

ČESKÉ VYSOKÉ UČENÍ TECHNICKÉ V PRAZE

FAKULTA STAVEBNÍ

KATEDRA GEOTECHNIKY



STABILITNÍ ANALÝZA SYPANÉ KAMENITÉ HRÁZE

DIPLOMOVÁ PRÁCE

Praha 2022

Vypracoval:

Pavol Časnocha

Vedoucí práce:

Ing. Daniel Jirásko, Ph.D.

ZADÁNÍ DIPLOMOVÉ PRÁCE

I. OSOBNÍ A STUDIJNÍ ÚDAJE

Příjmení: Časnocha Jméno: Pavol Osobní číslo: 462000
 Zadávací katedra: Katedra geotechniky 135
 Studijní program: (N3607) Stavební inženýrství
 Studijní obor: (3607T009) Konstrukce a dopravní stavby

II. ÚDAJE K DIPLOMOVÉ PRÁCI

Název diplomové práce: Stabilitní analýza sypané kamenité hráze

Název diplomové práce anglicky: Stability analysis of a rockfill dam

Pokyny pro vypracování:

Posuďte stabilitu hráze sypané přehrady za 2D a 3D podmínek pro různé návrhové situace. K řešení využijte dostupné analytické a numerické nástroje. Výsledky vyhodnoťte a proveďte závěry.

Seznam doporučené literatury:

Fell, R.: Geotechnical Engineering of Dams. CRC Press, 2018, ISBN 9781138749344

Lukac, Michal a Emília Bednarova. Navrhovanie a prevádzka vodných stavieb: sypané přehrady a hráze. Bratislava: Jaga, 2006. ISBN 80-8076-031-4.

Valstad, T., Hoeg, K., Kjaernsli, B., Rockfill dams: Design and Construction. 1992. ISBN 82-7598-014-3

Kutzner, Ch., Earth and Rockfill Dams: Principle of Design and Construction. 1997. ISBN 90 5410 682 4

Jméno vedoucího diplomové práce: Ing. Daniel Jirásko, Ph.D.

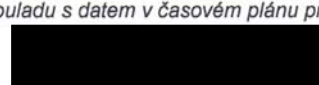
Datum zadání diplomové práce: 16.02.2022

Termín odevzdání DP v IS KOS: 15.05.2022

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



Podpis vedoucího práce



Podpis vedoucího katedry

III. PŘEVZETÍ ZADÁNÍ

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

23.02.2022

Datum převzetí zadání



Podpis studenta(ky)

Prohlášení

Prohlašuji, že jsem tuto diplomovou práci s názvem Stabilitní analýza sypané kamenité hráze vypracoval samostatně, pouze za odborného vedení Ing. Daniela Jiráka, Ph.D. a s použitím odborné literatury a dalších informačních zdrojů. Veškeré zdroje, které byly použity k tvorbě této práce, jsou uvedeny v seznamu literatury.

V Praze dne 22.5.2022

.....
Časnocha Pavol

Poděkování

Rád bych touto formou poděkoval vedoucímu své diplomové práce, panu Ing. Danielu Jiráskovi, Ph.D. za pomoc při zpracování této práce, poskytnutí potřebných informací a materiálů. Dále bych chtěl poděkovat Ing. Lucii Dostalíkové za jazykovou korekturu práce. V neposlední řadě bych také rád poděkoval mé rodině za podporu během celého mého studia.

Abstrakt

Vodní díla, mezi které patří také nádrže a přehrady, jsou jedny z nejvýznamnějších inženýrských staveb. Tyto stavby byly budovány již nejstaršími civilizacemi, a to primárně pro potřeby zavlažování. V průběhu vývoje lidské společnosti význam vodního hospodářství nabýval na důležitosti. Tato práce se zabývala stabilitou vodního díla Darbandikhan navrženého americkou firmou Harza Engineering Company v severním Iráku. Do provozu bylo vodní dílo uvedeno v roce 1961. V roce 2017 došlo k poškození přehrady zemětřesením a kvůli obavám z jejího protržení je vodní hladina v nádrži udržována na nižší úrovni oproti hladině projektované. Z toho důvodu bylo hlavním cílem práce stabilitní posouzení přehrady Darbandikhan v programech GEO5 a Plaxis. Z výsledků obou programů je patrné, že těleso hráze je při zatěžovacích stavech stabilní při uvážení zvolených materiálových charakteristik odhadnutých dle odborné literatury. Význam přehrady Darbandikhan je pro místní region značný, protože slouží například jako zdroj vody pro zavlažování či výrobu energie. Proto je třeba se i nadále problematikou stability a bezpečnosti hráze zabývat, jelikož materiálové vlastnosti z laboratorních a polních zkoušek nejsou dostupné.

Klíčová slova: 3D model, Darbandikhan Dam, GEO5, Plaxis, přehrada, stabilita svahu

Author's abstract

Waterworks, including reservoirs and dams, are the essential engineering structures that were built by the oldest civilizations, primarily for irrigation needs. During the development of human society, the importance of water management became more and more critical. This work dealt with the stability of the Darbandikhan dam, designed by the American company Harza Engineering Company in northern Iraq. The dam was completed in 1961; however, in 2017, it was damaged by an earthquake. Due to the risk of the dam rupture, water level in the reservoir was maintained at a lower level compared to the designed level. Therefore, the main objective of the work was the stabilization assessment of the Darbandikhan dam in the GEO5 and Plaxis programs. From the results of both programs, it is evident that the dam body is load-bearing stable; however, material characteristics estimated according to scientific literature should be considered. The Darbandikhan dam is necessary to the local region because it serves, for example, as a source of water for irrigation and energy production. Therefore, the analysis of stability and safety should carry on since material properties from laboratory and field tests are not available yet.

Key words: 3D model, dam, Darbandikhan Dam, GEO5, Plaxis, slope stability

Obsah

1.	Úvod a cíle.....	1
2.	Vodní hospodářství.....	2
2.1	Vodohospodářské stavby	3
2.1.1	Hydrotechnické stavby.....	3
2.1.1.1	Úpravy odtokových poměrů.....	3
2.1.1.2	Jezy.....	4
2.1.1.3	Vodní doprava.....	5
2.1.1.4	Využití vodní energie.....	7
2.1.2	Hydromeliorační stavby	9
2.1.3	Zdravotně technické stavby	9
3.	Přehrady.....	9
3.1	Konstrukce přehrad.....	12
3.1.1	Zemní a kamenité hráze	13
3.2	Mezní stavy sypaných hrází podle ČSN 75 2310	15
4.	Vodní dílo Darbandikhan	16
4.1	Řeka	20
4.2	Geologie podloží a materiály přehrady.....	21
4.3	Poškození přehrady Darbandikhan	23
4.3.1	Poškození vlivem sesuvů svahů.....	23
4.3.2	Poškození vlivem války	23
4.3.3	Poškození při zemětřesení.....	24
4.3.3.1	Příčné trhliny.....	24
4.3.3.2	Podélné trhliny	25
5.	Výpočtová část	26
5.1	3D model.....	26
5.1.1	Podklady k tvorbě 3D modelu	26
5.1.1.1	Mapové podklady.....	26
5.1.1.2	Podklady geologie.....	27
5.1.1.3	Podklady tělesa hráze.....	29
5.1.1.4	Podklady galerie.....	30
5.1.2	Dílčí 3D modely.....	31

5.1.2.1	3D model terénu.....	31
5.1.2.2	3D model geologie.....	34
5.1.2.3	3D model tělesa hráze.....	35
5.1.2.4	3D model pravé a levé galerie.....	37
5.1.3	Celý 3D model.....	37
5.2	Materiálové charakteristiky.....	39
5.2.1	Materiálové charakteristiky podloží a pokryvu.....	39
5.2.2	Materiálové charakteristiky hráze.....	41
5.3	Posouzení pomocí programu GEO 5.....	43
5.3.1	Vstupy do programu GEO 5.....	44
5.3.2	Výpočtové fáze jednotlivých příčných řezů.....	46
5.3.3	Výsledky programu Stabilita svahu.....	47
5.3.3.1	Výpočet podle Eurokódů.....	54
5.3.3.2	Výpočet bez dílčích součinitelů.....	56
5.3.4	Vyhodnocení programu Stabilita svahu.....	57
5.4	Posouzení pomocí programu Plaxis 2D.....	59
5.4.1	Modelové rozhraní 2D.....	60
5.4.2	Vstupy do programu Plaxis 2D.....	60
5.4.3	Materiálový model 2D.....	61
5.4.4	Sít konečných prvků 2D.....	61
5.4.5	Výpočtové fáze 2D.....	62
5.4.6	Nastavení výpočtových fází.....	63
5.4.7	Výsledky výpočtu 2D.....	64
5.5	Porovnání hodnot 2D výpočtů.....	67
5.6	Posouzení pomocí programu Plaxis 3D.....	68
5.6.1	Importovaný 3D model.....	68
5.6.2	Nastavení výpočtu Plaxis 3D.....	70
6.	Závěr.....	71

Seznam tabulek:

Tabulka 1. Pevnost hornin v prostém tlaku.....	40
Tabulka 2. Orientační parametry hornin v závislosti na pevnosti hornin v tlaku].....	40
Tabulka 6. Materiálové vlastnosti užívané v programu Stabilita svahu	44
Tabulka 7. Stupeň M-C-S a faktorů vodorovného zrychlení K_h	45
Tabulka 8. Stupně stability pro řez 290	54
Tabulka 9. Stupně stability pro řez 330	54
Tabulka 10. Stupně stability pro řez 420	55
Tabulka 11. Stupně stability pro řez 550	55
Tabulka 12. Stupně bezpečnosti svahu pro řez 290	56
Tabulka 13. Stupně bezpečnosti svahu pro řez 330	56
Tabulka 14. Stupně bezpečnosti svahu pro řez 420	56
Tabulka 15. Stupně bezpečnosti svahu pro řez 550	57
Tabulka 16. Tabulka 7 normy ČSN 75 2310 Sypané hráze	57
Tabulka 17. Vyhodnocení řezu 290 (Stupeň bezpečnosti svahu)	58
Tabulka 18. Vyhodnocení řezu 330 (Stupeň bezpečnosti svahu)	58
Tabulka 19. Vyhodnocení řezu 420 (Stupeň bezpečnosti svahu)	58
Tabulka 20. Vyhodnocení řezu 550 (Stupeň bezpečnosti svahu)	59
Tabulka 21. Materiálové vlastnosti užívané v programu Plaxis 2D	61
Tabulka 22. Vyhodnocení výsledků 2D analýz	67

Seznam obrázků a grafů:

Obrázek 1. Staroměstský jez (Praha).....	5
Obrázek 2. Vodní cesty ČR	6
Obrázek 3. Historické mlýnské vodní kolo	7
Obrázek 4. Peltonova turbína	8
Obrázek 5. Francisova turbína	8
Obrázek 6. Kaplanova turbína	8
Obrázek 9. Betonová tížná přehrada.....	11
Obrázek 10. Betonová tížná přehrada.....	12
Obrázek 11. Sypaná přehrada.....	13
Obrázek 12. Přehrada Darbandikhan.....	16
Obrázek 13. Mapa Iráku s vyznačením přehrady	17
Obrázek 14. Tainterova brána na přehradě Darbandikhan	18
Obrázek 15. Pohled na návodní stranu včetně vybavení hráze během budování.....	19
Obrázek 16. Charakteristický řez injekční štolami.....	20
Obrázek 17. Podélný řez injekčními štolami.....	20
Obrázek 18. Příčný řez tělesem hráze Darbandikhan.....	22
Obrázek 19. Podélný řez hrází Darbandikhan	22
Obrázek 20. Sesuvy svahů do nádrže přehrady Darbandikhan	23
Obrázek 21. Příčné trhliny po zemětřesení.....	24
Obrázek 22. Znázornění příčných i podélných trhlin na hrázi	25
Obrázek 23. Vrstevnicová mapa zájmového území s vyznačením budoucího tělesa hráze a geologických vrtů	27
Obrázek 24. Mapa vyznačující polohu a označení průzkumných vrtných prací.....	28
Obrázek 25. Grafické znázornění jádrových vrtů zájmového území	28
Obrázek 26. Dva příčné řezy přehrady Darbandikhan	29
Obrázek 27. Podélný profil s vyznačením těsnící clony	30
Obrázek 28. Podélný řez pravou galerií	30
Obrázek 29. Několik příčných řezů pravé galerie se zaměřením	31
Obrázek 30. Model terénu okolí hráze vytvořen na základě vrstevnic	32
Obrázek 31. Model terénu pod hrází a mimo hráz	33
Obrázek 32. Model terénu aplikace InfraWorks	33
Obrázek 33. Geologické vrty zájmového území Civil 3D	34

Obrázek 34. Model rozhraní geologických vrstev a příčný řez zájmovým územím.....	35
Obrázek 35. Model vnitřních části přehrady (těsnící jádro, filtry, přepad).....	36
Obrázek 36. Model přehrady včetně návodního a vzdušného líce.....	36
Obrázek 37. Celkový pohled v levé části a detail galerie v pravé části.....	37
Obrázek 38. V levé části celkový model ve stínovaném zobrazení a v pravé části model potažený mapovými podklady v realistickém zobrazení.....	38
Obrázek 39. Zobrazení tělesa hráze importovaného na základě souřadnic do Google Earth.....	38
Obrázek 40. Podélný řez hrází s vyznačením řešených řezů.....	43
Obrázek 41. Výsledek řezu 330 podle Eurokódů 1.....	48
Obrázek 42. Výsledky řezu 330 podle Eurokódů 2.....	49
Obrázek 43. Výsledky řezu 330 podle Eurokódů 3.....	50
Obrázek 44. Výsledky řezu 330 podle Eurokódů 4.....	51
Obrázek 45. Výsledky řezu 330 podle Eurokódů 5.....	52
Obrázek 46. Výsledky řezu 330 podle Eurokódů 6.....	53
Obrázek 47. Výsledky řezu 330 podle Eurokódů 7.....	54
Obrázek 48. Geometrie příčného řezu 330 v Plaxis 2D včetně zatížení.....	60
Obrázek 49. Síť konečných prvků Plaxis 2D.....	62
Obrázek 50. Nastavení výpočtových fází programu Plaxis 2D.....	63
Obrázek 51. Výsledek Fáze 1 $F_s = 1.931$	64
Obrázek 52. Výsledek Fáze 3 $F_s = 1.921$	64
Obrázek 53. Výsledek Fáze 5 $F_s = 1.917$	65
Obrázek 54. Výsledek Fáze 7 $F_s = 1.907$	65
Obrázek 55. Výsledek Fáze 9 $F_s = 1.947$	65
Obrázek 56. Výsledek Fáze 11 $F_s = 1.956$	66
Obrázek 57. Výsledek Fáze 13 $F_s = 1.924$	66
Obrázek 58. Průběhy výpočtů stupňů bezpečnosti jednotlivých Safety fází.....	66
Obrázek 59. Porovnání výsledků programu Plaxis 2D a GEO5 (zatěžovací stav a).....	67
Obrázek 60. Porovnání výsledků programu Plaxis 2D a GEO5 (zatěžovací stav b).....	68
Obrázek 61. Porovnání výsledků programu Plaxis 2D a GEO5 (zatěžovací stav c).....	68
Obrázek 62. Porovnání výsledků programu Plaxis 2D a GEO5 (zatěžovací stav d).....	68
Obrázek 63. Model v Rhinoceros 7 Evaluation.....	69
Obrázek 64. Model přehradního tělesa v Rhinoceros 7 Evaluation.....	69

