

ČESKÉ VYSOKÉ UČENÍ TECHNICKÉ V PRAZE

Fakulta stavební

Katedra hydromeliorací a krajinného inženýrství



DIPLOMOVÁ PRÁCE

Studie vlivu protipovodňových opatření v obci Kly na proudění podzemní vody

Vyhotovil: Bc. Ondřej Volhejn

Vedoucí diplomové práce: doc. Ing. Jana Valentová, CSc.

2020



## ZADÁNÍ DIPLOMOVÉ PRÁCE

### I. OSOBNÍ A STUDIJNÍ ÚDAJE

Příjmení: Bc. Volhejn Jméno: Ondřej Osobní číslo: 438504

Zadávací katedra: Katedra hydromeliorací a krajinného inženýrství

Studijní program: (N3607) Stavební inženýrství

Studijní obor: (3904T007) Inženýrství životního prostředí

### II. ÚDAJE K DIPLOMOVÉ PRÁCI

Název diplomové práce: Studie vlivu protipovodňových opatření v obci Kly na proudění podzemní vody

Název diplomové práce anglicky: The impact of the mitigation measures in the village Kly on groundwater flow

Pokyny pro vypracování:


Obec Kly, nacházející se v okrese Mělník na pravém břehu řeky Labe, přibližně 5 km nad soutokem s Vltavou je poměrně často ohrožována povodněmi, které způsobují značné materiální škody. V rámci ochrany před povodňovými situacemi je navrhována výstavba protipovodňových zdí a hrází, které budou zabraňovat zaplavení zástavby. Tyto protipovodňové stavby mohou svými podzemními konstrukcemi (těsnící clony) ovlivnit poměrně významně podzemní proudění podzemní vody. Pomocí numerického modelu proudění podzemní vody v dané lokalitě posuďte vliv navrhovaných protipovodňových opatření na režim proudění podzemní vody.

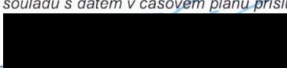
Seznam doporučené literatury:  
manuály software Groundwater Vistas

Jméno vedoucího diplomové práce: Doc. Ing. Jana Valentová, CSc.

Datum zadání diplomové práce: 3. 10. 2019 Termín odevzdání diplomové práce: 5. 1. 2020

*Údaj uveďte v souladu s datem v časovém plánu příslušného ak. roku*

  
Podpis vedoucího práce

  
Podpis vedoucího katedry

### III. PŘEVZETÍ ZADÁNÍ

*Beru na vědomí, že jsem povinen vypracovat diplomovou práci samostatně, bez cizí pomoci, s výjimkou poskytnutých konzultací. Seznam použité literatury, jiných pramenů a jmen konzultantů je nutné uvést v diplomové práci a při citování postupovat v souladu s metodickou příručkou ČVUT „Jak psát vysokoškolské závěrečné práce“ a metodickým pokynem ČVUT „O dodržování etických principů při přípravě vysokoškolských závěrečných prací“.*

3. 10. 2019  
Datum převzetí zadání

  
Podpis studenta

## Čestné prohlášení

Prohlašuji, že jsem diplomovou práci na téma Studie vlivu protipovodňových opatření na proudění podzemní vody v lokalitě obce Kly zpracoval samostatně, za použití uvedené literatury a pramenů.

Dále prohlašuji, že nemám závažný důvod proti užití tohoto školního díla ve smyslu § 60 zákona č. 121/2000 Sb., o právu autorském, o právech souvisejících s právem autorským a o změně některých zákonů (autorský zákon).

V Praze dne 5.1.2020

.....  
Ondřej Volhejn

## Poděkování

Děkuji paní doc. Ing. Janě Valentové CSc. za odborné rady a propůjčené podklady k diplomové práci. Děkuji firmě PROGEO za zapůjčení přístrojů a za odborné rady při vyhotovování modelu a práce. Dále děkuji místostarostovi obce Kly za zapůjčení studie proveditelnosti. V neposlední řadě bych rád poděkoval své rodině a svým blízkým za podporu při studiu.

## Abstrakt

Diplomová práce se zabývá modelováním proudění podzemní vody v lokalitě obce Kly. Model proudění podzemní vody slouží k ověření správnosti protipovodňových opatření, navrhovaných ve studii proveditelnosti. Pomocí dvou variant byly modelovány dva stavy. První stav je bezpovodňový stav a zohledňuje vliv navrhované podzemní těsnící stěny na hladinu podzemní vody, směr a rychlost proudění podzemní vody. Druhá simulace modeluje průběh hladiny podzemní vody při povodňové situaci. Model byl vypracován v programu Groundwater Vistas, verze 6. Pro tvorbu výstupů a pro modelování geometrie modelu byl použit program Surfer 12. Pro tvorbu geometrie modelu byl použit program Arc Pro.

Práce samotná je rozdělená do několika kapitol. V úvodu práce je popisován sběr vstupních dat, potřebných pro model a popis navrhovaných protipovodňových opatření. V další části se práce zabývá měřením hladiny podzemní vody. Následující část se zabývá podrobným popisem vytvořeného modelu a popisem jednotlivých variant. Teoretický základ proudění podzemní vody, z kterého model vychází, je popsán v samostatné kapitole. V závěrečné části jsou popsány výsledky.

## Klíčová slova

proudění podzemní vody, numerický model, hydrogeologie, protipovodňová opatření, Groundwater Vistas

## Abstract

The Diploma Thesis deals with groundwater model flow in the location of the village Kly. The groundwater model demonstrates the correctness of the flood control measures proposed in the feasibility studies. The Two possible states were created by the two available variants. The first state is a flood-free state and reflects the impact of the proposed underground sealing wall on the groundwater level, direction and speed of groundwater flow. The second state simulates continuous water levels during the flood situations. The model was created in the program Groundwater vistas, version 6. All outputs and geometric models were created in the program Suffer 12. For calculation of the Model geometry was used program Arc Pro.

The thesis is divided into several chapters. The introduction of the Thesis describes the collection of input data needed for the model and description of the proposed flood control measures. The next part is focused on groundwater measurement. The following part contains detailed description of the created model and all variants. The model is based on Theoretical basis of groundwater flow and described in a separate chapter. The last chapter describes the final results.

## Key Words

groundwater flow, numerical model, hydrogeology, flood protection, Groundwater Vistas

# Obsah

1	Úvod .....	9
2	Popis zájmového území .....	10
2.1	Historie obce.....	11
2.2	Rozvoj území.....	11
2.3	Povodně .....	12
2.4	Povodňové situace.....	14
2.4.1	Povodeň 2002.....	14
2.4.2	Povodeň 2006.....	18
2.4.3	Povodeň 2013.....	19
2.5	Geologické poměry.....	20
2.5.1	Litologická data .....	22
2.6	Hydrogeologické poměry.....	26
2.7	Geomorfologie.....	29
2.8	Hydrologické poměry .....	31
2.9	Klimatické poměry .....	32
3	Protipovodňová opatření.....	32
3.1	Soupis parametrů navrhovaného protipovodňového opatření .....	33
3.2	Technické řešení a popis jednotlivých konstrukcí .....	34
3.2.1	SO 01 Pevná zídka .....	34
3.2.2	SO 02 Zemní hrázka s pevnou zídkou.....	35
3.2.3	SO 03 Pevná zídka s mobilním hrazením.....	36
3.2.4	SO 04 Mobilní hrazení průjezdů.....	36
3.2.5	SO 05 Podzemní těsnící stěna .....	37
3.2.6	SO 06 Uzavírací a čerpací šachta na kanalizaci .....	37
3.2.7	SO 07 Čerpací šachty prosáklých povrchových vod .....	37
4	Měření hladiny podzemní vody .....	38
4.1	Metody měření.....	38
4.2	Piezometr a datalogger .....	38
4.3	Elektrokontaktní hladinoměry.....	39
4.4	Ultrazvukové hladinoměry .....	39
4.5	Měření na vrtu HV 1 .....	40
5	Matematický model proudění podzemní vody.....	42

5.1	Rovnice proudění podzemní vody .....	42
5.2	Počáteční a okrajové podmínky modelu .....	44
5.2.1	Počáteční podmínky .....	44
5.2.2	Okrajové podmínky .....	45
5.3	Groundwater Vistas .....	47
5.4	Modflow.....	47
5.5	Modpath .....	47
6	Hydraulický model .....	47
6.1	Koncepce řešení.....	47
6.2	Geometrie modelu .....	48
6.3	Okrajové podmínky modelu .....	50
6.3.1	Polopropustná hranice .....	50
6.3.2	Efektivní infiltrace a přítok podzemní vody .....	51
6.3.3	Nulový tok .....	53
6.4	Hydraulické parametry modelu .....	53
6.5	Podzemní těsnící stěna .....	55
6.6	Průběh povodňové vlny.....	55
6.7	Vstupní údaje pro kalibraci modelu.....	58
6.8	Modelové simulace.....	60
6.8.1	Stacionární modelové simulace .....	60
6.8.1.1	S1 - kalibrace .....	60
6.8.1.2	S2.....	60
6.8.1.3	S3.....	60
6.8.2	Transientní modelové simulace .....	60
6.8.2.1	T1.....	60
6.8.2.2	T2.....	60
6.8.2.3	T3.....	60
7	Výsledky .....	61
7.1	Stacionární model.....	61
7.1.1	Kalibrace modelu.....	61
7.1.2	Variantní řešení modelu S1 .....	62
7.1.3	Variantní řešení modelu S2 a S3.....	62
7.2	Transientní model.....	64

7.2.1	Variantní řešení modelu T1 .....	65
7.2.2	Variantní řešení modelu T2 .....	66
7.2.3	Variantní řešení modelu T3 .....	67
8	Závěr.....	70
9	Použitá literatura .....	72
10	Seznam použitých zkratk.....	74
11	Seznam obrázků .....	75
12	Seznam tabulek.....	76
13	Seznam příloh.....	77



# 1 Úvod

V závěrečné práci bylo řešeno proudění podzemní vody v lokalitě obce Kly. Obec Kly se nachází přibližně 5 km jižně od soutoku řek Labe a Vltava. Tato oblast bývá při povodních souvisle zaplavována. Z důvodu zvýšené četnosti povodní v uplynulých letech dochází k devastaci a znehodnocování majetků na území obce. Obec Kly si nechala po ničivých povodních v roce 2002 vypracovat Studii protipovodňových opatření na ochranu obce Kly. Studie protipovodňových opatření na ochranu obce Kly byla zpracována firmou Sweco Hydroprojekt a.s.

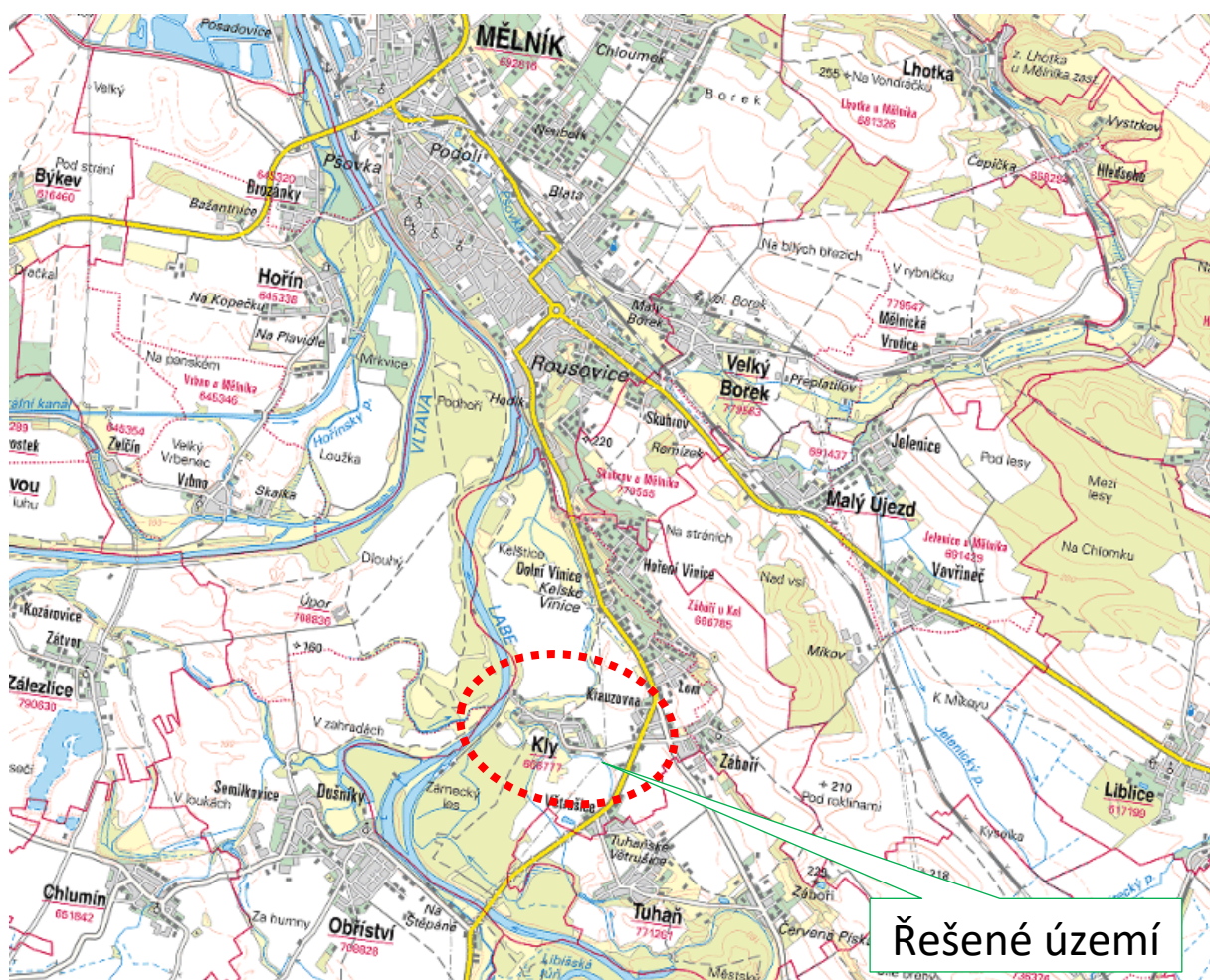
Cílem práce je posouzení vlivu navrhovaných protipovodňových opatření na proudění podzemní vody v oblasti obce Kly. Posouzení bude provedeno na základě měřených dat, dat poskytnutých ČHMÚ a Českou geologickou službou. Dále byly informace o místních poměrech, které ovlivňují model, získávány z online zdrojů Výzkumného ústavu vodohospodářského T. G. Masaryka, Českého úřadu zeměměřického a katastrálního, povodí Labe a dalších. Posouzení bude provedeno na stacionárním a transientním modelu. V prvním kroku bude provedena kalibrace modelu. Dále bude posuzováno ovlivnění hladiny podzemní vody, v případě výstavby protipovodňových opatření, podle studie proveditelnosti. V další variantě bude prováděno posouzení, jakým způsobem se změní hladina podzemní vody v případě zavázání podzemní těsnicí stěny do báze. Pomocí transientního modelu bude zkoumán vliv návrhové povodně na proudění podzemních vod s projektovaným protipovodňovým opatřením. Vstupním údajem pro transientní model je povodňová vlna z roku 2013. Tato povodňová vlna byla získána z měrného profilu Kostelec nad Labem. V první variantě transientního modelu bude posuzován vliv protipovodňových opatření na hladinu podzemní vody v průběhu povodně. Druhá varianta se bude zabývat problematikou parametru hydraulické vodivosti. Tento parametr v současné době není v řešené oblasti určen. V této variantě bude posuzováno, jakým způsobem nejistota tohoto parametru ovlivňuje výsledky. Třetí varianta se bude zabývat parametrem storativity, který je těžko určitelný, ale může významně ovlivnit výsledky modelu. I tato varianta bude posuzovat, jakým způsobem nejistota parametru ovlivní výsledky.

## 2 Popis zájmového území

Obec Kly leží mezi řekou Labe na západě a Turbovickým vrchem na východě (obr. 1). Samotná obec se nachází cca 5 km jižně od města Mělník. Kly se od roku 2001 dělí na pět místních částí: Krauzovna, Větrušice, Lom, Dolní Vinice a Hoření Vinice. Významnými stavbami na území obce jsou: kaple svatého Václava, kostel Narození Panny Marie a Štěpánský most. Dále se v katastrálním území obce nachází přírodní rezervace Úpor – Černínovsko. Obcí v severojižním směru prochází silnice I/9 z Prahy do Mělníka a následně do České Lípy a Rumburku. Z jihovýchodního směru se na komunikaci I/9 napojuje silnice II/331 ze Staré Boleslavi. Řešená oblast se nachází západně od těchto komunikací na břehové terase řeky Labe. V obci žije 1542 obyvatel (tab. 1). [1]

Tabulka 1 - Počet obyvatel v obci k 1.1.2019 [1], [2019]

Kód		Název obce	Počet obyvatel			Průměrný věk		
okresu LAU 1	obce LAU 2		celkem	muži	ženy	celkem	muži	ženy
CZ0206	534897	Kly	1542	759	783	37,4	37,0	37,9



Obrázek 1 – Lokalita obce staré Kly – topografie širšího územního celku. © ČÚZK – ZM50 [2019]

## 2.1 Historie obce

Oblast byla pro své výhodné životní podmínky obývána od pravěku, nicméně první písemná zmínka o obci Kly pochází z roku 1344. [2] Název obce nemá zcela jasný původ, ale nejspíše se odvozuje od tří dubů, které zde kdysi stály. Duby byly pokáceny a zbyly po nich pahýly, které se podobaly klům. Obec po celou dobu své existence spadala pod obřístevské panství, které se nachází jihozápadně od Kel. Obec Kly vždy spadala v územně právním začlenění pod město Mělník. Z obrázku 2 je patrný původní rozsah obce a původní koryto řeky.



Obrázek 2 – Lokalita obce Kly – Výřez mapy III. vojenského mapování z let 1877 – 1880. Na obrázku je vyznačena linie navrhovaného PPO a hranice řešené oblasti. Z mapy je vidět průběh řeky Labe před Kanalizováním. © Military Survey, Section No. xy, Austrian State Archive/Military Archive, Vienna, Laboratoř geoinformatiky Univerzita J.E. Purkyně, Ministerstvo životního prostředí ČR [21][2019]

## 2.2 Rozvoj území

Územní plán obce předpokládá rozvoj území, jakožto obytné předměstí města Mělník, případně obec Pražské aglomerace. Rozvoj území se plánuje v oblastech mimo záplavové území. V řešeném území starých Kel není v územním plánu počítáno s rozvojem obytných



ploch vzhledem k tomu, že oblast leží v záplavovém území  $Q_{100}$ . Z tohoto důvodu je respektována současná výstavba, ale není plánován její rozvoj. V rámci územního plánu je předpokládána budoucí přeložka silnice I/9 tak, aby obcházela zástavbu.

V územním plánu, který je platný od roku 2008, není počítáno s výstavbou protipovodňových opatření (zemních valů a hrází). Proto, v rámci Studie protipovodňových opatření na ochranu obce Kly, byly hráze a valy navrhovány přednostně do veřejného prostranství v majetku obce.

### 2.3 Povodně

Povodně historicky ovlivňovaly život v oblasti obce Kly. Pravidelnost povodní zajišťovala lidem přísun hnojiva v podobě splaveného materiálu. Tento splavený materiál byl využíván jako hnojivo zemědělské půdy. Z tohoto důvodu byla oblast obydlená již v době eneolitu (cca 2500 př. n. l.). Zemědělské pozemky se nacházely v nivní oblasti řeky, i zemědělská stavení se historicky stavěla v oblastech s výskytem povodní. Povodně po staletí přinášely obživu, ale také nebezpečí znehodnocování úrody a majetků.

Samotná obec je mírně vyvýšená nad okolním terénem, z tohoto důvodu nedocházelo k zatopení centrální části obce periodicky, ale pouze výjimečně. V tabulce 2 jsou uvedeny záplavy, které v obci zatopily centrální část a byly zaznamenány na kapli sv. Václava (obr.3). Nadmořská výška paty kaple sv. Václava je 161,6 m n.m.

*Tabulka 2 – Přehled historických povodní vztažený ke kapli sv. Václava v centru obce. Nadmořská výška terénu v centru obce je cca 161,6 m n.m. [2]*

Datum	Výška vody v obci	poloha hladiny v obci
28.2. 1784	+ 73 cm	
30.3.1845	+ 141 cm	
2.2.1862	+ 120 cm	
15.2.1870	+ 33 cm	
5.9.1890	+ 103 cm	
6.5.1896	+ 25 cm	
10.04.1900	+ 68 cm	
15.01.1920	+ 60 cm	
06.05.1926	+ 10 cm	
16.03.1940	+ 70 cm	
12.03.1941	+ 17 cm	
15.08.2002	+ 300 cm	164,60 m n.m.
03.03.2006	-	161,57 m n.m.
05.06.2013	+ 168 cm	163,26 m n.m.



*Obrázek 3 – Kaple sv. Václava – Na kapli byly zaznamenávány povodně od roku 1784.*

Z tabulky je patrné, že mezi léty 1784 – 2013 voda zatopila střed obce třináctkrát. Dříve docházelo k povodním častěji. Změna nastala na konci 19 století a na začátku 20 století, kdy

došlo k regulaci řeky Labe a řeky Vltavy. Z historického měření povodní lze vyzorovat, že ničivější povodně způsobila řeka Vltava vlivem zpětného vzduť hladiny řeky Labe. Příkladem mohou být ničivé povodně v srpnu roku 2002, kdy Vltava negativně ovlivnila hladinu Labe nad soutokem. Toto vzduť způsobilo zatopení celé nivy řeky, včetně přilehlých obcí. V Klech dosáhla hladina v kulminaci výšky 3,0 metru.

## 2.4 Povodňové situace

Popsané povodňové situace uvádějí pouze povodně z poslední doby, které jsou zaznamenány. K podrobnějšímu znázornění povodní byl vyhotoven výkres záplavových území, který je přiložen k diplomové práci. [4]

### 2.4.1 Povodeň 2002

Povodeň v srpnu roku 2002 byla nejničivější povodní v novodobé historii České republiky. Poslední povodeň obdobného rozsahu byla na území republiky 27.7.1432 (povodně byly zaznamenávány v Praze) [5]. Z tohoto důvodu je patrné, že povodeň v roce 2002 byla výjimečná a nesrovnatelná s jinými měřenými povodněmi. Tyto povodně způsobila výjimečná hydrometeorologická situace na území střední Evropy. Jednalo se o frontální postup dvou výrazných tlakových níží s malým časovým rozstupem. Dalším důležitým faktorem byl pomalý postup obou front. První srážková vlna probíhala od 6.8. – 7.8. 2002, druhá vlna byla mezi 11.8. – 13.8. 2002. Díky těmto vydatným srážkám došlo k zasažení celého povodí Vltavy. Povodeň při své kulminaci svojí velikostí v mnoha lokalitách překonala všechna předchozí měření průtoků. Velkou vodou byla zasažena oblast jižních Čech, Plzeňska i Vysočiny.

První povodňovou vlnu dokázala vltavská kaskáda transformovat a průtok v Praze dosáhl hodnoty 5letého průtoku. Zásadní roli při transformaci první povodňové vlny mělo vodní dílo Orlík, které první povodňovou vlnu zastavilo (obr.4).

O tři dny později zasáhla druhá silnější povodňová vlna Českou republiku. Z důvodu nízkého retenčního prostoru vody v krajině došlo k rychlému odtoku vody do povodí. Zároveň byla druhá vlna srážek daleko vyšší než první. Na mnoha tocích horní Vltavy byly překročeny průtoky  $Q_{50}$  až  $Q_{500}$ . Díky extrémnímu průtoku na řece Malši a jiných přítocích Vltavy už v Českých Budějovicích Vltava dosahovala hodnoty průtoku  $Q_{1000}$ . Významnou roli při povodních měl souběh povodňových vln na řekách, například souběh kulminací Berounky a Vltavy před Prahou. Druhá povodňová vlna zaplnila veškerý retenční prostor Vltavské kaskády, nicméně na vodním díle Orlík byla zachycena a snížena kulminace. Dne 13.8. v poledne byl přítok  $3\,900\text{ m}^3/\text{s}$  a odtok z nádrže byl  $3\,100\text{ m}^3/\text{s}$ . Z dalších nádrží Vltavské kaskády dokázalo redukovat maximální průtoky pouze vodní dílo Lipno. Ostatní nádrže měly zanedbatelný vliv na průtoky.

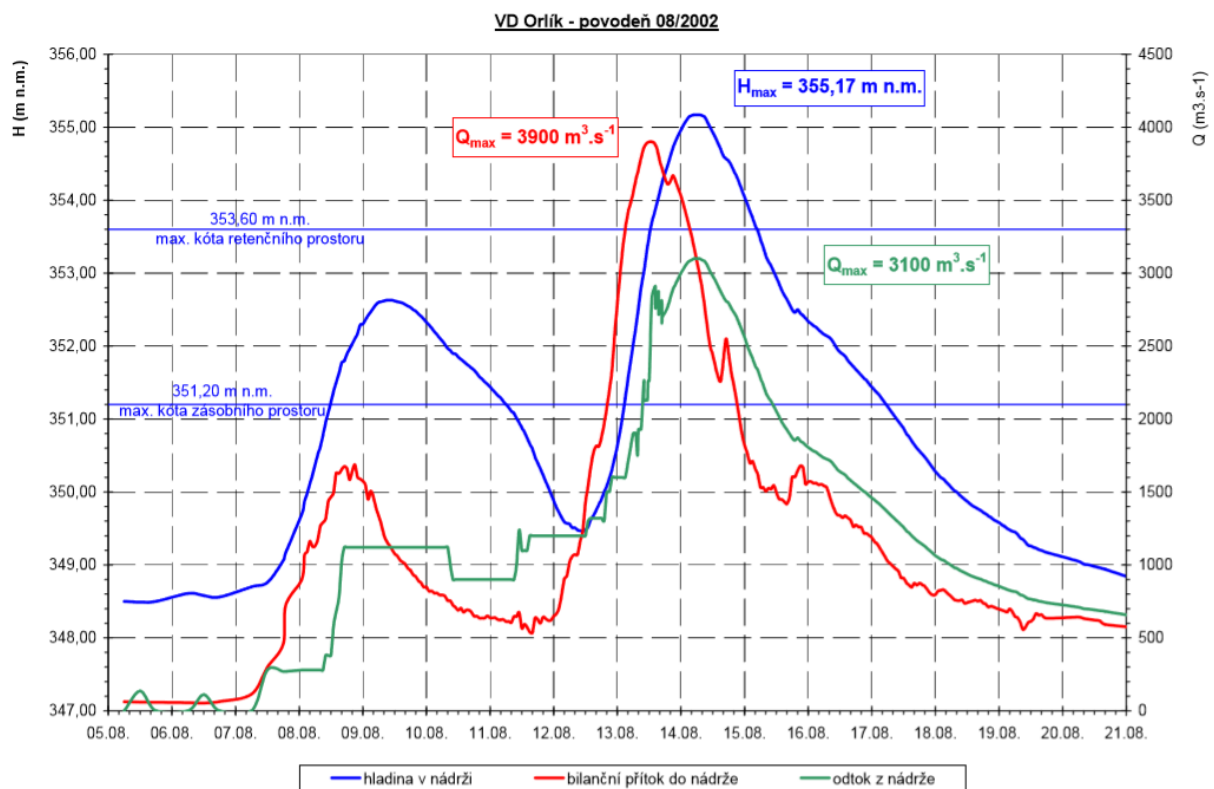
Povodí Labe zaznamenalo, díky vyšší srážkové činnosti od 11.8. – 13.8. vzestup hladiny, nicméně samotnou povodeň to téměř neovlivnilo. Poslední jez na Labi, na kterém je prováděno měření, který nebyl ovlivněn Vltavou, byl profil Brandýs nad Labem. Na tomto profilu byl 15.8. zaznamenán průtok  $530\text{ m}^3/\text{s}$ , výška vodního stavu 367 cm. Tyto hodnoty odpovídají povodni  $Q_2$ . V místě soutoku Labe a Vltavy došlo ke zpětnému vzduť řeky Labe (Vltava přehradila řeku Labe). Vzduť dosáhlo na Labi proti proudu délky 20 km. Vzduť byla zaplavena zdymadla v Obříství, v Neratovicích a zvýšena o 3 metry dolní voda na zdymadle

Kostelec nad Labem. Na měrném profilu Labe v Mělníku byla normální výška řeky při kulminaci překročena o 8 metrů (obr. 6). Povodňová vlna dolního toku Vltavy, která zasáhla širokou oblast soutoku řek Vltavy a Labe, postupovala pomalu. Postup povodňové vlny z Prahy do Mělníka byl 25-28 hodin, oproti obvyklé průtokové situaci 8 hodin. Tento velice pomalý postup byl způsoben zaplavováním inundačního území (tab. 3).

