Obr. 8** jsou vyneseny změny průměrných ročních úrovní hladiny podzemní vody v pozorovacích vrtech Českého hydrometeorologického ústavu monitorující jak kolektor turonský (2+3), tak i cenomanský (kolektor 4).

Z grafů je dobře patrný shodný trend kolísání hladiny podzemní vody ve všech pozorovaných vrtech a to včetně vrtů sledujících kolektor 4 (cenoman). Grafy také ukazují, že velký pokles hladiny podzemní vody, který začal v roce 1982, byl doprovázen relativně suchým obdobím (1982–1985), které je následně vystřídáno obdobím vlhkým (1986–1988), kdy je pokles hladin podzemní vody významně zpomalen až částečně zastaven. Po této etapě opět přichází čtyřleté suché období s velmi nízkými ročními úhrny srážek (1989–1992), které je se zhruba jednoletým zpožděním kopírováno poklesem hladiny podzemní vody v pozorovacích vrtech. V následujícím několikaletém období s vyššími srážkami však již hladina podzemní vody nenastoupala na předcházející úroveň z roku 1982.

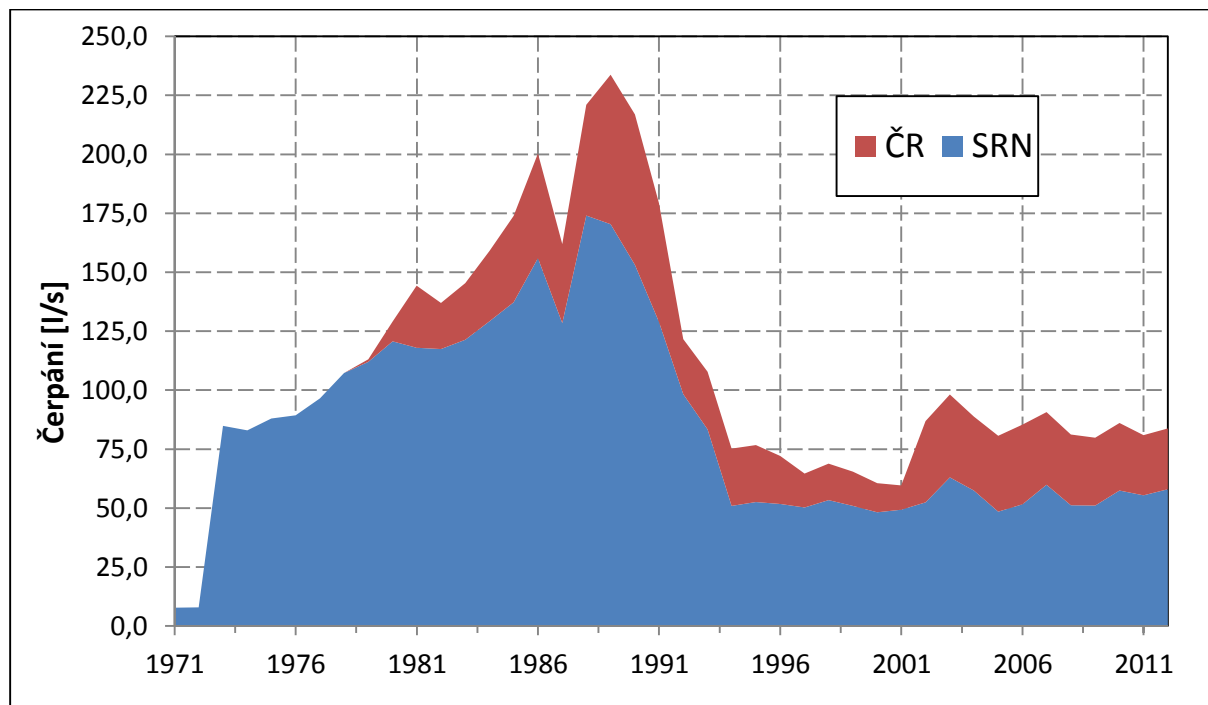


Obr. 7: Vývoj hladin v pozorovacích vrtech v mezipovodí Panenského potoka (Jitrava – Velký Valtínov)



Obr. 8: Vývoj hladin v pozorovacích vrtech ČHMÚ

Lze předpokládat, že kromě odběrů podzemních vod (**Obr. 9**) může mít velký vliv na režim podzemních vod infiltrace. Vysvětlení a predikce dalšího vývoje kolísání hladiny podzemní vody byly jedním z cílů transientního modelu a analýzy časových řad srážek, průtoků, čerpání a hladin podzemních vod.

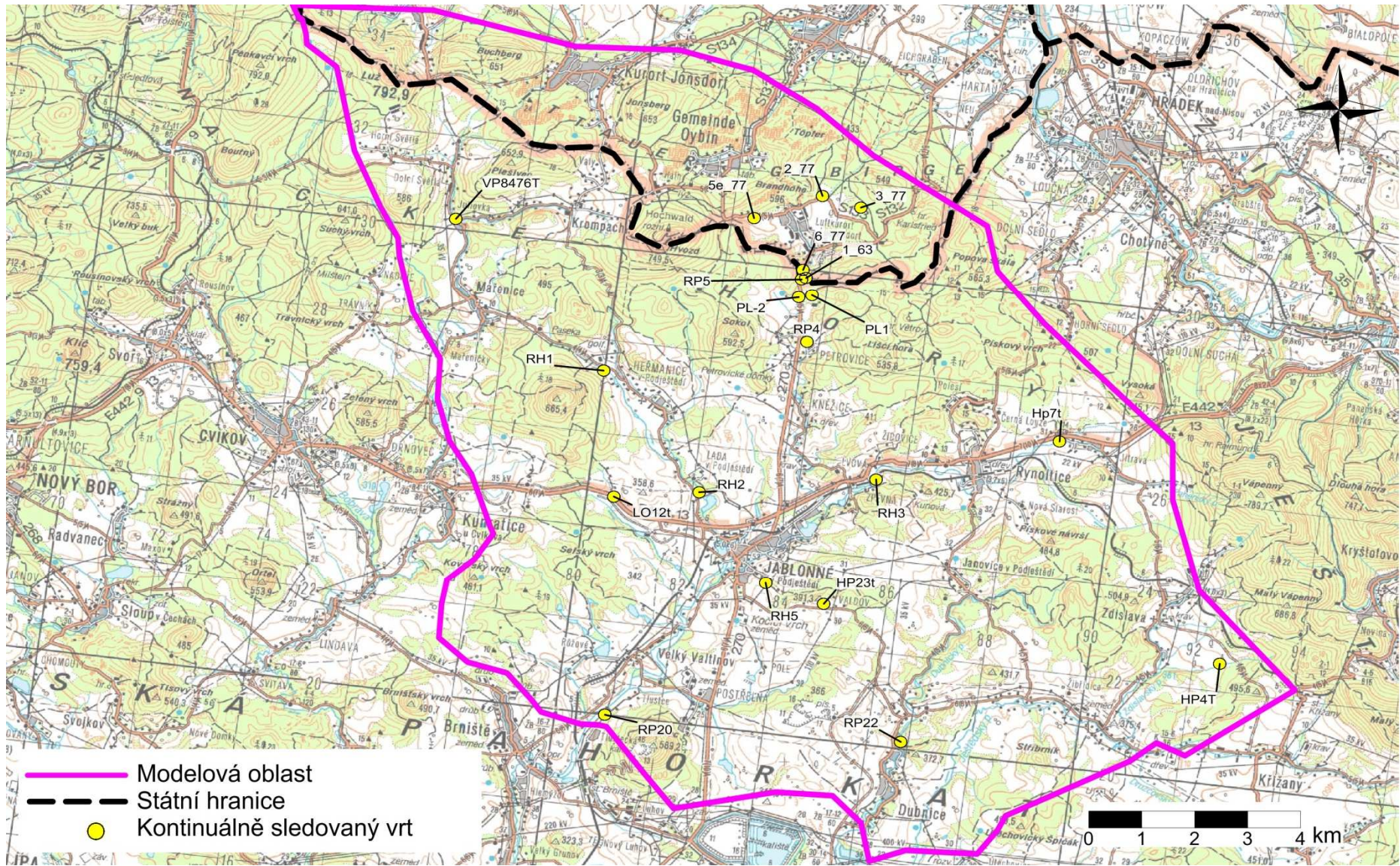


**Obr. 9: Zaznamenané čerpání podzemní vody na českém a německém území**

Pozn.: V grafu není zobrazeno jímání pramenů.

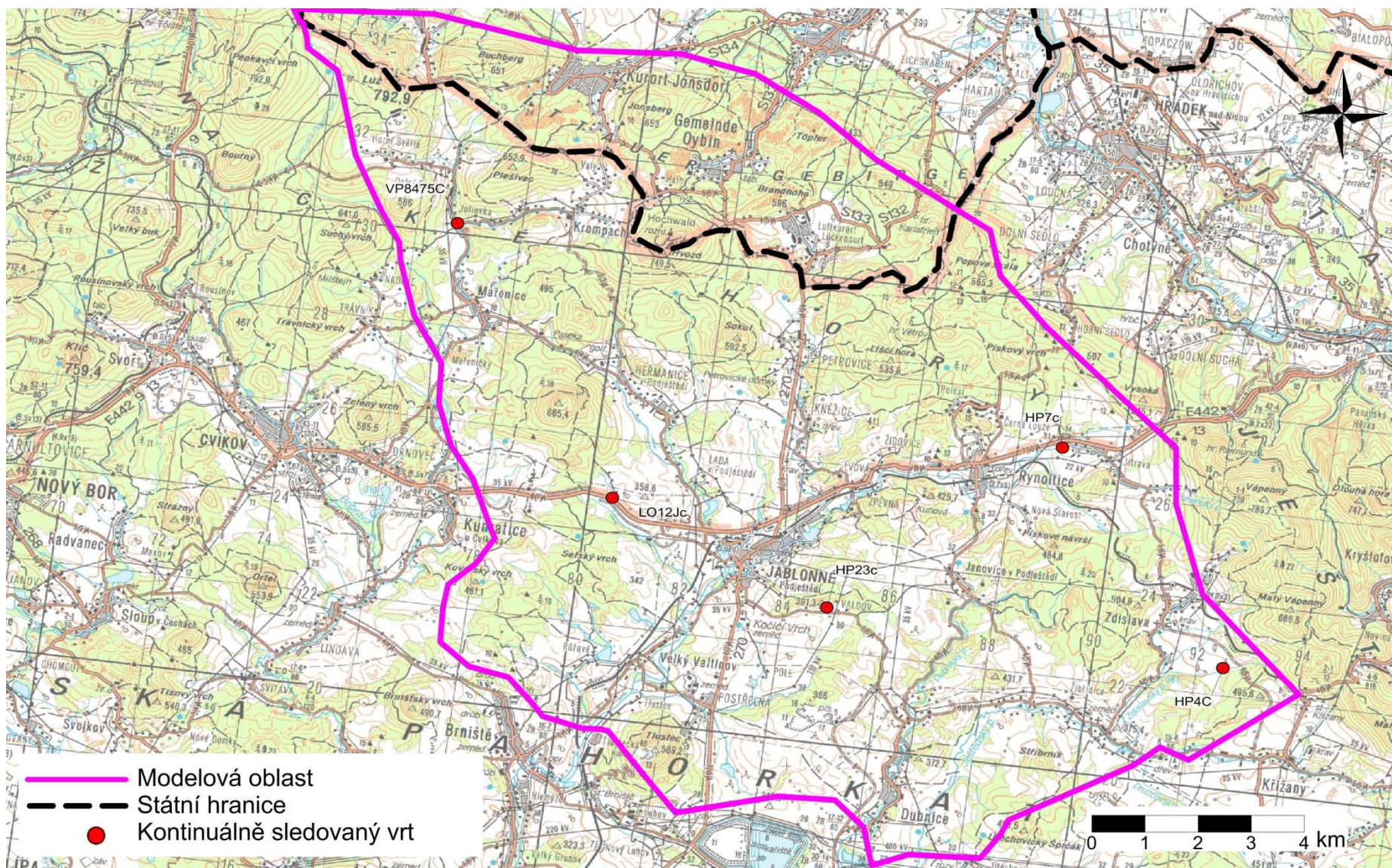
Zdroj dat: VUV TGM, v.v.i, G.E.O.S. (Mibus et al., 1998), LfULG, SČVK, a.s.





Obr. 10: Lokalizace kontinuálně sledovaných vrtů nacházejících se v modelové oblasti, kolektor 2+3 (turon)





Obr. 11: Lokalizace kontinuálně sledovaných vrtů nacházejících se v modelové oblasti, kolektor 4 (cenoman)

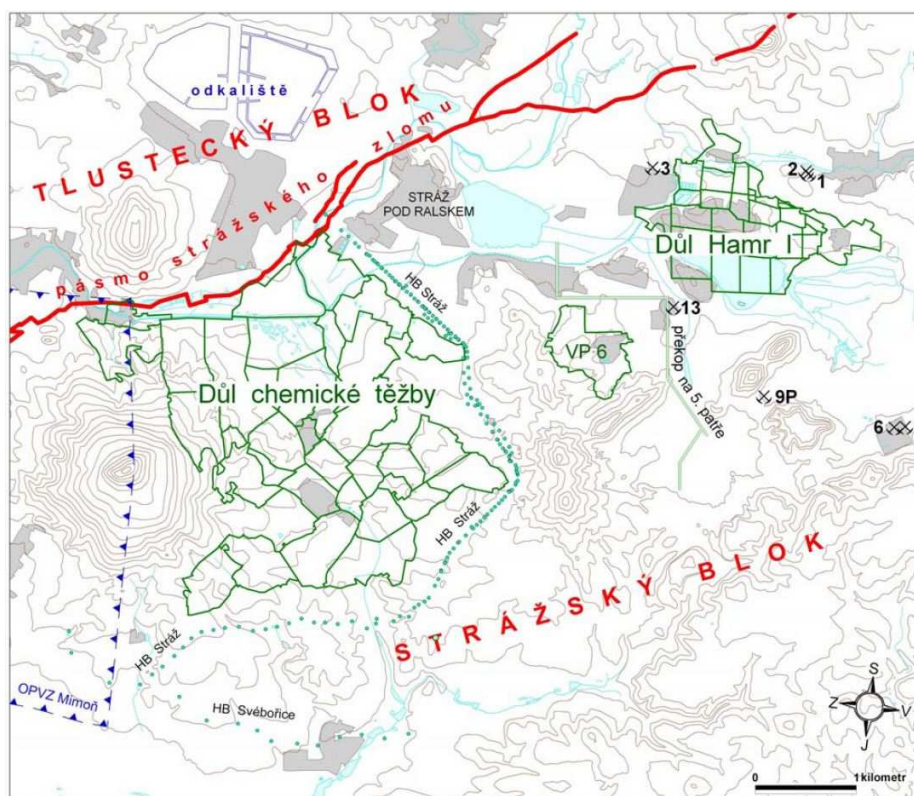


## 2.6. Problematika hydraulických zásahů ve strážském bloku

### 2.6.1 Obecně o těžbě uranu ve strážském bloku

Uranové zrudnění vázané na sedimenty cenomanu je ve strážském bloku dobýváno od 60. a 70. let minulého století. V roce 2001 byla veškerá hlubinná těžba ukončena, přičemž dochází k postupnému zatápění hlubinného dolu Hamr I (Ekert, 2008). Na bývalých vyluhovacích polích probíhá v současnosti sanace spočívající v čerpání kontaminované podzemní vody, jejím čištění a následným opětovným vtlačení v linii hydraulické bariéry. Orientačně je lokalizace oblastí těžby zobrazena na **Obr. 12**.

Oba způsoby těžby (hlubinná + hydraulická) vyskytující se v těsné vzájemné blízkosti vyžadují naprosto odlišné hydraulické poměry. Zatímco hydraulická metoda je založena na vtlačení roztoků do kolektoru (vytváří se nadbilance podzemních vod), hlubinná těžba naopak vyžaduje osušení horninového masivu. Na vzdálenosti cca 2,5 km podél strážského zlomu tak uměle vznikl rozdíl hladiny podzemní vody v cenomanské zvodni větší než 100 m (Ekert, 2008).

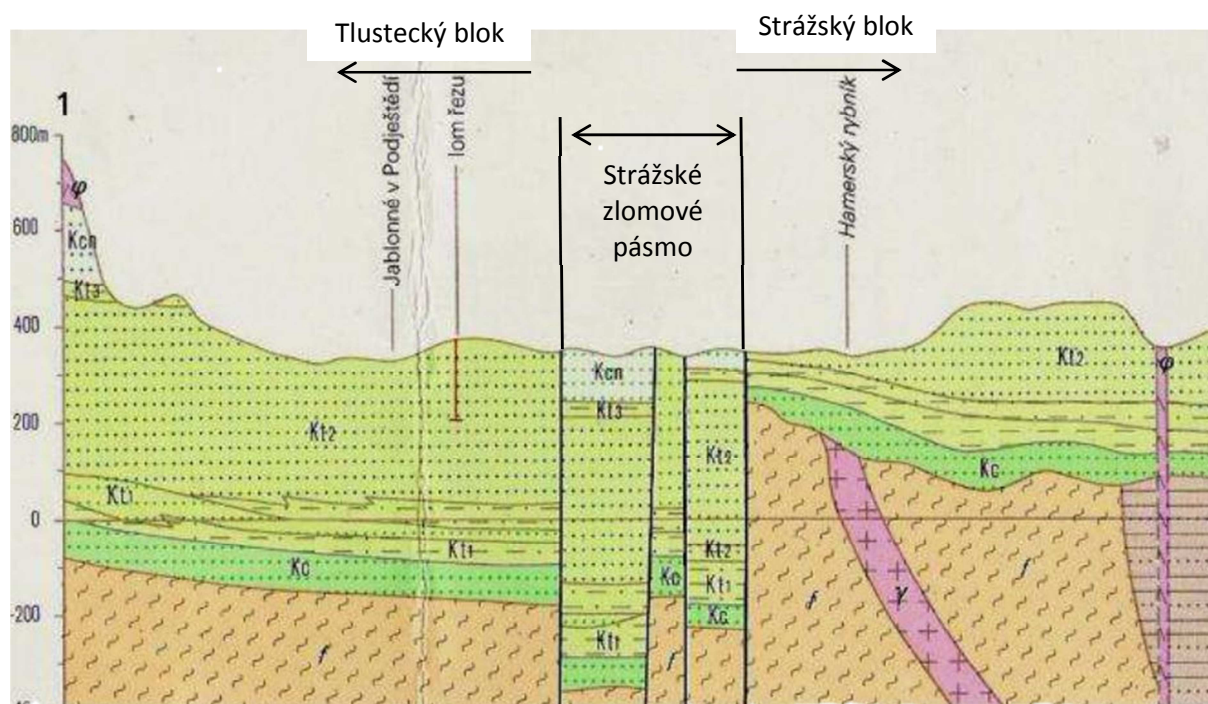


**Obr. 12:** Schematická mapka těžby ve strážském bloku a její poloha vůči tlusteckému bloku (Ekert, 2008)

V důsledku potřeby vytvoření velmi specifických hydraulických podmínek došlo v minulosti ke značnému ovlivnění piezometrických poměrů cenomanského kolektoru (kolektor 4) ve strážském bloku, které teoreticky mohou progradovat přes strážský zlom do turonské zvodně (kolektor 2+3) tlusteckého bloku.

## 2.6.2 Geologické a hydrogeologické poměry strážského zlomového pásma

Strážské zlomové pásmo představuje několik set metrů široký pruh poklesového charakteru podél strážského zlomu silně postižený dílčími subparalelními i kolmými zlomy. Pásmo od sebe odděluje zakleslý tlustecký blok od bloku strážského. Výška skoku je proměnlivá, pohybuje se však v řádu stovek metrů a místy přesahuje i 500 m (Datla 2007). V důsledku takto velikého skoku dochází na strážském zlomu ke styku cenomanské zvodně strážského bloku (kolektor 4) s turonskou zvodní tlusteckého bloku (kolektor 2+3). Na **Obr. 13** je schematický geologický řez přes strážský zlom. Hydrogeologická pozice kolektorů a izolátorů je znázorněna na **Obr. 14**.

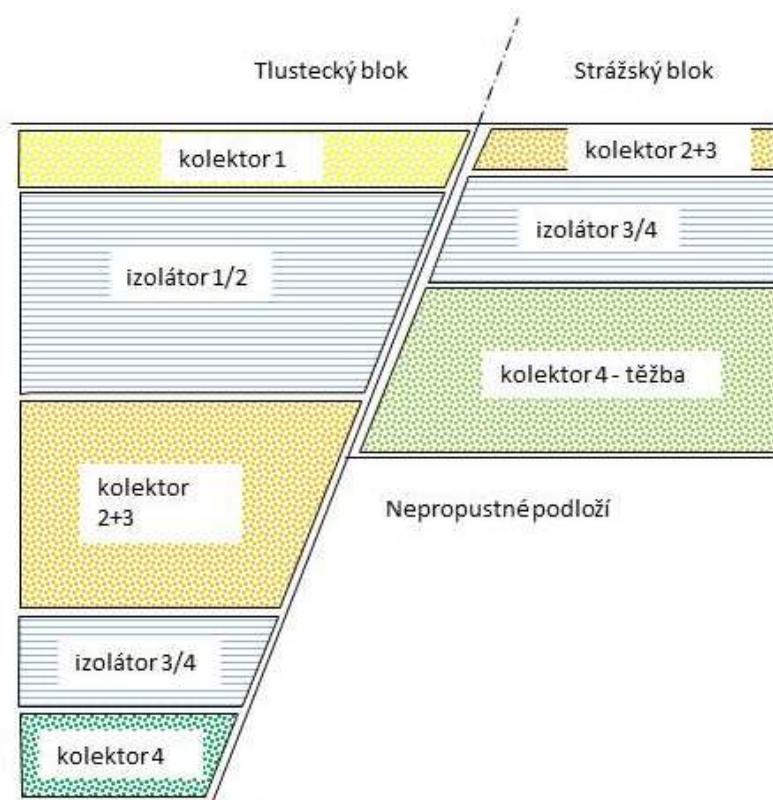


**Obr. 13: Schematický geologický řez přes strážský zlom**

Pozn.: Převzato z Datla (2007), upraveno; Kc – cenoman, Kt1 – spodní turon, Kt2 – střední turon, Kcn – coniak

Hydrogeologickou spojitostí tlusteckého a strážského bloku se v minulosti zabývala řada autorů. Z aktuálních příspěvků k této problematice je možné citovat např. Datla (2007) nebo Ekerta (2008). Z obou prací jednoznačně vyplývá, že k proudění podzemní vody mezi cenomanem strážského bloku a turonem tlusteckého bloku v současnosti nedochází a nedocházelo k němu ani v minulosti před začátkem těžby.

Tato tvrzení lze jednoduše ověřit díky informacím o hladinách podzemní vody v pozorovacích vrtech na obou stranách strážského zlomu poskytnutých s laskavým svolením společností DIAMO, s.p. Díky obrovskému množství vrtů vyhloubených v rámci průzkumu uranového ložiska je celá oblast dobře prozkoumána a nachází se v ní taktéž velké množství monitorovacích vrtů, které jsou dodnes sledovány společností DIAMO, s.p., jež celé ložisko včetně sanace polí hydraulické těžby spravuje.



Nepropustné podloží

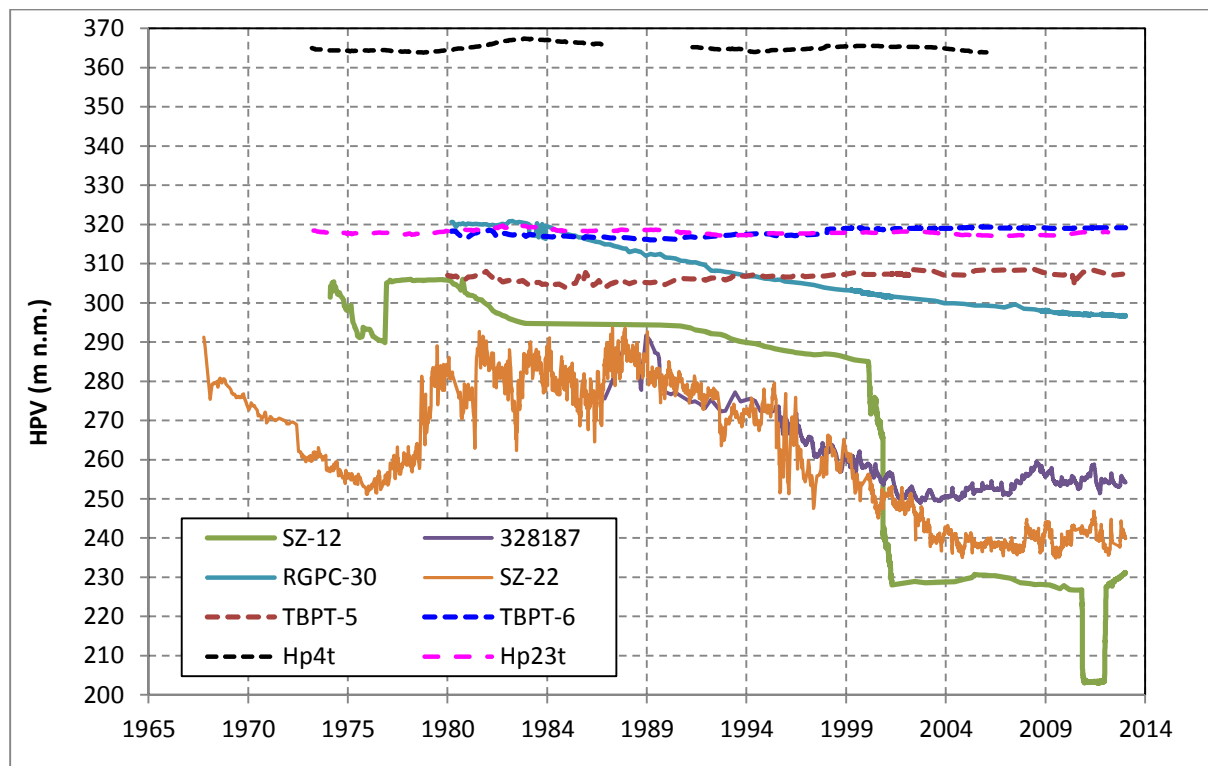
**Obr. 14: Schematický hydrogeologický řez přes strážský zlom**

Pozn.: Upraveno podle Datla (2007)

Údaje o nejnovějších hladinách podzemní vody v turonu tlusteckého bloku (kolektor 2+3) a cenomanu strážského bloku (kolektor 4) jsou vyneseny do mapy na **Obr. 16**. Z obrázku je velmi dobře vidět, že na strážském zlomu se vytváří značný gradient podzemní vody (rozdíl hladin na obou stranách zlomu dosahuje až 90 m). V současné době je v prostoru bývalé hydraulické těžby uměle vytvářena deprese podzemní vody cenomanské zvodně s hladinou podzemní vody na úrovni cca 230 m n. m. Tato deprese se přitom „opírá“ o pásmo strážského zlomu a jak je patrné z rozdílu hladin, neprograduje dále do tlusteckého bloku.

Naprosto odlišný a samostatný režim obou struktur je dobře vidět i z vývoje hladin ve výše zmíněných vrtech v čase. Časové řady hladiny podzemní vody získané od DIAMO, s.p., jsou vyneseny do grafu na **Obr. 15** a doplněny údaji z vrtů HP23t a HP4t v tlusteckém bloku. Zde se ukazuje, že vrty situované severně od strážského zlomu mají zcela odlišný vývoj hladiny podzemní vody od vrtů nacházejících se ve strážském bloku, jež jsou naopak silně ovlivněny hydraulickými zásahy spojenými s těžbou (poklesy o desítky metrů). To platí i pro vrty nacházející se velmi těsně u strážského zlomu (viz např. hladiny ve vrtech SZ-12 a TBPT-6). Z tohoto pohledu se tedy strážský zlom jeví jako **téměř dokonale nepropustný** (velmi malé proudění přes zlom nelze vyloučit) a je tedy možné konstatovat, že **výkyvy hladiny podzemní vody zaznamenané v minulosti v turonské zvodni tlusteckého bloku nemají žádnou souvislost s těžební činností ve strážském bloku** a jejími doprovodnými jevy. Je proto možné učinit závěr, že **hydraulické zásahy, které v minulosti způsobily značné narušení piezometrických poměrů v cenomanské zvodni strážského bloku, nemají žádný měřitelný vliv na hydrogeologické poměry v modelové oblasti a na modelové výsledky.**

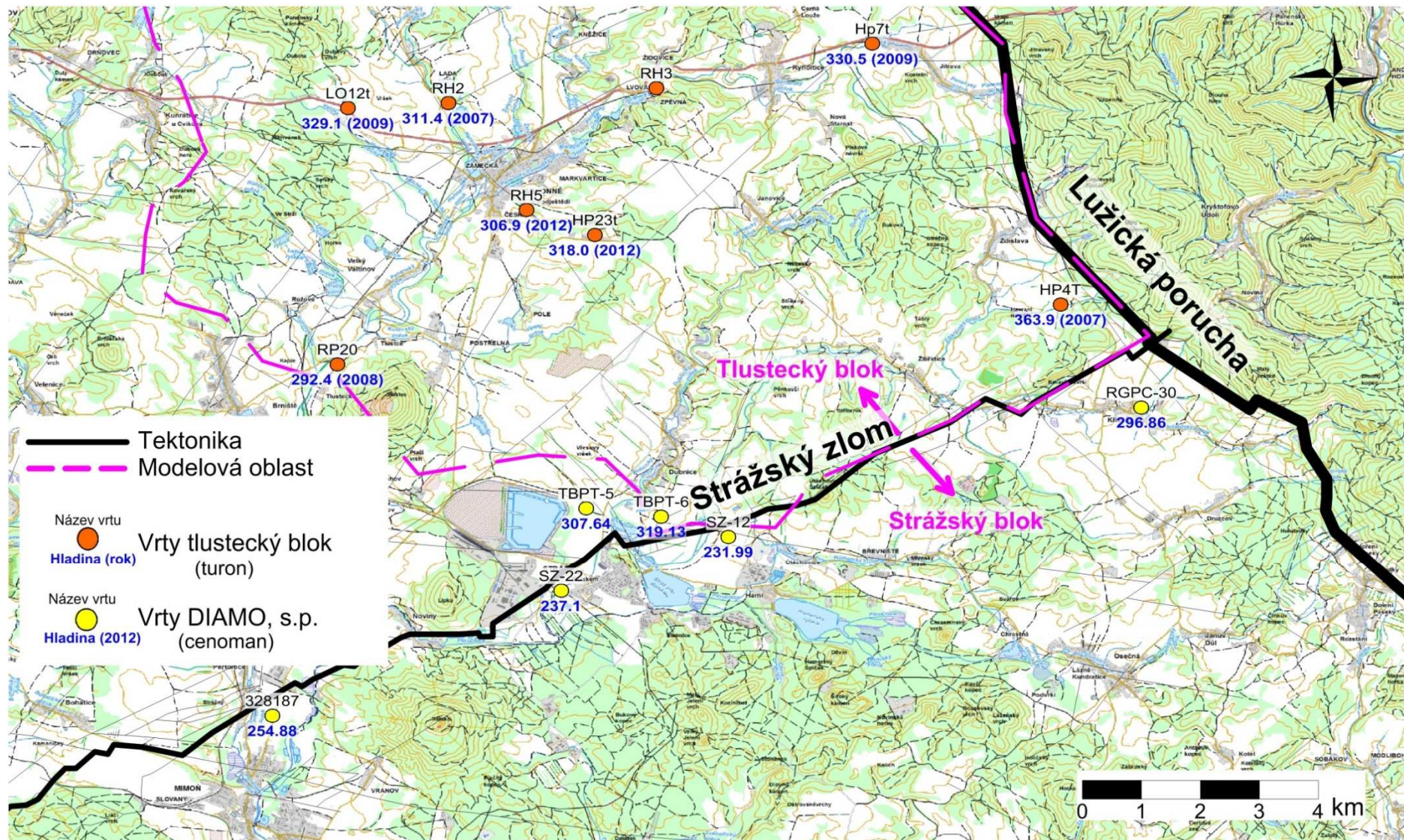
Stejně tak po ukončení sanace (zhruba v roce 2035), po kterém postupně nastoupá hladina podzemní vody cenomanu ve strážském bloku na svoji původní „neovlivněnou“ úroveň (cca 300 m n. m.), nedojde k přetoku zbytkových kyselých roztoků ze strážského bloku do tlusteckého bloku.



**Obr. 15: Vývoj hladiny podzemní vody ve strážském a tlusteckém bloku**

Vrty monitorující kolektor 4 strážského bloku jsou vykresleny spojitou čarou, vrty monitorující kolektor 2+3 v tlusteckém bloku čárkovaně.





Obr. 16: Porovnání hladiny podzemní vody v tlusteckém a strážském bloku

Zdroj dat: DIAMO, s.p



### 3. Metodika

#### 3.1. Použitý software

K výpočtu hladiny podzemní vody byl použit proudový model MODFLOW (Harbaugh, McDonald, 1996). Je to 3rozměrný model založený na metodě konečných diferencí. Modelovaná oblast se nejprve vertikálně rozdělí do vrstev a uvnitř těchto vrstev se definují elementy o obdélníkové základně. V modelované oblasti je možné definovat zdroje a odběry vody jako jsou studny, plošné zdroje z dešťových srážek, evapotranspirace, čerpané studny, drenáže, vodní toky.

Matematický model aplikuje metodu konečných diferencí na dvourozměrném poli elementů. Rovnice pro proudění v heterogenním anizotropním médiu je:

$$\frac{\partial}{\partial x} \left( k_{xx} \frac{\partial h}{\partial x} \right) + \frac{\partial}{\partial y} \left( k_{yy} \frac{\partial h}{\partial y} \right) + \frac{\partial}{\partial z} \left( k_{zz} \frac{\partial h}{\partial z} \right) = S \frac{\partial h}{\partial t} + W \quad (1)$$

kde jsou:

- $k_{xx}$  – hydraulická vodivost ve směru x, y, z
- h – hydraulická výška
- S – storativita
- W – zdroje jako funkce prostorových souřadnic a času
- t – čas
- x, y, z – prostorové souřadnice

Rovnice proudění se řeší společně s počátečními a okrajovými podmínkami pro všechny modelové elementy. Základní modelová síť je obdélník tvořený stejnými pravoúhlými prvky nestejně mocnosti. Protože skutečná modelovaná oblast je nepravidelná a menší než základní modelová síť, mohou být jednotlivé elementy ležící mimo tuto skutečnou oblast specifikovány jako neaktivní. Obecně mohou modelové elementy mít jednu z alternativních specifikací:

- aktivní elementy, tj. buňky s variabilní piezometrickou hladinou,
- elementy s konstantní hladinou (hydraulickou výškou),
- neaktivní elementy, tj. buňky ležící mimo oblast výpočtu.

Buňky s konstantní hydraulickou výškou na hranicích modelu definují I. okrajovou podmínku. Neaktivní prvky, které jsou specifikovány jako prvky ohraničující skutečnou oblast výpočtu, představují speciální případ II. okrajové podmínky modelu (hranice, přes kterou je nulový tok). Stejně tak i III. okrajovou podmínku (vtok závislý na výšce hladiny) lze definovat jako element s definovanými okrajovými podmínkami (např. řeka) v sousedství hraničního neaktivního elementu.

Vlastní hydraulický model MODFLOW je součástí programového balíku GroundWater Vistas, verze 6.34. (J. Rumbaugh, D. Rumbaugh, 1996), který slouží jako uživatelské prostředí pro převod vstupních dat do modelovacích algoritmů a grafickou interpretaci výsledků.

### 3.2. Postup a koncepce řešení

Druhá etapa matematického modelu proudění podzemní vody v oblasti Petrovice-Lückendorf-Jonsdorf-Oybin začala předáním geologického modelu od firmy G.E.O.S. (Kahnt et al., 2014), která vymezila 14 geologických vrstev na německém území. 3D definice vrstev přitom vychází z geologicko-stratigrafického modelu vytvořeného pro účely projektu GRACE (Voight, 2013). Vrstvy byly zpracovatelem, firmou G.E.O.S., označeny HGK01 až HGK14. Spojení těchto vrstev s českým vymezením jednotlivých hydrogeologických těles bylo provedeno na základě stratigrafické korelace mezi českými a německými daty – viz **Tab. 1**. Při tvorbě konceptuálního modelu byly též využity poznatky získané z dílčích částí projektu GRACE, zejména pak studie stáří a míšení vod (Šimek, 2014), studie vydatnosti pramenů (Eckhardt, 2014) a studie vlivu změny klimatu na tvorbu podzemních vod (Martínková 2014).

**Tab. 1: Stratigrafický profil křídý oblasti Petrovice-Lückendorf a korelace s českým názvoslovím (převzato ze zprávy Kahnt et al. 2014, upraveno)**

HGK	Německé názvosloví	Typ sedimentu	České názvosloví	Hydrogeologická funkce
00	Anthropogene Aufschüttung			
01	Auensedimente			
02	Blockschutt			
03	Gehängelehm			
04	Deluvialer bis glazifluviatiler Sand und Kies			
05	Vulkanite			
	Basaltoide Gänge			
06	Tuffe			
07	Waltersdorf-Formation	Sandstein	Březenské souvrství	vrstva s přechodnou HG funkcí kolektor 1 (D)
08	Lückendorf-Formation	Mergel, kalkiger Sandstein	Teplické souvrství	izolátor 1/2 (C/D)
09	Oybin-Formation	Pläner, Plänersandstein, ungliedert	Jizerské souvrství Bělohorské souvrství	kolektor 2+3 (BC)
10	Dölzschen-Formation		Perucko-korycanské souvrství	izolátor 3/4 (A/BC)
11	Oberhäslich-Formation	Konglomerat, Quadersandstein; Cenoman	Perucko-korycanské souvrství	kolektor 4 (A)
12	Ganggesteine			
13	Tonschiefer Ordovizium/Devon			
14	Biotitgranit			

Pozn.: Tučně zvýrazněny křídové vrstvy, žlutě kolektory, zeleně izolátory

Na rozdíl od oblasti 1 (Hřensko-Krinice/Kirnitsch), kde německý geologický model představoval výchozí bod pro definování geometrie hydrogeologických těles, vycházeli jsme v oblasti 2 z členění na českém území. Německé údaje byly využity pro ověření správnosti extrapolace českých bází na německé území a pro lokální korekce geometrie. Důvodem byl velmi malý počet dokumentačních bodů (geologických údajů) na německé straně území, na jejichž základě byl německý geologický model předaný firmou G.E.O.S. vytvořen. Z toho důvodu byly po dohodě s německou stranou báze kolektorů a izolátorů přepracovány. Známé báze kolektorů a izolátorů byly extrapolovány na německou část území, na níž byly následně lokálně modifikovány jejich úrovně podle dat německého modelu. Použito přitom bylo německé tektonické schéma (Voight, 2013).