Seznam zkratk a symbolů použitých v práci:

τ	smykové napětí
c	soudržnost zemin
c_{ef}	efektivní soudržnost zemin
σ	normálové napětí
φ	úhel vnitřního tření
φ_{ef}	efektivní úhel vnitřního tření
F_s	stupeň stability
ν	poissonovo číslo
K_h	faktor vodorovného zrychlení
K_v	koeficient svislého zemětřesení
MSK-64	Medvěděvova-Sponheuerova-Kárníkova stupnice
γ	objemová tíha zeminy
γ_{sat}	objemová tíha nasycené zeminy
X	součinitel redukce počátečního pórového tlaku
E_{def}	modul přetvárnosti
k_x	vodorovný součinitel filtrace
k_y	svislý součinitel filtrace
ψ	úhel dilatance

Seznam použitých norem

Platné normy

ČSN 73 6101	Projektování silnic a dálnic
ČSN EN 1997-1	Navrhování geotechnických konstrukcí
ČSN 75 2310	Sypané hráze
ČSN EN 1998-5	Navrhování konstrukcí odolných proti zemětřesení

Neplatné normy

ČSN 73 1001	Základová půda pod plošnými základy
-------------	-------------------------------------

1. Úvod a cíle

Vodní díla, mezi které ředíme mimo jiné přehrady, patří do skupiny největších a nejstarších inženýrských staveb. Tyto stavby byly budovány již nejstaršími civilizacemi pro potřeby zavlažování, zásobování pitnou vodou či ochrany proti povodním. Člověk v průběhu svého vývoje a objevování nových technik začal vodu kromě základních potřeb využívat také pro pohon nejrůznějších strojů.

Moderní vodní hospodářství zahrnuje celou řadu směrů ovlivňující každého člověka, a to buď to přímo nebo nepřímo. Dnešní vodní hospodářství se zabývá stavbami hydrotechnickými, hydromelioračními a stavbami zdravotně technickými. Obzvláště v dnešní době, kdy vlivem globálního oteplování dochází ke změnám klimatu, začínají mít tyto stavby, a zejména pak přehrady, významný vliv na rozvoj a kvalitu života lidské společnosti.

Přehrada Darbandikhan, kterou se tato práce zabývá, byla postavena v minulém století v severním Iráku. Má nesporný význam pro místní region, jelikož plní několik funkcí, mezi než patří například zásobování pitnou vodou, zavlažování, ochrana proti povodním a výroba elektrické energie. Tato přehrada je po konstrukční stránce řešena jako sypaná, kamenitá se středním jílovým těsněním a filtry. Dne 12. listopadu 2017 došlo k zemětřesení o velikosti 7,3 magnitudo a přehrada byla následkem tohoto zemětřesení poškozena. V návaznosti na tuto událost byl z Irácké strany vznesen podnět k stabilitnímu posouzení přehrady.

Tato závěrečná práce se v návaznosti na tento podnět zabývá stabilitou tělesa hráze. Cílem této práce je vyhotovení 3D modelu a následné provedení stabilitních výpočtů 2D a 3D analýzy pomocí programů GEO5 a Plaxis s následným vyhodnocením výsledků.

2. Vodní hospodářství

Za vodní díla jsou dle zákona o vodách a o změně některých zákonů (tzv. vodní zákon) považována díla sloužící ke vzdouvání a zadržování vod, umělému usměrňování odtokového režimu povrchových vod, k ochraně a užívání vod, ochraně před škodlivými účinky vod, k nakládání s vodami, k úpravě vodních poměrů nebo k jiným účelům sledovaným tímto zákonem (Zákon č. 254/2001 Sb.).

Vodní díla, zejména pak nádrže a přehrady, patří k nejstarším inženýrským stavbám, jelikož voda je základní podmínkou existence života. Z tohoto důvodu je historie vodního hospodářství spojená s nejstaršími civilizacemi v Africe, Asii, Americe i Evropě. Pravděpodobně nejstarším vodním dílem je dílo Mokhrablur, které bylo vystavěno mezi lety 4 000–3 000 př. n. l. na území dnešní Arménie. Stavebním materiálem byla zemina a hráze díla dosahovala výšky 3 m s celkovým objemem $320 \times 10^6 \text{ m}^3$. Na základě průzkumu vodních děl lze konstatovat, že díla budovaná od zhruba 3 000 př. n. l. až po 17. století n. l. sloužila nejčastěji pro zavlažování, zásobování měst vodou, plavbu a ochranu před povodněmi [1].

Historie výstavby přehrad a hrází v Čechách začíná přehradou Dvořiště, dokončenou roku 1367 a hrází Jordán, která vznikla roku 1492 přehrazením Košínského potoka [1]. V průběhu 15. a 16. století nastal v Českých zemích boom rybníkářství. Tento trend se projevil zejména na jihu Čech a na Pardubicku. Kromě hospodářského záměru chovu ryb byly tyto stavby budovány i za účelem ochrany před povodněmi. Budování vodních děl, jejichž primární úkol byl ochrana před povodněmi, nastal až v průběhu 19. a 20. století.

V dnešní době je nejvíce regulovaným tokem v České republice Vltava. Do vltavské kaskády, budované mezi lety 1930 až 1992, patří celkově devět přehradních nádrží o celkovém objemu 1353 mil. m^3 . Součástí kaskády jsou i největší přehrady v České republice, co do objemu vody (Orlík) nebo do plochy hladiny (Lipno) [3]. Účelem této kaskády je ochrana před povodněmi, zásoba pitné vody, doprava, energetika a turistika [2].

Mezi klasické stavební materiály, využívané od prvních vodních děl do současnosti, patří zeminy a kamenné zdivo, které jsou i v dnešní době jedny z nejvíce využívaných materiálů. Postupem času se na stavbu děl začal využívat beton. Ve 20. století se nabídka materiálu rozšířila o různé těsnící a filtrační materiály jako jsou fólie z PVC a PVE, nebo o separační materiály, ke kterým patří geotextilie a asfaltobeton [1].

2.1 Vodohospodářské stavby

Voda je základní podmínkou existence a rozvoje života na Zemi. Z tohoto důvodu lidé od nepaměti osidlovali okolí řek a přirozených vodních ploch, což vedle rozvoje obchodu, zemědělství a dopravy vedlo i k vzniku specializovaného odvětví vodního hospodářství. Dnes se vodní hospodářství zabývá využíváním povrchových i podzemních vod, úpravou těchto vod, čištěním a následnou distribucí do spotřebních míst. Dále se zabývá využitím vodní energie a ochrany před ničivými účinky vod. Pro splnění těchto účelů je nutno budovat speciální vodohospodářské stavby. Podle účelu dělíme vodohospodářské stavby na hydrotechnické, hydromeliorační a stavby zdravotně technické [4,5,6].

2.1.1 Hydrotechnické stavby

Hydrotechnické stavby slouží k účelnému a plnohodnotnému využití vodních toků pro dodávky pitné a užitkové vody, dopravu, ochranu před ničivými účinky vod, výrobu elektrické energie, chov ryb, či sportovně rekreační účely. Mezi tyto stavby řadíme stavby související s úpravami odtokových poměrů, přehrady, jezy, vodní cesty či vodní elektrárny. Tyto stavby jsou budovány jako veřejně prospěšné, případně je motivem k jejich výstavbě čistě podnikatelský záměr v jiných odvětvích, jako je rozvoj důlní činnosti, který vyžaduje rozsáhlou vodohospodářskou výstavbu.

Hydrotechnické stavby plní mnohé celospolečenské funkce a kvůli objemu prací nutných k výstavbě patří sice k nejvýznamnějším, ale také konstrukčně poměrně složitým veřejným stavbám. Náročnost hydrotechnických staveb je dána jejich individuálním charakterem jak z pohledu funkčního, tak i konstrukčního. Dále se na náročnosti podepisují místní podmínky, interakce s prostředím, délka životnosti objektu a další aspekty [5,6].

2.1.1.1 Úpravy odtokových poměrů

Pod pojmem úpravy toků označujeme soubor vodohospodářských, vodostavebních, lesnických a jiných opatření či zásahů, kterými se snažíme zabránit škodlivosti toků, zajistit větší užitečnost a zhodnotit jejich význam v prostředí. Tyto úpravy jsou ovšem závažným stavebním zásahem do krajiny a mohou vést k narušení přírodní, ekologické a estetické rovnováhy. Během takového zásahu pak dochází vždy

k narušení přirozeného říčního ekosystému, a to buď to dočasně, nebo trvale. V dnešní době se nicméně pozornost soustředí i na zachování rozmanitosti koryt, specifika proudění vody či ochranu fauny a flóry.

Úprava vodních toků ovšem nemá být jediným nástrojem pro docílení jistého cíle a je potřeba vycházet z komplexního řešení povodí. Na těchto projektech by tak měli spolupracovat hydrotechnici společně se zemědělci, dále pak lesníci, urbanisté, hydrobiologové, hydrogeologové, rybáři a popřípadě další specialisté [5,6].

2.1.1.2 Jezy

Pod pojmem jez rozumíme stavbu napříč vodním tokem, jejíž úkolem je vzduť vodní hladiny. Tohoto stavebního zásahu se dopouštíme při potřebách zajištění odběru vody pro průmysl, zemědělství, obyvatelstvo a energetiku, dále pak při dosažení požadované hloubky pro plavbu (Obrázek 1) nebo soustředění spádu pro elektrárny. Jako doprovodný pozitivní jev jezu může být jeho rekreační a sportovní využití, popřípadě může mít i estetický přínos.

Výstavba jezů má u nás dlouhou historii sahající až do 9. století n. l. Pro výstavbu bylo používáno kamenné zdivo, dřevo, případně kombinace těchto dvou materiálů. Účelem bylo vzdout hladinu pro přímou přeměnu v mechanickou energii (např. pro pohon vodních mlýnů), později pro plavbu. Až v 19. a 20. století byly jezy budované pro zásobování vodou. Dnes je v provozu v České republice několik tisíc jezů.

Jelikož dochází k výškovému rozdílu hladin bránícímu plavbě a přirozené migraci ryb, zpravidla se s výstavbou jezů budují i přidružené objekty napravující komplikace související se vzduťm hladiny. Mezi takovéto objekty řadíme rybí přechody, šterkové propusti, plavební komory či vorové a sportovní propusti.

Podle koncepčního řešení rozeznáváme dva druhy jezů. Prvním zástupcem jsou jezy pevné, u nichž je minimální úroveň vzduť dána úrovní přelivné hrany tělesa. Druhým zástupcem jsou jezy pohyblivé. U těchto jezů se hladina vzduť ovlivňuje pomocí uzávěrů [5,6].



Obrázek 1. Staroměstský jez (Praha) [34]

2.1.1.3 Vodní doprava

Vodní doprava k přepravě osob, zvířat a materiálů po mořích, jezerech, vodních tocích i umělých vodotečích patří k nejstarším druhům dopravy vůbec. Tento druh dopravy položil základy pro vznik a rozvoj mnoha civilizací, nicméně v dnešní době dominuje spíše doprava nákladní kombinovaná, tedy s nezbytným překládáním z jednoho dopravního prostředku na druhý.

Vodní dopravu lze rozdělit na námořní a vnitrozemskou, dále pak na nákladní a osobní. Vodní doprava má oproti ostatním druhům doprav jisté výhody, ke kterým patří nižší energetická náročnost, velká nosnost, vysoká produktivita a také relativně malá zátěž pro životní prostředí (emise výfukových plynů a emise hluku). Naproti tomu, největšími nevýhodami jsou malá hustota sítě vnitrozemských vodních cest, nedostatečná propojenost vodních cest, nutnost kombinace s jinou dopravou, a tedy překládání materiálu, či závislost na přírodních podmínkách. Zejména pak závislost na

přírodních podmínkách hraje dnes velkou roli, jelikož v letních měsících se u mnoha českých dopravních cest potýkáme čím dál častěji s nedostatkem vody [5].

Vnitrozemská doprava se obecně hodí spíše při přepravě substrátů jako je uhlí, kamenivo, rudy atd., které jsou ve velkých objemech. Pro přepravu těchto substrátů se používají převážně čluny bez vlastního pohonu. Jejich pohyb je zajištěn remorkéry, které dnes pracují výhradně jako tlačné a posunují člun nebo více člunů sestavených v soupravu.

Vnitrozemská doprava se uskutečňuje na přirozeně splavných tocích a jezerech, na vodních tocích splavněných regulačními úpravami nebo na sebe navazujících jezovými zdržemi s plavebními komorami, a v neposlední řadě také na průplavech, tedy uměle vybudovaných vodních cestách. Přirozeně splavné toky jsou zejména velké nížinné řeky, jezera a nádrže údolních přehrad, kde lze za libovolných průtoků zajišťovat plavební parametry. Mezi tyto parametry patří hloubka a šířka plavební dráhy a směrové parametry. Toky, které tyto požadavky přirozeně nesplňují, lze různými regulačními zásahy upravit [5,6]. Aktuální vodní cesty na území České republiky jsou vyobrazeny na obrázku 2.



Obrázek 2. Vodní cesty ČR [7]

2.1.1.4 Využití vodní energie

Jedním z vůbec nejstarších způsobů získávání energie bylo pomocí tekoucí vody. Historicky se vodní energie získávala díky vodnímu kolu, které nejprve sloužilo k čerpání vody, později k pohonu vodních mlýnů (Obrázek 3) nebo k pohonu pil. V současné době se vodní energie využívá výhradně k výrobě elektrické energie. Voda, jakožto médium pohonu, je do soustavy přirozeně doplňována koloběhem vody v přírodě a je tedy takřka nevyčerpatelným zdrojem energie. Díky minimálním dopadům na životní prostředí lze vodní mlýn považovat za velmi ekologický zdroj energie.



Obrázek 3. Historické mlýnské vodní kolo [15]

Základem pro efektivní využití vodní energie na vodním toku je výběr vhodného typu vodní turbíny, který závisí na průtoku vody a spádu, tedy rozdílu hladin před a za vodním motorem. Vodní turbíny se zpravidla skládají ze dvou částí, a to z pevného rozváděcího kola a pohyblivého oběžného kola. Rozeznáváme tři základní typy: Peltonova turbína, Francisova turbína a Kaplanova turbína. Na principu Kaplanovy turbíny je dále odvozena přímoproudová a reverzibilní turbína.