Povodeň dosáhla v centru obce u kapličky nadmořské výšky 164,60 m n. m. viz obrázek 3, čímž se zařadila na nejvyšší pozici ze všech dosavadních měření (obr. 5).

Tabulka 3 – Časový vývoj situace v centrální části obce Kly. [4]

13.8. ve 23:00	Vyhlášení stavu ohrožení
14.8. v 6:00	První škody na majetku
15.8. ve 14:00	Kulminace povodně
16.8. v 14:00	Pokles vodní hladiny
17.8. v 10:00	Vyvrcholení kalamitních škod
18.8. v 16:00	Doba trvání souvislého zaplavení
19.8. ve 13:00	Voda vrácena do původního koryta

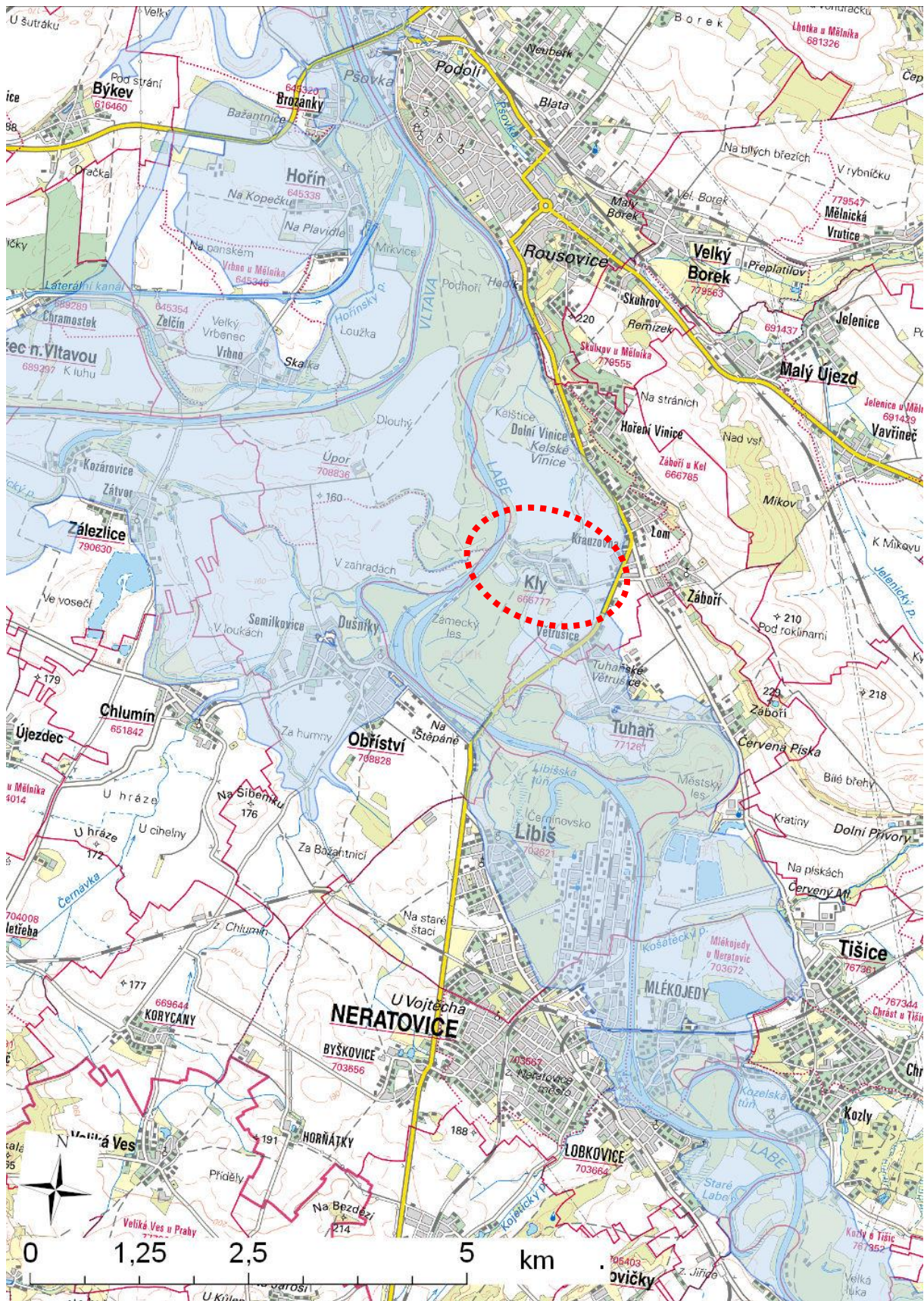


Obrázek 4 – Průběh povodně na VD Orlík. Souhrnná zpráva o povodni v srpnu 2002 za povodí Vltavy, státní podnik. [5]



*Obrázek 5 – Povodeň v roce 2002, pohled na zaplavenou část obce Kly. [2]*





Obrázek 6 – Rozsah povodně v roce 2002. Mapa byla vypracována v programu ArcGIS Pro, © ČÚZK, pla



#### 2.4.2 Povodeň 2006

Povodeň v březnu roku 2006 se řadí mezi zimní/jarní povodně způsobené rychlým táním sněhové pokrývky a často i kombinací s deštěm. Zima z roku 2005 na rok 2006 se vyznačovala malými výkyvy teplot [6]. Tedy nedocházelo k odtávání sněhu, a to ani v nižších polohách. Na konci měsíce března od 27.3. se začalo oteplovat. Z počátku docházelo k mírnému odtávání především v nižších polohách. Po intenzivních srážkách došlo k zvýšení vodní hladiny na měrných profilech na celém území České republiky. Teplota na území celé České republiky stále stoupala a ani v noci na horách neklesala pod bod mrazu. To způsobilo povodně na území spravovaném Povodím Labe. Byla zasažena oblast středního Labe a v měrném profilu Brandýs nad Labem dne 3.4. 2006 povodeň kulminovala na hodnotě  $Q_{10-20}$ . Tato povodeň byla největší povodní na středním Labi od roku 1981. Značnou roli v povodňové situaci měl souběh povodně Labe a Jizery. Na území dolního Labe, od soutoku Vltavy a Labe po státní hranici, voda kulminovala na hodnotách  $Q_{5-10}$ . Na dolním Labi se po ničivé povodni v roce 2002 jednalo o druhou největší povodeň od roku 1940.

Samotná obec Kly byla jarní povodní v roce 2006 zasažena relativně málo. Kulminace povodně byla 3.4. 2006 (obr. 7). Z tabulky 2 je patrné, že voda v centrální části obce dosáhla paty kaple, tedy nadmořské výšky 161,57 m n. m.



Obrázek 7 – Labe, Kly Větrušice 3.4. 2006, [6]

### 2.4.3 Povodeň 2013

Na konci měsíce května a v první polovině června došlo na území české republiky k ochlazení, které se pohybovalo cca 4 °C pod dlouhodobým průměrem [7]. Od 25.5.2013 převládala oblačnost a časté přeháňky. Toto počasí vydrželo až do 1.6. V prvních dnech měsíce června byly na území povodí Labe, tedy na celém území východních Čech, také na některých povodích řeky Moravy a řeky Vltavy, zaznamenány významné srážky. Výrazně byla zasažena východní oblast Krkonoš. Z důvodu předchozích dešťů již byla půda nasycená vodou. Krajina tedy nemohla pojmout tak velké množství vody. Docházelo k rychlému povrchovému odtoku a k povodňovým stavům.

Situace na soutoku Labe a Vltavy byla obdobná jako při povodni v roce 2002. Řeka Vltava přehradila řeku Labe. Z tohoto důvodu došlo ke vzduť hladiny. Přítok z Labe byl o 200 m<sup>3</sup>/s vyšší a přítok z Vltavy byl o 2000 m<sup>3</sup>/s nižší, než v roce 2002. Podle odečtů z měrných stanic průtok na Labi v Kostelci nad Labem byl při kulminaci 744 m<sup>3</sup>/s a průtok na Vltavě byl ve Vraňanech 3080 m<sup>3</sup>/s. Na soutoku řek došlo k výrazné transformaci povodně. Povodeň byla vyhodnocena jako Q<sub>20-50</sub>. Postupová doba vody z Prahy do Mělníka činila 22 hodin. Nicméně v okolí soutoku řek docházelo k rozlivu vody v nivách řek. Na různých měrných stanicích byly zaznamenány hodnoty přesahující povodně z roku 1845 a 1890.

Obec Kly byla při povodni v roce 2006 zasažena méně než, při povodni v roce 2002, ale i tak zásadně (voda byla o 1,34 m niž, než při povodni v roce 2002) (obr. 8). Povodeň v roce 2013 kulminovala 5.6.2013 na hodnotě 163,26 m n. m. Průtoky a výšky hladiny (obrázek 25 a 26) byly poskytnuty ČHMÚ pro měrný profil Kostelec nad Labem. Tento profil je nejbližším kontinuálně měřeným profilem proti proudu řeky. Labe proti proudu nemá zásadní přítok, který by silně ovlivnil měřená data. Celkové škody byly vyčísleny na 266 milionů Kč.



Obrázek 8 – Povodeň v roce 2013, pohled na zaplavenou část obce Kly. [8]

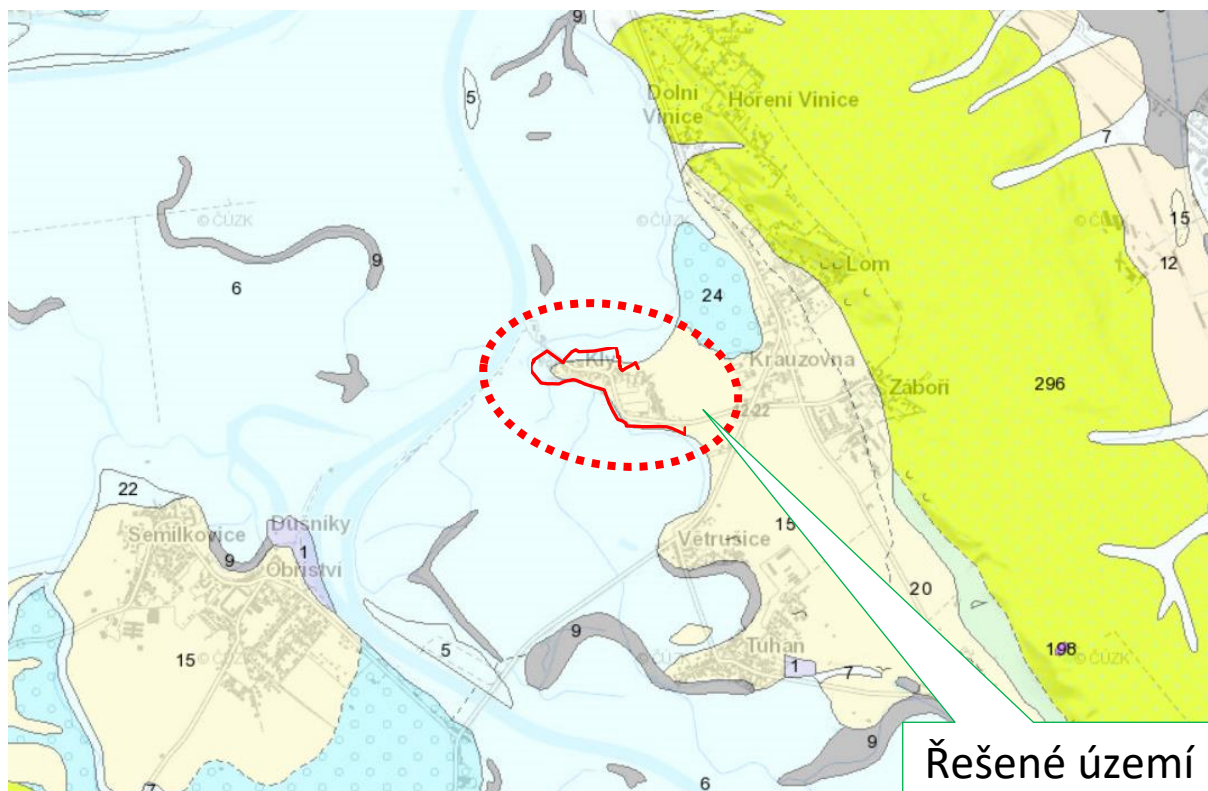
## 2.5 Geologické poměry

Řešená oblast spadá z geologického hlediska do zájmového území vltavsko – berounské oblasti české křídové pánve. Báze české křídové pánve převážně tvoří sedimenty slínovců a sedimenty prachovců a písčitých slínovců. Dno kvartérních sedimentů je tvořeno jílovcí, slínovci a prachovci turonského stáří.

Z obr. 9 je patrné, že oblast navrhovaných PPO je tvořena z geologického hlediska kvartérními sedimenty. Osa navrhovaných PPO vede v blízkosti rozhraní navátých písků a fluviálních sedimentů. území intravilánu obce Kly se nachází z geologického hlediska v oblasti, která je tvořena navátými písky. Naváté písky jsou obvykle při povrchu tvořeny jemnozrnným a neulehlým materiálem. S narůstající hloubkou dochází ke změně materiálu, a to na šterky, nebo šterkopísky. Oblast vně navrhované linie PPO je tvořena čtvrtihorními fluviálními sedimenty. Severovýchodně od navrhované linie PPO se nachází oblast šterků. Bází kvarterního pokryvu jsou v řešené oblasti jílovce, nebo slínovce turonského stáří. Tato vrstva slínovců a jílovců od sebe odděluje svrchní hydrogeologický kolektor od napjaté zvodně, která se nachází ve větších hloubkách. Hladina podzemní vody je přímo závislá na hladině vody v řece Labi.

V rámci terénní prohlídky řešené lokality byly zjištěny navážky v okolí Tuhaňské svodnice.

Pro další stupně projektové dokumentace by bylo vhodné vyhotovit podrobný geologický průzkum.



 <b>KVARTÉR</b>	 <b>KŘÍDA</b>
 <b>1</b> navážka, halda, výsypka, odval	 <b>296</b> pískovce vápnito-jílovité, glaukonitické
 <b>5</b> nivní sediment	 <b>297</b> slínovce s polohami či konkracemi vápenců, rytmy či cykly slínovce - vápenec (jílovito vápnité prachovce -lužický vývoj)
 <b>7</b> smíšený sediment	 <b>302</b> slínovce, vápnité jílovce místy písčité
 <b>9</b> slatina, rašelina, hnílokal	
 <b>12</b> písčito-hlinitý až hlinito-písčitý sediment	
 <b>15</b> navátý písek	
 <b>16</b> spraš a sprašová hlína	
 <b>20</b> sediment deluvioeolický	
 <b>24</b> písek, štěrk	

Obrázek 9 – Výřez geologické mapy v oblasti řešeného území s vyznačenou linií navrhovaných PPO. © Česká geologická služba [9]

### 2.5.1 Litologická data

Litologická data byla získána z útvaru Geofondu České geologické služby a následně byla přepracována do této práce. [3] Jedná se o podrobný popis šesti vrtů a zkrácený popis dvou vrtů, které leží v blízkosti vrtu V-708. Z nich bylo následně interpolací modelováno dno kvartérního pokryvu. Grafické znázornění litografických dat: příloha 6 této práce. Obrázek 10 znázorňuje výskyt geologických vrtů v řešené oblasti.

#### Vrt HV-1 (VP0705)

Vrt HV-1 se nachází ve vzdálenosti cca 50,0 m od západní hranice PPO a přibližně 100,0 m od řeky Labe. Tento vrt je svým umístěním nejvíce přiblížen linii PPO ze všech vrtů. Vrt je vystrojen v oblasti fluviálních sedimentů.

Hloubka [m]	Stratigrafie	Popis
0,00 – 0,20	Kvartér	hlína jemně písčité humózní pevný
0,20 – 0,60	Kvartér	hlína jemně písčité slabě slídnatý pevný
0,60 – 1,40	Kvartér	hlína jemně prachovitý písčité tuhý pevný
1,40 – 2,00	Kvartér	písek jemnozrný hlinitý jemně slídnatý
2,00 – 3,00	Kvartér	písek jemnozrný slabě slídnatý světlá
3,00 – 7,40	Kvartér	štěrk max. velikost částic 5 cm
7,40 – 7,80	Turon	slín pevný světlá šedá
7,80 – 8,00	Turon	slínovec šmouhovitý zvětralý navětralý

Z uvedeného popisu je patrné, že svrchní podpovrchová vrstva je tvořena humózním materiálem do hloubky 0,20 m. Tato vrstva je následována vrstvou povodňových hlín do hloubky 1,40 m. Pod vrstvou hlín se nachází vrstva písků a následně štěrků, které mají průlinovou propustnost. Štěrků a písků dosahují báze v hloubce 7,40 m tj. 151,26 m n. m. Báze kvartérních sedimentů tvoří vrstva slínovců.

#### Vrt S – 101

Vrt se nachází v jižním předpolí řešené oblasti ve vzdálenosti přibližně 500 m. Skladba je velmi podobná vrtu HV-1. Vrt leží ve směru proudění podzemní vody před navrhovanou linií PPO. V minulosti na vrtu probíhalo měření hladiny podzemní vody. Měření bylo ukončeno v roce 2012. Poskytnutá měřená data z tohoto vrtu byla použita pro kalibraci modelu.

Hloubka [m]	Stratigrafie	Popis
0,00 – 0,40	Kvartér	hlína písčité hnědá
0,40 – 1,00	Kvartér	hlína písčité světlá, valouny max. 5 cm
1,00 – 3,50	Kvartér	štěrk drobnozrný max. 4 cm slabě písčité
3,50 – 5,80	Kvartér	štěrk max. 4 cm slabě písčité
5,80 – 6,50	Křída	jílovec zvětralý šedá
6,50 – 8,50	Křída	jílovec slabě navětralý šedá

Tento vrt je ve svrchní vrstvě tvořen humózní vrstvou o mocnosti 0,40 m. Následuje vrstva štěrků a písků do hloubky 5,80 m tj. 152,61 m n. m. Báze kvartérních sedimentů tvoří vrstva jílovců.

## 2M-079

Vrt se nachází v těsné blízkosti silnice I/9 v místní části obce Kly Dolní Vinice. Tento vrt leží na okraji kvartérního pokryvu. Báze vrtu je v hloubce 4,70 tj. 156,88 m n. m. Vrt byl vystrojen v roce 2007 a je tedy nejmladším vrtem v řešené oblasti. Na vrtu ČHMÚ kontinuálně monitorují hladinu podzemní vody a teplotu. Poskytnutá měřená data z tohoto vrtu byla použita pro kalibraci modelu. Z hydrogeologických informací vrtu byla v modelu použita hodnota hydraulické vodivosti K viz kapitola 2.6.

Hloubka [m]	Stratigrafie	Popis
0 - 1.50	Kvartér	navážka písčité
1.50 - 3.50	Kvartér	písek jemnozrný
3.50 - 4.70	Kvartér	jíl slabě plastický světlá hnědá
4.70 – 8.00	Turon	jílovec šedá prachovec (siltovec, aleurolit)

Tento vrt má odlišnou svrchní strukturu oproti ostatním vrtům. To je dáno velkou blízkostí silnice I/9. Tedy svrchní vrstva je tvořena navážkou, respektive náspem silnice. Navážka dosahuje mocnosti 1,50 m. Následuje vrstva písku do hloubky 4,70 m. Od 3,50 m následuje jíl s přechodem do jílovce. Báze je v hloubce 4,70 m.

## Vrt V-708

Vrt se nachází ve vzdálenosti přibližně 600 m severně od linie PPO. Tento vrt je v modelu zahrnut, protože je na něm prováděno kontinuální měření hladiny podzemní vody a teploty. Data tohoto měření byla poskytnuta ČHMÚ a byla použita pro kalibraci. Vrt leží v blízkosti vrtu 17 a 18. Báze tohoto vrtu je v hloubce 6,70 tj. 150,77 m n. m.

Hloubka [m]	Stratigrafie	Popis
0.00 - 1.00	Kvartér	ornice slabě jílovitý humózní, hnědá
1.00 - 2.20	Kvartér	hlína silně jílovitý, hnědá
2.20 - 3.00	Kvartér	písek velmi hrubozrný, hnědá
3.00 - 4.00	Kvartér	štěrkopísek velmi hrubozrný valounový
4.00 - 6.00	Kvartér	štěrkopísek valouny max. 5 cm
6.00 - 6.70	Kvartér	štěrk, příměs: valouny
6.70 - 8.00	Turon	slín silně jílovitý, šedá

Vrt se nachází v orné půdě. Z důvodu hospodaření na polích tvoří humózní ornice vrstvu 1,00 m, což je více než u ostatních vrtů. Následuje vrstva písků a štěrků až do hloubky 6,70 m, kde je také báze tvořená slínovci.

## Vrt V1

Vrt V1 se nachází v místní části obce Kly Krauzovna. Vrt je umístěn přibližně 500 m východně navrhované linie PPO.

Hloubka [m]	Stratigrafie	Popis
0.00 - 0.40	Kvartér	navážka hlinitý písčité kamenitý, hnědá, šedá
0.40 - 0.70	Kvartér	hlína silně písčité pevný, hnědá
0.70 - 2.00	Kvartér	písek střednozrnný, žlutá, rezavá
2.00 - 5.00	Kvartér	písek střednozrnný cm, okrová
5.00 - 6.20	Kvartér	písek střednozrnný hrubozrnný okrová

Vrt tvoří hlíny v mocnosti 0,70 m. Navazují písky až do hloubky 6,20 m. Báze v tomto vrtu nebyla zastížena.

## Vrt MJ-7

Jedná se o 230 m hluboký strukturální vrt, který slouží především k zmapování celkové geologie dané oblasti. Vrt se nachází přibližně 900 m východně od řešené linie PPO, v místní části obce Kly Záboří.

Hloubka [m]	Stratigrafie	Popis
0 - 9.20	Kvartér	písek střednozrnný světlá žlutá valouny drobný ojediněle
9.20 - 19.50	Turon	prachovec světlá šedá slínovec prachovitý ve vložkách
19.50 - 58.30	Turon	slínovec prachovitý vápnitý šedá
58.30 - 64.50	Cenoman	prachovec slínitý šedá jílovec prachovitý
64.50 - 74.10	Cenoman	prachovec (siltovec, aleurolit) písčité glaukonitický
74.10 - 77.40	Cenoman	pískovec střednozrnný pískovec příměs: valouny
77.40 - 85.90	Perm	pískovec zvrstvení horizontální opakované světlá šedá
85.90 - 92.25	Karbon	pískovec hrubozrnný arkózový bílá šedá
92.25 - 212.10	Karbon	konglomerát drobnozrnný arkózový světlá šedá
212.10 - 223.40	Algonkium střední oddíl	fylit karbonátový sericitický silně jílovitý
223.40 - 230	Algonkium střední oddíl	fylit karbonátový sericitický

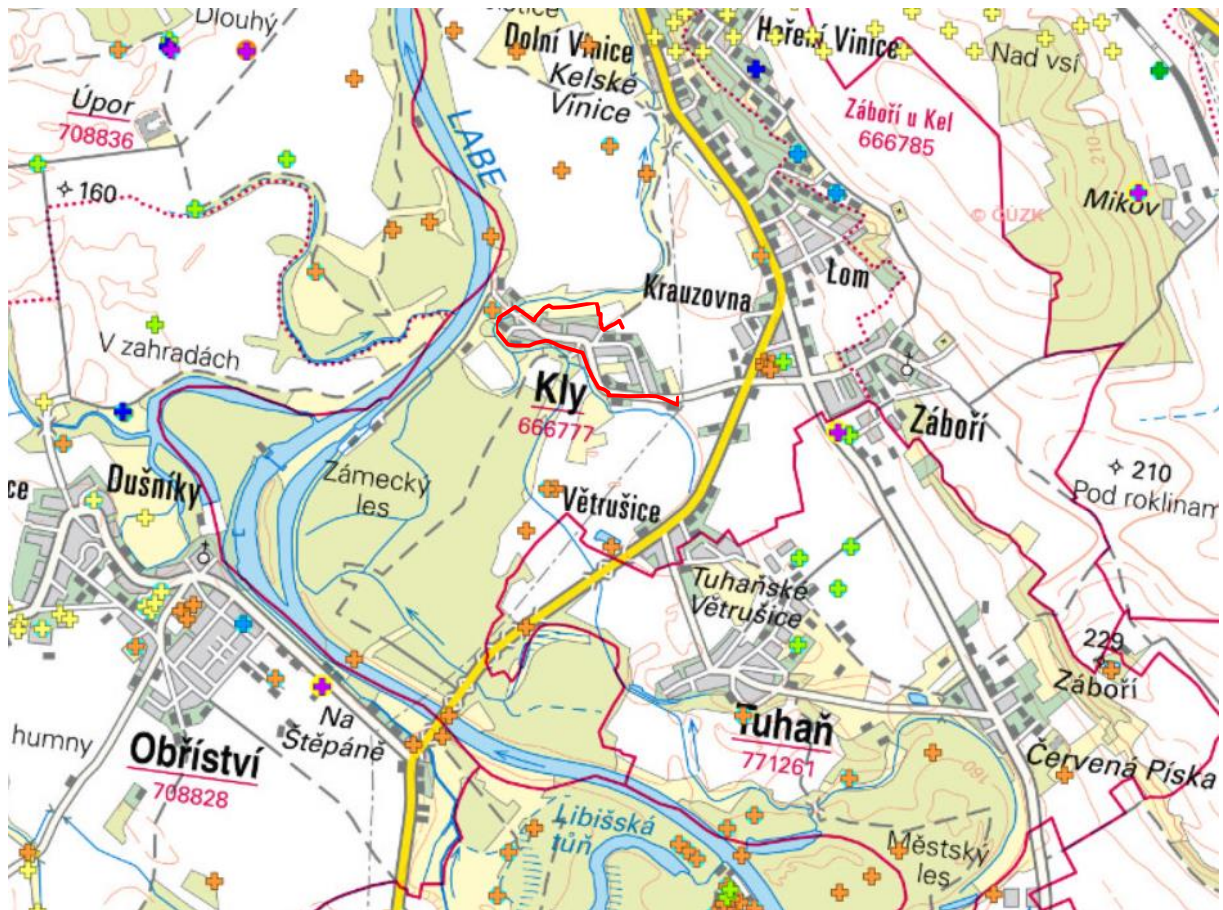
## Vrt 17

Se nachází přibližně 250 m jihozápadně od vrtu V-708 a přibližně 500 m severně od linie PPO. Svrchní vrstva vrtu je tvořena ornici, přibližně do hloubky 1,0 m. Pod touto vrstvou jsou štěrky a štěrkopísky do hloubky 8,0 m kde se nachází báze.