V modelové oblasti byly vymezeny 3 kolektory a 2 izolátory (viz **Tab. 1**). V rámci členění modelové oblasti na jednotlivé modelové vrstvy platí pravidlo, že modelové vrstvy musí být průběžné a musí se vyskytovat v celé modelové oblasti. Vymezení kolektorů na české straně území bylo provedeno podle Herčíka et al. (1987), dat z ČGS - Geofondu a dat z archívu zhotovitele. Mocnost kolektoru 4 na německé straně území byla pro nedostatek údajů zvolena koncepčně konstantní – 90m. Strop kolektoru 2+3 tvoří na většině území povrch terénu (až na výjimky, kde jsou zachovány sedimenty coniacu tvořící kolektor 1). Rozsah a báze kolektoru 1 byly odvozeny z práce Herčíka et al. (1987) a německého geologického modelu (Kahnt et al., 2014). Pro velmi obtížnou vymežitelnost izolátoru 1/2 nebyl tento v hydrogeologickém modelu fyzicky uvažován. Jeho funkce omezující infiltraci do podložního turonského kolektoru 2+3 je simulována sníženou vertikální hydraulickou vodivostí (podrobněji popsáno v **Kap. 4.1.**).

Implementací nové geometrie byl stacionární model z první etapy aktualizován a přepracován na transientní model proudění podzemní vody, který byl kalibrován jak na jednorázově měřené hladiny podzemní vody, tak i na kolísání dlouhodobě sledovaných vrtů české a německé pozorovací sítě. Během kalibrace byly upravovány hydraulické parametry tak, aby byla dosažena dobrá shoda mezi měřenými a simulovanými hladinami podzemní vody. V poslední fázi byl schválený kalibrovaný model použit pro predikci vývoje hladin podzemní vody podle předem dohodnutých scénářů s proměnnými odběry podzemní vody a infiltrací.

## 4. Hydraulický model

### 4.1. Konceptní model

Koncepce modelu vychází ze známých geologických a hydrogeologických údajů shrnutých v **Kapitole 2**. Model simuluje proudění ve všech třech křídových kolektorech (1, 2+3, 4).

Tříkolektorový systém je napájen infiltrovaným podílem ze srážek v celé ploše modelové oblasti. Všechny kolektory se však nevyskytují v celé modelové oblasti. Infiltrovaná voda vstupuje do horninového prostředí vždy do nejvyššího existujícího kolektoru. Nejsvrchnější kolektor 1 se vyskytuje ve formě nesouvislých reliktů na ploše cca 30 % modelové oblasti (**Obr. 21**). Velmi omezeně je drénován drobnými toky a prameny. Převážná část podzemní vody přetéká do kolektoru 2+3, který je dotován i infiltrací ze srážek v místech, kde se kolektor 1 nevyskytuje. Podzemní voda v kolektoru 2+3 proudí generelně směrem k Panenskému potoku, kde je drénována. Lokálně přejímají drenážní funkci jímací území v Německu a omezeně i v ČR. V severní části území dochází k významnému odvodňování kolektoru 2+3 k lužické poruše (pramenní vývěry Johanquelle a Weissbachtal).

Z kolektoru 2+3 přetéká podzemní voda do podložního kolektoru 4 v celé jeho ploše přes poloizolátor 2+3/4. Ve zvýšené míře dochází pravděpodobně k přetoku podél lužické poruchy, kde lze vlivem tektonického porušení hornin předpokládat vymizení izolační funkce meziložního poloizolátoru. Tento efekt je však v modelu simulován pouze na krátkém úseku u jihovýchodní hranice modelové oblasti, kde jsou k dispozici relevantní pozorování dokládající tlakové poměry v jednotlivých kolektorech a kde navíc horniny kolektoru 4 vycházejí tzv. na den. Hladina podzemní vody v kolektoru 1 a 2+3 je převážně volná. Pouze v místech, kde se vyskytuje kolektor 1, lze předpokládat výskyt napjaté hladiny podzemní vody v kolektoru 2+3.

Kolektor 4 je syčen převážně přetékáním z kolektoru 2+3, okrajově pak přímou infiltrací podél lužické poruchy u Zdislavy, kde vychází až na povrch. Hlavní část proudu podzemní vody kolektoru 4 opouští modelovou oblast přes západní hranici. V jižní části modelové oblasti částečně dochází i k odvodňování do kolektoru 2+3 přes meziložní izolátor. Jak modelové, tak i pozorované hladiny podzemní vody cenomanu zde dosahují vyšší úroveň než hladiny v turonu. Hladina podzemní vody v kolektoru 4 je v celém jeho rozsahu napjatá (výjimkou je pouze úzký pruh podél lužické poruchy).

### 4.2. Okrajové podmínky

Při stanovování hranic modelové oblasti bylo třeba brát v úvahu nutnost definice vhodných okrajových podmínek. Proto byla modelová oblast rozšířena směrem k jihu až ke strážskému zlomovému pásmu, které poskytuje relativně dobrou oporu pro volbu okrajové podmínky. Vymezení modelové oblasti a zájmového území bylo již diskutováno v **Kapitole 2**, a je patrné z **Obr. 3**.

Základní síť modelu tvoří buňky (o straně 50 m) nestejně mocnosti (**Obr. 17**). Celkově má modelová oblast rozsah 19 km ve východozápadním směru a 20 km v severojižním směru.

Buňky ležící mimo oblast výpočtu byly specifikovány jako neaktivní. Každý kolektor má vlastní rozsah a schéma okrajových podmínek.

Kolektor 4 má na severní, východní a jižní hranici okrajovou podmínku nulový průtok (lužická porucha). Potenciální přítok z krystalinika podél lužické poruchy byl zanedbán. Na západní hranici, kde se předpokládá přetok podzemní vody, je předepsána okrajová podmínka průtoku na základě hydraulické výšky (okrajová podmínka III. typu *General Head Boundary – GHB*). Výška předepsané hladiny zde odpovídá regionálnímu gradientu podzemní vody podle známých údajů z vrtů ČHMÚ (vrty VP8476, L012J, HP23J) a pohybuje se v severojižním směru od 388 do 294 m n. m.

Vedení okrajové podmínky nulový průtok podél lužické poruchy na německém území bylo vymezeno podle definice zájmového území na základě dat VUV TGM, v.v.i., na českém území podle aktuální geologické mapy ČGS. Na jihovýchodní hranici, kterou tvoří zlomy strážského zlomového pásma oddělující tlustecký blok od přilehlého strážského bloku, byla hydraulická komunikace rovněž zanedbána. Vzhledem ke značnému skoku na strážském zlomu, podél něhož je tlustecký blok oproti strážskému bloku pokleslý až o 400 m, dostávají se zde sedimenty cenomanu tlusteckého bloku do styku s krystalinikem na druhé straně zlomu.

Kolektor 2+3 je stejně jako kolektor 4 na severu, východě a jihovýchodě omezen hranicí s nulovým průtokem (**Obr. 20**). Potenciální přítok z krystalinika podél lužické poruchy byl opět zanedbán. Vedení okrajové podmínky nulového průtoku podél lužické poruchy bylo stanoveno stejným způsobem jako u kolektoru 4.

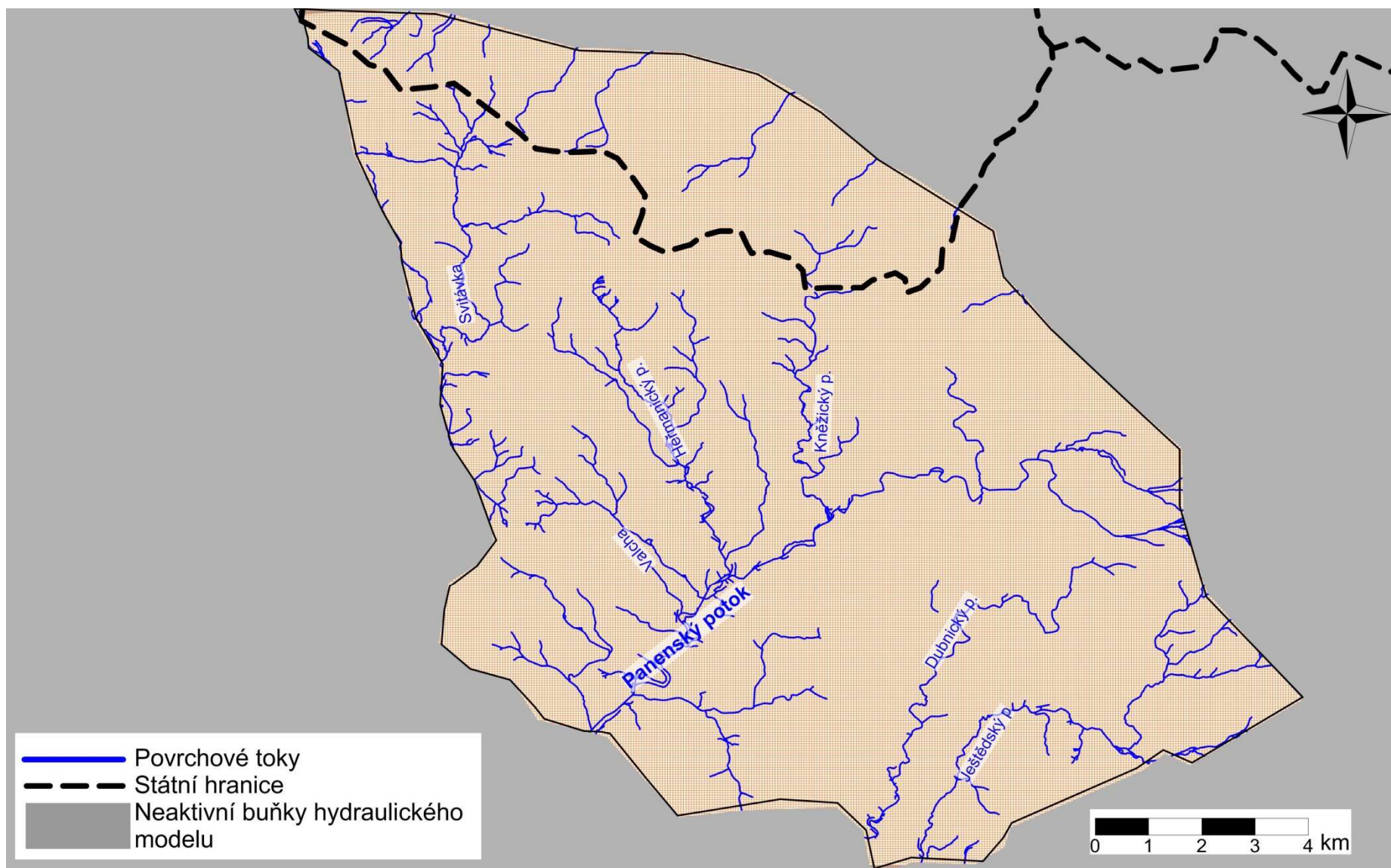
Na jižní hranici, kterou představuje strážský zlom (**Obr. 20, Obr. 5**), dochází ke styku turonu tlusteckého bloku (kolektor 2+3) s cenomanem strážského bloku (kolektor 4). Teoreticky zde tedy existuje možnost přetoku podzemní vody přes modelovou hranici. Jak ale vyplývá z porovnání úrovní hladiny podzemní vody a jejich kolísání na obou stranách zlomu (**Kap. 2.6.**), lze strážský zlom považovat prakticky za nepropustný.

Dále jsou v kolektoru 2+3 předepsány okrajové podmínky typu „studna“ s časově proměnnou velikostí čerpání podle skutečně zaznamenaných odběrů jak na české, tak i německé straně území v letech 1971–2012. Vodárensky významné odběry z pramenních vývěrů (Johanquelle, Weissbachtal), jsou modelovány pomocí okrajové podmínky typu „drén“ s výškou drenážní úrovně podle informací ze zprávy G.E.O.S. (Mibus, 1998). Přehled uvažovaných jímacích území je uveden v **Tab. 3** na straně 39, jejich poloha je znázorněna na mapce na **Obr. 22**. V grafu na **Obr. 9** jsou vyneseny souhrnné hodnoty odběrů podzemní vody za uvedené modelované období 1971–2012.

V kolektoru 2+3 jsou modelovány povrchové toky pomocí okrajové podmínky typu „drén“, která umožňuje drenáž podzemní vody do povrchového toku v případě, že hladina podzemní vody vystoupí nad úroveň definovaného dna dané okrajové podmínky. Použity byly odpovídající nadmořské výšky z digitálního modelu terénu poskytnutého zadavatelem a německou stranou. Hodnoty konduktance okrajových podmínek byly předmětem kalibrace modelu. Okrajové podmínky simulující povrchové toky byly v kolektoru 2+3 zadány pouze tam, kde tento kolektor vychází na povrch. V oblastech, kde je uvažováno jeho překrytí nadložním kolektorem 1, jsou povrchové toky modelovány pouze v nejvyšším kolektoru.

Kolektor 1 je omezen ve všech jeho modelovaných separátních oblastech okrajovou podmínkou nulového průtoku přes hranici. Dále jsou v něm modelovány povrchové toky pomocí okrajové podmínky typu „drén“ za použití odpovídajících nadmořských výšek z digitálního modelu terénu poskytnutého zadavatelem a německou stranou. V kolektoru 1 je uvažován odběr podzemní vody pouze z jednoho jímacího zdroje (SČVK Kunratice u Cvikova).





Obr. 17: Diskretizace modelové sítě



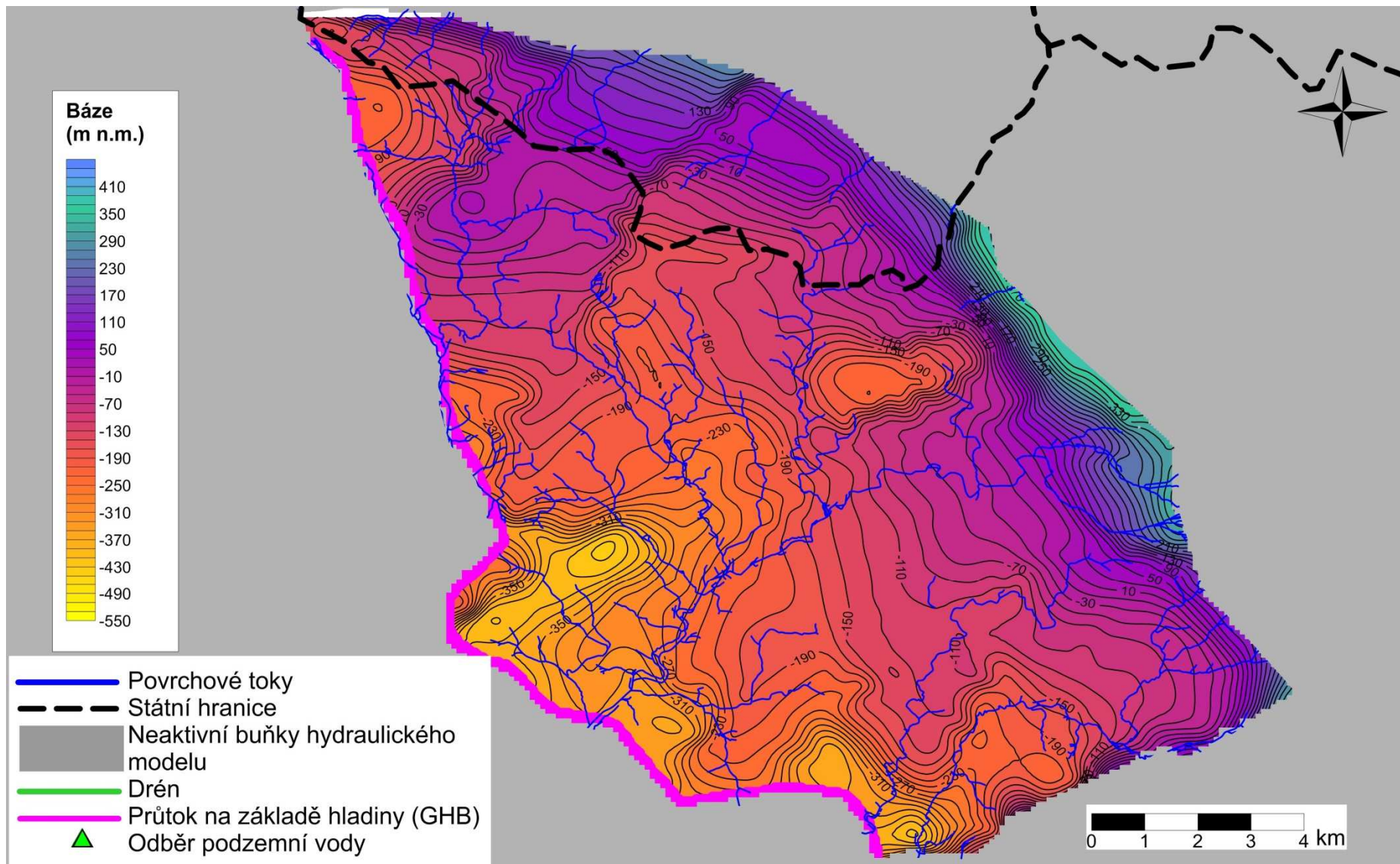
### 4.3. Geometrie a typ vrstev

Hydraulický model byl uvažován jako čtyřvrstevný (**Tab. 2**). Všechny báze spadají generelně od severu až severovýchodu k jihu až jihozápadu (tzn. od lužické poruchy směrem do centra pánve).

Nejvyšší modelová vrstva 1 reprezentující kolektor 1 byla zadána jako vrstva s volnou hladinou. Vrstva 2 (kolektor 2+3) je typu 3, tzn. kolektor s volnou nebo napjatou hladinou (transmisivita je počítána na základě zadané hydraulické vodivosti a závislosti na charakteru hladiny podzemní vody – volná/napjatá – buď ze zvodnělé mocnosti, nebo z celkové mocnosti kolektoru). Vrstva 3 a 4 (izolátor 3/4 a kolektor 4) byly zadány jako vrstvy s napjatou hladinou. Souhrnný přehled všech modelových vrstev včetně odkazů na příslušné vyobrazení jejich bází je uveden v **Tab. 2**. Poloizolátor 1/2 není v modelu fyzicky uvažován jako samostatná modelová vrstva z důvodu jeho obtížného vymezení a nedostatku informací o jeho rozsahu. Jeho funkce je simulována pomocí snížené vertikální hydraulické vodivosti kolektoru 1, kterou je omezeno přetékání do kolektoru 2+3.

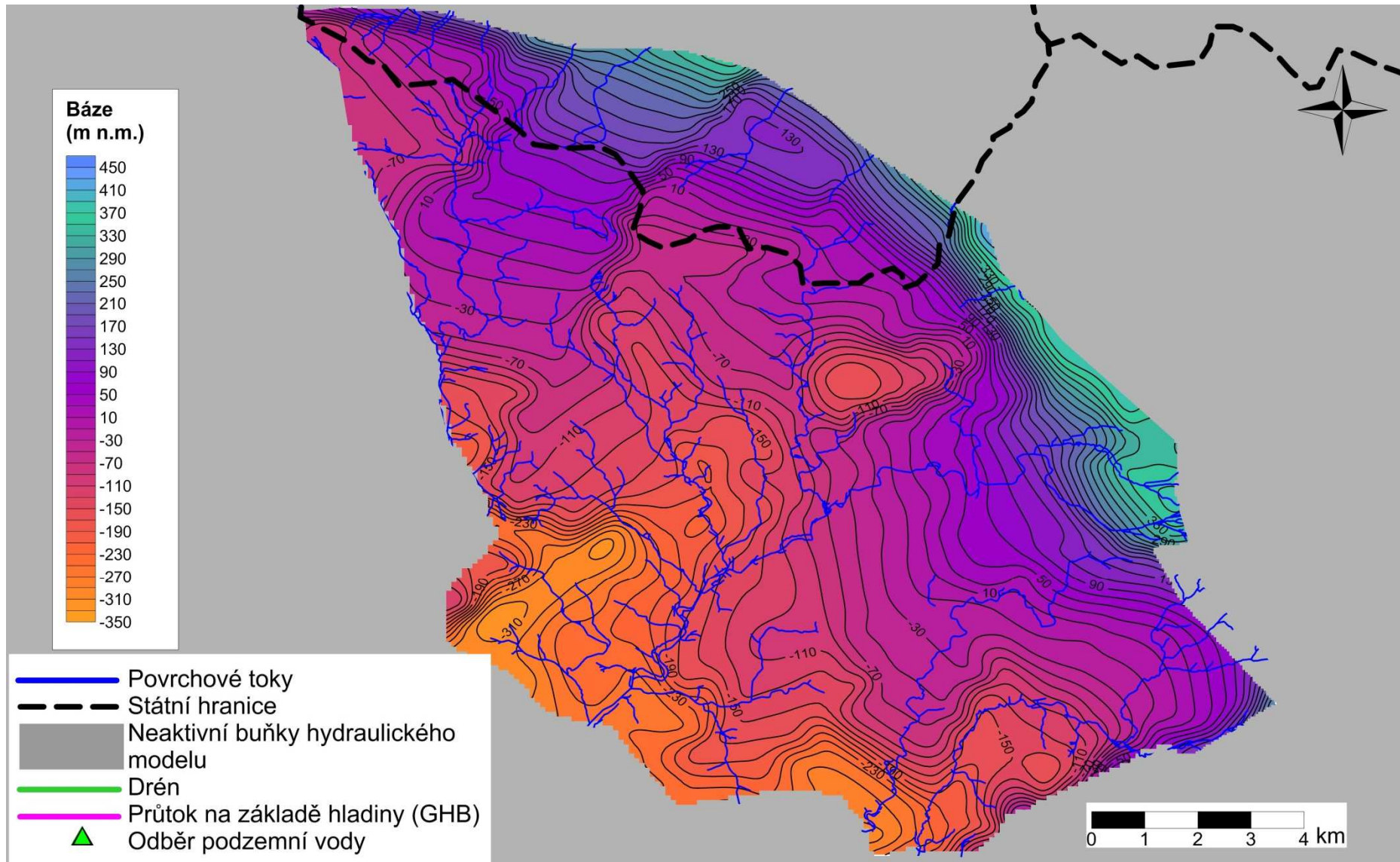
**Tab. 2: Geometrie modelových vrstev**

Modelová vrstva	Hydrogeologické zařazení	Typ vrstvy	Mapa báze
1	Kolektor 1	1 – volná hladina	<b>Obr. 21</b>
2	Kolektor 2+3	3 – volná/napjatá hladina	<b>Obr. 20</b>
3	Poloizolátor 3/4	0 – napjatá hladina	<b>Obr. 19</b>
4	Kolektor 4	0 – napjatá hladina	<b>Obr. 18</b>



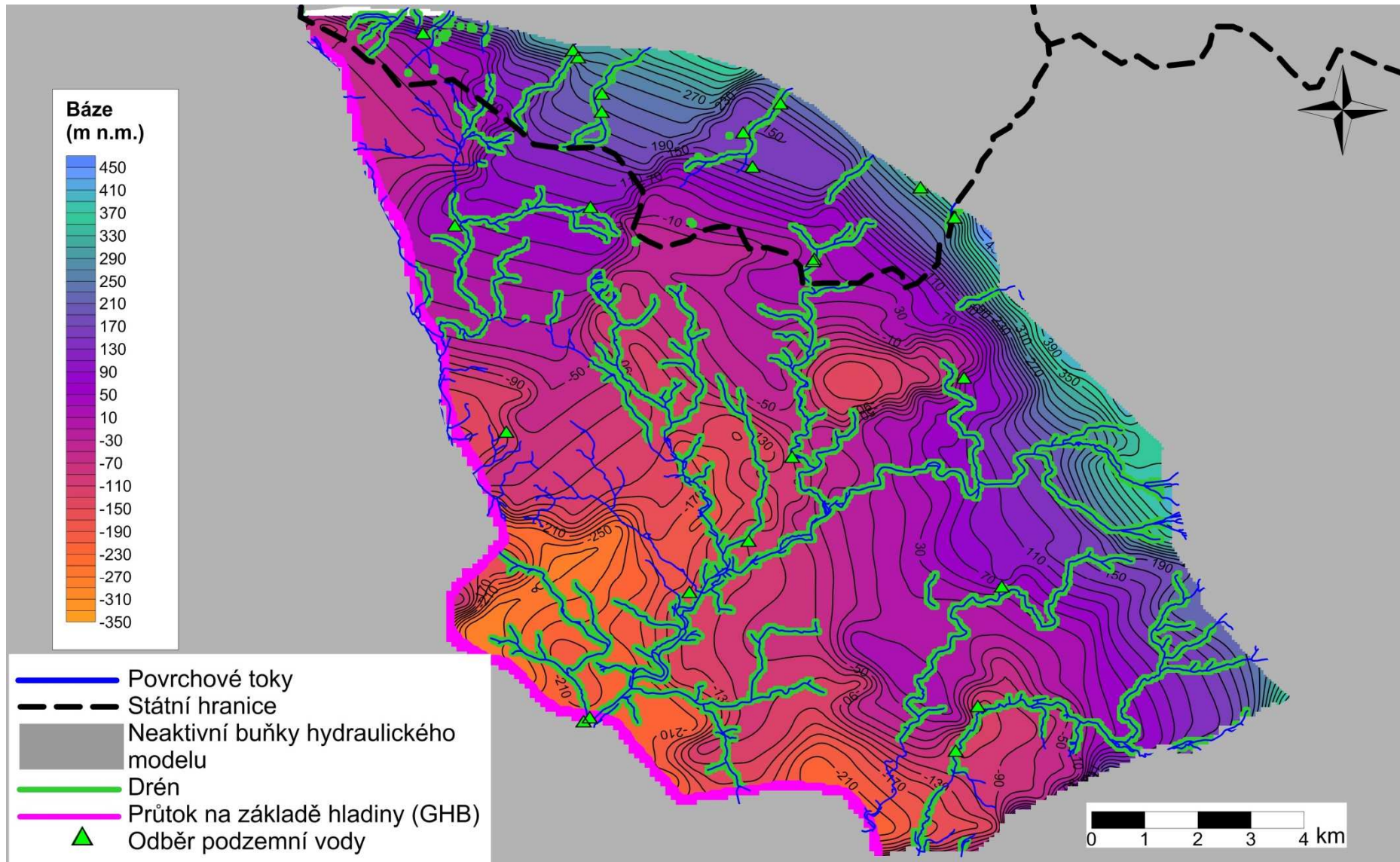
Obr. 18: Mapa báze kolektoru 4 a okrajové podmínky



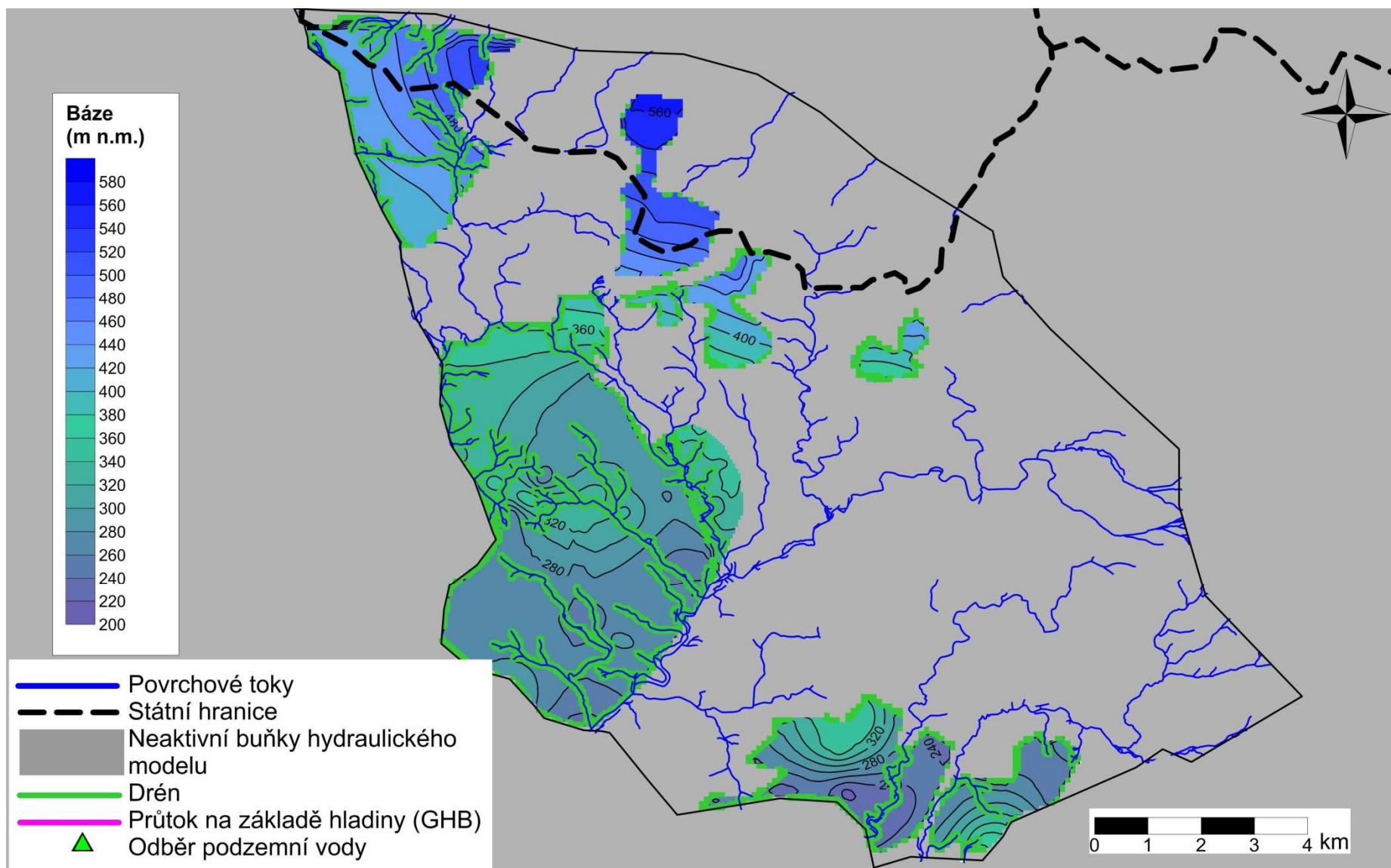


Obr. 19: Mapa báze izolátoru 2+3/4 a okrajové podmínky





Obr. 20: Mapa báze kolektoru 2+3 a okrajové podmínky



Obr. 21: Mapa báze kolektoru 1 a okrajové podmínky

#### 4.4. Vstupní parametry

V modelu byla zvolena diskretizace domény v čtvercových buňkách o délce strany 50 m. Aktivních buněk je 265 318. Aktivní plocha modelu je 202,3 km<sup>2</sup>. Pravidelnost sítě po celé doméně je pro použité numerické metody nejvhodnější.

Infiltrace do modelu byla oproti 1. etapě zadána v čase proměnná. Počáteční hodnota byla převzata z první etapy modelování (Vaněk, 2012) Stanovení kolísání infiltrace bylo předmětem kalibračního procesu (viz. **Kap. 4.5.**).

Hydraulická vodivost byla ve všech modelových vrstvách zadána konstantní v celé ploše. Počáteční hodnoty horizontální hydraulické vodivosti kolektorů byly uvažovány v řádu  $1 \cdot 10^{-6}$  až  $1 \cdot 10^{-5}$  m/s, u izolátorů, resp. vertikální hydraulické vodivosti byly zadány počáteční hodnoty o dva řády nižší. V průběhu kalibrace byly tyto hodnoty měněny, přičemž se pro dobrou shodu modelových a měřených hladin podzemní vody ukázalo jako nutné uvažovat v rámci jednotlivých modelových vrstev zóny s odlišnou hodnotou jak horizontální, tak i vertikální hydraulické vodivosti. Výsledné hodnoty  $k_x$  a  $k_z$  a pro všechny modelové vrstvy jsou uvedeny v **Kap. 4.5.**

Pro kolektory byla předpokládána efektivní porozita 0,10 a pro poloizolátory 0,02. Specifická storativita napjatých vrstev byla uvažována  $1 \cdot 10^{-4}$  m<sup>-1</sup>. Přehled výsledných hydraulických parametrů nakalibrovaného modelu je uveden v **Tab. 5** a je patrný i z **Obr. 31** až **Obr. 34**.

Transientní hydraulický model začíná v roce 1950 dvacetiletým obdobím, které slouží pro ustálení proudění (stanovuje počáteční hladiny podzemní vody pro transientní model). Transientní model končí v roce 2012. Časový krok změn všech okrajových podmínek (čerpání, infiltrace) je 1 rok. Vlastní transientní výpočet běží v kroku několika dní až prvých desítek dní (kratší časové kroky výpočtu následují automaticky vždy po změně hodnot okrajových podmínek).

Prognózní scénáře, které jsou založeny na kalibrovaném transientním modelu, začínají v roce 2013 a končí v roce 2043. Časová diskretizace je v prognózních scénářích shodná s výše popsanou diskretizací transientní kalibrace.

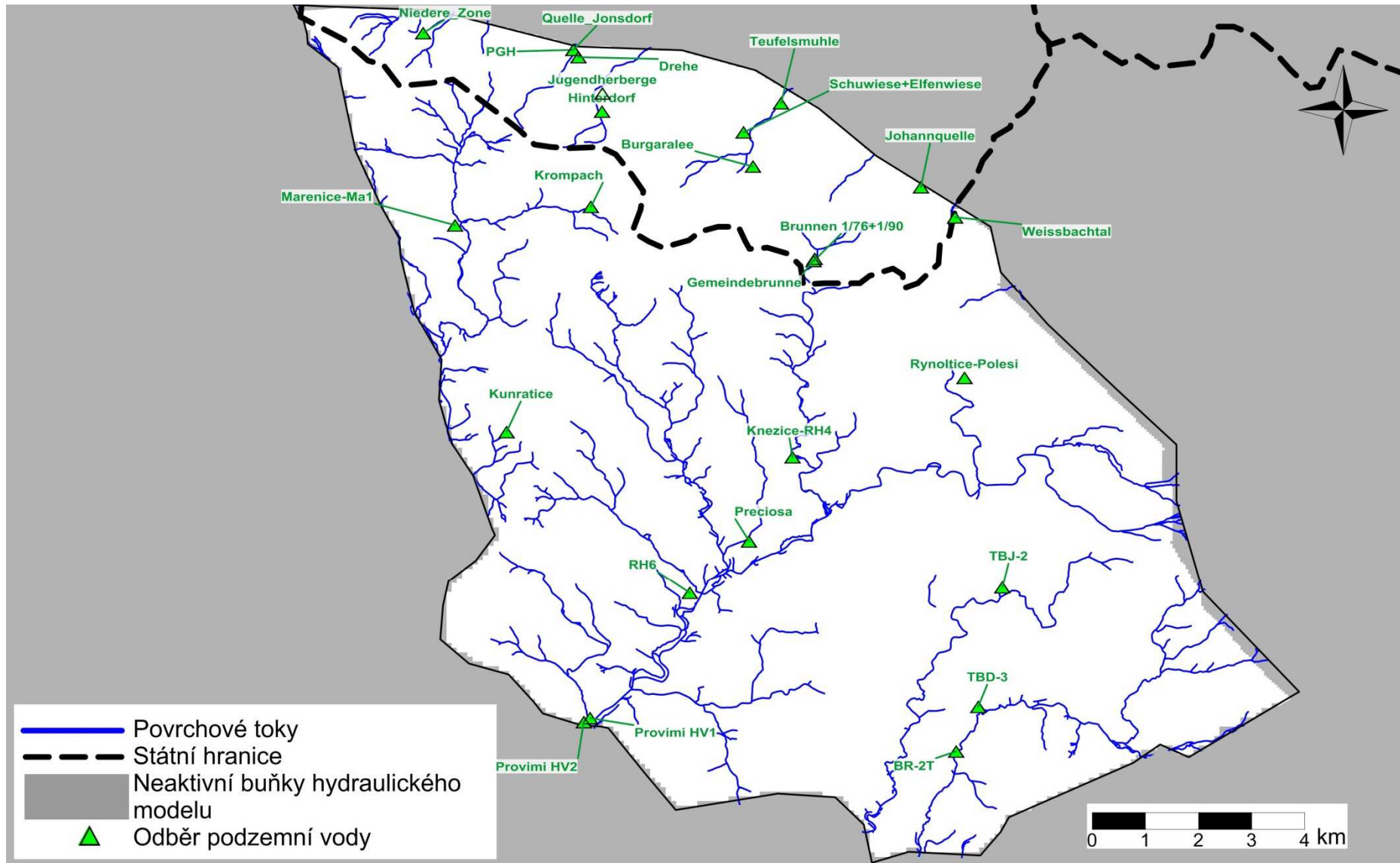


Tab. 3: Odběry podzemní vody uvažované v hydraulickém modelu

Jímací objekt	X (JTSK)	Y (JTSK)	Typ odběru	Průměrný odběr 1971–2012 [l/s]	Maximální odběr 1971–2012 [l/s]	Průměrný odběr v roce 2012 [l/s]	Současně povolený roční odběr [l/s]
Brunnen 1/76+1/90	-707469	-965171	Vrt/studna	8,5	42,1	0,4	41,7
Gemeindebrunne	-707454	-965121	Vrt/studna	1,2	3,6	0,6	2,0
Teufelsmuhle	-708095	-961781	Vrt/studna	19,7	50,0	17,8	41,7
Schulwiese+Elfenwiese	-708814	-962406	Vrt/studna	22,8	36,7	14,0	29,2
Burgaralee	-708634	-963139	Vrt/studna	6,1	20,5	1,0	25,5
Hinterdorf	-711520	-961960	Vrt/studna	5,9	10,7	5,8	5,8
Jugendherberge	-711513	-961567	Vrt/studna	3,1	8,4	4,3	8,1
Drehe	-711973	-960785	Vrt/studna	9,0	28,7	14,2	25,5
PGH	-712070	-960630	Vrt/studna	1,9	19,9	neaktivní	zrušeno
Niedere_Zn	-714944	-960267	Vrt/studna	2,1	5,4	neaktivní	zrušeno
Quelle_Jonsdorf	-712070	-960630	Pramen	4,2	17,0	neodebírání se	-
Weissbachtal	-704766	-964228	Pramen	20,8	35,0	21,1	-
Johannquelle	-705316	-963424	Pramen	4,6	14,0	cca. 2,3	-
Mařenice-Ma1	-714336	-964400	Vrt/studna	0,5	1,6	0,6	1,1
Kropfch	-711735	-964005	Vrt/studna	0,2	1,3	0,5	0,6
Kunratice	-713348	-968854	Zářezy	1,0	2,2	0,4	1,5
Kněžice-RH4	-707876	-969393	Vrt/studna	8,4	18,8	6,2	9,5
Rynoltice-Polesí	-704585	-967693	Vrt/studna	0,3	1,4	0,7	1,1
Preciosa	-708706	-971197	Vrt/studna	0,6	1,7	1,0	1,9
RH6	-709840	-972318	Vrt/studna	0,5	2,0	1,0	2,2
Provimi_HV1	-711753	-975015	Vrt/studna	0,1	1,1	0,6	1,6
Provimi_HV2	-711871	-975097	Vrt/studna	0,1	1,0	0,6	2,0
TBJ_2	-703857	-972198	Vrt/studna	1,9	9,5	0,2	0,5
TBD_3	-704321	-974769	Vrt/studna	9,9	41,1	15,1	zrušeno
BR-2T	-704745	-975731	Vrt/studna	0,0	0,3	0,3	0,8

Pozn.: Zeleně vyznačeny objekty na území SRN, oranžově na území ČR.