Peltonova turbína (Obrázek 4) byla navržena inženýrem L.A. Peltonem v roce 1880. Principem se podobá vodnímu kolu. Tento druh turbíny se používá pro vysoké spády od několika set metrů do 1800 m s malou hltností (průtokem) [4,5,6].



Obrázek 4. Peltonova turbína [8]

Francisova turbína (Obrázek 5) byla vynalezena Američanem J. B. Francistem v roce 1870. Na rozdíl od Peltonovy turbíny se voda na oběžné kolo turbíny přivádí spirálou, která díky proměnnému průtočnému průřezu zajišťovala rovnoměrný radiální přítok. Tento druh turbíny se využívá pro spády od několika desítek metrů až do 700 m a řadí se mezi nejvýkonnější vodní turbíny. Kaplanova turbína (Obrázek 6) byla vynalezena V. Kaplanem v Rakousku roku 1913. Její využití nachází uplatnění pro spády od několika metrů až po 70 metrů [5].



Obrázek 5. Francisova turbína [9]



Obrázek 6. Kaplanova turbína [10]

2.1.2 Hydromeliorační stavby

Hydromeliorační stavby lze považovat za soubor technických opatření, která slouží k ochraně prostředí před přemokřením. Jejich primárním úkolem je odvádění přebytečné vody z povrchu nebo půdního profilu v dané oblasti. Odvodňování můžeme rozdělit do dvou základních skupin podle činnosti, se kterou je spjaté. První skupinou je stavební činnost, kde odvodňování zajišťuje regulaci podzemní vody při realizaci nebo ochraně konstrukce před účinky povrchové i podzemní vody během životnosti stavby. Druhou skupinou je regulace vodního režimu zemědělských a lesních ploch. V tomto případě se jedná o zavlažení či odvodnění půdy, která je následně obhospodařovaná [18].

2.1.3 Zdravotně technické stavby

Pod těmito stavbami rozumíme stavby, které souvisejí se zdravím obyvatelstva a dopadem lidského žití na přírodu [19]. Tyto stavby zahrnují následující oblasti:

- Jímání a úprava vody
- Čištění odpadních vod
- Zásobování a doprava vody
- Inženýrské sítě
- Stokování
- Balneotechnika

3. Přehrady

Přehrady jsou díky své výšce a objemu největší inženýrské stavby. Společně se zavlažovacími kanály patří také k nejstarším vodohospodářským stavbám. První přehrady byly budovány již ve starověku, kdy se k jejich výstavbě používala málo propustná zemina vyztužená lomovým kamenem. Takovéto stavby byly v podstatě nádrže, které sloužily k napájení zavlažovacích systémů. Jejich archeologické pozůstatky byly nalezeny například v Mezopotámii, Egyptě, Indii a také Číně.

Pravděpodobně nejstarší objevená přehrada s názvem Sadd-el-Kafara, jejíž zbytky byly objeveny roku 1885 na východním břehu Nilu, se nachází 30 km jižně od Káhiry. Podle inženýrsko–archeologického průzkumu měla být přehrada budována v době 2 700 až 2 600 let př. n. l. a pravděpodobně fungovala jako retenční nádrž na ochranu před povodněmi.

V Evropě se přehrady začaly budovat až mnohem později. Jednou z prvních byla přehrada Alcanterilla postavená Římany ve Španělsku asi ve 2. století př. n. l. Přehrada byla tvořena ze zemin, kamenného zdiva a římského betonu. Dosahovala výšky 20 metrů a její funkcí byla zásoba vody pro město Toledo.

K rozmachu přehrad došlo až v 19. století jako reakce na rozvíjející se průmysl a nárůst počtu obyvatel. V tomto období se budovaly převážně tížné zděné přehrady z kamene, na konci století se pak objevují také první tížné přehrady z betonu. První betonové přehrady byly budovány technologií litého betonu, který se vyznačoval vysokým vodním součinitelem. Velkou výhodou byla snadná doprava na místo zabudování, nicméně z důvodu malé hutnosti nebyl beton dostatečně trvanlivý.

Na začátku 20. století dochází k rozvoji strojního vybavení pro výrobu, dopravu, pokládku a hutnění betonu, díky čemuž bylo možné vyrábět a ukládat betonovou směs vyhovující všem požadavkům. Z toho důvodu se začínají také navrhovat a stavět ekonomicky výhodnější typy betonových přehrad (klenbové, pilířové). Svého vrcholného období dosáhla výstavba betonových přehrad po 2. světové válce [5,6].

Během 19. století dochází k vývoji a pokroku také u sypaných hrází. Tělesa přehrad již nejsou budována pouze z homogenních materiálů, ale využívá se různých těsnících a stabilizačních materiálů. Například v Kalifornii se začaly stavět přehrady sypané lomovým kamenem a těsněné návodním dřevěným těsněním pro zadržování vody. Tyto přehrady byly využívány také při těžbě zlata.

Koncem 19. století se pak rozšířila technologie naplavování, a to zejména v USA. Nesporná výhoda této technologie spočívala v tom, že při její realizaci nebylo třeba výkonných strojů pro těžbu, dopravu a hutnění zemin. Nicméně po katastrofálním sesuvu na americké přehradě Fort Peck v roce 1938 se technologie naplavování po jistou dobu přestala používat. K jejímu opětovnému využití se stavitelé vrátili po roce 1945 v bývalém SSSR, kde bylo tímto způsobem postaveno mnoho přehrad. Mezi největší patří například přehrada Mingečaur ležící na území dnešního Ázerbájdžánu.

V roce 1896 byla dále postavena přehrada Chatworth, u které bylo použito návodní těsnění z prostého betonu. Později u přehrady Relief, dostavěné roku 1910, byl pro návodní těsnění použit železobeton. Asfaltobeton byl jako návodní těsnění poprvé použit v Německu roku 1934.

K rozvoji sypaných hrází dochází až po roce 1945, k čemuž přispělo hned několik faktů. Věda o mechanice zemin výrazně pokročila a v důsledku toho mohla být přehradní tělesa navrhována bezpečněji a ekonomičtěji. Také nově dostupné strojní vybavení pro těžbu, dopravu a ukládání materiálů pro stavbu sypaných hrází umožnily přehradu budovat efektivněji a ekonomičtěji. V neposlední řadě k rozvoji přispěl fakt, že inženýři získali potřebné zkušenosti a vědomosti pro stavbu takovýchto staveb. Sypané hráze se středním zemním těsněním a návodním těsněním se ukázaly jako mimořádně spolehlivé jak pro výstavbu do velké výšky, tak i jako přehradu vhodné do lokalit s málo únosným podložím, kde by se jiné typy přehrad nemohly realizovat [5].

Přehradu a údolní nádrže jsou důležité vodohospodářské stavby tvořící základ vodohospodářských úprav, na které navazují další vodohospodářské úpravy a stavby. Význam těchto staveb je přirozeně vyšší v zemích s převahou horních toků než v zemích s mořem a velkými jezery. Tyto stavby plní v krajině akumulaci funkci, která se příznivě projevuje na zvětšení zásob podzemní vody nebo na tvorbě klimatu [6].

Přehrada je stavba vytvářející nádrž pro hospodaření s vodou. Tato stavba je obvykle umístěována přímo na tok, i když v jistých případech lze vytvořit boční nádrž, která není na toku přímo umístěna. V takovémto případě se voda do nádrže přivádí přivaděčem. Pod pojmem přivaděč rozumíme otevřené koryto, nebo štolu, popřípadě jiné stavby. Přehradu tvoří vlastní přehradní těleso a tzv. příslušenství. Do tohoto příslušenství patří zejména objekty sloužící pro bezpečné převedení povodní (tzv. přelivy), dále pak objekty pro vypouštění vody z nádrže nebo odběr vody [5,6].



Obrázek 7. Betonová tízná přehrada [11]

3.1 Konstrukce přehrad

Přehrady se dělí na dva základní poddruhy podle materiálu, který byl použit na výstavbu vlastního přehradního tělesa, a to na betonové přehrady a na přehrady z místních materiálů. Dle statického působení se betonové přehrady dále dělí na tížné (Obrázek 10), pilířové, tížné s klenbovým účinkem, klenbové a členěné klenbové přehrady. Přehrady z místních materiálů se dělí podle způsobu provádění, a to na sypané a naplavované [5]. Naplavování se v současné době využívá spíše okrajově. Sypané přehrady se dále dělí podle použitého materiálu na zemní, kamenité a smíšené.

Betonové přehrady se navrhují v případě, kdy je únosné podloží v přijatelné hloubce. Platí, že nejkvalitnější podloží vyžadují přehrady klenbové. Dále také platí, že klenbové přehrady vyžadují takový přehradní profil, aby poměr délky přehrady v koruně a její výšky nebyl příliš velký. Nespornou výhodou betonových přehrad, a to zejména tížných a pilířových, je snadné začlenění přelivu, spodních výpustí a odběrných objektů do přehradního tělesa. Betonové přehrady jsou také bezpečnější při krátkodobém přelítí koruny hráze, jelikož by k poškození došlo až v souvislosti s výmoly způsobenými přepadající vodou na vzdušném líci u paty tělesa.



Obrázek 8. Betonová tížná přehrada [14]

Sypané přehrady se navrhují zejména do horších základových poměrů. Jejich nespornou výhodou je, že se pro jejich stavbu používají místní materiály z blízkého okolí. Nevýhodou sypaných hrází je složité umístění a řešení funkčních objektů, a to zejména přelivů, jsou-li navrhovány na velké průtoky. Oproti hrázím betonovým je realizace sypaných hrází mnohem více závislá na počasí. Dešťové srážky navíc znehodnocují povrch nasypané zeminy a tím způsobují problémy strojní mechanizaci [5].



Obrázek 9. Sypaná přehrada [13]

3.1.1 Zemní a kamenité hráze

Tyto hráze mají všechny vesměs lichoběžníkový příčný profil. Sklony svahů vycházejí z vlastností materiálů, které jsou použity pro budování vlastního tělesa hráze. Tyto sklony mohou být jednotné po celé výšce tělesa, nebo mohou být odstupňovány a případně přerušeny lavičkou. Vlastnosti materiálů (zejména smyková pevnost) se zjišťují laboratorními a polními zkouškami [6].

Návodní svah se opevňuje proti erozivním účinkům vlnobití, ledu, kolísání hladiny a přívalových dešťů. Pro tyto účely se používá kamenná dlažba, rovnanina, popřípadě pohoz. K zabránění vyplavování jemných částic, tzv. sufóze, se do tělesa hráze navrhuje vhodný filtr. Vzdušný líc tělesa se nejčastěji zatravňuje [6].

Kamenité nebo také balvanité hráze se odlišují od zemních hrází maximálním procentem frakce menší než 100 milimetrů. O kamenité či balvanité hrázi hovoříme v případě, kdy pro stavbu bylo použito maximálně 15 % frakce menší než 100

milimetrů. Tyto hráze bývají obvykle navrhovány strmější. Těsnění se navrhuje uvnitř tělesa (střední), nebo na návodním líci. Pro potřeby těsnění se používají vhodné zeminy, beton, železobeton, asfaltobeton a fólie z plastů [6]. Střední těsnění z betonu se osvědčilo pouze u malých sypaných přehrad, jejichž výška nepřesahuje 20 metrů [5].

Těsnění ze zemin se považuje za nejspolehlivější díky svým přetvárným vlastnostem, což znamená, že se dobře přizpůsobuje deformacím tělesa. Nevýhodou zemního těsnění je závislost na počasí během jeho realizace. Asfaltobeton je směs nejméně dvou frakcí kameniva, fileru, tedy kamenné moučky, a asfaltu. K těsnění se používá díky svým výborným přetvárným charakteristikám, nepropustnosti, a především velké pevnosti v tahu i ve smyku. Využívá se při těsnění návodního líce i při středním těsnění [5].

Těsnění z plastických fólií se zatím využívá okrajově u malých vodních nádrží, ve větší míře pak u hrází dočasného charakteru. Výhodou tohoto druhu těsnění je jeho cena, nepropustnost a rychlost realizace. Nevýhodou je nutnost svařování pásů fólií, během kterého dochází k poruchám z důvodu špatného provedení sváru. U těchto fólií je pak nutná zvýšená péče během realizace, neboť může dojít k protržení. V dnešní době se vyrábějí tzv. sendvičové fólie, které jsou po obou lících chráněny vhodným materiálem [5].

Těleso sypané přehradě se skládá ze vzdušné stabilizační části, návodní stabilizační části, těsnění, ochranné vrstvy, opevnění návodního líce, drenáží a opevnění vzdušného líce [5]. U kamenitých přehrad je nejvhodnější do stabilizační části umísťovat vyvřelé horniny, méně vhodné jsou metamorfované horniny. Výjimečně lze umísťovat vápence, dolomity, pískovce a jiné horniny, které vznikly usazováním [5]. Za nejvhodnější materiály pro stabilizační část zemní hráze jsou považovány propustné zeminy jako šterkopísky, šterky, hrubé písky, popřípadě lze použít i svahové suti a zvětralé horniny [5].

Pro těsnící účely se používají materiály uvedené výše, které se v případě dosažitelného nepropustného podloží napojí obvykle těsnícím zářezem nebo betonovým injekčním ozubem. Je-li hloubka nepropustného podloží větší, využívá se těsnící podzemní stěna zhotovená nejčastěji z injekční štoly. V případech, kdy je nepropustné podloží výrazně hluboko, lze užít předloženého těsnícího koberce zhotoveného ze zemin nebo plastické fólie. Tímto způsobem lze průsakovou dráhu prodloužit tak, aby celková velikost průsaku i hydraulických gradientů prosakující vody byla přijatelná [5].

Stabilitní řešení sypaných přehrad je náročné. Během řešení je nutné brát v potaz všechny zatěžovací stavy, které se v průběhu životnosti mohou vyskytnout. V dnešní době se používají numerické modely realizované metodou konečných prvků [5,6].

3.2 Mezní stavy sypaných hrází podle ČSN 75 2310

Norma ČSN 75 2310 stanovuje pro posouzení sypaných hrází splnění základních mezních stavů pro základní návrhové situace:

- a) mezní stav stability
- b) mezní stav deformace, přičemž se rozlišuje:
 - deformace v násypu vedoucí ke ztrátě použitelnosti, např. nadměrné deformace nebo trhliny
 - deformace (včetně creepových) vedoucí k poruše a nebo ztrátě použitelnosti v přilehlých konstrukcích
 - deformace v přechodových zónách
 - deformace vyvolané hydraulickým gradientem
- c) mezní stav vnitřní eroze
- d) mezní stav povrchové eroze

Podle normy lze z dosavadních zkušeností pokládat za nejdůležitější mezní stav ad. c), především v kombinaci s mezním stavem ad b).