## Vrt 18

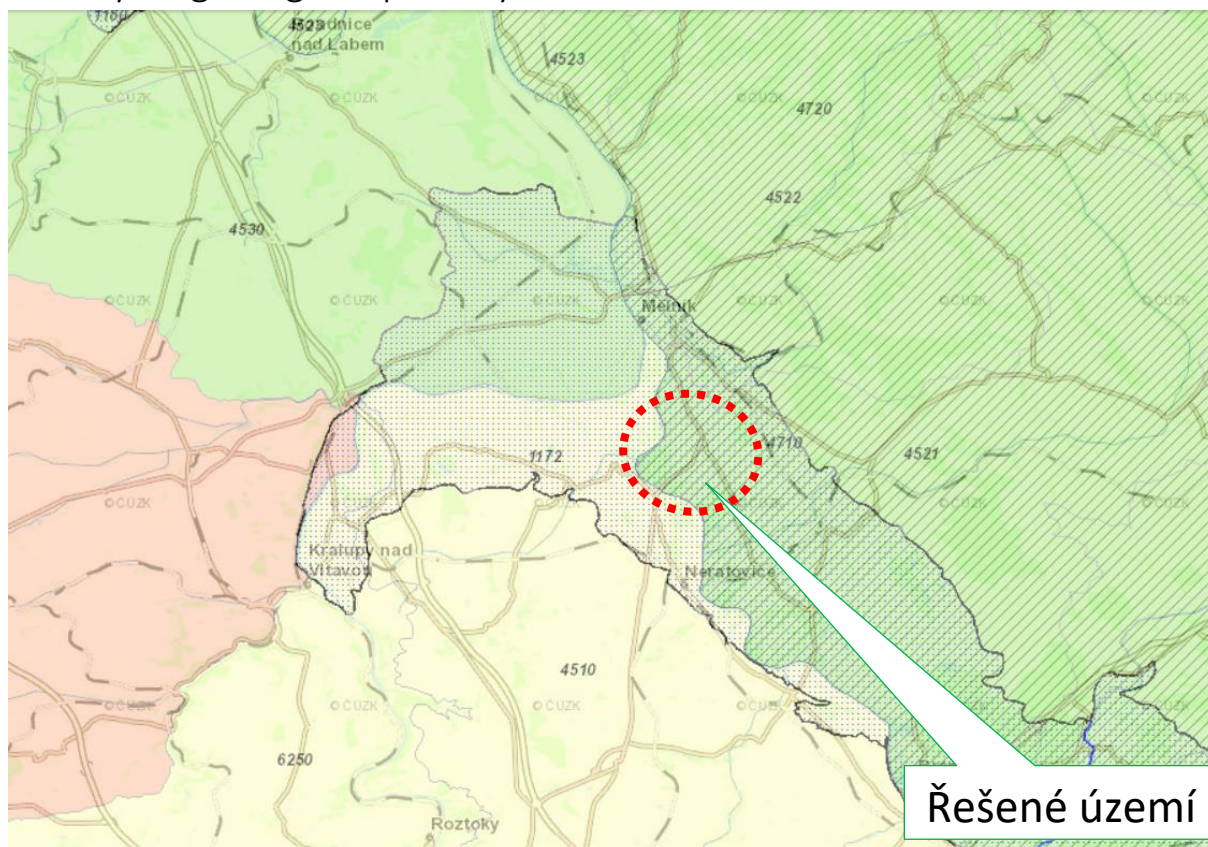
Vrt je umístěn přibližně 300 m jihovýchodně od vrtu V-708 a přibližně 500 m od linie PPO. Vrt se nachází v bezprostřední blízkosti Tuhaňské svodnice a má mírně odlišné složení od ostatních vrtů. Vrt je tvořen jílovitými hlínami a hlinitými jíly do hloubky 1,40 m. Následuje vrstva písků a štěrkopísků do hloubky 4,00 m, kde naráží na nepropustné jílovec.





Obrázek 10 – Vrtná prozkoumanost a vyznačená linie plánovaného PPO.[3]

## 2.6 Hydrogeologické poměry



### ▼ Hydrogeologické rajony

#### ▼ Typ hranice - svrchní

— ostatní

— hranice geologické jednotky

— linie toku

#### ▼ V svrchní vrstvě



#### ▼ Ve vrstvě bazálního křídového kolektoru



#### ▼ V základní vrstvě



v sedimentech svrchní křídy



v sedimentech permokarbonu



v terciálních a křídových pánevích sedimentech

Obrázek 11 – Výřez mapy hydrogeologických rajonů. © Česká geologická služba [2019]





Obrázek 12 – Rastrová hydrogeologická mapa 1:50 000 ČSSR © ČÚZK, Česká geologická služba

Výřez mapy hydrogeologických rajonů (obr. 11) graficky znázorňuje následující popis. Řešená oblast se nachází v základním rajonu 4521 – Křída Košáteckého potoka, svrchní rajon 1172 – Kvartér Labe po Vltavu a bazální rajon 4710 – Bazální křídový kolektor na Jizeře.

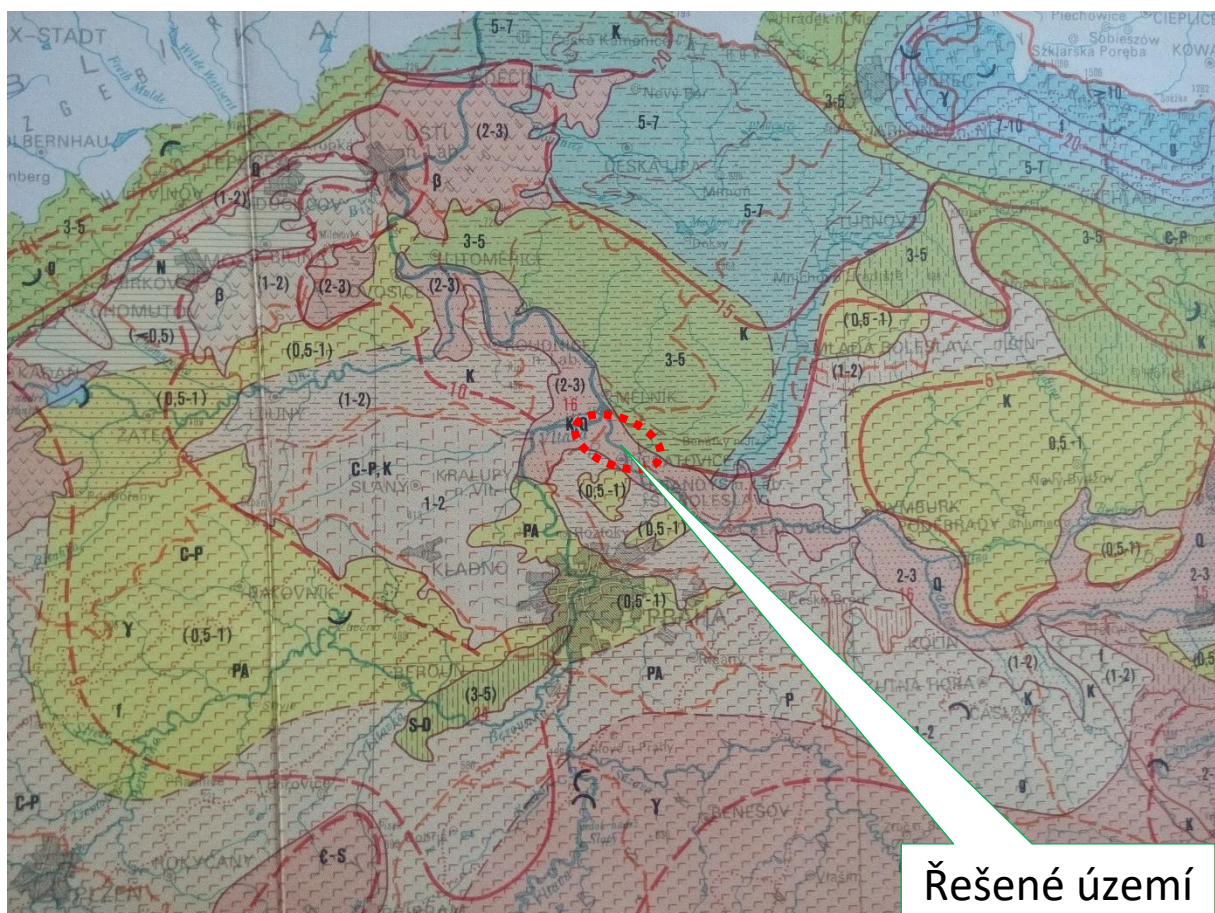
Řešená oblast se nachází v hydrogeologické struktuře jizerského souvrství (rajon 4521) [22,27] Řeka Labe tvoří drenážní bázi v úseku mezi Brandýsem na Labem a Litoměřicemi. V celé oblasti se jedná o pravostranné přítoky řeky. V území je severozápadní směr proudění podzemní vody. Jizerské souvrství má vysoký koeficient hydraulické vodivosti (filtrační koeficient), tj. schopnost prostředí vést vodu. Hydraulická vodivost je přímo závislá na vlastnostech porézního prostředí a vlastnostech proudící kapaliny (Valentová 2018). Propustnost v sedimentech je průlinovo puklinová s hodnotou hydraulické vodivosti, vyšší než  $1 \cdot 10^{-3}$  m/s. Další vlastností jizerského souvrství je poměrně častý výskyt vývěřů podzemní vody. Tyto vývěry se nachází především na pravostranných přítocích Labe, Pšovce a Košáteckém potoce.

Bazální kolektor s označením rajonu 4710 je z pískovců a slepenců. Jedná se o cenomanské perucko-korycanské souvrství. Jedná se o nejstarší sedimenty svrchněkřídové pánve. Mocnost báze dosahuje 50 m. Báze je od kolektoru jizerského souvrství oddělena, nepropustným březenským souvrstvím, které je tvořeno nepropustnými vápnitými jílovci nebo slínovci. Proudění podzemní vody je z větší části nezávislé na jizerském souvrství. Pouze v blízkosti řeky Labe, která je pro oba kolektory přirozenou drenážní bází, dochází k propojení obou kolektorů. Díky existenci březenského souvrství je v bazálním kolektoru napjatá hladina. Propustnost souvrství je průlinovo-puklinová s hodnotou hydraulické vodivosti  $1 \cdot 10^{-4}$  až  $1 \cdot 10^{-3}$  m/s.



V nivě řeky Labe se vyskytují fluvialní sedimenty. Jedná se především o frakce údolních teras, protože vyšší terasy se v údolí Labe vyskytují jen výjimečně. Terasy Labe (rajon 1172), které místy dosahují mocnosti až 25 m, jsou tvořeny jemnozrnným materiálem, který má dobrou propustnost. Terasy jsou tvořeny štěrky a písky a v okolí řešené oblasti jsou i těženy. Mají průlinovou propustnost a hydraulická vodivost nabývá hodnot  $1 \cdot 10^{-4}$  m/s (obr. 12). Štěrky a písky se vyznačují vysokým stupněm transmisivity, což je koeficient průtočnosti. Hladina podzemní vody v údolí je přímo ovlivňována řekou Labe. Labe bylo na začátku 20. století kanalizováno a hladina řeky přímo ovlivňuje hladinu podzemní vody, např. vzdutí jezu.

Oblast plánovaného protipovodňového opatření je ovlivněna přítomností kvartérních sedimentů. Kvartérní sedimenty mají průlinovou propustnost a tvoří je hrubozrné písky a štěrkopísky. Mocnost kvartérního pokryvu je 5,5 až 14 m. [3] Nepropustná báze je tvořena šedými jílovci, slínovci a prachovci. Hladina podzemní vody je v dané oblasti volná a koeficient hydraulické vodivosti  $K$  a nabývá ve fluvialních štěrkových píscích hodnot  $1 \cdot 10^{-3}$  až  $1 \cdot 10^{-4}$ . Místy se na štěrkových píscích může vyskytovat svrchní vrstva hlín, která má o řád nižší propustnost. S touto nepravidelnou vrstvou nebude v modelu uvažováno. Maximální mocnost svrchních hlín je 1,5 m. Hodnoty výšky hladiny poskytnuté ČHMÚ, České geologické služby nebo získané vlastním měření byly použity jako vstupní údaje modelu.



Obrázek 13 – Mapa odtoku podzemní vody ČSSR. Hodnoty jsou uváděny v l/s/km<sup>2</sup> a následně byly použity jako vstupní údaje do modelu. [16]

## 2.7 Geomorfologie

Tabulka 4 – Geomorfologické zařazení řešeného území. [10]

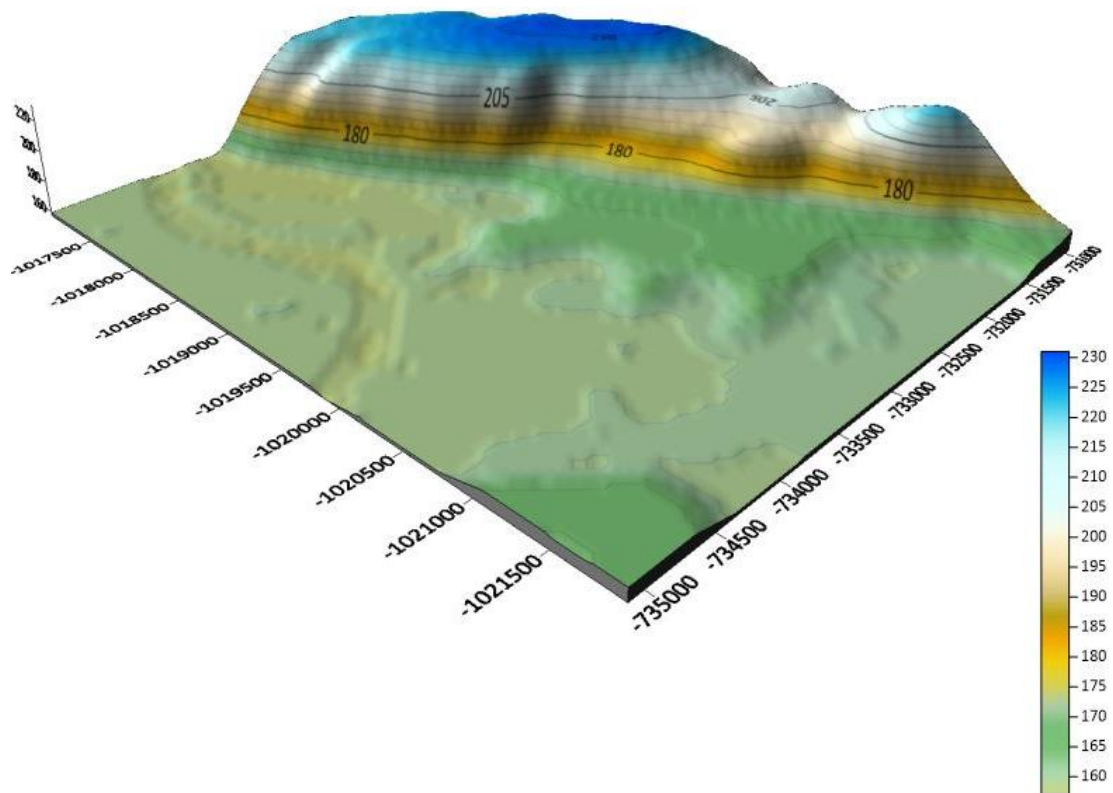
system:	Hercynský systém
subsystem:	Hercynské pohoří
provincie:	Česká vysočina
subprovincie:	Česká tabule
podsoustava:	Středočeská tabule
celek:	Středolabská tabule
podcelek:	Mělnická kotlina
okrsek:	Turbovický hřbet
	Lužecká kotlina
	Staroboleslavská kotlina

Z uvedené tabulky 4 je patrné rozdělení geomorfologických jednotek. Řešená lokalita se z regionálního pohledu nachází ve Středolabské tabuli, v Mělnické kotlině. Středolabská kotlina kopíruje v různé šířce řeku Labe od města Kolín, až k městu Mělník (obr. 14). Jedná se o rovinu, či mírně zvlněnou pahorkatinu. Většina středočeské tabule má křídové podloží, nicméně místy vystupují struktury krystalinika a permu (výstupy prvohorních buližníků v oblasti Kojetic, nebo vrch Dřínov). Oblast řešeného území je silně ovlivněna historickým formováním řeky Labe. Řeka má v těchto místech tvar nížinného toku, tzn. že řeka meandruje, vznikají agradační valy, či dochází k usazování dříve erodovaného materiálu. Terén je velmi zarovnaný s říčními terasami. Materiálově se v řešené oblasti nacházejí štěrky, písky, spraše, případně hnilokaly v místech zanesených meandrů řeky. Nadmožská výška starých Kel se pohybuje cca 160 m n. m. Kly leží na okraji říční nivy, která v těchto místech dosahuje šířky 3,5 km. To je způsobeno soutokem řek Labe a Vltavy. Obec Kly se nachází na nejnižší položené terase, která ve svém západním místě sousedí s korytem řeky. Území je mírně zvlněno od Turbovického vrchu na východě, k řece na západě (obr. 15). Samotným územím na přelomu 19. a 20. století proběhla regulace a splavnění řeky. Tento zásah ovlivnil hladinu podzemní vody. Při povodních bývá zaplaveno původní koryto nejdříve, přestože bylo zasypáno. Řešená oblast byla ovlivněna stavbou jezu v Obříví.





Obrázek 14 – Výřez z Národního geoporálu INSPIRE. V obrázku dochází ke kombinaci podkladové topografické mapy a geomorfologické mapy ČR. © ČÚZK, CENIA [10]



Obrázek 15 – Převýšený model terénu řešené oblasti. Jako podklad byl použit digitální model terénu DMR 5g

## 2.8 Hydrologické poměry

Obec Kly leží na pravém břehu řeky Labe. Řeka Labe pramení na Labské louce v nadmořské výšce 1386 m n. m. [11] v Krkonoších. Je dlouhá 1094 km a velikost povodí činí 148 268 km<sup>2</sup>. Na území České republiky má délku 370,74 km a velikost povodí 49 933 km<sup>2</sup>. Zajímavostí je, že na soutoku Labe s Vltavou má Labe menší průtok a menší délku než Vltava. Jez, který je situovaný přibližně 1 kilometr proti proudu jihozápadním směrem od obce Kly, se nachází na 843,504 km říčním kilometru [12]. Tato kilometráž Labe je vedena proti proudu řeky od ústí do Severního moře. Oblast, která byla definována modelem odvodňuje z větší části Tuhaňská svodnice. Jedná se o povodí třetího řádu s číselným označením 1-05-04-065 (obr. 16). Západní část oblasti je odvodňována dílčím povodím řeky Labe, s číselným označením 1-05-04-064. Velikost povodí po závěrový profil, který je tvořen soutokem řeky Labe a Tuhaňské svodnice je 13,983 km<sup>2</sup>. Tuhaňská svodnice se do řeky Labe vlévá v oblasti starého jezu, v jižní části města Mělník. Dílčí povodí má velikost povodí 7,045 km<sup>2</sup> a do oblasti modelu zasahuje omezeně v západní části modelu a nevstupuje do řešené oblasti modelu. V jihozápadní části modelu vstupuje do modelu efekt jezu. Zde dochází díky vzednutí hladiny v nadjezí k infiltraci vody do půdy. Tato voda obtéká jez a následně se vrací do řeky v podjezí. Jev byl prokázán ve stacionárním modelu proudění podzemní vody.



Obrázek 16 – Vodohospodářská mapa 1:50 000 České republiky s vyznačením hranice řešené oblasti modelu. © HEIS VÚV, [2019]

## 2.9 Klimatické poměry

Klimatické poměry popisují vodní režim území. Řešená oblast se nachází v Labské kotlině v nízkých nadmořských výškách okolo 160 m n. m. Odtokové poměry jsou přímo závislé na množství spadlých srážek, časovém rozložení srážek, plošném rozložení srážek a evapotranspiraci. Klimatické poměry ovlivňují druhové složení vegetace, která má vliv na odtokové poměry (tab. 5). Celá řešená oblast se nachází v teplém a suchém regionu T2 dle Quitta.

V následující tabulce jsou umístěné podrobné informace o klimatických poměrech řešené oblasti.

*Tabulka 5 Klimatické charakteristiky. Hodnoty jsou porovnávány s teplotní oblastí T2 dle Quitta. Hodnoty získány z let 1994 – 2014. [13] [2019]*

Klimatická charakteristika	Teplá oblast T2	Kly
počet letních dní (max. t $\geq 25,0^{\circ}\text{C}$ )	50 - 60	66
počet dní s $\varnothing t \geq 10,0^{\circ}\text{C}$	130 - 170	192
počet mrazových dní (min. t $\leq -0,1^{\circ}\text{C}$ )	100 - 110	75
počet ledových dní (max. t $\leq -0,1^{\circ}\text{C}$ )	30 - 40	20
$\varnothing$ teplota v lednu	-2/-3 $^{\circ}\text{C}$	0,2 $^{\circ}\text{C}$
$\varnothing$ teplota v červenci	18-19 $^{\circ}\text{C}$	20,6 $^{\circ}\text{C}$
$\varnothing$ teplota v dubnu	8-9 $^{\circ}\text{C}$	10,8 $^{\circ}\text{C}$
$\varnothing$ teplota v říjnu	7-9 $^{\circ}\text{C}$	10,1 $^{\circ}\text{C}$
počet dní se srážkami $\geq 1$ mm	90-100	91
srážkový úhrn ve vegetačním období	350-400 mm	435 mm
srážkový úhrn v zimním období	200-300 mm	214 mm
počet dní se sněhovou pokrývkou	40-50	25
počet zamračených dní ( $\geq 82\%$ )	120-140	95
počet jasných dní ( $\leq 20\%$ )	40-50	42

## 3 Protipovodňová opatření

V roce 2002 postihly obec Kly ničivé záplavy. [4,30] Povodně z let 2006 a 2013 opětovně částečně zaplavily obec Kly. Po ničivých povodních v roce 2002 obec začala uvažovat nad opatřeními, které by eliminovaly škody způsobené povodněmi. V roce 2007 byla vypracována Studie protipovodňových opatření na ochranu obce Kly. Roku 2016 proběhla revize této studie. Autorem studie proveditelnosti a revize této studie byla firma Sweco Hydroprojekt a.s.

Návrh technického řešení byl volen po dohodě s objednatelem studie proveditelnosti. Studie byla řešena pro úroveň hladiny velké vody  $Q_{100}$  s bezpečnostním převýšením koruny protipovodňových konstrukcí 0,5 m. Tato varianta byla vybrána z důvodu předpokládané budoucí změny polohy hladiny. Předpokládá se, že se hladina  $Q_{100}$  po realizaci PPO Kly zvýší. Dále se předpokládá, že výstavba PPO v inundačním pásmu (PPO Hořín, PPO Zálezlice) ovlivní výšku hladiny  $Q_{100}$ . V rámci dalšího stupně projektové dokumentace se předpokládá vyhotovení matematického simulačního modelu, který podrobněji určí polohu hladiny  $Q_{100}$ .



Z tohoto důvodu byla zvolena větší výška bezpečnostního převýšení 0,50 m. Ve studii proveditelnosti se předpokládá, že z tohoto důvodu nebude nutné dělat změny v projektové dokumentaci.

Stavba se ve studii proveditelnosti dělí na sedm stavebních objektů (tab. 6).

Tabulka 6 – Dělení stavby na stavební objekty. [4]

SO 01	Pevná zídka
SO 02	Zemní hrázka s pevnou zídkou
SO 03	Pevná zídka s mobilním hrazením
SO 04	Mobilní hrazení průjezdů
SO 05	Podzemní těsnící stěna
SO 06	Uzavírací a čerpací stavba na kanalizaci
SO 07	Čerpací šachty prosáklých a povrchových vod

### 3.1 Soupis parametrů navrhovaného protipovodňového opatření

Návrh ze studie proveditelnosti respektuje majetkové vztahy dané lokality a také Tuhaňskou svodnici na jižní straně řešené lokality. Z tohoto důvodu je relativně dlouhý úsek PPO řešen železobetonovou zdí. Podzemní těsnící prvek je v celé délce navržen v rozmezí 151,8 až 154,0 m n. m. Tato podzemní těsnící stěna je v celé své délce navržena nad nepropustnou bází. Z důvodu absence podrobného geologického průzkumu dané lokality není možné s přesností určit mocnost kvartérního sedimentu mezi dnem podzemní těsnící stěny a dnem kvartérního pokryvu.

Přehledný soupis parametrů navrhovaného díla byl převzat ze Studie protipovodňových opatření na ochranu obce Kly – Sweco Hydroprojekt a.s. [4]

Návrhová hladina $Q_{100}$	163,30 m n. m.
Bezpečnostní převýšení	0,50 m
Koruna objektů linie PPO	163,80 m n. m.

Celková délka linie PPO	2 028,0 M
Z toho	
Pevná zídka	1 176,0 m
Zemní hrázka s pevnou zídkou	795,0 m
Pevná zídka s mobilním hrazením	21,0 m
Mobilní hrazení průjezdů	36,0 m
Podzemní těsnící clona	2 028,0 m

#### Potřebná výška jednotlivých prvků PPO

Výška pevné zídky	0 ÷ 5,50 m
Výška zemní hrázky	0 ÷ 4,60 m
Výška pevné zídky na koruně hrázky	1,80 m
Výška pevné zídky pro nastavení mobilním hrazením	1,00 m
Výška mobilního hrazení na pevné zídce	2,80 m
Výška mobilního hrazení průjezdů	1,80 ÷ 5,10 m

Hloubka podzemní těsnicí stěny 3,60 ÷ 7,90 m

### **Objem jednotlivých prvků PPO**

Železobeton pevných zídek	7 402 m <sup>3</sup>
Zemina hrázek	23 909 m <sup>3</sup>
Železobeton pevných zídek na koruně hrázek	3 043 m <sup>3</sup>
Železobeton pevné zídky pro mobilní hrazení	96 m <sup>3</sup>
Mobilní hrazení na koruně pevné zídky	59,4 m <sup>2</sup>
Mobilní hrazení průjezdů	133,6 m <sup>2</sup>
Podzemní těsnicí stěna	10 840 m

## 3.2 Technické řešení a popis jednotlivých konstrukcí

Technické složení protipovodňové ochrany se skládá ze stavebních objektů popsaných v tabulce 5. Jedná se o stavby zemních hrází, železobetonových protipovodňových zdí a mobilních hrazení, které se skládají z nadzemní a podzemní části. V rámci stavby zemních hrází bude podzemní stavbu tvořit svislý těsnicí prvek. U mobilních hrazení a železobetonových zdí je navržen základový pás a svislý těsnicí prvek. Svislý těsnicí prvek je tvořen štětovicovou stěnou a je vybudován za účelem prodloužení doby prostupu podzemní vody. Návrh je projektován na hladinu povodně při návrhovém průtoku  $Q_{100}$  plus navýšení o bezpečnostní převýšení 0,50 m. Návrh zohledňuje stávající stav proudění podzemní vody. Z tohoto důvodu není podzemní těsnicí prvek zapuštěn až do báze, ale je ponechána propustná vrstva v kvarterním pokryvu. Tato vrstva umožňuje proudění podzemní vody i pod PPO. V případě zapuštění PTS do báze by došlo k negativnímu ovlivnění podzemních vod (zvýšení HPV, problémy s odtokem vody ze srážek).

Pro podrobnou orientaci popisovaného návrhu je k práci přiložena příloha 1 Vzorové příčné řezy a příloha 2 Situace protipovodňových opatření. Obě přílohy byly vyhotoveny v rámci Studie protipovodňových opatření na ochranu obce Kly – Sweco Hydroprojekt a.s. [4]

### 3.2.1 SO 01 Pevná zídka

Pevné zídky jsou primárně navrhovány z důvodu složitých majetkoprávních vztahů a jiných omezení. Jejich stavba bude z větší části situována na obecní či státní pozemky. V některých místech budou pevné zídky tvořit oplocení soukromých pozemků, kdy základové patky budou zasahovat do soukromých pozemků. Problémem může být velká výška pevných zídek, a to až do výšky 5,50 m (na okrajích soukromých pozemků max. do výšky 3,80 m). Koruna zídky je projektována na kótu 163,80 m. Délka projektované zídky bude 1176 m. Pevné zídky jsou navrženy ze železobetonu a budou mít tvar písmene L otočeného po vodě (vzorový řez A a B). Šířka pevné zídky v koruně je projektována na 0,40 m. Zídky budou dosypávány zeminou a jejich vzhled bude upraven až v dalším stupni projektové dokumentace

Návrh protipovodňového opatření pevné zídky začíná u silnice III. třídy, s označením 00910 u domu č.p. 250. PPO je v těchto místech zavázáno do terénu a vede od domu k jihu k Tuhaňské svodnici, kde se stáčí severozápadním směrem. Takto vede PPO až ke křížení

s polní cestou. V celé délce cca 580 m je PPO navrženo (vzorový řez A a B). Přibližně po 400 m betonovou zídku přerušuje stavba SO 04 a SO 03 v délce 28 m. Tato stavba končí zemní hrázkou s pevnou zídkou jižně od hasičské zbrojnice. Výška této stavby se pohybuje od 0,00 m do 5,35 m.

