

Univerzita Karlova
Přírodovědecká fakulta

Studijní program: Geologie
Studijní obor: Aplikovaná geologie



Ing. Jiří Pechar

Zhodnocení metod průzkumu stavu sypaných hrází na příkladu hráze R3 Hájecká

Assessment of surveying techniques for analyzing the condition of embankment
dams: a case study of R3 Hájecká dam

Typ závěrečné práce: Diplomová práce

Vedoucí práce: Mgr. Jan Jerman, M.Sc., Ph.D.

Konzultant: Mgr. Vlastimil Mužík

Praha 2023

Prohlášení

Prohlašuji, že jsem závěrečnou práci vypracoval samostatně s použitím literárních pramenů a informací, které cituji a uvádím v seznamu použité literatury a zdrojů informací. Tato práce ani její podstatná část nebyla předložena k získání jiného nebo stejného akademického titulu.

V Praze dne 03. května 2023

.....

Podpis

Poděkování

Rád bych poděkoval svému vedoucímu práce Mgr. Janu Jermanovi, M.Sc., Ph.D., za konzultace, odborné vedení práce a projevenou trpělivost. Dále děkuji Mgr. Vlastimilu Mužikovi, Mgr. Vladimíru Lachmanovi a Mgr. Jakubu Širokému za věcné rady, konzultace a pomoc při práci a firmě INSET s.r.o. za vypůjčení potřebných přístrojů, bez kterých by nebylo možné práci provést. Konečně velice děkuji a jsem vděčný i všem svým blízkým přátelům, kolegům a celé své rodině, za jejich podporu po celou dobu studia.

Abstrakt

Diplomová práce se zabývá zhodnocením metod pro průzkum stavby hrází a pro identifikaci poruch v jejich tělese.

V úvodu práce je popsána problematika sypaných hrází s důrazem na materiálové složení a konstrukční prvky v jejich tělese. Práce dále popisuje typy poruch hrází, jejich charakteristiky, příčiny a statistiky jejich četnosti výskytu. Následně je v textu práce přiblížen monitoring sypaných hrází.

Praktická část se věnuje zhodnocení provedených inženýrskogeologických, hydrogeologických a geofyzikálních metod a jejich vhodnosti pro zjištění stavu sypaných hrází. Na základě výsledků jsou popsány přínosy a omezení jednotlivých metod a možnost jejich kombinovaného využití pro dosažení přesnějších výsledků.

Pro zhodnocení výše uvedených metod byla vybrána zemní sypaná hráz R3 Hájecká, na které začala v průběhu roku 2020 prosakovat voda přes levobřežní stranu tělesa hráze. Z bezpečnostních důvodů byla před terénními pracemi snížena hladiny vody v nádrži, což ovlivnilo výběr provedených průzkumných metod.

Klíčová slova: R3 Hájecká, sufoze, porucha, hráz, průsaky

Abstract

The diploma thesis deals with the evaluation of methods for surveying the construction of dams and for identifying faults in their body.

In the beginning of the work, the issue of bulk dams is described with an emphasis on the material composition and structural elements in their bodies. The work also describes the types of dam failures, their characteristics, causes and statistics of their frequency of occurrence. Finally, the text of the thesis describes the monitoring of bulk dams.

The practical part is dedicated to the evaluation of the applied engineering geological, hydrogeological and geophysical methods and their suitability for determining the condition of bulk dams. Based on the results, the benefits and limitations of individual methods and the possibility of their combined use to achieve more accurate results are described.

For the evaluation of the above methods, the R3 Hájecká earth fill dam was selected, on which water began to seep through the left bank side of the dam body in the course of 2020. Of the safety ones, the water level in the reservoirs was lowered before the field work, which reflects the choice of survey methods carried out.

Keywords: R3 Hájecká, suffosion, failure, dike, seepage

Obsah

1	Úvod.....	1
2	Zemní sypané hráze.....	2
2.1	Typy sypaných hrází.....	2
2.1.1	Homogenní zemní sypané hráze	2
2.1.2	Nehomogenní zemní sypané hráze.....	3
2.2	Zeminy používané pro sypání hráze	3
2.3	Složení hráze.....	6
2.3.1	Těsnění sypané hráze	6
2.3.2	Filtry	7
2.3.3	Patní drén.....	8
2.3.4	Opevnění návodního svahu hráze.....	8
2.3.5	Opevnění vzdušního svahu.....	9
2.4	Založení hráze.....	9
2.4.1	Zakládání na nesoudržných zeminách.....	9
2.4.2	Zakládání na soudržných zeminách	9
2.4.3	Zakládání na skalním podloží	10
3	Příčiny porušení hrází.....	11
3.1	Statistika poruch	11
3.2	Charakteristiky porušení	14
3.2.1	Filtrační deformace	14
3.2.2	Přelití koruny hráze	15
3.3	Poruchy hrází-příklady	16
3.3.1	Porušení přehradní hráze Fontenelle	16
3.3.2	Kolaps přehradní hráze Big Bay	17
4	Monitoring stavu hrází	19
4.1	Měření posunů a deformací	19
4.1.1	Velmi přesná nivelace	20
4.1.2	Extenzometrie.....	20
4.1.3	Inklinometrie	20
4.1.4	Fotogrammetrie	20
4.2	Monitoring průsaků a podzemních vod.....	20
4.2.1	Monitoring pórového tlaku.....	21
4.2.2	Měření průsaků.....	21
4.3	Sledování vlivů prostředí a provozu.....	21

4.4	Geofyzikální metody používané pro průzkum hrází	21
4.4.1	Spontánní polarizace (SP)	22
4.4.2	Georadar (GPR).....	22
4.4.3	Dipólové elektromagnetické profilování (DEMP).....	23
4.4.4	Elektrická odporová tomografie (ERT).....	23
5	Vodní dílo R3 Hájecká	25
5.1	Přírodní poměry	27
5.1.1	Klimatické poměry	27
5.1.2	Geomorfologické poměry	28
5.1.3	Geologické poměry	28
5.1.4	Hydrogeologické poměry	31
5.2	Stávající situace hráze	32
6	Metodika prací.....	33
6.1	Archivní šetření	33
6.2	Inženýrskogeologický průzkum	33
6.2.1	Vrtné práce	33
6.2.2	Laboratorní zkoušky.....	35
6.3	Hydrogeologický průzkum	36
6.3.1	Monitoring hladiny vody.....	36
6.3.2	Hydrodynamické zkoušky	37
6.3.3	Agresivita vod	38
6.4	Geofyzikální průzkum	39
6.4.1	Dipólové elektromagnetické profilování (DEMP).....	39
6.4.2	Elektrická odporová tomografie (ERT).....	40
6.4.3	Georadar (GPR).....	42
7	Výsledky.....	43
7.1	Inženýrskogeologický průzkum	43
	Indexové zkoušky.....	43
	Geotechnické zhodnocení skalního podkladu	44
7.2	Hydrogeologický průzkum	48
7.2.1	Monitoring hladin vody.....	48
7.2.2	Hydrodynamické zkoušky	49
7.2.3	Agresivita vod	49
7.3	Geofyzikální průzkum	50
7.3.1	Elektrická odporová tomografie (ERT).....	50

7.3.2	Dipólové elektromagnetické profilování (DEMP).....	51
7.3.3	Georadar (GPR).....	52
8	Kombinované zhodnocení a diskuze výsledků	56
8.1	Posouzení použitých metod	59
8.2	Nepoužité metody.....	60
9	Závěr.....	61
	Seznam příloh.....	62
	Seznam zkratk	62
	Seznam obrázků	62
	Seznam tabulek	63
	Seznam použité literatury	64

1 ÚVOD

Sypané hráze jsou v České republice důležitými stavbami, které plní významnou funkci při dodávání pitné vody do domácností a užitkové vody do průmyslu, zajišťování chovů ryb a ochrany obyvatelstva před povodněmi. S jejich výstavbou však vždy vzniká určité riziko spojené s možností jejich porušení. Proto je důležité tyto poruchy včas odhalit a přijmout patřičná opatření, díky kterým je možné předejít havarijnímu stavu hráze. Z toho důvodu je potřeba pro jejich odhalení a identifikaci zvolit správnou metodu nebo kombinaci různých metod.

Předkládaná diplomová práce si klade za cíl zhodnocení metod průzkumu hrází schopných ověřit stavbu hrází a identifikaci poruch v jejich tělese. Nejprve jsou shrnuty dostupné informace o problematice zemních hrází a jejich poruch se zaměřením na příčinu jejich vzniku. V praktické části byly hodnoceny vybrané inženýrskogeologické, hydrogeologické a geofyzikální metody. V rámci inženýrskogeologických prací byly provedeny vrtné práce za účelem zjištění stavby hráze. Z hydrogeologických metod byla využita čerpací a stoupací zkouška a pravidelný monitoring s cílem zjištění hydraulických parametrů zemin tvořící těleso hráze a prověření závislosti hladiny vody v nádrži s hladinou podzemní vody ve vystrojených vrtech. Z geofyzikálních metod byly provedeny metody elektrické rezistivní tomografie, dipólového elektromagnetického profilování a georadaru za účelem zjištění rozhraní vrstev a lokalizování preferenčních cest v tělese hráze. Na základě výsledků jsou popsány přínosy a omezení jednotlivých metod k dané problematice a možnost jejich kombinovaného využití pro dosažení přesnějších výsledků.

Pro zhodnocení výše uvedených metod byla vybrána zemní sypaná hráz R3 Hájecká, na které začala v průběhu roku 2020 prosakovat voda přes levobřežní stranu tělesa hráze. Sypaná hráz R3 Hájecká, která se nachází u vodní nádrže Hostivař, byla vystavena v roce 1984. V dnešní době slouží jako retenční nádrž. Z bezpečnostních důvodů byla před terénními pracemi snížena hladina vody v nádrži, což ovlivnilo výběr provedených průzkumných metod.

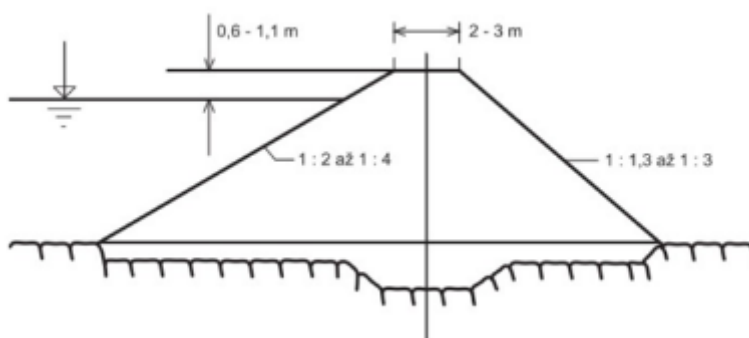
2 ZEMNÍ SYPANÉ HRÁZE

2.1 Typy sypaných hrází

Sypanou hráz tvoří zeminy nebo rozpojené horniny, které se z ekonomických důvodů musí vyskytovat v dostatečném množství a v blízkém okolí od budoucí sypané hráze. (Kratochvíl et al., 1990). Výhodou sypaných hrází je, že se dokáží přizpůsobit i značně nevýhodným základovým podmínkám. Na základě počtu zemín, které se využijí na stavbu, dělíme sypané hráze na heterogenní a homogenní (Říha, 2010).

2.1.1 Homogenní zemní sypané hráze

Homogenní hráz je z hlediska návrhu nejjednodušším typem přehrady. Těleso homogenní hráze tvoří jen jeden materiál, jenž je konstrukčně stálý a dostatečně nepropustný (ČSN 75 2410). Nejpoužívanějším materiálem jsou hlinitopísčité zeminy, s tím že celý průřez hráze plní funkci těsnící i stabilizační. Zeminy tvořící homogenní hráz mají malou smykovou pevnost, z toho důvodu by měla být hráz dle normy (ČSN 75 2410) ve sklonu 1:3 až 1:7 na návodním líci a 1:1,75 až 1:2,2 na vzdušním. Z tohoto pohledu se norma zdá benevolentní, protože autoři jako například Říha (2010) omezují sklony od 1:25 do 1:5. Výška homogenní zemní hráze se doporučuje okolo 6,0 m (ČSN 75 2410). To hráze v mnoha případech nesplňují. V diplomové práci zkoumaná hráz R3 Hájecký má výšku 8,5m, nebo například vodní nádrž Pilská, která se nachází ve Žďáru nad Sázavou, má maximální výšku hráze 8,6m. V zahraničí se ve většině případů jedná o protipovodňové ochranné hráze (Narita, 2000). V České republice se v minulosti stavěli homogenní hráze daleko častěji, nežli v zahraničí a proto mají širší využití. Stavěli se jako zásobárna vody, rybochovné nádrže, nebo pro zachytávání srážek. Příklad homogenní hráze je na Obr. 1.

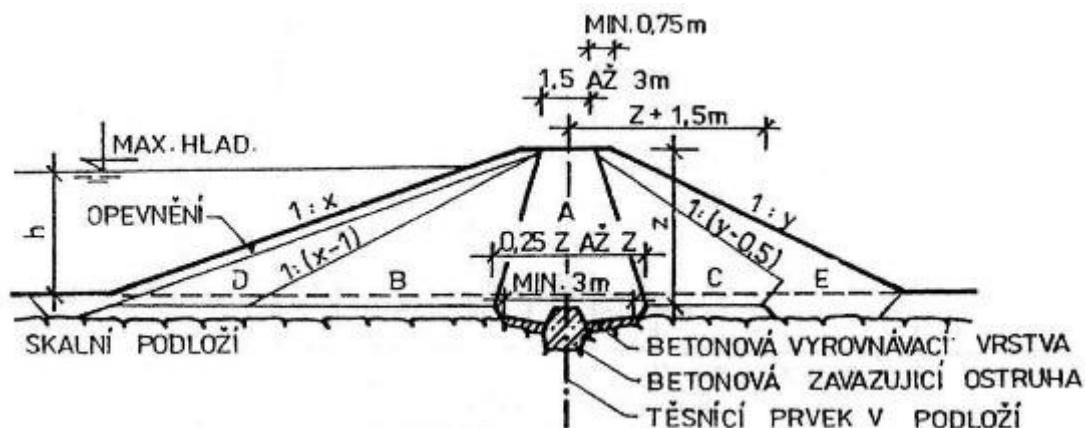


Obr. 1 Homogenní hráz na nepropustném podloží (převzato Vodohospodářská zařízení I, 2012).

2.1.2 Nehomogenní zemní sypané hráze

Jedná se o hráz, jejíž těleso je složeno z minimálně dvou typů zemin. Těleso hráze je tvořeno těsnícím jádrem, přechodovou stabilizační zónou a propustnou stabilizační částí (ČSN 75 2410).

Propustné zeminy zajišťují stabilitu, kdežto nepropustné zajišťují jejich vodotěsnost. Jako těsnící zeminy se obvykle používají hlíny nebo jíly (Broža, 1987). Do stabilizační části se používají zeminy s větší smykovou pevností, díky čemuž je možné projektovat strmější svahy a tím zmenšovat objem hrází oproti homogenním hrázím (Murthy et al., 2013). Těsnící a stabilizační část od sebe oddělují filtry, jenž zabraňují nepřístupnému vyplavování jemnějších částic do drenážního systému nebo jiných částí tělesa hráze (Říha, 2010). Podrobnější popis složení hrází a jejich prvků popisují v kapitole 2.4 – složení hráze. Nejvyšší sypaná hráz v České republice leží na vodní nádrži Dalešice s výškou 100 m a je druhou nejvyšší sypanou hrází v Evropě (Schuster, 2006). Nejdelší hráz v České republice a zároveň ve střední Evropě má vodní nádrž Nechanice, s délkou koruny hráze 3280 m (Pacina et al., 2020). Příklad nehomogenní hráze je na Obr. 2.



Obr. 2 Nehomogenní hráz (převzato Vodohospodářská zařízení I, 2012).

2.2 Zeminy používané pro sypání hráze

Pro správnou funkci hráze je důležitá správná volba těsnící zeminy. Na základě geologického průzkumu se stanovuje zdroj zemin splňující předepsané normy a předpisy v co nejbližším okolí budoucí hráze. Jestliže se tyto zeminy nachází v místě budoucí nádrže, je výhodné, využít jako zdroj materiálu toto místo. Díky tomu se zvětší objem nádrže a rekultivace po ukončení těžby není tak nákladná (Václavík, 2007). Nicméně je důležité zamezit porušení přirozených nepropustných pokryvných vrstev a k možnému zhoršení průsakových poměrů v podloží hráze. Před započítáním těžby se musí v předstihu odstranit porost, ornice a nevhodné zeminy (Říha et al., 2004). Zařídění a vhodnost zemin do tělesa hráze uvádí norma ČSN 75 2410.

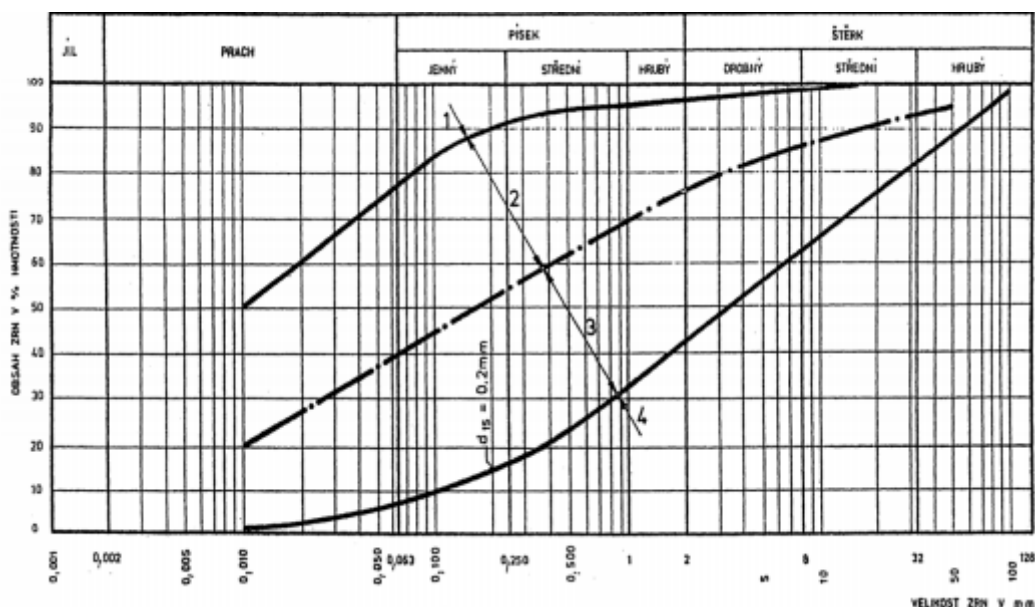
Požadavky na zeminu do hráze suché nádrže uvádí norma ČSN 75 2310. Všeobecně platí, že by se do hrází suchých nádrží neměly používat zeminy, jenž jsou náchylné k vysychání a změnám fyzikálně mechanických vlastností (Říha et al., 2014).

Do těsnících vrstev heterogenní hráze a jako materiál, který tvoří těleso homogenní hráze, se používají zeminy, které jsou stabilní proti sufozi, dostatečně nepropustné, objemově stálé a dobře zhutnitelné (Říha et al., 2014). Dle normy ČSN 75 2410 musí splňovat tyto požadavky

- čára zrnitosti leží v zóně 2, popř. 1 dle Obr. 3,
- obsah organických látek nepřesahuje 5%,
- mez tekutosti W_L není vyšší než 50%,
- maximální průměr zrna zeminy je 100 mm,
- u zemin skupiny ML, CL, CS, MS je index plasticity $I_p = W_L - W_p > 8$,
- hydraulická vodivost těsnících zemin má být menší $k = 5 \cdot 10^{-6}$

Vhodnost zemin určených k těsnění hráze se ověřují pomocí laboratorních zkoušek (Říha et al., 2014).

Zeminy pro stabilizační vrstvu hráze by dle Říhy et al., (2014) měli mít zrnitost v oblasti 4, nebo 3 dle Obr. 3. Tato zemina musí být po zhutnění propustná, objemově stálá vůči změnám počasí a nesmí obsahovat organické látky. Vhodnost různých skupin zemin použitých pro různé části hráze jsou uvedené v Tab. 1.



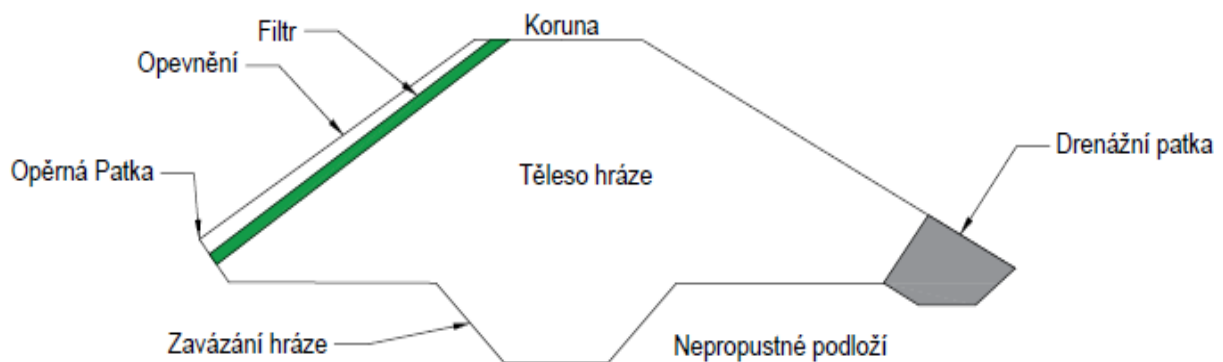
Obr. 3 Mezní čáry zrnitosti zemin převzato (převzato Říha et al., 2014).

Tab. 1 Vhodnost různých skupin zemín pro různé části hráze (převzato Staš, 2016).