Řešení mezního stavu stability spočívá v posouzení stability jako celku a jednotlivých částí konstrukce, přičemž do řešení je nutno vždy zahrnout podloží. Stabilitu je dle normy potřeba prokázat v dostatečném počtu příčných řezů hráze. Pro posouzení se volí nejčastěji kolmé řezy k ose hráze, nicméně lze použít i šikmých řezů vyžaduje-li to situace. Do řešení stabilitního výpočtu je nutno vzít v úvahu:

- a) výsledky geotechnického průzkumu podloží v místě hráze
- b) výsledky laboratorních zkoušek, zkoušek in situ a zkoušek provedených na zkušebních hutnících úsecích z pohledu fyzikálně-mechanických vlastností sypanin
- c) technologický postup a rychlost výstavby
- d) očekávaný vývoj pórových tlaků v podloží i tělese hráze
- e) vliv kolísání hladiny vody v nádrži (zvláště při prvním napouštění)
- f) dynamické účinky

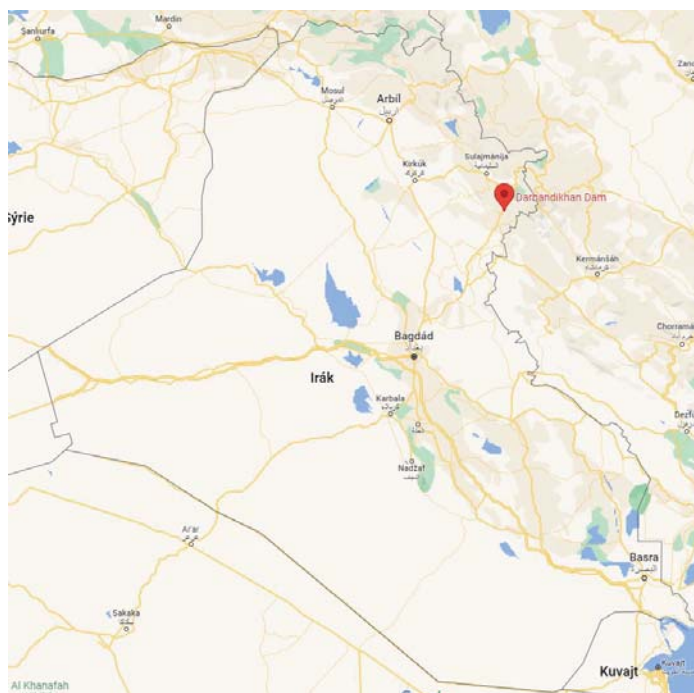
Ověření mezního stavu deformace se liší v závislosti na přiřazené třídě hráze. Zatřídění sypané hráze se provádí z hlediska jejího významu a bezpečnosti stavby. U hrází nejvyšší priority, tedy hrází spadajících do I. třídy, je nutno prověřit 3D přetvoření, zatímco pro hráze III. třídy postačí 1D deformace (výpočet sedání). Vypočtené hodnoty se následně ověřují měřeními deformace tělesa sypaniny na jeho svazích i koruně a na styku sypaniny s podložím. Pro I. třídy se navíc měří i svislé deformace podloží v jednotlivých úrovních. Výpočtem přetvoření je nutno prokázat, že nehrozí narušení těsnicí funkce hráze.

4. Vodní dílo Darbandikhan



Obrázek 10. Přehrada Darbandikhan [12]

Vodní dílo Darbandikhan (Obrázek 12) leží v Iráku na řece Diyala–Sirvan přibližně 65 km jihovýchodně od města Sulaimaniah a 230 km východně od města Bagdád (Obrázek 13). Nachází se ve stejnojmenném guvernorátu (Sulaymaniah Governorate), tedy v jednom ze samostatně správních celků, na které se Irák dělí. Celkově se Irák skládá z 19 takovýchto samostatných celků. V čele každého celku stojí guvernér.



Obrázek 11. Mapa Iráku s vyznačením přehrady [20]

Přehrada se pyšní úchvatnými rozměry. V jednom ze svých kolmých řezů k ose přehrady koruna dosahuje výšky 128 m od původního terénu. Délka přehrady je 445 m a šířka koruny hráze má 17 m v nadmořské výšce 495 m. n. m.

Vodní dílo bylo navrženo americkou firmou Harza Engineering Company. Výstavba byla zahájena v roce 1956 a dokončena v létě 1961, kdy se vodní dílo začalo napouštět. Primárním účelem návrhu bylo zajistit zavlažování, ochranu před povodněmi a výrobu elektrické energie. Sekundárním přínosem stavby je využití vodní plochy k rekreačním účelům.

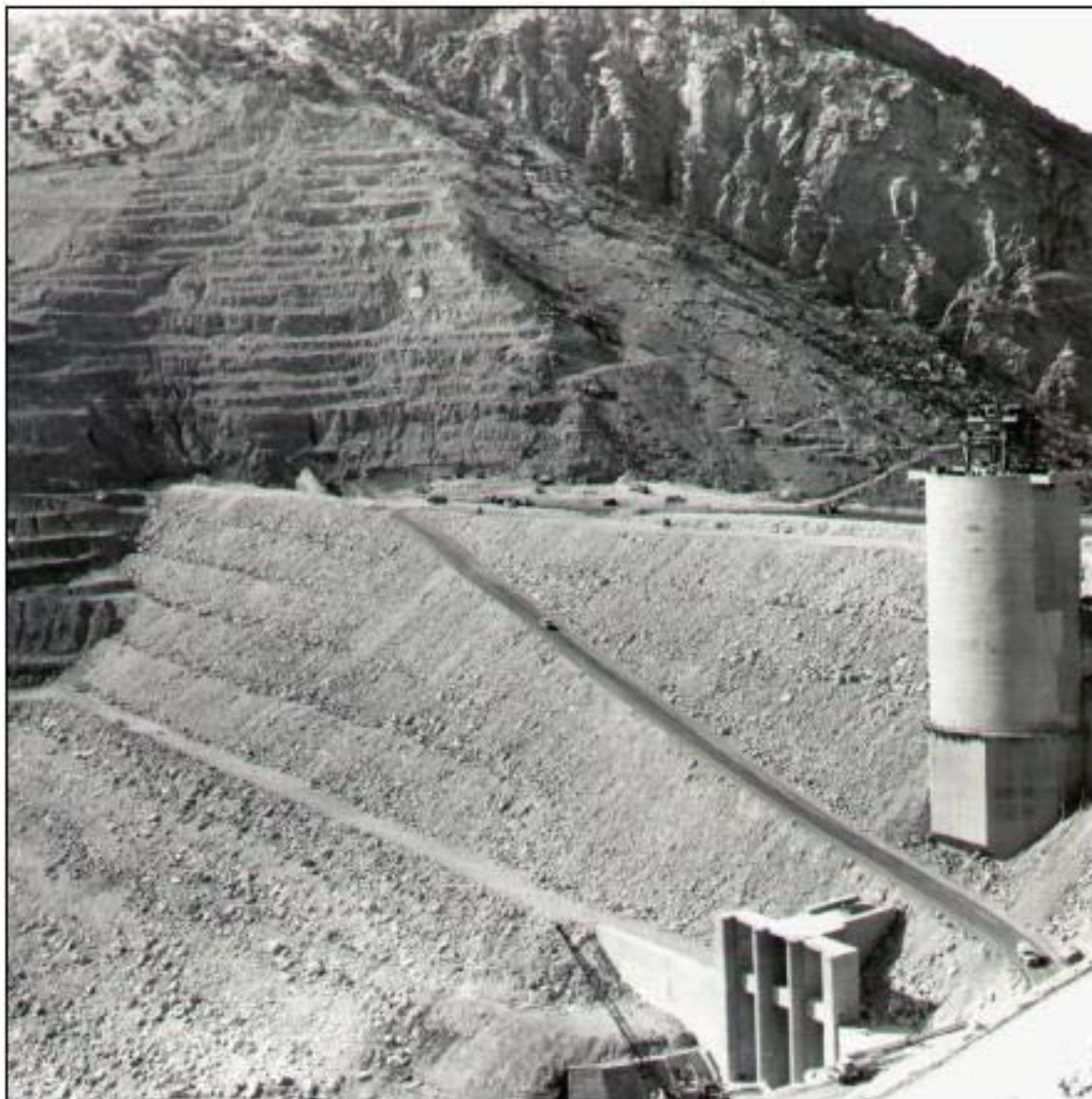
Vodní nádrž byla projektována na celkovou kapacitu zadržené vody o objemu $3 \times 10^9 \text{ m}^3$ při normální hladině v nádrži (485 m. n. m). Z celkového objemu je $2,5 \times 10^9 \text{ m}^3$ aktivní kapacity nádrže a $0,5 \times 10^9 \text{ m}^3$ neaktivní kapacity. Dnes je kapacita nádrže menší než projektovaná kapacita ($2,5 \times 10^9 \text{ m}^3$), a to zejména z důvodu usazování sedimentů, které řeka do vodní nádrže přináší.

Přehrada je vybavena bezpečnostním přelivem se třemi tainterovými branami zabraňujícími přelití koruny hráze. Každá z těchto bran má čtvercový průřez o straně 15 m. Spodní hrana bezpečnostního přelivu je umístěna ve výšce 470 m. Při výšce vodní hladiny 485 m je kapacita bezpečnostního přelivu $5700 \text{ m}^3/\text{s}$. Při výšce 493,5 m, tedy při maximální hladině, je kapacita bezpečnostního přelivu $11\,400 \text{ m}^3/\text{s}$ [28].



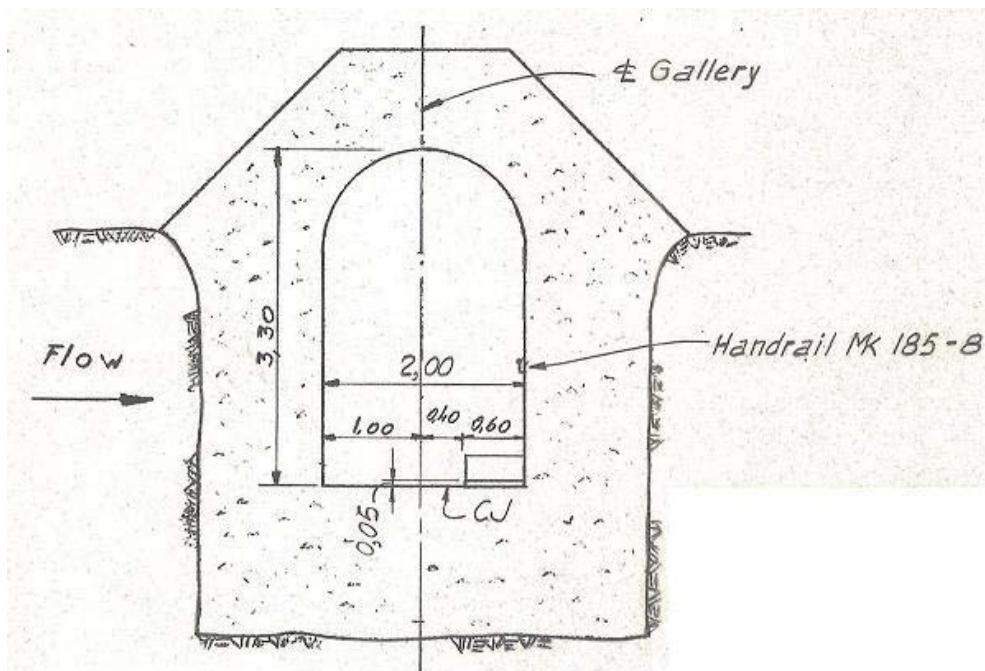
Obrázek 12. Tainterova brána na přehradě Darbandikhan [16]

Dále je přehrada vybavena dvěma spodními výpustěmi, které přivádí vodu do elektrárny. První spodní výpust' má v průměru 6 m. Vtok do této výpusti je realizován jednou z celkově tří bran, přičemž každá má rozměry 4,75 m x 9,5 m. Otevření či zavření výpusti se realizuje pomocí šoupat umístěných ve věži na návodním líci přehrady. Druhá výpust' má v průměru 9 m a vtok je realizován pomocí 2 vtokových bran. Je taktéž řízena za pomoci šoupat umístěných ve věži. Obě tyto spodní výpustě pohání tři velké turbíny vodní elektrárny umístěné na vzdušném líci přehrady [28]. Elektrárna je vybavena třemi Francisovými turbínami, které pohání generátory schopné dodávat 3x83 MW elektrické energie. Tyto turbíny pro svůj pohyb využívají hydraulickou výšku 80 m a každá z nich při maximálním výkonu vypouští (spotřebovává) 113 m³/s vody.

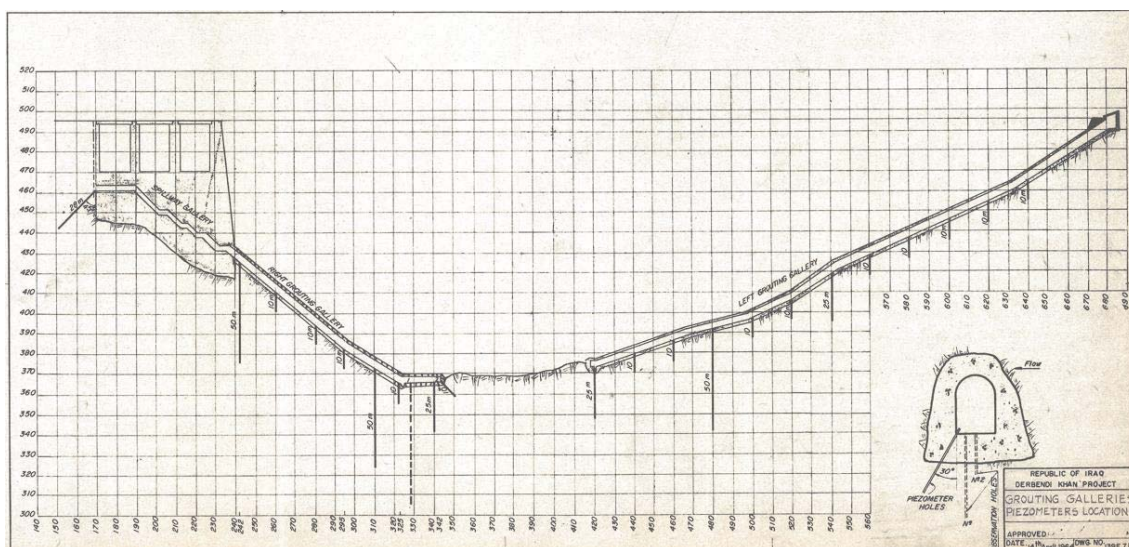


Obrázek 13. Pohled na návodní stranu včetně vybavení hráze během budování [29]

Přehrada dále disponuje dvěma oddělenými injekčními štolami (Obrázek 17). Jsou rozděleny na pravou a levou injekční štolu a každá je přístupná z jednoho břehu. Pravá injekční štola začíná v blízkosti první přepadové brány a končí ve staničení 344.2 m. Podlaha má v nejnižším bodě výšku 365.2 m a je zde umístěna čerpací jímka pro případ čerpání vody. Levá injekční štola začíná ve staničení 418,75 m a končí ve staničení 680 m. Nejnižším bod podlahy je umístěn ve výšce 373,5 m a jako v případě pravé injekční štoly je vybavena čerpací jímkou. Na obrázku 16 je znázorněn charakteristický řez galerie (injekční štoly).