Druhý úsek pevné zídky je situován jižně od centrální části obce na hranici přírodní rezervace Černínovsko – Úpor. Z důvodu úzkého pruhu mezi tuhaňskou svodnicí a zahradami rodinných domů byla zvolena pevná zídka jako nejvhodnější řešení. Tento úsek má délku 310 m, přibližně uprostřed je přerušen průchodem širokým 3 metry, opatřeným stavbou SO 04 mobilní hrazení průjezdů. Tato stavba končí zemní hrázkou s pevnou zídkou na západě obce, u ohybu Tuhaňské svodnice. Výška tohoto úseku stavby se pohybuje od 2,00 do 5,50 m.

Třetí úsek pevné zídky je situován na západě PPO u výběhu koní a přejezdu místní komunikace k ohybu Labe. Úsek je dlouhý 106 metrů a v severní části je přerušen místní komunikací. V těchto místech ho přerušuje stavba SO 04 mobilní hrazení průjezdů. Severně od místní komunikace končí pevná zídka a pokračuje stavba SO 02 zemní hrázka s pevnou zídkou. Výška tohoto úseku stavby se pohybuje od 4,65 do 5,15 m.

Čtvrtý a poslední úsek pevné zídky je situován na severovýchodním konci PPO. Stavba má délku 183 metrů a je přerušena ve dvou místech stavbou SO 04 mobilní hrazení průjezdů. První průjezd je projektován na polní cestě, směrem na místní část obce Hoření Vinice. Tento průjezd je projektován na šířku 5 metrů. Druhý průjezd je projektován na šířku 2,3 m a nachází se na počátku u stavby SO 02 zemní hrázka s pevnou zídkou. Výška tohoto úseku se pohybuje od 2,15 do 5,30 metru.

### 3.2.2 SO 02 Zemní hrázka s pevnou zídkou

Zemní hrázky s pevnou zídkou jsou navrhovány především tam, kde jsou dobré majetkoprávní vztahy a je dostatek prostoru pro trvalý zábor. Mezi výhody zemní hráze patří přírodní vzhled, mezi nevýhody patří nároky na trvalou údržbu (sečení trávy) a trvalý zábor. Samotná hráz je navržena do max. výšky 4,60 m. Koruna hráze je navržena v šířce min. 3,00 metru. Navržená délka hráze je 795 metrů. Sklony svahu jsou navrhovány v poměru 1:2 u návodního i vzdušného líce (v případě výstavby zemní hráze až do navrhované výšky 163,80 m by musel být návodní líc navržen v poměru 1:3). Zemní hráze by měly být navrhovány podle ČSN 75 2410 (752410) Malé vodní nádrže. Při výstavbě se předpokládá skryvka ornice v mocnosti 0,30 m a následný základ na základové spáře. Ve většině trasy (vyjma 38 m na severovýchodním konci PPO) je navržena hrázka s korunou na kótě 162,00 m n. m. Zbylá výška, do kóty 163,80 m n. m. je navržena jako železobetonová zídka. Samotná zídka bude na koruně zemní hráze situovaná na koruně hráze při návodním líci tak, aby koruna hráze byla pojezdná. Zídka prostupuje celou zemní hrází, kde navazuje na podzemní těsnící prvek. V úseku severovýchodní části je zemní hráz navržena bez pevné zídky, a to z důvodu malé výšky zemní hráze. V těchto místech je zemní hráz zavázána s terénem. V rámci variant se ve studii proveditelnosti uvažovalo o nahrazení zemní hráze s pevnou zídkou pouze zemní hrází, nebo zemní hrází s mobilním hrazením. Varianta zemní hráze nebyla vybrána z důvodu velkého prostorového nároku. Tato varianta by byla možná pouze v severní části, nicméně maximální výška zemní hráze 6,80 m by znamenala velký nárok na zeminu. Druhá varianta zemní hráze s mobilním hrazením nebyla vybrána z důvodu velkých pořizovacích nákladů.

Dalším problémem je nutnost skladovacích prostorů pro mobilní hrazení a v neposlední řadě náročnost na rychlé vybudování mobilního hrazení v případě povodně.

Návrh zemní hrázky s pevnou zídou se nachází v úseku jižně od hasičské zbrojnice. V úseku je navržena v délce cca 100 metrů zemní hráz se zídou (vzorový řez D). Trvalá železobetonová zeď prostupuje celým tělesem zemní hráze. Přibližně uprostřed zemní hráze se zídou se nachází přejezd polní cesty. Přejezd je 3,00 metry široký. V těchto místech je zeď nahrazena stavbou SO 04 pevná zídka s mobilním hrazením. Na obou okrajích na stavbu SO 02 navazuje stavba SO 01 pevná zídka. Výška zemní hrázky tohoto úseku se pohybuje od 1,00 do 2,70 metru. Nad zemní hrázkou vystupuje železobetonová zídka s výškou 1,80 m.

Druhý úsek se nachází v západní části PPO v ohybu Tuhaňské svodnice. Úsek je navržen v délce 134 m. Přibližně uprostřed zemní hráze se zídou je 4,00 m široký průjezd polní cesty se nachází průjezd polní cesty. V těchto místech je zeď nahrazena stavbou SO 04 pevná zídka s mobilním hrazením. Na obou okrajích na stavbu SO 02 navazuje stavba SO 01 pevná zídka. Výška zemní hrázky tohoto úseku se pohybuje od 2,35 do 3,45 metru. Nad zemní hrázkou vystupuje železobetonová zídka s výškou 1,80 m.

Třetí úsek navazuje na železobetonovou zídou severně od místní komunikace a pokračuje východním směrem. V severní části polní cesta přejíždí zemní těleso. Délka zemní hráze je navržena 527 m. Na obou okrajích na stavbu SO 02 navazuje stavba SO 01 pevná zídka. Výška zemní hrázky tohoto úseku se pohybuje od 3,00 do 4,60 metru. Nad zemní hrázkou vystupuje železobetonová zídka s výškou 1,80 m.

Poslední úsek se nachází na severovýchodní části PPO. V severní části navazuje na pevnou zídou a v jižní části je zavázán do terénu. Tento úsek je výjimečný v tom, že je navržen jako zemní hrázka bez pevné zidky. Délka tohoto úseku je 38 m. Výška zemní hrázky se pohybuje od 0,00 do 2,15 metru.

### 3.2.3 SO 03 Pevná zídka s mobilním hrazením

Návrh pevné zidky s mobilním hrazením se nachází pouze v jižní části řešeného území u hřiště při napojení na polní cestu. Jedná se o železobetonovou pevnou zídou vysokou pouze 1,00 m (161 m n. m.). Předpokládá se, že v případě povodňové situace bude vystavěno mobilní hrazení do požadované nadmořské výšky 163,80 m n. m. Zidky jsou projektovány do tvaru L s patkami (vzorový řez C) se základovým pasem. Délka této stavby je projektována na 21 m. Podzemní část je řešena PTS.

### 3.2.4 SO 04 Mobilní hrazení průjezdů

V rámci studie je navrženo celkem 8 průjezdů. Sedm těchto průjezdů se nachází na místních komunikacích. V jednom případě se jedná o průchod pro hospodářská zvířata. Šířka mobilního hrazení se pohybuje od 2,30 do 7,00 metru. Výška mobilního hrazení se pohybuje od 1,80 do 5,30 metru. Mobilní hrazení je ve všech případech projektováno na kótu 163,80 m n. m. Mobilní hrazení bude dosedat na základový pas, do kterého zesponu doléhá PTS. V případě větší šířky mobilního hrazení budou muset být vybudovány vzpěry.

### 3.2.5 SO 05 Podzemní těsnící stěna

Podzemní těsnící stěna je v rámci studie uvažována především z důvodu prodloužení průsakové doby pod PPO v povodňovém období. PTS není navržena až na úroveň báze, a to z toho důvodu, aby byl zachován prostup podzemní vody. Podrobnější parametry PTS budou definovány až po vyhotovení podrobného geologického průzkumu. V současné době se předpokládá, že hloubka stěny se pohybuje od 3,6 do 7,90 m. Prostup podzemní vody je podrobněji řešen v této práci matematickým modelem.

Vyhotovení podzemní těsnící stěny bude předcházet zakládání zídek, mobilního hrazení a založení hrází. PTS bude vytvořena v celé délce stavby 2028 m. Předpokládá se, že PTS bude štětovnicovou stěnou, nicméně bude muset být provedeno posouzení chemismu podzemní vody, jestli je štětovnicová stěna vhodný materiál.

### 3.2.6 SO 06 Uzavírací a čerpací šachta na kanalizaci

V jižní části obce kříží dešťová kanalizace DN 250 zemní hrázku. Kanalizace je vyústěná v rybníčku na Tuhaňské svodnici. Tato dešťová stoka je vybavena uzavírací šachtou. V šachtě se nachází stavítkový uzávěr na odtoku ze šachty, který bude v případě zvednutí hladiny uzavřen. Provoz dešťové kanalizace bude zajištěn plovoucím čerpadlem, umístěným v šachtě. V případě uzavření uzávěru budou na plovoucí čerpadlo namontovány hadice a dešťová voda bude odváděna přes hráz.

### 3.2.7 SO 07 Čerpací šachty prosáklých povrchových vod

V rámci studie proveditelnosti se předpokládá s výstavbou čerpacích šachet. Šachty by měly být při vnitřní stěně PPO. Do těchto šachet by v případě povodňové situace měla být svedena dešťová voda. Četnost těchto studní a jejich potřebu by měl ověřit model proudění podzemní vody.

## 4 Měření hladiny podzemní vody

Pomocí měření můžeme mapovat mocnost zvodní. V této práci byly naměřené hodnoty použity v kalibraci modelu. Zvodně jsou přímo závislé na geologickém rozložení dané řešené oblasti.

V geologickém prostředí dochází k proudění podzemní vody. V rámci hydrogeologických procesů dochází k infiltraci, akumulaci a také k vyvěrání podzemní vody. Jestliže nedochází k akumulaci, podzemní voda pouze protéká profilem a doba zdržení je krátká (závislá na hydraulické vodivosti horninového prostředí). Oproti tomu, jestliže se voda v hydrogeologické struktuře akumuluje, doba zdržení může být značná. Oblasti infiltrace a vývěru mohou být značně vzdáleny. Akumulace může být ve zvodních s volnou hladinou, či ve zvodních s hladinou napjatou. Zvodní může být i několik nad sebou. Mezi těmito zvodněmi dochází k přetoku (žádná hornina není absolutně nepropustná). Oblasti, kde dochází k akumulaci vody, se nazývají kolektory.

V řešeném případě je více kolektorů nad sebou. Řešen je pouze vrchní kolektor s volnou hladinou, protože vrchní kolektor je přímo ovlivňován srážkami, případně povodňovou situací.

V rámci této diplomové práce bylo prováděno samostatné měření na vrtu s označením HV - 1(VP0705). Jedná se o vrt svislý s hloubkou osm metrů. Vrt byl vyhotoven v roce 1971.

### 4.1 Metody měření

Hladinu podzemní vody můžeme měřit několika způsoby. A to: kontaktním hladinoměrem, ultrazvukovým měřičem hladiny, otevřeným či uzavřeným piezometrem, nebo kontinuálním měřičem hladiny. Kontaktní hladinoměr je přístroj, kdy dochází ke spouštění sondy do měřeného vrtu či study. Ve chvíli kontaktu s vodní hladinou dochází k světelné, nebo zvukové reakci. Ultrazvukový měřič hladiny je přístroj pracující na principu odrazu ultrazvukového signálu od hladiny.

### 4.2 Piezometr a datalogger

V terénu je měřena hydraulická výška pomocí přístroje, který se nazývá piezometr. Jedná se o přístroj určený k monitorování vodního tlaku. Máme piezometry otevřené a piezometry uzavřené. Piezometr otevřený měří výtlačnou hladinu. Piezometr uzavřený měří pórový tlak. Samotný piezometr se skládá z nerezového hrotu (těla), v kterém se nachází filtr proti zanášení. Dále se skládá z přívodního kabelu. Na druhé straně kabelu je konektor, určený pro sběr dat společně s dataloggerem. Na datalogger je zaznamenáváno kontinuální měření. Data jsou většinou měřena po časovém intervalu, obvykle jednou za den. Společně s konektorem se zde vyskytuje i háček k zavěšení (obr. 17).

Piezometry jsou standardně vyráběny s rozsahem vodního sloupce až 10 m (u výrobce lze objednat i větší délku). Výhodou je vysoká přesnost a stabilita měření. V rámci samotného přístroje je měřen hydrostatický tlak. Dále jsou prováděny další redukce např. ze změny teploty.

Přístroje mohou být vybaveny GPS signálem, pomocí kterého mohou být přenášena data přímo na server. Není tedy nutné fyzicky data přímo odebírat. V případě mého měření bylo nutné data fyzicky odebrat z dataloggeru po ukončení měření.



*Obrázek 17 – Vzorový příklad dataloggeru. Jedná se o typ H40 – GSM/GPRS od firmy Fiedler. [29]*

### 4.3 Elektrokontaktní hladinoměry

Hladinoměry jsou přístroje určené k měření hladiny ve studních, vrtech, ale i jámkách i u různých druhů nádrží. Nicméně přesnost u takovýchto přístrojů může být v rozsahu 2 %. Hladinoměr je sonda s indikací světelnou, zvukovou, nebo jejich kombinací. Sonda se spouští do vrtu a při kontaktu s vodní hladinou reaguje. Hladinoměr může mít dosah až 700 metrů. Hladinoměry vyžadují obsluhu, protože nemají vlastní napájecí baterii a neumožňují vzdálený přístup. Elektrokontaktní hladinoměry disponují dvěma senzory. Jeden měří atmosférický tlak a druhý senzor měří hydrostatický tlak společně s atmosférickým. Následně se atmosférický tlak odečítá. Měřicí rozsah snímače bývá do 25 metrů. Instalace snímače je taková, že se spustí po kabelu do snímaného prostoru.

### 4.4 Ultrazvukové hladinoměry

Ultrazvukové hladinoměry měří časovou prodlevu mezi vyslaným a přijatým signálem. Nespornou výhodou tohoto měření je jeho bezkontaktnost. Problémem je, že rychlost šíření zvuku je závislá na teplotě. Z tohoto důvodu musí být v přístroji zabudovaná automatická teplotní korekce. Je potřeba říci, že toto měření má minimální vzdálenost. Jestliže je měřená hloubka menší, tento přístroj nepracuje. Výrobci tuto vzdálenost udávají cca 1 metr.

Ultrazvukové hladinoměry se používají všude tam, kde je potřeba bezkontaktní měření (obr. 18). Dále ve vodních tocích, kanalizačních stokách, jímkách, nebo třeba při měření výšky sněhové pokrývky.



Obrázek 18 – Vzorový příklad Ultrazvukového hladinoměru. Typ MICROFLEX C. [29]

#### 4.5 Měření na vrtu HV 1

Ke správnému vytvoření modelu proudění podzemní vody je potřeba provést kalibraci modelu. Z důvodu absence kalibračního vrtu na západním okraji řešené oblasti bylo přistoupeno k vlastnímu měření na vrtu s označením HV 1. Vrt HV 1 se nachází ve vzdálenosti cca 50,0 m od západní hranice PPO a přibližně 100,0 m od řeky Labe ve výběhu koní (Příloha 1). Geologie vrtu byla podrobněji popsána v kapitole 2.5.1. Vrt samotný byl vystrojen v roce 1971 a měření na vrtu bylo ukončeno v 80 letech. Z profilu vrtu je patrné, že svrchní vrstvu tvoří propustné písky a spodní vrstva je tvořena štěrky. Složení geologického podloží umožňuje změny výšky hladiny podzemní vody ve vrtu v závislosti na řece Labi. Studny, které se nachází v intravilánu obce mohou svým odběrem ovlivňovat hladinu podzemní vody ve vrtu.

Měření probíhalo od 17.7.2019 do 25.10.2019. Do vrtu byl umístěn piezometr s dataloggerem. Jednalo se o přístroj LGR 2 HT, vyrobený firmou Geomon s.r.o. [32]



Jedná se o autonomní záznamník, který zaznamenával v časových krocích jedné hodiny vývoj hladiny podzemní vody a teploty. Přístroj pracuje na principu měření hydrostatického tlaku. V přístroji je prováděna automatická kompenzace vlivu změn atmosférického tlaku.

Přístroj LGR 2 tvoří vodotěsné, nerezové válcové pouzdro, uvnitř kterého je umístěna elektronika, teplotní a tlakové čidlo. Dále přístroj tvoří úchyt, za který je možné přístroj zavěsit na okraj vrtu a baterie. Závěs a nerezové válcové pouzdro se skládá ze speciálního kabelu s polyuretanovým pláštěm, který je odolný i v agresivním prostředí. Kabel je vybaven ocelovými lanky, které zajišťují minimální protažení kabelu a dutou žílu. Ta slouží k vyrovnávání tlaků.

Přístroj je napájen 9 V destičkovými bateriemi. Při měření v hodinových krocích výrobce uvádí výdrž baterií bez nabíjení jeden rok. Rozsah při měření tlaku je od 40 do 800 kPa. Rozsah při měření teplot je od 0 do 100 °C. Nastavené intervaly měření je možné měnit. Data z přístroje je nutné na konci měření fyzicky odebrat.

Grafické a tabulkové výstupy z měřených dat jsou uvedeny v příloze 14.

Data srážek byla získána zaznamenáváním srážkových situací pro meteorologickou stanici Tuhaň na oficiálních stránkách ČHMÚ. Data z této stanice jsou zaznamenávána ČHMÚ. Stanice se nachází přibližně 2 km jihovýchodně od řešené oblasti.

Z grafických výstupů měřených dat je viditelný dlouhodobý pokles hladiny podzemních vod. Z měřených dat jsou patrné výkyvy hladiny, které mohou být způsobeny srážkovou činností, změnou hladiny v řece, případně větší odběr podzemní vody ze studní v okolí vrtu. V grafu přílohy 14 je vykresleny srážkové úhrny společně s vývojem hladiny podzemní vody. Z tohoto grafu je vidět korelace mezi srážkovou činností a nárůstem hladiny podzemní vody u některých výkyvů v měření. Vzhledem k tomu, že se řešená oblast nachází na středním Labi mohou být způsobeny některé nárůsty hladiny podzemní vody zvednutím hladiny v řece. Zvednutí hladiny v řece může způsobit srážková činnost na horním povodí řeky. Srážkoměrná stanice Tuhaň nemusí v daném období zaznamenat srážkovou činnost. Vývoj teploty ve vrtu HV 1 má vzrůstající charakter až do druhé poloviny měsíce září. Na začátku října dochází k výraznějšímu ochlazení. Z grafu lze usuzovat, že změna teploty podzemní vody v kvartérním kolektoru má přibližně měsíční zpoždění oproti teplotě na povrchu.

## 5 Matematický model proudění podzemní vody

K popisu proudění podzemní vody v oblasti nasyceného porézního prostředí s definovanými počátečními a okrajovými podmínkami jsou užívány matematické rovnice. Proudění podzemní vody lze řešit pomocí analytických a numerických metod. [23]

Analytické metody proudění podzemní vody jsou užívány pro jednoduché úlohy. Prostředí musí být homogenní a izotropní a počáteční podmínka musí být definována jako konstantní v celé oblasti modelu. Toto řešení je vhodné pro pochopení fyzikálních a prostorových vztahů daného řešení a pro jednoduchost výpočtů. V případě této diplomové práce se jedná o komplexní model.

Numerické metody řeší komplexní úlohy v oblasti proudění podzemní vody. [17] V oblasti řešení proudění podzemních vod se užívá metoda konečných diferencí, nebo metoda konečných prvků (Valentová 2018). Tyto metody umožňují na počítačích simulovat proudění podzemní vody v definované oblasti. Numerické metody řeší specializované softwary. Numerické metody umožňují komplexní řešení s velkým množstvím vstupních údajů. Lze počítat s neustáleným prouděním a lze použít různé druhy okrajových podmínek. Modely jsou vhodné pro popis reálného stavu v řešené oblasti. Ze vstupních dat zjišťujeme hodnoty hydraulických gradientů, velikost a směr proudění podzemní vody. Pomocí numerických metod lze aplikovat i inverzní úlohu, kdy dochází ke zpětnému zjišťování těžko určitelných parametrů, jako je transmisivita, storativita, nebo hodnoty hydraulické vodivosti.

### 5.1 Rovnice proudění podzemní vody

V této kapitole jsou uvedeny řídicí rovnice proudění podzemní vody. Hydraulika podzemní vody se odvíjí od Darcyho pokusu z roku 1856.

**Darcyho zákon** [24] Darcy experimenty zjistil, že průtok vody válcem, který je naplněn pískem je přímo úměrný rozdílu hydrostatických tlaků na počátku a na konci válce. Průtok vody je nepřímo úměrný délce válce, přímo úměrný ploše průřezu válce a závislý na hodnotě koeficientu hydraulické vodivosti. Tato úvaha je uvedena v rovnici (1). Tento koeficient je různý v závislosti na materiálu. Hodnota hydraulické vodivosti nabývá největších hodnot u štěrků, naopak nejnižší hodnoty hydraulické vodivosti mají jíly.

$$Q = KS(H_1 - H_2)/L \quad (1)$$

$Q$  – proteklé množství vody za jednotku času [ $m^3/s$ ]

$K$  – hydraulická vodivost [ $m/s$ ]

$(H_1 - H_2)$  – rozdíl hydraulických výšek na koncích válce Darcyho experimentu

$L$  – délka vzorku [ $m$ ]

V rovnici (2) je uvedeno zobecnění Darcyho zákona. Vektor rychlosti se v tomto případě nazývá Darcyho rychlost. Jedná se o hustotu toku, tedy objem vody, který protekl válcem naplněným materiálem (Darcyho pokus probíhal s pískem) za jednotku času. Zobecnění Darcyho zákona pro jednorozměrné proudění v homogenním prostředí je popsáno v následující rovnici:

$$v = -K \frac{dH}{dl} \quad (2)$$

$v$  – vektor rychlosti [m/s]

$K$  – hydraulická vodivost [m/s]

$\frac{dH}{dl}$  – hydraulický gradient

Předchozí rovnice byly uvedeny pro jednorozměrné proudění podzemní vody. Pro trojrozměrné proudění podzemní vody ve směrech os kartézského souřadnicového systému platí následující zobecnění Darcyho zákona.

$$v_x = -K \frac{\partial H}{\partial x}, \quad v_y = -K \frac{\partial H}{\partial y}, \quad v_z = -K \frac{\partial H}{\partial z} \quad (3)$$

$v_x, v_y, v_z$  – jednotlivé složky rychlosti ve směru souřadnicových os  $x, y, z$  [m/s]

$K$  – hydraulická vodivost [m/s]

$H$  – hydraulická výška [m]

$x, y, z$  – osy pravoúhlého kartézského souřadnicového systému [m]

**Rovnice kontinuity** [28] vyjadřuje zákon zachování hmoty. (Valentová 2018) Zákon zachování hmoty lze převést do problematiky hydrauliky podzemní vody. Následující tvar rovnice je uveden pro případ, kdy je kapalina stlačitelná. V případě konstantní hustoty dochází k zjednodušení rovnice kontinuity.

$$-\left(\frac{\partial}{\partial x} \rho v_x + \frac{\partial}{\partial y} \rho v_y + \frac{\partial}{\partial z} \rho v_z\right) = \rho S_0 \frac{\partial H}{\partial t} \quad (4)$$

$v_x, v_y, v_z$  – jednotlivé složky rychlosti ve směru souřadnicových os  $x, y, z$  [m/s]

$x, y, z$  – osy pravoúhlého kartézského souřadnicového systému [m]

$\rho$  – hustota kapaliny [kg/m<sup>3</sup>]

$S_0$  – specifická storativita [1/m]

$H$  – hydraulická výška [m]

$t$  – čas [s]

**Rovnice třírozměrného proudění podzemní vody** v tomto tvaru je použita v programu Groundwater Vistas, který byl používán v této závěrečné práci. (Harbaugh and McDonald 1988) [25,26] Rovnice (5) je kombinací zobecněného tvaru Darcyho zákona pro trojrozměrné proudění (3) a rovnice kontinuity (4). Tento tvar rovnice je platný pouze v případě předpokladu nestlačitelné kapaliny.

$$\frac{\partial}{\partial x} \left( K_{xx} \frac{\partial H}{\partial x} \right) + \frac{\partial}{\partial y} \left( K_{yy} \frac{\partial H}{\partial y} \right) + \frac{\partial}{\partial z} \left( K_{zz} \frac{\partial H}{\partial z} \right) - W = S_0 \frac{\partial H}{\partial t} \quad (5)$$

$x, y, z$  – osy pravoúhlého kartézského souřadnicového systému [m]

$K_{xx}, K_{yy}, K_{zz}$  – hodnoty hydraulické vodivosti podél souřadných os  $x, y, z$ , které se považují za rovnoběžné s hlavními osami hydraulické vodivosti

$S_0$  – specifická storativita [1/m]

$H$  – hydraulická výška [m]

$t$  – čas [s]

$W$  – objemový tok na jednotku objemu představující zdroje a propady vody

## 5.2 Počáteční a okrajové podmínky modelu

### 5.2.1 Počáteční podmínky

Počáteční podmínky charakterizují stav proudění v celé řešené oblasti v počátečním čase sledovaného procesu,  $t = 0$ . (Valentová 2018) [17] Matematické vyjádření počáteční podmínky:

$$H = f(x, y, z, 0) \quad (6)$$

$f$  – známá funkce

$(x, y, z)$  – libovolný bod se známými souřadnicemi v čase  $t = 0$

Počáteční podmínka je využívána u transientního modelu. Jedná se o počáteční stav, (v případě této práce se jedná o výstup stacionárního modelu S1), z kterého se odvíjí transientní simulace.

### 5.2.2 Okrajové podmínky

Pomocí okrajových podmínek je popisován vztah řešené oblasti a prostředí na okrajích modelu. V úlohách, zabývajících se prouděním podzemních vod, se používají tyto okrajové podmínky: Dirichletova (hranice s předepsanou hodnotou hydraulické výšky), Neumannova (hranice s předepsaným tokem) a Newtonova (Cauchyho) (polopropustná hranice).

**Dirichletova** okrajová podmínka prvního typu. Tato podmínka řeší případ, kdy je po celou dobu trvání modelu znám průběh tlakových výšek v libovolných bodech. V této diplomové práci Dirichletova okrajová podmínka nebyla použita. V případě užití této podmínky by byla v programu GWVistas vložena funkce „constant head“.

$$H = f_1(x, y, z) \quad \text{nebo} \quad H = f_2(x, y, z, t) \text{ na ploše } S \quad (7)$$

$H$  – hodnota hydraulické výšky

$f_1, f_2$  – známé funkce

První uvedená rovnice je rovnice užívaná pro stacionární model, druhá uvedená rovnice se užívá pro model transientní.