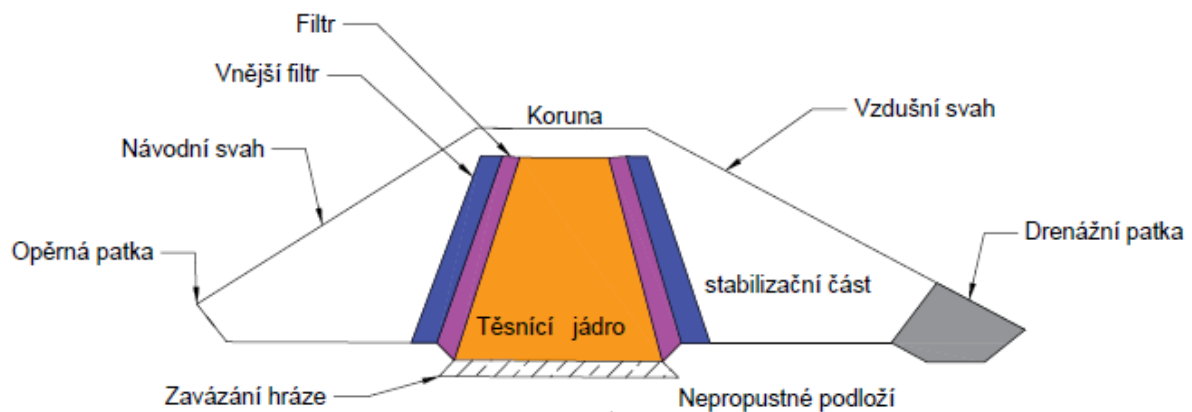
Značení skupiny	Název zeminy	Těsnící část hráze	Stabilizační část hráze	Homogenní hráz
GW	dobře zrněné štěrky, štěrky s pískem, malá frakce	nevhodná zemina	výborná zemina	nevhodná zemina
GP	špatně zrněné štěrky, štěrky s pískem, malá frakce	nevhodná zemina	výborná zemina	nevhodná zemina
GM	hlinitopísčité štěrky, špatně zrněné směsi štěrku, písku a prachu	velmi vhodná zemina	málo vhodná	výborná zemina
GC	jílovitopísčité štěrky, špatně zrněné směsi štěrku, písku a jílu	výborná zemina	málo vhodná	výborná zemina
SW	dobře zrněné písky, písky se štěrkem, malá frakce, jemná frakce	nevhodná zemina	vhodná zemina	nevhodná zemina
SP	špatně zrněné písky, písky se štěrkem, malá frakce, jemná frakce	nevhodná zemina	vhodná zemina	nevhodná zemina
SM	prachové písky, špatně zrněné směsi písku a prachu	vhodná zemina	vhodná zemina	vhodná zemina
SC	jílovité písky, špatně zrněné směsi písku a jílu	výborná zemina	nevhodná zemina	velmi vhodná zemina
ML	anorganické písčité hlíny a velmi jemné písky	málo vhodná zemina	nevhodná zemina	málo vhodná zemina
CL	anorganické jíly malé až střední plasticity, jíly se štěrkem, písčité jíly, jílovité hlíny	velmi vhodná zemina	nevhodná zemina	vhodná zemina
OL	organické písčité hlíny a organické jílovité hlíny malé plasticity	málo vhodná zemina	nevhodná zemina	málo vhodná zemina
MH	anorganické hlíny, slídnaté nebo rozsivkovité jemné nebo prachovité zeminy, slídnaté hlíny	málo vhodná zemina	nevhodná zemina	málo vhodná zemina
CH	anorganické jíly, vysoké plasticity, mastné jíly	málo vhodná zemina	nevhodná zemina	málo vhodná zemina
OH	organické jíly střední až vysoké plasticity	nevhodná zemina	nevhodná zemina	nevhodná zemina

2.3 Složení hráze

Jak už bylo zmíněno v předchozích kapitolách, homogenní a nehomogenní hráze se od sebe liší zejména svým složením. Vhodně zvolené rozměry konstrukčních prvků a následné jejich umístění je nutné ke správně fungující hrázi. Na Obr. 4 a Obr. 5 jsou vidět oba typy hrází založené na nepropustném podloží s jejich složením. V této kapitole se budu snažit vysvětlit jednotlivé parametry a funkce jednotlivých konstrukčních prvků obou hrází.



Obr. 4 Struktura homogenní hráze.



Obr. 5 Struktura nehomogenní hráze.

2.3.1 Těsnění sypané hráze

Těsnění má za úkol snížit množství průsaků přes těleso hráze. Dle polohy se dělí na povrchové (vnější, svahové) nebo vnitřní a dle použitého materiálu na zemní nebo z umělých materiálů. Výška těsnění se projektuje na základě rozměrů hráze, přičemž by mělo být vyvedeno do takové výšky, aby dokázalo bez problémů zamezit průsakům při kontrolní povodni (Říha, 2010).

Při stavbě homogenní hráze se volí takový materiál, který splňuje jak požadavek stability, tak i dostatečné nepropustnosti (ČSN 75 2410).

U nehomogenních hrází by měla být dle ČSN 75 2410 šířka zemního těsnění rovna alespoň $\frac{1}{4}$ výšky hráze nad uvažovanou úrovní, nejméně však 1,5 m. Autoři zabývající problematikou hrází dokonce uvádějí, že by měla být minimální šířka $\frac{1}{3}$ výšky hráze, jak to udává například Kratochvíl (1961).

Těsnění z umělých materiálů může být umístěno jako plášťové nebo jako vnitřní. Jako plášťové těsnění se se obvykle používá beton, plastové fólie nebo asfaltobeton. Jako vnitřní se používají štětovicové popřípadě betonové stěny (Narita, 2000).

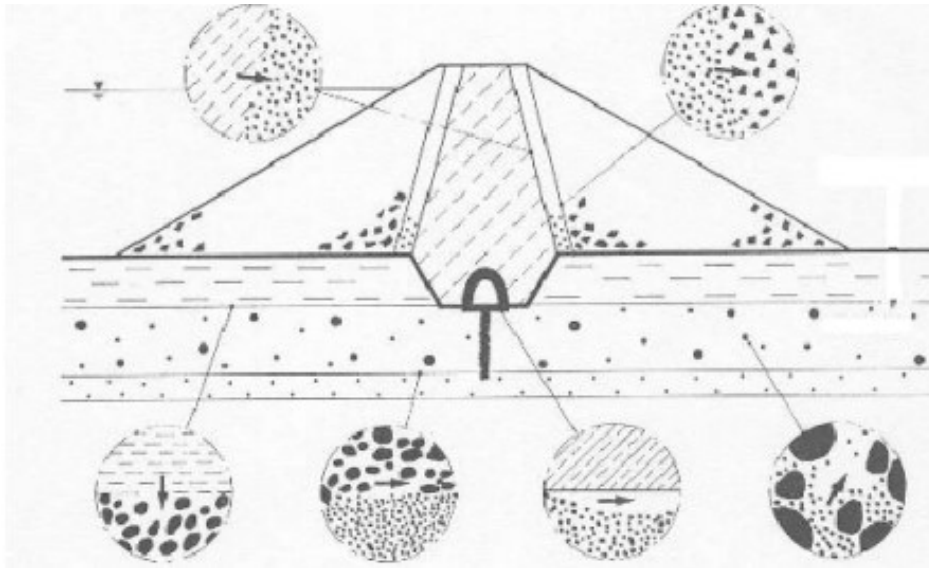
2.3.2 Filtry

Filtry se zřizují v kritických místech styku zemin s různou zrnitostí, kde může docházet k filtračním deformacím, které jsou často uváděny jako hlavní příčina porušení. Narušení filtrační stability je způsobeno vodou, jenž prosakuje přes těleso hráze. Problematice filtračních deformací se zbývám v kapitole 3.2. Dle Václavíka (2007) se filtry v tělese hráze nejčastěji budují v těchto místech:

- kolem drenážních prvků
- na styku opevnění návodního svahu a tělesa hráze
- na kontaktu tělesa hráze s podložím.
- u nehomogenních hrází mezi těsnící jádro a ostatní části hráze

Pravidla pro projektování filtrů jsou popsána v normě ČSN 75 2410.

Materiál filtru je tvořen z přírodního, nebo umělého materiálu. Jestliže se filtr zvolí jako kombinace více druhů materiálů, nesmí se promíchat. Mezi materiály, které se nejčastěji používají, jako filtry patří geotextilie, písky, šterky, drcené kamenivo nebo šterkopísky. Jednotlivé vrstvy by dle ČSN 75 2410 měly být minimálně 0,2 m tlusté, kolem perforovaných trubek 0,1 m. Kvůli hrozícímu zanášení filtračních otvorů by se kolem patního drénu neměli zřizovat filtry tvořené geotextilií (ČSN 75 2410).



Obr. 6 Místa náchylná ke vzniku filtračních deformací (převzato Doležal, 2011).

2.3.3 Patní drén

Patní drén se zřizuje podél paty vzdušného svahu hráze. Slouží ke kontrolovanému odvádění vody, která prosákla tělesem hráze nebo jejím podložím (Šálek et al., 1990). Drén je tvořen materiálem s vysokou propustností, jako je hrubozrný štěrk nebo lomový kámen. Principiálně funguje tak, že soustřeďuje vodu z tělesa hráze a poté ji odvádí drenážními trubkami do koryta pod hrází. (Václavík, 2007).

Rozměry patního drénu se určují na základě velikosti hráze. Návrh drénu musí být takový, aby minimální vzdálenost průsakové křivky od vzdušného svahu hráze byla pod hloubkou promrzání půdy, což odpovídá hloubce 0,8–1 m pod terénem. Kdyby voda prosakovala nad požadovanou hladinou, tak by hrozilo její zamrznutí, což by mohlo vést vytvoření preferenčních cest a následnému poškození hráze (Říha, 2010). Norma ČSN 75 2410 udává, že by v místě vyústění, měly drenážní trubky přesahovat o 5 až 10 cm, aby bylo možné měřit množství prosáklé vody tělesem hráze. Zároveň by se měl závěrečných cca 50 až 100 cm potrubí z důvodu hrozícího poškození nahradit ocelovou trubkou (ČSN 75 2410).

2.3.4 Opevnění návodního svahu hráze

Pro ochranu návodního svahu před negativními účinky zadržované vody (led, vlny) se používá opevnění. U větších hrází bývá opevnění navrženo minimálně 0,8 m pod hladinu stálého nadržení, zatímco u nižších se opevňuje celý svah až do úrovně dna. Opevnění musí být navrženo tak, aby bylo schopné odolat negativním účinkům, jako je usmyknutí, působení tlaku vody a zároveň odolné vůči agresivním účinkům vody v nádrži (Václavík, 2007).

2.3.5 Opevnění vzdušního svahu

Vzdušný svah hráze vyžaduje ochranu před nepříznivými klimatickými podmínkami, jako jsou srážky a eroze. Většinou dostačuje svah nechat jen zatravnit. Kromě toho je možné vysadit dřeviny, což má pomoci s integrací hráze do krajiny. Nicméně tyto dřeviny nesmí nepříznivě ovlivnit stabilitu hráze, funkci drénů a bránit při kontrole hráze (Václavík, 2007).

2.4 Založení hráze

Při projektování hráze je nutné studovat vlastnosti jejího podloží, jako je propustnost a pevnost. Podloží musí být schopno unést vysokou hmotnost hráze. Při projektování hráze potřeba znát sklony svahů, výška hráze, očekávané zatížení a pevnostní charakteristiky materiálů v hrázi a jejího podloží (Říha et al., 2014). Během výstavby je potřeba ze základové půdy odstranit organickou humózní vrstvu a půdy, které jsou pro založení nevhodné. Norma ČSN 75 2310 uvádí, že základová může obsahovat jen objemových 10% (stanovuje se vizuálně). Laboratorními zkouškami zjištěný obsah rozložených látek nesmí překročit 8%. Na způsob založení hráze má největší vliv druh podloží, tj. jestli je hráz zakládána na podloží soudržných, popř. nesoudržných zeminách nebo na skalním podloží (Hobst, 1984).

2.4.1 Zakládání na nesoudržných zeminách

Podloží tvořeno nesoudržnými zeminami má vhodnou smykovou a tlakovou pevnost, ale bývá velmi propustné. Na podloží složeného z nesoudržných zemin je ekonomicky příliš nákladné stavět homogenní hráz, protože by se musely odstranit veškeré propustné vrstvy, a to v místech s její velkou mocností není možné (Hobst, 1984). Z tohoto důvodu se na těchto místech staví hráze heterogenní, u nichž je nutné vytvořit dostatečnou délku průsakové dráhy s cílem zabránit vzniku filtračních deformací. Toho lze dosáhnout pomocí rozšíření základové spáry hráze v kombinaci s těsnícím kobercem, nebo podzemní stěnou (Říha et al., 2014).

2.4.2 Zakládání na soudržných zeminách

Výhodou soudržných zemin je, že jsou oproti nesoudržným zeminám málo propustné až nepropustné, zároveň ale mají menší smykovou pevnost (Murthy et al., 2013). Proto se stabilita zajišťuje různými stabilizačními prvky, jako například zatěžovacími lavicemi, zmírněním sklonu a odvodněním vzdušní paty. Základová spára se upravuje očištěním a zarovnáním, jenž má zamezit vzniku prohlubní, ve kterých by se mohla shromažďovat voda. K odvodnění se využívají studny, které se musí nacházet mimo objekt hráze, aby se daly používat i během procesu sypání (Hobst, 1984).

2.4.3 Zakládání na skalním podloží

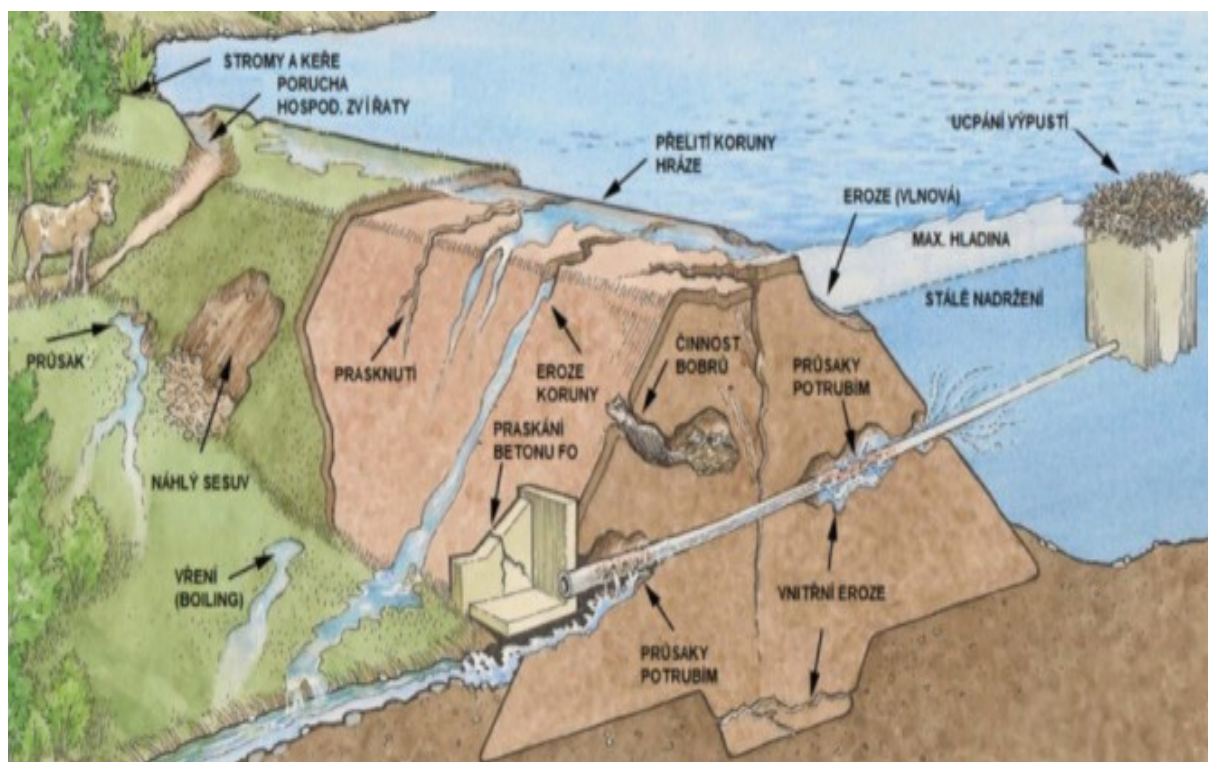
Skalní podloží je nejvhodnější prostředí pro založení hráze, protože je pevné, nepropustné a lze relativně levně a účelně utěsnit vyplněním puklin a dutin, kterými je skalní masiv většinou prostoupen. Důležitým úkolem při zakládání je úprava povrchu skalního podloží, v oblasti navázání těsnících prvků (Kratochvíl et al., 1990). Napojení těsnícího prvku na skalní podloží se obvykle zajišťuje prostřednictvím ozubu nebo zídky. Pod zemním těsněním na svazích se musí základová spára plynule vytvarovat, aby nedošlo k náhlým změnám sklonu, které by mohly vyvolat trhliny v těsnící zóně (Kratochvíl et al., 1990).

3 PŘÍČINY PORUŠENÍ HRÁZÍ

Poruchy hrází se dělí na přirozené a umělé. Přirozené poruchy jsou způsobeny extrémní povodní, půdním sesuvem, zemětřesením, filtračními deformacemi nebo přelitím. Mezi umělé poruchy patří nevhodné umístění, chyby během výstavby a špatný návrh konstrukce. Obvykle se při porušení hráze setkáváme s kombinací několika příčin (Říha, 2010). Různé druhy poruch jsou zobrazeny na Obr. 7.

Příčiny poruch hrází je možné klasifikovat různými způsoby. Z toho vyplývá různá klasifikace uváděná jednotlivými autory a podklady (Říha, 2010). Dle Říhy (2010) patří mezi používané klasifikace Floods and Reservoir Safety (1996), Říha (2005) a Pilarczyk (2017). Například Floods and Reservoir Safety (1996), poruchy klasifikuje jako:

- Ztráta mechanické stability: ve chvíli kdy dojde k sesuvu v tělese hráze.
- Přelití: když dojde k erozi způsobené přetékající vodou přes těleso hráze.
- Filtrační deformace: ve chvíli, kdy dojde k nekontrolovanému průsaku tělesem hráze.
- Porušení v důsledku účinku vln.



Obr. 7 Možné příčiny poruch hrází (převzato, Kotaška et., al 2019).

3.1 Statistika poruch

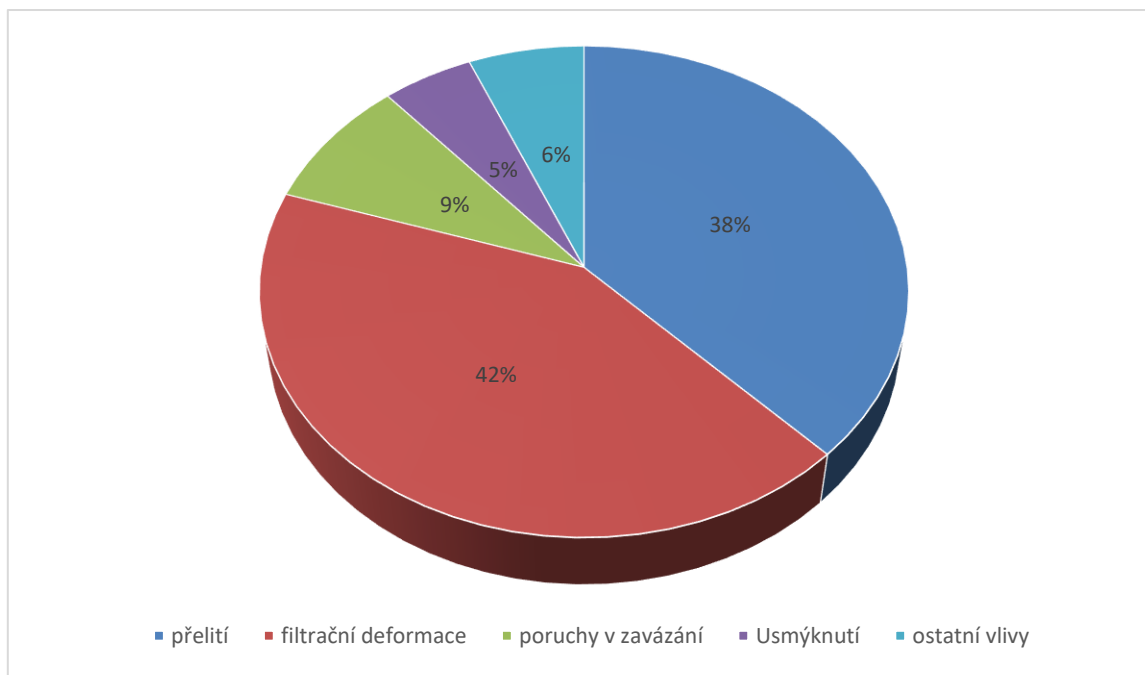
Poruchy hrází se vyskytují na celém světě, a proto jsou předmětem zájmu mnoha odborníků zabývajících se jejich samotnou stavbou, provozem a opravami. Kotaška et al. (2019) provedli

analýzu zastoupení typů porušení do roku 1985 podle tří vybraných autorů. Dle Fostera et al., (2000) bylo porušení hrází do roku 1986 procentuálně zastoupeno: z 48% přelitím, 46% filtrační deformace, 5% poruchy v zavázání a 1% ostatní vlivy. Statistika Costy, (1985) uvádí, že do roku 1985 bylo porušení více než 200 hrází z následujících příčin: 35% přelití, 38% filtrační deformace, 21% poruchy v zavázání a 6% ostatní vlivy. Schaefer (1992) uvádí jiné statistické údaje a to, že na 220 hrázích bylo porušení v letech 1850-1950 zastoupeno následovně: 30% přelití, 43% filtrační deformace, 15% ztráta stability v podobě usmýknutí, 12% ostatní vlivy. Přehledné procentuální zastoupení poruch je v Tab. 2. Zprůměrované zastoupení příčin poruch hrází dle uvedených autorů je zobrazeno v grafu na Obr. 8.