Obrázek 14. Charakteristický řez injekční štolou



Obrázek 15. Podélný řez injekčními štolami

4.1 Řeka

Řeka Diyala–Sirvan, zásobující přehradu vodou, pramení v pohoří Zagros poblíž města Hamadán v Iránu, odkud teče do Iráku. Na délce 32 km tvoří hranici mezi těmito zeměmi. Ve městě Bagdád ústí do řeky Tigris jako levostranný přítok. Délka řeky je 445 km a celková plocha povodí dosahuje 32 600 km² [30].

4.2 Geologie podloží a materiály přehrady

Přehradní těleso se nachází na konci úzkého strmého kaňonu, který vznikl říční erozí řeky Diyala–Sirwan. Od místa přehrady klesají skalní útvary přibližně o 45° po proudu směrem k jihozápadu. Těleso leží v zóně zvrásněného příkrovu jihozápadně od hranice, kde dochází k subdukci Arabské a Euroasijské litosférické desky, tedy k podsouvání jedné litosférické desky pod druhou. Podloží přehrady je tvořeno řadou sedimentárních hornin. Jedná se o slínovce, pískovce, vápence a konglomeráty (nesourodé směsi).

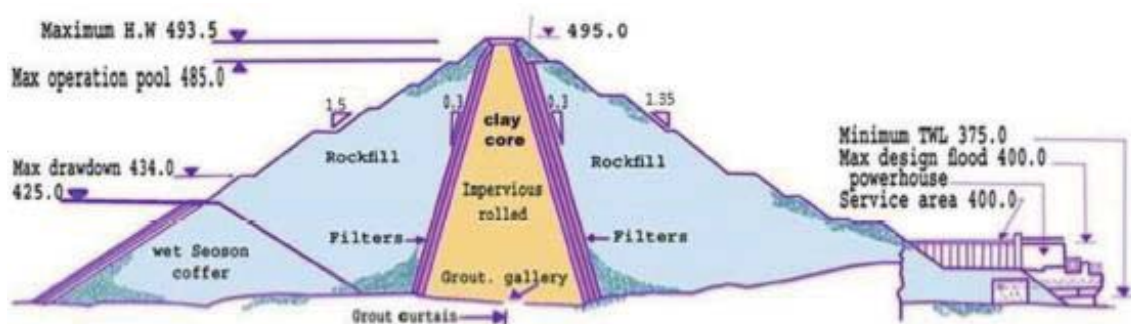
Samotná hráz je tvořena rockfillovou stabilizační částí, jílovým jádrem s bočními sklony 1:0,3 (v:h) a filtry. Směrem k návodnímu lici od jádra jsou dva filtry, každý o šířce 3 m. Ve druhém směru jsou pak tři filtry, každý taktéž o šířce 3 m. Před výstavbou samotného tělesa byla odstraněna vrstva kvartérních pokryvů v celém rozsahu stavby a základová spára byla situovaná do zdravé sedimentární horniny.

Hlavní těsnící injektážní clona (Obrázek 26) je provedena jako jednořadá se třemi výškovými úrovněmi. Nejhlubší těsnící vrty dosahují hloubky 100 m a jsou osově vzdáleny 6,4 m. Středně hluboké vrty dosahují hloubky 60 m a jsou umístěny mezi nejhlubšími vrty, tedy v osově vzdálenosti 3,2 m. Poslední těsnící vrty pak dosahují hloubky 30 m a jsou umístěny mezi středně hlubokými vrty. Hlavní těsnící clona tedy obsahuje vrty v osově vzdálenosti 1,6 m. Tato clona je dále doplněna o injektáž koryta, dodatečnou injektáž, ošetření poruch a vějířovitou injektáž v místě potrubí spodních výpustí.

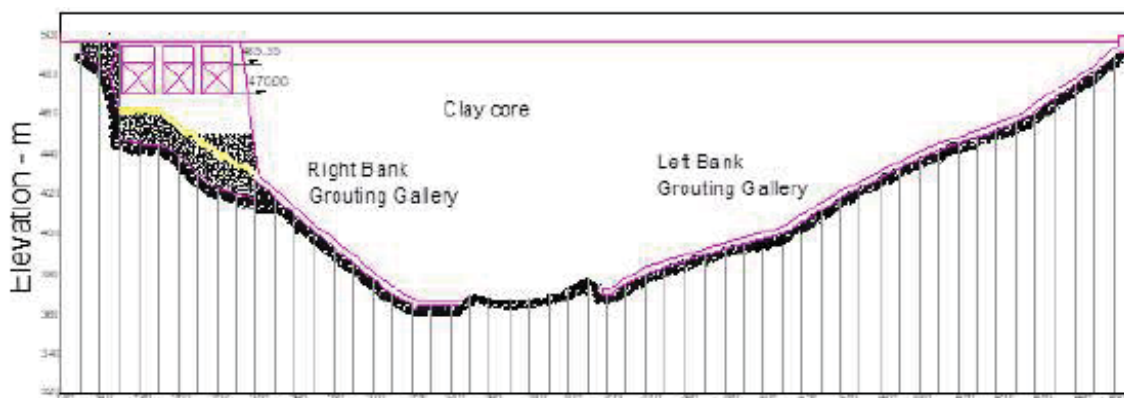
Injektáž koryta zahrnuje primární (15 m hluboké) a sekundární (7,5 m hluboké) konsolidační vrty umístěné jak po proudu, tak i proti němu. Dodatečné injekční těsnící clony jsou umístěny 0,5 m od hlavní clony po obou stranách její osy. Vrty jsou umístěny mezi vrty hlavní clony a jsou ukloněny o 10° od roviny hlavní clony. Tyto vrty dosahují hloubky 15 m. Vějířovitá injektáž je umístěna v rovině hlavní injekční clony (Obrázek 26).

V horninách pod tělesem hráze se nachází geologické poruchy, které byly ošetřeny těsnícími injektážními pracemi. Pro tyto účely byly použity konvenční cementobentonitové, cementové (síranovzdorné) a chemické směsi. Cementobentonitové ošetření zlomových linií bylo realizováno v rovině 0,5 m po proudu od osy hlavní injekční clony do hloubky 15 až 30 m v osových vzdálenostech 1,6 m. Proti proudu byl postup obdobný, ošetření bylo realizováno taktéž ve vzdálenosti

0,5 m a osově vzdálenosti 1,6 m, ale průměrná hloubka dosahovala 100 m. V rozmezí staničení cca 300 až cca 335 m bylo realizováno chemické ošetření zlomové linie. Jedná se o dvě řady nakloněných vrtů dosahující hloubky 60 m. První řada je zakomponovaná v rovině hlavní těsnící clony a druhá je v rovině 0,5 m od hlavní clony proti proudu. Poslední injektáž síranovzdušným cementem kopíruje předpokládanou zlomovou linii v rovině 0,5 m proti proudu od hlavní injekční clony s úklonem 8° proti proudu.



Obrázek 16. Příčný řez tělesem hráze Darbandikhan [28]



Obrázek 17. Podélný řez hrází Darbandikhan [28]

4.3 Poškození přehrady Darbandikhan

4.3.1 Poškození vlivem sesuvů svahů

Po naplnění přehrady došlo k několika sesuvům svahů. K prvnímu velkému sesuvu došlo roku 1967 na pravém břehu ve vzdálenosti 100 m proti proudu od přehrady. Tento sesuv je nebezpečný, neboť panují obavy, že by mohlo dojít k překrytí nátoků spodních výpustí. Na následujícím obrázku jsou vyznačeny sesuvy.



Obrázek 18. Sesuvy svahů do nádrže přehrady Darbandikhan [35]

4.3.2 Poškození vlivem války

Během Irácko-iránské války (1980–1988) byla přehrada bombardována. Došlo k poškození bezpečnostního přelivu a rozvodny vodní elektrárny. Elektrárna byla taktéž poškozena bombardováním v roce 1990.

4.3.3 Poškození při zemětřesení

Dne 12. listopadu 2017 došlo k velkému zemětřesení o velikosti 7,3 magnitudo poblíž Irácko-iránské hranice. Podle USGS (United States Geological Survey) došlo k zemětřesení vlivem šikmého tahu v zemské kůře. Epicentrum zemětřesení se nacházelo poblíž města Ezgeleh, pouhých 32 km od přehrady. Hloubka hypocentra byla 23,4 km pod povrchem. Zemětřesení trvalo 30 vteřin a je považováno za nejničivějším zemětřesením na Irácko-iránské hranici od roku 1909. Kromě vysokých materiálních škod si zemětřesení vyžádalo nad 500 civilních obětí. Zemětřesení způsobilo po obou stranách koruny hráze významnou svislou deformaci, příčné trhliny a podélné trhliny. V důsledku zemětřesení bylo uvolněno mnoho balvanů měřících i 2,5 m v průměru, které padaly po strmých svazích na korunu hráze, přepad a elektrárnu [28].

4.3.3.1 Příčné trhliny

Zemětřesení způsobilo několik příčných trhlin patrných zejména na komunikaci vedoucí po koruně hráze. Frekvence trhlin se zvyšovala směrem k betonové části přelivu. Všechny tyto trhliny, až na jednu výjimku, byly, vzhledem k mocnosti přehrady, spíše povrchového rázu. Jednalo se o trhliny s hloubkou do dvou metrů a s šířkou trhliny do 3 cm (Obrázek 21 B). Jedna trhlina v blízkosti betonového přelivu byla však rozsahem větší. Její maximální šířka byla 16 cm, nicméně její hloubku se nepodařilo zjistit. Podle obrázku (Obrázek 21 A) je patrné, že se v tomto místě vytvořil klín zemin s šířkou 74 cm na povrchu. Tento druh porušení nazýváme separační trhlinou, která bývá běžná při seismickém i statickém zatížení zemních sypaných přehrad v blízkosti betonových konstrukcí či strmých břehů koryta řeky [28].

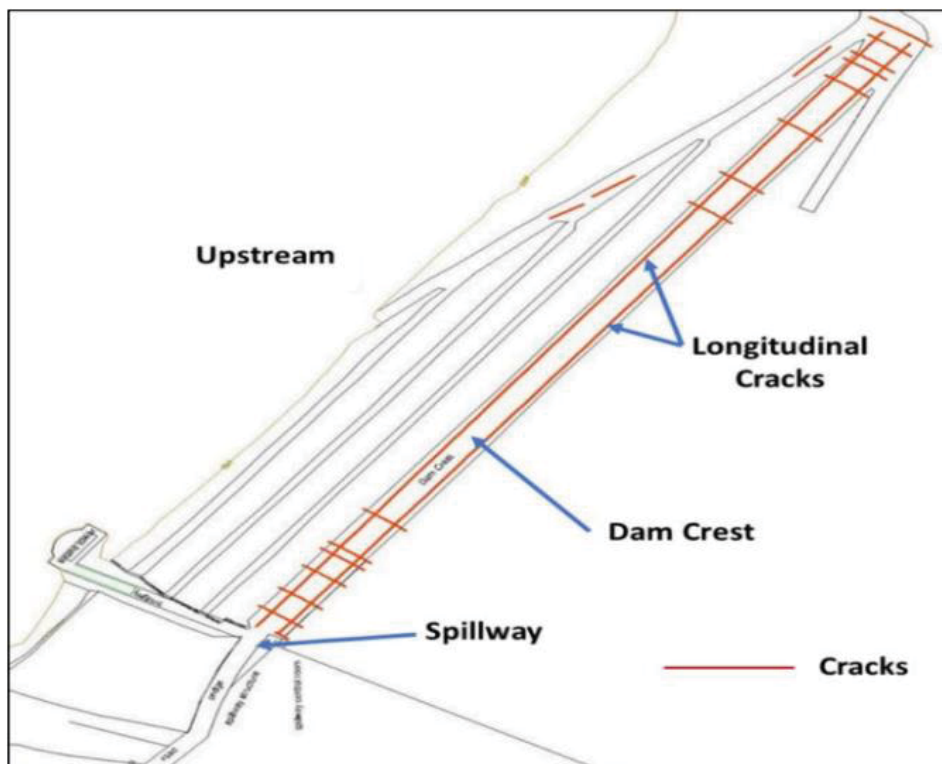


Obrázek 19. Příčné trhliny po zemětřesení [28]

4.3.3.2 Podélné trhliny

Podélné trhliny taktéž vznikly následkem zemětřesení 12. listopadu 2017. Častější výskyt těchto poruch byl pozorován na návodním líci. Vznikly zde dlouhé podélné trhliny a několik krátkých. Dvě podélné trhliny se však vyznačovaly větším rozsahem a nacházely se po obou stranách komunikace v celé délce hráze. Šířka a hloubka těchto dvou trhlín byla proměnlivá. Největší šířku trhlíny (15 cm) se podařilo naměřit podél komunikace směrem ke vzdušnému líci. Šířka těchto trhlín se zmenšovala směrem k břehům.

Chodníky podél komunikace, vedoucí po koruně hráze, byly po obou stranách nakloněny spolu se stožáry veřejného osvětlení mezi 20–40 ° směrem dál od podélné osy. Důležitým poznatkem pozorování je, že tyto dvě podélné trhliny vznikly v místě rozhraní mezi hutněným jílovým jádrem a filtračními vrstvami. Další poznatek vzešel z kontrolních výkopů, během kterých bylo zjištěno, že trhliny jsou omezeny na horní dva metry ochranných štěrkových materiálů. Na základě těchto poznatků lze předpokládat, že během zemětřesení došlo k intenzivnějšímu sesednutí filtrů a rockfillu než hutněného jílového jádra. Vlivem otřesů pravděpodobně došlo k přeskupení skeletu zrn kameniva, což mělo za následek sesednutí hráze. Během kontrolních prohlídek nebylo pozorováno žádné smykové porušení hráze [28].