**Neumannova** okrajová podmínka druhého typu. Tato podmínka je definovaná pro případ, kdy je známé přetékající množství vody kolmo na hranici. V diplomové práci byla tato podmínka užitá v případě infiltrace. Infiltrace byla v práci definována pomocí podmínky „recharge“. Speciální případ této okrajové podmínky je nulový tok. Jedná se o případ, kdy rychlost  $v_n$  je rovna nule.

$$v_n = f(x, y, z, t) \text{ na ploše } S \quad (8)$$

$v_n$  – složka rychlosti kolmá na hranici

$f(x, y, z, t)$  = známá funkce

**Newtonova (Cauchyho)** okrajová podmínka třetího typu, polopropustná hranice. Podmínka se vyskytuje v oblastech kontaktu otevřeného vodního zdroje s oblastí proudění podzemních vod, kde dochází k vzájemnému ovlivňování vodních útvarů. Prostředí jsou od sebe odděleny tenkou polopropustnou vrstvou s výrazně nižší hodnotou hydraulické vodivosti. V reálné praxi se jedná např. o řeku se zakolmatovaným dnem. Podrobněji je tato podmínka řešena v kapitole 6.3.1. Do modelu je okrajová podmínka třetího typu vkládána pomocí funkce „river“.

$$v_n = \frac{(H_1 - H)}{c} \text{ kde } c = \frac{B}{K} \quad (9)$$

$c$  – odpor vrstvy

$K$  – hydraulická vodivost

$B$  – mocnost polopropustné vrstvy



$v_n$  – složka rychlosti kolmá na hranici

$H$  – hodnota hydraulické výšky

Uvedená Newtonova (Cauchyho) okrajová podmínka byla v programu MODFLOW definována podle následující rovnice. Odpor vrstvy uvedený v rovnici 9 byl definován jako parametr konduktance, který je podrobně popsán v kapitole 6.3.1 a vstupuje do rovnice 10 v upraveném tvaru:

$$Q = \frac{KLW}{M} (H - h_{i,j,k}) \quad (10)$$

$Q$  – velikost toku mezi zvodní a řekou

$K$  – hydraulická vodivost dna řeky

$L$  – délka buňky

$W$  – šířka řeky v buňce

$M$  – mocnost zakolmatovaného dna

$H$  – hydraulická výška v řece

$h_{i,j,k}$  – hydraulická výška ve spodním okraji dna řeky

### 5.3 Groundwater Vistas

Groundwater Vistas (Harbaugh, McDonald 1996) je programový balík, který komerčně poskytuje grafické rozhraní pro výpočet proudění podzemní vody a transportu rozpuštěných látek. [26]

### 5.4 Modflow

Program modflow byl použit v mé závěrečné práci pro výpočet proudění podzemní vody. *Modul Modflow řeší nestacionární třírozměrné proudění vody o konstantní hustotě v nehomogenním a neizotropním prostředí (Valentová 2018)*. Podrobně je matematicky popsán rovnicí číslo 5. Při výpočtech modul provádí velké množství výpočtů, které počítají změnu vody mezi jednotlivými buňkami. Změny zásob vody v buňce se musí rovnat. Při výpočtech je využívána metoda objemů, jedná se o přechod mezi metodou konečných diferencí a konečných prvků. Původně byl program v roce 1988 zveřejněn vědeckou agenturou U. S. Geological Survey ve vědeckém článku A modular tree-dimensional finite-difference grand-water flow model od autorů Harbaugh, A. W., McDonald, M. G. V následujících letech probíhal vývoj programu ve směru zjednodušení uživatelského prostředí a rozvoje funkcí v programu. První dvě verze byly určeny pouze pro výpočet trojrozměrného proudění podzemní vody v saturované zóně. Ve verzích zveřejňovaných po roce 1996 program zahrnuje i množství modulů, které jsou vhodné např. pro výpočet transportních procesů.

### 5.5 Modpath

Program Modpath byl použit v mé závěrečné práci pro určování směru proudění částic vody. Program modpath vypočítává pravděpodobnost, pomocí metody monte carlo, že částice bude zachycena jasně definovanou buňkou (buňky jsou prostorově definovány). Výstup z programu modpath je vykreslen v příloze 2. V této příloze byly definovány počáteční body částic a následně byl vypočten a vykreslen směr pravděpodobného proudění podzemní vody v dané oblasti.

## 6 Hydraulický model

### 6.1 Koncepce řešení

Model proudění podzemní vody byl vyhotoven pro dva stavy. [19,31]

Stacionární model proudění podzemní vody řeší proudění podzemní vody nezávislé na čase. Stacionární, jinak řečeno ustálené proudění podzemní vody je nejjednodušší příklad proudění, kde dochází ke konstantnímu průtoku v jednotlivých buňkách. Výsledky modelu jsou v čase konstantní. Stacionární model byl použit pro řešení současného stavu zkoumané oblasti. Dále byl stacionární model použit pro zjištění ovlivnění HPV po výstavbě PTS dle návrhu definovaného ve studii proveditelnosti a pro případ kdy, PTS zasahuje do báze kolektoru. V rámci modelování současného stavu proudění podzemní vody proběhla kalibrace modelu na základě vstupních údajů a okrajových podmínek vstupujících do modelu.

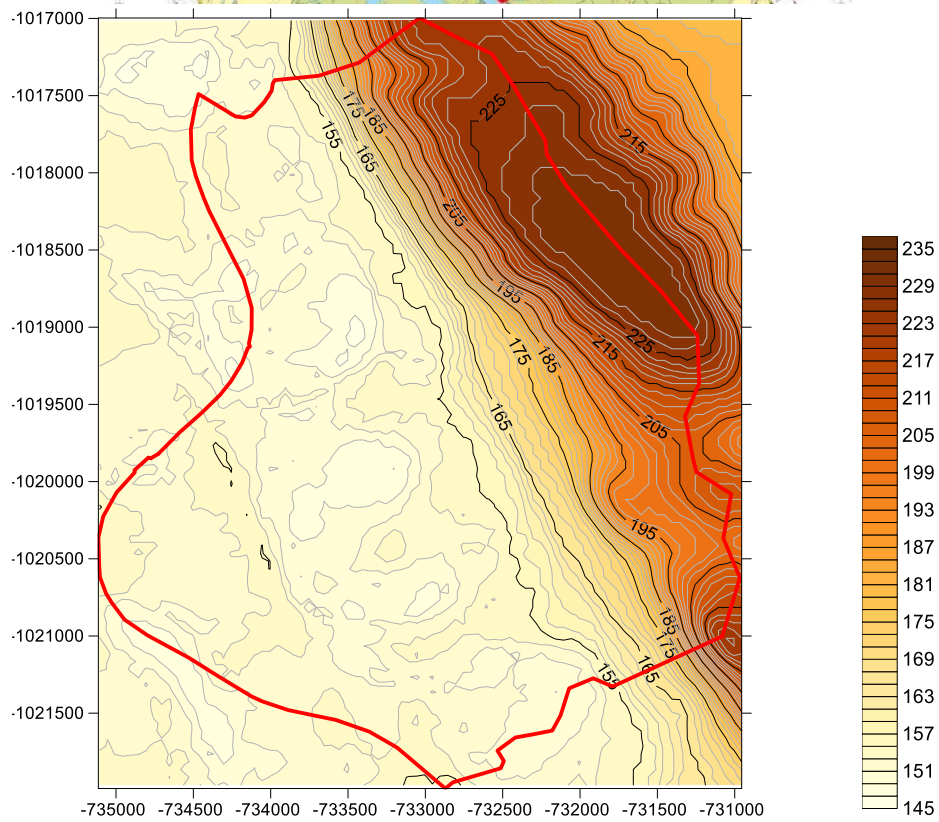
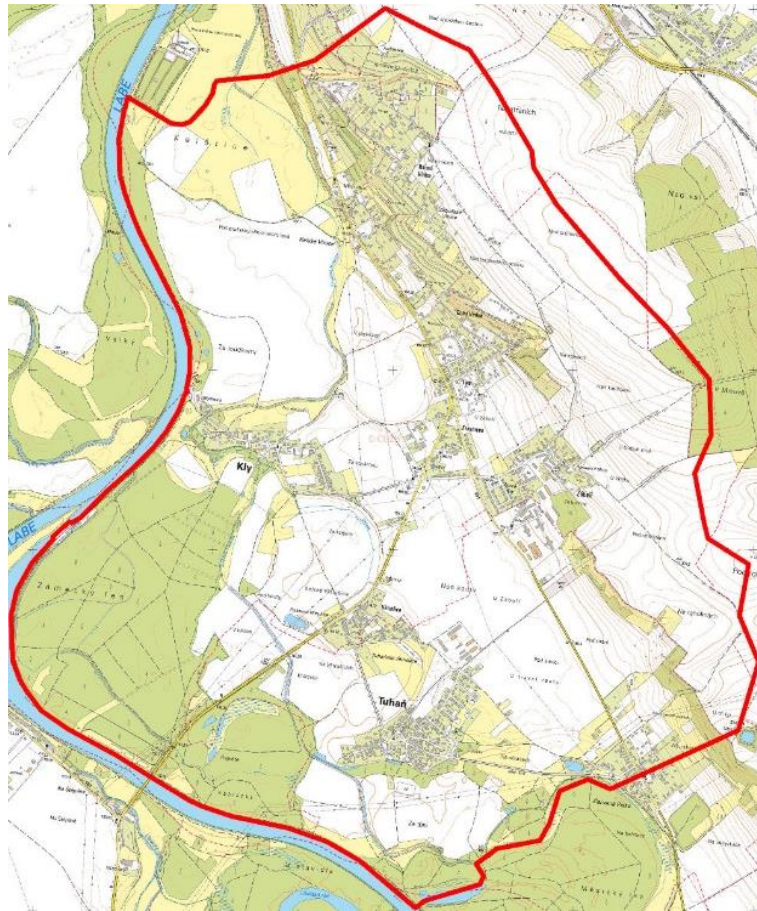
Nestacionární model proudění podzemní vody je model, ve kterém dochází ke změně hladiny v závislosti na čase podle modelové povodně z roku 2013. Data povodňové vlny byla poskytnuta ČHMÚ pro měrný profil Kostelec nad Labem (nejbližší měrný profil proti směru

proudění řeky). Tato data tvoří okrajovou podmínku modelu, která se v čase mění. Pro počáteční stav byly zvoleny výsledky ze stacionární simulace S1. Okrajová podmínka, která se mění, byla v modelu zadána jako „river“. Jedná se o Cauchyho okrajovou podmínku polopropustné hranice, viz kapitola 6.3.1. Transientní model byl nastaven na dobu trvání 33 dní. Tato délka byla zvolena podle vývoje povodňové situace (obrázek 23 a 24).

## 6.2 Geometrie modelu

Horizontální rozsah modelového území je z východu ohraničen hřebenem Turbovického vrchu. Z jihu je území tvořeno slepým ramenem řeky a západním okrajem modelu je koryto řeky Labe. Severní okraj modelu je ohraničen Tuhaňskou svodnicí. Model je tvořen obdélníkem o rozměrech 5000 x 4200 m (obr. 19). Souřadnicová síť je nepravidelná, pravouhlá a základní velikost buňky je 50 m. V oblasti plánovaného PPO je čtvercová síť zhuštěna a strany jednotlivých buněk jsou dlouhé 7,5 m. Velikost řešeného území je 12 952 101 m<sup>2</sup>. V území, které se nachází za okrajem modelu, je použita okrajová podmínka nulového toku. V oblasti za okrajem modelu jsou umístěny neaktivní buňky. Ve vertikálním směru je model tvořen jednou vrstvou, která aproximuje vrstvu kvartérního pokryvu. Svrchní vrstvou modelu je terén. Pro model byl povrch převzat z DMR 5g. Báze modelu je tvořena stropem nepropustných křídových sedimentů (slínovci a jílovci). Tato vrstva byla vyinterpolována z dat, získaných z České geologické služby. Z dat byla následně v programu Arc Pro provedena interpolace mezi jednotlivými vrty. Takto získané dno kvartérního pokryvu bylo naimportováno do programu GWVistas jako vrstva „bottom elevation“.

Pro model byly použity historické vrty v dané oblasti. [3] Síť stávajících vrtů není příliš hustá, proto může modelovaná báze nabývat odlišných nadmořských výšek než skutečnost, a to především v případě lokálních depresí, či hřbetů. Kvartérní pokryv nabývá výrazných mocností (v modelu 5 - 14 m) v oblasti údolní nivy Labe (obr. 19). V oblasti Turbovického hřbetu mocnost kvartérního pokryvu klesá.



Obrázek 19 – Území, řešené v modelu a mocnost kvartérního pokryvu. Souřadnice uváděny v souřadnicovém systému S-JTSK.

## 6.3 Okrajové podmínky modelu

Okrajové podmínky modelu definují způsob, jakým voda do kolektoru řešené oblasti vstupuje, či vystupuje. [17] V modelu byly použity Neumannova a Cauchyho okrajové podmínky viz kapitola 5.3.

### 6.3.1 Polopropustná hranice

Jedná se o Cauchyho okrajovou podmínku, kdy dochází k dotaci podzemní vody skrz polopropustnou vrstvu. Polopropustná hranice se vyskytuje v místech styku otevřené vodní plochy a kolektoru, ve kterém dochází k proudění podzemní vody, a přitom jsou tato dvě prostředí od sebe oddělena polopropustnou bariérou. Tato bariéra klade, díky nízké hodnotě hydraulické vodivosti, odpor při proudění.

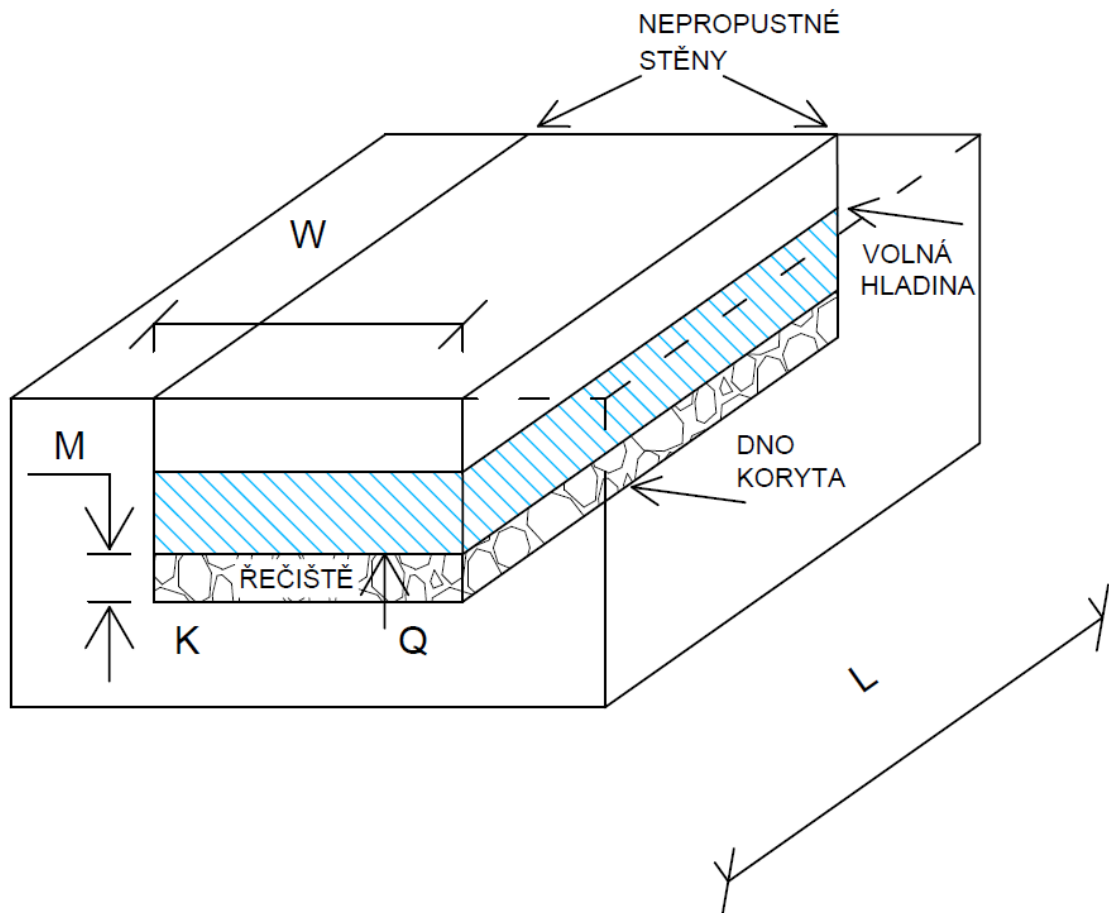
Polopropustná hranice byla v programu GWVistas zadána v sekci „boundary conditions“ jako okrajová podmínka „river“. Podmínka river byla v modelu definována po celé západní hranici modelu v ose řeky Labe a simuluje přetok vody z koryta řeky do kvartérního kolektoru a naopak. V rámci definování podmínky river byly do modelu vkládány informace o výšce hladiny Labe, o nadmořské výšce dna, délky buněk, hydraulické vodivosti zakolmatovaného dna, šířky koryta v buňce a hloubce dna. Z těchto informací byla v rámci modelu vypočtena konduktance.

Nadmořská výška hladiny Labe byla získána z kombinace měřených dat hladiny, kontrolovaných hodnotami, uvedenými ve Vodohospodářské mapě a údajů z DMR 5g. Nadmořská výška hladiny se v modelu pohybuje v rozmezí 158,50 m n. m. a 154,80 m n. m. V jižní a jihozápadní části modelu je sklon hladiny velmi mírný, a to z důvodu vzduť hladiny, které je způsobeno zdymadlem Obříství. V podjezí je hladina Labe v modelu zadána kótou 156,9 m n. m. Následně dochází k lineárnímu poklesu na kótu 154,80 m n. m.

Okrajová podmínka polopropustné hranice byla použita pro stacionární a transientní model.

Konduktance (vodivost) ve stacionárním modelu charakterizuje odpor polopropustné vrstvy při průtoku podzemní vody mezi volnou hladinou řeky a kvartérním kolektorem (obr. 20). V případě transientního modelu je parametr konduktance použit pro vyjádření odporu povodňových hlín při povodňové situaci. [18] V modelu se zadávají v praxi jednodušeji zjiřitelné parametry, ze kterých se výsledná konduktance dopočte viz kapitola 6.3.1.





Obrázek 20 – Konduktance schéma. Upraveno z Waterloo hydrogeologic. [18] [2019]

Výpočet konduktance:

$$C = \frac{K \cdot L \cdot W}{M}$$

C – konduktance [m<sup>2</sup>/s]

K – hydraulická vodivost [m/s]

L – délka buňky [m]

W – šířka řeky v buňce [m]

M – mocnost zakolmatovaného dna [m]

Hydraulická vodivost K zakolmatovaného dna řeky nabývala při výpočtech hodnoty  $5 \cdot 10^{-4}$  m/s. Parametry L a W, tedy šířka a délka, vycházely z rozměrů výpočetních buněk (velikost buněk se v různých částech modelu mění). Mocnost zakolmatovaného dna byla zvolena 1 m. Tento parametr je do značné míry nejistý.

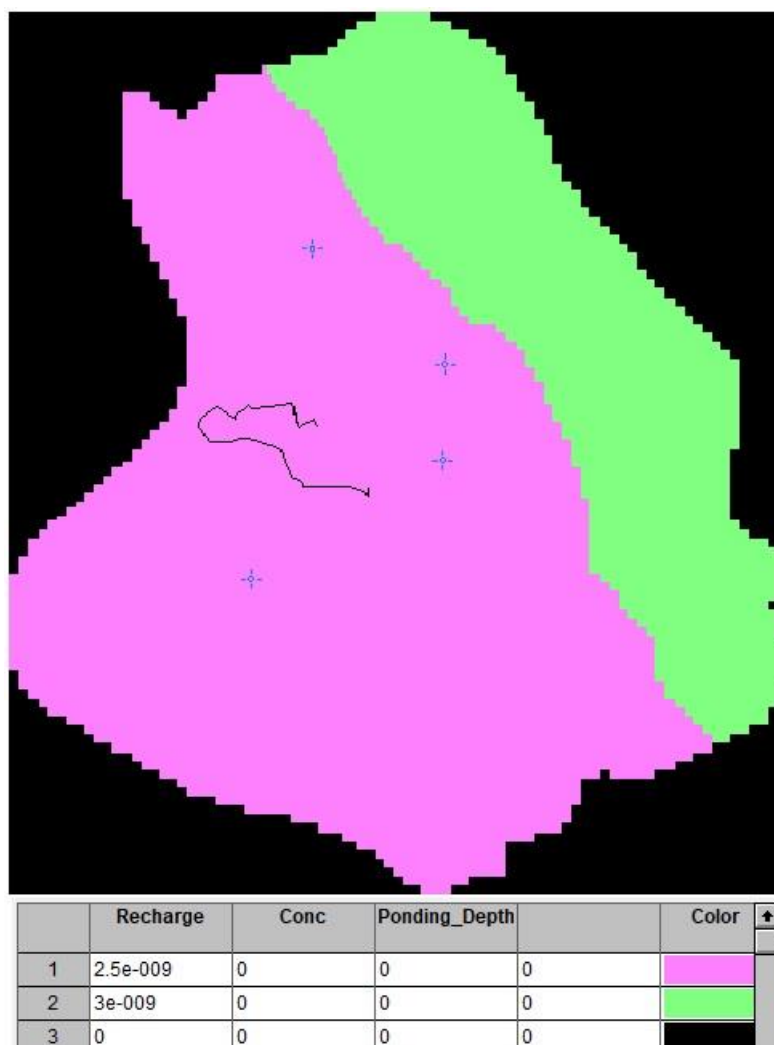
### 6.3.2 Efektivní infiltrace a přítok podzemní vody

Jedná se o Neumannovu okrajovou podmínku. Tento typ okrajové podmínky je použit pro zadání efektivní srážkové infiltrace (plošné infiltrace) do kvartérního kolektoru a přetoku

z Jizerského souvrství. Efektivní (plošná) infiltrace byla v programu GWVistas zadána v sekci „boundary conditions“ jako okrajová podmínka „recharge“.

Přítok podzemní vody byl odhadnut na základě Mapy podzemního odtoku ČSSR viz obrázek 13. [16] Vzhledem k tomu, že v oblasti nejsou k dispozici potřebné údaje vycházející z terénního měření, je obtížné odhadnout množství vody, které do kolektoru přitéká od východu (směr proudění v dané oblasti má severozápadní směr, tak jak uvádí hydrogeologické mapy kapitola 2.6). Přetok ze sousedního kolektoru, byl nahrazen navýšením plošné infiltrace na východním okraji modelu viz obrázek 25. Území, které je řešené v této práci (obr. 16) spadá do oblasti dlouhodobého odtoku podzemní vody 2-3 l.s<sup>-1</sup>.km<sup>-2</sup>.

Na obrázku 22 je patrné rozdělení zón s různou hodnotou přítoku. Černou oblast modelu tvoří buňky s nulovým tokem, v zelené oblasti byla definována podmínka 3 l.s<sup>-1</sup>.km<sup>-2</sup> a v růžové oblasti byla podmínka definována 2,5 l.s<sup>-1</sup>.km<sup>-2</sup>. Zelená oblast má plochu o velikosti 3,8 km<sup>2</sup> a růžová oblast má plochu o velikosti 9,1 km<sup>2</sup>.



Obrázek 21 – Rozdělení řešené oblasti podle hodnot recharge. Na obrázku je viditelná linie PPO a polohy kalibračních vrtů. Jednotky jsou uváděny v m<sup>3</sup>/den. [2019]

### 6.3.3 Nulový tok

Jedná se o speciální případ Neumannovy okrajové podmínky, kdy se předpokládá nepropustná hranice. Tato podmínka je programem volena automaticky na všech okrajích modelu, kde není definovaná jiná okrajová podmínka.

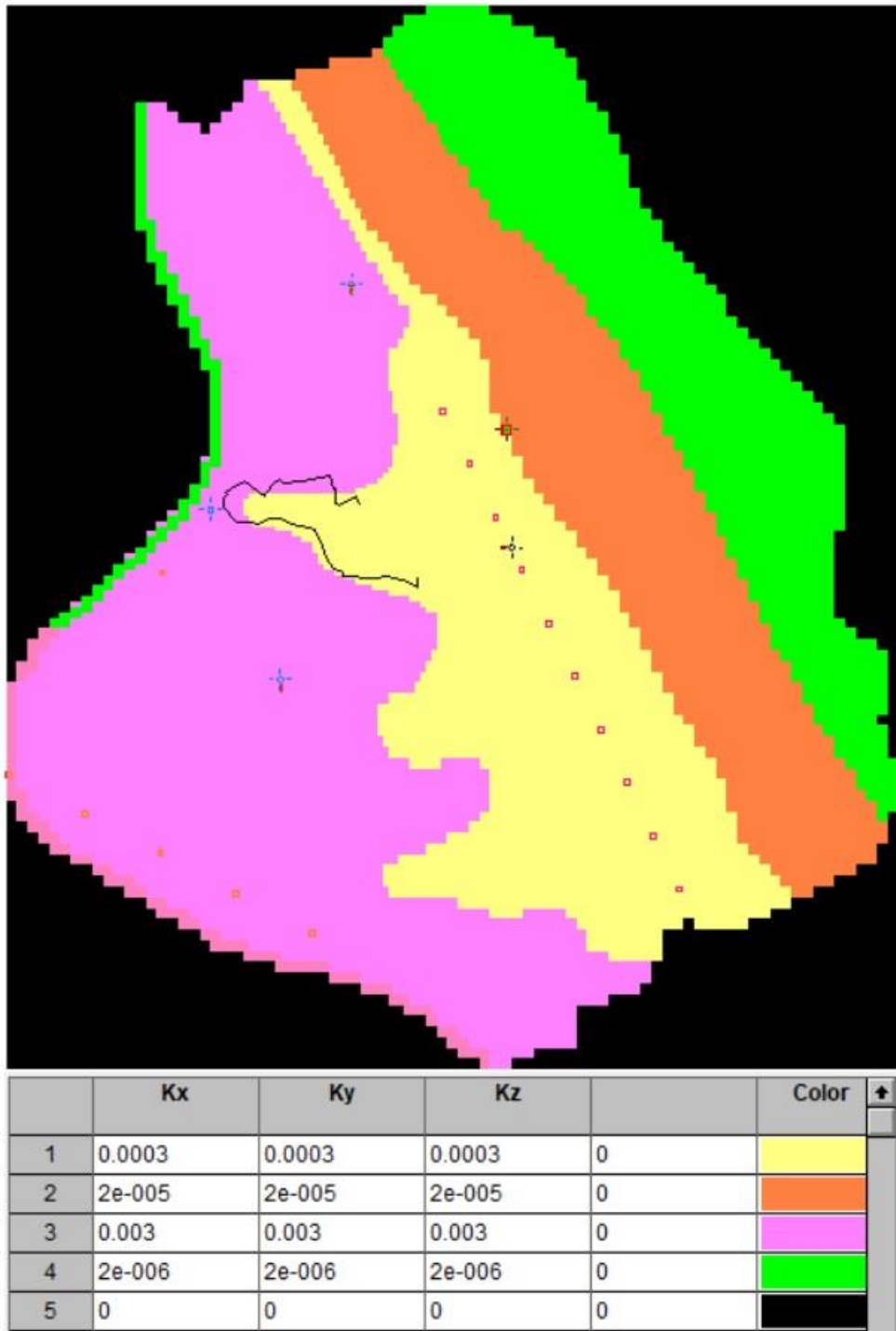
## 6.4 Hydraulické parametry modelu

Hydraulické parametry ovlivňují režim proudění podzemních vod. Mezi hydraulické parametry se řadí hydraulická vodivost a storativita.

Hydraulická vodivost  $K$ , nebo také filtrační koeficient, je definován jako: *hustota toku při jednotkovém hydraulickém gradientu*. (Valentová 2018) Hydraulická vodivost je závislá na vlastnostech kapaliny a prostředí. Jednotkou je hydraulické vodivosti je vzdálenost za čas.

Řešená oblast je dle informací zjištěných v kapitole 2.5 tvořena převážně písky a štěrkopísky. Mocnost kvartérního kolektoru se pohybuje v rozmezí 5,5 až 14 m. Místy se na povrchu vyskytuje vrstva povodňových hlín. Tato vrstva nepřesahuje mocnost 1,5 m. Vrstva povodňových hlín byla v modelu zanedbána, a to především z důvodu nepravidelného výskytu a pro zjednodušení modelu. Toto zjednodušení bylo možné provést díky štěrčkům a štěrkopískům, které se vyskytují pod povodňovými hlínami. Hydraulická vodivost štěrků a štěrkopísků je  $1 \cdot 10^{-3} - 1 \cdot 10^{-5}$  m/s. Hydraulická vodivost povodňových hlín je cca  $1 \cdot 10^{-6}$ . Rozdělení hydraulické vodivosti je graficky uvedeno na obrázku 22. Rozdělení hydraulické vodivosti na území vychází z geologických map. Po kalibraci modelu došlo k malým úpravám hodnot hydraulické vodivosti a území tak, aby se hodnoty modelované hladiny podzemní vody co nejvíce přiblížili měřeným hodnotám (obr. 22).