Z tabulky a grafu vyplývá, že většina porušení je u všech autorů shodně způsobeno dvěma způsoby, a to přelitím (38%) a filtračními deformacemi v tělese hráze (42%), popř. podloží. Autoři (Foster et al., 2000) a (Costa, 1985) ve svých statistikách úplně vynechali porušení hráze způsobené ztrátou stability v podobě usmýknutí a zařadili to mezi ostatní vlivy, za to Schaefer, (1992) to má jako třetí nejčastější poruchu s 15%. Schaefer (1992) opomenul porušení způsobené poruchou v zavázání, které u zbylých dvou autorů dosahuje průměrně 13%.

Tab. 2 Procentuální zastoupení poruch hrází.

Autoři	(Foster et al., 2000)	(Costa, 1985)	(Schaefer, 1992)	Průměr
Přelití (%)	48%	35%	30%	38%
Filtrační deformace (%)	46%	38%	43%	42%
Vady v zavázání (%)	5%	21%	-	9%
Ztráta stability v podobě usmýknutí (%)	-	-	15%	5%
Ostatní vlivy (%)	1%	6%	12%	6%



Obr. 8 Graf zprůměrovaného zastoupení příčin poruch hrází.

Pro lepší názornost zde uvádím údaje podle Říhy (2008), jenž provedl analýzu pro protržené a existující sypané hráze ve světě, kromě Číny a Ruska, ve které uvádí podíl protržených hrází ku počtu hrází v provozu v čase (Tab. 3) a podíl protržených a nově vybudovaných zemních přehrad (Tab. 4).

$$P_p = \frac{\text{počet protržených hrází}}{\text{počet hrází v provozu}}$$

Tab. 3 Podíl protržených sypaných hrází a hrází v provozu (převzato Říha, 2008).

	Počet přehrad v provozu	Počet protržených přehrad	$P_p = \frac{\text{protržené}}{\text{v provozu}} (\%)$
Do 1900	465	33	7,10
1900-1950	2203	75	3,40
1950-2000	14464	124	0,86

Tab. 4 Podíl protržených a nově vybudovaných hrází (převzato Říha, 2008).

	Počet nových přehrad	Počet protržených přehrad	$P_I = \frac{\text{nové}}{\text{protržené}} (\%)$
Do 1900	465	33	7,10
1900-1950	1738	75	4,32
1950-2000	12261	124	1,01

Z tabulek lze vyvodit, že do roku 1900 připadala 1 protržená přehrada na 14 nově vybudovaných. V období 1900-1950 bylo na 1 protrženou přehradu už 35 nově vybudovaných a v období 1950-2000 bylo na 1 protrženou přehradu dokonce 116 vybudovaných. Z vyhodnocených dat lze vyčíst, že podíl počtu protržených přehrad ku počtu přehrad v provozu výrazně klesá.

3.2 Charakteristiky porušení

Jak z předchozí kapitoly vyplývá, nejběžnějšími poruchami zemních sypaných hrází jsou filtrační deformace a přelití koruny hráze, které představují cca 90% všech poruch hrází. Z těchto důvodů jsou oba tyto typy poruch hrází popsány v následujícím textu.

3.2.1 Filtrační deformace

Filtrační deformace jsou nejvyskytovanější poruchou u hrází, které dle předchozí kapitoly dosahují až 42% všech poruch. Toto porušení hráze je charakteristické vysokými průsaky vody tělesem hráze nebo jejím podloží. Nejčastějším filtrační deformací je sufoze, během které v tělese hráze vznikají preferenční cesty. Dalšími filtrační deformacemi rozumíme prolomení těsnícího prvku nebo podloží, které jsou způsobené zvýšenými hydraulickými gradienty v tělese hráze. Méně častou filtrační deformací je zvýšení proudových tlaků, které mohou být spouštěčem ztráty stability návodního nebo vzdušního svahu (Říha, 2010).

Tyto způsoby porušení nastávají, jestliže nejsou jednotlivé části zemního tělesa vhodně navrženy nebo provedeny. Mezi hráze, které byly tímto způsobem protrženy, patří hráz Teton v USA protržená v roce 1976, hráz Lawn lake protržená v roce 1982. V České republice způsobily filtrační deformace v roce 1916 protržení přehrady Velká Desná.

3.2.1.1 Vnitřní eroze (sufoze)

Jedná se o nejčastější filtrační poruchy, během nichž dochází k vyplavování jemnějších částic zeminy prosakující vodou. Během sufoze vznikají preferenční cesty, kterými prosakuje voda a následně vyplavuje další jemné částice (Pašek et al., 1995). Nejvíce náchylné k sufozi jsou hrubozrné zeminy s jemnou výplní. Sufoze se dle způsobu působení dělí na tři druhy: kontaktní, vnější a vnitřní. Dle Rozsypala (2009) vzniká sufoze za následujících podmínek:

- těleso hráze musí tvořit nesoudržné zeminy
- v tělese hráze musí proudit voda
- vyplavený materiál má kam odtékat
- zemina je schopná vytvořit strop na vznikajícím kanálem

Během kontaktní sufoze dochází k postupnému vyplavování zrn na rozhraní zemin s odlišnou zrnitostí. Během tohoto procesu vnikají zrna jemnější zeminy do pórů hrubozrnější zeminy. Následkem kontaktní sufoze může být narušení struktury jemnozrné zeminy a smísení vrstev s původně odlišnou zrnitostí. Nejčastěji s tento jev objevuje v místě kontaktu zemin tvořící konstrukční vrstvu hráze a patním drénem. Jako ochrana proti působení kontaktní sufoze se do tělesa hráze zřizují filtry (Říha, 2010).

K vnitřní sufozi dochází v tělese hráze ve chvíli, kdy v příslušném objemu homogenní zeminy dochází k vyplavování jemných částic v pórech, což má za následek zvětšení pórovitosti a propustnosti. Během tohoto procesu může docházet k vyplavování hrubších zrn a následně k sedání zeminy. Tomuto procesu lze zamezit snížením hydraulického gradientu nebo zhutněním zeminy (Říha et al., 2014).

Vnější sufoze vzniká na styku tělesa hráze s vnějším prostředím. Během tohoto procesu dochází k vyplavování zeminy mimo hráz a mohlo by docházet k vzniku preferenčních cest. Pokud jsou tyto částice zeminy dále odnášeny proudem vody, tak se celý proces urychluje (Říha, 2010).

3.2.1.2 Prolomení těsnícího prvku

Tato porucha nastává v důsledku zvýšených hydraulických gradientů. Tato porucha může být následkem kontaktní sufoze, činností zvířat, nebo kořeny stromů. (Říha et al., 2014).

3.2.2 Přelití koruny hráze

Statistiky poruch sypaných hrází ukazují, že až 40% všech poruch je způsobeno přelitím koruny hráze. Toto porušení je nejrizikovější u protipovodňových hrází, ale může se vyskytnout i u malých vodních nádrží s nedostatečně dimenzovaným bezpečnostním přelivem. Mezi známé

hráze, u kterých se přelila koruna, patří hráz Canyon Lake, hráz Sanford v Severní Karolině nebo hráz Tiware v Indii (Martin et al., 2020).

Během přelití těleso hráze nejdříve odolává účinku proudu přepadávající vody. Ve chvíli, kdy je překročeno kritické smykové napětí, dojde k vývoji zpětné povrchové eroze vymíláním koruny a vzdušního líce a postupným odplavením materiálu hráze. K erozi nejčastěji dochází v nejnižších místech koruny hráze (Jandora et al., 2002).

3.3 Poruchy hrází-příklady

Jak České republice, tak i ve světě v minulosti nastala spousta tragédií v podobě kolapsu hrází. Tyto kolapsy pro nás byli velmi důležité v jejich následných zkoumání a pochopení jejich problémů a následných opatření proti jejich znovu opakováním. To se výraznou měrou povedlo, což potvrzují statistiky z kapitoly 3, které uvádějí, že se v letech 1950-2000 protrhla 1 přehrada na 116 nově vybudovaných oproti letům mezi 1900-1950, kdy se protrhla 1 hráz na 35 vybudovaných. Nejznámějším kolapsem hráze v České republice bylo protržení hráze Desná v roce 1916, při níž umřelo 65 lidí. Ve světě to byli hráz Teton v USA, hráz Beli v Rumunsku nebo hráz Taum Sauk v USA. Do příkladů porušení jsem si vybral hráze Fontenelle a Big bay, u kterých byl zdokumentován průběh porušení.

3.3.1 Porušení přehradní hráze Fontenelle

Sypaná hráz Fontelle byla postavena v roce 1964 na řece Green River v jihozápadním Wyomingu jako zásobní nádrž pro závlahovou vodu. Výška hráze je 42 m a zadržuje vodu o rozloze 0,42 km². Hráz se skládá ze tří vrstev tvořených břidlicemi, pískovci a vápenci. (Zeidan et al., 2017) V srpnu v roce 1965 byly rekordní jarní deště, při kterých se voda v nádrži zvedla 2 m pod korunu hráze. Odpoledne 3. září 1965 si inženýr projektu všiml průsaku kolem výpustního objektu hráze. Průsak se začal zvětšovat a ráno druhého dne dosahoval až 20 m³/s a vznikla kuželovitá erozní dutina 19 m hluboká, 24 m vysoká a 30 m široká. Čtvrtého dne incidentu se zhroutila 5 x 7 m dlouhá koruna hráze (Wiley, 2008). Tento propad byl zasypán kamením z koruny hráze, díky čemuž se zabránilo úplnému protržení hráze. Po dobu incidentu byla nádrž vypouštěna 1,2 m za den. Devátý den, kdy byla voda v nádrži snížena již o 9 m, byla vydána zpráva, v níž se uvedlo, že ohrožení protržení pominulo. Po incidentu byla v hrázi vybudováno betonové těsnící jádro, které má hráz chránit před filtračními deformacemi (Foster et al., 2000).

Jako hlavní důvod protržení se na základě následného vyšetřování uvádí jako hlavní faktor extrémně vysokou hladinu vody v nádrži v důsledku silných dešťů a tání sněhu. Také byl zjištěn

nedostatečně kvalitní filtr na kontaktu tělesa hráze a výpustního objektu, kolem něhož začala vznikat preferenční cesta (Wiley, 2008).



Obr. 9 Porušená hráz Fontenelle (převzato Wiley, 2008)



Obr. 10 Porušená hráz Fontenelle (převzato Wiley, 2008).

3.3.2 Kolaps přehradní hráze Big Bay

Přehradní nádrž Big Bay se nachází ve spojených státech amerických ve státě Mississippi. Hráz byla postavena v letech 1990-1991 a selhala 12 března 2004. Šířka hráze byla 576 m, výška 15 m a maximálním objem nádrže 4 552 718 m³ (Altınakar et al., 2010). Podloží i konstrukční prvky hráze byly převážně tvořeny vysoce náchylnými k erozi prachovými písky a pískovými bahenními materiály, které jsou považovány za nevhodný materiál do konstrukce hráze (Keith, 2004).

I když v průběhu provozu hráze došlo k varovným známkám porušení, tak k protržení došlo v několika hodinách 13 let po uvedení do provozu. Začátek kolapsu začal 12. března v 11:00, kdy technik zodpovědný za inspekci a monitoring hráze zjistil pod vzdušnou stranou jedno místo průsaku o průměru 2,5 cm, který probublával cca 2,5 cm nad povrch rychlostí 3,8 l/s. O hodinu později přivolaný technik popsal průsak vzdálený 6-9 m jihozápadně od drenážní trubky, jako vyplavující materiál stříkající 9-12 m do vzduchu. O pár minut později byl popsán průsak jako 1 m vysoký o průměru 0,5 m. Náhle, oblast kolem průsaku zkapalnila a následně postupovala

rychlá eroze od spodního svahu přehrady směrem po proudu. Následně se začala hroutit koruna hráze. Ve 12:25 začal nekontrolovatelný únik vody z nádrže (Keith, 2004).

Jako příčina porušení se uvádí defekty v drenážním potrubí, nedostatečná kontrola prosakování v centrálním jádru hráze, špatně navržený a zkonstruovaný filtr a nedostatečné vybavení k monitorování hráze. Také nepochopení a nereagování na faktory, které se objevovaly v předchozích letech při chodu hráze. Mezi tyto ukazovatele patřily zvětšené průtoky a změny průtoků ve výstupním potrubí a vytvoření závrtů na návodní straně přehrady (Keith, 2004). Protržení hráze nemělo za následek žádné lidské životy, ale bylo zničeno 58 domů (Altınakar et al., 2010).



Obr. 11 Protržená hráz Big bay (převzato Keith, 2004).



Obr. 12 Protržená hráz Big Bay (převzato Keith, 2004).

4 MONITORING STAVU HRÁZÍ

Monitorování zemních sypaných hrází se v České republice provádí v rámci tzv. technickobezpečnostního dohledu (ve zkratce TBD). Povinnost k monitorování ukládá zákon o vodách (č. 254/2001Sb.), jenž uvádí, že monitoring hrází mají za povinnost správci konkrétního vodního díla.

TBD se zaměřuje na sledování technického stavu vodohospodářských děl. Především se jedná o technickou bezpečnost provozu, stabilitu a zjišťování potenciálních příčin poruch s cílem jejich zamezení. TBD se provádí jak v preventivně, tak k opravě zjištěných škod. Vodní díla se zařazují dle úrovně TBD do I. až IV. kategorie již ve stádiu přípravy stavby vodního díla (Broža, 1987).

V rámci TBD by se měly dle Lukáče, et al., (2006) provádět tyto úkony:

- Monitorování vlastností materiálů v tělese hráze a jejího podloží.
- Ověřování shod jednotlivých parametrů bezpečnosti ve výpočtových modelech se skutečností.
- Identifikování možných anomálií a předejití tak poruchám.

Dle Rozsypala (2001) lze monitoring na základě měřených veličin rozdělit na hlavní, doplňkové a speciální. Jako hlavní se označují měření, na základě nichž je možné posoudit bezpečnost stavby. Patří zde měření pórových tlaků, množství průsaků a přetvoření. Mezi doplňková měření patří zkoumání geologického prostředí, klimatických poměrů a velikostí i charakterem zatížení. Speciální průzkumem se označují geofyzikální metody.

Broža (2000) monitoring přehradních hrází rozčlenil do následujících skupin:

- monitoring přetvoření posunů a deformací
- monitoring podzemních a průsakových vod a jejich důsledků
- monitoring vlivu prostředí, provozu a jiných měření

4.1 Měření posunů a deformací

Při měření posunů a deformací se měří celkové posuny a pootočení vodního díla (celkové posuny a pootočení), relativní posuny a pootočení jednotlivých částí tělesa spolu s podložím a poměrná přetvoření. Ke sledování přetvoření se využívají geodetické a fyzikální metody (Broža, 2000).

4.1.1 **Velmi přesná nivelace**

Tato metoda slouží k měření vertikálních změn na geotechnických konstrukcích (Kratochvíl, 1964). Díky tomu lze sledovat posuny, které jsou vyvolány stlačením nebo odlehčením, při stavbě a provozu hráze. Niveláčnický přístroj je postaven doprostřed mezi nivelačními body, čímž vznikne vodorovná rovina. Výškový rozdíl se následně vypočte z rozdílu čtení na nivelační lati. Tato metoda lze také použít k výškovým změnám v drenážní štolě (Kratochvíl, 1964).

4.1.2 **Extenzometrie**

Extenzometrie slouží k sledování objemových změn v tělese hráze a jejího podloží. K měření se využívají tyčové sondy, které sledují posuny mezi dvěma body. Základním principem je měření změny polohy hlavy extenzometru vůči kotvě. Do jednoho vrtu je možné umístit až pět extenzometrů v různých hloubkách. Extenzometry se obvykle měří přetváření horninového masivu v okolí nebo v nadloží podzemních kaveren, tunelů či šachet (Hrubešová, 2006).

4.1.3 **Inklinometrie**

Pomocí inklinometrického měření se sleduje náklon vrtu od jeho kolmé osy. Měří se pomocí inklinometrické sondy, ve které je zabudován náklonoměr. Sonda se pohybuje v drážkách speciální inklinometrické pažnice, která je zabudována do vrtu. Pomocí inklinometrie se měří posuny vyvolané deformací masivu, jenž jsou kolmé k měřenému profilu. Dle způsobu využití se inklinometrie dělí na dva typy – vertikální a horizontální. Horizontální inklinometrie se využívá k sledování sedání sypaných přehrad, geotechnických konstrukcí, skládek atd. Pomocí vertikální inklinometrie se zjišťuje poloha smykové plochy v sesuvném území (Hrubešová, 2006).

4.1.4 **Fotogrammetrie**

Pomocí fotogrammetrie se u sypaných hrází monitorují deformace. Spočívá v zachycení hráze na fotografické snímky a následném porovnání polohy kontrolních bodů. Díky snímkům je možné zachytit okamžitý stav a zachytit libovolný počet bodů. Tato metoda v minulosti prošla mnohými modernizacemi. V dnešní době se využívá takzvaná digitální fotogrammetrie, která dokáže analyticky vyhodnotit fotogrammetrické snímky. Toto vyhodnocení spočívá v převodu snímkových souřadnic do geodetických souřadnic, pomocí prostorových transformací. (Kněžínek, 2006).

4.2 **Monitoring průsaků a podzemních vod**

Monitoring průsaků a podzemních vod je klíčové pro posouzení technického stavu hráze a jejího bezpečného provozu. Zvýšené množství prosakující vody by mohlo signalizovat možnou

poruchu či nefunkčnost konstrukčních prvků. Způsob monitoringu je důležité navrhnout již před samotnou výstavbou vodního díla. Drenážní systém by měl umožňovat kontrolu funkce těsnících prvků. Je důležité oddělit kontrolu průsaků tělesem hráze a podloží a zamezit vnikání jiné vody do odvodňovacího systému. Mezi hodnocené parametry účinků průsaků patří pórový tlak, množství průsaků přes odvodňovací systém a sledování výšky hladiny vody, která prosakuje tělesem hráze (Hrubešová, 2006).

4.2.1 Monitoring pórového tlaku

K měření pórového tlaku se využívají otevřené nebo uzavřené piezometry. Jejich výběr závisí na očekávaném reakčním času a tlaku (Hrubešová, 2006). Ten je důležitý ve chvíli, kdy se měří v nepropustných horninách s rychlým kolísáním tlaku podzemní vody. Piezometry se umísťují přímo do zeminy (piezometr je opatřen hrotem), nebo do vrtu (bez hrotu) (Votruba et al., 1978).

4.2.2 Měření průsaků

Měření velikosti průsaků na výtocích z drenážního systému hráze se provádí buď měrnými přelivy (kontinuální měření), nebo čerpáním stálého objemu z jímky (periodické měření), (Votruba et al., 1978). Jinou možností je, velikost průsaků odhadnout z průtoku v korytě pod vodním dílem. Depresivní křivka se v tělese hráze sleduje pomocí piezometrických vrtů (Broža, 1987). Výšky hladiny podzemní vody se monitorují jak v samotném tělese zemní hráze, tak i v blízkém okolí, z důvodu sledování změn vyvolaných provozem vodního díla (Kratochvíl, 1964).

4.3 Sledování vlivů prostředí a provozu

Vliv provozu a prostředí působí na sypané hráze většinou pozvolna. Tyto vlivy jsou sledovány při rutinních kontrolách, které jsou součástí obchůzek, během kterých se zaznamenávají informace o klimatických jevech, jako jsou teplota vzduchu a vody v nádrži, srážky a výška sněhové pokrývky. Mezi sledované jevy patří teplota ovzduší a vody v nádrži, srážky, nebo výška sněhové pokrývky. Je také důležité sledovat výšku hladiny vody v nádrži, což má vliv na stabilitu a správnou funkci sypaných hrází (Kratochvíl 1964).

4.4 Geofyzikální metody používané pro průzkum hrází

Geofyzikální průzkum patří mezi neinvazivní metody, díky nimž lze určit podpovrchovou stratifikaci půdních nebo zemních vrstev a makroskopickou charakteristiku půdního prostředí (stupeň nasycení vodou, pórovitost, zrnitost nebo objemovou hmotnost). Používají se jako alternativa k invazivním metodám (vrtané nebo kopané sondy), které jsou finančně a časově nákladné, nebo jako jejich doplnění (David et. al., 2020).

Geofyzikální metody se pro průzkum zemních hrází začaly využívat až v 90. letech 20. století, kdy došlo rozšíření využití geofyzikálních metod i pro mělký půdní horizont (Guo, L. et al., 2020). V současné době se tento průzkum provádí standardně a je komerčně dostupnou službou.

Geofyzikální metody lze při průzkumu sypané hráze použít k identifikaci základové spáry, k lokalizování případných heterogenit, k identifikaci vnitřní struktury hráze, k nalezení depresní křivky, k objevení průsakových cest uvnitř tělesa hráze nebo k lokalizování technických zařízení uvnitř hráze. Mezi metody, které se používají k průzkumu hrází, patří Dipólové elektromagnetické profilování (DEMP), metoda spontánní polarizace (SP), Elektrická rezistivní tomografie (ERT) a georadarová metoda (GPR). Mezi méně využívané metody patří refrakční seismika, která je oproti ostatním metodám finančně a časově nákladnější (Kayode et. al., 2018). Každá metoda má své výhody i nevýhody a používají se jak jednotlivě, tak v kombinaci.

4.4.1 Spontánní polarizace (SP)

Pomocí metody spontánní polarizace se v tělese hráze sleduje filtrační potenciál. Ten vzniká průsakem vody přes těleso hráze. Výsledná interpretace výsledků jsou profilové křivky-grafy elektrických potenciálů. Během jejich pozdější analýz lze určit místa možných průsaků vody hrází (Beneš, 2016). Rozdíly mezi metodami SP a ERT v lokalizování průsakových cest v tělese sypané hráze Sandog v Jižní Koreji zkoumali (Song, et., al 2005). Přičemž potvrdili, že se metoda ERT je více užitečná na detekci míst, které jsou příznivé pro průsak, kdežto metoda SP se více hodí k lokalizaci samotných průsakových cest.