Obrázek 20. Znázornění příčných i podélných trhlín na hrázi [28]

5. Výpočtová část

V této části diplomové práce jsem se zabýval zejména tvorbou 3D modelu přehradního tělesa přehrady Darbandikhan, jejím podložím a přilehlým okolím. Z 3D modelu byly generovány zejména příčné řezy jako vstup k dalšímu zpracování v programu GEO 5 a Plaxis 2D. Následně byl 3D model podroben analýze v programu Plaxis 3D. Na závěr byly výstupy z programů vyhodnoceny a zrekapitulovány v závěru práce.

5.1 3D model

Model byl vyhotoven za podpory následujících programů a jejich doplňujících modulů ve studentských verzích těchto programů:

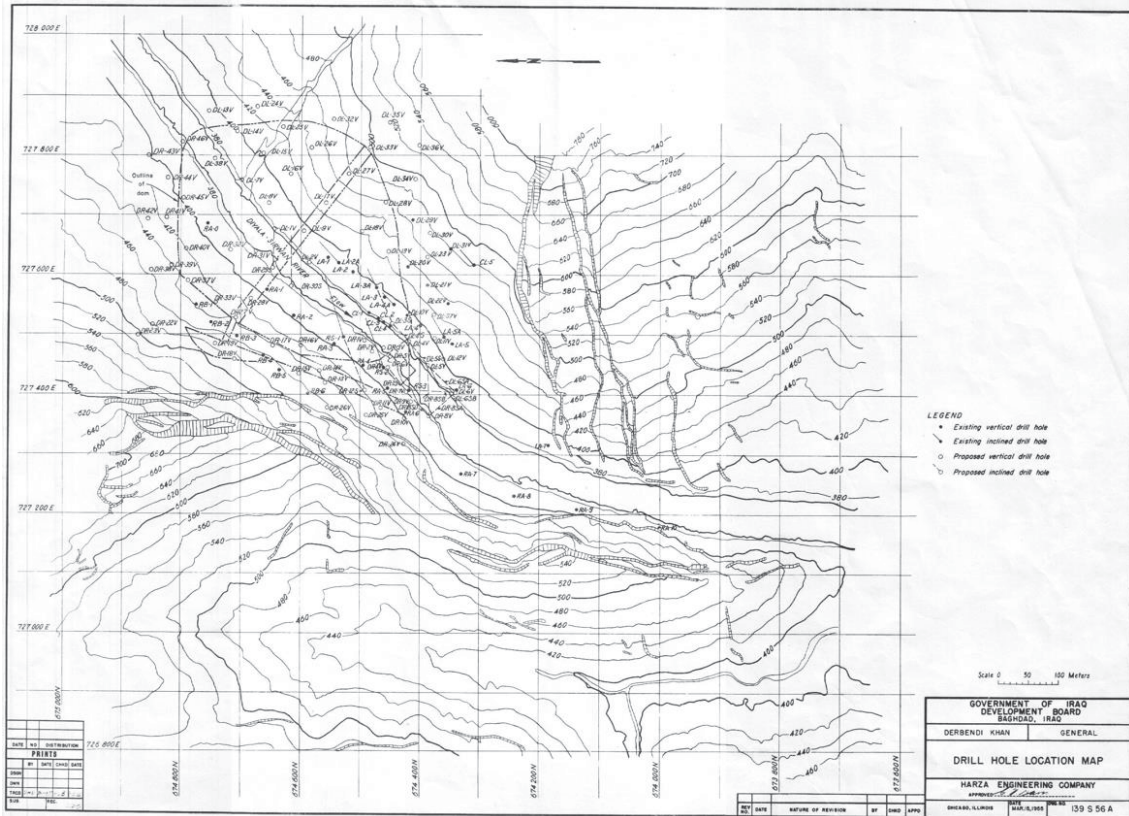
- AutoCAD 2018
- AutoCAD 2022
- Civil 3D 2021
- InfraWorks

5.1.1 Podklady k tvorbě 3D modelu

K vyhotovení modelu přehradního tělesa, jeho okolí a geologie posloužily podklady dodané Iráckou stranou (Ředitelství přehrady Darbandikhan). Jednalo se o oskenované původní výkresy skutečného provedení stavby z roku 1954 až 1962, které bylo nutné nejprve zdigitalizovat pro následnou práci ve výše zmíněných programech.

5.1.1.1 Mapové podklady

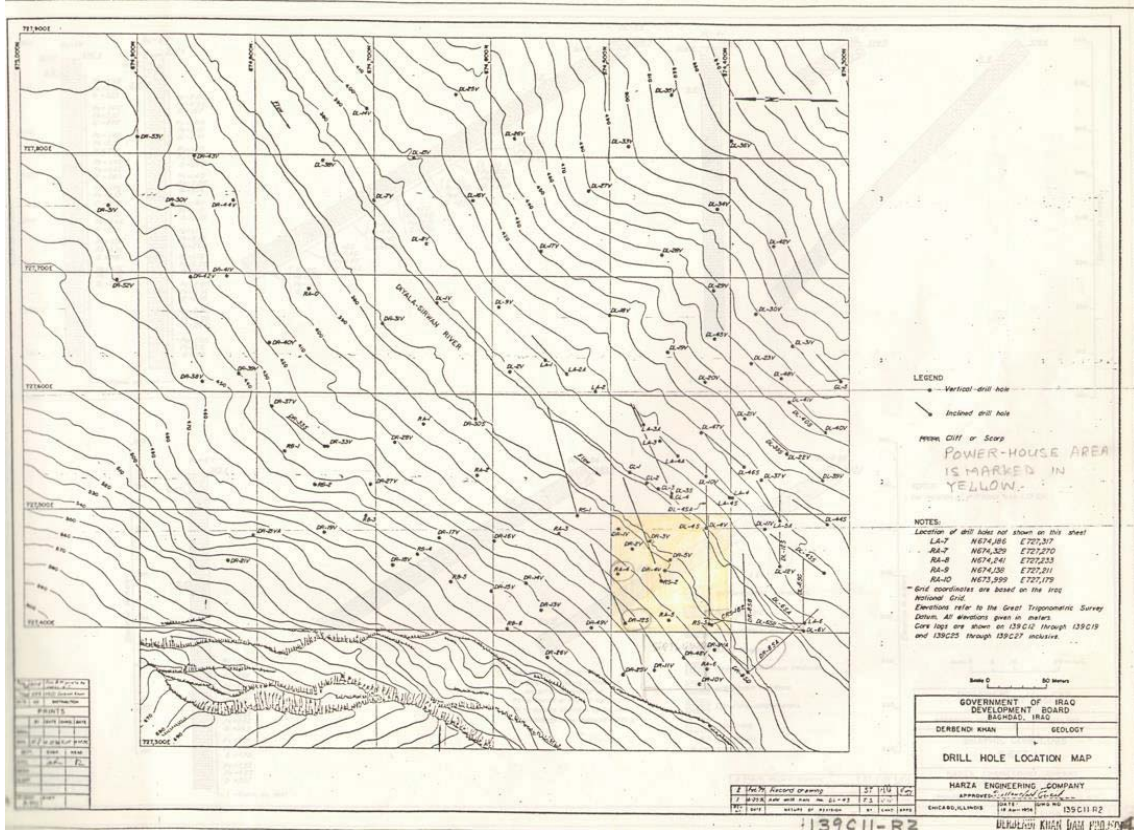
Jako podklad pro první fázi modelování sloužila následující mapa (Obrázek 2) zachycující vrstevnice a jejich výšky, která byla zdigitalizována za pomoci aplikace AutoCAD 2022 s modulem Raster Tools. Následně bylo potřeba značně zvětšit modelované území, čehož bylo dosaženo pomocí aplikace InfraWorks a Google Maps.



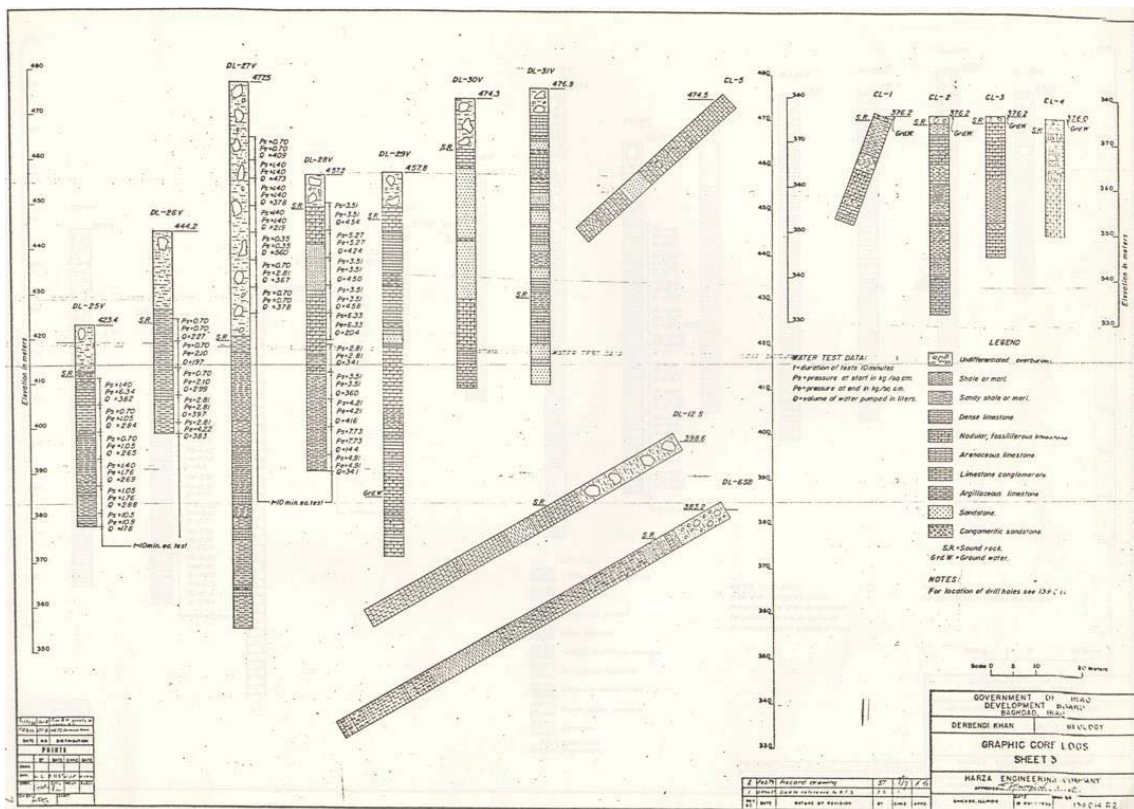
Obrázek 21. Vrstevnicová mapa zájmového území s vyznačením budoucího tělesa hráze a geologických vrtů

5.1.1.2 Podklady geologie

Tyto podklady také bylo nutné nejprve zdigitalizovat. Jednalo se o digitalizaci souřadnic jádrových vrtů, geologického profilu a orientaci u vrtů ukloněných. Souřadnice, označení a hloubku jednotlivých vrtů bylo možno přepsat z podkladu do excelovského souboru, ovšem geologický profil bylo nutné manuálně odečíst z grafického znázornění u každého vrtu zvlášť. Výsledkem jsou tři excelovské soubory obsahující souřadnice, orientaci a geologický profil, které sloužily jako vstup do geotechnického modulu aplikace Civil 3D.



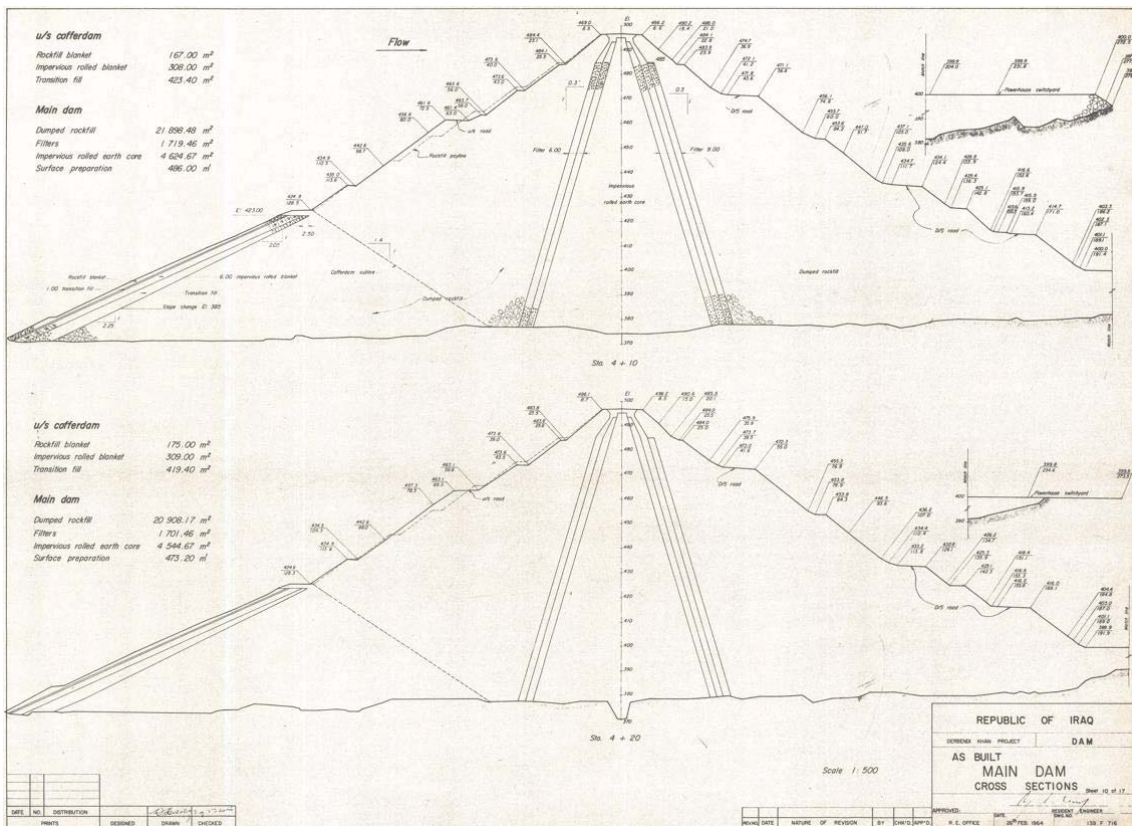
Obrázek 22. Mapa vyznačující polohu a označení průzkumných vrtných prací