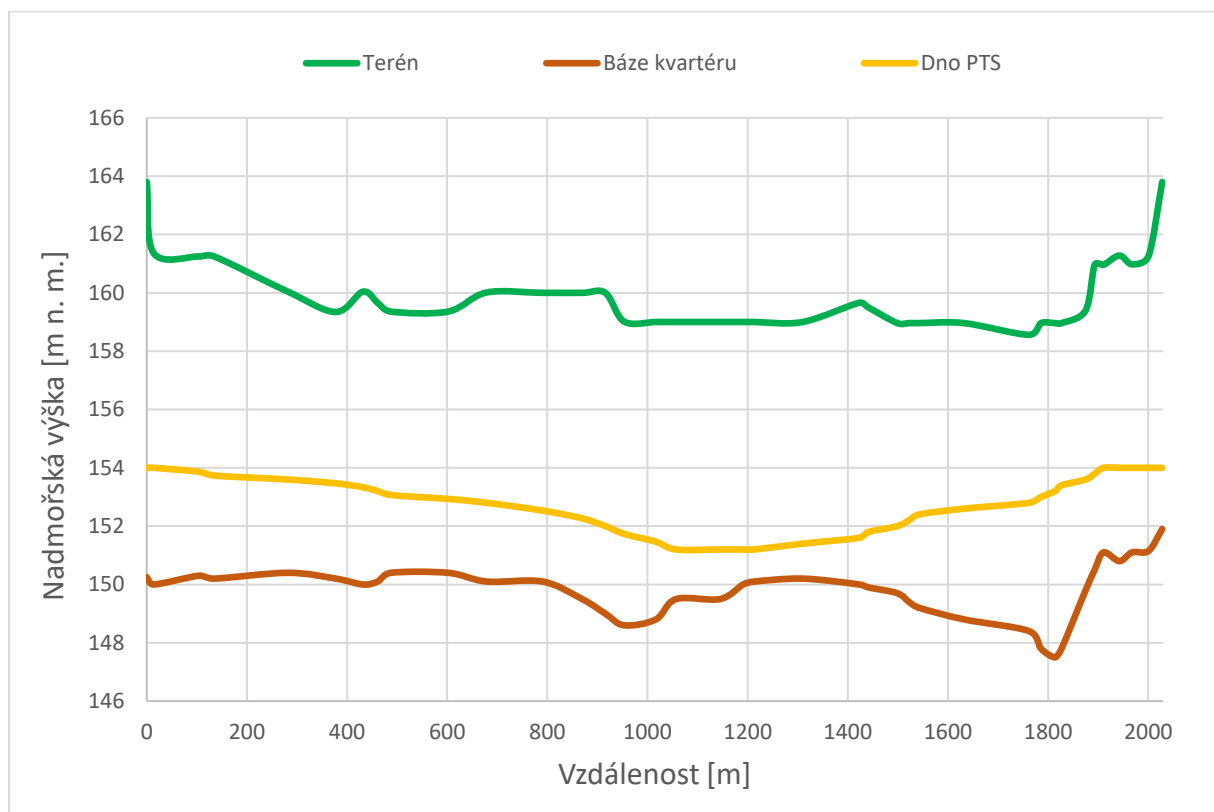
*„Specifická storativita porézního prostředí je parametr, vystihující schopnost nasyceného porézního prostředí uchovat v sobě určité množství vody.“* (Valentová 2018) Specifická storativita popisuje efektivní pórovitost daného prostředí. Efektivní pórovitost uvažuje zastoupení pórů, kterými může proudit voda gravitační silou. [22] Storativita se také nazývá zásobnost. Její jednotkou je  $m^{-1}$ .



Obrázek 22 – Rozdělení řešené oblasti podle hodnot hydraulické vodivosti. Na obrázku je viditelná linie PPO a polohy kalibračních vrtů. [2019]

## 6.5 Podzemní těsnící stěna

Linie podzemní těsnící stěny byly převzaty ze Studie protipovodňových opatření na ochranu obce Kly. Je potřeba poznamenat, že hloubka uložení PTS je orientační a v dalších stupních projektové dokumentace bude upřesněna. Na obrázku 25 je žlutou linií zobrazen podélný profil linie podzemní těsnící stěny. Dále je na, obrázku linie terénu, který byl získán z digitálního modelu reliéfu 5. generace a báze kvartérního pokryvu. Báze kvartérního pokryvu se může od reálného stavu významně lišit. Báze kvartérního pokryvu použitá v modelu byla vytvořena interpolací z vrtů poskytovaných Českou geologickou službou viz kapitola 2.5. V prostoru mezi bází PTS a kvartérních sedimentů může během povodně docházet k přítoku podzemní vody do chráněného území. Z obrázku 23 je vidět, že prostor pro průtok podzemní vody je poměrně omezený – cca 1,0 m.



Obrázek 23 – Podélný profil v linii podzemní těsnící stěny. Podélný profil je vedený od jihovýchodního okraje (bod č.1) směrem k severovýchodnímu okraji modelu (bod č. 23) dle obrázku 30.

## 6.6 Průběh povodňové vlny

Pro transientní model byla vkládána do modelu data návrhové povodně. Data použitá pro model byla poskytnuta ČHMÚ v červenci 2019. Jedná se data povodně, která proběhla v roce 2013 a podrobně je popsána v kapitole 2.4.3. Měřená data povodně z měrného profilu Kostelec nad Labem byla použita pro průběh povodňové vlny (tab. 7). Na měrném profilu Kostelec nad Labem byl 4.6.2013 zaznamenán maximální průtok  $744 \text{ m}^3 \cdot \text{s}^{-1}$ . Samotný průběh povodňové vlny je graficky znázorněn na obrázcích 25 a 26. Měrný profil Kostelec nad Labem se nachází přibližně 15 km proti proudu. Profil je nejbližším kontinuálně měřeným profilem



proti proudu řeky. Labe proti proudu nemá zásadní přítok, který by silně ovlivnil měřená data. Průběh povodňové vlny je sepsán v tabulce 7.

Délka trvání transientního modelu je 33 dní v závislosti na skutečném průběhu povodňové vlny v roce 2013. 33 dní je rozděleno do 66 period a každá perioda je dlouhá 12 hodin. Posledních 22 period bylo přidáno z důvodu sledování pohybu hladiny podzemní vody po skončení povodně. K vylití z koryta řeky dochází postupně, až ve chvíli, kdy voda vystoupá nad úroveň terénu.

Cílem simulace je zjistit, zda podzemní voda dosáhne úrovně terénu v chráněné oblasti a potenciálně způsobí materiální škody.

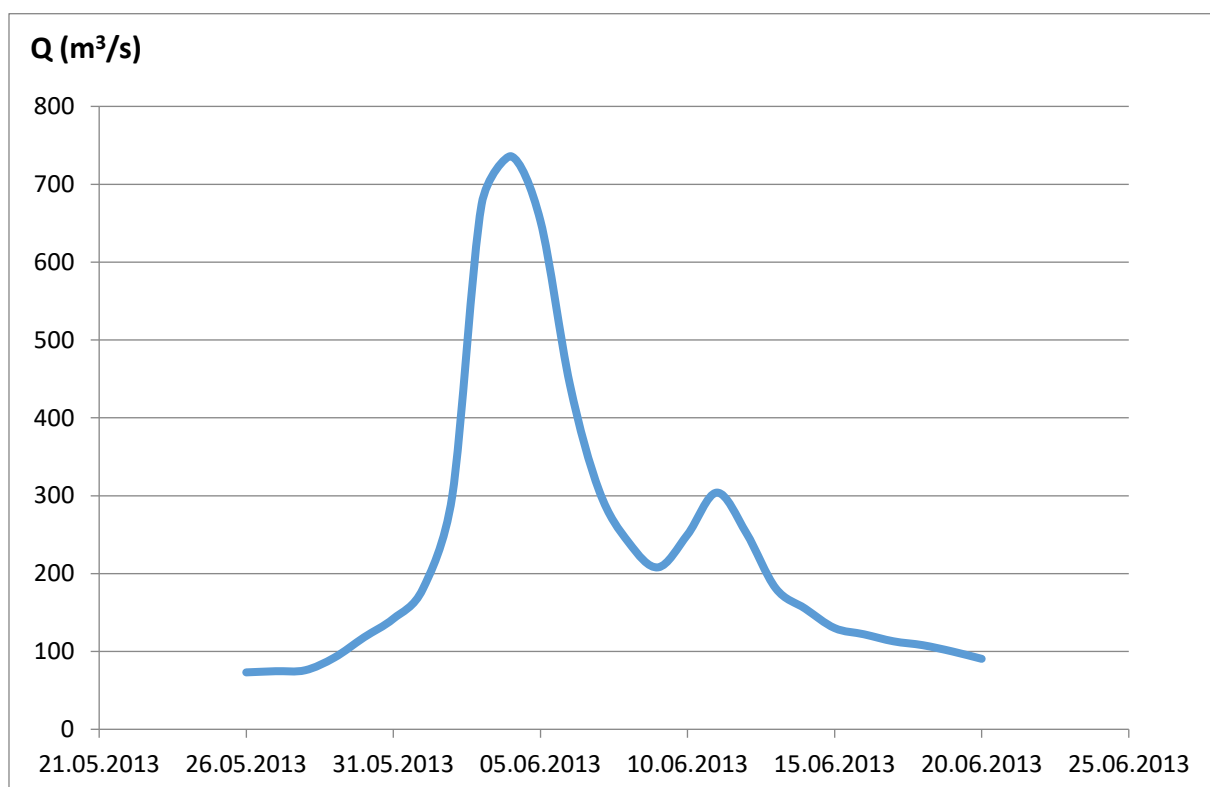
Průběh povodňové vlny byl do modelu zadáván jako okrajová podmínka třetího typu (Cauchyho okrajová podmínka), v modelu jako podmínka „river“. Pro každou jednotlivou buňku, ve které byla definována okrajová podmínka „river“, musely být vloženy údaje pro výpočet. Tyto údaje zahrnovaly: jednotlivou periodu a výšku hladiny v dané periodě. Tento postup byl vyhotoven pro buňky s okrajovou podmínkou pro 66 period.

V dalším kroku došlo k vložení okrajové podmínky „river“ k navrhované linii PPO. V rámci transientního modelu bylo uvažováno, že jez nehraje v modelu roli. Tedy, hladina při povodni je v stejné v nadjezí i v oblasti pod jezem.

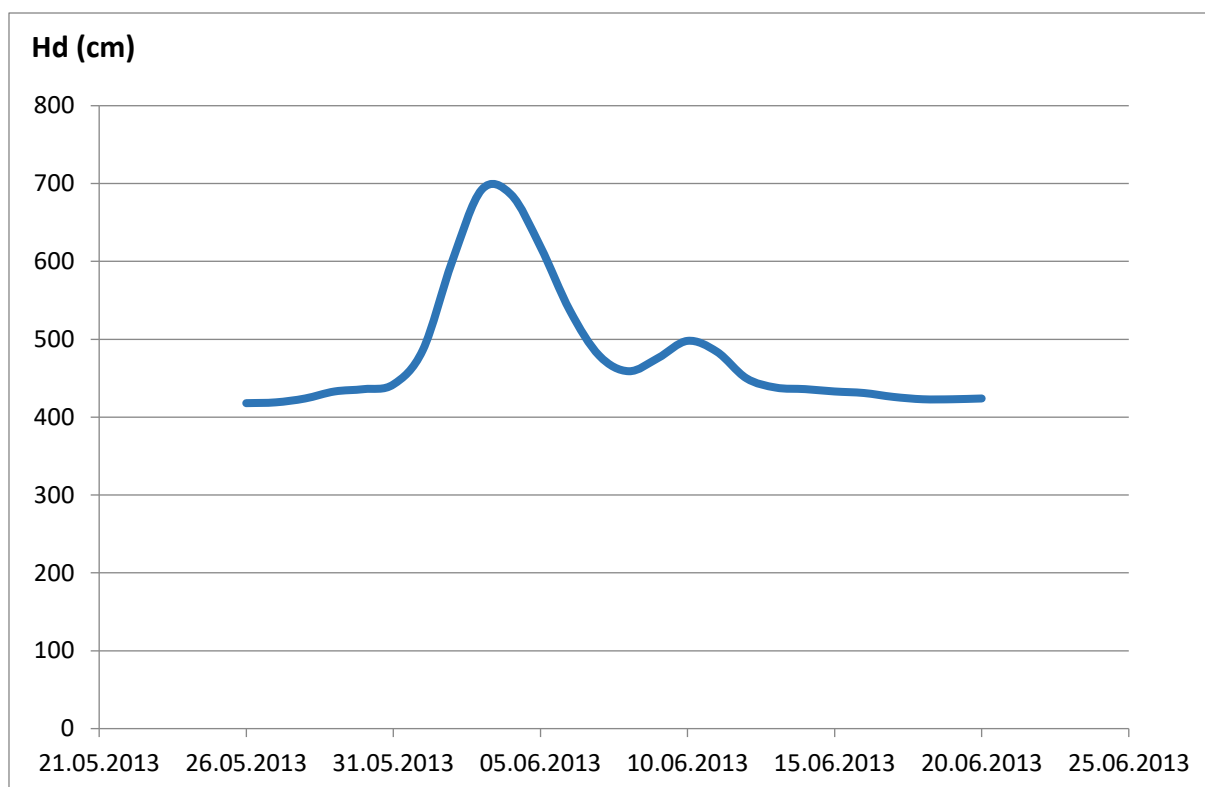
*Tabulka 7 – Průběh povodňové vlny zadávaný do transientního modelu jako okrajová podmínka „river“. Tabulka je graficky znázorněná obrázky 9 a 10.*

čas (s)	čas (dny)	výška (m n.m.)	čas (s)	čas (dny)	výška (m n.m.)
43200	0,5	156.45	1468800	17,0	157.08
86400	1,0	156.46	1512000	17,5	156.96
129600	1,5	156.46	1555200	18,0	156.87
172800	2,0	156.47	1598400	18,5	156.80
216000	2,5	156.49	1641600	19,0	156.76
259200	3,0	156.52	1684800	19,5	156.73
302400	3,5	156.55	1728000	20,0	156.70
345600	4,0	156.58	1771200	20,5	156.68
388800	4,5	156.59	1814400	21,0	156.66
432000	5,0	156.62	1857600	21,5	156.64
475200	5,5	156.64	1900800	22,0	156.62
518400	6,0	156.77	1944000	22,5	156.59
561600	6,5	156.93	1987200	23,0	156.57
604800	7,0	157.30	2030400	23,5	156.56
648000	7,5	157.75	2073600	24,0	156.55
691200	8,0	158.15	2116800	24,5	156.54
734400	8,5	158.53	2160000	25,0	156.53
777600	9,0	158.68	2203200	25,5	156.53
820800	9,5	158.73	2246400	26,0	156.53
864000	10,0	158.63	2289600	26,5	156.52
907200	10,5	158.44	2332800	27,0	156.52
950400	11,0	158.19	2376000	27,5	156.52

993600	11,5	157.89	2419200	28,0	156.52
1036800	12,0	157.64	2462400	28,5	156.52
1080000	12,5	157.41	2505600	29,0	156.52
1123200	13,0	157.27	2548800	29,5	156.51
1166400	13,5	157.15	2592000	30,0	156.51
1209600	14,0	157.14	2635200	30,5	156.51
1252800	14,5	157.15	2678400	31,0	156.51
1296000	15,0	157.20	2721600	31,5	156.51
1339200	15,5	157.26	2764800	32,0	156.51
1382400	16,0	157.23	2808000	32,5	156.51
1425600	16,5	157.19	2851200	33,0	156.51



Obrázek 24 – Průtoky při povodňové vlně v měrném profilu Kostelec nad Labem. Maximální průtok  $Q_{max}$  dosáhl hodnoty 744  $\text{m}^3/\text{s}$ . Data byla poskytnuta Českým hydrometeorologickým ústavem.



Obrázek 25 – Výšky hladiny při povodňové vlně v měrném profilu Kostelec nad Labem. Maximální výška hladiny dosáhla hodnoty 712 cm. Data byla poskytnuta ČHMÚ.

## 6.7 Vstupní údaje pro kalibraci modelu

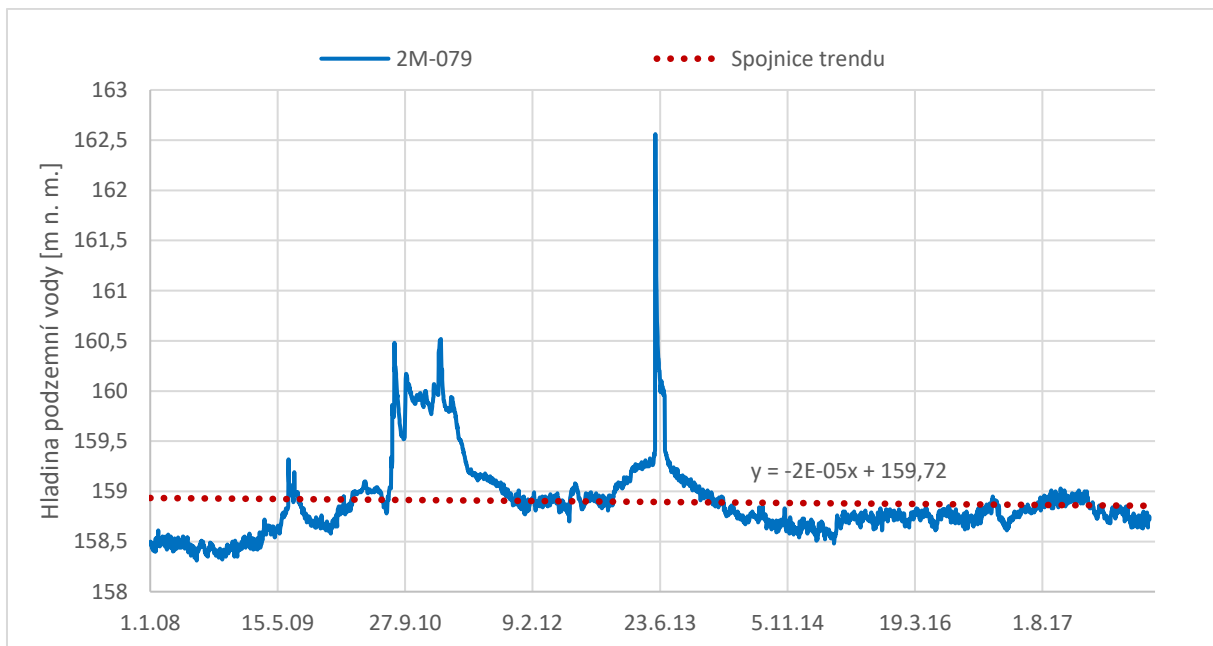
Ve chvíli, kdy je v modelu definována geometrie modelu, okrajové podmínky, hydraulické parametry a podzemní těsnící stěna, je možné přistoupit ve stacionárním modelu ke kalibraci. Cílem modelu je co nejvíce se přiblížit skutečnému stavu v řešené oblasti v kalibračních vrtech. V tomto modelu bylo určeno pět kalibračních vrtů: 2M-079, V-708, S-101, HV 1, W1 (Příloha 1). Pro určení přesnějších výsledků by bylo vhodné definovat více kalibračních vrtů.

Na vrtech 2M-079 a V-708 je prováděno kontinuální měření. Vrty monitoruje ČHMÚ a jednou za 24 hodin je změřena hladina podzemní vody v těchto vrtech. ČHMÚ ve vrtech monitoruje vývoj hladiny podzemní vody v České křídové tabuli. Do modelu vstupuje průměrná hladina podzemní vody za měřené období. Data byla poskytnuta pro období od roku 2008 do roku 2018 pro vrt 2M-079. Na vrtu V-708 byla poskytnuta data pro období od roku 2012 do 2018. Na obrázku 26 je vidět vývoj hladiny podzemní vody ve vrtu 2M-079. Vykreslení tohoto vrtu bylo zvoleno, protože se jedná o kontinuální měření z poslední doby. Z dlouhodobého hlediska, na základě lineární směrnice trendu, je možné konstatovat, že hladina podzemní vody klesá. Výkyv v červnu roku 2013 je způsoben povodní.

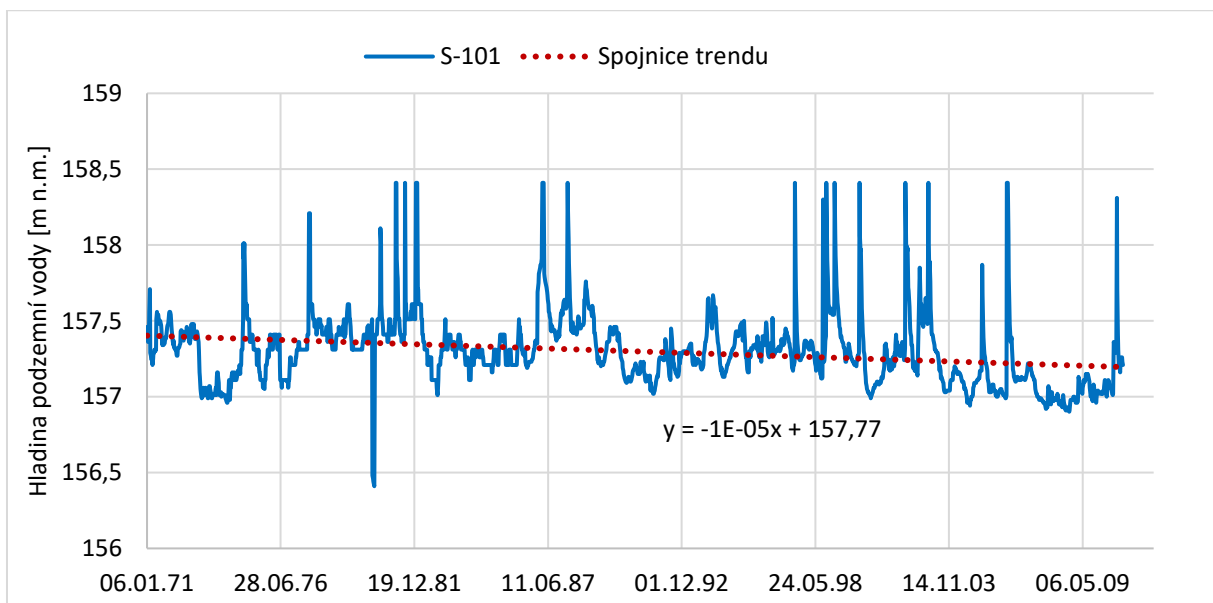
Vrt S-101 je vrt ČHMÚ, na kterém bylo prováděno kontinuální měření jednou za týden. Měření hladiny podzemní vody bylo ukončeno v roce 2010. Data, poskytnutá pro tuto závěrečnou práci, jsou pro období od roku 1971 do roku 2010 (obr. 27). Dlouhodobý vývoj hladiny podzemní vody je patrný z obrázku 27. Na obrázku je vykreslená lineární směrnice trendu, z které je patrný dlouhodobý pokles hladiny podzemní vody. Pro kalibraci byl použit průměr z celého sledovaného období.

Vrt W1 je geologický vrt, který byl použit pro kalibraci modelu. Data k vrtu byla získána z geofondu České geologické služby. Pro kalibraci byla použita ustálená hladina podzemní vody v době pořízení vrtu. Vrt pochází z roku 1966.

Jedním ze vstupů do modelu bylo i měření hladiny podzemní vody na kalibračním vrtu HV 1. Podrobný popis měření na vrtu HV 1 je uveden v kapitole 4.5. Pro kalibraci byl použit průměr z měřeného období. Průměrné hodnoty hladiny podzemní vody použité pro kalibraci jsou uvedeny v tabulce 8.



Obrázek 26 – Vývoj hladiny podzemní vody v monitorovacím vrtu ČHMÚ s označením 2M-079 a směrnice trendu. [2019]



Obrázek 27 – Vývoj hladiny podzemní vody v monitorovacím vrtu ČHMÚ s označením S-101 a směrnice trendu. [2019]

## 6.8 Modelové simulace

Stacionární i transientní model byl vypracován v několika variantách. Stacionárním modelem byl posouzen vliv protipovodňových opatření (podzemní těsnící stěny) na hladinu podzemní vody v období mimo povodňové situace. Transientním modelem byl posouzen návrhový stav protipovodňové stěny v období povodňové situace.

### 6.8.1 Stacionární modelové simulace

#### 6.8.1.1 S1 - kalibrace

Varianta stacionárního modelu 1 řeší současné průměrné poměry proudění podzemní vody v bez vlivu PPO, PTS a návrhové povodně. Pomocí této varianty dochází ke kalibraci modelu. Hodnoty hydraulických parametrů byly zvoleny dle skutečného stavu popsaného v kapitole 6.4.

#### 6.8.1.2 S2

Varianta 2 řeší vliv dle studie navrhované PPO na hladinu podzemní vody. Tato varianta řeší, jak velké změně hladiny podzemní vody dojde v případě realizace protipovodňového opatření. Hlavním cílem varianty S2 je posoudit nebezpečí zvýšení hladiny podzemní vody vlivem realizace PTS. V řešené oblasti jsou domy podsklepeny a nárůst hladiny podzemní vody může způsobit zaplavování sklepů, případně podmáčení základů nemovitostí.

#### 6.8.1.3 S3

Varianta 3 řeší případ, kdy by podzemní těsnící stěna zasahovala až do báze kvartérního pokryvu. Cílem této varianty je zjistit, jak moc dojde k ovlivnění hladiny podzemní vody.

### 6.8.2 Transientní modelové simulace

#### 6.8.2.1 T1

Varianta T1 řeší proudění podzemní vody v období návrhové povodně a podle návrhu založení PPO dle studie proveditelnosti. Tato varianta vychází ze stacionární simulace S2. V rámci transientního modelu byla zvolena hodnota volné storativity 3 %. Druhý z parametrů, který ovlivňuje transientní model je hodnota hydraulické vodivosti, která nebyla měněna. Pomocí této simulace byl zjištěn průběh hladiny podzemní vody s působením PPO.

#### 6.8.2.2 T2

Varianta T1 řeší proudění podzemní vody v období návrhové povodně a podle návrhu založení PPO dle studie proveditelnosti. Ve variantě T2 se sníží hydraulická vodivost  $K$  na hodnotu  $3 \cdot 10^{-4}$  m/s oproti původní hodnotě  $3 \cdot 10^{-3}$  m/s v celé oblasti údolní nivy. Hodnota volné storativity je volena 3 %. Pomocí varianty T2 byl zjištěn průběh hladiny podzemní vody v oblasti navrhovaného PPO při změně hydraulické vodivosti.

#### 6.8.2.3 T3

Varianta T3 navazuje na variantu T1 a řeší proudění podzemní vody v období návrhové povodně, podle návrhu založení PPO dle studie proveditelnosti. Tato varianta předpokládá hodnotu hydraulické vodivosti podle skutečnosti  $3 \cdot 10^{-3}$  m/s. Hodnota storativity se v této variantě mění. Původní předpoklad storativity 3 % se zvýší na 10 % a 20 %. Cílem této simulace je zjistit vliv parametru storativity na průběh povodně.



## 7 Výsledky

### 7.1 Stacionární model

Pomocí stacionárního modelu byl posouzen vliv navrhovaných protipovodňových opatření na běžný průměrný stav proudění podzemních vod. V prvním kroku proběhla kalibrace matematického modelu proudění podzemní vody na variantě současného stavu. Cílem nakalibrovaného modelu je, aby se model co nejvíce přiblížil skutečnému stavu. V dalších variantách bylo cílem modelu posoudit návrh PPO dle Studie protipovodňových opatření na ochranu obce Kly.

#### 7.1.1 Kalibrace modelu

Kalibrace modelu byla vytvářena pro variantu S1, tedy pro variantu současného průměrného stavu. Z důvodu absence podrobného geologického průzkumu byl model kalibrován na pět vrtů v okolí plánovaného PPO. Data pro kalibraci jednotlivých vrtů byla získána samostatným měřením, nebo byla poskytnuta ČHMÚ a Českou geologickou službou. Báze kvartérního pokryvu použitá v modelu byla získána interpolací z dat České geologické služby.