4.4.2 Georadar (GPR)

Pomocí georadarové metody se vysílají vysokofrekvenční elektromagnetické (EM) pulzy do země a registruje se čas příjmu odrazu od podpovrchových rozhraní, které indikují změny EM vlastností. Primárním výstupem je časový řez, který se následně přepočítává na hloubkový řez (Beneš, 2016). Georadar lze využít při ověřování struktury hráze, rozhraní jednotlivých vrstev, při sledování deformací nebo hledání případných trhlin v tělese hráze (Kramer, 2012). Například Morelli et al. (2017) byli schopni pomocí georadarového průzkumu detekovat i zvlnění geotextilie a pod ní zachycenou akumulovanou vodu. Nicméně se jednalo o oblast do 3 m pod povrchem. Tato metoda je uživatelsky přívětivější a výrazně rychlejší než ERT nebo SP a lze ji využít na hrázích se zpevněnou korunou hráze, zároveň se ale s její pomocí jenom odhaduje hloubka detekovaných struktur a má malý dosah (maximálně 5-10 m).

4.4.3 Dipólové elektromagnetické profilování (DEMP)

Dipólové elektromagnetické profilování je elektromagnetická metoda, pomocí které se měří zdánlivý měrný odpor geologického prostředí. Na základě zjištěných odporů indikuje přítomnost vodivých těles v místech měřených profilů a dále vymezuje odporově odlišné polohy proměřovaného horninového prostředí. Díky tomu mohou být pomocí této metody zjištěné tektonické poruchy a porušené zóny, indikující preferenční cesty (Zumr, 2018). Výhodou dipólové elektromagnetického profilování je rychlost, která odpovídá rychlosti georadaru, ale podává vzhledem k horšímu prostorovému rozlišení pouze indikativní informace o stavu hráze a má malý dosah (maximálně 10 m). Proto se hodí pro rychlý průzkum základního materiálového složení a vyhodnocení homogenity tělesa hráze (Sentenac et al., 2017).

4.4.4 Elektrická odporová tomografie (ERT)

Elektrická odporová tomografie (ERT) je prakticky nová a v posledních letech stále častěji využívaná metoda. Principiálně je založena na výpočtu rozložení odporů pod zemským povrchem. Mezi párem elektrod je měřen elektrický potenciál, jenž je vyvolán průchodem stejnosměrného proudu mezi párem dalších dvou elektrod. Následně jsou naměřená data uváděna ve formě "pseudosekcí", které představují předpokládaný rozsah odporů pod zemským povrchem (David, 2020). Pomocí optimální konfigurace elektrod pak může podat kvalitní výsledky různých typů struktur. Při průzkumu sypaných hrází se zkoumá vnitřní struktura hráze, lokalizování předkvartérního povrchu, technické zařízení uvnitř hráze a je s ní také možné nalézt preferenční cesty (Loke, 1999). Hlavními výhodami ERT je, že dokáže přesně vymezit hloubkové změny rezistivity prostředí a lze zvolit hloubkový dosah měření. ERT je díky své univerzálnosti nejčastěji používaná geofyzikální metoda pro monitorování vnitřní struktury zemních hrází (Al-Fares, 2011).

Během měření pomocí ERT lze zvolit rozestup elektrod 1,2,3,4, 5 m. Jestliže jsou jednotlivé elektrody od sebe více vzdálené, tím se elektrický proud dostává do větších hloubek a naopak. Při menší vzdálenosti elektrod se však dostává podrobnější složení horninového prostředí v menších hloubkách (Karous, 1989). Pro měření lze zvolit několik možností uspořádání elektrod. Nejvíce používanými uspořádáními je uspořádání podle: Wenner, Wenner-Schlumberger, Schlumbergerovo uspořádání, přičemž má každá z nich výhody i jisté omezení (Loke, 1999).

Wennerovo uspořádání: Páry proudových elektrod se rozmisťují tak, aby vzdálenost mezi přilehlými elektrodami byla stejná (Lowrie, 2007). Toto uspořádání se tedy spíše využívá k určení vertikálních změn v horizontálně uložených vrstvách (Loke, 1999).

Schlumbergerovo uspořádání: Při tomto uspořádání se vzdálenosti mezi elektrodami liší. Během tohoto uspořádání se vzdálenost mezi proudovými elektrodami mnohem větší než vzdálenost mezi potenciálovými (Lowrie, 2007).

Uspořádaání Wenner-Schlumberger: toto uspořádání je v podstatě něco mezi Wennerovým a Schlumbergovým zapojením. Toto uspořádání je úměrné citlivé jak k vertikálním, tak k horizontálním strukturám. V oblastech, kde je předpokládán výskyt obou struktur, je toto uspořádání dobrým kompromisem mezi uspořádáními Wennerovým a dipól-dipól. Hloubka dosahu je při tomto uspořádání o 10% větší, než při Wennerově uspořádání s totožnou vzdáleností elektrod(Loke, 1999).

5 VODNÍ DÍLO R3 HÁJECKÁ

Vodní dílo R3 Hájecký se nachází na hájeckém potoce v Praze 15 – Hostivaři. Vlastníkem díla je magistrát hl. m. Prahy a správcem jsou Lesy hl. m. Prahy. Z historických dokumentů se zachoval manipulační řád z roku 1985, žádná jiná komplexnější dokumentace se nezachovala. Sledovaný prostor byl předmětem stavebního zájmu jako přehradního místa od 60. let minulého století a v polovině 70. let bylo vydáno vodohospodářské povolení. Na konci 70. let se započalo s výstavbou a v roce 1984 byla uvedena do provozu (Bláha, 2001). Umístění zemní hráze R3 Hájecká je zobrazeno na Obr. 13.



Obr. 13 Umístění zemní hráze R3 Hájecká.

Vodní dílo R3 Hájecký je průtočná retenční nádrž napájená vodou z Hájeckého potoka, kterým přitéká voda od retenční nádrže R1 Hájecký a dešťovou kanalizací z Jižního Města. V současné době je nádrž využívána především k zachycování nárazových srážek na území Jižního Města – Hájích. Rovněž je díky svému umístění na okraji Hostivařského háje vhodným estetickým prvkem. Nádrž se také využívá k chovu ryb.

Půdorysně je hráz nádrže přímá, kolmá ke směru toku Hájeckého potoka. Hráz je homogenní zemní sypaná tvořena písčitými jíly a jílovitými písky. Pod hrázi se nachází zavazovací ostruha,

na návodní straně je patka z lomového kamene zalitého betonem a na vzdušné straně je kamenný patní drén, který je vyústěn v bočních zdech vývaru sruženého objektu (Bláha, 2001).



Obr. 14 Vzdušný svah hráze.



Obr. 15 Návodní svah hráze.

Pro veškerou manipulaci je hráz vybavena sruženým manipulačním železobetonovým objektem. Jedná se o objekt složený z výpustné a přelivné části, odpadního potrubí, vedeného tělesem hráze a vývaru podhrází.

Přelivovou část tvoří nehrazený kašnový přeliv. Dvě přelivné hrany o celkové délce 9,4 m jsou na úrovni 260,32 m n. m.

V levém břehu nádrže je situován přepouštěcí objekt, který slouží k převádění normálních a mírně zvýšených průtoků Hájeckého potoka mimo VN Hostivař. Úkolem toho zařízení je, aby přítoky dešťové kanalizace Jižního Města co nejméně zhoršovaly kvalitu vody v nádrži.

Nádrž má velikost 80× 150 m a má přibližně tvar rozevřeného U. Při normální výšce hladiny je plocha hladiny 7814 m² a objem 16218 m³. Při maximální hladině dosahuje plocha hladiny 13043 m² a objem zadržené vody 38493 m³ (Bláha, 2001). Základní technické údaje jsou uvedeny v Tab. 5.

Tab. 5 Základní technické údaje.

Délka v koruně	78 m
Minimální šířka v koruně	11 m
Maximální výška	8,5
Minimální kóta koruny	261 m n. m.
Průměrná plocha hladiny	7814 m ²
Průměrný objem vody	16218 m ³
Plocha při maximální hladině	13 043 m ²
Objem při maximální hladině	38 493 m ³

5.1 Přírodní poměry

5.1.1 Klimatické poměry

Lokalita se podle Quita (1971) nachází v teplé klimatické oblasti T2. Pro tuto jednotku je typické suché a teplé léto, poměrně krátký přechod z mírně teplého jara do léta a z léta do teplého až mírně teplého podzimu. Zima je obvykle krátká, suchá, se sněhovou pokrývkou trvající jen krátce. Základní klimatické informace o lokalitě jsou shrnuty v Tab. 6.

Tab. 6 Základní klimatické informace o lokalitě (převzatu Quit, 1971).

Klimatická charakteristika	Oblast
	T 1
Počet letních dnů	50-60
Počet dnů s průměrnou teplotou nad 10°C	160-170
Počet mrazových dnů	120-130
Počet ledových dnů	30-40
Průměrná teplota v lednu	-3 - -5
Průměrná teplota v červenci	17-19
Průměrná teplota v dubnu	7-8
Průměrná teplota v říjnu	7-9
Průměrný počet dnů se srážkami 1 mm a více	90-100

Srážkový úhrn ve vegetační období	350-400
Srážkový úhrn v zimním období	200-300
Počet dnů se sněhovou pokrývkou	50-80
Počet dnů zamračených	120-140
Počet dnů jasných	40-50

Podle atlasu Česka pro lokalitu vyplývá, že největší četnost výskytu má jihovýchodní (35 %) až východní (26 %) vítr. Četnost výskytu bezvětří je 2,22 %. Vítr o rychlosti do 2 m/s se vyskytuje v 20 % procentech případů, vítr o rychlosti do 6 m/s lze očekávat v 48 % a rychlosti nad 6 m/s se vyskytuje v 28 % případech. III. a IV. třída stability počasí v přízemní vrstvě atmosféry, tj. dobré rozptylové podmínky, se vyskytují v 60 % případů. I. a II. třída stability počasí v přízemní vrstvě atmosféry, tj. špatné rozptylové podmínky se vyskytují ve 2,01 % případů (Tolasz et al., 2007).

5.1.2 Geomorfologické poměry

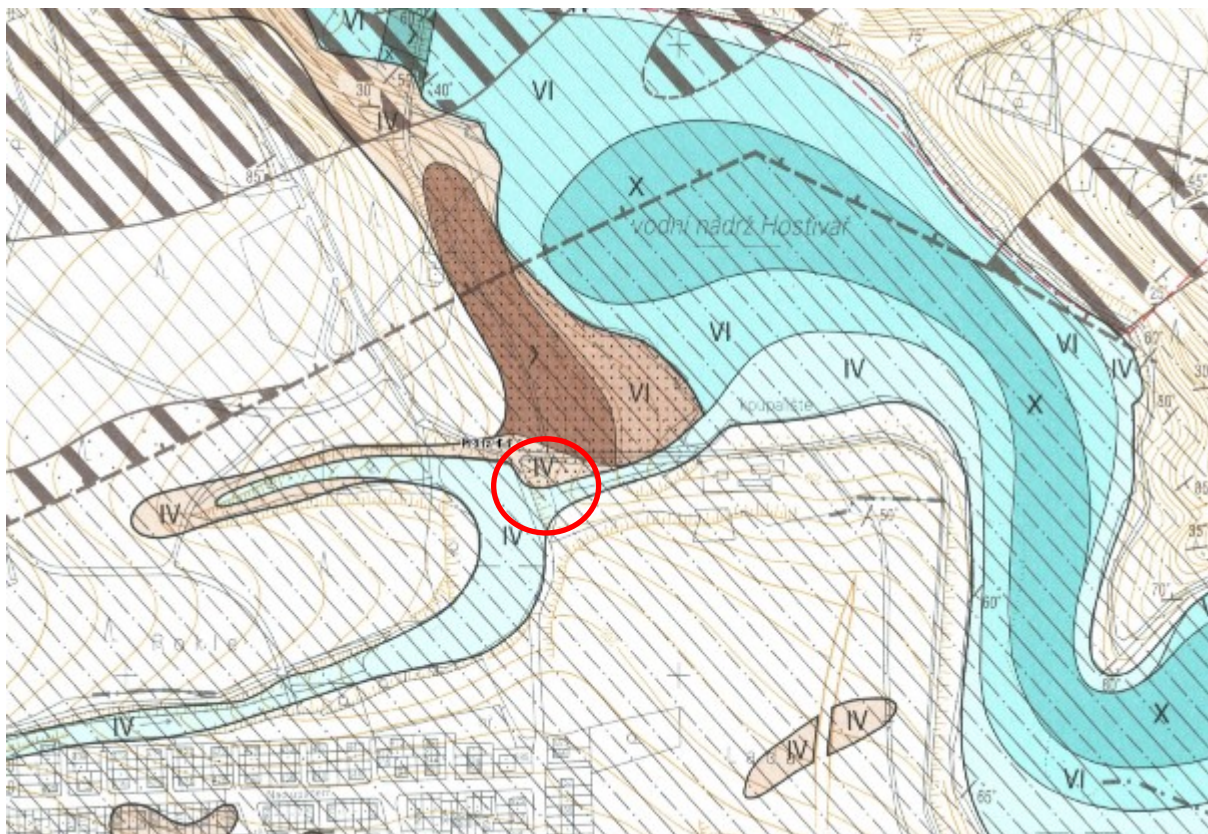
geomorfologického hlediska lokalita leží na jižním okraji Říčanské plošiny, v pražské plošině. Leží v korytě hájeckého potoka jihozápadně od vodní nádrže Hostivař. Jedná se o jednu z několika retenčních hrází v okolí. Okolní terén se svažuje směrem k vodní nádrži Hostivař, do které se posléze Hájecký potok vlévá. Niveleta koruny hráze se nachází ve výšce 263 m n. m. Výška samostatného tělesa hráze dosahuje 8,5 m.

Pražská plošina se nachází ve středních Čechách, zhruba na území hlavního města Prahy a v jeho západním a jihovýchodním okolí. Rozloha celku je 1 128 km², s nadmořskou výškou pohybující se od 170 do 435 m.

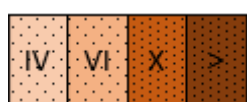
5.1.3 Geologické poměry

Z regionálně geologického hlediska se zájmová oblast nachází v Barrandienu, konkrétně v pražské pánvi, která vznikla jako tektonicky založený příkop s horninami ordovického až devonského stáří (Chlupáč et al., 2011). Předkvartérní podklad tvoří zpevněné sedimenty spodně ordovického stáří patřící do šáreckého souvrství. Jedná se o slídnaté tmavě šedé jílovité břidlice, jejichž vývoj odráží další fázi postupující ordovické transgrese a prohloubení. Místy se můžou vyskytovat křemité konkrce tvořené jemnozrnným křemenem s jílem (Kovanda, 2001).

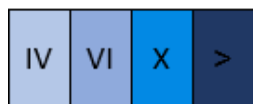
Na svazích okolo hráze je kvartérní pokryv zastoupen deluviálními sedimenty, především hlinitými písky s možným podílem štěrku. Samotná hráz leží na fluviálních holocenních náplavech Hájeckého potoka. Jedná se zejména o jíly až jílovité písky a směrem k bázi přechází do bahnitých štěrkopísků. Mocnost splachových sedimentů se pohybuje okolo 4 m. Na Obr. 16 je zobrazena IG mapa oblasti.



Obr. 16 Výřez účelové IG mapy Prahy lis 4-4 (převzato app.iprpraha.cz).



Fluviálně-deluviální (splachové sedimenty převážně hlinité písky s menším podílem štěrku slabě až středně opracované úlomky ordovických hornin + valounky křemene)



Fluviální sedimenty-holocenní náplavy Botiče a jeho přítoků jílovité hlíny až jíly s podřízenými polohami jílovitých písků, v bazální části místy polohy bahnitých štěrkopísků.



Šárecké souvrstí-tmavošedé břidlice s prachovou příměsí, roubíkovitě rozpadavé, nepravidelně fosilně zvětralé šárecké souvrstí.

Geologická stavba v místě hráze a jejího blízkého okolí byla již v minulosti zkoumána. Informace o archivních průzkumných úkolech je v kapitole 6.1-Archivní šetření Zjednodušené geologické profily archivních sond jsou následující:

Vrt V10 (GF U006530)

0,0-0,3 m – Ornice
0,3-2,8 m – Světlehnědý hlinitý písek
2,8-5,8 m – Hnědá písčítá hlína
5,8-9,4 m – Hnědá sprašová hlína
9,4-12,0 m – Eluvium břidlice v podobě štěrku hlinitého

Vrt VCH-37 (GF P098837)

0,0-0,9 m – Jílovitopísčítá hlína, okrová
0,9-3,2 m – Okrový Hlinitý písek
3,2-5,8 m – silně zvětralá bílá jílovitá břidlice
5,8-18,0 m – navětralá bílá břidlice

Vrt SG1 (GF U006544)

0,0-1,3 m – Šedý bahnitý náplav
1,3-1,7 m – Světle šedá jílovitá hlína, tuhá
1,7-4,0 m – Šedý jílovitý písek s úlomky břidlice

Vrt SG2 (GF U006544)

0,0-1,3 m – Šedý bahnitý jílovitý náplav
1,3-2,5 m – Šedý jílovitý písek
2,5-4,0 m – Šedá jílovitá hlína se střípky břidlice

Vrt S215 (GF U006544)

0,0-0,25 m – Hnědošedá humózní písčítá hlína
0,25-1,5 m – Šedý hlinitý písek

Vrt S216 (GF U006544)

0,0-2,0 m – Hnědožlutá písčítá hlína

Kopaná sonda KS 1 (GF U006544)

0,0-0,9 m – Světle hnědožlutá jílovitopísčítá hlína, pevná
0,9-1,3 m – Písčítá hlína s úlomky břidlic

Kopaná sonda KS2 (GF U006544)

0,0-1,7 m – Světle hnědá písčitojílovitá hlína, tuhá
1,7-3,1 m – Světle hnědá hlína s hojnými úlomky břidlice
3,1-3,5 m – Velké kusy tmavošedé šarečné břidlice, slídnaté, s nehojnou mezivrstevní hlinou

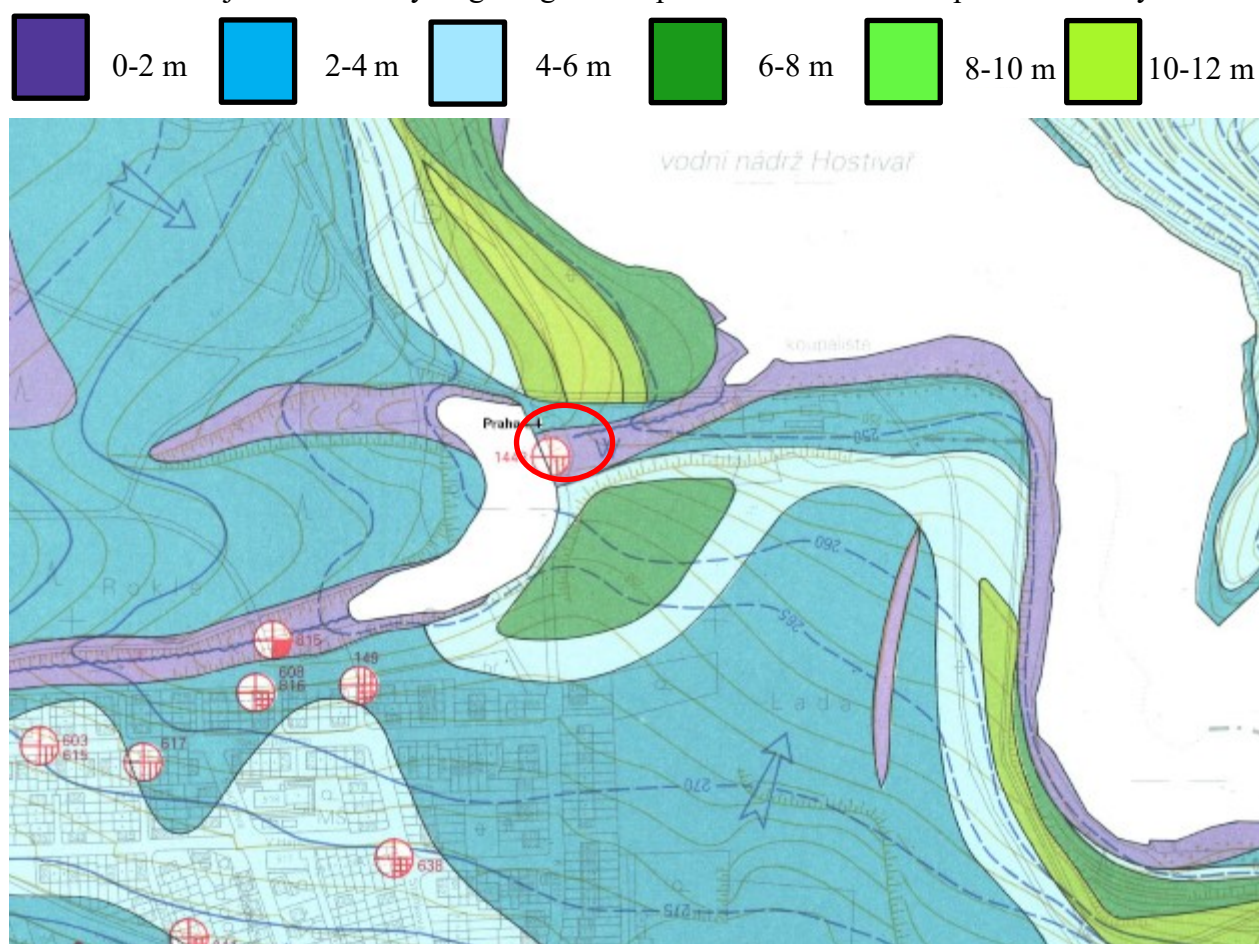
Kopaná sonda KS3 (GF U 006544)

0,0-0,6 m – Písčito-jílová hlína
0,6-1,3 m – Světle hnědožlutý písek

5.1.4 Hydrogeologické poměry

Zkoumaná oblast spadá do hydrogeologického rajonu 6250-Proterozoikum a paleozoikum v povodí přítoků Vltavy. Tento rajón je rozsáhlý a patří pod něj severovýchodní část spodního staršího paleozoika Barrandienu s okolním proterozoikem. Hlavním kolektorem je přípovrchová zóna s maximální hloubkou 30-40 m. Zvodeň je obvykle volná, výjimečně polonapjatá s volnou hladinou kopírující morfologii terénu. Výška hladiny je přímo závislá na srážkách, které jsou hlavní dotací kolektoru. Chemickým složením jsou podzemní vody různorodé. Nejrozšířenějšími typy jsou Ca-(Mg)-HCO₃ a Ca-(Mg)-SO₄ případně jejich směs. Místy se vyskytuje typ Na-HCO₃. Celková mineralizace se pohybuje v nízkých hodnotách, a to v rozmezí 200-400 mg/l. Výjimkou jsou některé vody ordoviku, kde se mineralizace může dosahovat i několika g/l (Olmer et al., 1990).