Zdroj dat: VÚV TGM, v.v.i., G.E.O.S. (Mibus, 1998), LfULG Sasko, SČVK, a.s.



Obr. 22: Lokalizace odběrných míst podzemní vody uvažovaných v hydraulickém modelu

#### 4.5. Kalibrace

Modelovaná hydrogeologická struktura je z hydrogeologického i geologického hlediska poměrně složitá. Významnou roli hrají i časově proměnné parametry, zejména infiltrace, díky nimž se hydrogeologické poměry neustále mění. Na druhé straně existuje velká skupina časově a prostorově měřených dat, která poskytují útržkovité informace o chování podzemní vody v této hydrogeologické struktuře. Čím lepší je shoda výsledků hydraulického modelu s měřenými hladinami podzemní vody v různých časových obdobích vyznačujících se odlišnými odběry a proměnnou infiltrací, tím věrohodnější jsou i prognózní scénáře predikující budoucí vývoj hladiny a zásob podzemní vody.

Modelová oblast je kontinuálně sledována pomocí celkem 24 vrtů, z nichž některé poskytují časovou řadu delší než 40 let. Na české části modelového území se nachází celkem 19 pozorovacích vrtů, z nichž 10 je (či v minulosti bylo) součástí státní pozorovací sítě provozované Českým hydrometeorologickým ústavem. Zbýlých 9 vrtů představuje staré hydrogeologické objekty vybudované v rámci hydrogeologických průzkumů, jejichž sledování v minulosti zajišťovala Stavební geologie, s.p., a v současnosti AQUATEST a.s. v rámci monitoringu antropogenního vlivu na přeshraniční podzemní vody (Skořepa et al., 2013). Z celkového počtu 25 dlouhodobě monitorovaných vrtů je 5 situováno do kolektoru 4 (všechny na české části území). 5 vrtů nacházejících se na německé části území náleží do saské státní pozorovací sítě a sledují kolektor 2+3.

Kromě výše zmíněných 24 kontinuálně sledovaných vrtů existuje v modelové oblasti řada údajů o jednorázových záměrech hladiny podzemní vody, které většinou pocházejí z vrtných průzkumů nebo čerpacích zkoušek. Pro účely kalibrace nebyly tyto jednorázové záměry využity, neboť obecně vykazují menší spolehlivost měření a jsou oproti sobě těžko porovnatelné, protože byly změřeny v různém časovém období. Naproti tomu kontinuálně sledované vrty pokrývají až na výjimky relativně rovnoměrně celou zájmovou oblast a dovolují tedy utvořit ucelenou představu o vývoji hladiny podzemní vody v celém území. Výjimkou je severozápadní cíp modelové oblasti zhruba mezi obcí Mařenice a městem Jonsdorf. V této oblasti neexistují žádné věrohodné údaje o hladině podzemní vody v kolektoru 2+3.

Model byl kalibrován na shodu hladiny podzemní vody s měřenými hladinami ve zmíněných 24 pozorovacích vrtech (**Obr. 10, Obr. 11**). V první řadě byla hledána optimální shoda mezi absolutními hodnotami hladin (nadmořské výšky) při konstantní infiltraci (**Obr. 23**). Jakmile bylo dosaženo přijatelné shody a modelové hladiny podzemní vody souhlasily s pozorovanými hladinami podzemní vody, začala druhá fáze kalibrace s časově proměnnou infiltrací tak, aby transienční hydraulický model dobře odpovídal na relativní kolísání na všech dlouhodobě sledovaných vrtech. Během tohoto procesu byla měněna především infiltrace, konduktance okrajových podmínek a omezeně hydraulická vodivost opět s cílem co největší shody mezi modelovým a měřeným kolísáním hladiny podzemní vody.

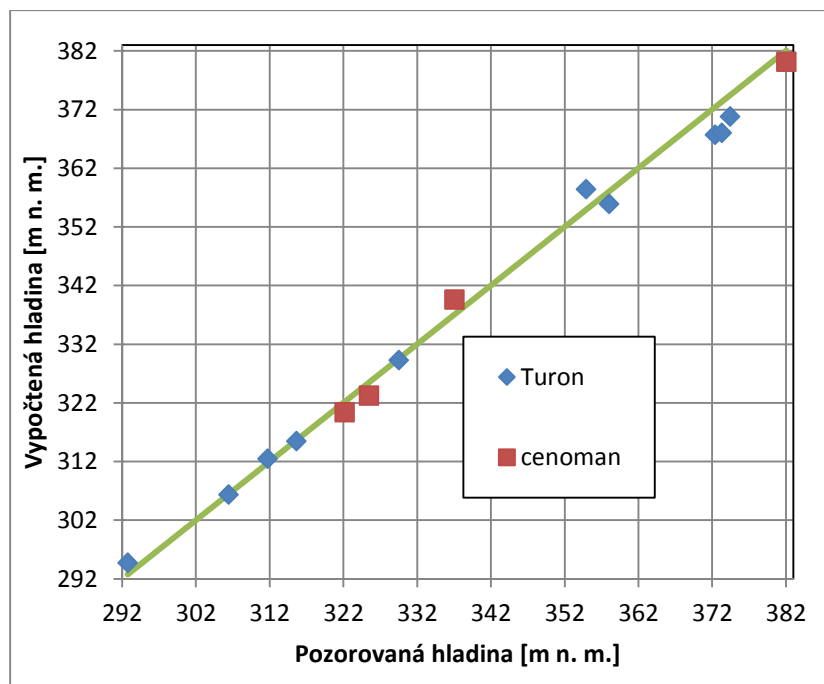
V průběhu kalibrace se jako nutné ukázalo uvažovat v rámci jednotlivých vrstev zóny s odlišnou hydraulickou vodivostí. Ze zpráv archivních průzkumů vyplývá poměrně značná variabilita hydraulických vlastností, které byly zjišťovány v modelové oblasti na vybraných



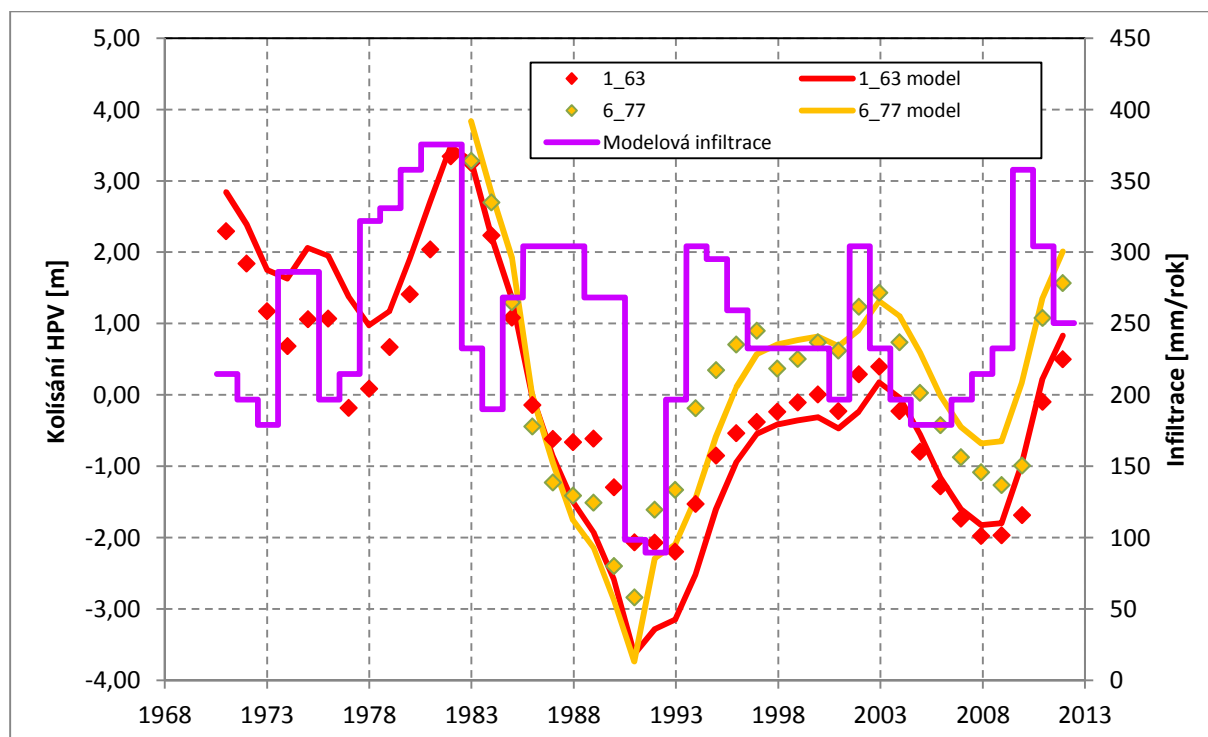
pozorovacích vrtech. Brožek (Brožek, 1978, 1982) a Nakládal (1975) uvádějí hodnoty hydraulické vodivosti pro vrty situované v modelové oblasti do středního turonu od  $4,9 \cdot 10^{-5}$  do  $1,02 \cdot 10^{-3}$  m/s, přičemž vyšší hodnoty byly častěji zjištěny v údolí Panenského potoka, které je patrně tektonicky založeno a představuje regionální drenáž podzemní vody turonského kolektoru. Vymezení zón s rozdílnou hydraulickou vodivostí je patrné z **Obr. 31** až **Obr. 34**. Seznam kalibračních bodů a jejich lokalizace v rámci modelové oblasti jsou uvedeny v **Tab. 4**, na **Obr. 10** a **Obr. 11**.

**Tab. 4: Kalibrační body**

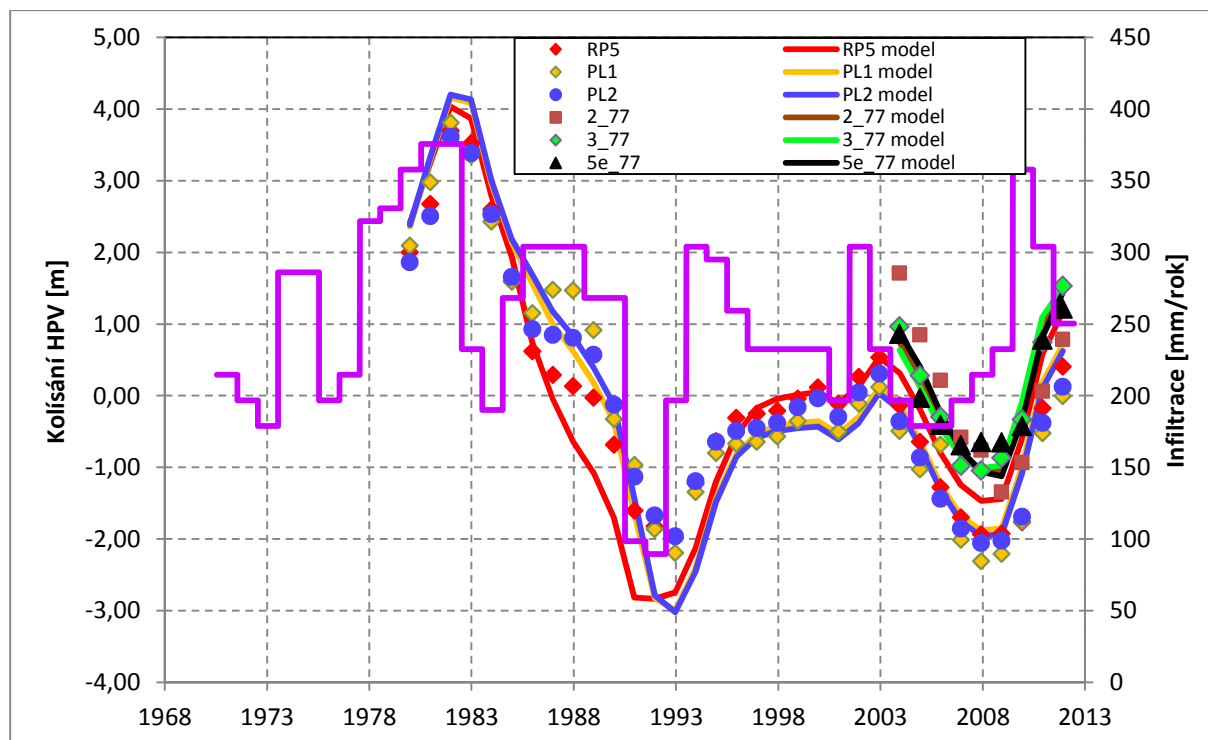
Vrt	Územní náležitost	X (JTSK)	Y (JTSK)	Kolektor	Graf
RP5	ČR	-707649	-965585	2+3	<b>Obr. 25</b>
PL1	ČR	-707454	-965931	2+3	<b>Obr. 25</b>
PL2	ČR	-707707	-965977	2+3	<b>Obr. 25</b>
RP4	ČR	-707551	-966939	2+3	<b>Obr. 27</b>
RH1	ČR	-711453	-967559	2+3	<b>Obr. 28</b>
LO12t	ČR	-711258	-970268	2+3	<b>Obr. 28</b>
RH2	ČR	-709620	-970174	2+3	<b>Obr. 28</b>
RH3	ČR	-706220	-969900	2+3	<b>Obr. 26</b>
RH5	ČR	-708342	-972134	2+3	<b>Obr. 26</b>
RP20	ČR	-711428	-974976	2+3	<b>Obr. 26</b>
VP8476	ČR	-714289	-964275	2+3	<b>Obr. 27</b>
VP8475	ČR	-714282	-964281	4	<b>Obr. 30</b>
LO12Jc	ČR	-711319	-970196	4	<b>Obr. 30</b>
HP23t	ČR	-707226	-972591	2+3	<b>Obr. 29</b>
HP23c	ČR	-707213	-972578	4	<b>Obr. 30</b>
Hp7t	ČR	-702697	-969085	2+3	<b>Obr. 29</b>
HP7c	ČR	-702700	-969123	4	<b>Obr. 30</b>
HP4t	ČR	-699622	-973879	2+3	<b>Obr. 27</b>
HP4c	ČR	-699627	-973883	4	<b>Obr. 30</b>
1_63	SRN	-707565	-965551	2+3	<b>Obr. 24</b>
6_77	SRN	-707623	-965378	2+3	<b>Obr. 24</b>
2_77	SRN	-707249	-963781	2+3	<b>Obr. 25</b>
3_77	SRN	-706512	-964033	2+3	<b>Obr. 25</b>
5e_77	SRN	-708564	-964260	2+3	<b>Obr. 25</b>



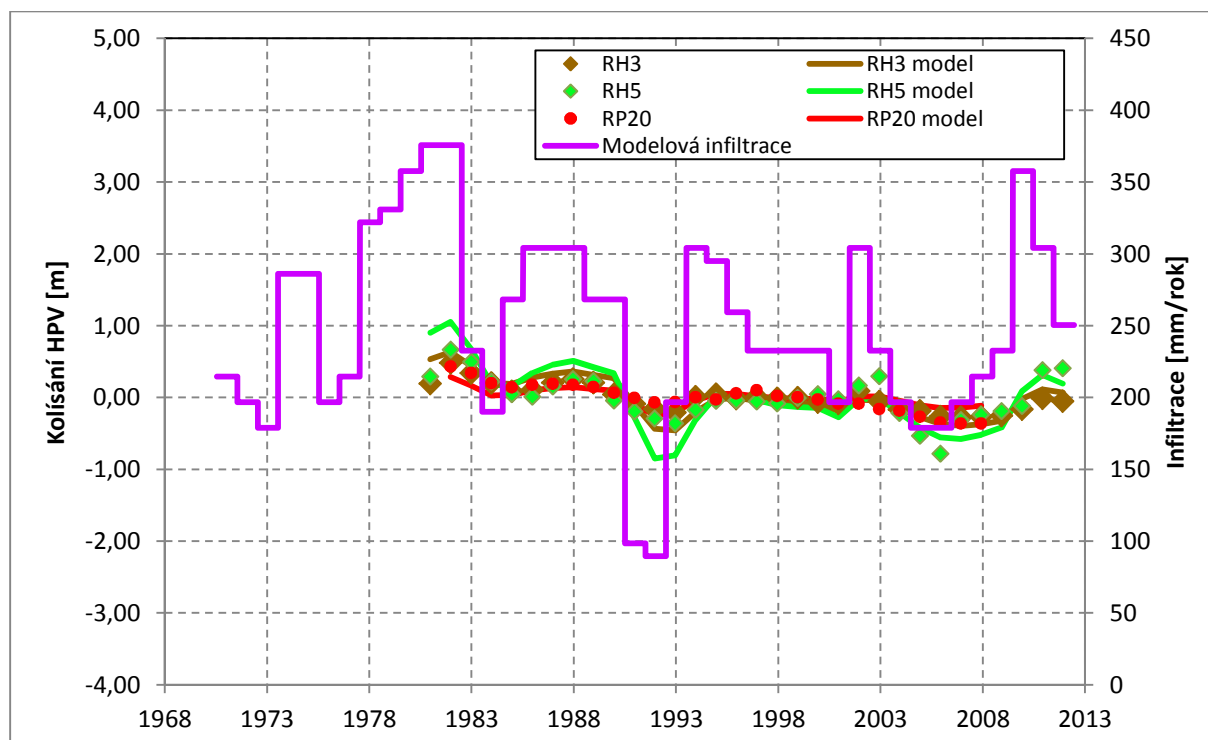
Obr. 23: Grafické porovnání pozorovaných a vypočtených absolutních hladin podzemní vody (modelový stav v roce 2012)



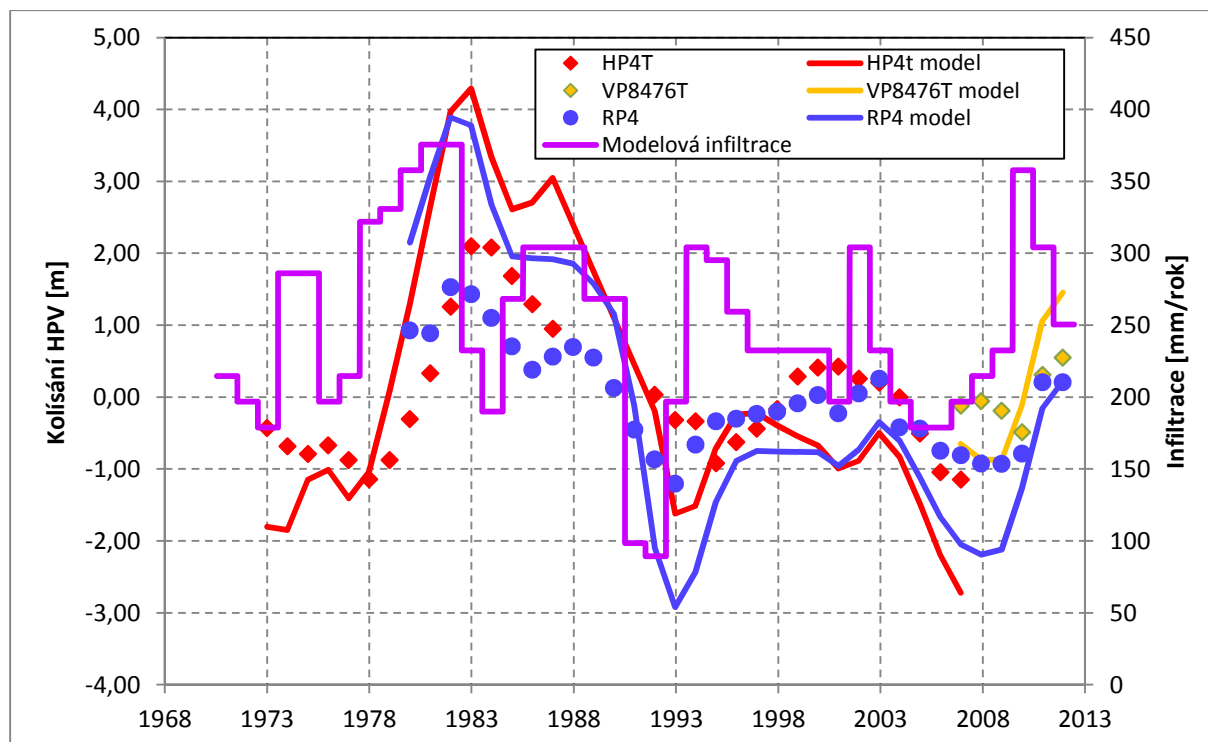
Obr. 24: Kalibrace na kolísání hladiny podzemní vody – kolektor 2+3 na německém území



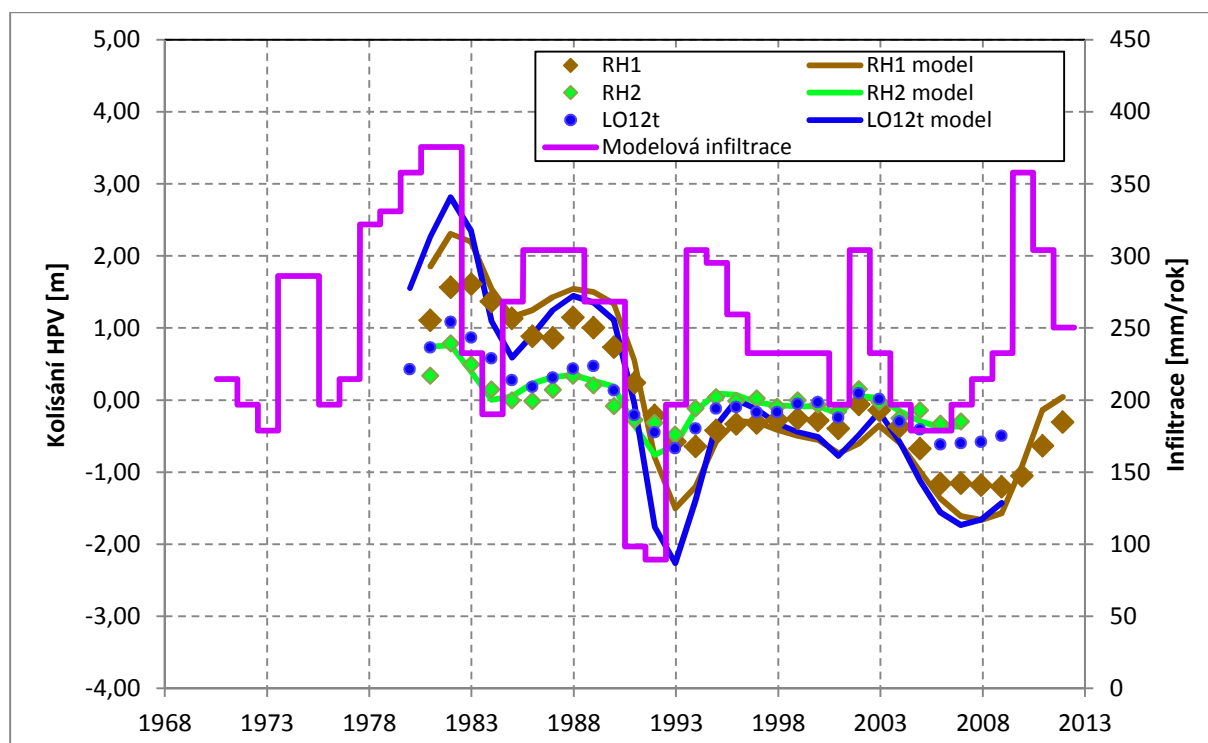
Obr. 25: Kalibrace na kolísání hladiny podzemní vody – kolektor 2+3 na německé straně a státní hranici



Obr. 26: Kalibrace na kolísání hladiny podzemní vody – kolektor 2+3 v drenážní oblasti podél Panenského potoka

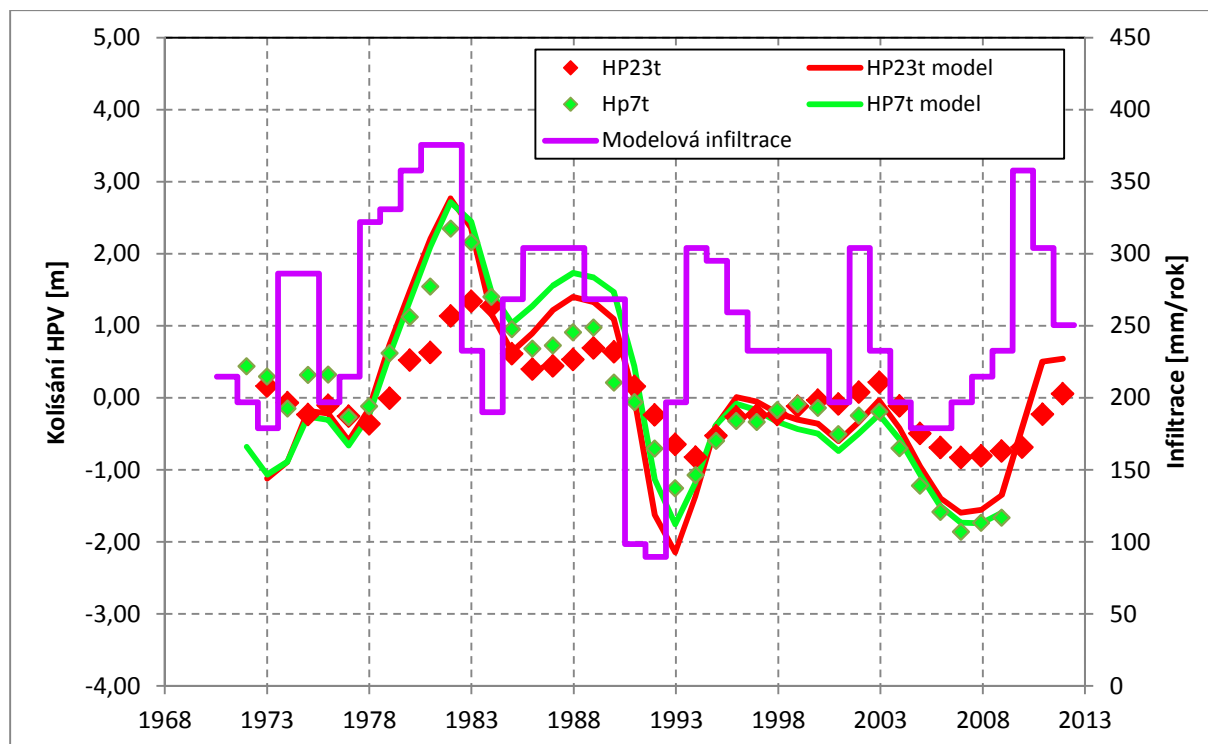


Obr. 27: Kalibrace na kolísání hladiny podzemní vody – kolektor 2+3 v okrajových částech modelové oblasti

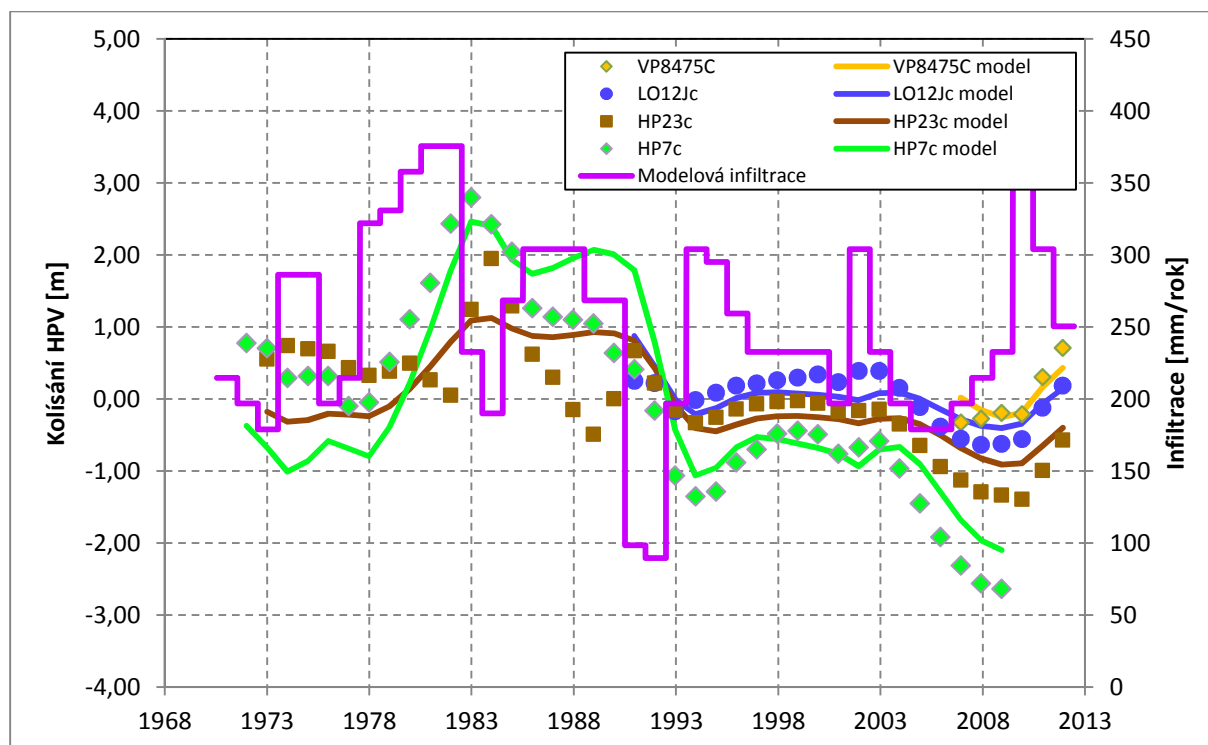


Obr. 28: Kalibrace na kolísání hladiny podzemní vody – kolektor 2+3 v povodí Heřmanického potoka a Valchy





Obr. 29: Kalibrace na kolísání hladiny podzemní vody – kolektor 2+3

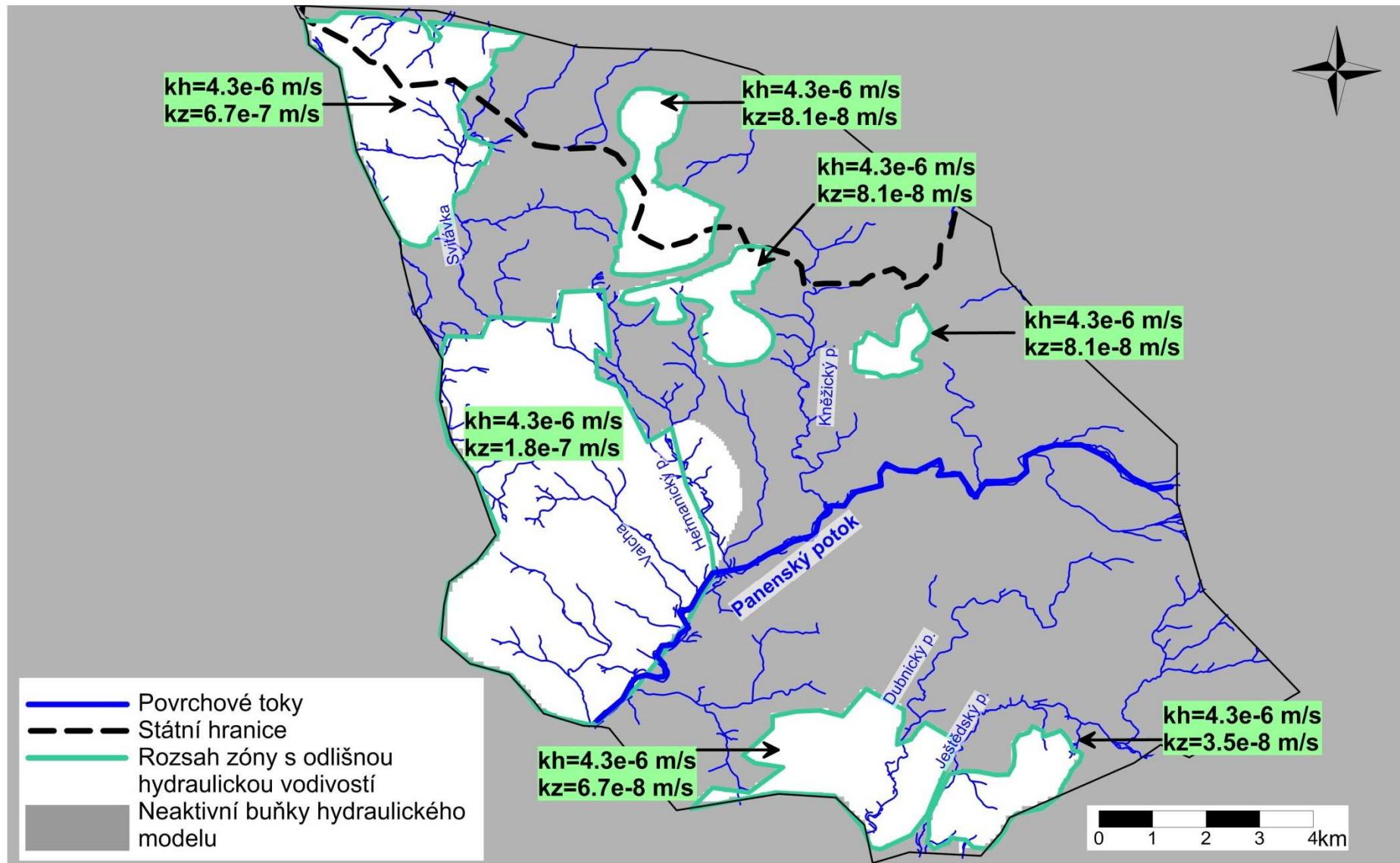


Obr. 30: Kalibrace na kolísání hladiny podzemní vody – kolektor 4

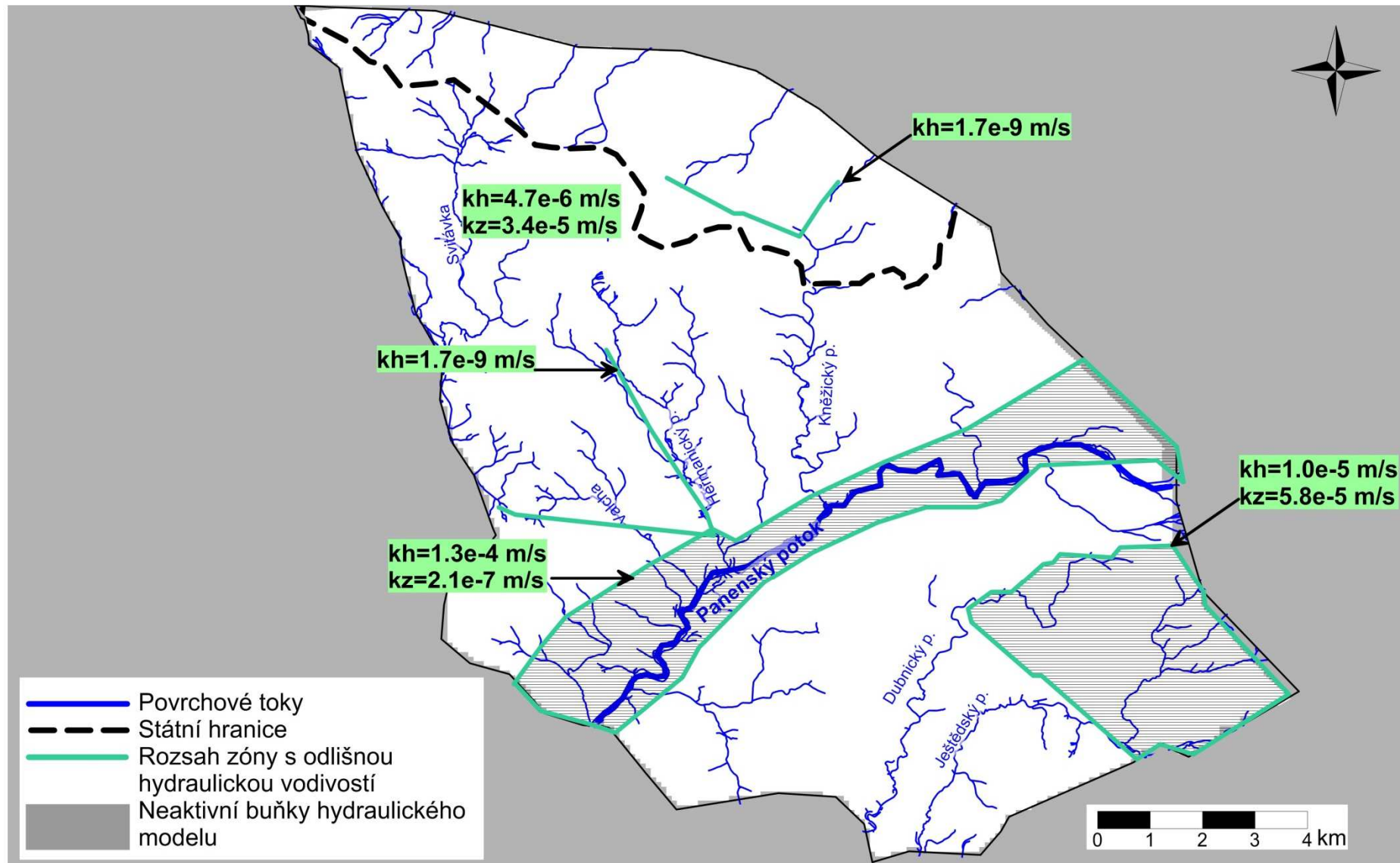
Výsledné (přijaté) hydraulické parametry všech modelových vrstev jsou shrnuty v následující tabulce (**Tab. 5**). Relativně nízká hydraulická vodivost kolektoru 2+3 je způsobena existencí poměrně značných hydraulických gradientů podzemní vody zaznamenaných na pozorovacích vrtech v turonu (s vyšší hydraulickou vodivostí nelze dosáhnout shody mezi měřenými a modelovými hladinami podzemní vody). Ačkoliv výsledky čerpacích zkoušek na vrtech situovaných do kolektoru 2+3 většinou poukazují na vyšší vodivost (Brožek, 1978, 1982; Nakládal, 1975.), z regionálního hlediska se turonský kolektor modelově projevuje hodnotami v řádu  $10^{-6}$  m/s. Tento rozdíl může být způsoben tím, že většina historicky testovaných vrtů se nachází v místech lokální drenáže podzemní vody, které obecně vykazují větší hodnoty hydraulické vodivosti. Kalibrací určená hydraulická vodivost je v dobré shodě s průměrnými hodnotami, které pro turonské pískovce uvádí ve své zprávě Mibus (1998)