V prvním kroku byly z geologických podkladů získány hydraulické vodivosti  $K$ . Řešená oblast byla rozdělena na čtyři části, podrobné rozdělení hydraulických vodivostí je uvedeno v obrázku 22. Hodnota  $K$  ve žluté vrstvě písčitých a hlinitopísčitých sedimentů na obrázku 22 byla převzata z hydrogeologického vrtu 2M-079, ve kterém byla hodnota  $K$  zjištěna již v minulosti čerpací zkouškou. Pro zbylé tři oblasti byla hydraulická vodivost odhadnuta z tabulkového rozdělení dle příslušných geologických podmínek. [17] V rámci kalibrace při následných iteracích docházelo k malým úpravám parametru  $K$  tak, aby modelová hladina podzemní vody v kalibračních vrtech byla co nejbližší hodnotám naměřených v kalibračních vrtech. Tedy, aby rozdíl modelových a skutečných výšek byl v simulaci S1 co nejmenší (tab. 8).

Tabulka 8 – Kalibrace modelu podle hladin naměřených ve vrtech.

název vrtu	měřená hladina	modelová hladina	rozdíl
hladiny uváděny v m n. m.			
V-708	155,29	155,70	-0,41
2M-079	159,00	158,81	0,02
W1	159,20	158,02	0,18
S101	157,30	157,54	-0,24
HV-1	155,60	155,45	0,15

Pro kalibraci bylo použito celkem 5 vrtů. Tyto vrty ohraničují řešenou oblast po svém obvodu. Žádný vrt, který by se nacházel v intravilánu obce, není v databázi České geologické služby k dispozici. Výsledky kalibrace modelu jsou v rámci možností dostačující. Pro zvýšení přesnosti kalibrace by muselo do modelu vstupovat větší množství kalibračních vrtů. Největší odchylky se nacházejí na vrtech S101 a V-708, tyto vrty se nacházejí v blízkosti původního koryta řeky a nejsou ve směru proudění podzemní vody k obci Kly.

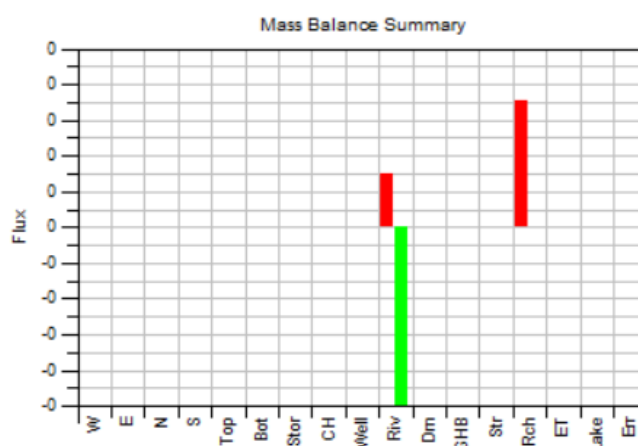
### 7.1.2 Variantní řešení modelu S1

Jak již bylo řečeno, Variantní model S1 je model současného stavu, na kterém byla prováděna kalibrace. Celková bilance modelu je uvedena v tabulce 9 a graficky znázorněna na obrázku 28. Chyba modelu činí 0,4 %. Z celkové bilance je patrné, že největší výměna podzemní vody je s řekou Labe. Kanalizované Labe se zakolmatovaným dnem v dané oblasti funguje jako přirozený drén a odvádí podzemní vodu. Podzemní voda v modelované oblasti je ze 70 % dotována infiltrací z povrchu a přetokem ze sousední zvodně.

Tabulka 9 – Bilance stacionárního modelu

Celková bilance	Přítok (l/s)	Odtok (l/s)
Řeka	14,78	49,84
Infiltrace a přetok	35,28	0,00
Celkem	50,06	49,84
Rozdíl	0,22	

Obrázek 28 – Graficky znázorněná bilance. [2019]



Grafický výsledek variantního řešení modelu S1 je uveden jako Příloha 2. V příloze jsou zobrazeny izoliny hladiny podzemní vody. Z grafického výsledku je patrné, že proudění podzemní vody má severozápadní směr. Z důvodu vzduší hladiny v nadeží dochází k přetoku vody z volné hladiny do podzemní vody. Poté dochází k obtékání jezu a následnému drénování v severovýchodní části řešené oblasti. Trajektorie zobrazují směry proudění a z trajektorií je patrné reflektování geologických podmínek tak, že je viditelné obtékání teras s méně propustným materiálem. Největší objem vody proudí v oblasti propustných štěrků při západní hranici chráněného území. Dále si podzemní voda přirozeně vybírá k toku původní koryto řeky Labe před kanalizováním a v daných oblastech vzniká preferenční proudění. Největší rychlosti proudění podzemní vody se nacházejí v místě kalibračního vrtu HV-1. V těchto místech dochází k propojení starého i kanalizovaného koryta Labe a dochází zde k drénování podzemní vody do Labe. Tento efekt je umocněn výstupem terasy, jejíž okraj se nachází přibližně ve vzdálenosti 100 m od koryta Labe. Maximální rychlost proudění podzemní vody při zadávání pórovitosti 3 % je modelem udávaná rychlost 0,00084 m/s a nachází se právě v místech západního okraje PPO.

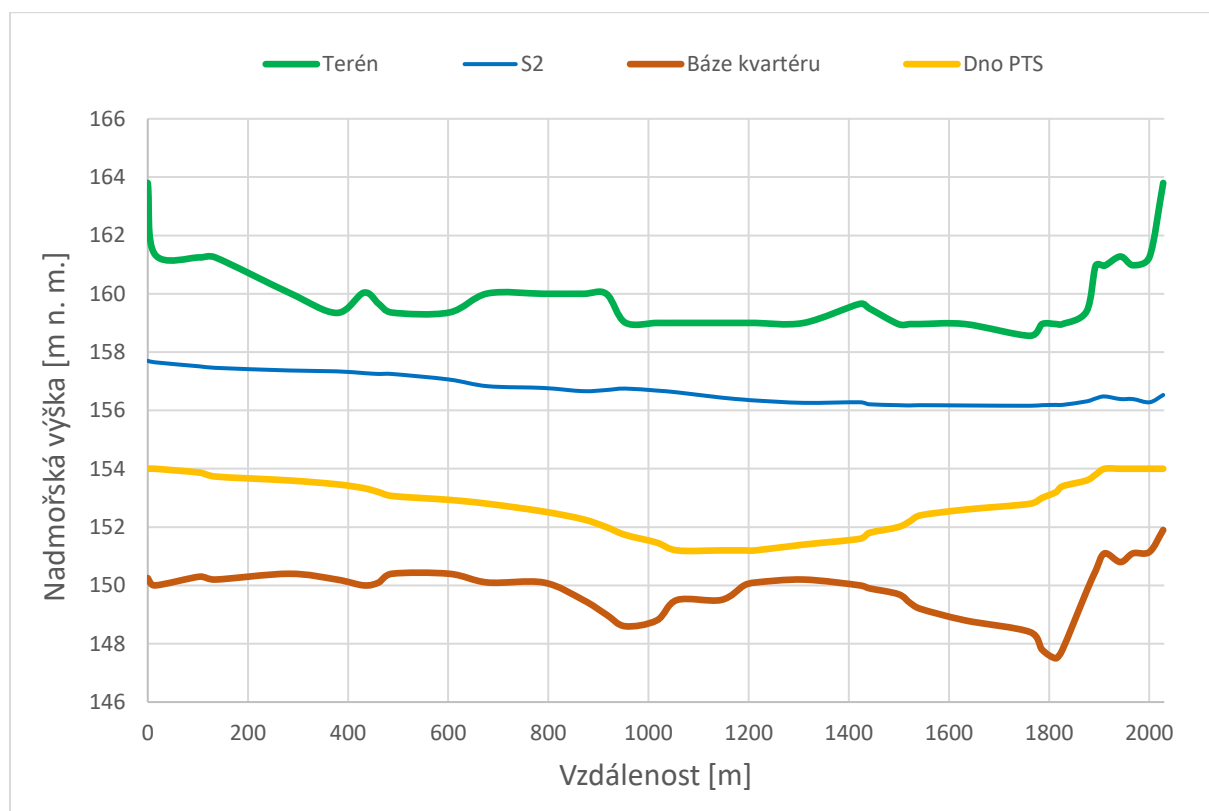
### 7.1.3 Variantní řešení modelu S2 a S3

Grafický výsledek variantních řešení modelu S1, tedy S2 a S3 je uveden jako Příloha 3 až 5. Ve variantě S2 bylo posuzováno, jakým způsobem bude ovlivněno proudění podzemní vody v případě výstavby protipovodňového opatření tak, jak je navrhováno ve studii proveditelnosti (obr. 29). Ve variantě S3 bylo posuzováno, jakým způsobem bude ovlivněna hladina podzemní vody v případě, že dno podzemní těsnící stěny bude zavázáno do báze.

Ve variantě S2 byla modelována podzemní těsnící stěna dle návrhu Studie protipovodňových opatření na ochranu obce Kly. V obrázku 23 je vykreslena báze kolektoru, úroveň dna

podzemní těsnící stěny a terén v linii podzemní těsnící stěny. To znamená, že průtok podzemní vody pod PTS se děje přibližně v pruhu o výšce 2,2 m. Pomocí modelu bylo zjištěno mírné navýšení a snížení hladiny podzemní vody v místech intravilánu obce. Maximální navýšení bylo v řádech centimetrů a nemělo by překročit 10 cm. Maximální snížení bylo v řádech centimetrů a nemělo by překročit 5 cm. Mírné navýšení hladiny podzemní vody bylo zaznamenáno i před linií PPO ve směru proudění podzemní vody. Naopak mírné snížení bylo zaznamenáno za linií PPO jak v intravilánu, tak v extravilánu ve směru na Mělník.

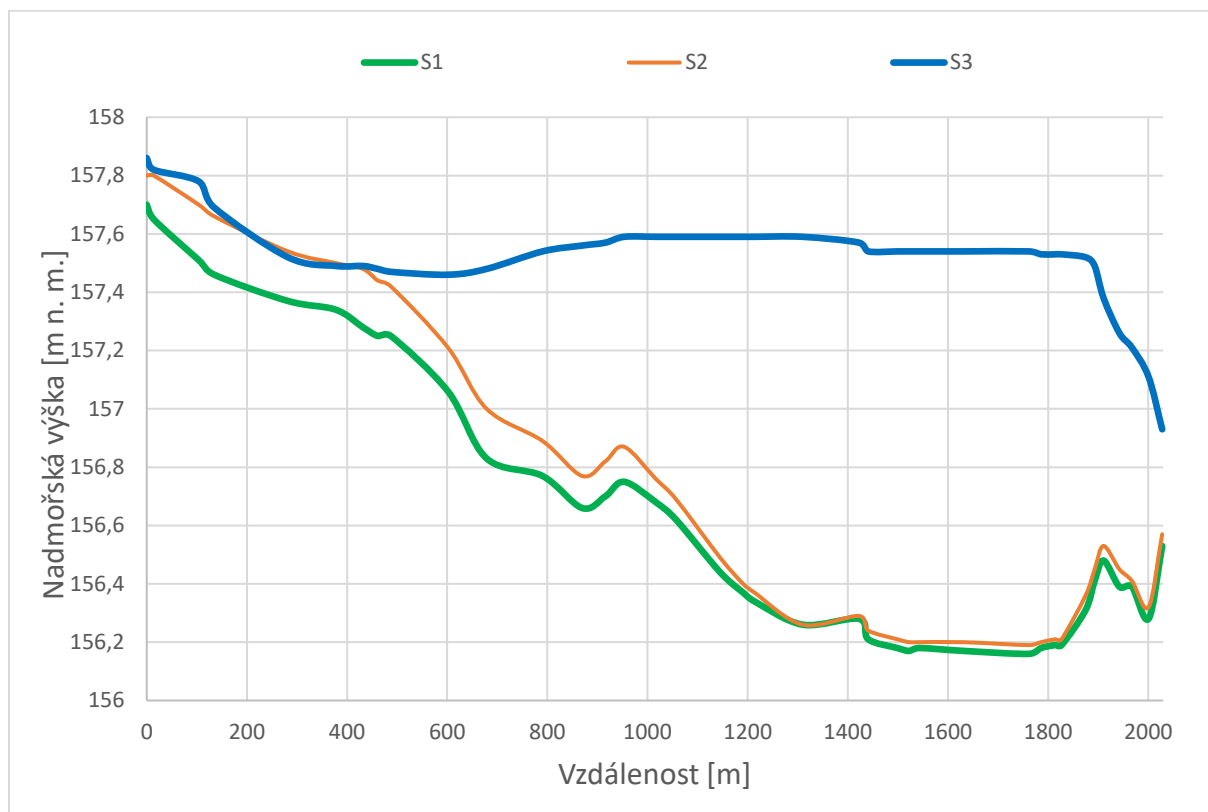
Dno podzemní těsnící stěny se pohybuje v rozmezí 2-6 m pod úrovní terénu. Hladina podzemní vody dle návrhu Sweco Hydroprojekt a.s. bude výstavbou PTS jen velmi málo ovlivněna.



Obrázek 29 – Podélný profil v linii PTS se zákresem HPV podle varianty S2. Podélný profil je vedený od jihovýchodního okraje (bod č.1) směrem s severovýchodnímu okraji modelu (bod č. 23) dle obrázku 31.

Varianta S3 řeší případ, kdy by podzemní těsnící stěna zasahovala až do báze kvartérního pokryvu. Studie protipovodňových opatření na ochranu obce Kly předpokládá, že dno podzemní těsnící stěny bude v nadmořské výšce 151,8 až 154,0 m n. m. Z obrázku 29 je patrné, že dno podzemní těsnící stěny a nepropustná vrstva slínovců a jílovců je v některých místech od sebe vzdálena méně než 1 m. Aby byl zachován přirozený stav proudění podzemních vod nesmí dojít k zasažení báze podzemní těsnící stěnou. Z důvodu absence podrobného geologického průzkumu byla vyhotovena i tato varianta. Z výsledků uvedených v příloze 4 a 5 je patrné, že zavázání podzemní těsnící stěny do báze způsobí výrazný nárůst hladiny podzemní vody v chráněném území. Tento efekt je dán především tím, že navrhované PPO je tvořeno písmenem U (obr. 31). Z tohoto důvodu dochází ke zvedání hladiny podzemní vody

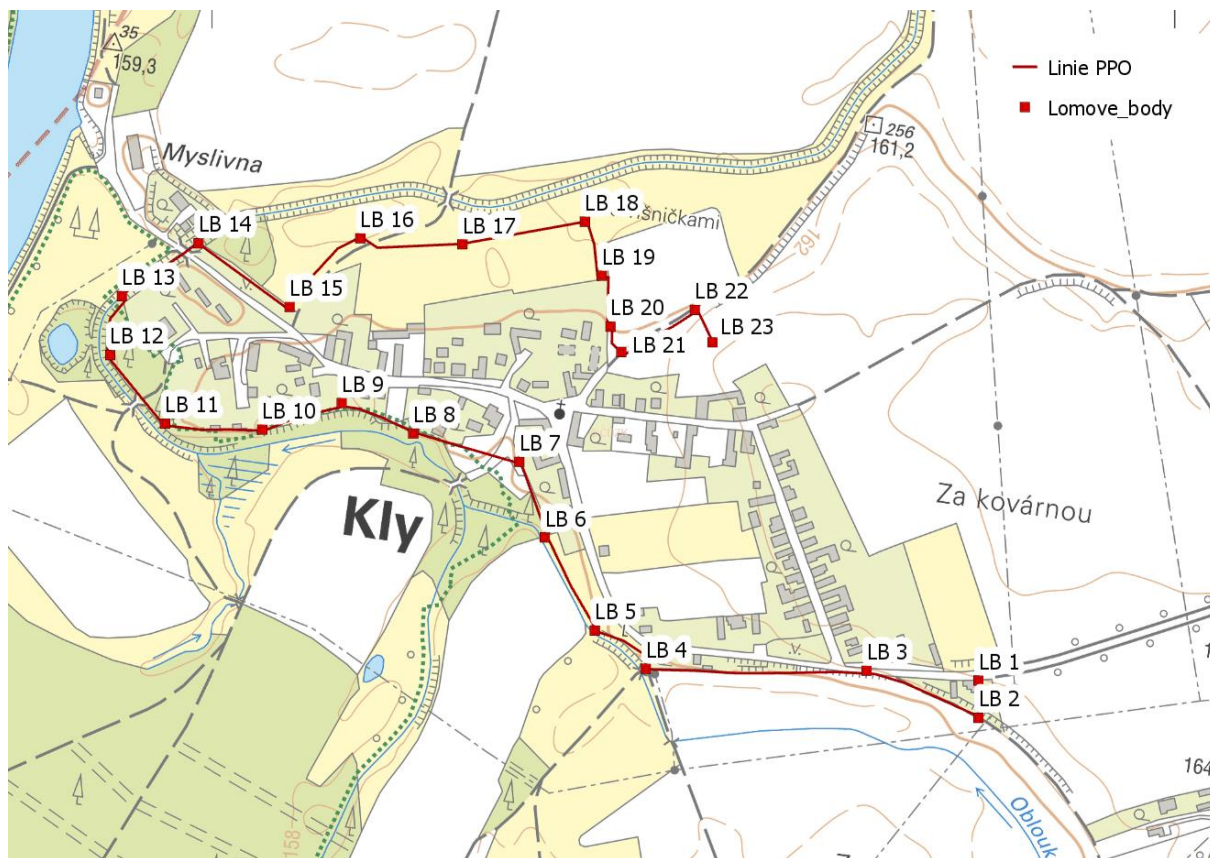
v intravilánu. Při completním zavázání hladiny podzemní vody do báze dojde k zvýšení hladiny podzemní vody až o 1,4 m.



Obrázek 30 – Podélný profil v línii PTS se zákresy hladin dle stacionárních variant. Podélný profil je vedený od jihovýchodního okraje (bod č.1) směrem s severovýchodnímu okraji modelu (bod č. 23) dle obrázku 31.

## 7.2 Transientní model

Simulace transientního proudění je prováděna pro návrhovou oblast obce Kly v období povodňové situace (obr. 31). Pro model byla použita povodňová vlna z roku 2013. V rámci transientního modelu bylo provedeno posouzení proudění podzemní vody z hlediska směru proudění, rychlosti a velikosti. Dále bylo provedeno posouzení proudění podzemní vody při změně hydraulické vodivosti povodňových hlín a hodnot storativity. Jedná se o obtížně zjistitelné parametry, které mohou výsledky modelu do značné míry ovlivnit. Transientní model byl vyhotoven ve třech variantách. Jednotlivé varianty se od sebe liší hydraulickými parametry. Ve všech variantách transientního modelu bylo uvažováno s hloubkou založení podzemní těsnící stěny podle studie proveditelnosti.



Obrázek 31 – Lomové body linie PPO s číselným označením.

### 7.2.1 Variantní řešení modelu T1

Ve variantě T1 bylo posuzován průběh hladiny podzemní vody v linii navrhovaného protipovodňového opatření. Jako počáteční podmínka pro model T1 byly použity výsledky varianty S2. Návrhová povodňová vlna kulminovala v periodě 18, tedy devátého dne od počátku modelu. Pro výstupy z modelu byly vybrány periody 18, 20, 22, tedy 9, 10 a 11 dní od počátku řešeného časového úseku modelu. V přílohách 6 až 9 je vykreslen detail řešené oblasti s izoliniemi, pro uvedené časové úrovně. Maximální rychlost proudění podzemní vody v transientním modelu je 0,00390 m/s. Tato hodnota je přibližně 2 x větší než ve stacionárním modelu.

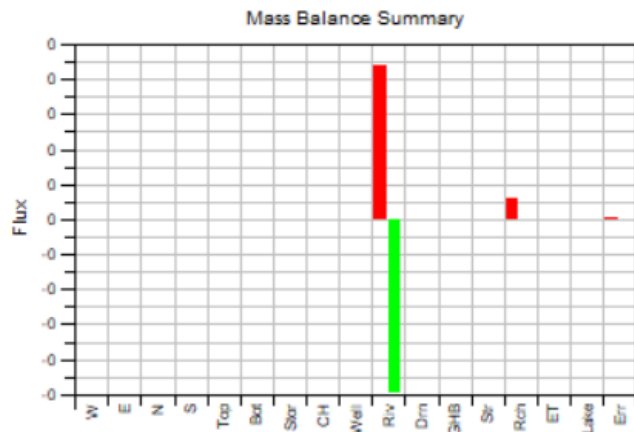
Celková bilance transientního modelu je uvedena v tabulce 10. Chyba modelu činí 0,4 %. Z celkové bilance je patrné, že největší výměna podzemní vody v období povodně je s řekou Labe (obr. 32). V průběhu povodně jsou vstupy do modelu z jiných okrajových podmínek marginální a tvoří méně než 10 % dotace vody do modelu.



Tabulka 10 – Balance transientního modelu

Celková bilance	Přítok (l/s)	Odtok (l/s)
Řeka	257,32	289,55
Infiltrace a přetok	35,28	0,00
Celkem	292,77	291,48
Rozdíl	1,29	

Obrázek 32 – Graficky znázorněná bilance transientního modelu. [2019]



Nejvyšší rychlost proudění podzemní vody se nachází při západní linii PPO. To je způsobeno tím, že obec Kly se nachází na vyvýšené terase s jiným geologickým složením kvartérních sedimentů, a tedy i jinou hydraulickou vodivostí. Obec Kly v těchto místech defacto tvoří přirozenou překážku v nivě řeky. Rychlosti proudění podzemní vody jsou řádově nižší než v oblasti štěrků mimo návrhovou linii PPO. Převažující směr proudění je podél linie PPO ve směru od řeky. Z modelu je patrné, že významnou roli má jez Obříství do chvíle vyrovnání hladiny v nadjezí a podjezí.

Výsledkem této simulace je zjištění, že hladina podzemní vody nevystoupá na terén. Nicméně hladina podzemní vody se v severní části chráněné oblasti, která je nejnižší položená a nevyskytují se zde rodinné domy, přiblíží terénu. Hrozí tedy, že v domech, které jsou nejnižší položené může docházet při povodni k zaplavování sklepů. Vzhledem k tomu, že není bezpečné zahlubovat bázi PTS z důvodu rizika zavázání s bází kvartérního kolektoru lze tento problém řešit vybudováním sítě čerpacích vrtů, které by hladinu podzemní vody v případě výjimečné situace čerpáním snižovaly.

Průběh hladiny v chráněném území v blízkosti vybraných lomových bodů je viditelný z grafů uváděných v kapitole 7.2.3 s hodnotou storativity 3 %.

### 7.2.2 Variantní řešení modelu T2

Ve variantním řešení modelu T2 je posuzován vliv parametru hydraulické vodivosti na proudění podzemní vody. Hodnoty hydraulické vodivosti byly odhadovány podle zeminy v dané oblasti. Hodnoty hydraulické vodivosti nabývají nejvyšších hodnot ve štěrcích a píscích. Nižší hodnoty hydraulické vodivosti mají hlíny a nejnižší hodnoty mají jíly. Volené hodnoty parametru hydraulické vodivosti v modelu se mohou od skutečného stavu lišit. Proto ve variantním řešení T2 byla měněna hodnota hydraulické vodivosti na stranu bezpečnosti. Hodnoty hydraulické vodivosti v oblasti štěrků byly sníženy z hodnoty  $3 \cdot 10^{-3}$  na hodnotu  $3 \cdot 10^{-4}$ . Hodnoty hydraulické vodivosti v oblasti písků snižovány nebyly. Vrt s označením 2M-079 byl vystrojen v roce 2006. Při vystrojení vrtu probíhala čerpací zkouška a hodnota hydraulické vodivosti byla určena  $2 \cdot 10^{-4}$  m/s. Změna hodnot hydraulické vodivosti má zásadní vliv na průběh hladiny v pozorovacích lomových bodech. Hodnota hydraulické vodivosti ovlivňuje dobu prostupu geologickým podložím. V modelu volené nižší hodnoty způsobí prodloužení doby prostupu podložím a hladina podzemní vody v chráněném území

nevystoupá na terén. Při porovnávání příloh 6 a 10 je patrné zpoždění nárůstu podzemní vody v období 12 hodin po kulminaci povodně. V řešené oblasti se místy mohou vyskytovat v oblasti štěrku písky při svrchní vrstvě kvartérního pokryvu. Lze říci, že výskyt písků může být pro chráněné území výhodný a doba prostupu podzemní vody zeminou se prodlouží.

### 7.2.3 Variantní řešení modelu T3

Ve variantním řešení T3 byl posuzován model T1 s rozdílnou hodnotou storativity. Vyjma storativity zůstaly všechny ostatní parametry stejné, jako ve variantě T1. V rámci modelu byly voleny tyto varianty storativity: 3 %, 10 % a 20 %.

Hodnota 3 % je případ, kdy vlivem srážkové situace v řešeném území dochází k saturaci do té doby nesaturované zóny. Jinak řečeno, srážky, které předchází povodňovou situaci, se infiltrují a vyplní do té doby volné póry. Z tohoto důvodu již není v době zaplavení velká schopnost půdy infiltrovat vodu z povodně.

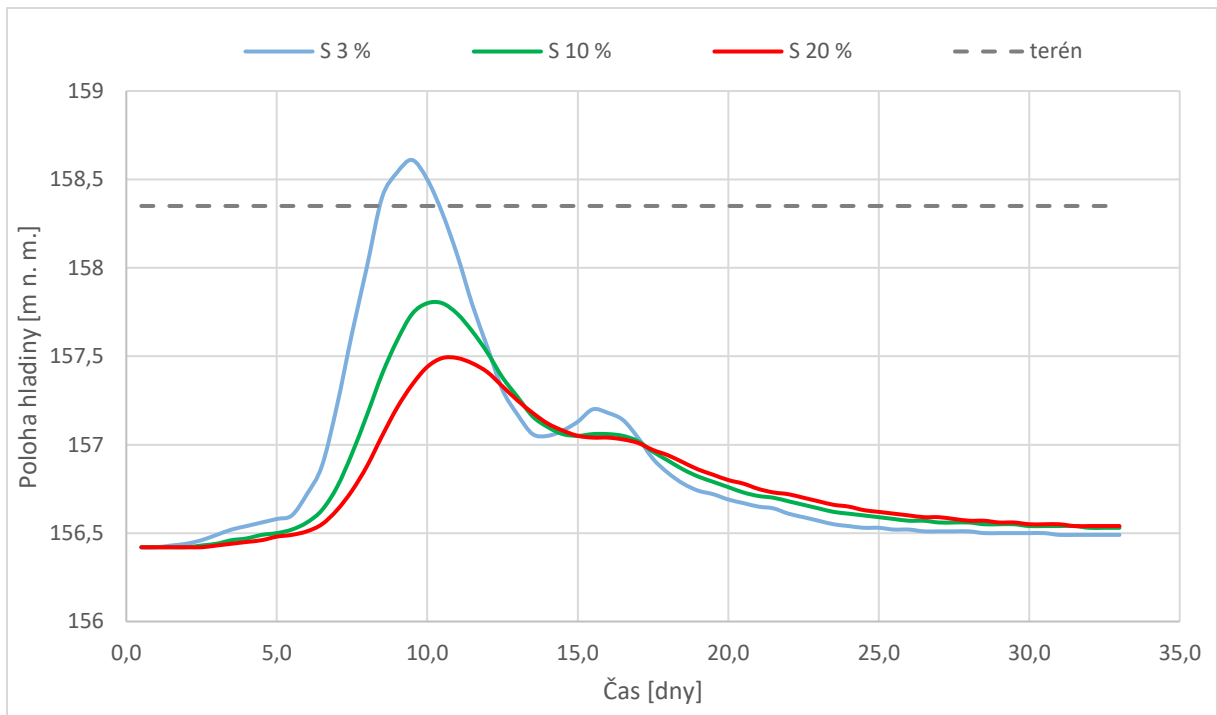
Hodnota 10 % je kompromisem mezi variantou 3 % a variantou 20 %. Jedná se o umírněný předpoklad, kdy se uvažují geologické podmínky, které nemohou do nesaturované zóny v období povodní přijmout velké množství vody. Jedná se například o jemné písky. Zároveň tato varianta předpokládá mírnou saturaci, tedy méně významné srážky v oblasti

Hodnota 20 % představuje kombinaci dobrých geologických podmínek společně s výhodnou geografickou polohou. Z povodňových situací uvedených v kapitole 2.4 je patrné, že řešená oblast se nachází ve velké vzdálenosti od oblastí, které v minulosti byly zasaženy srážkami. Tato varianta může nastat za předpokladu, že srážkové situace v místech záplav nebudou a nesaturovaná zóna kvartérního kolektoru bude schopná přijmout vodu z povodně. Druhým předpokladem této varianty je štěrkové podloží v oblasti kvartérního kolektoru. Tento předpoklad bude potvrzen či vyvrácen v případném geologickém průzkumu v budoucnu.