Přirozená hladina podzemní vody by se měla v okolí koryta potoka nalézat v přípovrchové zóně do dvou metrů pod povrchem. V místech s mocnější morfologií se pohybuje v hloubkách okolo 4 m. Na Obr. 17 je zobrazena hydrogeologická mapa oblasti s hloubkami podzemní vody.



Obr. 17 Výřez hydrogeologické mapy Prahy, list 4-4 (převzato app.iprpraha.cz).

5.2 Stávající situace hráze

Průzkum byl prováděn z důvodu dlouhodobých pozorovaných výtoků vody z levobřežní části vzdušného svahu hráze a z levobřežní části betonové výpusti, které v součtu dosahovaly 2-3 l/s. Také byly na návodní straně tělesa hráze pozorované drobné mechanické deformace.

V době aktivních průsaků (před provedenými pracemi) se hladina vody v nádrži v úrovni 257,8 m n. m. V době provádění průzkumných prací byla nádrž odpuštěna na 256,4 m n. m., tedy o 1,4 m níže než před vypuštěním. Na Obr. 18 jsou znázorněna místa, kterými prosakovala voda z tělesa hráze.



Obr. 18 Znázorněná místa, kterými prosakovala voda tělesem hráze.

6 METODIKA PRACÍ

6.1 Archivní šetření

Geologická stavba v místě hráze byla v minulosti zkoumána geologickým průzkumem v rámci akce: Hostivař-přehrada zemník (GF U 006530). Písemná dokumentaci k tomuto průzkumu mi byla poskytnuta firmou K+K průzkum s.r.o. Ve vzdálenějším okolí hráze byl prováděn geologický průzkum v rámci akce: Závěrečná zpráva o podrobném inženýrsko-geologickém průzkumu kanalizační sběrač Jižní Město (GF P098837). Písemnou dokumentaci k této závěrečné zprávě jsem získal z archivu geofondu.

K podrobnější charakteristice hráze mi poskytly Lesy hl. m. Prahy manipulační řád hráze z roku 1985. Český hydrometeorologický ústav mi dal k dispozici srážkové údaje z oblasti za rok 2020 a 2021.

6.2 Inženýrskogeologický průzkum

6.2.1 Vrtné práce

Vrtné práce na lokalitě probíhaly ve dnech od 13. 5. do 20. 5. 2020. V rámci průzkumu byly provedeny čtyři jádrové vrty MV1 až MV4 na předem určených pozicích, které byly zvoleny po dohodě s objednavatelem, konkrétně Lesy hl. města Prahy. Po vyhloubení byly vrty vystrojeny, aby sloužily jako monitorovací.

Během terénních prací jsem pod dohledem geologa makroskopicky popisoval vrtná jádra. Následně jsme provedli odběr vzorků pro laboratorní stanovení a zařídění zemin a hornin a zjišťovali údaje o zastižené hladině podzemní vody.

Průzkumné vrty byly vyhloubeny metodou rotačního jádrového vrtání s jádrovnicí o vnějším průměru 190 mm. Práce provedl vrtmistr Mgr. David Zeman z firmy ZEMAN-INGEO. K vrtání byla použita vrtná souprava UGB 50M umístěná na nákladním automobilu Praga V3S. Při zastižení materiálu s vyšším odporem nebo zastižení skalního podloží bylo nutné vrt dovtat jádrovnicí o průměru 170 mm. Vrtné jádro bylo po vytažení ukládáno do dřevěných vzorkovnic o dvou řadách s délkou jednoho metru.

Aby ve vrtech mohl probíhat monitoring, tak po ukončených vrtných pracích byly průzkumné vrty vypaženy pomocí PVC pažnice a vystrojeny v souladu s normou ČSN 75 5115.

Při bázi vrtů byla pažnice ponechána bez perforace ve formě kalníku v minimální mocnosti 0,5 m. Perforace byla provedena v místech na míru zastižené litologii vrstev. Do 4 m pod terénem nebyla u pažnic zvolena perforace, aby se mohlo provést těsnění vrchní části do hloubkové

úrovně svrchních hutněných písčitých jíílů. Následně byly otevřené části vrtů obsypány přírodním kamenivem, konkrétně praným kačírkiem frakce 4/8 mm do hloubky 1 m nad svrchní úrovně perforací. Na kačírek byl pokaždé umístěn 0,5 m mocný pískový přechod, s na něj nasedajícím jíilovým těsněním, jenž sahá do úrovně 1 m pod terén. Zbývající volné místo bylo vyplněno betonovým těsněním, do nějž byla vsazena ocelová zárubnice s ochranným zhlavím a šroubovým uzávěrem (Lachman, 2020).

V rámci vrtných prací byly odebrány čtyři vzorky zemin pro stanovení indexových zkoušek, dvě sady vzorků pro stanovení geotechnické zhodnocení skalního podkladu a dva vzorky vody pro stanovení agresivity vody na beton a ocel.

Pozice nových vrtů, archivních vrtů a archivních kopaných sond je vyznačena na Obr. 19. Údaje o provedených vrtech jsou uvedeny v Tab. 7.



Obr. 19 Pozice nových vrtů, archivních vrtů, a archivních kopaných sond

Tab. 7 Přehled provedených sond.

Vrt	X	Y	Z (m n. m.)	Hloubka (m)	Naražená hladina podzemní vody (m p. t.)	Ustálená hladina podzemní vody (m p. t.)
MV1	1 049 344	735 650	261,18	11,5	8,4	9,73
MV2	1 049 366	735 636	261,15	9,0	6,2	5,91
MV3	1 049 347	735 635	260,37	12,0	8,5	9,44
MV4	1 049 361	735 625	260,30	10,8	8,5	8,72



Obr. 20 Vrtná souprava UGB 50M během vrtných prací v prostoru hráze.



Obr. 21 Vrtné jádro z průzkumného vrtu MV1

6.2.2 Laboratorní zkoušky

6.2.2.1 Zkoušky zemin

V rámci průzkumných prací bylo z průzkumných vrtů odebrány 4 vzorky zemin, na kterých byly provedeny indexové zkoušky. Jedná se o stanovení zrnitosti, vlhkosti, konzistenčních mezí a obsahu CaCO_3 . Následně se vzorky zařídili dle normy ČSN 73 6133 (inženýrskogeologický průzkum) a dle normy ČSN 75 2410 (Malé vodní nádrže) se provedlo zařídění vhodnosti do konstrukčních vrstev hráze. Laboratorní zkoušky provedla firma Geotechnický servis. Přehled odebraných vzorků pro indexové zkoušky je uveden v Tab. 8.

Tab. 8 Přehled odebraných vzorků zemin.

Lab. č. vzorku	Místo odběru	Hloubka (m)	Matrice
325	MV1	2,3 – 2,5	zemina
326	MV2	7,2 - 7,3	zemina
327	MV3	8,0-8,2	zemina
328	MV4	9,0 – 9,2	zemina

6.2.2.2 Laboratorní zkoušky skalního podkladu

Při vrtání byly v průzkumných vrtech MV1 a MV3 zachyceny zvětralé šárecké jílovité břidlice tvořící původní geologický podklad, u nichž pak firma INSET s.r.o. provedla laboratorní zkoušky. Konkrétně to byly zkoušky v podobě bodového zatížení a měření objemové hmotnosti, na dvou sadách vzorků. Následně bylo na základě makroskopického popisu vzorků z vrtných jader, stratigrafického a genetického zařazení a výsledků laboratorních zkoušek provedeno zařazení do geotechnických typů hornin. Přehled odebraných vzorků pro zkoušky skalního podkladu je uveden v Tab. 9.

Tab. 9 Označení a hloubkové úrovně odebraných vzorků.

Vrt	Označení vzorku	Hloubková úroveň odběru vzorků
MV1	A1	7,3-7,9
MV1	A2	7,3-7,9
MV1	A3	7,3-7,9
MV3	B1	10,3-10,7
MV3	B2	10,3-10,7
MV3	B3	10,3-10,7

6.3 Hydrogeologický průzkum

6.3.1 Monitoring hladiny vody

Monitoring hladiny podzemní vody trval tři měsíce od 14. 12. 2020 do 30. 3. 2020. V rámci monitoringu jsem měřil každé pondělí hladinu podzemní vody ve všech čtyřech vrtech a v nádrži, kde se hladina měřila z výpustě. Měření probíhalo pomocí elektronického hladinoměru G30 od firmy NPK Europe Mfg. s.r.o.

Cílem monitoringu bylo porovnat závislost výšky hladiny podzemní vody ve vrtech s výškou hladiny vody v nádrži a zároveň porovnat výšky hladin s denním úhrnem srážek v oblasti, které mi poskytl Český hydrometeorologický ústav.

6.3.2 Hydrodynamické zkoušky

Na průzkumném vrtu MV2, ve kterém byla oproti ostatním vrtům podstatně vyšší hladina vody jsem provedl za pomoci Mgr. Vladimíra Lachmana dne 18.12. 2020 hydrodynamické zkoušky zahrnující čerpací a stoupací zkoušku.

Pro čerpací zkoušku bylo použito čerpadlo pumpa 4SKM.

Před zahájením zkoušky se hladina podzemní vody nacházela 6,08 m od horního okraje zárubnice (odměrný bod v úrovni 0,55 m nad úrovní terénu).

Čerpací zkouška byla zahájena ve 12:17 a trvala 35 minut. Po zapuštění čerpadla se aktuální úroveň hladiny podzemní vody nacházela 5,96 m od OB (odměrný bod). Průměrná hodnota čerpacího množství byla 0,011018 l/s. Čerpané množství bylo vypočteno na základě výsledků měření pomocí stopek a odběrné nádoby. Během prvních minut byla hladina snížena na úroveň 8,2 m od OB. Přítok do vrtu byl tak malý, že se čerpací zkouška musela po 35 minutách ukončit, aby nedošlo k poruše čerpadla. Na základě této zkoušky nemohly být spočteny hydraulické parametry. Výška hladiny podzemní vody se v ostatních vrtech nezměnila.

Po zastavení čerpání byl měřen zpětný vzestup hladiny (stoupací zkouška), který trval 3 hodiny a 45 minut. Měření na začátku probíhalo každou minutu a z úrovně 7,92 m od OB hladina za 1 minutu vystoupala na 7,88 tj. o 0,04 m. Stejný vzestup hladiny pokračoval dalších 11 minut. Poté se stoupání zpomalilo a každou minutou hladina stoupala o 0,01 m, trvající následujících 54 minut. Po dalším zpomalení stoupání se měřilo každých pět minut, při němž 1 hodinu hladina stoupala v průměru o 0,03 m za minutu. Poté se znova stoupání utlumilo v průměru na 0,01 m za minutu, a to trvalo do konce stoupací zkoušky.

Prvním hydraulickým parametrem, který jsem počítal, byla transmisivita neboli průtočnost, tedy schopnost hydrogeologického kolektoru propouštět podzemní vodu. Transmisivitu jsem vypočítal dle rovnice 1, která je Jacobovou transformací Theisových rovnic. Druhým zájmovým parametrem byl koeficient filtrace, který nám definuje úměru propustnosti porézního prostředí k vlastnostem proudící kapaliny. Koeficient filtrace byl vypočítán podle rovnice č2 jako podíl transmisivity a mocnosti zvodnělé vrstvy.

$$T = \frac{0,183 \cdot Q}{\Delta s} \quad (1)$$

T-transmisivita (m²/s)

Q-čerpané množství (m³/s)

Δs-hodnoty reziduálního snížení naměřené po ukončení čerpání.

$$K = \frac{T}{M} \quad (2)$$

K-koeficient filtrace (m/s)

T-transmisivita kolektoru

M-mocnost kolektoru.



Obr. 22 Měření čerpaného množství vody.



Obr. 23 Měření hladiny podzemní vody ve vrtu MV1.

6.3.3 Agresivita vod

Z průzkumných vrtů MV1, MV3 a z nádrže R3 hájecký jsme odebrali 3 vzorky vody za účelem zjištění agresivity na beton a na ocel. Vzorky byly odebrány do plastové vzorkovnice a rozbor

byl proveden v laboratořích firmy Monitoring s. r. o. Přehled odebraných vzorků vody pro analýzu agresivity na beton a ocel je uveden v Tab. 10.

Tab. 10 Místa a hloubkové úrovně odebraných vzorků vody.

Odběrové místo	Hloubka odběru vody (m)
R3 Hájecký	2,0
MV1	10
MV2	7,0

6.4 Geofyzikální průzkum

Geofyzikální práce byly provedeny ve dvou termínech 18. 12. 2020 a 14. 12. 2021. Měření jsem prováděl s přístroji vypůjčené společností INSET s.r.o. Následnou interpretaci jsem prováděl za pomoci Mgr. Jakuba Širokého z firmy INSET s.r.o.

Cílem měření bylo identifikovat vnitřní strukturu hráze, rozpoznat předkvartérní podklade a lokalizovat poruchy v tělese hráze. Měření bylo provedeno elektrickou odporovou tomografií (ERT), dipólovým elektromagnetickým profilováním (Demp) a georadarem (GPR).

6.4.1 Dipólové elektromagnetické profilování (DEMP)

Dipólové elektromagnetické profilování proběhlo pomocí aparatury CMD-Explorer od výrobce GF Instruments, který umožňuje měření ve třech kalibrovaných úrovních najednou (2,2; 4,2 a 6,7 m). Měřilo se 1 m nad povrchem pomocí závěsného nosného systému v manuálním módu měření s krokem 1 m.

Během měření bylo provedeno pět podélných profilů (X0-X4). Profil X0 byl měřen na lavičce hráze, profil X1 byl měřen ve středu svahu na vzdušné straně hráze, profily X2 a X3 jsme měřili na koruně hráze a X4 na návodním svahu hráze. Délky profilů a jejich umístění jsou zobrazeny na Obr. 24.



Obr. 24 Měřené profily prováděné metodou DEMP.

6.4.2 Elektrická odporová tomografie (ERT)

Měření pomocí ERT probíhalo v termínu 18.12. 2020. Měření spočívalo v provedení jednoho podélného profilu s celkovou délkou měřeného profilu 158 m. Měřilo se pomocí přístroje ARES od firmy GF Instrument napojeným na 12 V baterii. Systém přístroje se skládá z multielektrodových kabelů, ocelových elektrod, automatické řídicí jednotky a externí baterie (Putiška et al. 2014). Během měření byly elektrody v rozestupu 2 m, aby byla podrobněji prozkoumána struktura hráze. Elektrody byly uspořádány podle Wenner-Schlumberger, které je pro měření na hrázi nejvhodnější. Délka profilu a jeho umístění je na Obr. 25.



Obr. 25: Měřený profil prováděný metodou ERT.



Obr. 26: Měřicí přístroj Ares II při terénním geofyzikálním měření.



Obr. 27: Umístění elektrod v rámci geofyzikálního průzkumu na koruně hráze na lokalitě.

6.4.3 Georadar (GPR)

Měření jsme provedli aparaturou MALÅ GroundExplorer (GX) HDR. Pro účel měření byl vybrán stíněný anténní systém o vysílací frekvenci 80 MHz. Během měření jsme provedli tři podélné profily P0, P2 a P3. Profil P0 byl veden na lavičce na vzdušné straně hráze, druhý profil (P2) byl veden na návodní straně koruny hráze a třetí profil (P3) byl veden na vzdušné straně koruny hráze. Délky profilů a jejich umístění je uvedeno na Obr. 28.



Obr. 28 Měřené profily prováděné metodou GPR.

7 VÝSLEDKY

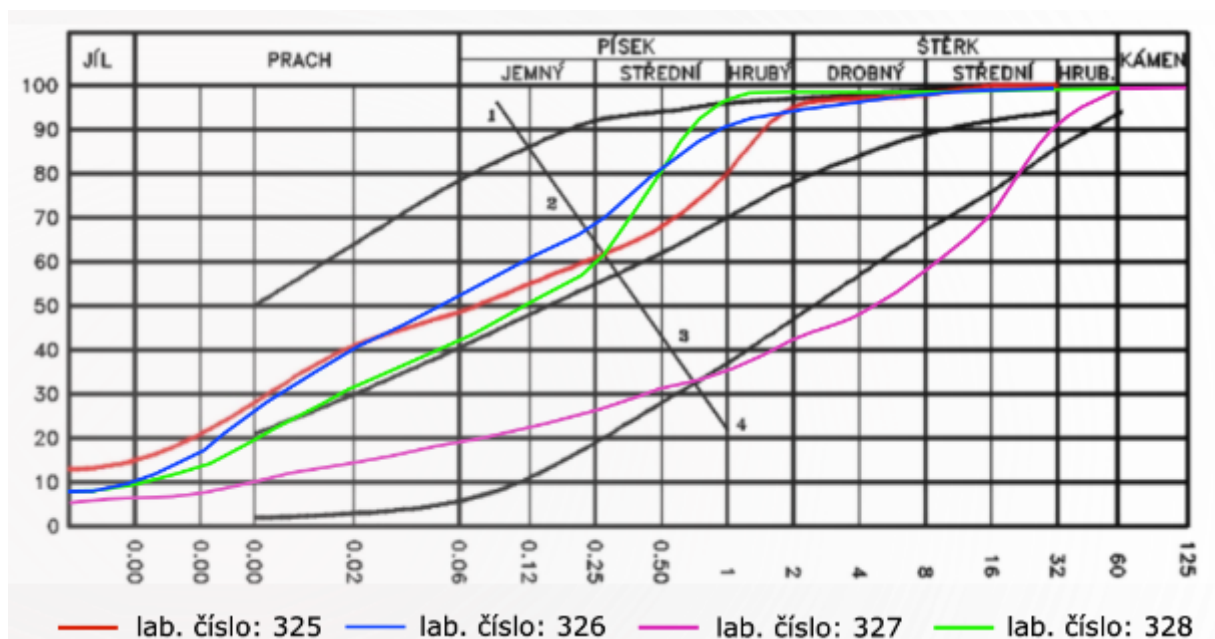
7.1 Inženýrskogeologický průzkum

Indexové zkoušky

K laboratorním zkouškám byly vzorky vybrány tak, aby zachycovali hlavní vrstvy hráze. Vzorky z vrtů MV1 a MV2 reprezentují svrchní vrstvu hutněných jílu písčitých a vzorky z vrtů MV3 a MV4 reprezentují spodní vrstvu tvořenou jílovitými písky až jílovitými šterky. Přehled laboratorních výsledků je v Tab. 11. Následně byly vzorky zaříděny dle ČSN 75 2410 – Malé vodní nádrže podle vhodnosti do konstrukčních vrstev hráze.

Tab. 11 Přehled výsledků laboratorních zkoušek.

Vrt	MV1	MV2	MV3	MV4
Laboratorní číslo	325	326	327	328
Hloubka odběru	2,3-2,5	7,2-7,3	8,0-8,2	9-9,2
klasifikace dle ČSN 73 61335	F4 CS	F4 CS	G5 GC	S5 SC
klasifikace dle ČSN EN ISO 14688	sasiCl	sasclSi	sacGr	sasiCl
Optimální vlhkost dle ČSN 752410 [%]	10-14,7	10-14,7	<17,7	10-14,7
Vlhkost [%]	12,7	16,6	12,4	16,4
Mez plasticity [%]	19	19	19	15
Mez tekutosti [%]	32	34	36	29
Index plasticity [%]	13	15	17	14
Konzistence	pevná	pevná	pevná	tuhá



Obr. 29 Zrnitostní křivky laboratorních vzorků zemin

Tab. 12 Zatřídění vzorků zemin dle vhodnosti.

Odběrový vrt	Lab. číslo	Zatřídění zemin dle ČSN 73 6133	Vhodnost do homogenní hráze dle ČSN 75 2410	Vhodnost do těsnící části dle ČSN 75 2410	Vhodnost do stabilizační části dle ČSN 75 2410
MV1	325	F4 CS	velmi vhodná	velmi vhodná	nevhodná
MV2	326	F4 CS	velmi vhodná	velmi vhodná	nevhodná
MV3	327	G5 GC	Výborná	velmi vhodná	málo vhodná
MV4	328	S5 SC	velmi vhodná	Výborná	nevhodná

Po porovnání výsledků s normou ČSN 75 2410 vyplývá, že je materiál vhodný do konstrukčních vrstev homogenní hráze ze všech vzorků, a to u vzorků MV1, MV2 a MV4 jako velmi vhodný a MV3 jako výborný. Do těsnící části je materiál dle tabulky velmi vhodný z vzorků MV1-MV3 a výborný ze vzorku MV4. Na použití materiálu do stabilizační části je u vzorků MV1, MV2, MV4 nevhodný a u MV3 málo vhodný. Z výsledků vyplývá, že zeminy těleso hráze jsou dle normy ČSN 75 2410 vhodným materiálem do tělesa homogenní hráze.

Geotechnické zhodnocení skalního podkladu

Výsledky z měření objemové hmotnosti a bodového zastižení hornin shrnují Tab. 13 a 14.

Tab. 13 Výsledné objemové hmotnosti.