**Tab. 5: Přijaté hydraulické parametry nakalibrovaného modelu**

Vrstva	Hydrogeologické zařazení	Horizontální hydraulická vodivost $k_h$ [m/s]		Vertikální hydraulická vodivost $k_z$ [m/s]		Porozita [%]	Storativita [-]
		min.	max.	min.	max.		
1	Kolektor 1	$4,3 \cdot 10^{-6}$		$3,5 \cdot 10^{-8}$	$6,7 \cdot 10^{-7}$	8	8
2	Kolektor 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	Poloizolátor 3/4	$3,5 \cdot 10^{-9}$		$3,5 \cdot 10^{-9}$		2	$1 \cdot 10^{-4}$
4	Kolektor 4	$1,6 \cdot 10^{-6}$	$8,1 \cdot 10^{-6}$	$1,2 \cdot 10^{-8}$	$1,7 \cdot 10^{-4}$	10	$1 \cdot 10^{-4}$

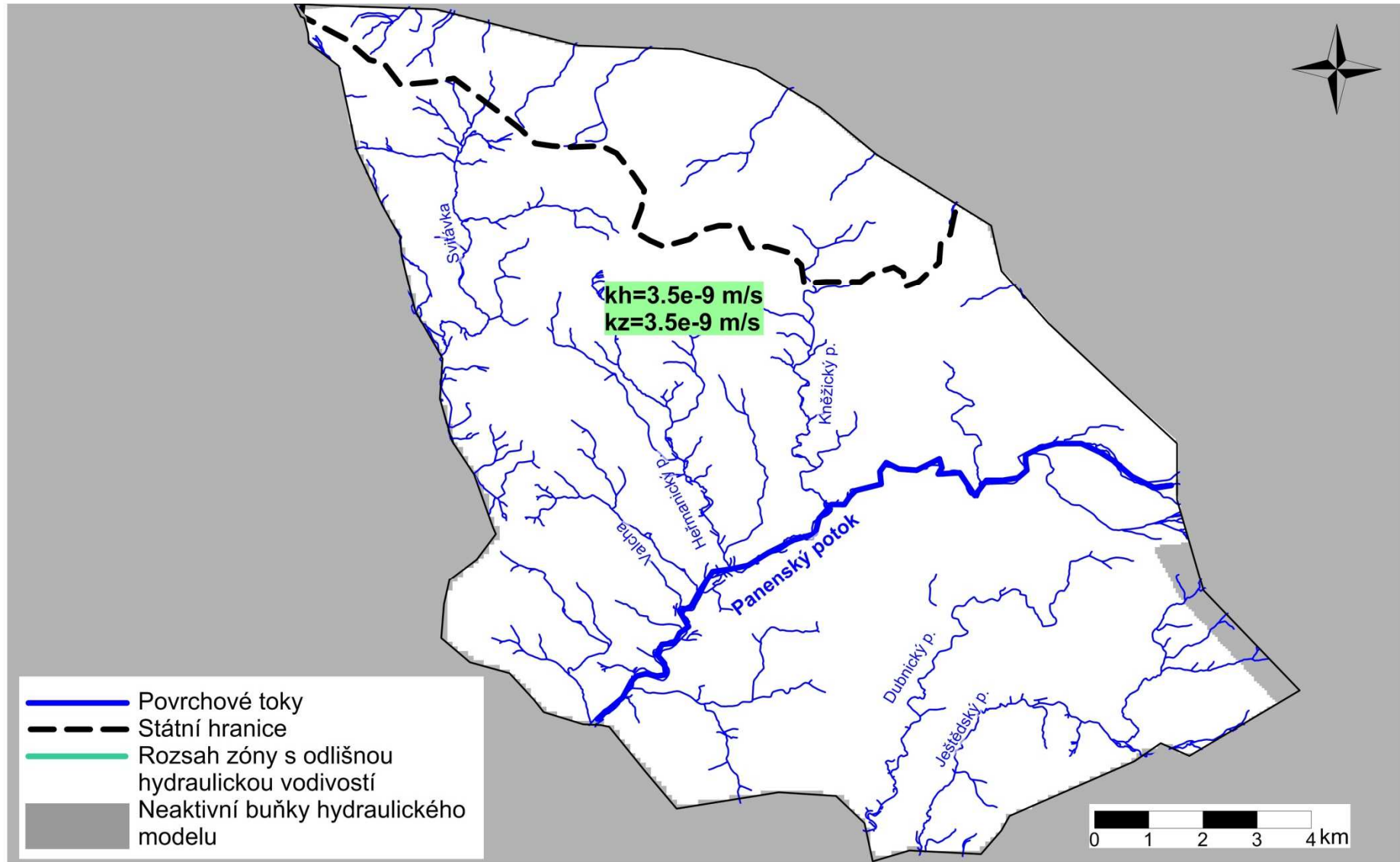


Obr. 31: Zóny s odlišnou hydraulickou vodivostí – Kolektor 1

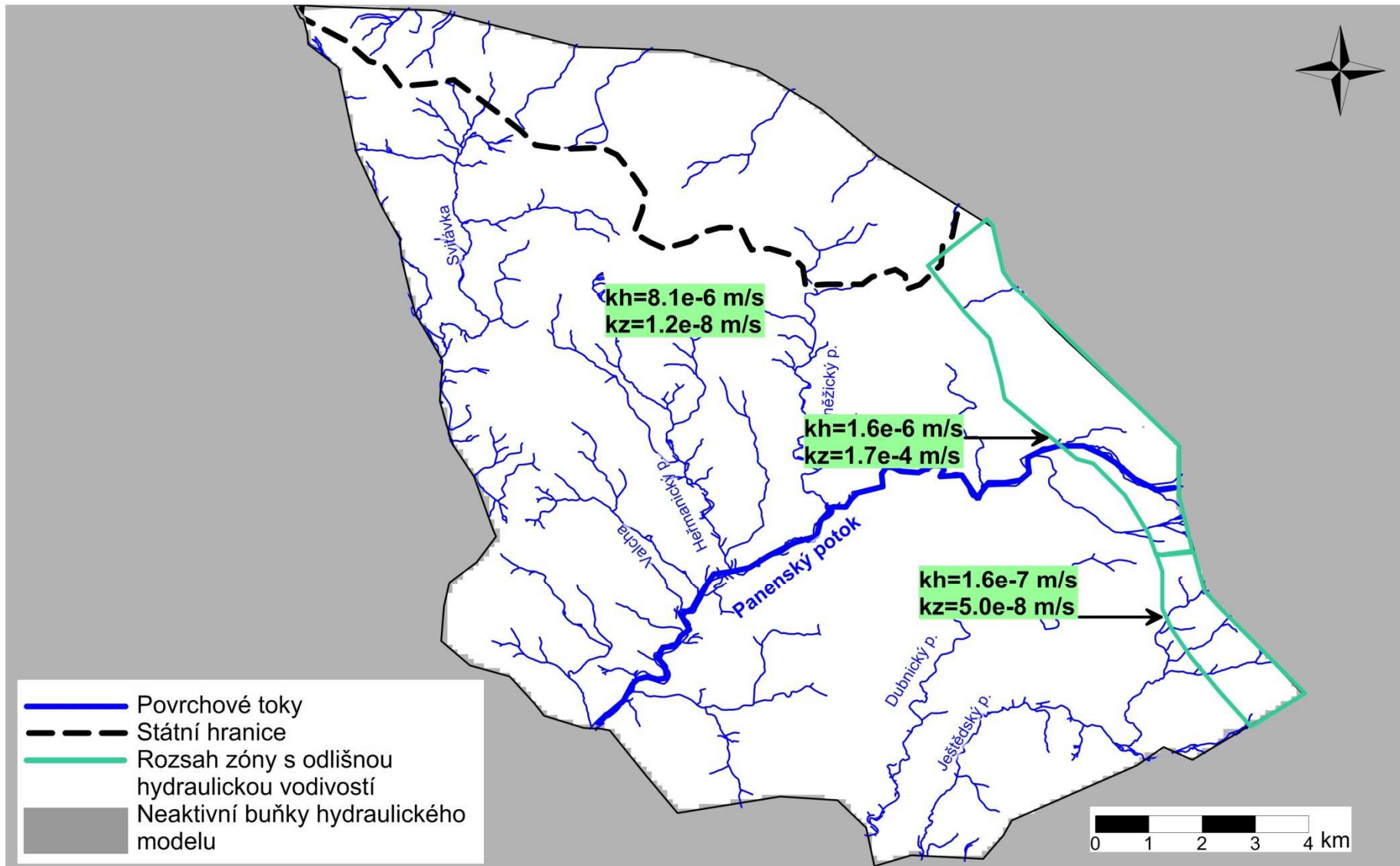


Obr. 32: Zóny s odlišnou hydraulickou vodivostí – Kolektor 2





Obr. 33: Zóny s odlišnou hydraulickou vodivostí – Poloizolátor 3/4



Obr. 34: Zóny s odlišnou hydraulickou vodivostí – Kolektor 4

#### 4.6. Simulované proudění podzemní vody

Modelové hydroizohypsy v jednotlivých kolektorech jsou zobrazeny na **Obr. 37** až **Obr. 39**. Presentovaný proudový model vystihuje piezometrické poměry zkoumaného Petrovice-Lückendorf-Jonsdorf-Oybin.

Podzemní voda v kolektoru 2+3 proudí směrem k Panenskému potoku tvořícímu hlavní drenážní bázi. Lokálně se projevují místní drenážní báze (např. při severní hranici odvodnění u Weissbachtalu k lužické poruše). Kromě Panenského potoka se na výsledné podobě hydroizohyps projevuje i drenážní efekt Ještědského a Dubnického potoka.

Při západní hranici se proud podzemní vody lehce stáčí k západu a pokračuje částečně přes tuto hranici. V kolektoru 4 má podzemní voda větší tendenci k proudění západním směrem přes hranici modelu (okrajová podmínka II. typu – *GHB*). V kolektoru 1 podzemní voda přetéká do podložního kolektoru 2+3 a ve směru úklonu dílčích výskytů kolektoru 1.

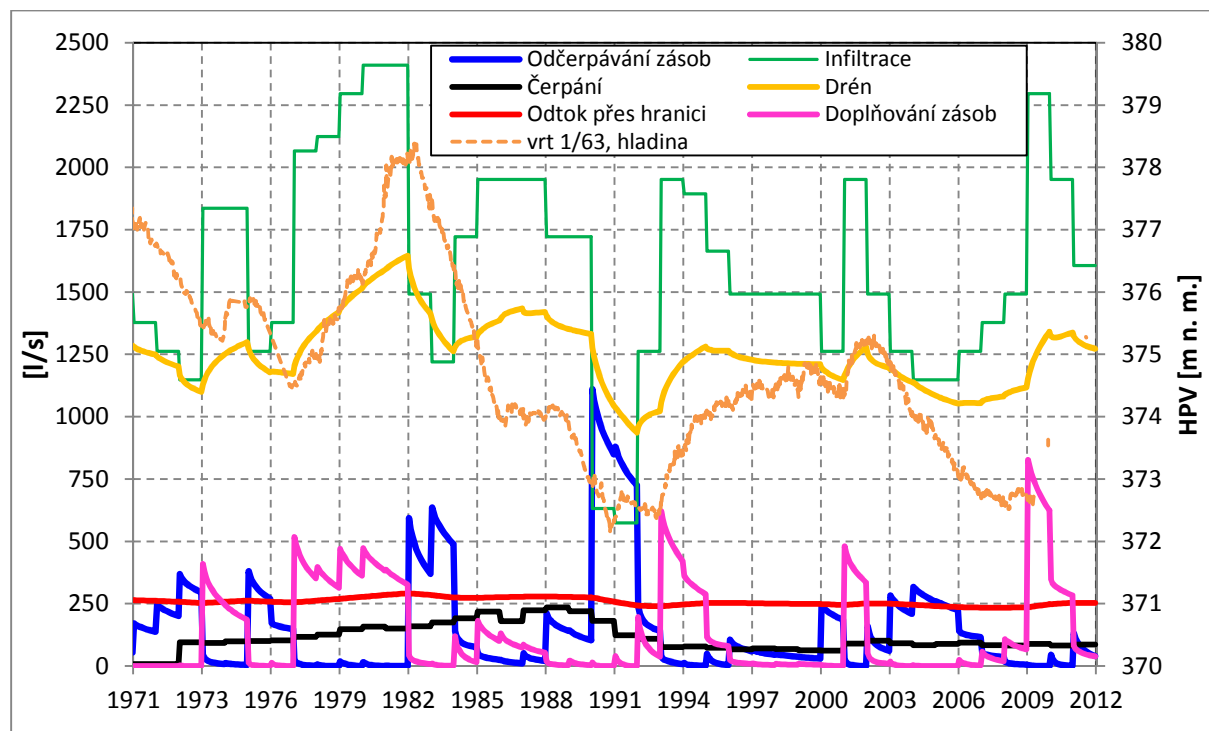
V severní části území je piezometrická úroveň kolektoru 2+3 vyšší než v kolektoru 4. Ve směru od severu k jihu se však tento rozdíl zmenšuje a zhruba v centrální části oblasti se obrací – dochází k přetoku z kolektoru 4 do kolektoru 2+3.

Na proudění v kolektoru 2+3 mají vliv i uvažované zóny s nižší hydraulickou vodivostí, zejména pak 2 liniové zóny v severní části v SRN a v centrální části u Heřmanického potoka (**Obr. 32**). Na mapě hydroizohyps kalibračního stavu (**Obr. 38**) je jejich vliv velmi málo patrný. Mnohem zřetelněji se tyto zóny projevují v prognózních scénářích (**Kap. 4.8.**). Jejich existence a opodstatnění vychází ze značného gradientu podzemní vody v kontinuálně sledovaných vrtech, který není možný namodelovat za použití hydraulické vodivosti odpovídající kolektorovému prostředí (jedná se o vrty LO12t a RH2, resp. 2/77 a 5e/77). Naopak při uvažování málo propustné zóny v linii předpokládaných tektonických poruch jsou modelové hladiny v těchto vrtech v relativně dobré shodě se skutečností.

V následující tabulce (**Tab. 6**) je shrnuta vodní bilance hydraulického modelu odpovídající roku 2012. Jelikož je simulace transientní, je i modelová vodní bilance závislá na čase. Z grafu na **Obr. 35** je tato závislost dobře patrná. Vidět jsou změny odvozené infiltrace a skutečného čerpání a s tím související v čase se měnící toky přes jednotlivé okrajové podmínky. Z grafu je patrná reakce modelu na kolísání infiltrace ve formě kolísání drenáže do povrchových toků (okrajová podmínka „drén“) a doplňování nebo naopak vyprazdňování statických zásob. Nejvyšší historické odběry podzemních vod na konci 80. let doprovázené velmi suchým obdobím jsou dokumentované odčerpáváním statických zásob, které se projevuje jak zaznamenaným, tak i modelovaným poklesem hladiny podzemní vody v celé struktuře (viz porovnání měřených a modelových hladin na **Obr. 24** až **Obr. 30**).

Tab. 6: Vodní bilance kalibrovaného modelu, stav k r. 2012

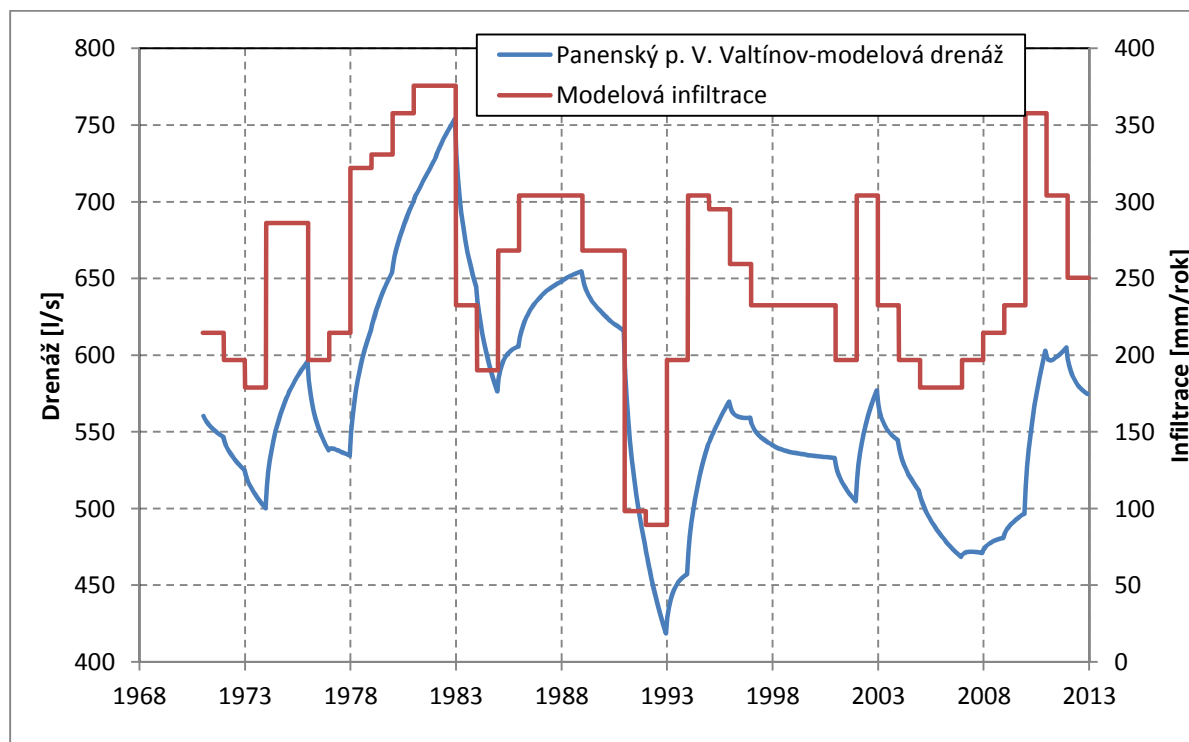
Vrstva	Bilanční položka	Vtok	Odtok
		[l/s]	[l/s]
1	Přetok do/z kol. 2+3	54.5	539.9
	Infiltrace	531.3	0.0
	Drén	0.0	57.4
	Zásoby	12.0	0.3
2	Přetok do/z kol. 1	539.9	54.5
	Přetok do/z izol. 3/4	40.0	161.8
	Infiltrace	1053.2	0.0
	Drén	0.0	1215.9
	GHB	0.0	115.7
	Studny	0.0	85.0
	Zásoby	26.3	26.4
3	Přetok do/z kol. 2+3	161.8	40.0
	Přetok do/z kol. 4	38.0	174.6
	Infiltrace	15.4	0.0
	Zásoby	0.6	1.2
4	Přetok do/z izol. 3/4	174.6	38.0
	Infiltrace	6.8	0.0
	GHB	4.0	137.6
	Zásoby	0.7	10.7
Celkem		2659.2	2658.9
Chyba vtok/odtok (%)		5.35E-03	



Obr. 35: Vodní bilance hydraulického modelu v závislosti na čase, 1971–2012, kalibrační stav



Na **Obr. 36** je vynesena závislost velikosti modelové drenáže podzemní vody do Panenského potoka na čase. Bilance je vypočtena pro profil Velký Valtínov. Z grafu je patrná reakce odtoku na kolísající infiltraci. Určitý podíl na velikosti drenáže má i čerpání podzemní vody. V průměru činí modelový základní odtok pro profil Velký Valtínov 654 l/s, v závislosti na infiltraci a čerpaném množství však kolísá mezi 420 a 750 l/s.



**Obr. 36:** Graf závislosti velikosti modelové drenáže podzemní vody do Panenského potoka na čase, profil Velký Valtínov, lg.

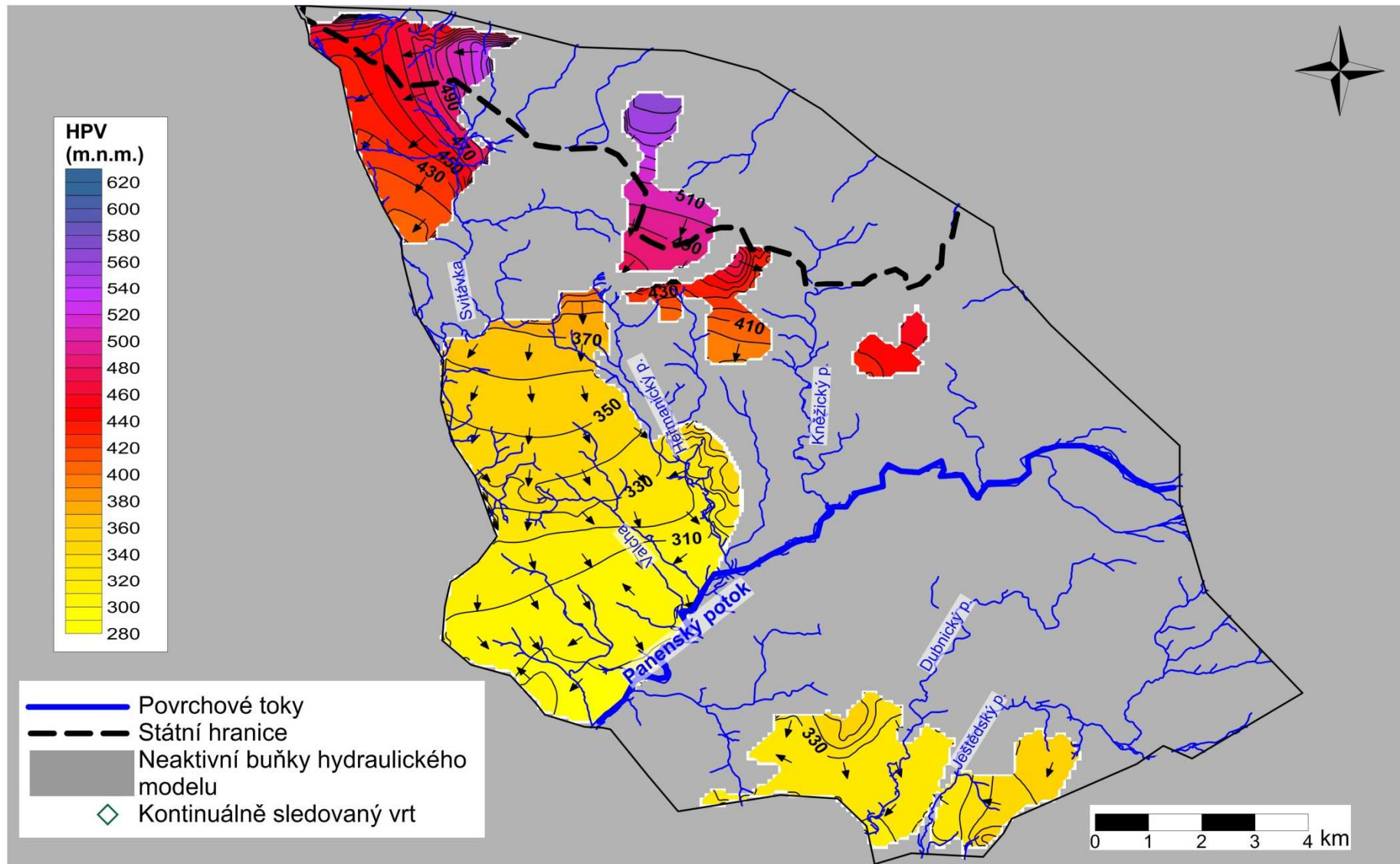
#### 4.7. Vliv čerpání podzemní vody a infiltrace na režim a stav podzemních vod

Na kolísání hladin podzemní vody se podílejí dva faktory – velikost odběrů podzemních vod a změny infiltrace. Zatímco odběry jsou díky registraci čerpání faktor snadno definovatelný, skutečná infiltrace v čase, podle které hladiny podzemní klesají nebo stoupají, je stanovitelná s omezenou přesností. Odběry vstupují do hydraulického modelu jako průměrná množství v každém zaznamenaném roce a v hydraulickém modelu se nijak neupravují. Infiltrace se mění podle kalibrace hydraulického modelu na kolísání hladin podzemních vod na dlouhodobě sledované vrty. V případě, že byl hydraulický model dobře nakalibrován na dostupné hladiny podzemní vody, lze je použít pro kvantifikaci vlivu obou faktorů na kolísání hladin podzemních vod. V hydraulickém modelu se zruší všechna modelová jímání podzemní vody a provede se simulace bez čerpání úplně stejným způsobem jako v případě simulace s odběry. Oba scénáře se porovnají jak v ploše prostřednictvím rozdílu hladin podzemní vody (**Obr. 40** a **Obr. 41**), tak i v grafech (**Obr. 42**) na vybraných vrtech, které se kontinuálně sledují.

Největší rozdíly mezi scénářem s čerpáním a bez čerpání podzemní vody se logicky projevují v kolektoru 2+3, do něhož je situována naprostá většina odběrů podzemní vody v rámci řešeného území. Nejvíce se čerpání projevuje v severní části modelové oblasti, kde se nacházejí německá jímací území s historicky velmi významnými odběry (objekty PGH, Drehe, Jugendherberge, Schulwiese, Eulfenwiese, ad.). Lokální snížení v řádu prvních jednotek metrů jsou způsobena i některými českými objekty (vrty RH-4 Kněžice a TBD-3). Značná diferenciací ve velikosti ovlivnění je dána velikostí odběrů podzemní vody. Z **Obr. 9** na straně 17 je dobře patrné, že zejména v 80. letech dosahovaly odběry podzemní vody na území SRN více než trojnásobku odběrů na straně české. Německé jímací objekty jsou navíc koncentrované na poměrně malém území.

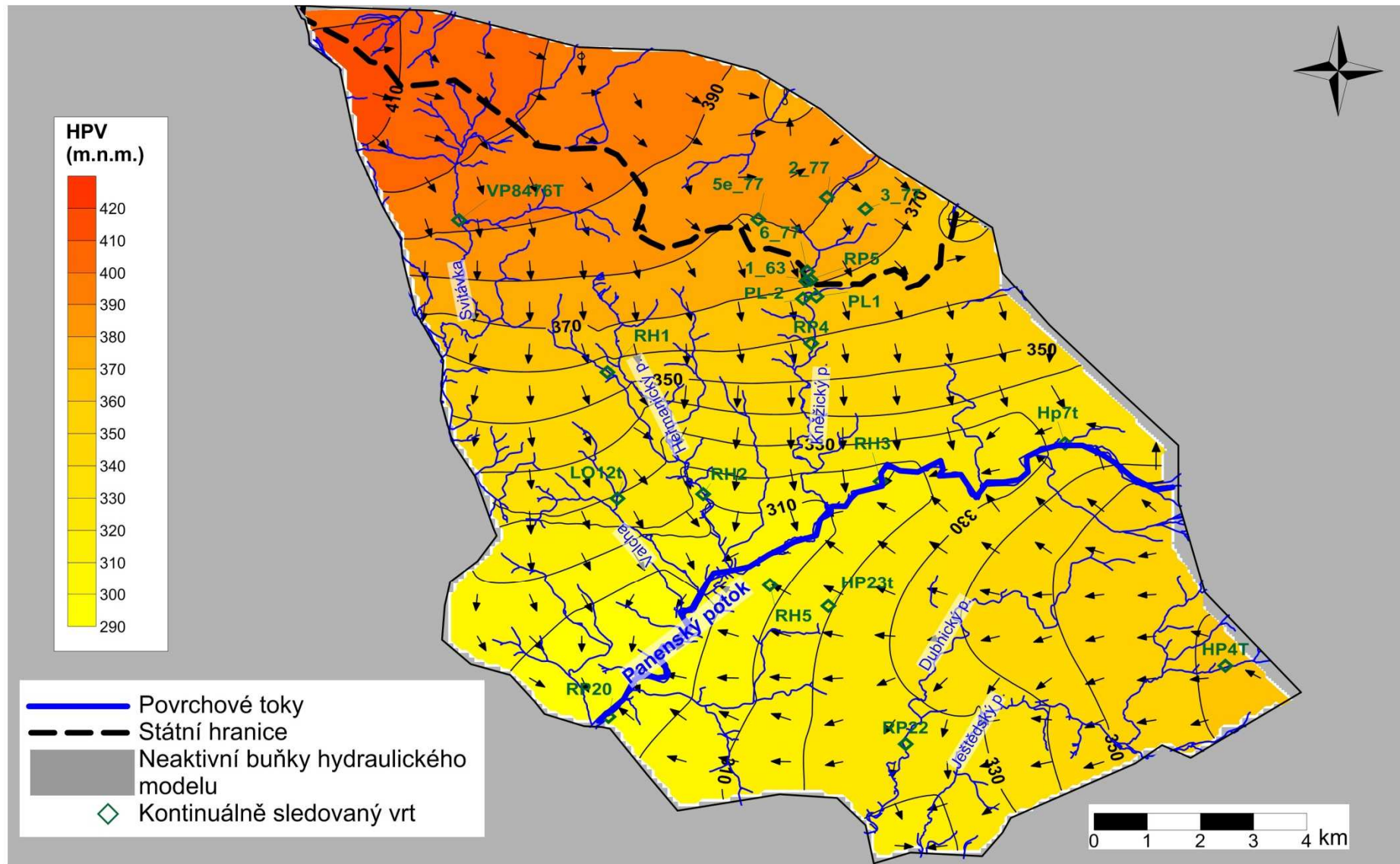
Určitou roli hraje i fakt, že v SRN se podzemní voda jímá de facto v infiltrační oblasti, kdežto na české straně se jímací objekty nacházejí v blízkosti drenážní báze, kde je hladina podzemní vody obecně mnohem méně náchylná na kolísání v důsledku změn infiltrace i velikosti odběrů. Zřejmé je to i v grafu na **Obr. 42**, kde jsou porovnány modelové vývoje hladiny podzemní vody ve vybraných vrtech ve scénáři bez čerpání a s čerpáním.

V kolektoru 4 je pokles piezometrické úrovně způsoben snížením hladiny v kolektoru 2+3 v jímacích územích v SRN a je tudíž omezen pouze na severní část modelového území.

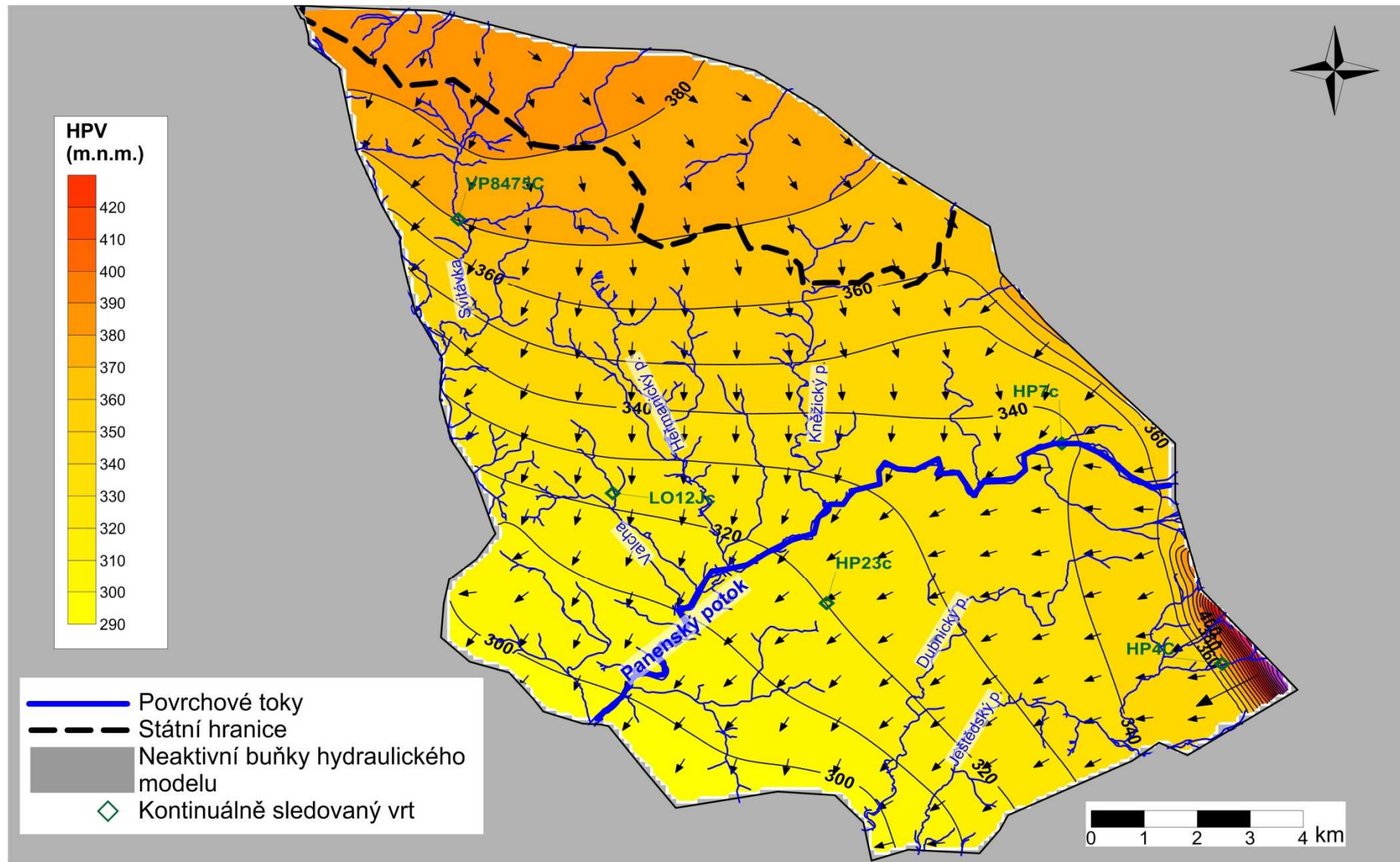


Obr. 37: Modelové hladiny podzemní vody a směry proudění v kolektoru 1



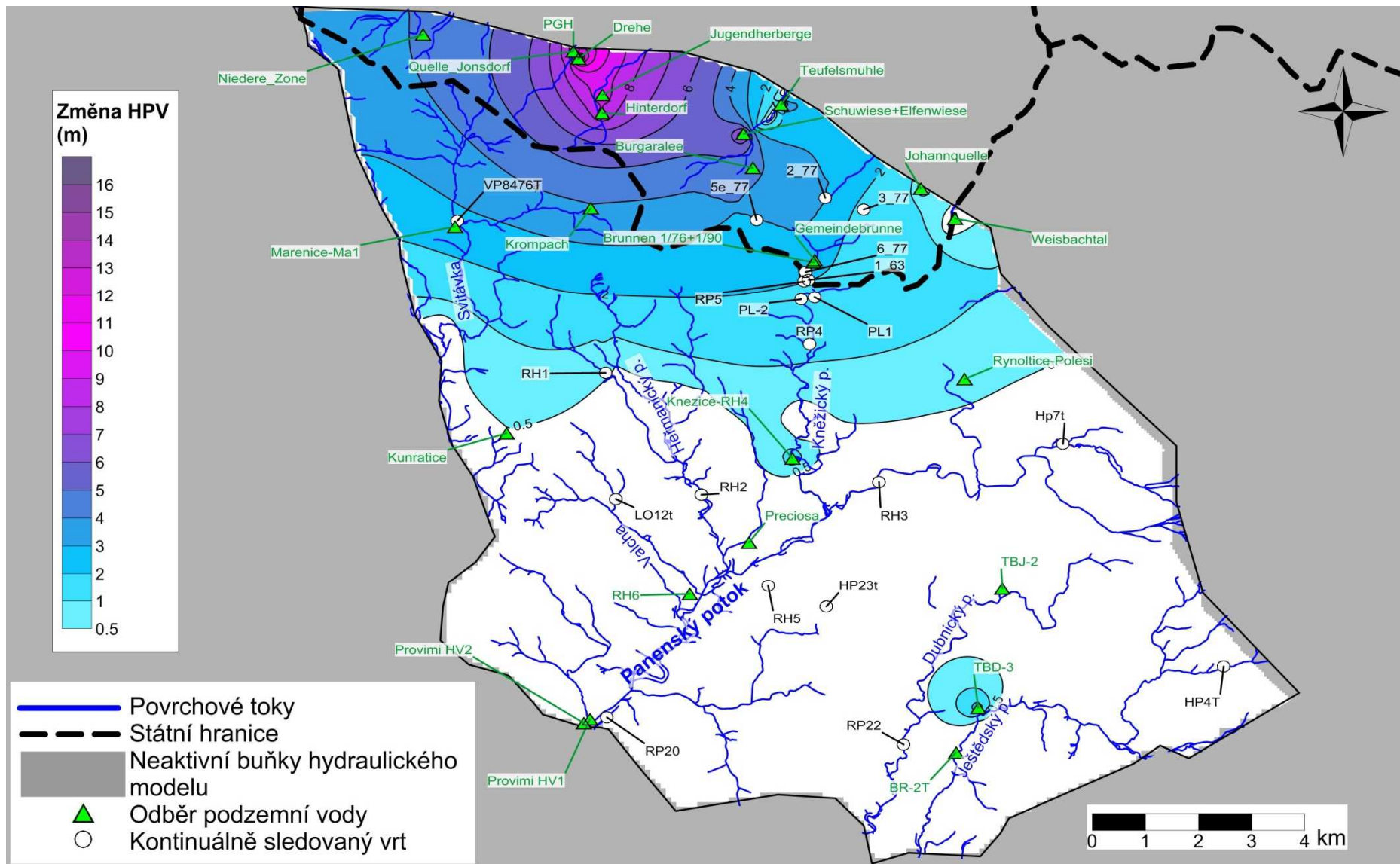


Obr. 38: Modelové hladiny podzemní vody a směry proudění v kolektoru 2+3



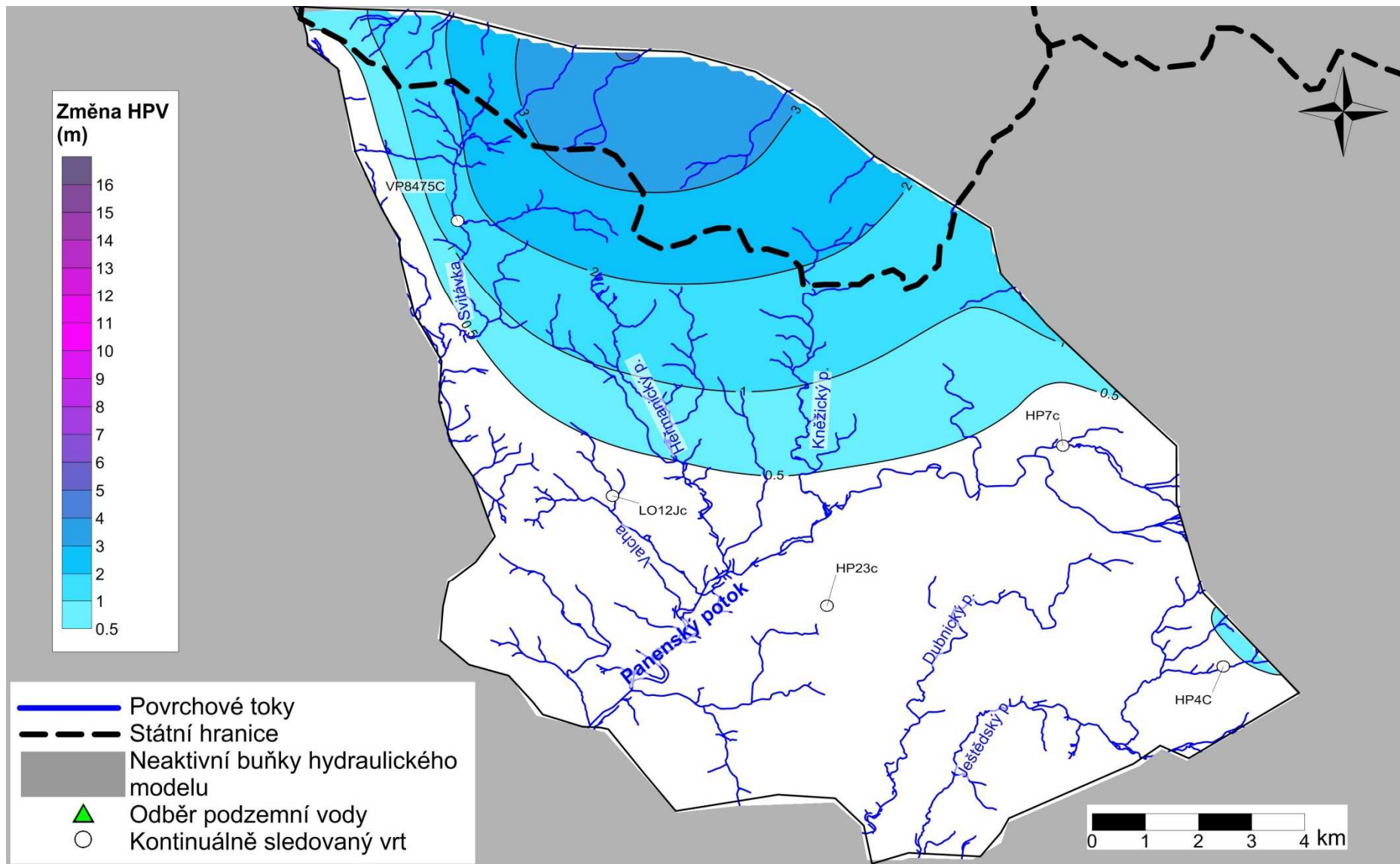
Obr. 39: Modelové hladiny podzemní vody a směry proudění v kolektoru 4