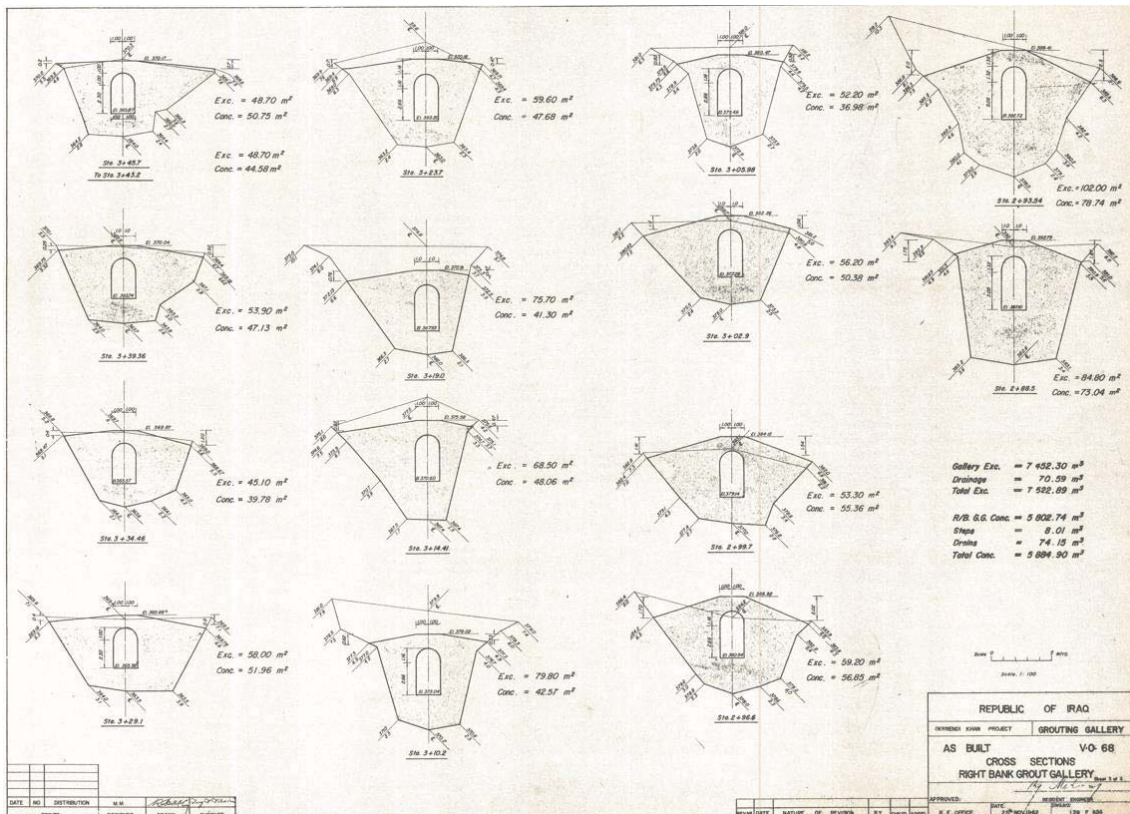
Obrázek 23. Grafické znázornění jádrových vrtnů zájmového území

5.1.1.3 Podklady tělesa hráze

Podobně jako u mapových podkladů byly i ty geologické dodány v naskenované podobě výkresů, které bylo nutné nejprve zdigitalizovat. Digitalizace geometrie v první fázi spočívala v odečítání vodorovných vzdáleností a nadmořské výšky od osy přehrady k oběma lícím ve zlomových bodech. Ve druhé fázi byl opět použit modul Raster Tools aplikace AutoCAD 2022 k digitalizaci povrchu terénu pod hrází a k digitalizaci geometrie, u kterého nebylo podrobnější zaměření.



Obrázek 24. Dva příčné řezy přehrady Darbandikhan



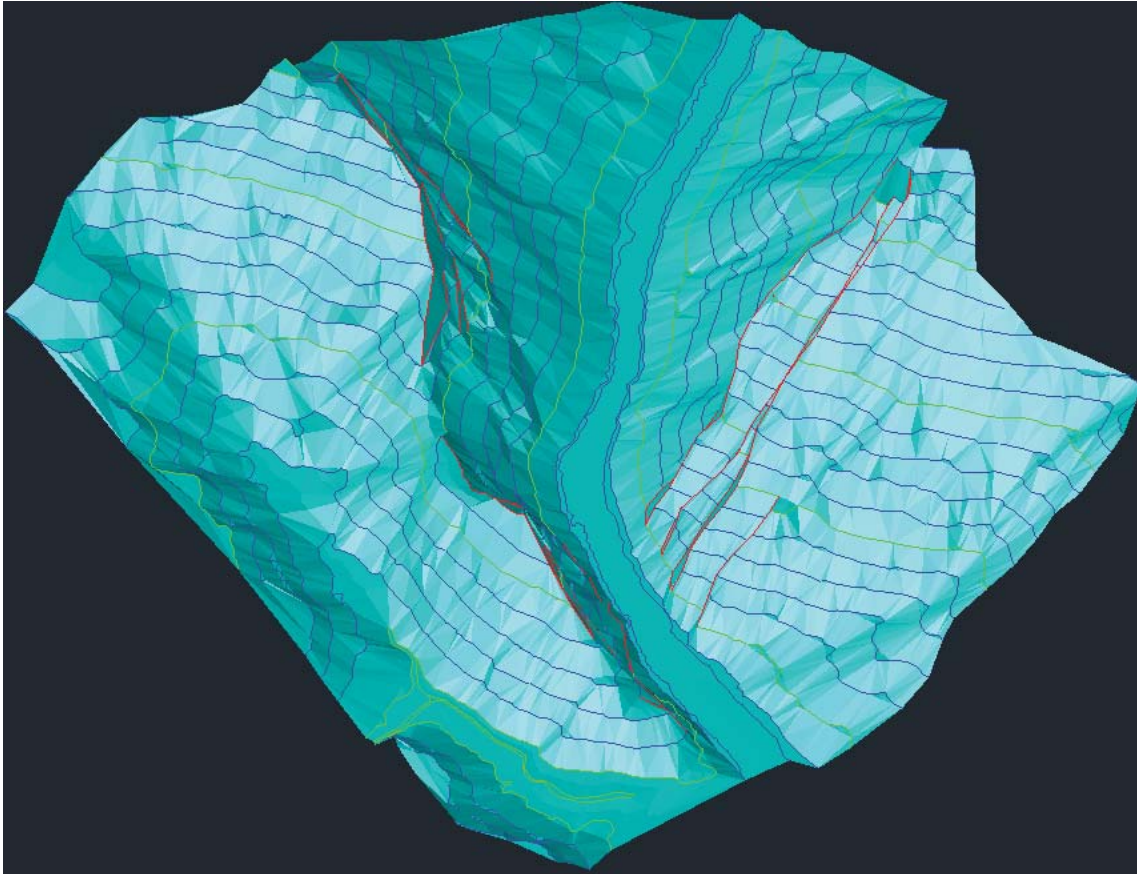
Obrázek 27. Několik příčných řezů pravé galerie se zaměřením

5.1.2 Dílčí 3D modely

S ohledem na problematiku, rozsáhlost celé úlohy a operace vyžadující rozdílné aplikace či moduly, bylo modelování rozděleno do jednotlivých ucelených celků. Tyto celky byly následně sloučeny do jednoho souboru, který byl vstupem pro další analýzy a úpravy.

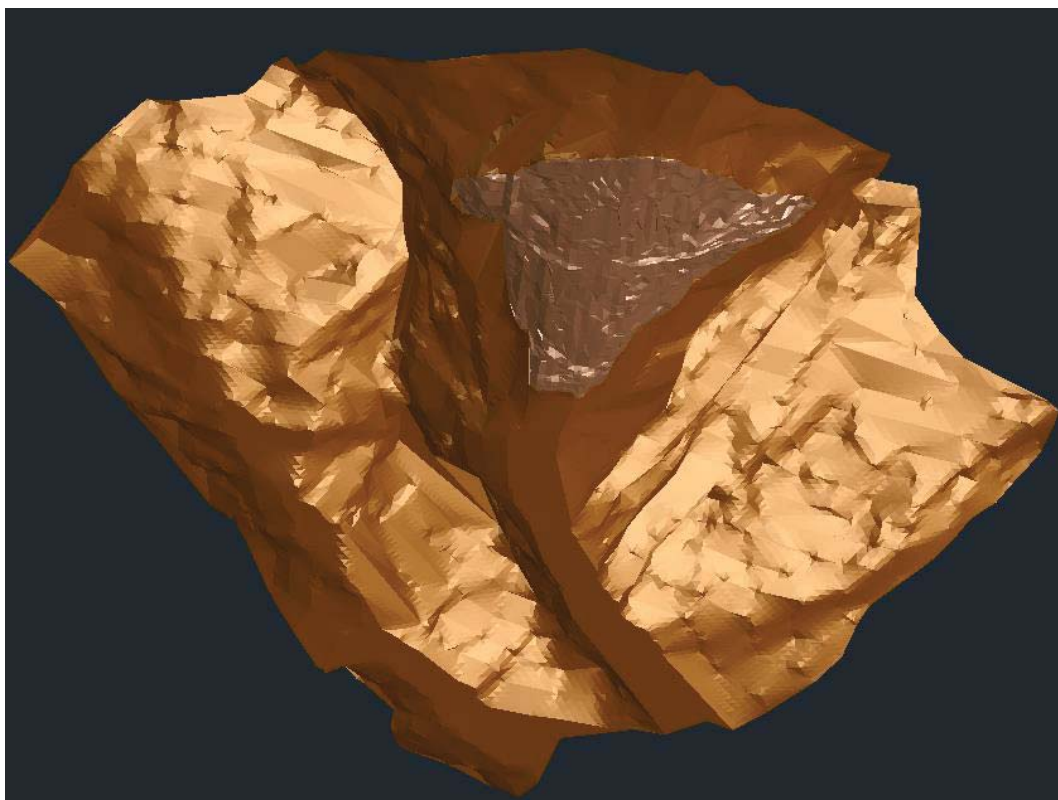
5.1.2.1 3D model terénu

Na základě vrstevnicových map (viz předchozí kapitola), byl nejprve vytvořen model terénu bezprostředně sousedící s vodním dílem. Tato část modelu povrchu byla vytvořena pomocí aplikace Civil 3D na základě vrstevnic digitalizovaných pomocí modulu Raster Tools z mapových podkladů (Obrázek 30).



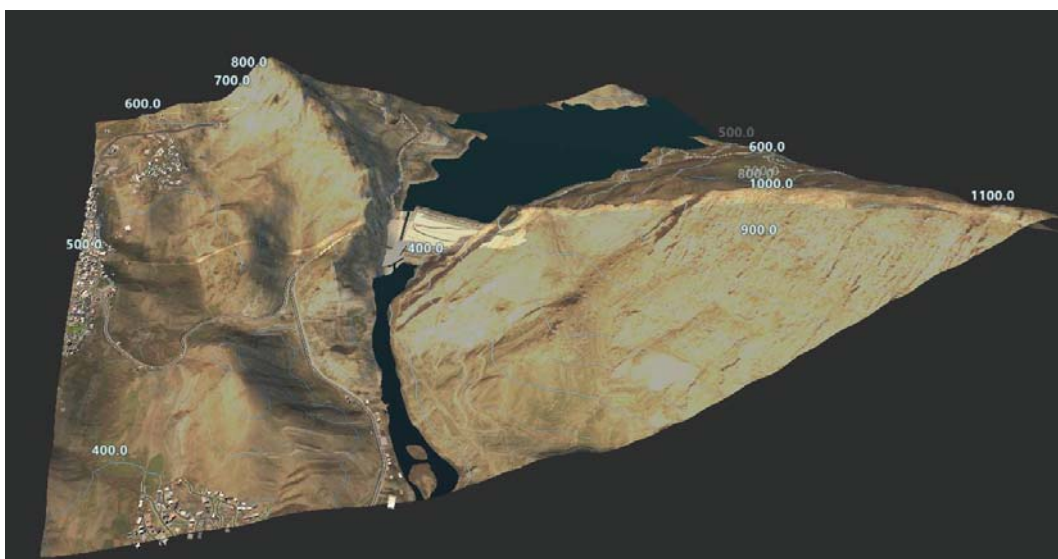
Obrázek 28. Model terénu okolí hráze vytvořen na základě vrstevnic

Dalším krokem bylo modelování povrchu terénu pod hrází, jelikož před výstavbou hráze byly veškeré pokryvy odtěženy. Jeho součástí je i povrch terénu pod galeriemi. Model povrchu terénu byl vytvořen na základě příčných řezů, modulu Raster Tools aplikace Civil 3D a dat získaných z příčných řezů galerií, kde je geometrie povrchu pod galeriemi zdokumentována. Výsledek sloučení povrchu pod hrází a mimo hráz je na obrázku 31.



Obrázek 29. Model terénu pod hrází a mimo hráz

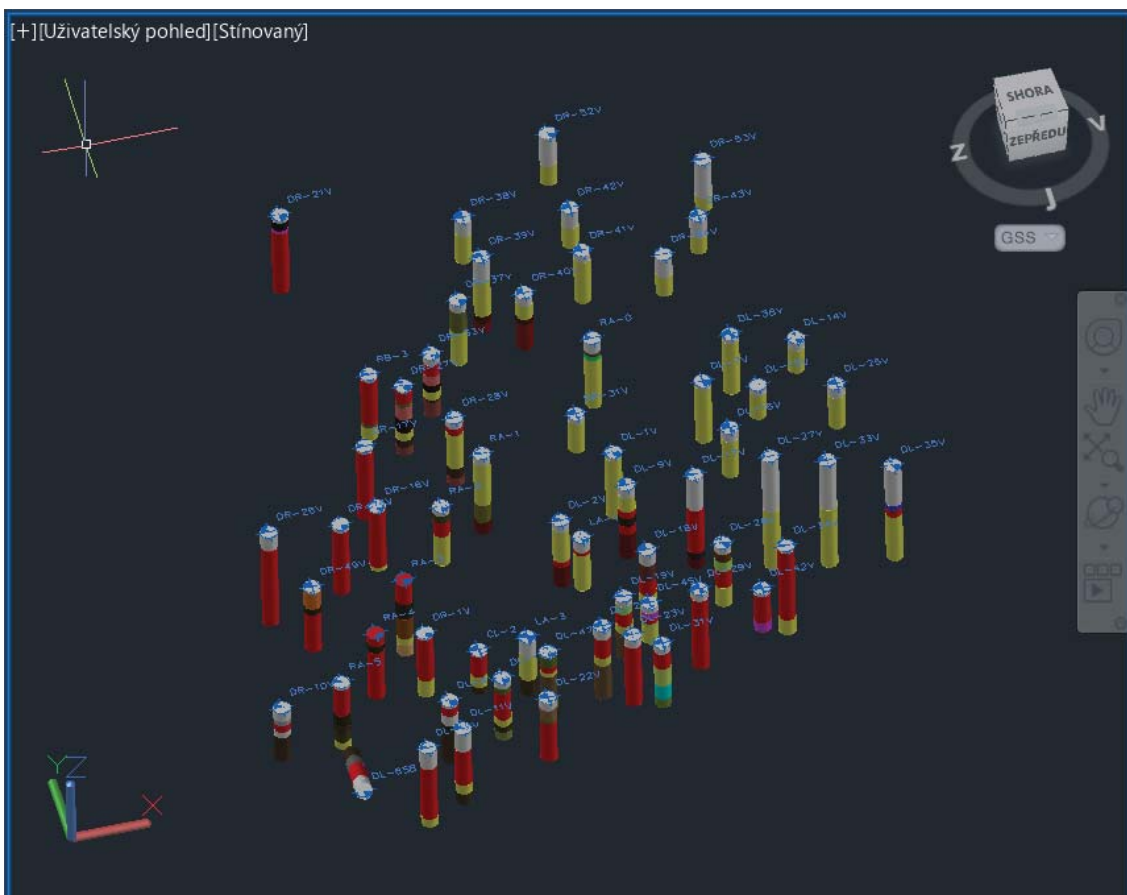
Následně byl model terénu pod hrází a mimo hráz rozšířen o značnou část povrchu za pomoci aplikace InfraWorks a podkladů Google maps (Obrázek 32). Toto rozšíření je nutné s ohledem na budoucí analýzu dynamického namáhání konstrukce a její odezvy. Tento postup modelování povrchu byl zvolen proto, aby co možná nejvěrohodněji popsal povrch pod hrází i mimo něj.