Vrt	Označení vzorku	Hmotnost (g)	Objem (ml)	Objemová hmotnost (g/cm ³)
MV1	A1	401	180	2,23
MV1	A2	501	223	2,20
MV1	A3	496	223	2,22
MV3	B1	484	214	2,26
MV3	B2	418	185	2,27
MV3	B3	520	231	2,25
průměr				2,24

Objemová hmotnost byla u vzorků v rozmezí 2,20-2,27 (g/cm³), zprůměrovaná na 2,24 (g/cm³).

Tab. 14 Výsledky bodového zatížení (převzato Lachman, 2020).

Označení vzorku	Vrt	hornina	Metráž (m p.t.)	Výška (m)	Šířka (m)	Index pevnosti (MPa)	Korelace indexu pevnosti dle grafu (MPa)	Třída pevnosti
A1	MV1	Jílovitá břidlice	7,3-7,9	0,08	0,1	6,20	5,4	R5/R4
A2	MV1	Jílovitá břidlice	7,3-7,9	0,075	0,06	6,44	5,6	R5/R4
A3	MV1	Jílovitá břidlice	7,3-7,9	0,09	0,04	6,78	5,8	R5/R4
B1	MV3	Jílovitá břidlice	10,3-10,7	0,09	0,09	9,93	9,9	R4
B2	MV3	Jílovitá břidlice	10,3-10,7	0,08	0,065	10,08	9,4	R4
B3	MV3	Jílovitá břidlice	10,3-10,7	0,07	0,05	14,1	11,2	R4

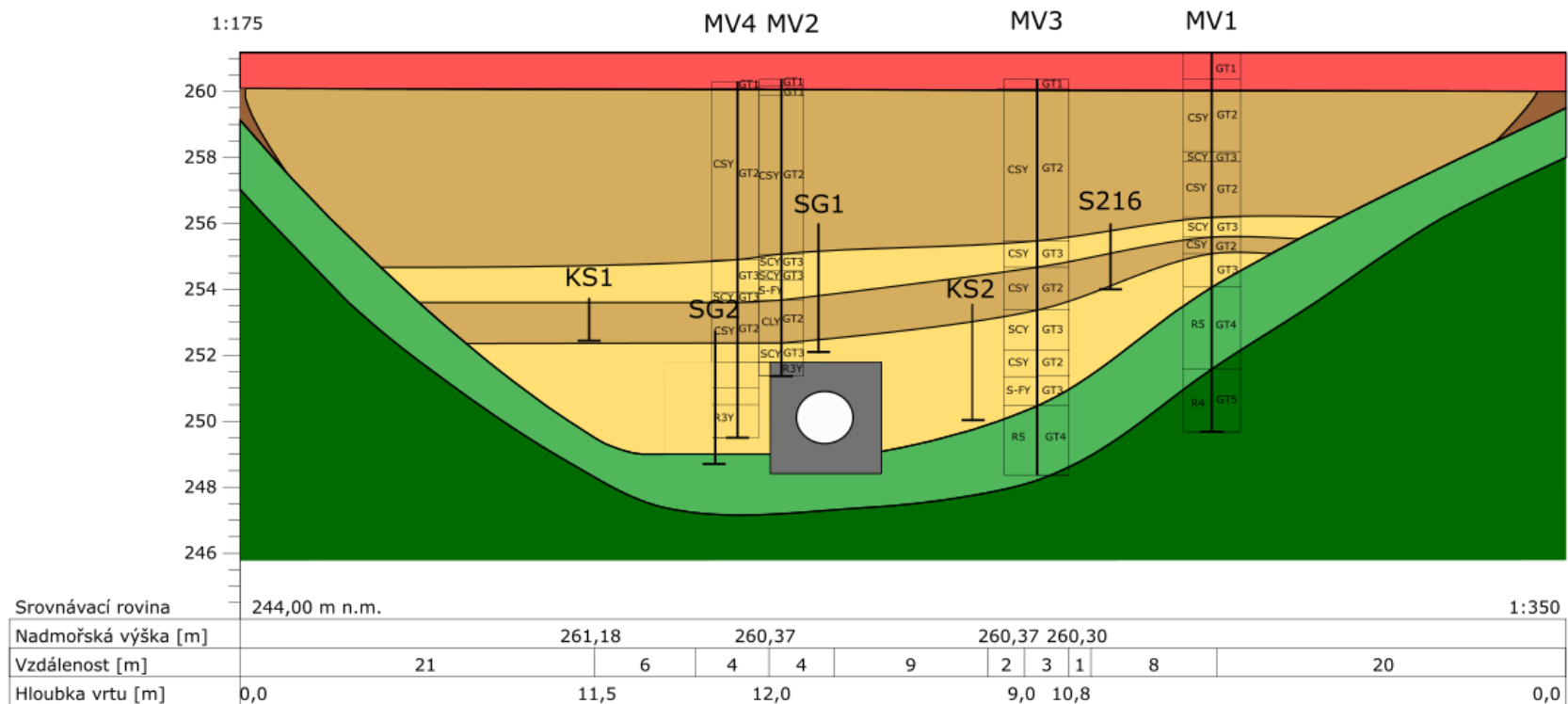
Index pevnosti se dle laboratorních zkoušek u první sady vzorků z vrtu MV1 pohybuje v rozmezí 6,20-6,78 MPa (průměr=6,47 MPa). U druhé sady druhých vzorků se index pevnosti pohybuje v rozmezí 9,93-14,1 MPa (průměr=11,37 MPa). První sada vzorků byla na základě výsledků přiřazena do třídy pevnosti R5/R4 a druhá do třídy R4.

Skalní podloží je nejvhodnějším prostředím pro založení hráze. Zároveň, po porovnání hloubky uložení skalního podloží s místy průsaků na vzdušné straně hráze, je zřejmé, že průsak probíhal nad skalním podložím v tělese hráze. Z tohoto důvodu lze vyloučit, že by se ve skalním podloží vytvořily preferenční cesty, přes které by probíhal průsak hráze.

Na Obr. 30 je znázorněno umístění geotechnického řezu tělesem hráze, který byl sestaven na základě makroskopického popisu vrtných jader a laboratorních zkoušek. Samotný řez je znázorněn na Obr. 31.



Obr. 30 Znáznorněné umístění geotechnické řezu.



Vysvětlivky:

- návážka - konstrukce cesty
- jíly písčité - konstrukční vrstva hráze
- písek jílovitý - konstrukční vrstva hráze

- silně zvětralá břidlice R5
- slabě zvětralá břidlice R4

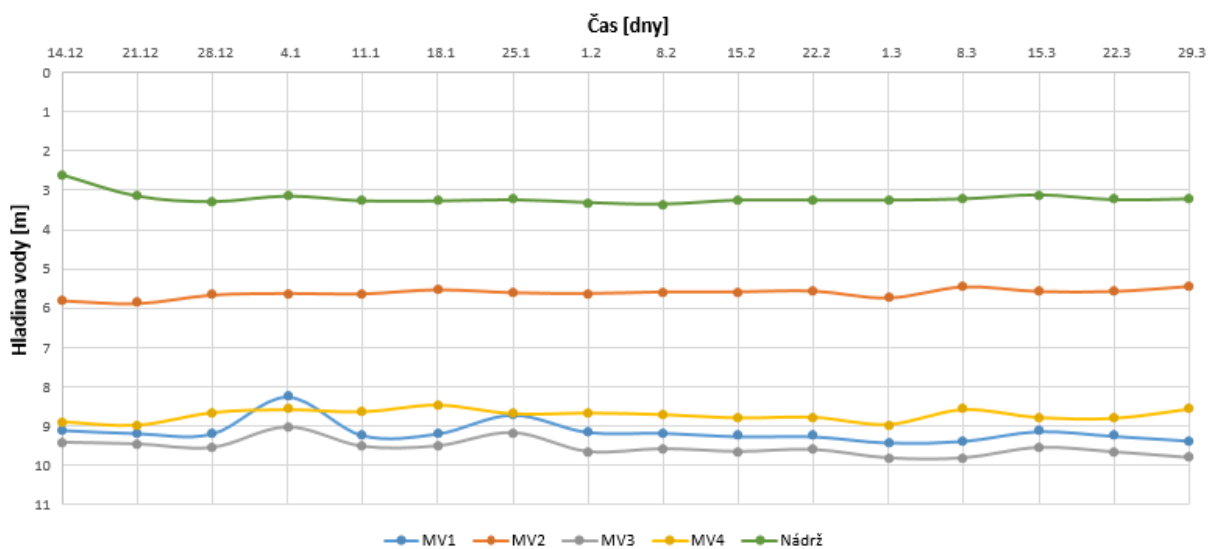
Obr. 31 Geotechnický řez tělesem hráze

7.2 Hydrogeologický průzkum

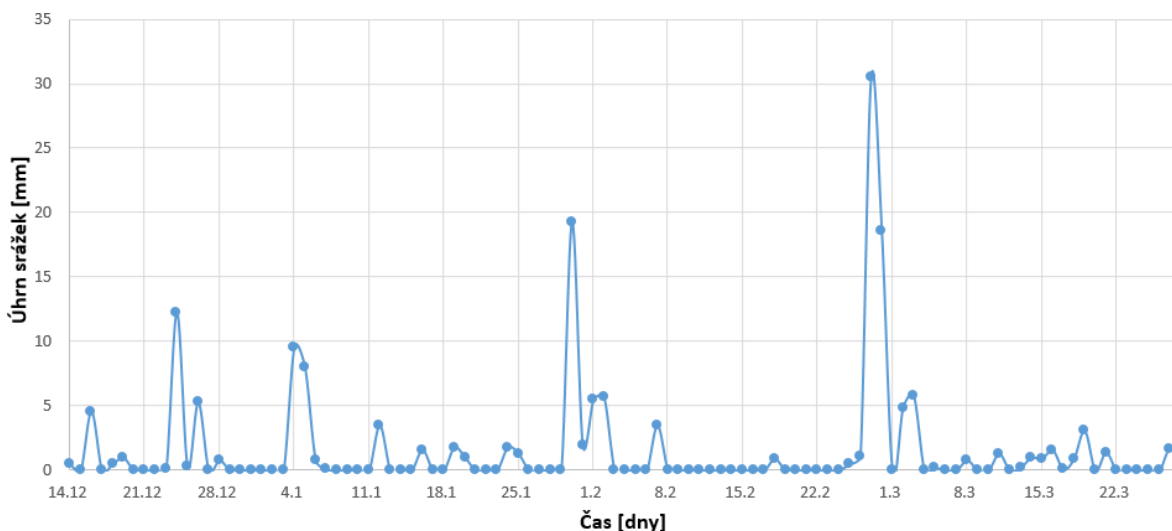
7.2.1 Monitoring hladin vody

Na Obr. 32 jsou znázorněny výšky hladin podzemní vody ve vrtech a výška hladiny vody v nádrži po dobu měření. Výška hladiny vody v nádrži se výrazně neměnila, proto nebylo možné zjistit její vliv na výšku hladin ve vrtech. Hladina podzemí vody se ve vrtech průměrně pohybovala: MV1=9,14 m, MV2=5,61 m, MV3=9,5 m a MV4= 8,72. m Z výsledků monitoringu je patrné, že se hladina podzemní vody ve vrtu MV2 pohybuje podstatně výše (přes 3 m), než u ostatních vrtů. Při měření 4. 1. a 25. 1. byla změřena zvýšená hladina u vrtů MV1 a MV3. Jiné výrazné změny ve výškách hladin podzemní vody se během měření neprojevovalo. Jistou zajímavostí je, že spolu „komunikují“ hladiny podzemní vody ve vrtech MV1 s MV3 a MV2 s MV4.

Na Obr. 33 jsou znázorněny úhrnné srážky v oblasti po dobu měření, které mi poskytl hydrometeorologický ústav. Během měření bylo několik období, kdy docházelo k vydatnějším srážkám. Mezi tyto období patří: 24.12-26.12., 04.01-06.01 a 30.01-02.02. Po těchto deštích nedošlo k ovlivnění hladiny podzemní vody v ani jednom vrtu. V nejdeštivějším období 27.02.-03.03. byly úhrny srážek až 30,5 mm za den. Po těchto deštích došlo k mírnému zvýšení hladiny ve vrtech MV2 a MV4. Na hladinu vody v nádrži neměly srážky žádný vliv.



Obr. 32 Hloubka hladin vody ve vrtech a nádrži pod dobu měření.



Obr. 33 Úhrnné srážky po dobu měření.

7.2.2 Hydrodynamické zkoušky

V Tab. 15 jsou přehledně shrnuty vypočítané hodnoty hydraulických parametrů z vyhodnocených hydrodynamických zkoušek. Z výsledku hydraulické vodivosti je zřejmé, že zeminy splňují požadavky stanovené normou ČSN 75 2410.

Tab. 15 Vypočtené hodnoty hydraulických parametrů.

Q [m ³ /s]	1,11111E-05
Δs [m]	3,960
m [m]	2,1
T [m ² /s]	5,14E-07
Kf [m/s]	2,44748E-07

Q -vydatnost při čerpací zkoušce, Δs – hodnota snížení, m - mocnost kolektoru, T -Transmisivita kolektoru, k -hydraulická vodivost.

7.2.3 Agresivita vod

Na základě rozborů vzorků vody z nádrže R3 Hájecký a z vrtů MV-1, MV2 bylo zjištěno, že se veškeré sledované ukazovatele nachází pod úrovní odpovídající slabé agresivitě dle ČSN EN 206-1. Vzorky vody však vykazují konduktivitu v rozmezí 46,5-99,4 mS/m, což dle normy ČSN 03 8375 IV odpovídá nejvyššímu IV stupni agresivity na ocel. Geochemické parametry vzorků vod jsou shrnuty v Tab. 16.

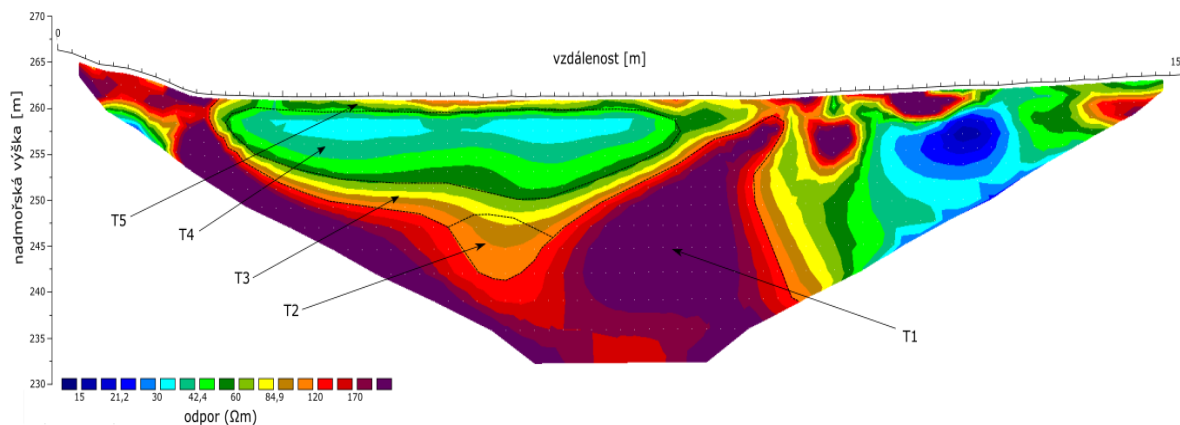
Tab. 16 Geochemické parametry vzorků vod.

Místo odběru	MV1	MV2	R3 Hájecký
pH při 25°C	7,8	7,1	7,5
Elektrická konduktivita (mS/m)	46,5	99,4	64,2
Vápník (mg/l)	50	132	58
Hořčík (mg/l)	12	27	26
Železo (mg/l)	<0,02	<0,02	0,06
Amonné ionty (mg/l)	0,35	<0,1	<0,1
Sírany (mg/l)	38	10	46
Dusičnany (mg/l)	<1	2,3	2,9
Hydrogenuhlíčitany (mg/l)	135	397	226
Chloridy (mg/l)	47	85	56

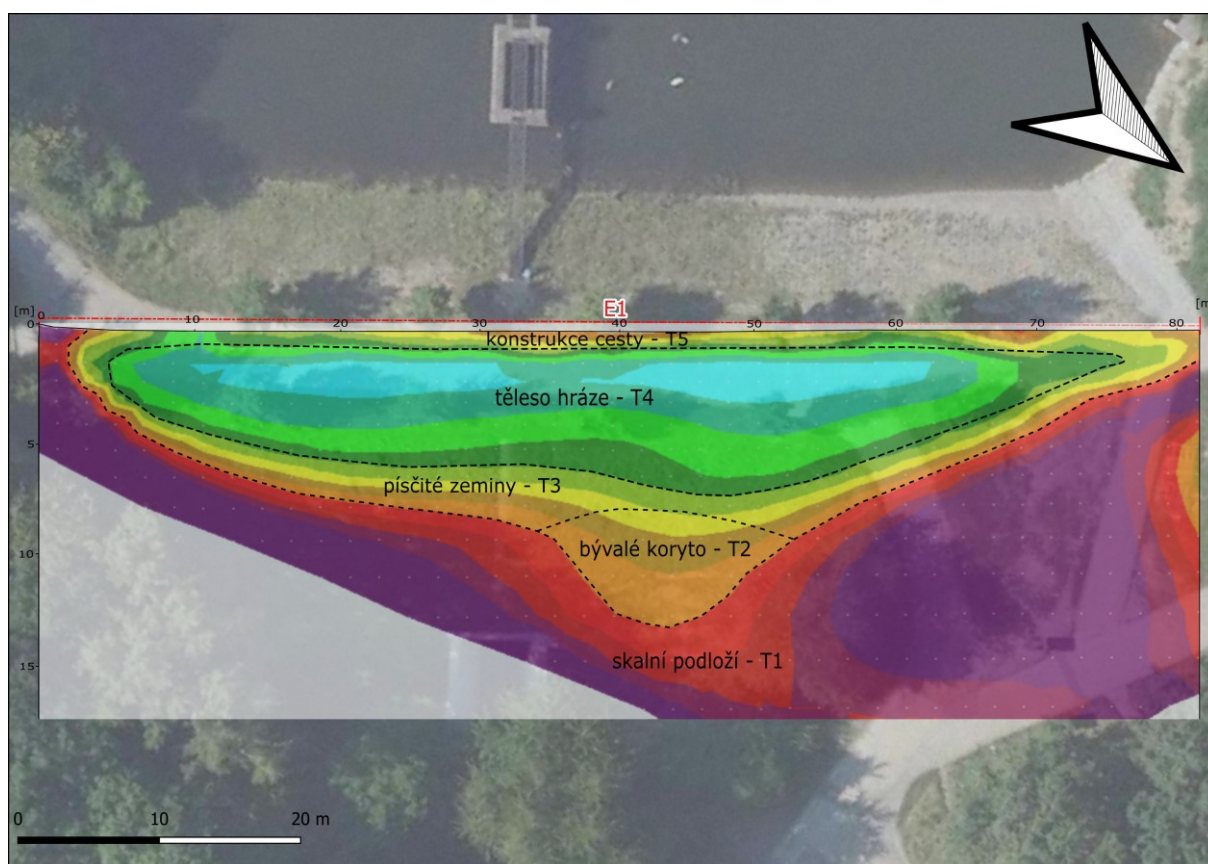
7.3 Geofyzikální průzkum

7.3.1 Elektrická odporová tomografie (ERT)

Na Obr. 34 je elektrický odporový model celého měřeného profilu E1 . Pro větší přehlednost jsem model ořízl jen na samotné těleso hráze (Obr. 35). Na obrázku je několik míst, jenž mají odlišný měrný odpor. Ty jsem pro lepší přehled označil symboly T1-T5. Vyšší odpory ve svrchní části hráze (symbol T 5), jež sahají do hloubky 2 m, jsou dány kombinací konstrukce cesty na koruně hráze a nižší vlhkostí zemin. Jejich odpor činí až 120 Ω m. Nejnižší odpory jsou v hloubce 2-3 m pod terénem (symbol T4). Jedná se o jemnozrnné zeminy, které tvoří těleso hráze. Jejich měrné odpory začínají už od 30 Ω m. Směrem k bázi hráze je vidět nárůst odporů (symbol T3), jež odpovídá o přítomnosti písčitých zemin, které byly zastiženy vrty. Odpory těchto zemin dosahují až 120 Ω m. Pod těmito sedimenty se už nachází břidlicové skalní podloží (symbol T1) s odpory od 170 Ω m. Zajímavá je oblast mezi 35 a 50m, kde podloží ustupuje vodivějším sedimentům (symbol T2). V tomto místě nejspíše dříve vedlo koryto hájeckého potoka tvořící písčité zeminy.



Obr. 34 Elektrický odporový model.



Obr. 35 Těleso hráze v elektrickém odporovém modelu.