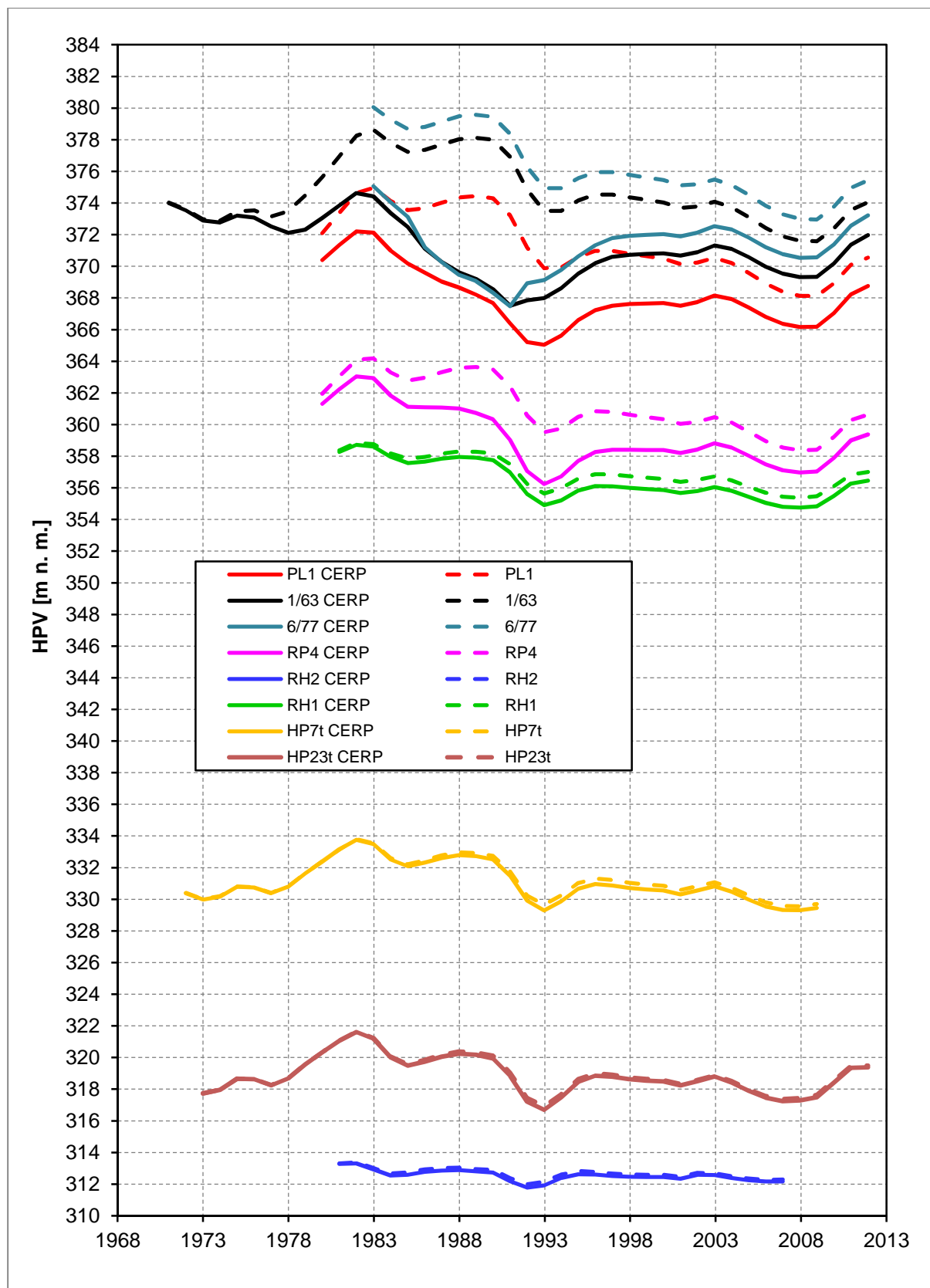


Obr. 40: Rozdíl mezi modelovou hladinou podzemní vody s čerpáním a bez čerpání podzemní vody – kolektor 2+3





Obr. 41: Rozdíl mezi modelovou hladinou podzemní vody s čerpáním a bez čerpání podzemní vody – kolektor 4



**Obr. 42: Časové porovnání mezi modelovou hladinou podzemní vody s čerpáním a bez čerpání podzemní vody – vybrané vrty s kontinuálním sledováním**

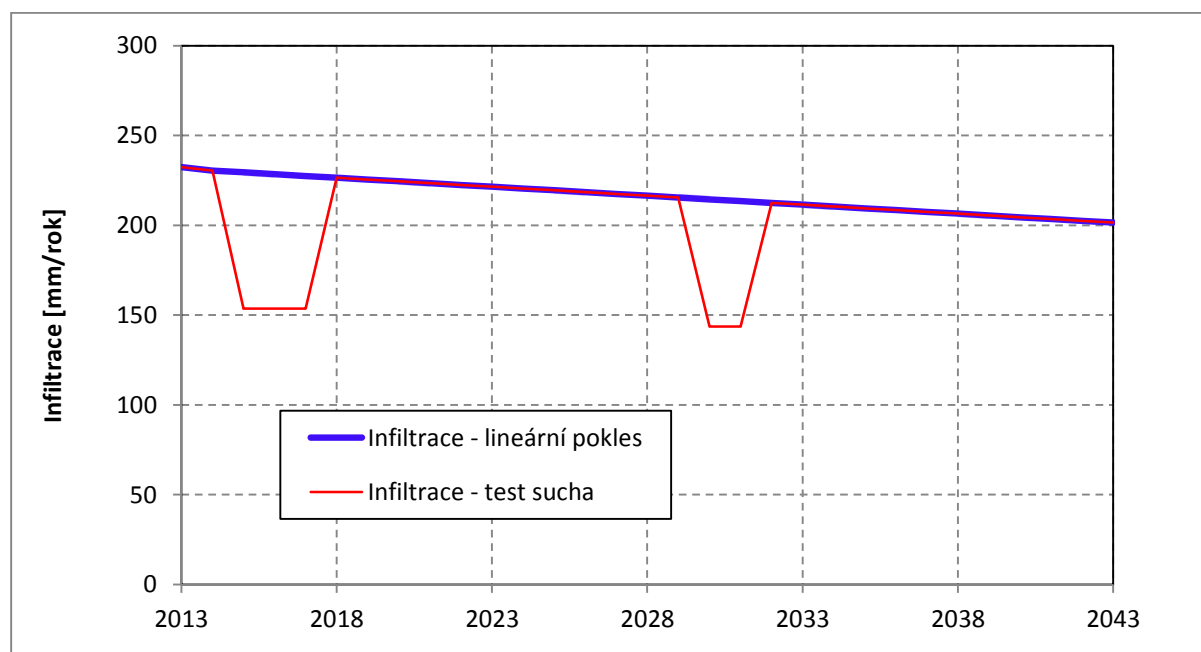
Pozn.: Zkratka „CERP“ v legendě značí scénáře s uvažovaným čerpáním podzemní vody

#### 4.8. Predikce vývoje hladiny podzemní vody

Nakalibrovaný hydraulický model byl použit pro predikci vývoje hladiny podzemních vod v následujících 30 letech (simulováno je období 2013–2043). Každý scénář (viz **Tab. 7**) byl charakterizován odběry podzemních vod a infiltrací. Pro každý scénář byly porovnány modelové hladiny podzemní vody v roce 2043 s výchozím scénářem (V2S1-1) s cílem popisu plošných změn za daného nastavení po uplynutí 30 let. Časové změny hladin podzemní vody pro všechny scénáře byly dále porovnány na kontrolních bodech, které odpovídají důležitým kontinuálně sledovaným vrtů na českém a německém území (**Obr. 44** až **Obr. 55**). V ploše (**Obr. 56** až **Obr. 70**) je zobrazen rozdíl hladin mezi jednotlivými scénáři a scénářem výchozím (V2S1-1).

V prognózních scénářích jsou uvažovány různé velikosti odběrů podzemní vody. Vycházíme přitom ze znalosti skutečně zaznamenaných odběrů a platných vodoprávních povolení pro jednotlivá jímací území. Data o povolených odběrech německých objektů byla získána od LfULG, data z ČR byla získána od zadavatele z databáze vodoprávní evidence (portál HEIS VÚV) a od SČVK, a.s., které provozují značnou část českých jímacích objektů.

Dále je v prognózních scénářích uvažována různá infiltrace. Scénáře označené jako S1 předpokládají konstantní infiltraci po celou dobu prognózy odpovídající průměrné odvozené infiltraci (232 mm/rok). Scénáře označené S2 a S3 předpokládají postupný pokles infiltrace o 1 mm/rok vlivem působení klimatické změny (zvyšování teploty zvýší podíl evapotranspirace a sníží infiltraci). Scénáře S3 mají navíc za cíl otestovat vliv krátkodobých suchých period (dvou- a tříletých), kdy je infiltrace snížena o 30 %. Uvažovaná křivka vývoje infiltrace ve scénářích S2 a S3 je uvedena na **Obr. 43**.



**Obr. 43: Modelová infiltrace pro predikce**

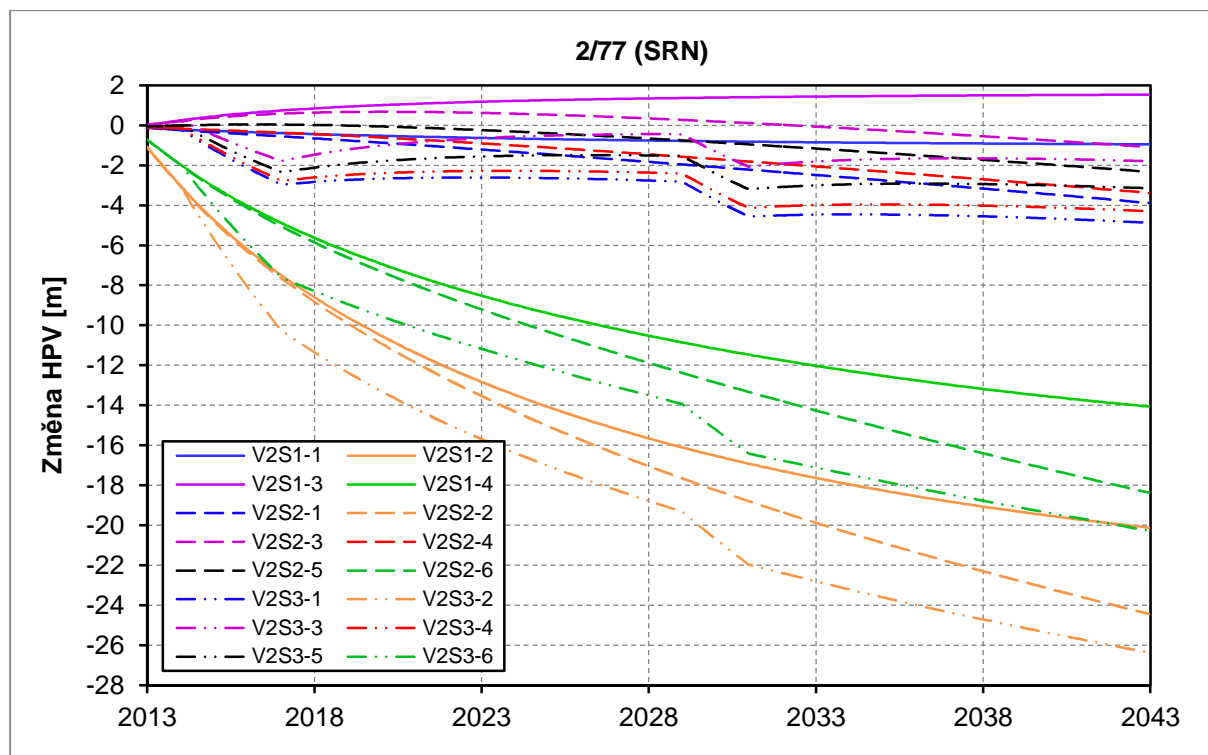
Pozn.: Odhad změny infiltrace pro budoucí období byl získán na základě výstupů projektu TA02020320 "Podpora dlouhodobého plánování a návrhu adaptačních opatření v oblasti vodního hospodářství v kontextu změn klimatu" financovaného Technologickou agenturou ČR.



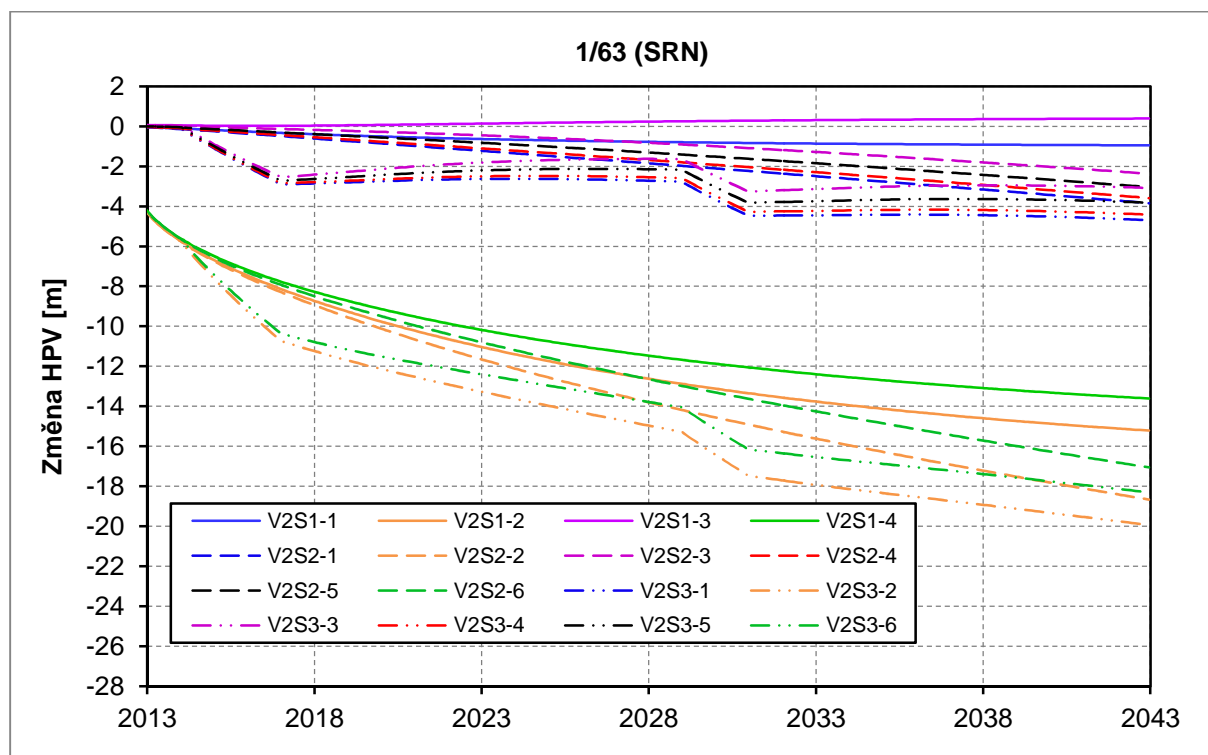
Tab. 7: Scénáře V2S0 až V2S3

Varianta a scénář	Odběry a čerpání podzemních vod			Infiltrace průměrná roční [mm/rok]	Popis výsledků, hlavní změna vůči výchozímu stavu	Grafy kolísání hladin	Mapa snížení hladiny
	Charakteristika	SRN [l/s]	ČR [l/s]				
V2 S0-1 (kalibrace)	Skutečné, časová řada ročních průměrů do roku 2012	<b>Obr. 9</b>	<b>Obr. 9</b>	Modelově odvozená infiltrace (časově proměnná řada 1971–2012)	Čerpání se projevuje zejména snížením hladiny v severní části modelové oblasti. Zaznamenané poklesy HPV jsou způsobeny kombinací čerpání a kolísání infiltrace.		<b>Obr. 40</b> <b>Obr. 41</b>
V2 S0-2	Nulové	0,0	0,0				
<b>V2 S1-1 (výchozí scénář)</b>	<b>Skutečné (v roce 2012, konstantní do 2043)</b>	58,0	27,3	Konstantní hodnota 232 mm pro období 2013–2043	Mírný pokles HPV v důsledku snížení infiltrace oproti současnosti.	<b>Obr. 44</b> až <b>Obr. 55</b>	-
V2 S1-2	Současné platné povolené množství (roční průměr)	179,3	35,7		Významný pokles HPV, až 20 m v okolí něm. jímacích objektů. Čerpání převyšuje využitelné zdroje.		<b>Obr. 56</b>
V2 S1-3	Nulové	0,0	0,0		Nárůst hladiny v průměru o 0–4 m, nejvíce v SRN.		<b>Obr. 57</b>
V2 S1-4	Maximální zaznamenané (konstantní do 2043)	174,1	63,8		Značný pokles HPV zejména v SRN. Odběry převyšují využitelné zdroje. Výsledky podobné scénáři V2S1-2.		<b>Obr. 58</b>
V2 S1-5	Hodnota nižší než využitelné zdroje podzemní vody (hledaná modelem)	78,0	37,0		Stacionární predikce pro účely stanovení využitelných zdrojů. Výsledky diskutovány v <b>Kap. 4.9</b> .		<b>Obr. 71</b>
V2 S1-6	Hodnota odpovídající využitelným zdrojům podzemní vody (hledaná modelem)	107,0	204,0				<b>Obr. 72</b>
V2 S1-7	Hodnota vyšší než využitelné zdroje podzemní vody (hledaná modelem)	174,0	321,0				<b>Obr. 73</b>
V2 S2-1	Skutečné (v roce 2012, konstantní do 2043)	58,0	27,3		Lineární pokles z 232 mm na 202 mm v období 2013–2043		Postupný mírný pokles HPV v důsledku lineárně klesající infiltrace. Pokles 1–4 m v roce 2043 oproti současnosti.
V2 S2-2	Současné platné povolené množství (roční průměr v roce 2014, konstantní do 2043)	179,3	35,7	Značný pokles HPV v celé severní části modelové oblasti v důsledku čerpání nad využitelné zdroje. Pokles v roce 2043 o 2–30 m oproti současnosti.		<b>Obr. 60</b>	
V2 S2-3	Nulové	0,0	0,0	Nejprve mírný nárůst v důsledku vypnutí čerpání následovaný plynulým mírným poklesem jako reakce na lineárně klesající infiltraci. V SRN celkově vyšší HPV oproti současnosti, ve zbytku území pokles o 1–2 m.		<b>Obr. 61</b>	
V2 S2-4	Snížené na 85 % ze skutečných v roce 2012	49,3	23,2	Mírný plynulý pokles HPV v důsledku klesající infiltrace o 1–3 m za 30 let.		<b>Obr. 62</b>	
V2 S2-5	Snížené na 50 % ze skutečných v roce 2012	29,0	13,65	Na většině území velmi mírný pokles v důsledku klesající infiltrace o 1–2 m za 30 let. V okolí největších německých zdrojů mírný nárůst jako reakce na snížené čerpání.		<b>Obr. 63</b>	
V2 S2-6	Maximální zaznamenané	174,1	63,8	Značný pokles HPV v celé severní části modelové oblasti v důsledku čerpání nad využitelné zdroje. Pokles v roce 2043 o 2–30 m oproti současnosti.		<b>Obr. 64</b>	

Varianta a scénář	Odběry a čerpání podzemních vod			Infiltrace průměrná roční [mm/rok]	Popis výsledků, hlavní změna vůči výchozímu stavu	Grafy kolísání hladin	Mapa snížení hladiny
	Charakteristika	SRN [l/s]	ČR [l/s]				
V2 S3-1	Skutečné (v roce 2012, konstantní do 2043)	58,0	27,3	Test sucha – infiltrace specifikována podle <b>Obr. 43</b>	Pokles HPV o 1–5 m jako reakce na klesající infiltraci a suché periody. Větší poklesy v severní části území.	<b>Obr. 44</b> až <b>Obr. 55</b>	<b>Obr. 65</b>
V2 S3-2	Současné platné povolené množství (roční průměr)	179,3	35,7		Významný pokles HP v celé severní části území vlivem vysokého čerpání a nízké infiltrace. Pokles o 2–30 m.		<b>Obr. 66</b>
V2 S3-3	Nulové	0,0	0,0		Nejprve mírný nárůst v důsledku vypnutí čerpání následovaný plynulým mírným poklesem jako reakce na lineárně klesající infiltraci. V SRN celkově vyšší HPV oproti současnosti, ve zbytku území pokles o 1–2 m		<b>Obr. 67</b>
V2 S3-4	Snížené na 85 % ze skutečných v roce 2012	49,3	23,2		Plynulý pokles HPV v důsledku klesající infiltrace doprovázený periodickými poklesy vlivem suchých period. Celkové snížení proti současnosti o 1–4 m za 30 let.		<b>Obr. 68</b>
V2 S3-5	Snížené na 50 % ze skutečných v roce 2012	29,0	13,65		Na většině území mírný pokles o 1–2 m za 30 let v důsledku klesající infiltrace a suchých period. V bezprostředním okolí největších německých zdrojů nepatrný nárůst jako reakce na snížené čerpání.		<b>Obr. 69</b>
V2 S3-6	Maximální zaznamenané	174,1	63,8		Významný pokles HP v celé severní části území vlivem vysokého čerpání a nízké infiltrace. Pokles o 2–30 m.		<b>Obr. 70</b>

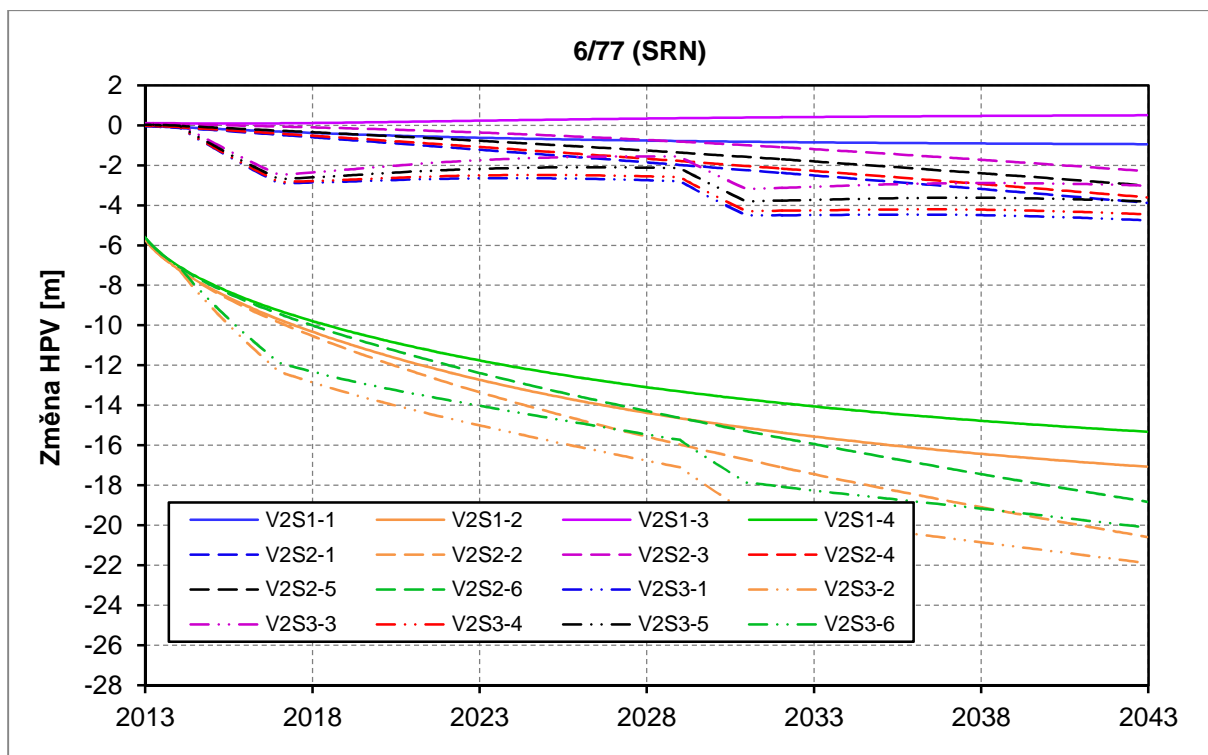


Obr. 44: Porovnání modelových predikcí pro scénáře V2S1-1 až V2S3-6 na vrtu 2/77 (SRN)

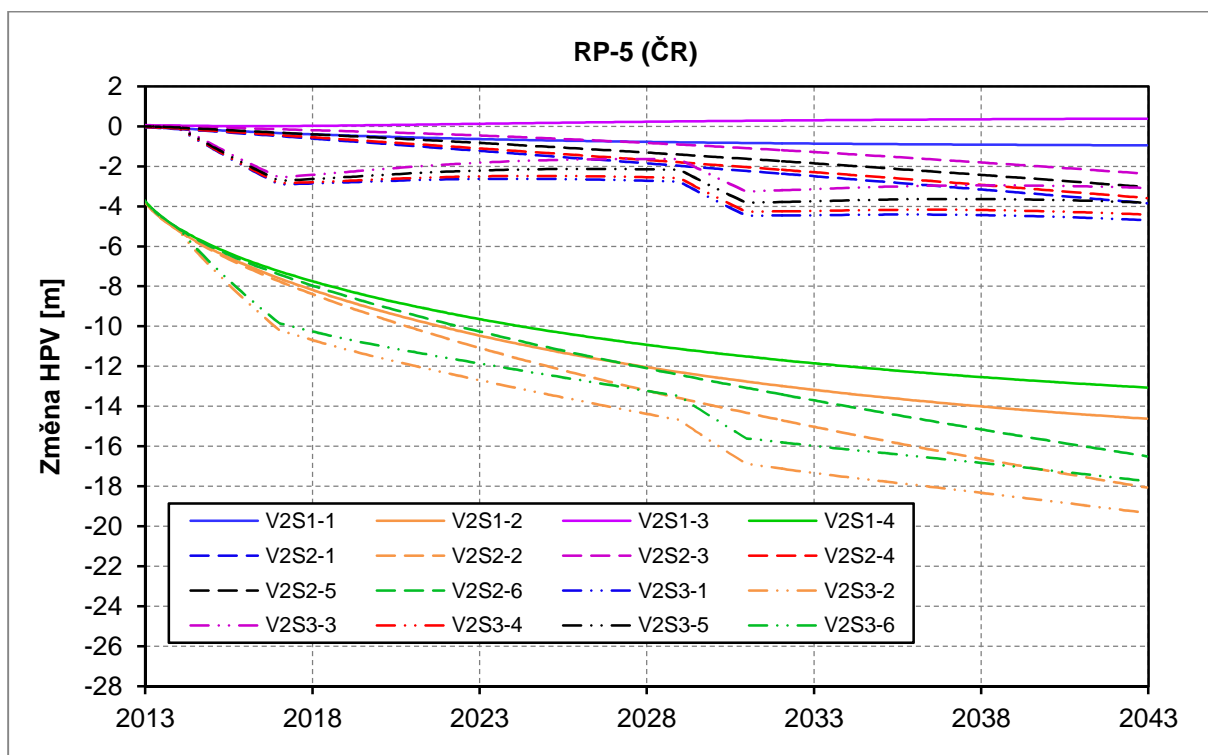


Obr. 45: Porovnání modelových predikcí pro scénáře V2S1-1 až V2S3-6 na vrtu 1/63 (SRN)

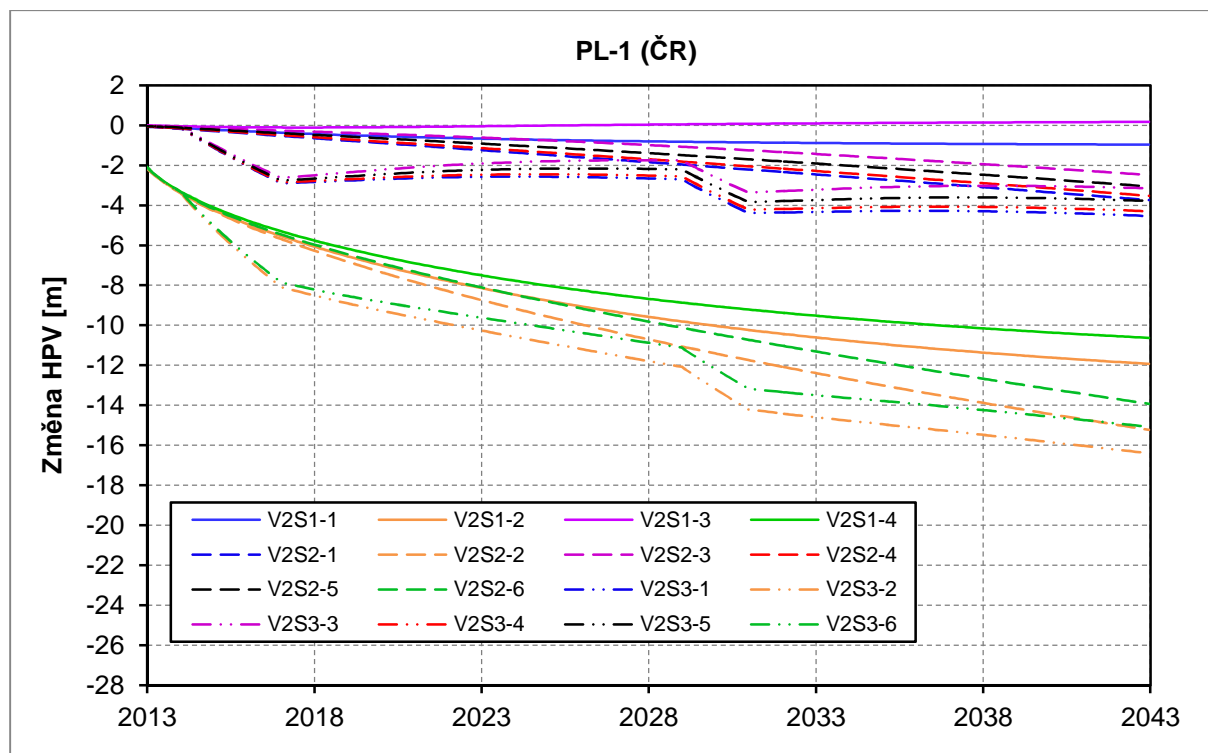




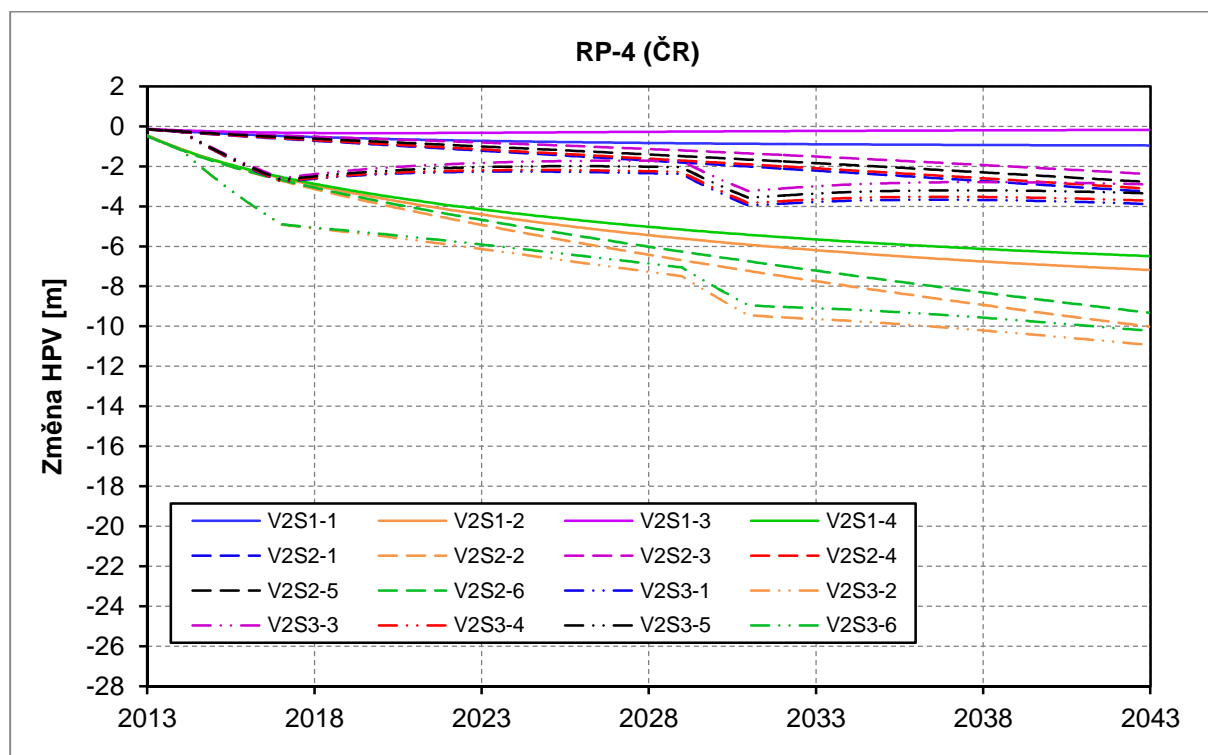
Obr. 46: Porovnání modelových predikcí pro scénáře V2S1-1 až V2S3-6 na vrtu 6/77 (SRN)



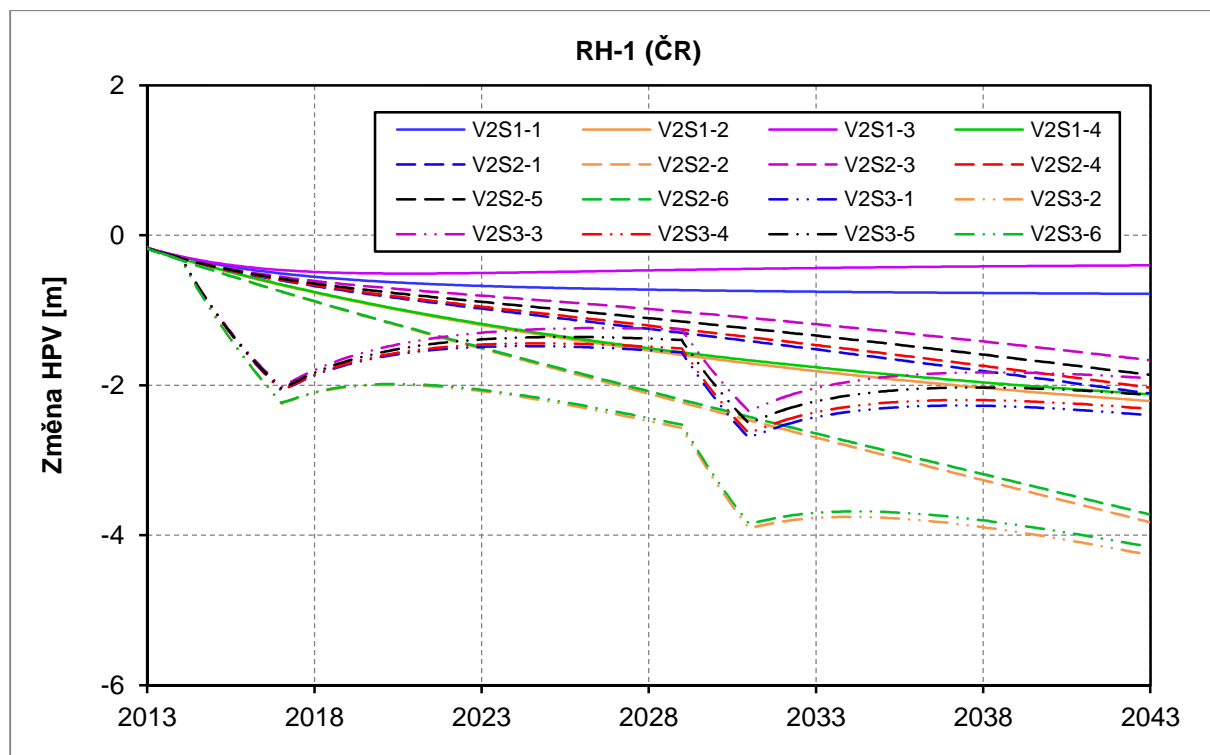
Obr. 47: Porovnání modelových predikcí pro scénáře V2S1-1 až V2S3-6 na vrtu RP-5 (ČR)