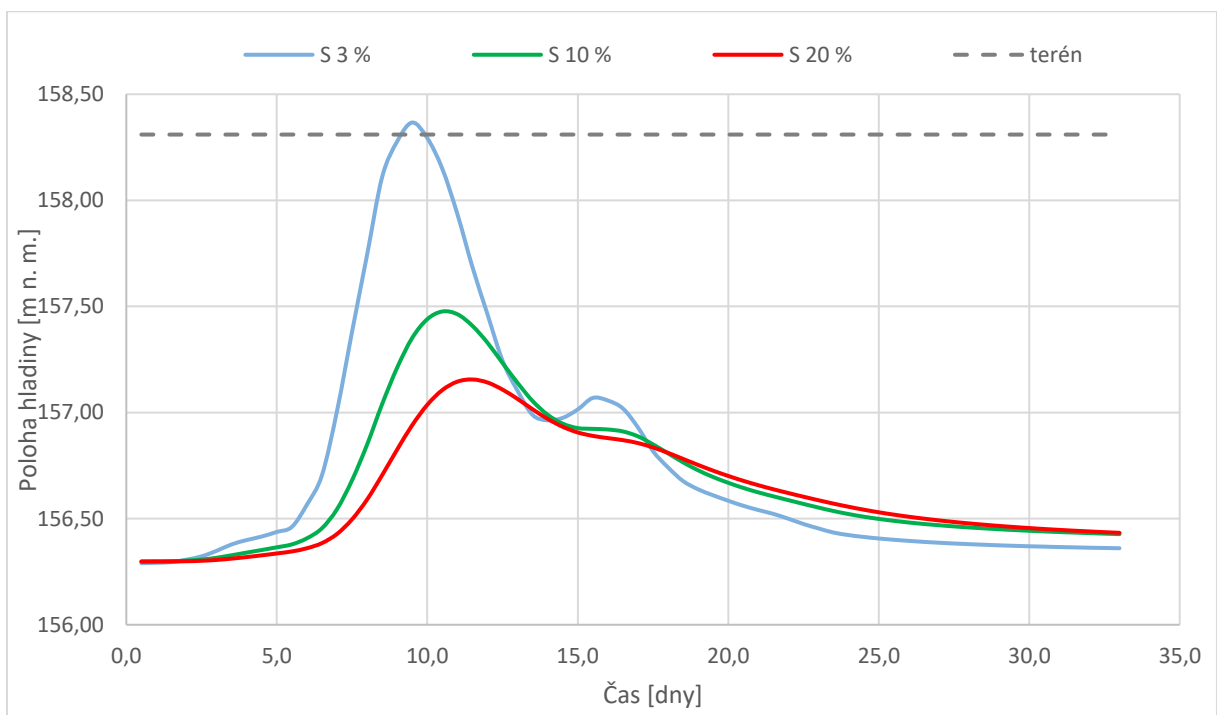
Vyhodnocení rozdílné specifické storativity probíhalo v chráněném území za linií návrhového protipovodňového opatření. Pro přesnější vyhodnocení by v budoucnu měly být hodnoty hladiny podzemní vody porovnávány s geodetickým zaměřením výškopisu.

Na následujících obrázcích je uváděn vždy jeden bod v chráněném území v blízkosti lomového bodu, na kterém jsou zobrazeny hodnoty hladiny podzemní vody v závislosti na čase a hodnotě storativity. Společně s nimi je na grafu zakreslena hodnota terénu.

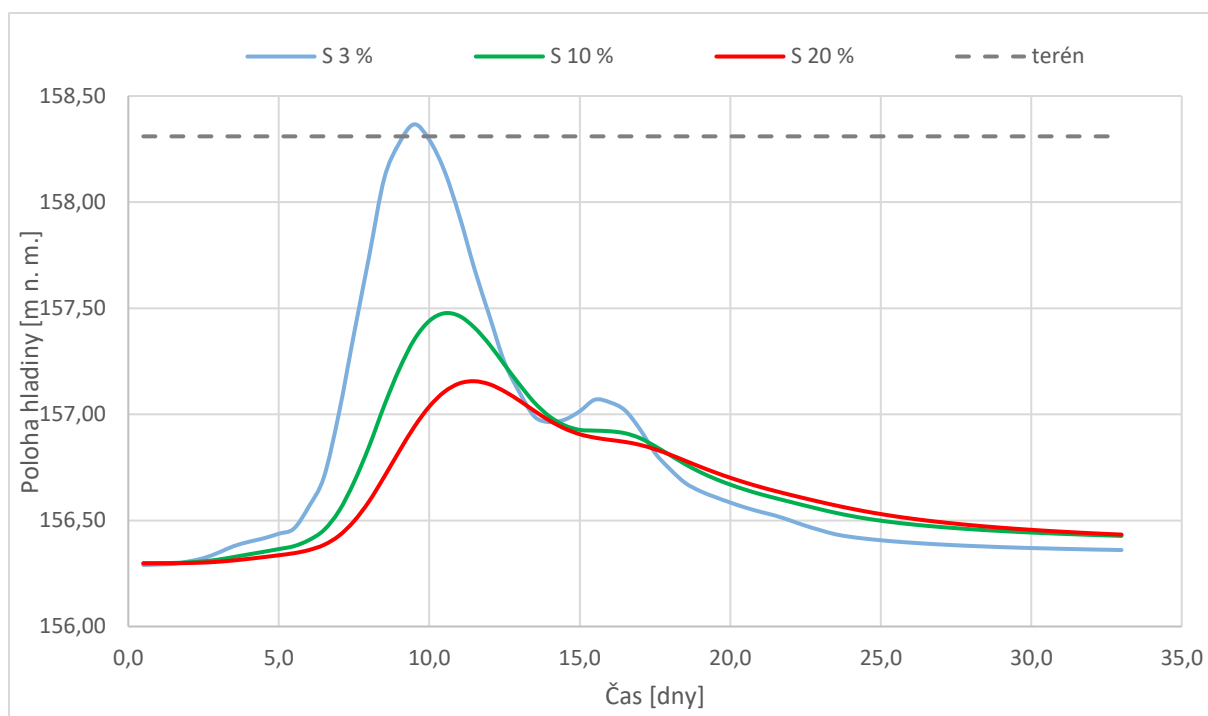
Na obrázcích 33 až 35 jsou vykresleny průběhy hladin v chráněné oblasti v blízkosti lomových bodů, které jsou nejvíce ohroženy v závislosti na čase a hodnotě storativity. Místa, v kterých hladina podzemní vody vystupuje na terén jsou situována u západního okraje linie PPO je provedeno vyhodnocení na jednotlivých lomových bodech. Samotné vyhodnocení, zda podzemní voda vystoupá v nejnižších bodech chráněného území na povrch terénu bylo porovnávání s hodnotami výškopisu, které udává model DMR 5g. Z grafů 33 až 35 je viditelné, že může dojít k vystoupaní hladiny podzemní vody na terén v oblasti s nejmenší geodetickou výškou při severozápadním okraji linie PPO. Vystoupaní hladiny podzemní vody na terén může dojít při nízkých hodnotách storativity. Tato varianta může nastat v případě dlouhotrvající povodně. V příloze 10 až 12 jsou vykresleny izolinie hladiny podzemní vody při hodnotě storativity 3 %, 10 % a 20 %.



Obrázek 33 – Průběh hladin v lomovém bodě 13 při různých hodnotách storativity.



Obrázek 34 – Průběh hladin v lomovém bodě 14 při různých hodnotách storativity.



Obrázek 35 – Průběh hladin v lomovém bodě 16 při různých hodnotách storativity.

## 8 Závěr

Pro závěrečnou práci bylo vybráno praktické řešení modelování proudění podzemních vod. Tato práce navazuje na Studii protipovodňových opatření na ochranu obce Kly. V diplomové práci byl posuzován vliv navrhovaných protipovodňových opatření na hladinu podzemní vody a režim proudění podzemních vod. Prvním cílem této práce bylo ověření, zda vybudování protipovodňového opatření ovlivní proudění podzemní vody v oblasti při běžných stavech hladiny vody v Labi. Případně zjištění, jak velká by byla změna hladiny podzemní vody vyvolaná vybudováním protipovodňových opatření v přirozených poměrech může způsobit materiální škody v chráněném území. Druhým cílem bylo ověření, zda v povodňovém období bude docházet k takovým průsakům pod linií podzemní těsnící stěny, že bude ohrožen majetek v chráněném území. Materiálními škodami v území mohou být zaplavené sklepy, podmáčení základů staveb a jejich zhoršená stabilita, či poškození movitého majetku v oblasti. Vliv protipovodňových opatření na proudění podzemních vod v chráněné oblasti byl posuzován pomocí stacionárního a transientního modelu.

Vzhledem k nedostatku kalibračních podkladů bylo rozhodnuto doplnit tato data měření výšky HPV ve vrtu HV 1 v období přípravy a zpracování diplomové práce – po dobu tří měsíců. Z výsledků měření je viditelný dlouhodobý pokles hladiny podzemní vody. Dále je z výsledků patrná korelace mezi srážkovou činností a hladinou podzemní vody.

Pomocí stacionárního modelu byl posouzen vliv navrhovaných protipovodňových opatření na běžný (nepovodňový) stav proudění podzemních vod.

Ve variantě S2 došlo k posouzení navrhovaného protipovodňového opatření podle studie proveditelnosti. Výsledkem této simulace bylo zjištění, že vzhledem k nepříznivému směru proudění podzemní vody vůči navrhovanému PPO dochází k nárůstu hladiny podzemní vody v chráněném území, ale pouze v řádu centimetrů. Výstavba protipovodňových opatření nebude mít významný vliv na proudění podzemních vod. Z důvodu malé podrobnosti geologického průzkumu, malé vzdálenosti báze kvartérního pokryvu a hloubky podzemní těsnící stěny byla vyhotovena varianta S3. Tato varianta předpokládá, že dojde k zavázání podzemní těsnící stěny do báze kvartérního pokryvu. Z této simulace bylo zjištěno, že za těchto podmínek by hladina podzemní vody stoupla až o 1,4 m a výrazně by se změnil přirozený stav proudění podzemních vod.

V transientním modelu bylo posuzováno proudění podzemních vod při povodni. Pro model byla použita povodňová vlna z roku 2013. Transientní model byl vyhotoven ve třech variantách. Jednotlivé varianty se od sebe liší vstupními hodnotami hydraulických parametrů. Cílem jednotlivých variant bylo zjistit, jaký vliv mají obtížně zjistitelné parametry hydraulické vodivosti a storativity na průběh hladiny. Ve všech variantách transientního modelu bylo uvažováno s hloubkou založení podzemní těsnící stěny podle studie proveditelnosti.

Ve variantě T1 bylo analyzováno, zda může dojít během povodně k vystoupaní hladiny podzemní vody na terén v chráněné oblasti. Model T1 počítá s hodnotou storativity 3 %, to je případ, kdy se předpokládá, že na začátku simulace tvoří volný pórový prostor 3 % z celkového objemu zeminy. Z této simulace bylo zjištěno, že hladina podzemní vody nevystoupá na terén. Nicméně hladina podzemní vody se v severní části chráněné oblasti, která je nejnižší položená



a nevyskytují se zde rodinné domy, přiblíží terénu. Hrozí tedy, že v domech, které jsou nejnižší položené, může docházet při povodni k zaplavování sklepů. V případě ochrany veškerého majetku by bylo potřeba vyhotovit čerpací vrty. Z těchto vrtů by v případě povodňové situace musela být odčerpávána podzemní voda.

Varianty T2 a T3 a jejich vzájemná kombinace posuzují vliv hydraulické vodivosti a storativity. Tyto parametry nejsou v současné době na řešeném území stanoveny. Ve variantě T2 byla snížena hodnota parametru hydraulické vodivosti. Tento případ je volen z důvodu absence geologického průzkumu a nejistoty tvaru. V modelu to znamená, že oblast štěrků je v této variantě změněna na písky. Doba prostupu vody horninovým prostředím se prodlouží v řádu hodin. Hladina podzemní vody ani v tomto případě nevystoupá na terén. I v tomto případě se hladina podzemní vody přiblíží k terénu v severní části chráněného území. Ve variantě T3 byl posuzován vliv storativity na model. Základní model byl vypracován pro případ 3 %. Následně byly vyhotoveny varianty s hodnotou storativity 10 % a 20 %. Takto vysoké hodnoty byly voleny, protože se celá oblast vyskytuje v oblasti štěrků a také protože v případě povodňové situace nemusí být v řešeném území srážková aktivita. Výstupem z modelu T3 je zjištění, že zvýšení hodnot storativity má pozitivní efekt při povodni a nedochází k ohrožování majetku v chráněném území.

Výstupy z transientního modelu ukazují, že parametry hydraulické vodivosti a storativity by v případě povodně výrazně ovlivnily průběh povodně v dané lokalitě. Vysoká hydraulická vodivost štěrků a písků způsobuje rychlou odezvu hladiny podzemní vody v průběhu povodně.

Výstupy z modelu jsou silně ovlivněny kvalitou vstupních údajů. Odhad parametrů hydraulické vodivosti, storativity, nebo interpolace báze kvartérního pokryvu se může odchylovat od skutečného stavu. Zpřesnění výsledků modelu lze dosáhnout vyhotovením geologického průzkumu a čerpacích zkoušek.

## 9 Použitá literatura

- [1] Český statistický úřad - Počet obyvatel v obcích - k 1.1.2019 [online]  
<https://www.czso.cz/csu/czso/pocet-obyvatel-v-obcich-za0wri436p>
- [2] Občanské sdružení Původní Kly [online]. [cit. 2019-07-06] Dostupné z:  
<http://puvodnikly.cz/galerie-historicke-fotografie/>
- [3] Česká geologická služba – Vrtná prozkoumanost [online]. [cit. 2019-07-10] Dostupné z: [https://mapy.geology.cz/vrtna\\_prozkoumanost/](https://mapy.geology.cz/vrtna_prozkoumanost/)
- [4] Studie protipovodňových opatření na ochranu obce Kly – Sweco Hydroprojekt a.s. [cit. 2019-08-24]
- [5] Souhrnná zpráva o povodni v srpnu 2002 [online]. [cit. 2019-08-24] Dostupné z: [http://www.dibavod.cz/data/povodnove\\_zpravy/vltava/vltava\\_08\\_2002.pdf](http://www.dibavod.cz/data/povodnove_zpravy/vltava/vltava_08_2002.pdf)
- [6] Souhrnná zpráva o povodni v březnu 2006 v oblasti povodí Horního a středního Labe a na vlastním toku Labe v oblasti povodí Ohře a Dolního Labe (24.3. - 13.4.2006) [online]. [cit. 2019-08-24] Dostupné z: [http://www.pla.cz/planet/public/dokumenty/zpravy\\_vhd/Zprava%20o%20povodnove%20situaci%2003-2006%20-%20text\\_cast.pdf](http://www.pla.cz/planet/public/dokumenty/zpravy_vhd/Zprava%20o%20povodnove%20situaci%2003-2006%20-%20text_cast.pdf)
- [7] Souhrnná zpráva o povodních v červnu 2013 v oblasti povodí Horního a středního Labe a na vlastním toku Labe v oblasti povodí Ohře a Dolního Labe (1.6. - 13.6. a 25.6 – 28.6.) [online]. [cit. 2019-08-25] Dostupné z: [http://www.pla.cz/planet/public/dokumenty/zpravy\\_vhd/Zprava%20o%20povodni%202013\\_06b.pdf](http://www.pla.cz/planet/public/dokumenty/zpravy_vhd/Zprava%20o%20povodni%202013_06b.pdf)
- [8] Letecké záběry povodní, Policie České republiky [online]. [cit. 2019-08-25] Dostupné z: <https://www.policie.cz/galerie/letecke-zabery-povodni.aspx?q=aW1naWQ9MjE4ODY3MDAmY3BpPTI%3D>
- [9] Česká geologická služba, Geovědní mapa 1:50 000 [online]. [cit. 2019-08-25] Dostupné z: <https://mapy.geology.cz/geocr50/>
- [10] Geomorfologická mapa ČR. Cenia, česká informační agentura životního prostředí [online]. [cit. 2019-08-25] Dostupné z: <https://geoportal.gov.cz/web/guest/map>
- [11] Labe [online], poslední aktualizace 29. září 2019 8:08 [cit. 2019-10-06], Wikipedie. Dostupné z: <https://cs.wikipedia.org/wiki/Labe>
- [12] Nová kilometráž Labe [online]. [cit. 2019-10-06] Dostupné z: [http://www.pla.cz/planet/webportal/internet/cs/dokumenty/nova-kilometraz-labe\\_1203.html](http://www.pla.cz/planet/webportal/internet/cs/dokumenty/nova-kilometraz-labe_1203.html)
- [13] Počasí v Neratovicích, údaje čerpány z meteorologické stanice [online]. [cit. 2019-10-14] Dostupné z: <http://www.nera-weather.estranky.cz/clanky/prirodni-pomery-neratovic.html>

- [14] Volhejn, O., Bakalářská práce – Studie revitalizace povodí Kojetického potoka [cit. 2019-08-24]
- [15] Rastrová hydrogeologická mapa 1:50 000, Česká geologická služba [online]. [cit. 2019-10-16] Dostupné z: [http://mapy.geology.cz/hydro\\_rajony/](http://mapy.geology.cz/hydro_rajony/)
- [16] Krásný et al. 1980, Mapa odtoku podzemní vody ČSSR
- [17] Valentová, Jana. Hydraulika podzemní vody. 4. přepracované vydání. Thákurova 1, Praha 6: nakladatelství ČVUT, 2018. ISBN 978-80-01-06483-2.
- [18] Waterloo Hydrogeologic [online]. [cit. 2019-10-27] Dostupné z: [https://www.waterloohydrogeologic.com/help/vmod-flex/index.html?vm\\_about\\_boundary\\_conditions\\_\\_\\_\\_\\_t.htm](https://www.waterloohydrogeologic.com/help/vmod-flex/index.html?vm_about_boundary_conditions_____t.htm)
- [19] Groundwater: Manual of Water Supply Practies. 4 edition. 6666 West Quincy Avenue, Denver, CO 80235-3098: American Water Works Association, 2014. ISBN 978-1-58321-964-5.
- [20] Česká křídová pánev [online]. [cit. 2019-10-29] Dostupné z: [http://pruvodce.geol.cechy.sci.muni.cz/regionalni\\_geol/kridova\\_panev.htm](http://pruvodce.geol.cechy.sci.muni.cz/regionalni_geol/kridova_panev.htm)
- [21] Prezentace starých mapových děl z území Čech, Moravy a Slezska [online]. [cit. 2019-11-9] Dostupné z: <http://oldmaps.geolab.cz/index.pl?lang=cs>
- [22] Tourková, Jana Hydrogeologie 1. vydání. Thákurova 1, Praha 6: nakladatelství ČVUT, 1996. ISBN 80-01-01501-7.
- [23] Havlíková B. Bakalářská práce, Význam numerického modelování pro řešení kontaminace podzemních vod [online]. [cit. 2019-11-23] Dostupné z: [https://dspace.cuni.cz/bitstream/handle/20.500.11956/39366/BPTX\\_2009\\_2\\_11310\\_0\\_200467\\_0\\_80289.pdf?sequence=1&isAllowed=y](https://dspace.cuni.cz/bitstream/handle/20.500.11956/39366/BPTX_2009_2_11310_0_200467_0_80289.pdf?sequence=1&isAllowed=y)
- [24] Sněhota, Šanda, Pedologie, přednáška 8, Proudění vody v půdě, hydraulická vodivost. [online]. [cit. 2019-11-23] Dostupné z: [http://storm.fsv.cvut.cz/data/files/předměty/PED/PrednaskyPED/K143PEDO\\_08\\_Hydraulicka\\_vodivost.pdf](http://storm.fsv.cvut.cz/data/files/předměty/PED/PrednaskyPED/K143PEDO_08_Hydraulicka_vodivost.pdf)
- [25] Harbaugh, A. W., McDonald, M. G., A modular tree-dimensional finite-difference ground-water flow model, U. S. Geological Survey, 1998
- [26] Harbaugh, A. W. et. al. (2000) MODFLOW-2000, THE U.S. GEOLOGICAL SURVEY MODULAR GROUND-WATER MODEL—USER GUIDE TO MODULARIZATION CONCEPTS AND THE GROUND-WATER FLOW PROCESS [online]. [cit. 2019-11-23] Dostupné z: <https://www.nrc.gov/docs/ML1521/ML15211A635.pdf>
- [27] Kadlecová, R., J. Bruthans, J. Grunloch, et al. KVARTÉRNÍ SEDIMENTY, PODZEMNÍ VODA A ZEMĚDĚLSTVÍ. Klárov 3, Praha 1: Česká geologická služba, 2018. ISBN 978-80-7075-936-3.
- [28] Císlarová, M., Vogel, T. Transportní procesy. 1. vydání. Zikova 4, Praha 6: nakladatelství ČVUT, 1998. ISBN 80-01-01866-0.

- [29] Fiedler, produkt [online]. [cit. 2019-08-25] Dostupné z: <https://www.fiedler.company/>
- [30] Říha, J., Ochranné hráze na vodních tocích. 1. vydání. U Průhonu 22, Praha 7: Tiskárny Havlíčkův Brod, a. s. 2010. ISBN 978-80-247-3570-2
- [31] Rumbaugh, J. O., Rumbaugh, D. B. Tutorial Manual for Groundwater Vistas, Environmental Simulations, Inc.
- [32] Geomon s.r.o., [online]. [cit. 2019-12-13] Dostupné z: <http://www.geomon.cz/lgr2ht.htm>

## 10 Seznam použitých zkratek

HPV	Hladina podzemní vody
PPO	Protipovodňové opatření
PTS	Podzemní těsnící stěna
DMR 5g	Digitální model reliéfu 5. generace
ČHMÚ	Český hydrometeorologický ústav
ČÚZK	Český úřad zeměměřický a katastrální
pla	Povodí Labe
CENIA	Česká informační agentura životního prostředí
S-JTSK	Systém jednotné trigonometrické sítě katastrální
HEIS VÚV	Hydroekologický informační systém – Výzkumný ústav vodohospodářský T. G. Masaryka
INSPIRE	Infrastruktura pro prostorové informace

## 11 Seznam obrázků

Obrázek 1 – Lokalita obce staré Kly – topografie širšího územního celku.....	10
Obrázek 2 – Lokalita obce Kly – Výřez mapy III. vojenského mapování z let 1877 – 1880. ....	11
Obrázek 3 – Kaple sv. Václava – Na kapli byly zaznamenávány povodně od roku 1784. ....	13
Obrázek 4 – Průběh povodně na VD Orlík.....	15
Obrázek 5 – Povodeň v roce 2002, pohled na zaplavenou část obce Kly. ....	16
Obrázek 6 – Rozsah povodně v roce 2002. ....	17
Obrázek 7 – Labe, Kly Větrušice 3.4. 2006. ....	18
Obrázek 8 – Povodeň v roce 2013, pohled na zaplavenou část obce Kly. ....	19
Obrázek 9 – Výřez geologické mapy v oblasti řešeného území s vyznačenou linií navrhovaných PPO. ....	21
Obrázek 10 – Vrtná prozkoumanost a vyznačená linie plánovaného PPO. ....	25
Obrázek 11 – Výřez mapy hydrogeologických rajonů.....	26
Obrázek 12 – Rastrová hydrogeologická mapa 1:50 000 ČSSR.....	27
Obrázek 13 – Mapa odtoku podzemní vody ČSSR. ....	28
Obrázek 14 – Kombinace podkladové topografické mapy a geomorfologické mapy ČR. ....	30
Obrázek 15 – Převýšený model terénu řešené oblasti. ....	30
Obrázek 16 – Vodohospodářská mapa 1:50 000 České republiky.....	31
Obrázek 17 – Vzorový příklad dataloggeru. Typ H40 – GSM/GPRS od firmy Fiedler. ....	39
Obrázek 18 – Vzorový příklad Ultrazvukového hladinoměru. Typ MICROFLEX C.....	40
Obrázek 19 – Území, řešené v modelu a mocnost kvartérního pokryvu.....	49
Obrázek 20 – Konduktance schéma.....	51
Obrázek 21 – Rozdělení řešené oblasti podle hodnot recharge.....	52
Obrázek 22 – Rozdělení řešené oblasti podle hodnot hydraulické vodivosti.....	54
Obrázek 23 – Podélný profil v linii podzemní těsnící stěny.. ....	55
Obrázek 23 – Průtoky při povodňové vlně v měrném profilu Kostelec nad Labem.. ....	57
Obrázek 24 – Výšky hladiny při povodňové vlně v měrném profilu Kostelec nad Labem.....	58
Obrázek 26 – Vývoj hladiny podzemní vody v monitorovacím vrtu ČHMÚ s označením 2M-079 a směrnice trendu. ....	59
Obrázek 27 – Vývoj hladiny podzemní vody v monitorovacím vrtu ČHMÚ s označením S-101 a směrnice trendu. ....	59
Obrázek 28 – Graficky znázorněná bilance.....	62
Obrázek 29 – Podélný profil v linii PTS se zákřesem HPV podle varianty S2.. ....	63
Obrázek 30 – Podélný profil v linii PTS se zákřesem hladin dle stacionárních variant.....	64
Obrázek 31 – Lomové body linie PPO s číselným označením. ....	65
Obrázek 32 – Graficky znázorněná bilance transientního modelu.....	66
Obrázek 33 – Průběh hladin v lomovém bodě 13 při různých hodnotách storativity.....	68
Obrázek 34 – Průběh hladin v lomovém bodě 14 při různých hodnotách storativity.....	68
Obrázek 35 – Průběh hladin v lomovém bodě 16 při různých hodnotách storativity.....	69

## 12 Seznam tabulek

Tabulka 1 - Počet obyvatel v obci k 1.1.2019 .....	10
Tabulka 2 – Přehled historických povodní vztahený ke kapli sv. Václava v centru obce. ....	13
Tabulka 3 – Časový vývoj situace v centrální části obce Kly. ....	15
Tabulka 4 – Geomorfologické zařazení řešeného území. ....	29
Tabulka 5 Klimatické charakteristiky.....	32
Tabulka 6 – Dělení stavby na stavební objekty. ....	33
Tabulka 7 – Průběh povodňové vlny zadávaný do transientního modelu jako okrajová podmínka „river“.....	56
Tabulka 8 – Kalibrace modelu podle hladin naměřených ve vrtech.....	61
Tabulka 9 – Bilance stacionárního modelu .....	62
Tabulka 10 – Bilance transientního modelu.....	66



## 13 Seznam příloh

- 1) Celková situace
- 2) Stacionární model – S1
- 3) Stacionární model s navrhovanou linií PPO – S2
- 4) Hloubka HPV v případě zavázání PTS do báze kvartérního pokryvu – S3
- 5) Stacionární model s navrhovanou linií PPO zavázanou do báze kvartéru – S3
- 6) Transientní model s navrhovanou linií PPO v čase 12 hodin po kulminaci – T1
- 7) Transientní model s navrhovanou linií PPO v čase 36 hodin po kulminaci – T1
- 8) Transientní model s navrhovanou linií PPO v čase 60 hodin po kulminaci – T1
- 9) HPV vystupující v čase 12 hodin po kulminaci na terén – T1
- 10) Transientní model změna hydraulické vodivosti v čase 12 hodin po kulminaci – T1
- 11) Transientní model změna storativity na 10 % v čase 12 hodin po kulminaci – T1
- 12) Transientní model změna storativity na 20 % v čase 12 hodin po kulminaci – T1
- 13) Průběh hladin podzemní vody v chráněném území
- 14) Výsledky měření hladiny podzemní vody na vrtu HV 1
- 15) Vzorové příčné řezy – Studie protipovodňových opatření na ochranu obce Kly – Sweco Hydroprojekt a.s.
- 16) Základní hydrogeologické údaje objektu vrtu 2M-079
- 17) Fotodokumentace