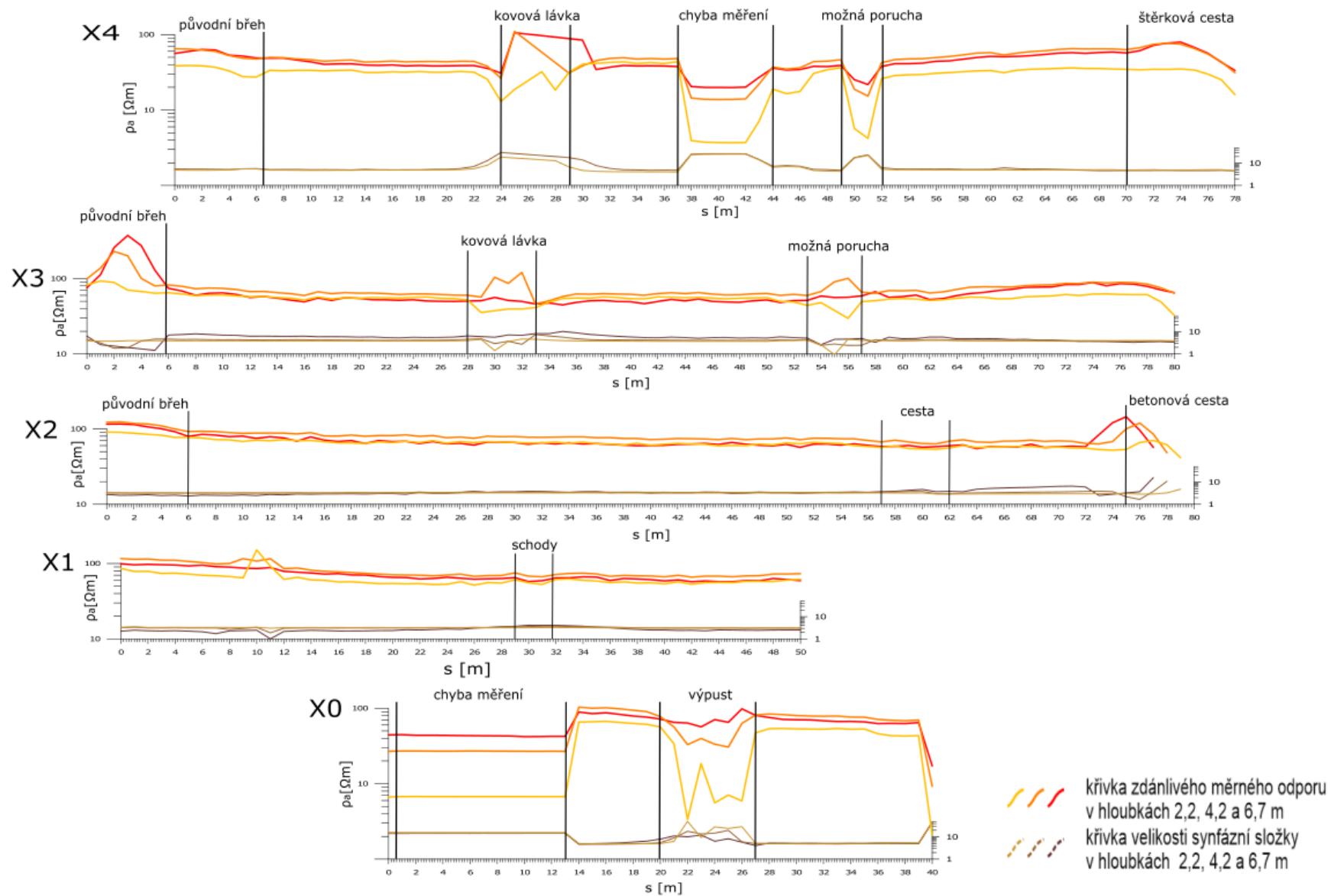
7.3.2 Dipólové elektromagnetické profilování (DEMP)

Na Obr. 36 jsou zobrazeny výsledné křivky zdánlivého měrného odporu (ρ_a) měřených profilů X0-X4. Náhlé změny odporových hodnot indikují přechod mezi odporově odlišnými bloky podpovrchového prostředí, která značí nehomogenity v tělese hráze, ale i místa přechodů na jiný typ konstrukce cest, i místa, kde pravděpodobně došlo k chybám při měření. Nehomogenity, interpretované jako anomálie nebo konstrukčně odlišné prvky hráze byly pro

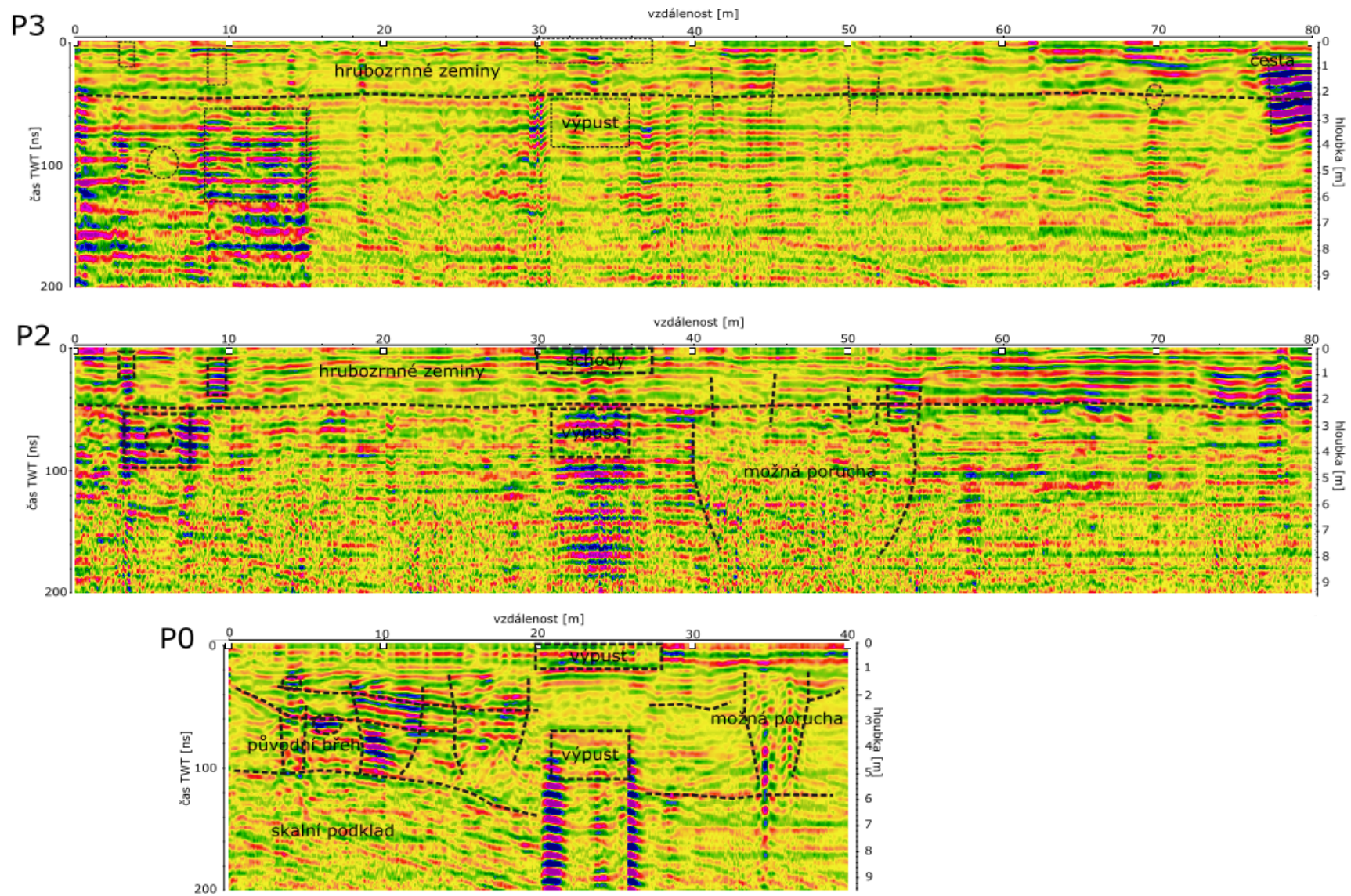
lepší přehlednost vyznačeny. Na profilech X2, X3 a X4 ve staničení 0-6 m mírné zvýšení odporů ($> 100 \Omega\text{m}$) vymezuje původní svah údolí nebo převrstvený materiál v závazání hráze. Snížením odporům k hodnotám 60-80 Ωm v navazujícím úseku se projevil materiál samotné hráze. Opačný konec hráze nebyl pravděpodobně profily zastiženo (ani podle odporových křivek, ani podle rozměru hráze). V místech, kde docházelo k průsakům hráze, bylo v profilech X3 a X4 ve vzdálenosti 49-57 m, zjištěny nehomogenity. Tato místa by mohla indikovat poruchu hráze. V profilech X0, X3 a X4 byly během měření zaznamenané velké odporové změny způsobené kovovou lávkou, popřípadě betonovou výpustí pod ní.

7.3.3 Georadar (GPR)

Na Obr. 37 jsou výsledné georadarové řezy (radargramy) z měřených profilů P0, P2 a P3. Na řezech jsou černou přerušovanou linií vyznačena místa nehomogenit. V úvodních 6 m profilů P2 a P3 je zvýšená odrazivost pravděpodobně zapříčiněná měřením nad původním svahem. Také je u obou řezů dobře znatelné rozhraní vrstev v hloubce 2 m. Svrchní část hráze je totiž tvořena méně vlhkými hrubozrnnými zeminami, nasypnými na hlavním tělese hráze. V řezu P0 je v hloubce 5 m zaznamenáno odrazové rozhraní, které podle vrtných sond představuje přechod tělesa hráze do břidlicového podloží. Nad tímto rozhraním v hloubce 2-5 m ve staničení 2-20 m se projevilo několik zřetelně ohraničených oblastí zvýšené odrazivosti, které mohou znamenat konstrukční odlišnosti v násypu hráze, popř. změny v původně homogenním násypu, které též mohou souviset s denudačními procesy násypu (mohlo by se jednat i o další poruchové místo, ale na jiných průzkumných metodách se to nepotvrdilo). V úseku staničení 33-38 m téhož profilu byla v hloubce 2-5 m zaznamenána další odporová anomálie, která může značit výskyt dutin větších rozměrů nebo obecně oslabení hráze. Tato nehomogenita může souviset s anomáliemi zastiženými metodou demp v profilech X3 a X4, který odpovídá i úzká zóna nehomogenity ve st. 52,5-55 m profilu P2. Toto místo by mohlo představovat zvodnělou vrstvu a tedy místo, kde v hrázi vznikly preferenční cesty. Na všech profilech bylo zastiženo zintenzivnění odrazů v místech betonové výpusti, procházející hrází. Ostatní vyznačené nehomogenity jsou poruchy v signálu, které ale nemusí mít negativní geotechnický význam, V řezech P2 a P3 jsou vyznačeny ještě povrchové objekty (stromy, chodníčky, schody), které uměle zvyšují odrazivost v georadarových záznamech.



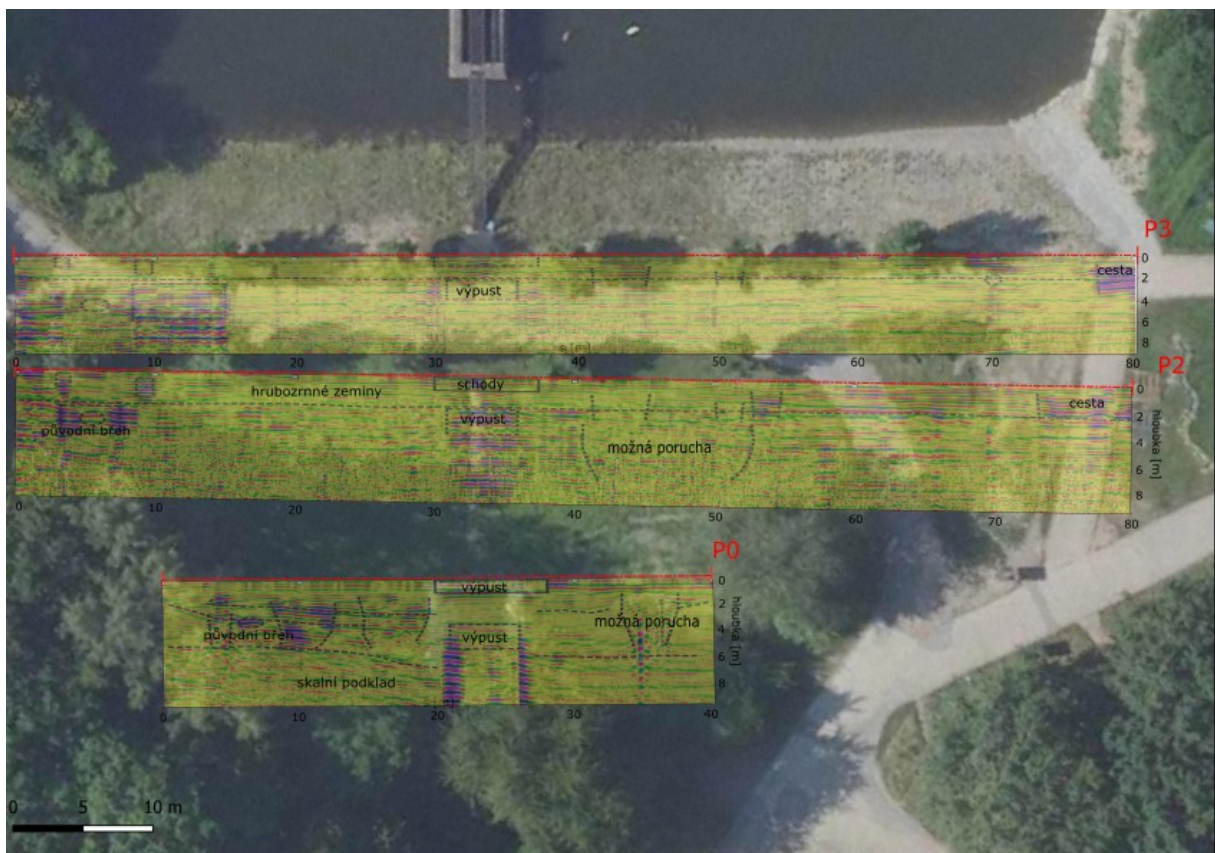
Obr. 36 Křivky zdánlivého měrného odporu měřené metodou DEMP.



Obr. 37 Georadarové řezy (radagramy) z měřených profilů P0, P2 a P3.



Obr. 38 Křivky zdánlivého měrného odporu měřené metodou DEMF.



Obr. 39 Georadarové řezy (radagramy).

8 KOMBINOVANÉ ZHODNOCENÍ A DISKUZE VÝSLEDKŮ

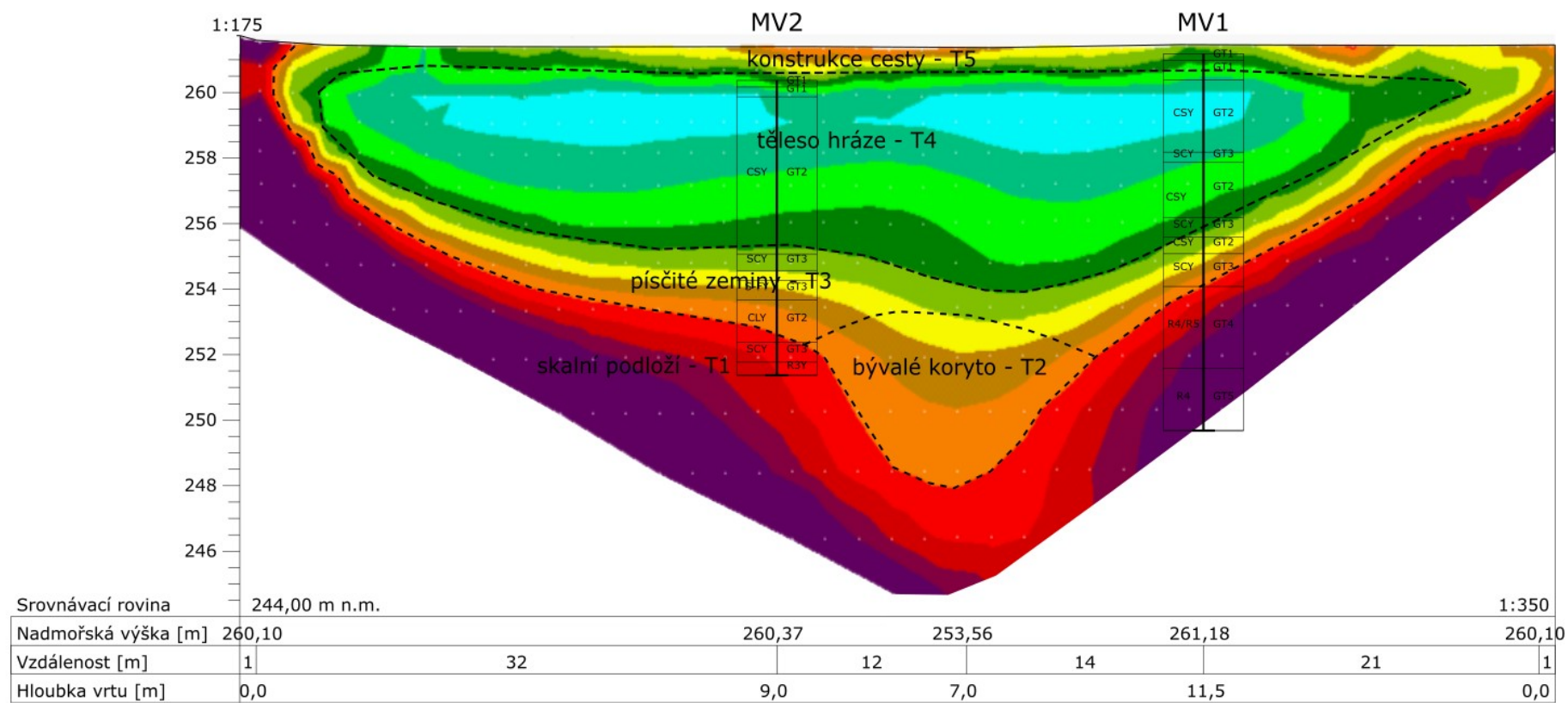
V rámci komplexního zhodnocení stavu hráze a zjištění druhu a místa jejího porušení byly provedeny rešeršní, geologické, hydrogeologické a geofyzikální práce.

V rámci archivní rešerše byly studovány archivní geologické zprávy provedené v místě hráze a jejího blízkého okolí. Jelikož byly všechny archivní práce prováděny před výstavbou hráze, neměli žádný přínos k určení složení hráze. Přínosem archivních zpráv byly jen informace o hloubce uložení skalního podloží, které bylo dle archivních vrtů okolo 250 m n. m..

Inženýrskogeologický průzkum spočíval ve vyhloubení čtyř jádrových vrtů a odebrání vzorků zemin a hornin. Cílem prací bylo provést dle normy ČSN 75 2410 zatřídění zemin dle vhodnosti do tělesa homogenní hráze. Po porovnání výsledků s normou vyplývá, že zeminy použité na výstavbu hráze jsou vhodným materiálem do tělesa homogenní hráze.

Geofyzikální metodou ERT bylo za cíl vymezení rozhraní vrstev v tělese hráze, hloubku uložení skalního podloží a lokalizování preferenční cesty. Na Obr. 40 je elektrický odporový model proložený vrty MV1 a MV2, kterými měřený profil procházel. Po porovnání řezu s vrty, lze vyvodit, že se pomocí této metody dokázalo poměrně přesně stanovit výškové rozhraní písčitých a jílovitých zemin a skalního podloží v celé délce hráze. Zároveň se podařilo lokalizovat bývalé koryto Hájeckého potoka, které jsme vrtnými pracemi nezachytili. Nicméně jsme nelocalizovali žádné výrazné odporové změny, které by indikovaly výskyt preferenční cesty.

Hydrogeologické práce spočívaly v provedení čerpací a stoupací zkoušky ve vrtu MV2 pro zjištění hydraulických parametrů a tříměsíčním monitoringu hladin podzemní vody ve vrtech a nádrži. Norma ČSN 75 2410 vyžaduje maximální hydraulickou vodivost zemin v tělese hráze $k=5 \cdot 10^{-6}$ m/s. Výsledná hydraulická vodivost z provedených hydrodynamických zkoušek byla $2,44 \cdot 10^{-7}$ m/s. Z toho vyplývá, že zeminy splňují požadavky normy. Monitoringem nebyl zjištěn výrazný vliv srážek na výšky hladin podzemní vody ve vrtech. Jediné mírné zvýšení hladiny bylo ve vrtech MV2 a MV4 po deštích z období 27.02-03.03. Hladina vody v nádrži se po dobu měření výrazně neměnila, z toho důvodu se nebylo možné zjistit její vliv na hladinu podzemní vody ve vrtech.



Obr. 40 Elektrický odporový model s vrtvy MV1 a MV2.

Metodami DEMP a GPR bylo za cíl lokalizovat preferenční cesty v tělese hráze. Měření metodou DEMP spočívalo v provedení pěti profilů X0-X4. Pomocí metody GPR byli provedeny profily P0, P2 a P3. Na Obr. 41 jsou znázorněny měřené profily metodami DEMP a GPR, na kterých se vyskytly anomálie, značící potenciální místa výskytu poruch v tělese hráze. Tyto profily jsem podložil ortofotografickou mapou, abych vyznačil hypotetickou preferenční cestu, kterou mohl probíhat průsak tělesem hráze (vyznačena modrými přerušovanými čarami). Georadarem byly tyto anomálie zaznamenány profily P0 a P2, metodou DEMP to byly profily X3 a X4.

Na návodní straně hráze byly zvýšené odpory zaznamenány profilem X4 ve staničení 48-52 m, v hloubce do 2,2 m pod terénem (259,4-257,2 m n. m.). Profilem X3 (návodní strana koruny hráze) byla potenciální porucha zaznamenána ve staničení 52-58 m, v hloubce do 4,2 m pod terénem (259,4-256,8 m n. m.). Profilem P2 (vzdušná strana koruny hráze) bylo zjištěno nevýrazné zvýšení odrazivosti ve staničení 40-52 m, v hloubce v rozmezí 3,5-7 m pod terénem (257,5-254,0 m n. m.). V profilu P0 měřeném na lavici hráze (nejblíže k místům průsakům) bylo zaznamenáno výrazné zvýšení odrazivosti ve staničení 33-37 m, v hloubce 1,5 m pod terénem (254,5 m n. m.). Po spojení nehomogenit lze vymezit potenciální preferenční cestu v tělese hráze viz Obr. 41. Preferenční cesta se také mohla vytvořit podél výpustního objektu. Nicméně se tato možnost nedala geofyzikálními metodami z důvodu rušivých odporů výpustního objektu ověřit.



Obr. 41 Měřené profily metodami DEM a GPR, kde se vyskytují anomálie, která značí možná místa průsaku tělesem hráze.