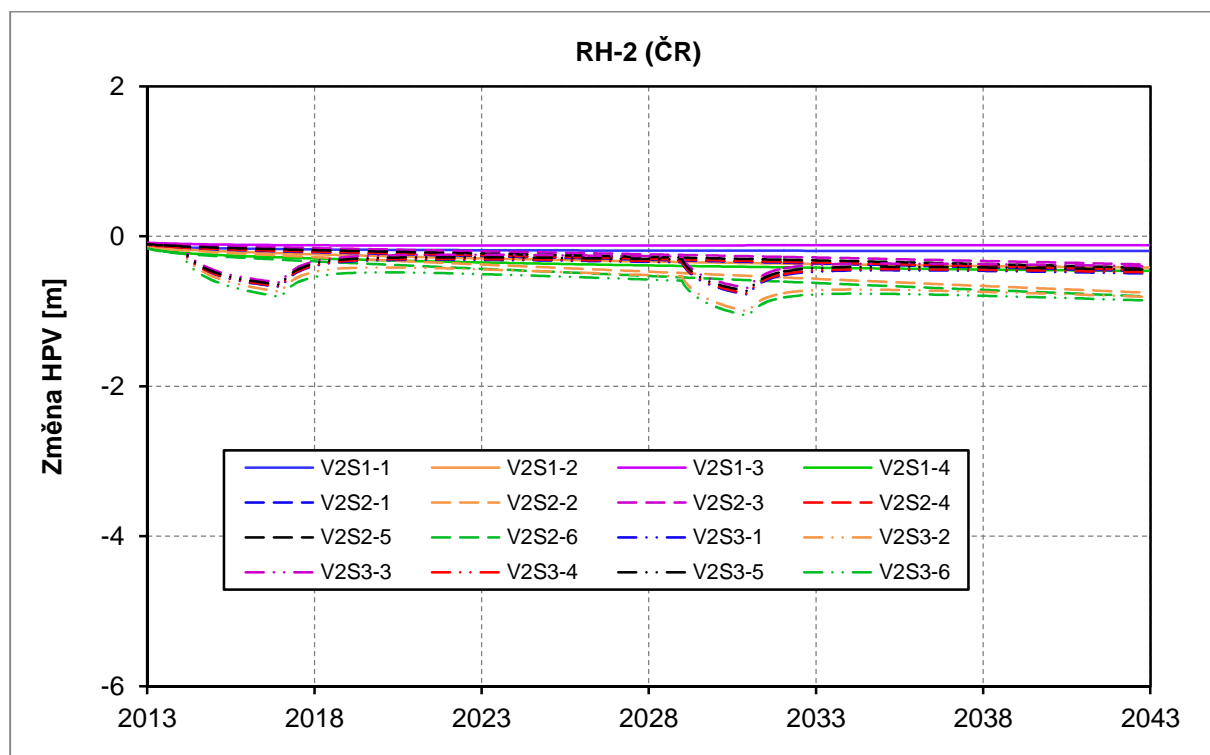
Obr. 48: Porovnání modelových predikcí pro scénáře V2S1-1 až V2S3-6 na vrtu PL-1 (ČR)



Obr. 49: Porovnání modelových predikcí pro scénáře V2S1-1 až V2S3-6 na vrtu RP-4 (ČR)

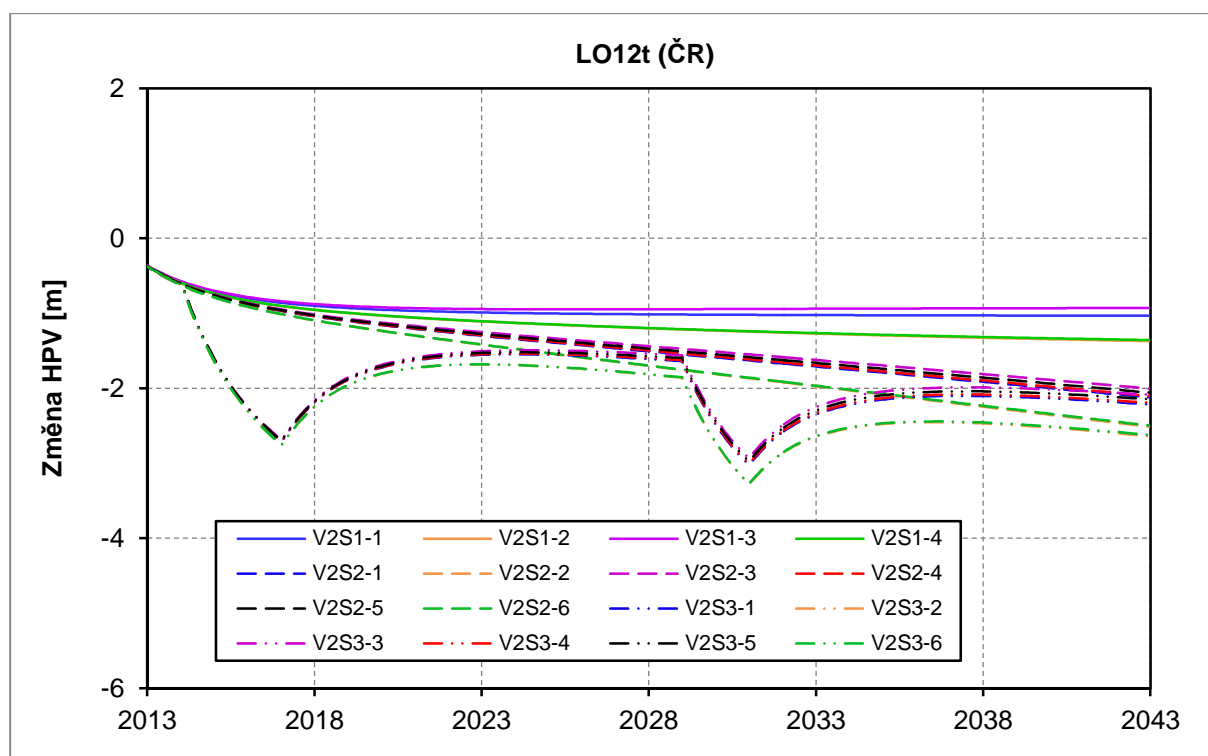


Obr. 50: Porovnání modelových predikcí pro scénáře V2S1-1 až V2S3-6 na vrtu RH-1 (ČR)

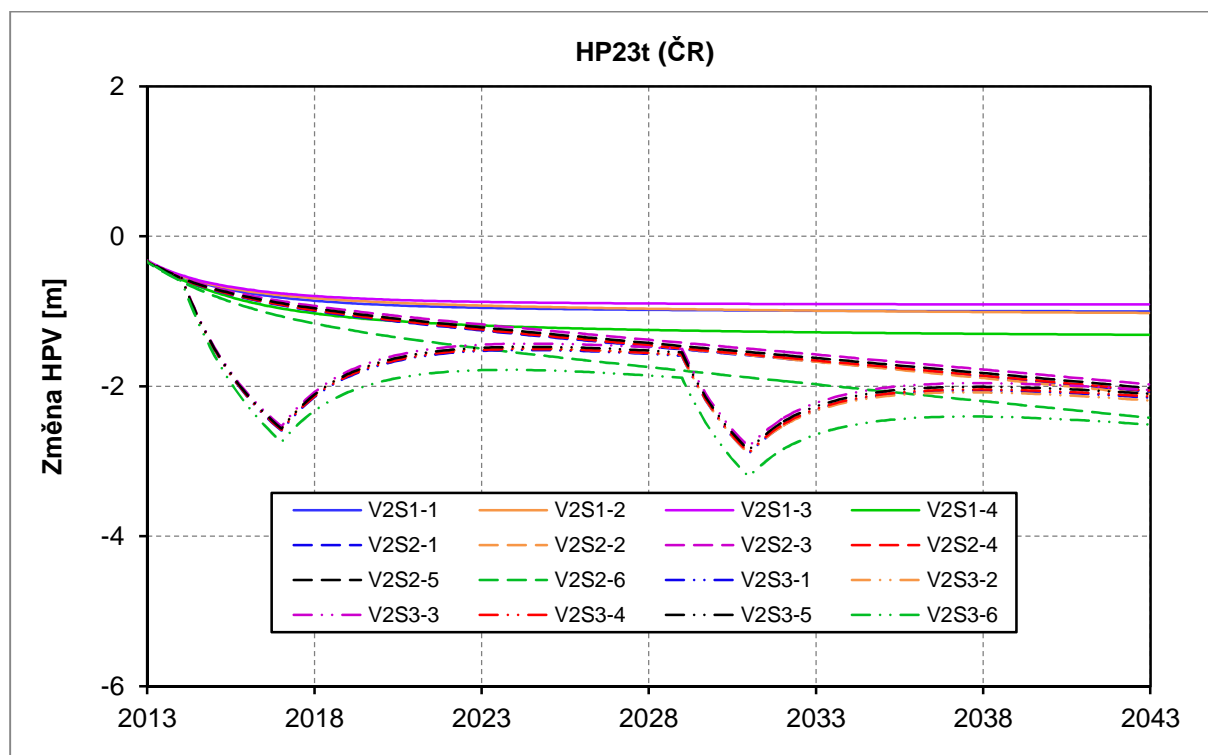


Obr. 51: Porovnání modelových predikcí pro scénáře V2S1-1 až V2S3-6 na vrtu RH-2 (ČR)

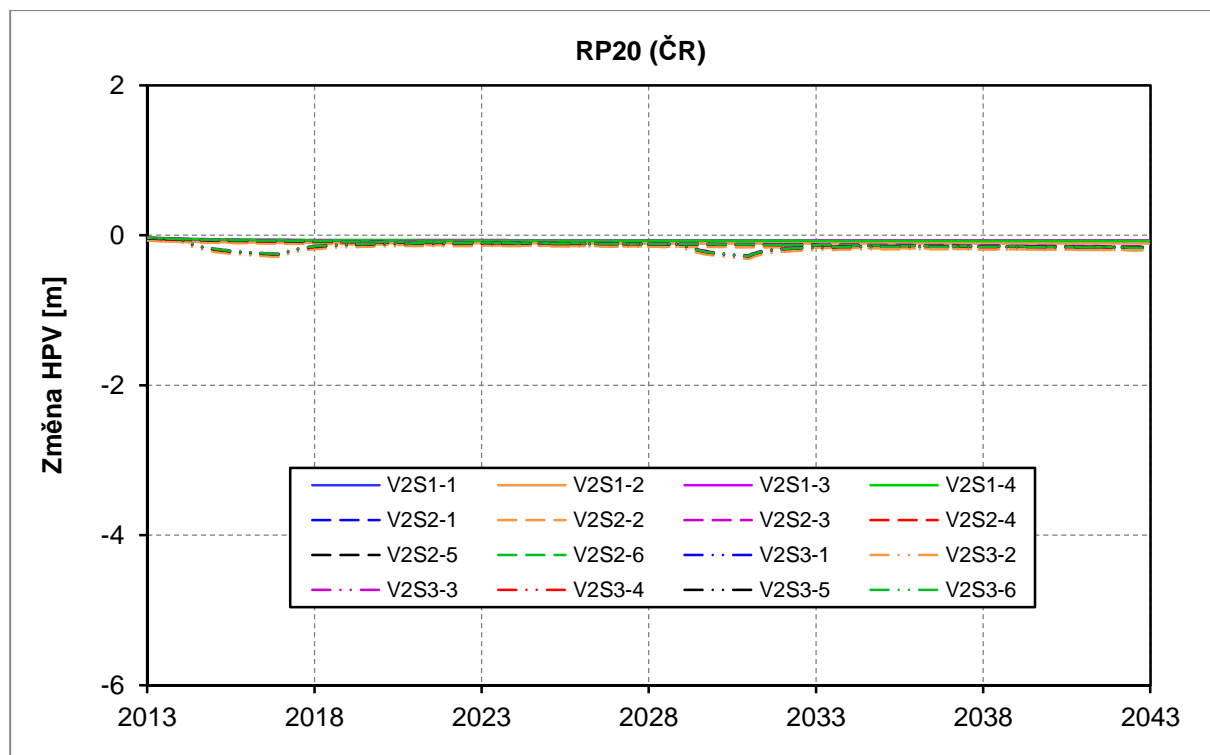




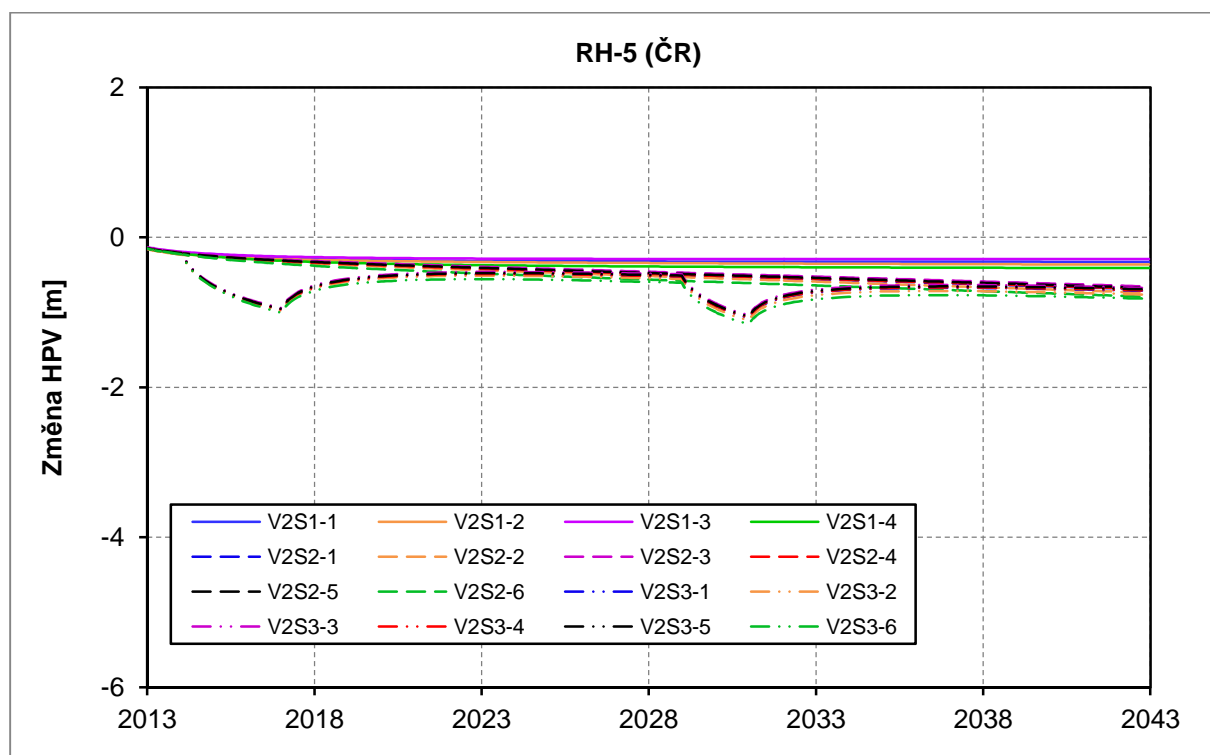
Obr. 52: Porovnání modelových predikcí pro scénáře V2S1-1 až V2S3-6 na vrtu LO12t (ČR)



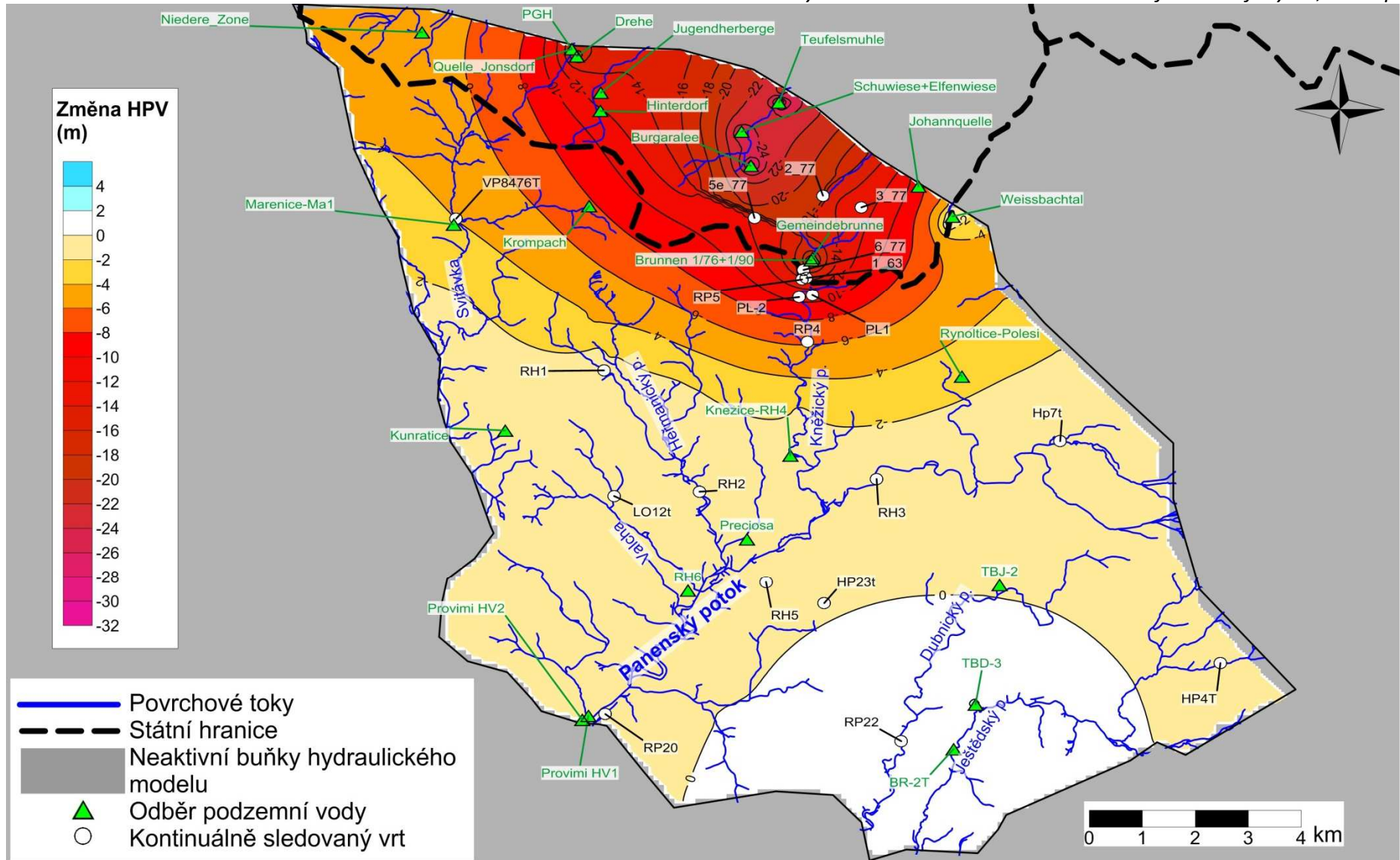
Obr. 53: Porovnání modelových predikcí pro scénáře V2S1-1 až V2S3-6 na vrtu HP23t (ČR)



Obr. 54: Porovnání modelových predikcí pro scénáře V2S1-1 až V2S3-6 na vrtu RP20 (ČR)

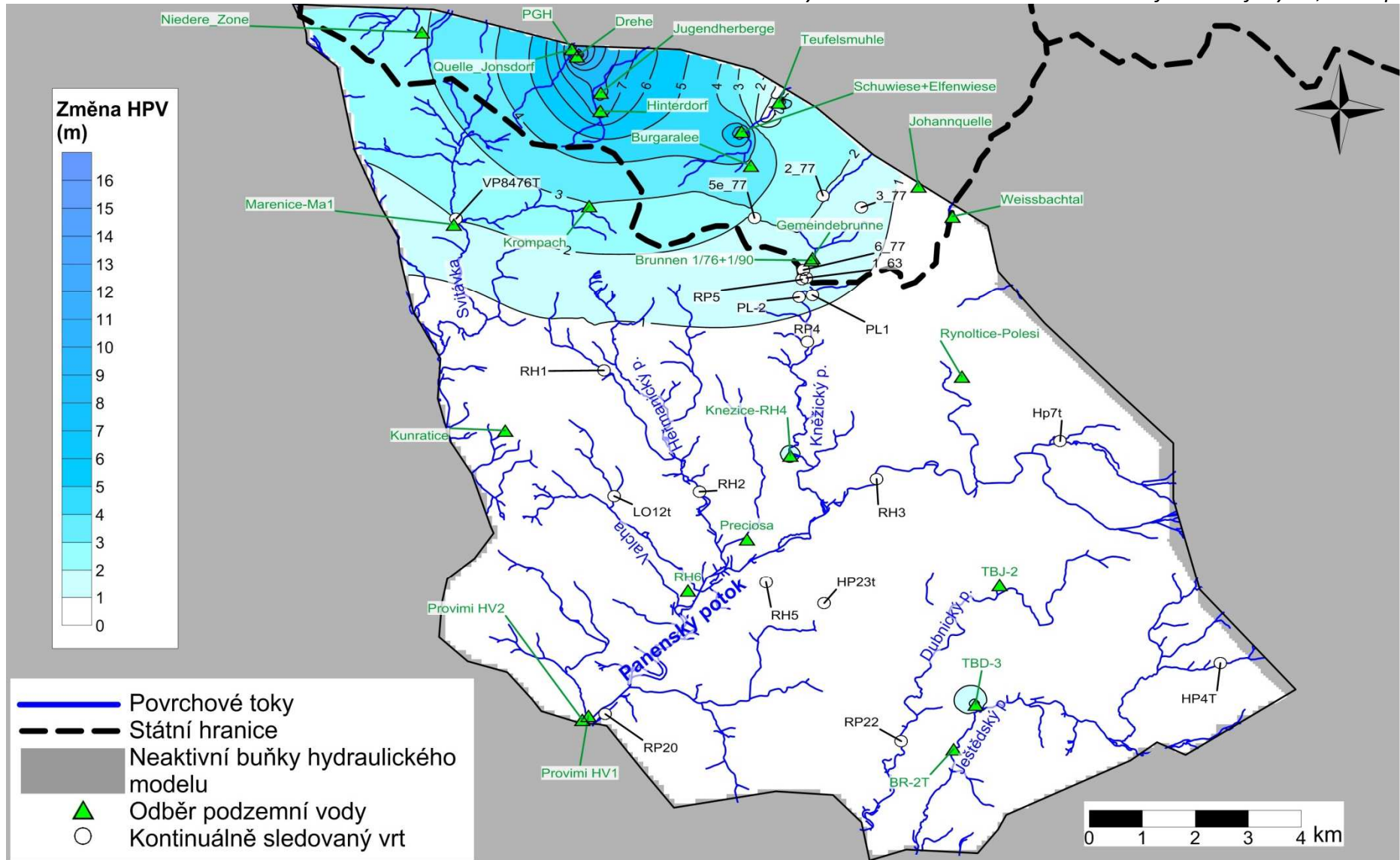


Obr. 55: Porovnání modelových predikcí pro scénáře V2S1-1 až V2S3-6 na vrtu RH-5 (ČR)



**Obr. 56: Rozdíl hladin podzemní vody scénářů V2S1-1 a V2S1-2, kolektor 2, rok 2043**

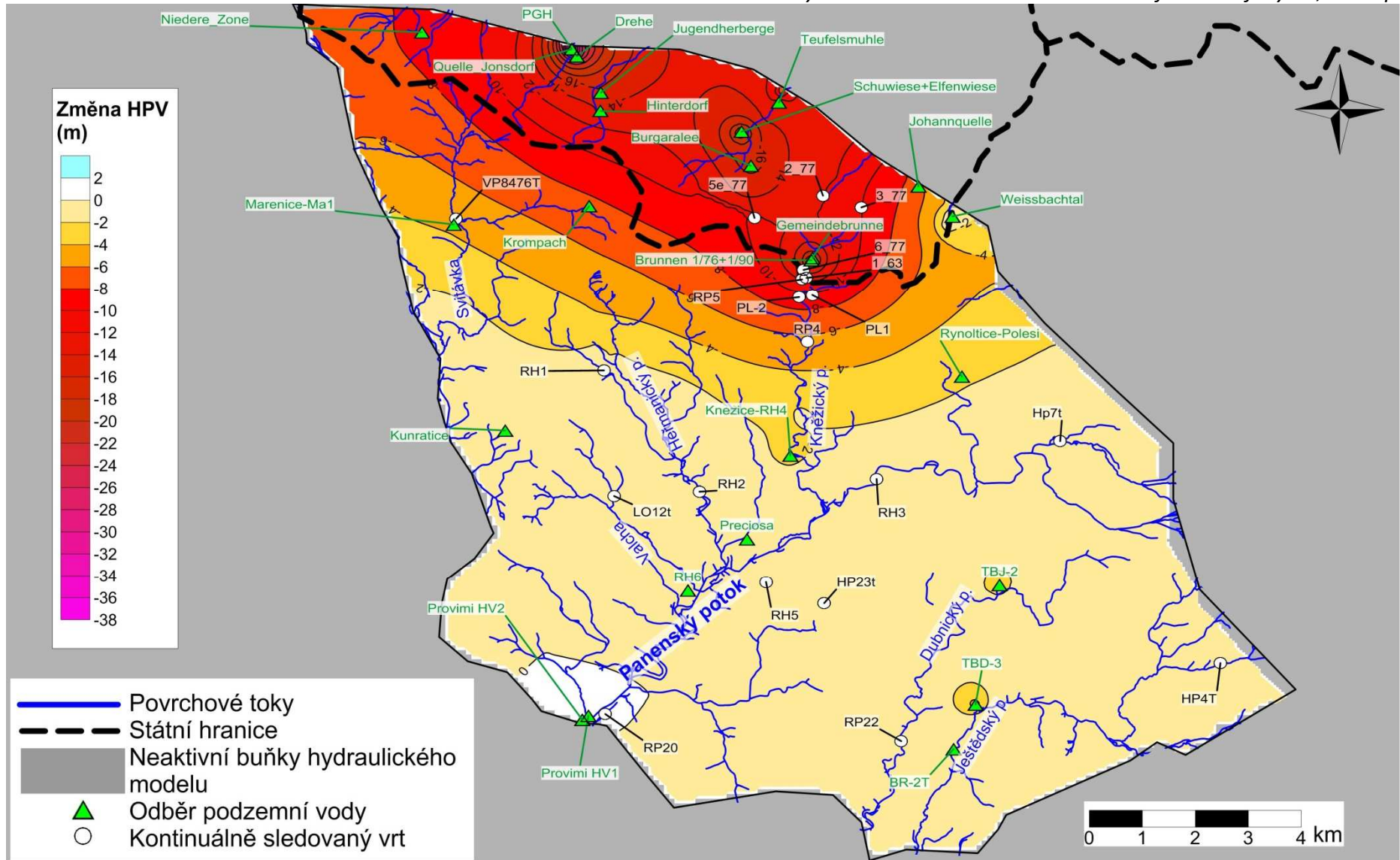
Pozn.: Záporné hodnoty rozdílů hladin podzemní vody znamenají snížení hladiny podzemní vody oproti scénáři V2S1-1. Kladné hodnoty rozdílů hladin podzemní vody popisují nárůst hladiny podzemní vody oproti scénáři V2S1-1.



**Obr. 57: Rozdíl hladin podzemní vody scénářů V2S1-1 a V2S1-3, kolektor 2, rok 2043**

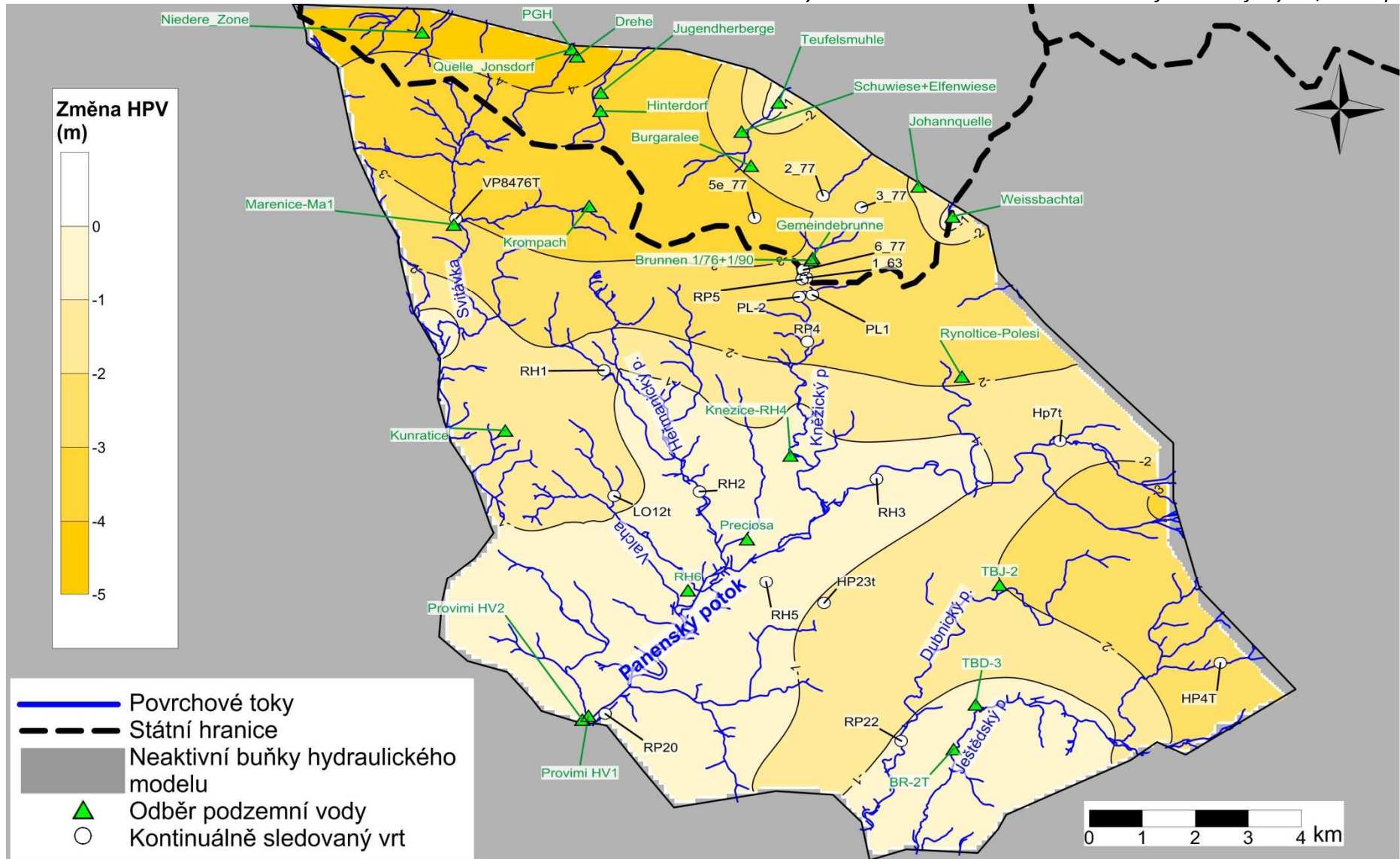
Pozn.: Záporné hodnoty rozdílů hladin podzemní vody znamenají snížení hladiny podzemní vody oproti scénáři V2S1-1. Kladné hodnoty rozdílů hladin podzemní vody popisují nárůst hladiny podzemní vody oproti scénáři V2S1-1.





**Obr. 58: Rozdíl hladin podzemní vody scénářů V2S1-1 a V2S1-4, kolektor 2, rok 2043**

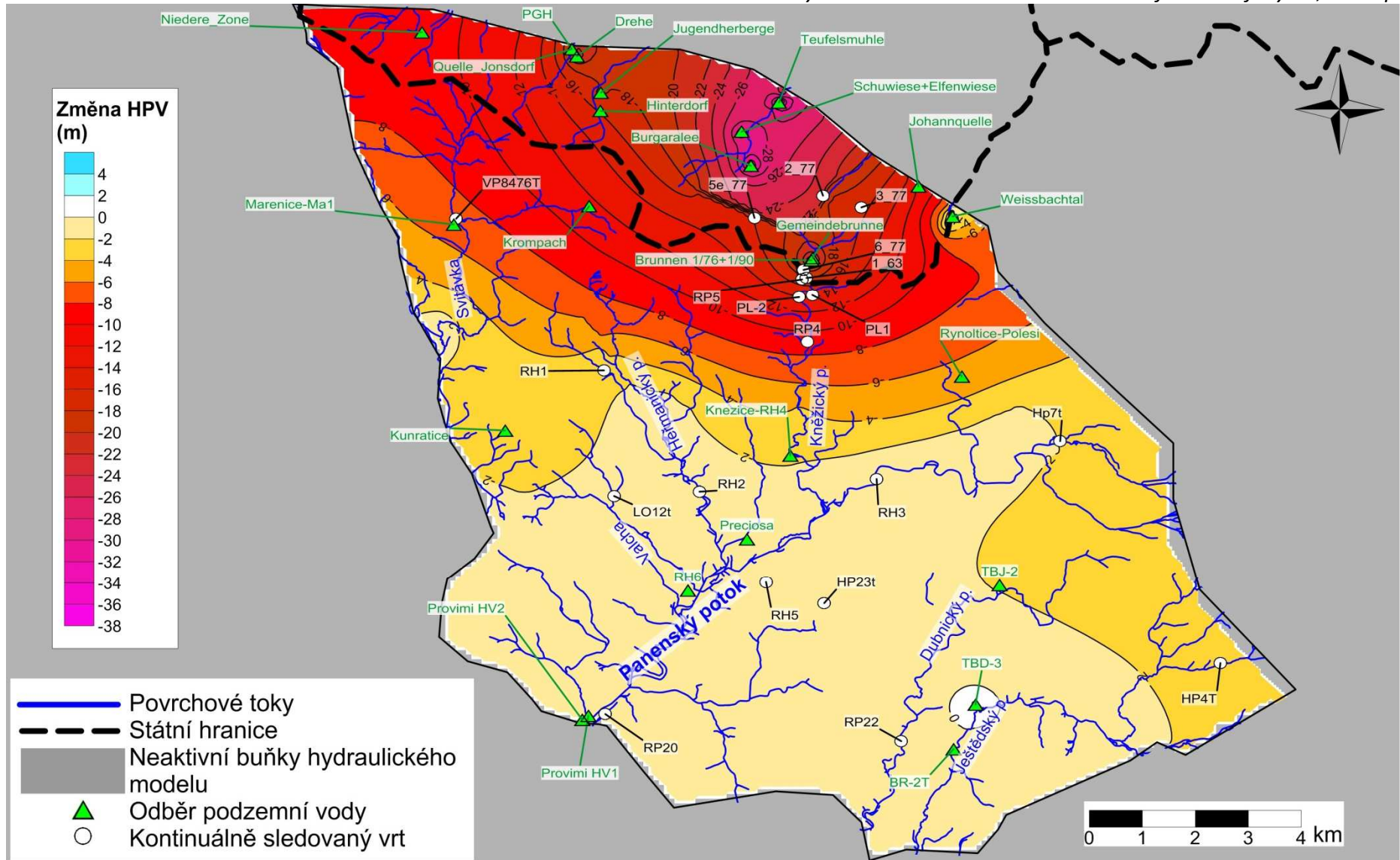
Pozn.: Záporné hodnoty rozdílů hladin podzemní vody znamenají snížení hladiny podzemní vody oproti scénáři V2S1-1. Kladné hodnoty rozdílů hladin podzemní vody popisují nárůst hladiny podzemní vody oproti scénáři V2S1-1.



**Obr. 59: Rozdíl hladin podzemní vody scénářů V2S1-1 a V2S2-1, kolektor 2, rok 2043**

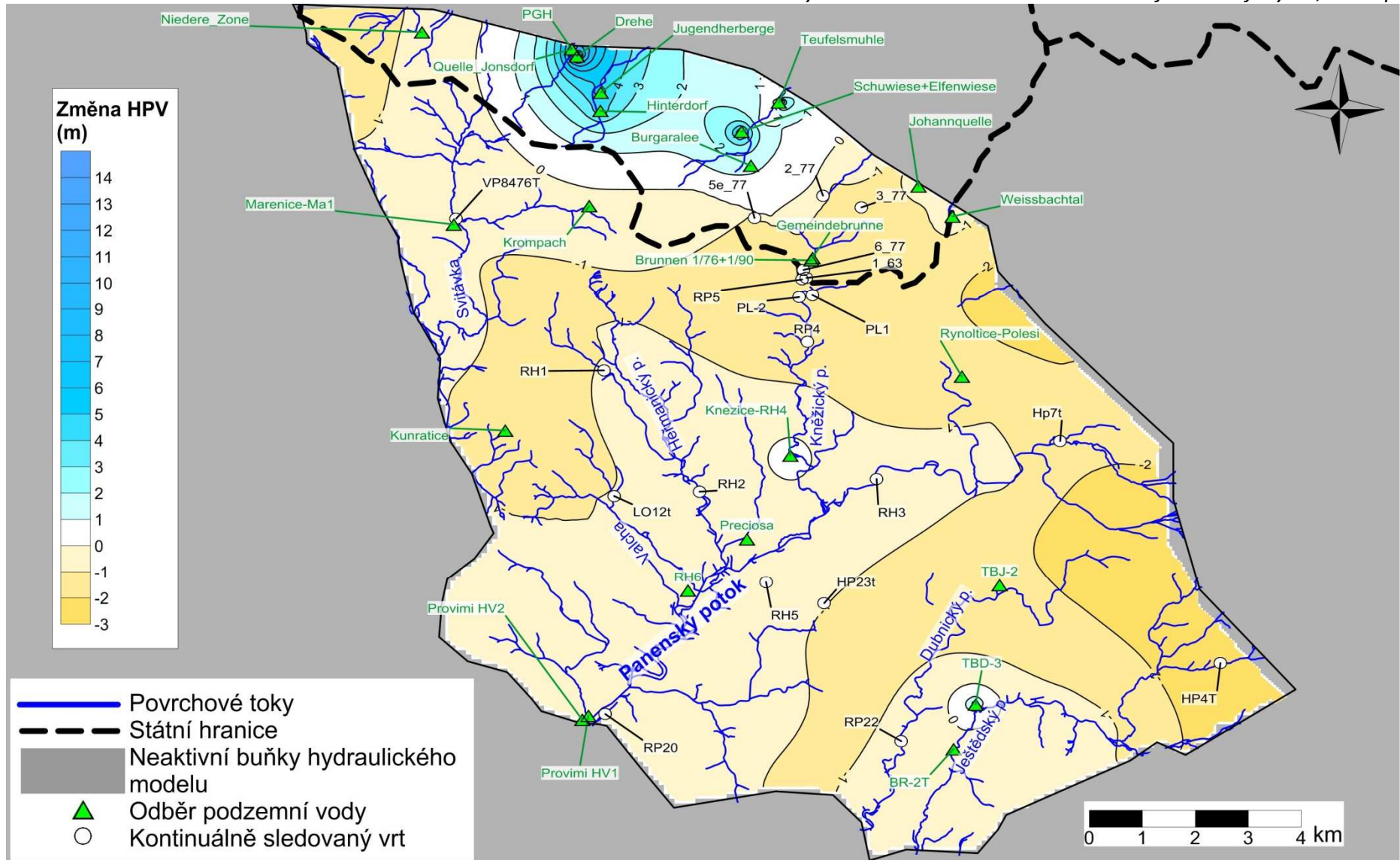
Pozn.: Záporné hodnoty rozdílů hladin podzemní vody znamenají snížení hladiny podzemní vody oproti scénáři V2S1-1. Kladné hodnoty rozdílů hladin podzemní vody popisují nárůst hladiny podzemní vody oproti scénáři V2S1-1





**Obr. 60: Rozdíl hladin podzemní vody scénářů V2S1-1 a V2S2-2, kolektor 2, rok 2043**

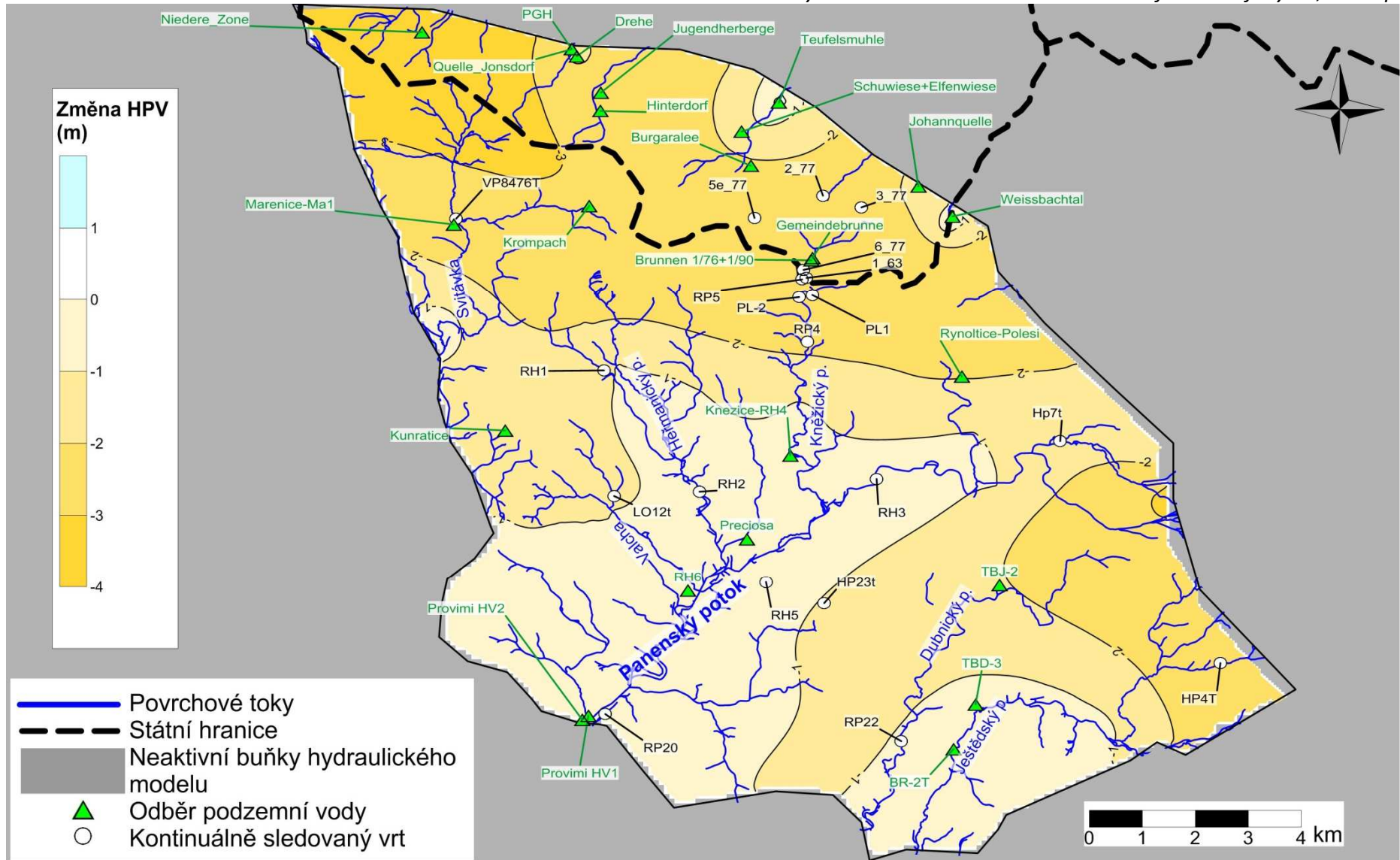
Pozn.: Záporné hodnoty rozdílů hladin podzemní vody znamenají snížení hladiny podzemní vody oproti scénáři V2S1-1. Kladné hodnoty rozdílů hladin podzemní vody popisují nárůst hladiny podzemní vody oproti scénáři V2S1-1



**Obr. 61: Rozdíl hladin podzemní vody scénářů V2S1-1 a V2S2-3, kolektor 2, rok 2043**

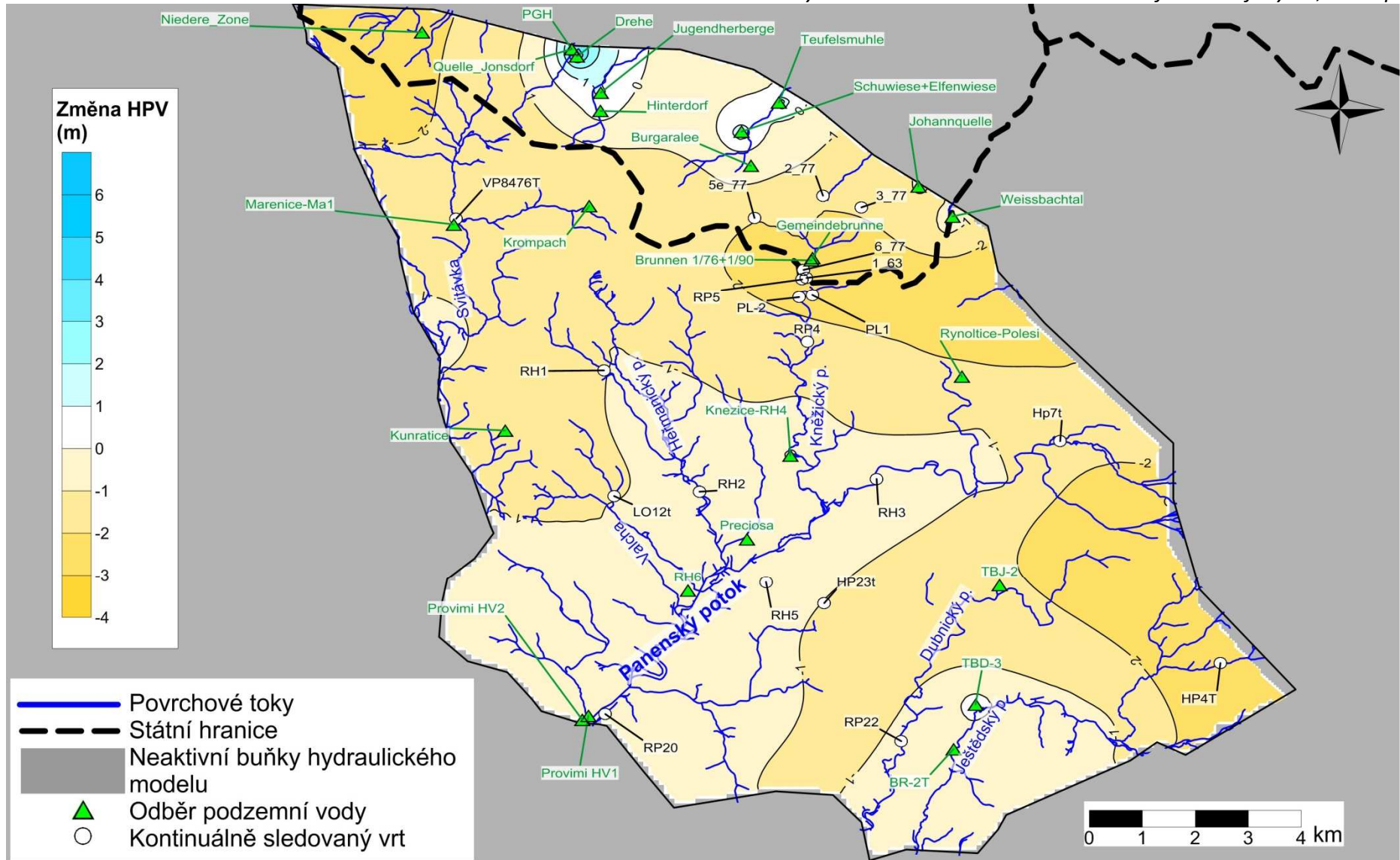
Pozn.: Záporné hodnoty rozdílů hladin podzemní vody znamenají snížení hladiny podzemní vody oproti scénáři V2S1-1. Kladné hodnoty rozdílů hladin podzemní vody popisují nárůst hladiny podzemní vody oproti scénáři V2S1-1





**Obr. 62: Rozdíl hladin podzemní vody scénářů V2S1-1 a V2S2-4, kolektor 2, rok 2043**

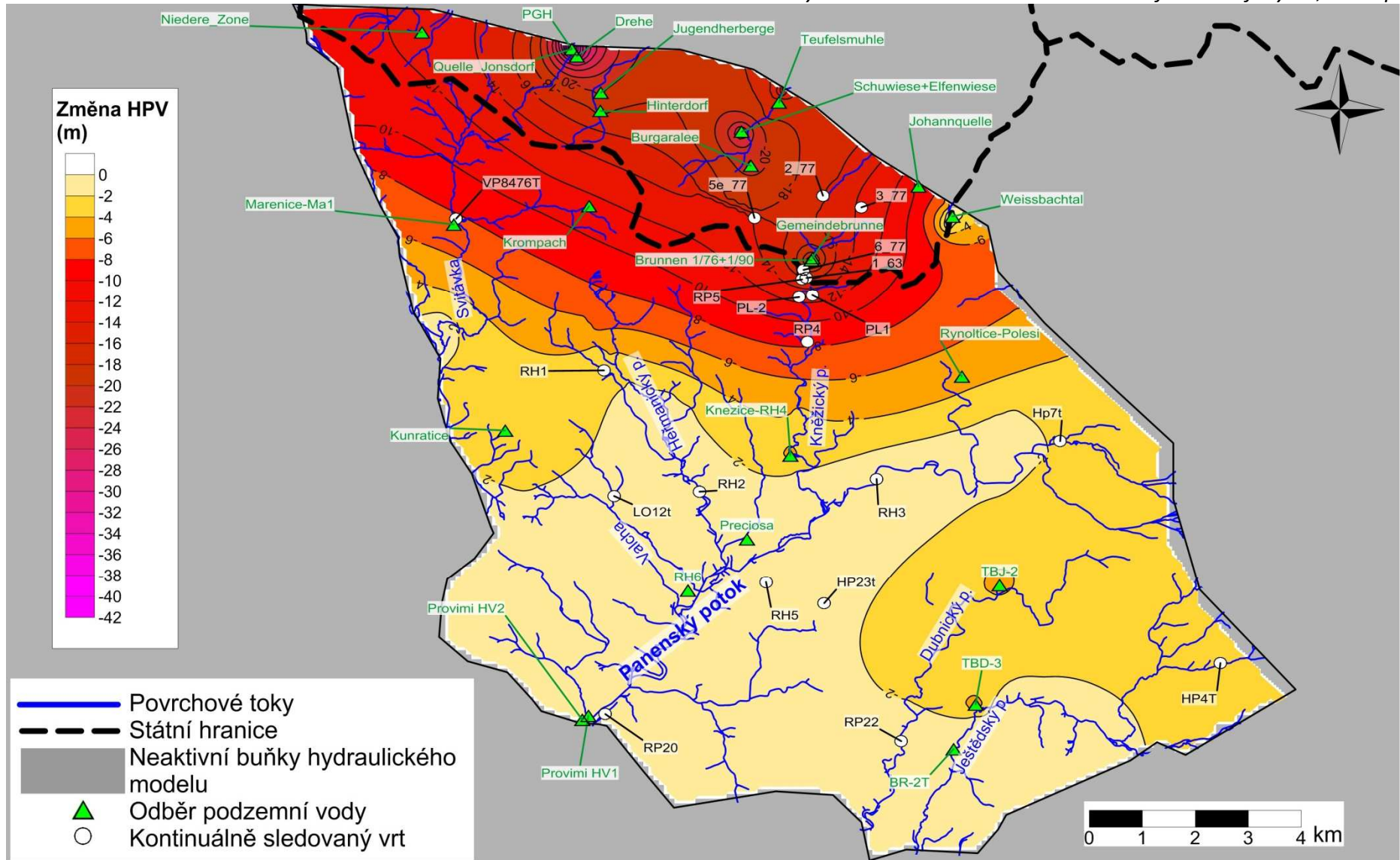
Pozn.: Záporné hodnoty rozdílů hladin podzemní vody znamenají snížení hladiny podzemní vody oproti scénáři V2S1-1. Kladné hodnoty rozdílů hladin podzemní vody popisují nárůst hladiny podzemní vody oproti scénáři V2S1-1



**Obr. 63: Rozdíl hladin podzemní vody scénářů V2S1-1 a V2S2-5, kolektor 2, rok 2043**

Pozn.: Záporné hodnoty rozdílů hladin podzemní vody znamenají snížení hladiny podzemní vody oproti scénáři V2S1-1. Kladné hodnoty rozdílů hladin podzemní vody popisují nárůst hladiny podzemní vody oproti scénáři V2S1-1

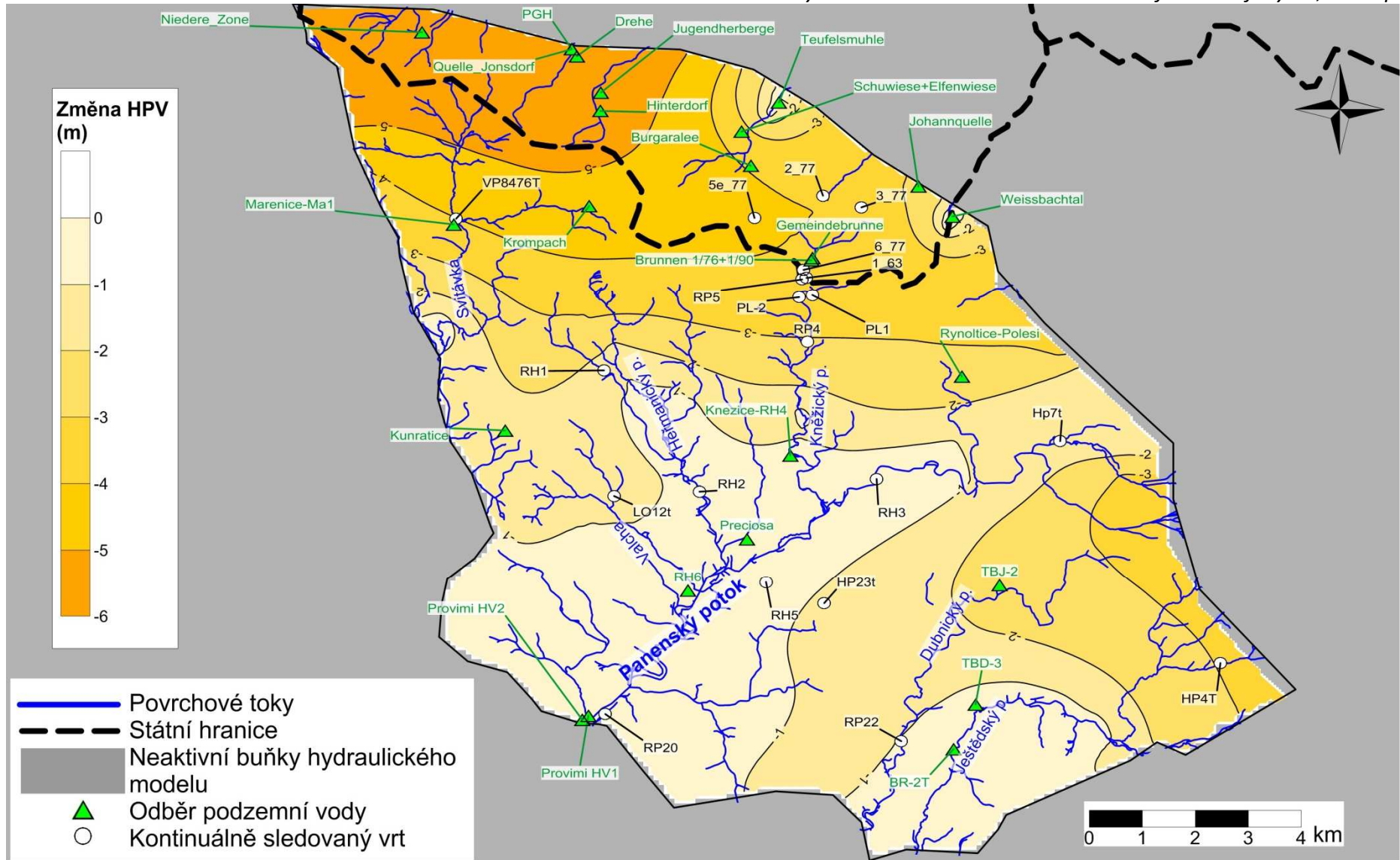




**Obr. 64: Rozdíl hladin podzemní vody scénářů V2S1-1 a V2S2-6, kolektor 2, rok 2043**

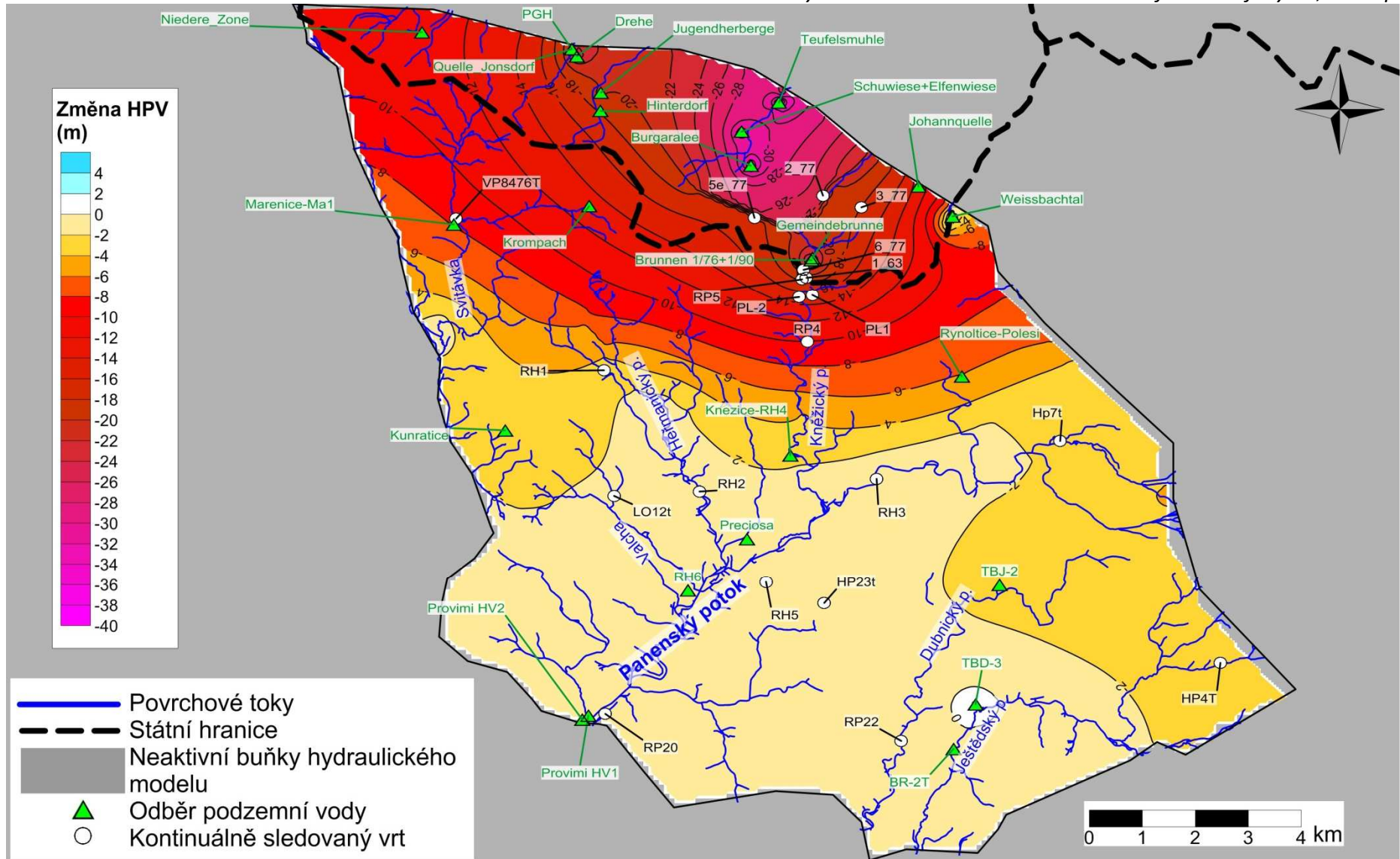
Pozn.: Záporné hodnoty rozdílů hladin podzemní vody znamenají snížení hladiny podzemní vody oproti scénáři V2S1-1. Kladné hodnoty rozdílů hladin podzemní vody popisují nárůst hladiny podzemní vody oproti scénáři V2S1-1





**Obr. 65: Rozdíl hladin podzemní vody scénářů V2S1-1 a V2S3-1, kolektor 2, rok 2043**

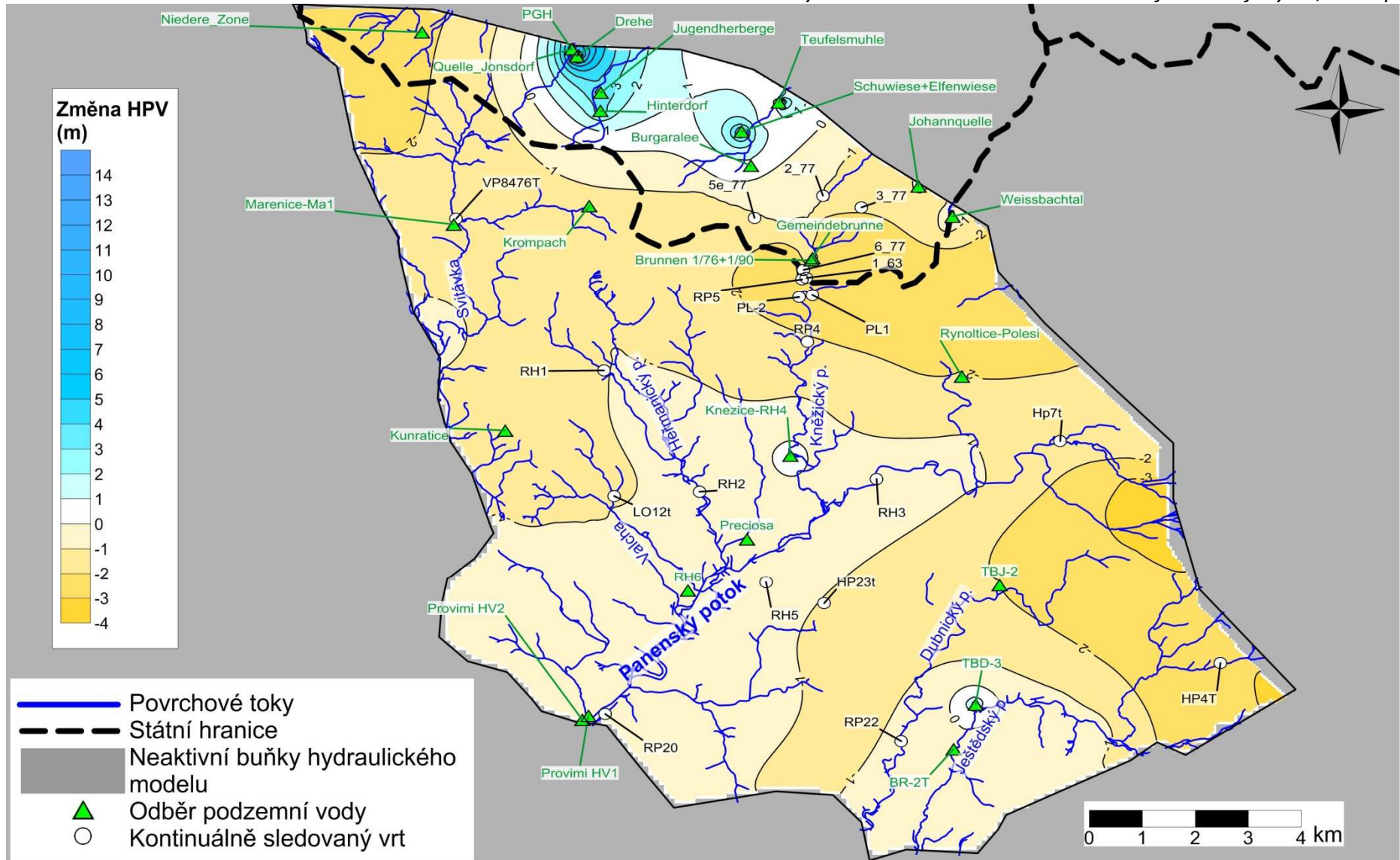
Pozn.: Záporné hodnoty rozdílů hladin podzemní vody znamenají snížení hladiny podzemní vody oproti scénáři V2S1-1. Kladné hodnoty rozdílů hladin podzemní vody popisují nárůst hladiny podzemní vody oproti scénáři V2S1-1



**Obr. 66: Rozdíl hladin podzemní vody scénářů V2S1-1 a V2S3-2, kolektor 2, rok 2043**

Pozn.: Záporné hodnoty rozdílů hladin podzemní vody znamenají snížení hladiny podzemní vody oproti scénáři V2S1-1. Kladné hodnoty rozdílů hladin podzemní vody popisují nárůst hladiny podzemní vody oproti scénáři V2S1-1

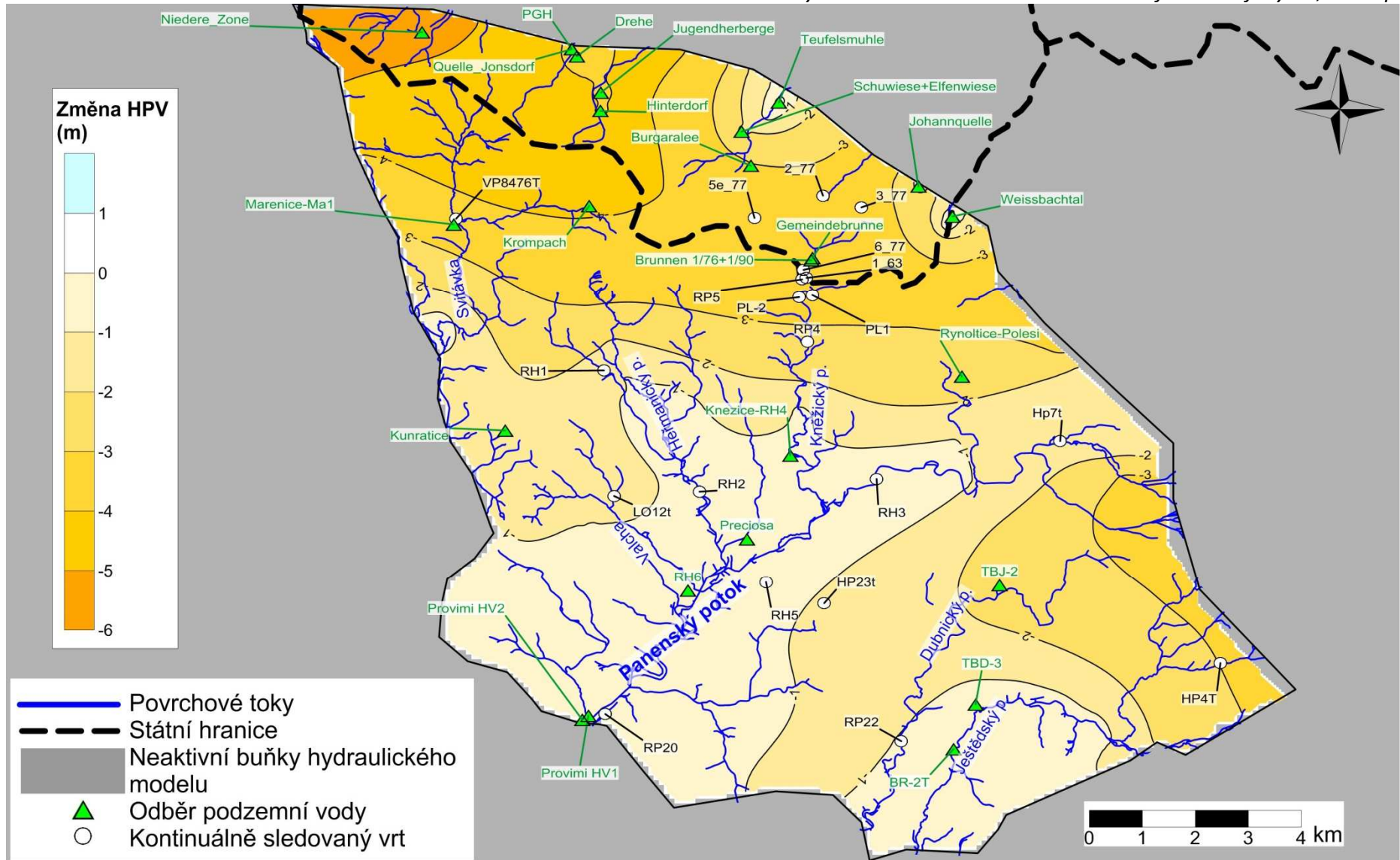




**Obr. 67: Rozdíl hladin podzemní vody scénářů V2S1-1 a V2S3-3, kolektor 2, rok 2043**

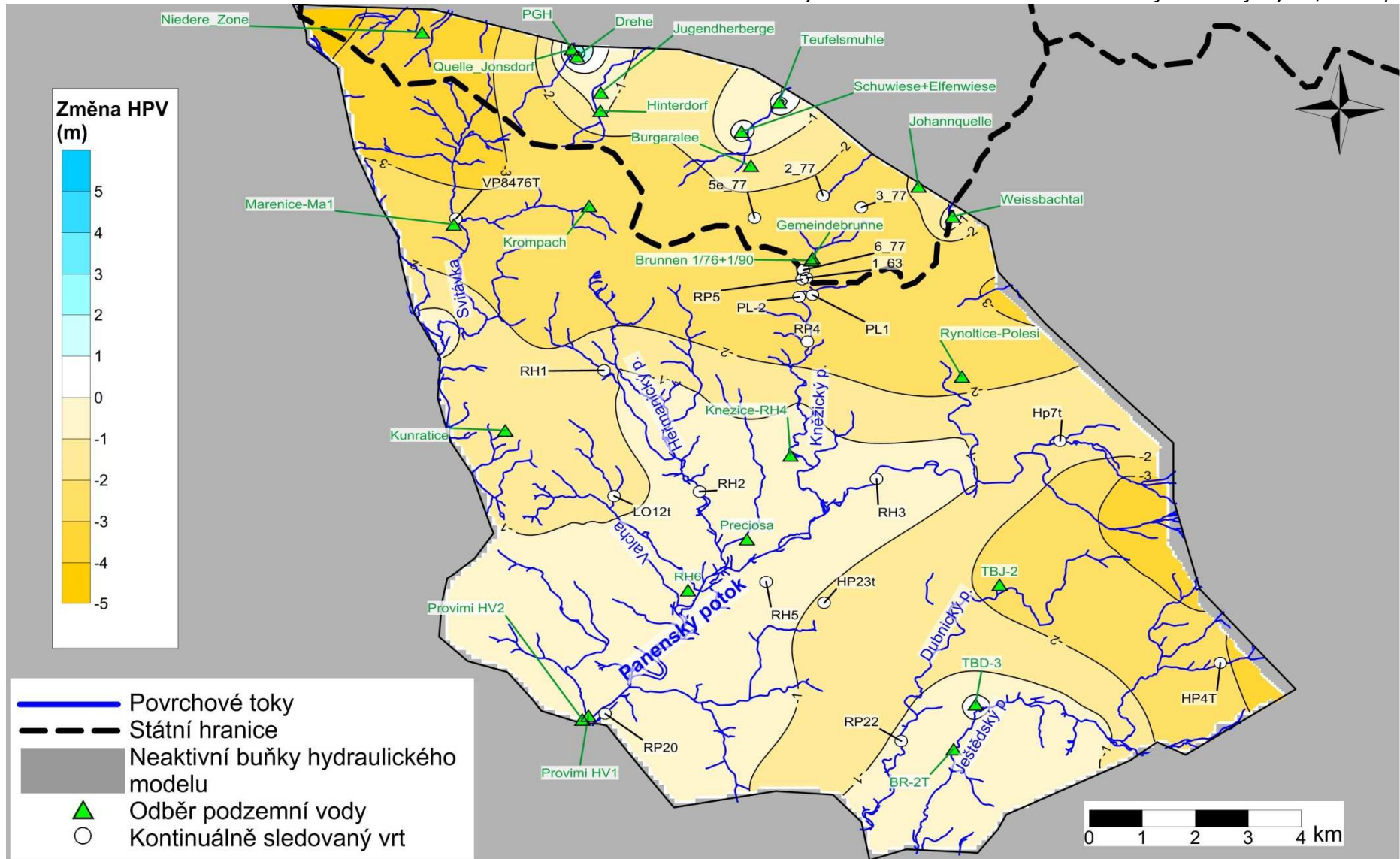
Pozn.: Záporné hodnoty rozdílů hladin podzemní vody znamenají snížení hladiny podzemní vody oproti scénáři V2S1-1. Kladné hodnoty rozdílů hladin podzemní vody popisují nárůst hladiny podzemní vody oproti scénáři V2S1-1





**Obr. 68: Rozdíl hladin podzemní vody scénářů V2S1-1 a V2S3-4, kolektor 2, rok 2043**

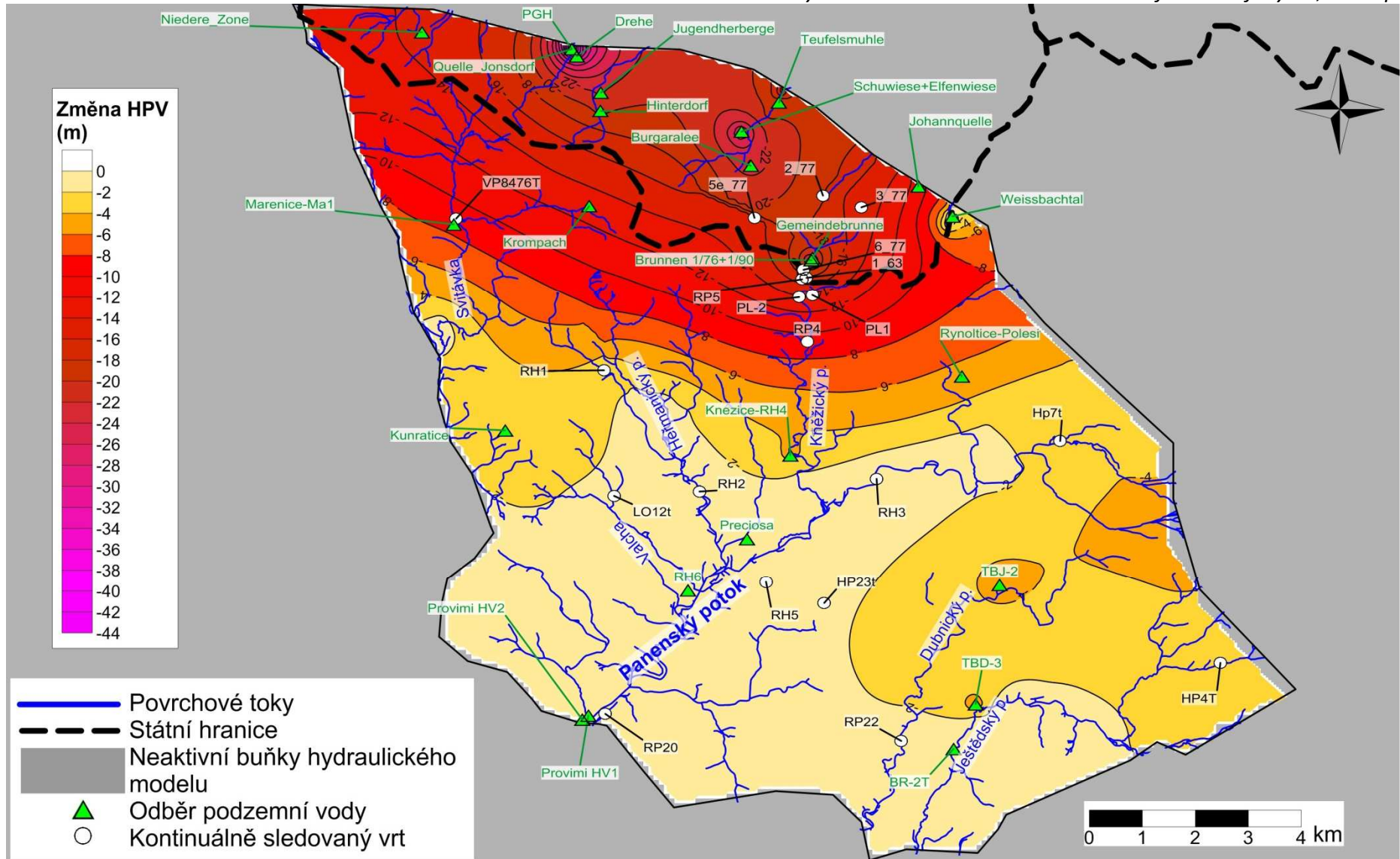
Pozn.: Záporné hodnoty rozdílů hladin podzemní vody znamenají snížení hladiny podzemní vody oproti scénáři V2S1-1. Kladné hodnoty rozdílů hladin podzemní vody popisují nárůst hladiny podzemní vody oproti scénáři V2S1-1



**Obr. 69: Rozdíl hladin podzemní vody scénářů V2S1-1 a V2S3-5, kolektor 2, rok 2043**

Pozn.: Záporné hodnoty rozdílů hladin podzemní vody znamenají snížení hladiny podzemní vody oproti scénáři V2S1-1. Kladné hodnoty rozdílů hladin podzemní vody popisují nárůst hladiny podzemní vody oproti scénáři V2S1-1





**Obr. 70: Rozdíl hladin podzemní vody scénářů V2S1-1 a V2S3-6, kolektor 2, rok 2043**

Pozn.: Záporné hodnoty rozdílů hladin podzemní vody znamenají snížení hladiny podzemní vody oproti scénáři V2S1-1. Kladné hodnoty rozdílů hladin podzemní vody popisují nárůst hladiny podzemní vody oproti scénáři V2S1-1



Z grafické dokumentace prognózních scénářů je patrný jeden společný rys – a sice významné ovlivnění hladiny podzemní vody odběry v německé části území, které se týká scénářů, jež počítají buď s maximálními zaznamenanými odběry (V2S1-4, V2S2-6, V2S3-6), nebo s maximálními povolenými odběry (V2S1-2, V2S2-2, V2S3-2) podle platných vodoprávních povolení (viz **Tab. 7**). Jak historicky maximální zaznamenané odběry, tak i aktuální povolené jsou značně vysoké a převyšují dlouhodobě využitelné přírodní zdroje dané oblasti.