8.1 Posouzení použitých metod

Výhodou inženýrskogeologického průzkumu je, že je možné pomocí jádrových vrtů ověřit materiál, kterým je tvořeno těleso hráze. Díky tomu je možné zjistit, jestli je porušení hráze způsobené špatnou volbou materiálu na výstavbu nebo zda došlo k degradaci a sufozi zastíženého materiálu. Nevýhodou je, že nedokáže při provedení menšího počtu vrtaných sond vymezit jednotlivé horizonty zemin a hloubku uložení skalního podloží v celé délce hráze. Také nelze pomocí této metody lokalizovat vytvořenou preferenční cestu. Proto by měla být při porušení hráze filtračními deformacemi využita v kombinaci s metodami DEM, GPR nebo SP. Vrtné práce není obvykle možné kvůli omezené dostupnosti provádět na svazích hráze. Z toho důvodu by bylo vhodné doplnit vrtné práce o dynamické penetrační sondy, které by se daly provést na svazích hráze.

Pomocí hydrodynamických zkoušek lze zjistit, jestli v různých místech hráze splňují zeminy hydraulické parametry stanovené normou ČSN 75 2410. Díky této metodě lze určit, zda je vysoká hladina v konkrétním místě tělesa hráze způsobena vyšší průsakovou křivkou, která nemusí ovlivňovat bezpečnost vodního díla, nebo filtračními deformacemi. Výhodou je, že u

hrázi, kde se nachází monitorovací vrty, ve kterých je možné provést hydrodynamické zkoušky, to je poměrně levná a časově nenáročná metoda. Nevýhodou je, že kromě hydraulických parametrů, nelze pomocí této metody zjistit více informací o stavu hráze a tedy je zapotřebí využít hydrodynamických zkoušek jen v kombinaci s ostatními metodami.

Monitoringem hladin podzemní vody lze zjistit vliv hladiny vody v nádrži na hladinu podzemní vody ve vrtech. Nicméně, při havarijním stavu, se hráze kvůli bezpečnosti obvykle částečně vypouští a následným monitoringem nelze zjistit adekvátní informace. Proto je vhodné, u hrázi, kde se nachází monitorovací vrty, provést před vypuštěním monitoring, který by mohl být využitý k vyhodnocení proudění vody v tělese hráze.

Pomocí geofyzikální metody ERT lze poměrně přesně vymežit rozhraní vrstev hráze. Její výhodou je, že oproti inženýrskogeologickému průzkumu lze rozhraní vymežit v celé délce hráze. Zároveň je to oproti inženýrskému průzkumu méně ekonomicky nákladná a rychlejší metoda. Nicméně nepodává žádné informace o vlastnostech zemin tvořící těleso hráze a měla by být využita v kombinaci s inženýrskogeologickým průzkumem. Při průzkumu hráze je možné provést méně vrtaných sond pro zjištění materiálového složení hráze a následně pro vymezení rozhraní využít tuto geofyzikální metodu. Díky této kombinaci je možné rozlišit jednotlivé horizonty zemin v celé délce hráze.

Metodami DEMP a GPR lze v hrázi indikovat porušená místa, která značí výskyt preferenčních cest v tělese hráze. Výhodou těchto metod je, že je lze provádět i na málo dostupných místech. Nicméně nedávají žádné informace o složení hráze, či proudění vody v hrázi a dosahují jen malých hloubek. Z toho důvodu je tyto metody vhodné využít až ve chvíli, kdy je ostatními metodami ověřena skladba hráze.

8.2 Nepoužité metody

Mezi další metody, které by se daly využít pro průzkum hráze, patří dynamická penetrační zkouška. Pomocí dynamické penetrace by bylo možné vymežit rozhraní zemin a dala by lepší informace o proudění vody v tělese hráze. Její výhodou je, že lze sondy provádět oproti jádrovým vrtům i na svazích hráze. Z toho důvodu se to hodí jako doplněk právě k jádrovým vrtům.

Další metoda, která nebyla využita, je geofyzikální metoda spontánní polarizace. Tato metoda se považuje za nejvhodnější pro lokaci zvodnělých preferenčních cest v tělese hráze. Ve chvíli, kdy je ale hráz vypuštěná a preferenčními cestami neprosakuje voda, je lepší tuto metodu nahradit metodami DEMP a GPR. Z tohoto důvodu nebyla využita ani při měření v této práci.

9 ZÁVĚR

V rámci diplomové práce byla v úvodu provedena vlastní rešerše, která se věnuje problematice zemních sypaných hrází. Podrobně bylo popsáno téma materiálového složení a konstrukčních prvků s ohledem na zavedené normy a předpisy. Dále v textu byly popsány typy poruch, jejich charakteristiky, příčiny a statistiky jejich četnosti výskytu. Závěr rešeršní části je věnován monitoringu sypaných hrází.

Cílem praktické části diplomové práce bylo zhodnocení průzkumných metod používaných k ověření stavby a indikaci poruch hráze. Za tímto účelem byla vybrána zemní sypaná hráz R3 Hájecká, na které docházelo k průsakům přes levobřežní stranu tělesa hráze. Pro posouzení stavu hráze byly použity inženýrskogeologické, hydrogeologické a geofyzikální metody. Na základě inženýrskogeologického zhodnocení bylo zjištěno, že se hráz skládá z jílu písčitých a písků jílovitých, místy až štěrku jílovitých. Tyto zeminy jsou dle normy ČSN 75 2410 vhodným materiálem do tělesa homogenní hráze. Hydrogeologickými zkouškami bylo prokázáno, že zeminy v tělese hráze splňují limit hydraulické vodivosti stanovený normou ČSN 75 2410. Monitoringem nebyl zjištěn vliv srážek ani hladiny vody v nádrži na hladinu podzemní vody ve vrtech, nicméně měření bylo ovlivněno částečným vypuštěním vody z nádrže. Geofyzikální metodou ERT se podařilo rozlišit jednotlivé horizonty zemin v celé délce hráze, a dále metodami DEMP a GPR byla lokalizovaná preferenční cesta. Na základě výsledků bylo provedeno zhodnocení jednotlivých metod a jejich kombinované využití.

Na základě výsledků provedených průzkumů se přepokládá, že průsak hráze probíhal preferenční cestou, která mohla vzniknout na dvou místech hráze. Jedno z možných míst výskytu preferenční cesty bylo zjištěno pomocí metod DEMP a GPR, nachází se v levobřežní části hráze. Druhou možností je, že se preferenční cesta vytvořila podél výpustního objektu, kde jsou hráze obecně velmi náchylné k poruše. Nicméně se tato možnost nedala geofyzikálními metodami z důvodu rušivých odporů výpustního objektu ověřit.

Průběh prací byl ovlivněn částečným vypuštěním vody z nádrže. Kvůli vypuštění bylo nevhodné použít geofyzikální metodu SP, která se obvykle používá k lokalizaci zvodnělých preferenčních cest. Tuto metodu jsme nahradili u hrází méně často využívanými metodami DEMP a GPR. Zároveň nebylo možné kvůli ustálené hladině vody v nádrži zjistit její vliv na hladiny podzemní vody ve vrtech.

SEZNAM PŘÍLOH

Příloha č. 1 Geologická dokumentace vrtů

Příloha č. 2 Fotodokumentace vrtů

SEZNAM ZKRATEK

VD	Vodní nádrž
GPR	Georadar
TBD	Technickobezpečnostní dohled
DEMP	Dipólové elektromagnetické profilování
ERT	Elektrická odporová tomografie
SP	Spontánní polarizace

SEZNAM OBRÁZKŮ

Obr. 1 Homogenní hráz na nepropustném podloží (převzato Vodohospodářská zařízení I, 2012).	2
Obr. 2 Nehomogenní hráz (převzato Vodohospodářská zařízení I, 2012).	3
Obr. 3 Mezní čary zrnitosti zemin převzato (převzato Říha et al., 2014).	4
Obr. 4 Struktura homogenní hráze.	6
Obr. 5 Struktura nehomogenní hráze.	6
Obr. 6 Místa náchylná ke vzniku filtračních deformací (převzato Doležal, 2011).	8
Obr. 7 Možné příčiny poruch hrází (převzato, Kotaška et., al 2019).	11
Obr. 8 Graf zprůměrovaného zastoupení příčin poruch hrází.	13
Obr. 9 Porušená hráz Fontenelle (převzato Wiley, 2008)	17
Obr. 10 Porušená hráz Fontenelle (převzato Wiley, 2008).	17
Obr. 11 Protržená hráz Big bay(převzato Keith, 2004).	18
Obr. 12 Protržená hráz Big Bay (převzato Keith, 2004).	18
Obr. 13 Umístění zemní hráze R3 Hájecká.	25
Obr. 14 Vzdušní svah hráze.	26
Obr. 15 Návodní svah hráze.	26
Obr. 16 Výřez účelové IG mapy Prahy lis 4-4 (převzato app.iprpraha.cz).	29
Obr. 17 Výřez hydrogeologické mapy Prahy, list 4-4 (převzato app.iprpraha.cz).	31
Obr. 18 Znázorněná místa, kterými prosakovala voda tělesem hráze.	32
Obr. 19 Pozice nových vrtů, archivních vrtů, a archivních kopaných sond.	34
Obr. 20 Vrtná souprava UGB 50M během vrtných prací v prostoru hráze.	35
Obr. 21 Vrtné jádro z průzkumného vrtu MV1	35
Obr. 22 Měření čerpaného množství vody.	38
Obr. 23 Měření hladiny podzemní vody ve vrtu MV1.	38

Obr. 24 Měřené profily prováděné metodou DEMP.....	40
Obr. 25: Měřený profil prováděný metodou ERT.....	41
Obr. 26: Měřicí přístroj Ares II při terénním geofyzikálním měření.	41
Obr. 27: Umístění elektrod v rámci geofyzikálního průzkumu na koruně hráze na lokalitě. ..	41
Obr. 28 Měřené profily prováděné metodou GPR.	42
Obr. 29 Zrnitostí křivky laboratorních vzorků zemin	44
Obr. 30 Znázorněné umístění geotechnické řezu.	46
Obr. 31 Geotechnický řez tělesem hráze.....	47
Obr. 32 Hloubka hladin vody ve vrtech a nádrži pod dobu měření.	48
Obr. 33 Úhrnné srážky po dobu měření.	49
Obr. 34 Elektrický odporový model.....	51
Obr. 35 Těleso hráze v elektrickém odporovém modelu.	51
Obr. 36 Křivky zdánlivého měrného odporu měřené metodou DEMP.....	53
Obr. 37 Georadarové řezy (radagramy) z měřených profilů P0,P2 a P3.....	54
Obr. 38 Křivky zdánlivého měrného odporu měřené metodou DEMP.....	55
Obr. 39 Georadarové řezy (radagramy).	55
Obr. 40 Elektrický odporový model s vrty MV1 a MV2.	57
Obr. 41 Měřené profily metodami DEMP a GPR, kde se vyskytují anomálie, která značí možná místa průsaku tělesem hráze.....	59

SEZNAM TABULEK

Tab. 1 Vhodnost různých skupin zemin pro různé části hráze (převzato Staš, 2016).....	5
Tab. 2 Procentuální zastoupení poruch hrází.	12
Tab. 3 Podíl protržených sypaných hrází a hrází v provozu.	13
Tab. 4 Podíl protržených a nově vybudovaných hrází.	14
Tab. 5 Základní technické údaje.	27
Tab. 6 Základní klimatické informace o lokalitě (převzato Quit, 1971).....	27
Tab. 7 Přehled provedených sond.	35
Tab. 8 Přehled odebraných vzorků zemin.	36
Tab. 9 Označení a hloubkové úrovně odebraných vzorků.	36
Tab. 10 Místa a hloubkové úrovně odebraných vzorků vody.	39
Tab. 11 Přehled výsledků laboratorních zkoušek.....	43
Tab. 12 Zatřídění vzorků zemin dle vhodnosti.	44
Tab. 13 Výsledné objemové hmotnosti.	45
Tab. 14 Výsledky bodového zatížení (převzato Lachman, 2020).....	45
Tab. 15 Vypočtené hodnoty hydraulických parametrů.	49

SEZNAM POUŽITÉ LITERATURY

- Al-Fares, W. (2011). *Contribution of the geophysical methods in characterizing the water leakage in Afamia B dam, Syria*. Journal of Applied Geophysics, 75(3), 464-471.
- Altinakar, M., McGrath, M. Z., Ramalingam, V. P., & Omari, H., (2010). *2D modeling of big bay dam failure in mississippi: Comparison with Field Data and 1D Model Results*. River Flow 2010, 547-554.
- Beneš, V., (2016). *Závěrečná zpráva o geofyzikálním monitoringu hráze během napouštění nádrže*. G IMPULS Praha, spol. s r.o.
- Bláha, M. (2001). *Manipulační a provozní řád pro vodní dílo Retenční nádrž R3 Hájecký*. VODNÍ DÍLA- TBD a.s.
- Broža, V., (1987). *Přehrady*, Praha: SNTL - Nakladatelství technické literatury.
- Broža, V., (2000). *Hydrotechnické stavby 10: Přehrady*, Praha: Vydavatelství Českého vysokého učení technického.
- Chlupáč, I., Brzobohatý, R., Kovanda, J., & Stráník, Z. (2011). *Geologická minulost České republiky*, Vydání 2, opravené.
- Costa, J. E. (1985). *Floods from dam failures* (Vol. 85, No. 560). US Geological Survey.
- ČSN 75 2310. (2006). *Sypané hráze*. Český normalizační institut.
- ČSN 75 2410. (1997). *Malé vodní nádrže*. Praha: Český normalizační institut.
- ČSN 03 8375 (1986). *Ochrana kovových potrubí uložených v půdě nebo ve vodě proti korozi*. Český normalizační institut.
- David, V. a kolektiv. (2020). *Vybrané neinvazivní metody průzkumu rybníčních hrází*. Praha: České vysoké učení technické v Praze.
- Doležal, P. (2011). *Malé vodní a suché nádrže: TP 1.19*.
- Foster, M., Fell, R., & Spannagle, M. (2000). *The statistics of embankment dam failures and accidents*. Canadian Geotechnical Journal, 37(5), 1000-1024.
- Guo, L., Mount, G. J., Hudson, S., Lin, H., & Levia, D. (2020). *Pairing geophysical techniques improves understanding of the near-surface Critical Zone: Visualization of preferential routing of stemflow along coarse roots*. Geoderma, 357, 113953.
- Hobst, L. (1984). *Technologie sypaných hrází*, Bratislava: SNTL.
- Hrubešová E. (2006). *Geotechnický monitoring*. dostupné na: <http://fast10.vsb.cz/hrubesova/>.
[https://app.iprpraha.cz/apl/app/atlas-zp/?service\[\]=ig_mapy](https://app.iprpraha.cz/apl/app/atlas-zp/?service[]=ig_mapy). Datum přístupu 17.4. 2021.
- Jandora, J., & Říha, J. (2002). *Porušení sypaných hrází v důsledku přelití*. Econ
- Karous, M. (1989). *Geoelektrické metody průzkumu*. SNTL.
- Kayode, O. T., Odukoya, A. M., Adagunodo, T. A., & Adeniji, A. A. (2018). *Monitoring of seepages around dams using geophysical methods: a brief review*. In IOP Conference Series: Earth and Environmental Science (Vol. 173, No. 1, p. 012026). IOP Publishing.
- Keith A. F. (2004). *Case Study: Big Bay Lake Dam* dostupné na: <https://damfailures.org/>.

- Kněžínek K., (2006). *Poziční zařazení fotodokumentace do geodatabáze*. Bakalářská práce. Masarykova univerzita, přírodovědecká fakulta
- Kotaška, S., & Říha, J. (2019). *Přehled metod modelování porušení zemních hrází*. Vodní hospodářství
- Kovanda, J. (2001). *Neživá příroda Prahy*. Academia, Český geologický ústav, Praha.
- Kramer, N., Wohl, E. E., & Harry, D. L. (2012). Using ground penetrating radar to 'unearth' buried beaver dams. *Geology*, 40(1), 43-46.
- Kratochvíl, S., (1964). *Hydrotechnický výzkum*. Praha: Státní nakladatelství technické literatury, Česká matice technická (SNTL).
- Kratochvíl, S. (1961). *Vodní nádrže a přehrady*. Praha: Československá akademie věd.
- Kratochvíl, J., & Stara, V. (1990). *Přehrady: určeno pro posluchače fakulty stavební*, Brno: VUT.
- Lachman, V. (2020). *Průsaky hráze vodní nádrže R3 Hájecká, Praha – Hostivař*, INSET s.r.o., Divize geologie a geofyziky.
- Loke, M. H. (1999). *Electrical imaging surveys for environmental and engineering studies*. A practical guide to, 2, 70.
- Lowrie, W., (2007). *Fundamentals of Geophysics*, Cambridge University Press, Cambridge, UK.
- Lukáč, M., & Bednářová, E. (2006). *Navrhovanie a prevádzka vodných stavieb: Sypané priehrady a hrádze*. Jaga group.
- Martin, H. Yanites, Brian J. & Edmonds, D. A. (2020). *The 2020 Edenville and Sanford, MI Dam Failures: Geomorphic Change in Response to Catastrophic Flooding*. In: AGU Fall Meeting Abstracts. 2020. p. EP016-10.
- Morelli, G., & Tayyab, H. (2017). *Investigation of seepage through embankment dam using 3D electrical resistivity tomography and 3D ground penetrating rada survey*. In Symposium on the Application of Geophysics to Engineering and Environmental Problems 2017 (pp. 272-273). Society of Exploration Geophysicists and Environment and Engineering Geophysical Society.
- Murthy, G. S. R., Murty, K. G., & Raghupathy, G. (2015). *Designing Earth Dams Optimally. In Case Studies in Operations Research: Applications of Optimal Decision Making* (pp. 129-165). New York, NY: Springer New York.
- Narita, K. (2000). *Design and construction of embankment dams*. Dept. of Civil Eng., Aichi Institute of Technology.
- Olmer, M., & Kessler, J. (1990). *Hydrogeologické rajóny*. SZN.
- Pacina, J., Lendáková, Z., Štojdl, J., Matys Grygar, T., & Dolejš, M. (2020). *Dynamics of Sediments in Reservoir Inflows: A Case Study of the Skalka and Nechranice Reservoirs, Czech Republic*. ISPRS International Journal of Geo-Information, 9(4), 258.
- Pašek, J., & Matula, M. (1995). *Inženýrská geologie II.*, Česká Matice Technická - Technický Průvodce č. 76, Praha.
- Pilarczyk, K. (Ed.). (2017). *Dikes and revetments: design, maintenance and safety assessment*. Routledge.
- Putiška, R., Kušnirák, D., Dostál, I., Lačný, A., Mojzess, A., Hok, J., & Bošanský, M. (2014). *Integrated geophysical and geological investigations of karst structures in komberek, Slovakia*. Journal of Cave & Karst Studies, 76(3).

- Quitt, E. (1971). *Klimatické oblasti Československa*. Academia.
- Rozsypal, A. (2001). *Kontrolní sledování a rizika v geotechnice*. Jaga group.
- Rozsypal, A. (2009). ASB – odborný stavební portál, Voda – rizikový faktor v inženýrských stavbách.
- Říha, J., Sedláček, M., Smrž, P., Veselý, R., & Žatecký, S. (2014). *Návrh a realizace suchých nádrží z pohledu technickobezpečnostního dohledu*. MŽP, CERM.
- Říha, J., (2005). *Riziková analýza záplavových území*. Byd. 1. Brno: Akademické nakladatelství CERM.
- Říha, J., (2008). *Úvod do rizikové analýzy přehrad*. Akademické nakladatelství CERM.
- Říha, J., (2010). *Ochranné hráze na vodních tocích*. Grada Publishing as.
- Sentenac, P., Benes, V., Budinsky, V., Keenan, H., & Baron, R. (2017). *Post flooding damage assessment of earth dams and historical reservoirs using non-invasive geophysical techniques*. *Journal of Applied Geophysics*, 146, 138-148.
- Schaefer, M. (1992). *Dam Safety Guidelines—Technical Note 1: Dam Break Inundation Analysis and Downstream Hazard Classification*. Washington State Department of Ecology.
- Schuster, R. L. (2006). *Interaction of dams and landslides: case studies and mitigation*. US Geological Survey.
- Song, S. H., Song, Y., & Kwon, B. D. (2005). *Application of hydrogeological and geophysical methods to delineate leakage pathways in an earth fill dam*. *Exploration Geophysics*, 36(1), 73-77.
- Staš, J. (2016). *Geotechnické aspekty poruch sypaných hrází*. VŠB-Technická univerzita Ostrava. Fakulta stavební.
- Šálek, J., Kujal, B., & Doležal, P. (1990). *Rybníky a účelové nádrže: Návod ke komplexnímu projektu a diplomnímu semináři*. Vysoké učení technické.
- Tolasz, R., Míková, T., Valeriánová, A., & Voženílek, V. (2007). *Atlas podnebí Česka*. Prague: ČHMÚ, UPOL.
- Václavík, V. (2007). *Účelové vodohospodářské nádrže: učební texty*. VŠB-Technická univerzita.
- Vodohospodářská zařízení I. (2012). *Vodohospodářské stavby* [online]. Ostrava. Dostupné z: <http://hgf10.vsb.cz/546/VHZ1/vyuka/vodohosp/prehrady.html>.
- Votruba, L., Broža, V., & Kazda, I. (1978). *Přehrady*. Praha: České vysoké učení technické v Praze.
- Wiley, R. W. (2008). *The 1962 rotenone treatment of the Green River, Wyoming and Utah, revisited: lessons learned*. *Fisheries*, 33(12), 611-617.
- Zákon č. 254/2001. (2001). *O vodách a o změně některých zákonů*.
- Zeidan, B., Shahien, M., Elshemy, M., & Kirra, M. S. (2017). *Combined seepage and slope stability analysis of failed earthen dams*. In 85 Annual Meeting of International Commission on Large Dams, Prague, Czech Republic (pp. 1-14).
- Zumr, D., David, V., Krása, J., & Nedvěd, J. (2018). *Geophysical evaluation of the inner structure of a historical earth-filled dam*. In *Proceedings* (Vol. 2, No. 11, p. 664). MDPI.