Současná velikost odběrů na německé straně se po razantním poklesu v letech 1989–1993 pohybuje zhruba okolo 50–60 l/s, kdežto suma čerpání v roce 1987 v SRN činila bezmála 175 l/s (historické maximum). Podobně při součtu všech vydaných povolení k odběru podzemní vody na území SRN (bez započítání jímání pramenů) dostáváme hodnotu průměrného ročního čerpání o velikosti 179 l/s (zdroj: LfULG). Na české straně se v současnosti čerpání pohybuje mezi 25 a 30 l/s, přičemž historické maximum dosahovalo 64 l/s (1989) a povolený roční odběr odpovídá 36 l/s. Uvažování takto vysokých čísel v transienční simulaci po dobu 30 let pak vede k modelovým výsledkům dokumentovaným značnými poklesy hladiny podzemní vody v širokém pásmu prakticky až k Panenskému potoku.

Prognózní scénáře počítající se současnou velikostí odběrů a simulující postupný pokles infiltrace (V2S2-1, resp. V2S3-1) se projevují snížením hladiny podzemní vody v celé modelové oblasti o 1 až 5 m, resp. 1 až 6 m, přičemž větší poklesy se projevují v čistě infiltračních oblastech v SRN, kdežto drenážní oblast v okolí Panenského potoka se logicky vyznačuje poklesy nižšími.

#### 4.9. Stanovení využitelných zdrojů podzemní vody – stacionární predikce

Celkové přírodní zdroje celé modelové oblasti lze odvodit z minimálních průtoků Panenského potoka ve Velkém Valtínově, kde probíhá měření od roku 1995. Průměr všech měsíčních minim činí 440 l/s (Vaněk in Skořepa, 2013). Pokud tuto hodnotu vztáhneme přes plochu sledovaného povodí na celou modelovou oblast, vychází nám číslo 1 070 l/s. V této hodnotě však nejsou započteny využívání podzemních vod a skrytý odtok mimo modelové území. Tyto efekty jsou naopak dobře kompenzované ve vodní bilanci hydraulického modelu, na jehož základě lze vyčíslit celkové přírodní zdroje modelové oblasti (202 km<sup>2</sup>) na 1 492 l/s. Více jak 250 l/s přitom však připadá na přetok podzemní vody přes západní hranici (viz vodní bilance v **Tab. 6**)

Z celkové sumy přírodních zdrojů lze dostupnými technickými prostředky využít jen určitou část, aniž by došlo například k nežádoucímu snížení průtoků povrchových toků během suchých period, během nichž je většina odtoku tvořena právě odtokem podzemním. A právě definování kritérií pro stanovení mezního (přijatelného) vlivu odběru rovnajícímu se využitelným zdrojům, má zásadní vliv na výslednou hodnotu. Pokud bychom jako kritérium nastavili např. požadavek na setrvalý stav hladiny podzemní vody bez dalšího poklesu, pak by bylo možné využitelné zdroje podzemních vod ztotožnit s velikostí současných odběrů, jelikož každé další, byť nepatrné zvýšení čerpání bude v modelu ve výsledku znamenat snížení úrovně hladiny podzemní vody. To samé platí i v případě, že bychom zvolili „objemové“ kritérium, tedy například základní odtok v některém z povrchových toků drénujících hlavní kolektor.

Je tedy nutné nastavit určité limity ať už ve formě minimální úrovně hladiny podzemní vody ve specifikovaných vrtech, nebo minimálního základního odtoku, při jejichž dosažení bude konstatováno, že dalším snižováním hladiny podzemní vody by již mohlo dojít k negativnímu vlivu na okolí. Tento „negativní vliv“ má přitom velmi obecný charakter a může se týkat např. ovlivnění na vodu vázaných ekosystémů, dodržení minimálního (hygienického) průtoku v povrchových tocích nebo zachování vydatnosti důležitých vodárenských objektů.

Pro naše účely jsme využili tzv. „institut minimální hladiny“, kdy je hledána maximální velikost čerpání, při níž ustálená hladina podzemní vody nepoklesne pod předem stanovený limit na určeném vrtu. Jako kritérium minimální hladiny přitom uvažujeme minimální historicky zaznamenanou hladinu na vrtu RP-4, který byl v minulosti využíván jako „indikační“ vrt při česko-saských jednáních o přeshraničním vlivu využívání podzemních vod, a kterou ve své práci uvádí Mibus (1998). Na tomto vrtu byla v minulosti stanovena hladina 353,77 m n. m. jakožto minimum, které by nemělo být překročeno v důsledku čerpání na německé straně (Mibus, 1998). Vlastní hodnota přitom představuje historicky nejnižší zaznamenanou hladinu na tomto vrtu. Vzhledem k rozdílu absolutních hodnot modelových a měřených hladin (v řádu jednotek metrů), byla pro účely modelování přijata opravená limitní hodnota hladiny ve vrtu RP-4 v úrovni **356,23 m n. m.** představující modelový ekvivalent nejnižší zaznamenané hladiny (jedná se o nejnižší modelovou hladinu simulovanou na tomto vrtu v kalibračním scénáři V2S0-1).

Kromě přijaté limitní hladiny podzemní vody má zásadní význam na stanovení využitelných zdrojů rozložení jímacích objektů, jejichž čerpáním se testuje dosažení či překročení

stanoveného kritéria. Jak bylo ukázáno v předchozím textu, na snížení hladiny podzemní vody v modelové oblasti mají mnohem větší vliv německé odběry než české. Důvodem je obecně větší objem využívaných vod na německé straně a značná koncentrace německých jímacích objektů na relativně malé ploše. Lze tak logicky odvodit, že zatímco vrt RP-4 je dobře využitelný jako kritérium pro stanovení maximálních odběrů na německé straně, české odběry budou mít vzhledem k jejich velikosti a relativní vzájemné vzdálenosti jen velmi malý až zanedbatelný vliv. Z toho důvodu bylo zvoleno ještě druhé limitní kritérium, kterým je velikost základního odtoku Panenského potoka na profilu Velký Valtínov (tzn. složky odtoku tvořené pouze podzemní vodou). Minimální měsíční průtoky vypočtené z denních pozorování probíhajících zde od roku 1995 (Vaněk, 2013), které je možné při určitém zjednodušení ztotožnit se základním odtokem  $Q_z$ , byly seřazeny podle velikosti do sestupné řady. Z té byl následně jako druhé limitní kritérium stanoven  $Q_z$  50%, tedy základní odtok se statistickým 50% zabezpečením. Druhým hodnotícím kritériem je tedy základní odtok Panenského potoka na profilu Velký Valtínov o **velikosti  $Q_{z50\%} = 426$  l/s**.

Protože v současnosti existuje na české straně jen velmi málo využívaných jímacích objektů, byly do modelu ve scénářích V2S1-5 až V2S1-7 zahrnuty i staré vodárenské vrty RH-1, RH-3, RH-5 a RH-7 (situace - viz **Obr. 71**). Důvodem bylo lepší rozložení testovaných odběrů v rámci modelové oblasti.

Pro modelová řešení s výše uvedeným zadáním byly využity scénáře V2S1-5 až V2S1-7 (viz **Tab. 7**), které předpokládají konstantní infiltraci a velikost čerpání po celou dobu predikce. Čas 30 let simulace je dostatečný k tomu, aby došlo k ustálení proudění podzemní vody a dosažení stacionárního stavu. Výsledky jsou graficky uvedeny na **Obr. 71** až **Obr. 73** a dále pak ve formě vodní bilance v **Tab. 8**.

**Tab. 8: Vodní bilance stacionárních prognóz – scénáře V2S1-5 až V2S1-7**

Stacionární prognózy – vodní bilance [l/s]			
Scénář	V2S1-5	V2S1-6	V2S-7
Infiltrace	1492	<b>1492</b>	1492
Čerpání ČR	37	<b>204</b>	321
Čerpání SRN	78	<b>107</b>	174
Prameny u lužické poruchy	31	<b>29</b>	24
celkem odběry	146	<b>340</b>	519
Odtok přes západní hranici (GHB)	240	<b>228</b>	206
Panenský potok Velký Valtínov – drenáž	524	<b>405</b>	330

**Tab. 9: Porovnání výsledků stacionárních prognóz s limitními hodnotami**

Kritéria hodnocení využitelných zásob				
Kritérium	V2S1-5	V2S1-6	V2S-7	Limit
Hladina RP-4 [m n. m.]	358.1	356.3	353.3*	<b>356.23</b>
Základní odtok Panenský p. Velký Valtínov [l/s]	524	405	330	<b>426</b>

\*Ve scénáři V2S-7 nedošlo ani po 30 letech k ustálení hladiny podzemní vody

Při daném nastavení testu vychází hodnota využitelných zdrojů podzemní vody v modelové oblasti 330 l/s – scénář V2S1-6. Při tomto scénáři došlo sice k mírnému podkročení kritéria

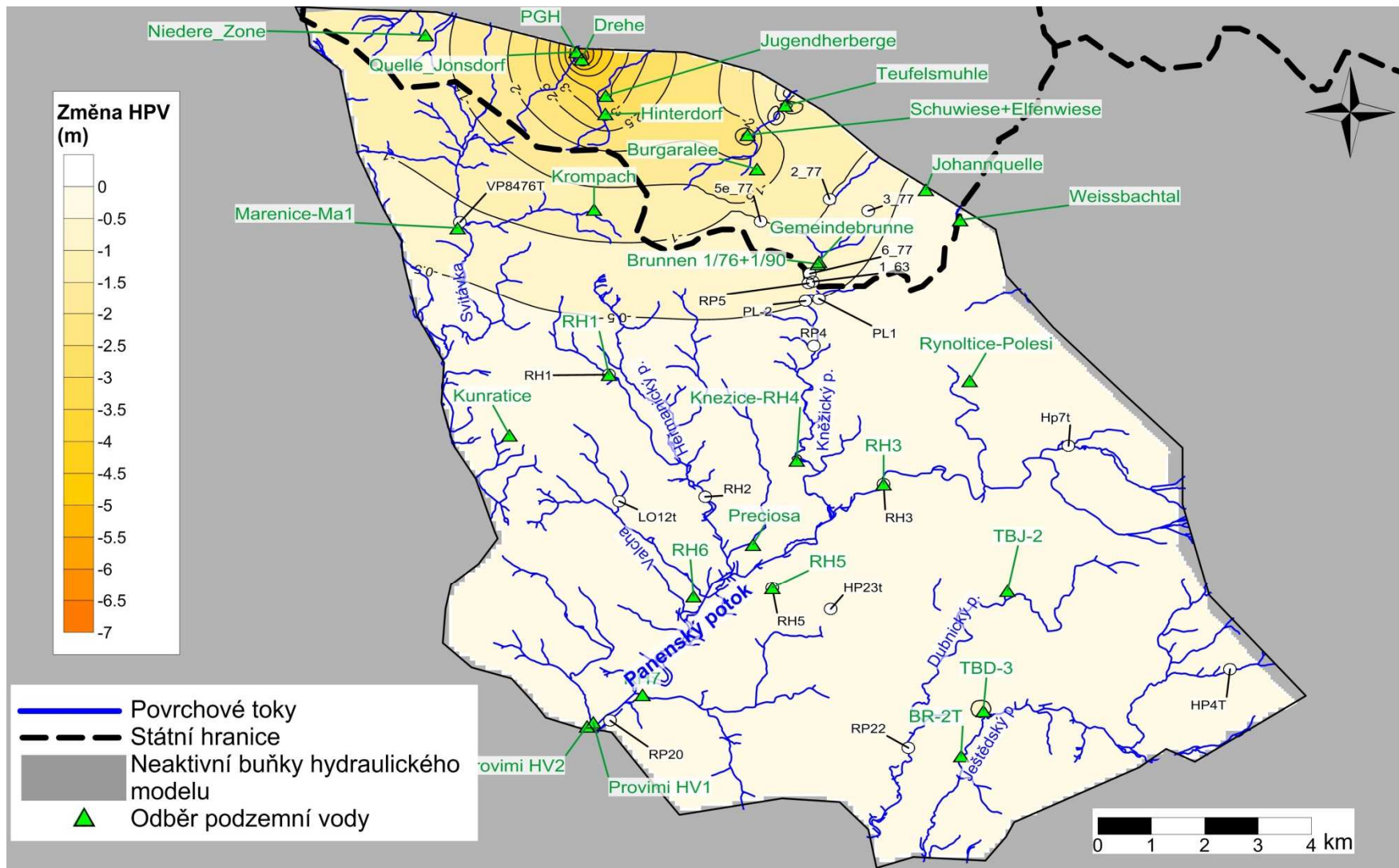


minimálního základního odtoku na profilu Panenský potok-Velký Valtínov, rozdíl oproti stanovenému limitu je však vzhledem k celkové modelové chybě zanedbatelný.

Snížení hladiny podzemní vody oproti výchozímu scénáři (V2S1-1) je vyneseno do mapky na **Obr. 72**. Celkové modelové snížení se pohybuje od 0 do max. 18 m, v průměru však kolem 1 až 3 m po 30 letech od současnosti.

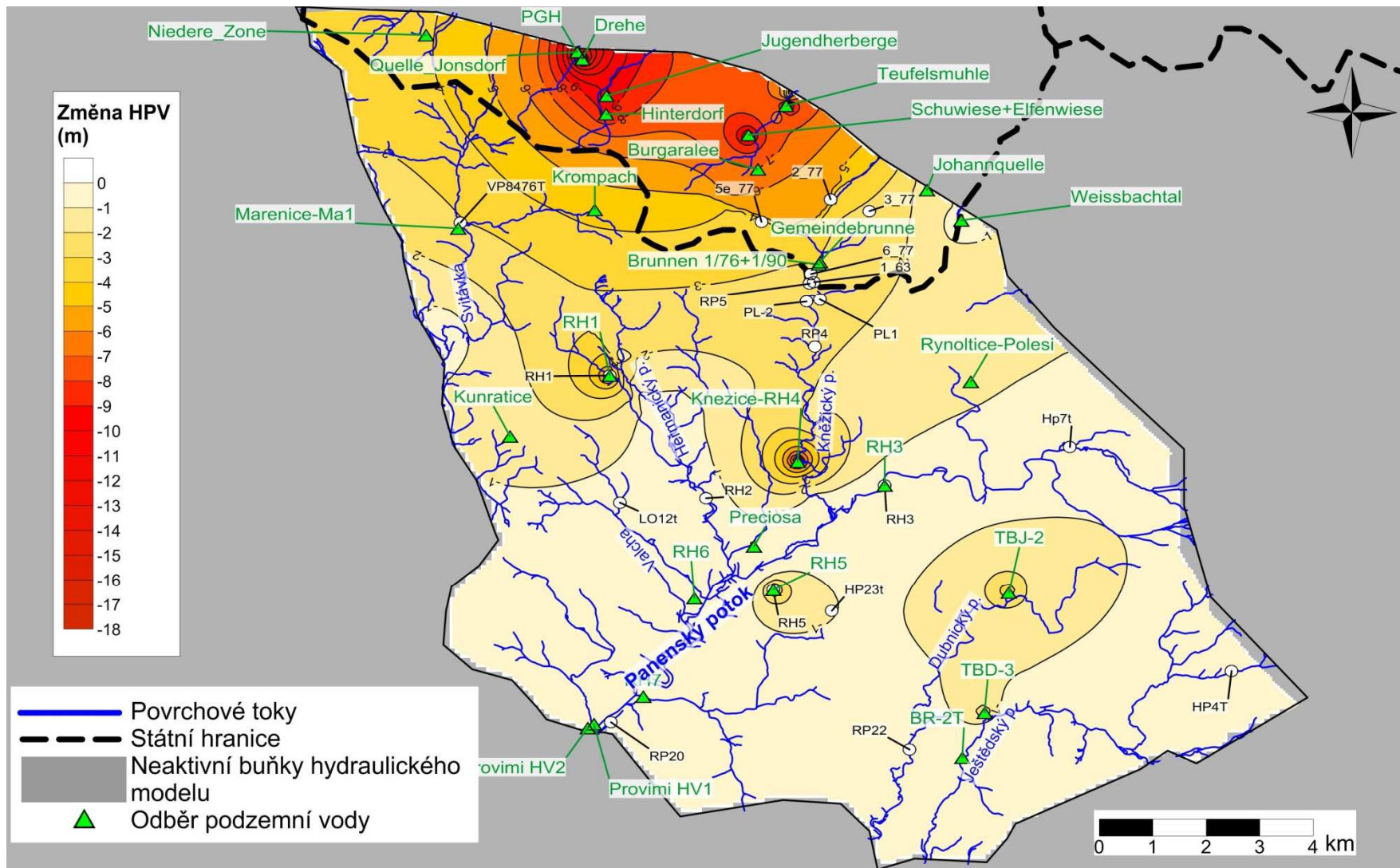
Ve scénáři V2S1-7, ve kterém byly úmyslně nadhodnoceny odběry podzemních vod, nedošlo ani po 30 letech simulace k ustálení proudění a hladina na pozorovaném vrtu stále klesala. Odběry 519 l/s uvažované v tomto scénáři tedy převyšují dlouhodobě využitelné zdroje podzemních vod v modelové oblasti (nebyl dodržen základní požadavek na ustálení proudění podzemní vody).

Velmi důležité je připomenout, že velikost stanovených využitelných zdrojů podzemních vod v rámci modelové oblasti je ovlivněna nejen všemi modelovými nejistotami (viz **Kap. 4.10.**), ale zejména volbou kritérií, která nesmí být překročena. V modelovém hodnocení byla využita dříve dohodnutá „nepodkročitelná“ hladina na vrtu RP-4 a základní odtok Panenského potoka na profilu Velký Valtínov. Je nutné poznamenat, že při jiné volbě kritérií nebo rozdílném nastavení jejich limitních hodnot se může výsledné stanovení využitelných zdrojů značně lišit.



**Obr. 71: Rozdíl hladin podzemní vody scénářů V2S1-1 a V2S1-5, kolektor 2, rok 2043**

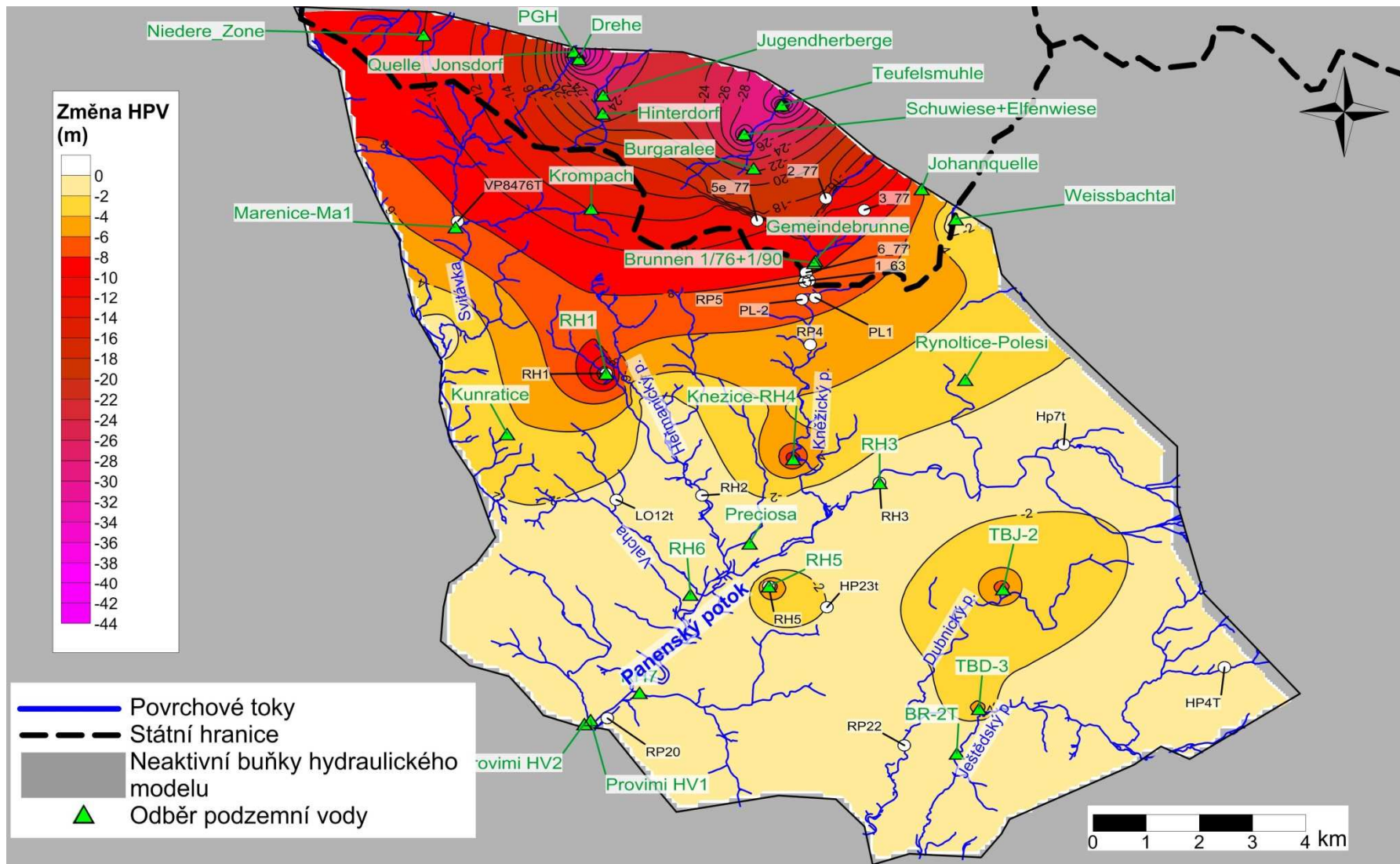
Pozn.: Záporné hodnoty rozdílů hladin podzemní vody znamenají snížení hladiny podzemní vody oproti scénáři V2S1-1. Kladné hodnoty rozdílů hladin podzemní vody popisují nárůst hladiny podzemní vody oproti scénáři V2S1-1



**Obr. 72: Rozdíl hladin podzemní vody scénářů V2S1-1 a V2S1-6, kolektor 2, rok 2043**

Pozn.: Záporné hodnoty rozdílů hladin podzemní vody znamenají snížení hladiny podzemní vody oproti scénáři V2S1-1. Kladné hodnoty rozdílů hladin podzemní vody popisují nárůst hladiny podzemní vody oproti scénáři V2S1-1





**Obr. 73: Rozdíl hladin podzemní vody scénářů V2S1-1 a V2S1-7, kolektor 2, rok 2043**

Pozn.: Záporné hodnoty rozdílů hladin podzemní vody znamenají snížení hladiny podzemní vody oproti scénáři V2S1-1. Kladné hodnoty rozdílů hladin podzemní vody popisují nárůst hladiny podzemní vody oproti scénáři V2S1-1

#### 4.10. Nejistoty modelu a citlivostní analýzy

Asi nejzásadnější nejistotou hydraulického modelu jsou výsledky týkající se proudění podzemní vody v severozápadním cípu modelové oblasti, odkud neexistují prakticky žádné relevantní údaje o hladině podzemní vody a jejím režimu. Model v této oblasti nelze porovnat se skutečnými hladinami podzemní vody, a tudíž jeho věrohodnost zde nelze ověřit.

K určitému zjednodušení úlohy dochází v důsledku uvažování nulového přetoku podzemní vody z krystalinika podél lužické poruchy. Určitou roli v bilanci může hrát přetok zejména v okolí velkých odběrů na německém území (jímáně PGH a Drehe), které se nacházejí velmi blízko lužické poruchy a vzhledem k jejich velikosti mohou čistě teoreticky indukovat přítoky z krystalinika.

Další nejistotou je geometrie kolektorů v německé části území. Báze jednotlivých vrstev zde sice byly vytvořeny na základě předaného geologického modelu zpracovaného firmou G.E.O.S. (Kahnt, 2014), ale i tento je vzhledem k velmi malému počtu geologických podkladů z vrtů nedostačující pro dobrou definici všech bází.

Další významnou nejistotou hydraulického modelu je hydrogeologická role tektoniky a dílčích zlomů, podle nichž je celá modelová oblast rozdělena do jednotlivých, oproti sobě různě posunutých ker. Ačkoliv hladiny podzemní vody v pozorovaných vrtech až na výjimky neukazují na významnější vliv tektoniky na proudění podzemní vody, nelze tento vliv vzhledem ke značnému tektonickému porušení oblasti vyloučit. Zejména pak v oblasti podél lužické poruchy, kde lze očekávat významné tektonické porušení hornin celého křídového sledu.

Velmi důležitým faktorem je reprezentativnost pozorovacích objektů, a to hned ze dvou důvodů: stáří vrtu a jeho lokalizace. Nejdéle pozorované vrty mají záznamy dlouhé 30–45 let, které však mohou být ovlivněny stavem vrtu. Na řadě vrtů s dlouhým záznamem byla po provedení karotáže v posledních 10 letech ukončena jejich sledování a vrt byl kvůli svému stavu vyřazen z monitorovací sítě. Koncepte celé struktury a změny zásob podzemních vod jsou přitom odvozeny především na základě známého kolísání úrovně hladiny v pozorovacích vrtech. Nezanedbatelný vliv na kolísání hladiny podzemní vody, který není možné modelem postihnout, mohou působit sezónní změny infiltrace v rámci jednoho hydrologického roku (např. doplňování zásob na jaře z tajícího sněhu, nebo naopak letní období s vysokou evapotranspirací apod.).

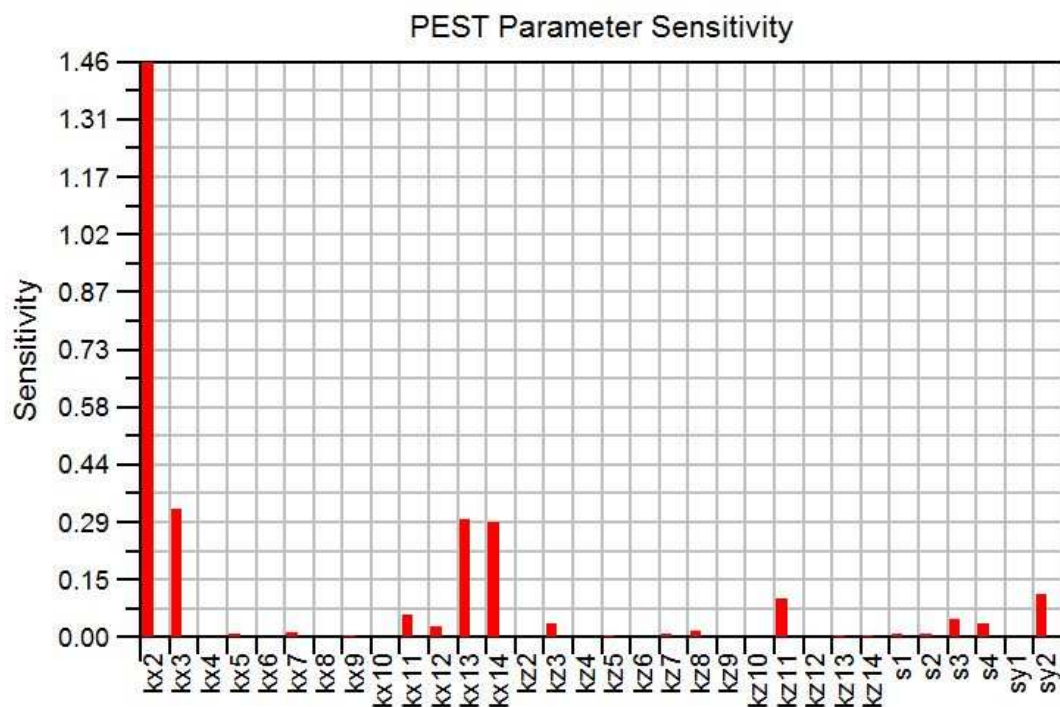
Pro určitou míru kvantifikace modelových nejistot vycházejících z odhadů hydraulických parametrů byla provedena citlivostní analýza. Po dohodě se zadavatelem a s německým partnerem (LfULG) byly do citlivostní analýzy zahrnuty vybrané hydraulické parametry, které mají největší vliv na modelované proudění podzemní vody. Seznam analyzovaných parametrů je uveden v **Tab. 10**. V grafu na **Obr. 74** jsou vyneseny citlivosti jednotlivých parametrů modelu. Citlivostní analýza kvantifikuje reakce modelu (modelových výsledků) na změny hodnot vstupních parametrů. Její výsledky lze interpretovat tak, že parametry, na jejichž změnu je model citlivý, je možné relativně přesně stanovit. Naopak stanovení parametrů s nízkou nebo nulovou citlivostí je neprůkazné.

Z výsledků vyplývá, že daleko nejcitlivější je model na změny horizontální hydraulické vodivosti kolektoru 2+3 (Kx2, Kx13) a dále pak (již méně) hydraulické vodivosti kolektoru 4 (Kx3, Kx14). Vliv na výsledky má i hodnota volné storativity (efektivní porozity) kolektoru 2+3. Model naopak prakticky nereaguje na hodnoty hydraulické vodivosti kolektoru 1 v důsledku absence kalibračních dat v nejvyšší modelové vrstvě.

Tab. 10: Seznam parametrů testovaných citlivostní analýzou

Označení	Příslušná vrstva	Typ parametru	Citlivost	Pořadí podle citlivosti (1=nejvyšší)
<b>Kx 2</b>	<b>Kolektor 2+3</b>	Horizontální hydraulická vodivost	1.4576	<b>1</b>
<b>Kx 3</b>	<b>Kolektor 4</b>		0.3262	<b>2</b>
Kx 4	Kolektor 1		0.0012	26
Kx 5			0.0091	15
Kx 6			0.0003	29
Kx 7			0.0125	13
Kx 8			0.0021	22
Kx 9			0.0056	19
Kx 10			0.0002	30
Kx 11			Poloizolátor 3/4	0.0588
Kx 12	Kolektor 4		0.0284	11
<b>Kx 13</b>	<b>Kolektor 2+3</b>		0.2977	<b>3</b>
<b>Kx 14</b>	<b>Kolektor 4</b>		0.2932	<b>4</b>
Kz 2	Kolektor 2+3		Vertikální hydraulická vodivost	0.0018
Kz 3	Kolektor 4	0.0364		10
Kz 4	Kolektor 1	0.0004		27
Kz 5		0.0050		20
Kz 6		0.0019		23
Kz 7		0.0085		16
Kz 8		0.0157		12
Kz 9		0.0015		25
Kz 10		0.0004		28
Kz 11		Poloizolátor 3/4		0.0973
Kz 12	Kolektor 4	0.0001		31
Kz 13	Kolektor 2+3	0.0041		21
Kz 14	Kolektor 4	0.0060		18
s1	Kolektor 1	Specifická storativita		0.0075
s2	Kolektor 2+3		0.0091	14
s3	Poloizolátor 3/4		0.0444	8
s4	Kolektor 4		0.0365	9
Sy1	Kolektor 1	Volná storativita	0.0000	32
<b>Sy2</b>	<b>Kolektor 2+3</b>		<b>0.1103</b>	<b>5</b>





**Obr. 74: Citlivostní analýza**

Hydraulický model není v prognózních scénářích schopen reflektovat sezónní kolísání infiltrace a tím vliv na úroveň hladiny podzemní vody. Veškeré prognózy vycházejí ze stanovené průměrné infiltrace pro modelovou oblast a odrážejí tak předpokládaný obecný trend vývoje hladiny podzemní vody. Skutečný režim může být poznamenán nejen střídáním suchých a vlhkých period, ale i nepravidelným rozložením srážek v průběhu jednotlivých let a jejich intenzitou a bude proto pravděpodobně daleko více rozkolísaný.

## 5. Závěr

V souladu se zadáním byl zkonstruován transientní model proudění podzemní vody v oblasti Petrovice-Lückendorf-Jonsdorf-Oybin. Transientní model byl kalibrován na všechny dostupné historické informace získané s cílem, aby dobře popisoval vývoj hladin podzemních vod v minulosti. Nakalibrovaný model umožnil odlišit vliv čerpání podzemních vod a infiltrace na změny hladin podzemních vod a predikovat vývoj hladin podzemních podle zadaných klimatických scénářů a velikosti odběrů podzemních vod.

Na základě provedených simulací lze konstatovat, že na kolísání hladiny podzemní vody v modelové oblasti měla v minulosti vliv kombinace 2 faktorů – velikosti infiltrace a odběrů podzemní vody. Dlouhodobý pokles hladiny podzemní vody ve všech pozorovacích vrtech v období 1982–1991 byl způsoben vysokými odběry podzemní vody na německé straně území, které převyšovaly využitelné zdroje oblasti. Celkový efekt byl navíc znásoben předcházejícím velmi vlhkým obdobím (1980–1981) a naopak následnými suchými obdobími (1982–1985, 1990–1991), která měla za následek zvětšení absolutních hodnot pozorovaných poklesů hladiny podzemní vody.

Po roce 1991, kdy došlo k drastickému snížení odběrů podzemní vody, lze zaznamenané kolísání hladin připsat zejména kolísání infiltrace, neboť odběry podzemních vod jsou od této doby na obou stranách relativně stabilní.

Obecně lze konstatovat, že čerpání podzemní vody v německé části modelového území má vliv na hladinu podzemní vody na české straně a podle modelových způsobuje v současnosti její snížení o zhruba 0,5 – 3 m oproti přírodním podmínkám bez antropogenního vlivu. Předmětem předkládané zprávy však není tuto skutečnost jakkoliv hodnotit.

Z hlediska budoucího vývoje zásob podzemních vod v řešeném území je důležitý poznatek o vlivu infiltrace na kolísání úrovně hladiny podzemní vody. Pokud budeme uvažovat průměrný pokles infiltrace o 1 mm ročně jako důsledek klimatické změny, pak dojde při konstantním odběru podzemních vod odpovídajícím způsobem i k trvalému poklesu jejich hladiny o zhruba 3 až 13 cm ročně (v závislosti na lokalitě – drenážní/infiltrační oblast).

Z hlediska využitelných zdrojů podzemních vod je nutné poznamenat, že jak maximální odběry, které byly zaznamenané v historii, tak i suma všech současně povolených odběrů v modelové oblasti překračují využitelné zdroje podzemních vod. Z pohledu velikosti aktuálních odběrů a současného trendu, kdy je obecně vyvíjen tlak na šetření s vodními zdroji, se zdá nepravděpodobné, že by se opakovala situace z konce 80. let, kdy dosahovaly odběry podzemních vod v modelové oblasti svých maxim. Na druhou stranu je nutné zdůraznit, že takto velké odběry představují značné riziko pro celou hydrogeologickou strukturu, neboť přesahují její dlouhodobě využitelné zdroje. To se týká i sumy všech aktuálně platných povolení k čerpání podzemní vody, zejména pak na německém území.

Matematický model splnil cíle definované v zadávací dokumentaci, tzn. transientní simulaci proudění podzemní vody, odpověď na příčiny historických poklesů hladiny podzemní vody a prognózu budoucího vývoje úrovně a zásob podzemních vod.

Jedním z dílčích cílů matematického modelu bylo posouzení možnosti odvodnění severní části modelové oblasti přes tzv. „lückendorfskou“ poruchu. Na základě provedených simulací je možné konstatovat, že výše uvedený scénář, tedy odvodnění kolektoru 2+3 přes tektonickou poruchu směrem do polského dolu Turów, se zdá jako velmi nepravděpodobný. Poklesy hladiny podzemní vody zaznamenané v minulosti byly velmi dobře vysvětleny kombinací kolísání infiltrace a odběrů podzemní vody.





## 6. Použité podklady

Brožek, P. (1982): Tlustecký blok. Závěrečná zpráva o Hg. průzkumu, Stavební geologie, Praha.

Datel, J. (2007): Průzkum složitých zlomových struktur na příkladu strážského zlomového pásma, příspěvek na konferenci Ekomonitor.

zdroj: [http://www.ekomonitor.cz/sites/default/files/04\\_Datel.pdf](http://www.ekomonitor.cz/sites/default/files/04_Datel.pdf)

Doherty, J. (2000): PEST - Model-independent parameter estimation. User's manual. Watermark Computing. Australia.

Eckhardt P. (2013): Vývoj vydatnosti pramenů a pramenných oblastí v oblasti Petrovice-Lückendorf-Jonsdorf-Oybin. Závěrečná zpráva, VÚV TGM, v.v.i. Praha, prosinec 2013

Ekert, V. (2008): Průběh zatápění Dolu Hamr I, 47. ročník symposia Hornická Příbram ve vědě a technice, Příbram 2008

zdroj: <http://slon.diama.cz/hpvt/2008/sanace/S17.pdf>

Harbaugh, A. W. a 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.

Herčík, F. a kol. (1987): Hydrogeologická syntéza České křídové pánve, Stavební geologie, Praha.

Herčík, F., Herrmann, Z., Valečka, J. (2003): Hydrogeology of the bohemian cretaceous basin. CGS, Praha.

Jetelová, J. (1972): Závěrečná zpráva o regionálním hydrogeologickém průzkumu v povodí Ploučnice, Kamenice a Křinice, Stavební geologie, Praha.

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., Halsbrücke.

Martínková, M. (2014): Vliv klimatické změny na celkovou vodnost oblastí „Hřensko - Křinice/Kirnitzsch“ a „Petrovice - Lückendorf – Jonsdorf –Oybin“. Závěrečná zpráva dílčí studie projektu GRACE. Výzkumný ústav vodohospodářský TGM, v.v.i., Praha.

Mibus, H. (1998): Übersichtsbeurteilung des Grundwasserdargebots und dessen Nutzung im Zittauer Gebirge unter Berücksichtigung der Grundwaessernutzungen auf tschechischem Gebeit, G.E.O.S., Dresden.

Nakládal, V. (1975): Tlustecký blok – hydrogeologický průzkum. Zpráva z 1. etapy a ideový projekt II. etapy, Stavební geologie, Praha.

Rumbaugh, J., Rumbaugh, D. (1996): Guide to using Groundwater Vistas, Environmental simulations, Inc.

Šimek P. (2014): Stáří a mísení podzemních vod. Oblast 2: Petrovice – Lückendorf – Jonsdorf - Oybin - závěrečná zpráva, projekt GRACE 2012-13, MS VÚV TGM, v.v.i. Praha, 101 stran.

Vaněk, J. (2012): Společně využívané vody na česko-saském pomezí (GRACE), Matematický model proudění podzemní vody v oblasti Petrovice-Lückendorf, Zpráva za 1. etapu. AQUATEST, a.s. Praha

Voight, T. (2013): Grundlagen für ein geologisch-tektonisches Modell der Kreideablagerungen im Sächsisch-Böhmischen Grenzbereich im Rahmen des Ziel 3 - Projektes GRACE, Jena, 2013

Skořepa, J. a kol. (2013): Ovlivnění podzemních vod antropogenní činností v části povodí Horní Ploučnice, Lužické Nisy a Smědé – Závěrečná zpráva, Aquatest a.s. Praha.

### **Další podklady:**

<http://geoportal.gov.cz/web/guest/home>

<http://www.chmi.cz>

<http://www.mzp.cz>

<http://www.vuv.cz>