Obrázek 30. Model terénu aplikace InfraWorks

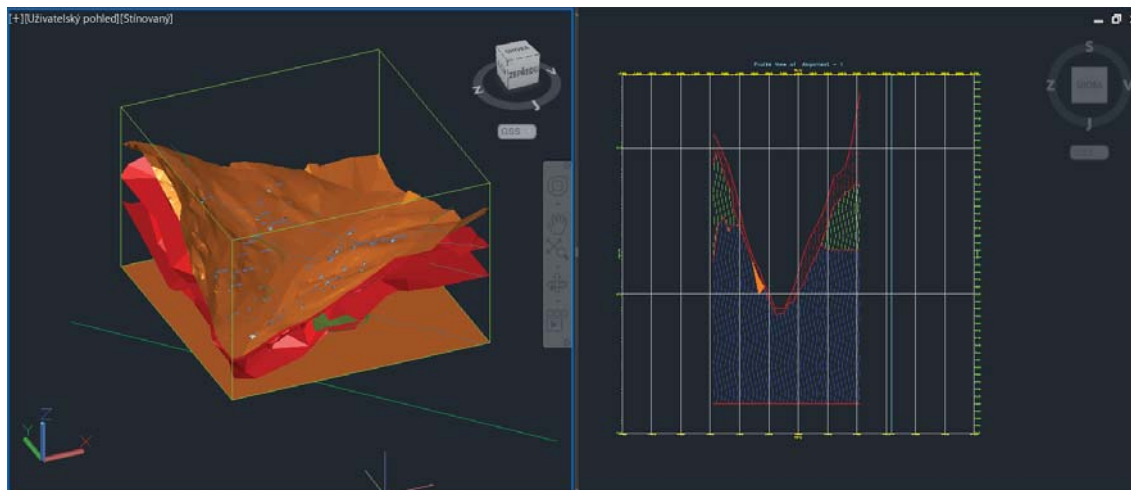
5.1.2.2 3D model geologie

Na základě podkladů k jádrovým vrtům byl za pomoci geotechnického modulu aplikace Civil 3D vytvořen model geologie zájmového území zahrnující 79 jádrových vrtů, a to jak vertikálních, tak i ukloněných, popřípadě jinak orientovaných. Tyto vrty jsou z velké části soustředěny pod samotné vodní dílo. K dokreslení a rozšíření geologie podle potřeb bylo využito vícero funkcí geotechnického modulu. Na obrázku 33 je vidět rozmístění vrtů a jejich profil.



Obrázek 31. Geologické vrty zájmového území Civil 3D

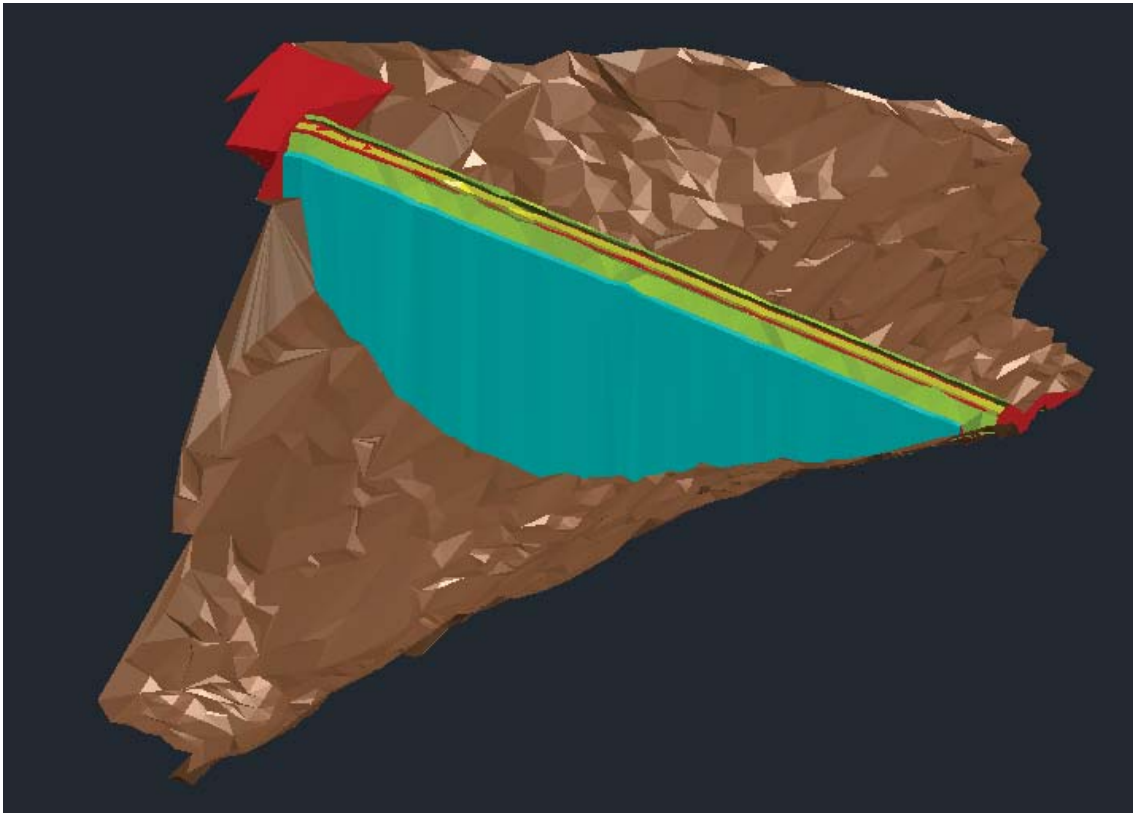
Výsledkem této práce je 3D model geologie (Obrázek 34), na němž je vidět rozhraní geologických vrstev. Na levé straně je vidět 3D model s jádrovými vrty a jednotlivými rozhraními, zatímco na pravé straně je převýšený příčný řez levého modelu.



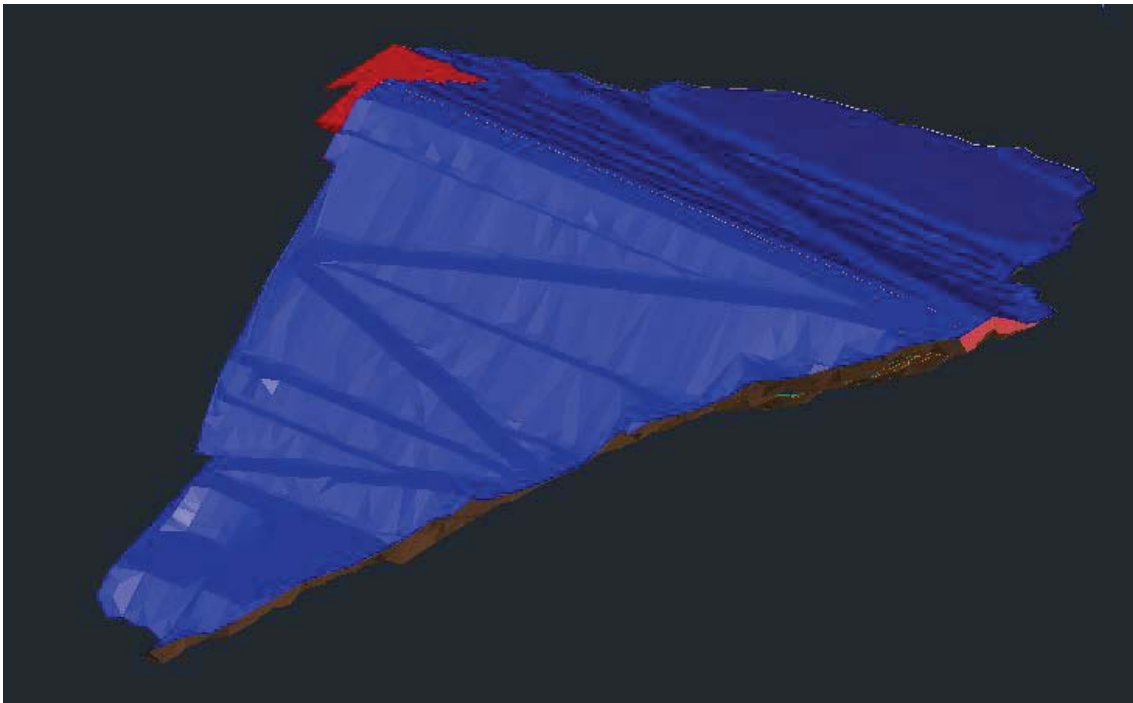
Obrázek 32. Model rozhraní geologických vrstev a příčný řez zájmovým územím

5.1.2.3 3D model tělesa hráze

Na základě příčných řezů a dat získaných odečtením výškových souřadnic spolu s horizontální vzdáleností od osy díla byl vytvořen model přehrady, viz obrázky 35 a 36. Části přehrady, jejichž souřadnice nebylo možno odečíst z příčných řezů, nebo tyto souřadnice zcela chyběly, byly doplněny opět pomocí digitalizace příčných řezů modulem Raster Tools. Model zahrnuje jádro přehrady, přepad, dvakrát filtr na návodní straně, třikrát filtr na vzdušné straně a oba líce přehrady (Obrázek 35).



Obrázek 33. Model vnitřních částí přehrady (těsnící jádro, filtry, přepad)



Obrázek 34. Model přehrady včetně návodního a vzdušného líce

5.1.2.4 3D model pravé a levé galerie

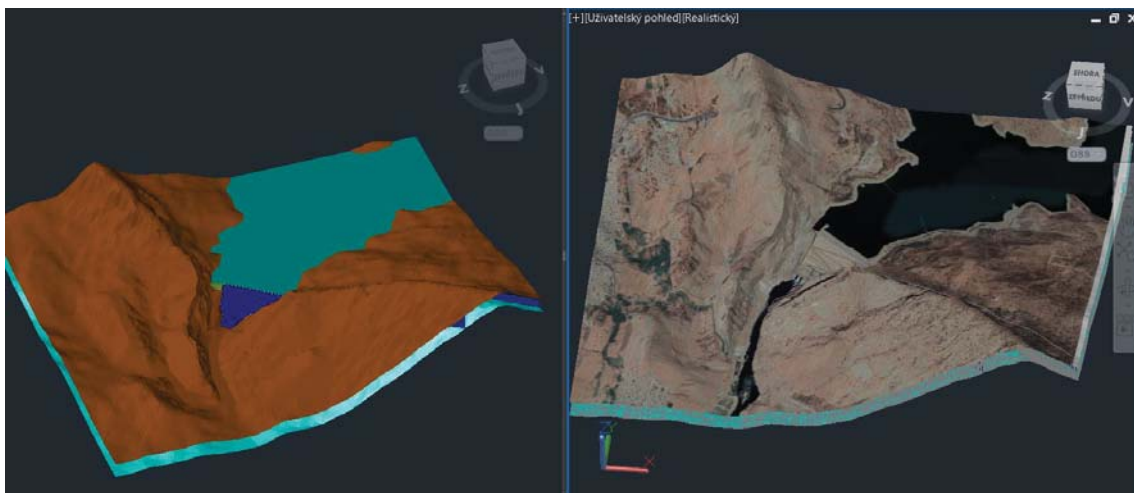
Model této části tělesa byl modelován obdobnými kroky jako předchozí. Geometrie byla převzata opět z příčných řezů. Na následujícím obrázku je v levé části vidět celkový pohled na umístění galerií, zatímco na pravé části je vidět detail. Na obrázku je červeně znázorněn obrys revizní chodby, žlutě povrch pod galerií a modře povrch betonové části pravé galerie (povrch betonu levé galerie není zobrazen) (Obrázek 37).



Obrázek 35. Celkový pohled v levé části a detail galerie v pravé části

5.1.3 Celý 3D model

Složením dílčích částí modelu (viz předchozí kapitoly) byl vytvořen komplexní model zahrnující geologické rozhraní jednotlivých vrstev pod hrází, povrch terénu pod hrází i mimo ni, galerie hráze, jádro a jednotlivé filtry. Na obrázku 38 je zobrazení celkového modelu ve stínovaném a realistickém zobrazení. Dále pak na obrázku 39 se nachází těleso hráze importované pomocí souřadnic GPS do aplikace Google Earth pro dokreslení celé situace.



Obrázek 36. V levé části celkový model ve stínovaném zobrazení a v pravé části model potažený mapovými podklady v realistickém zobrazení



Obrázek 37. Zobrazení tělesa hráze importovaného na základě souřadnic do Google Earth

5.2 Materiálové charakteristiky

Během zpracovávání geometrie zaslané Iráckou stranou (Ředitelstvím přehrady Darbandikhan) mělo dojít také k zahraničnímu výjezdu a sběru dat potřebných k této práci. Bohužel tento zahraniční výjezd, jehož se účastnil pan Ing. Daniel Jirásko, Ph.D., byl několikrát odložen, a to z mnoha důvodů. Úkolem tohoto zahraničního výjezdu bylo, mimo jiné, prozkoumat zájmové území a opatřit vzorky zemin, popřípadě pověřit Iráckou stranu provedením laboratorních a *in situ* zkoušek pro zajištění materiálových vlastností zemin a hornin užitých při této stavbě. Výjezd sice před odevzdáním práce proběhnul, ale Irácká strana nedodala žádné výsledky zkoušek. Z toho důvodu musely být charakteristické vlastnosti zemin odhadnuty na základě odborné literatury [27, 32, 33].

5.2.1 Materiálové charakteristiky podloží a pokryvu

Horniny byly pojmenovány na základě dostupných graficky znázorněných jádrových vrtů z geologického průzkumu, které byly použity i u tvorby rozhraní geologických vrstev v části model geologie. Následně jim byly přiřazeny materiálové charakteristiky na základě odborného odhadu a literatury [22, 25].

V podloží hráze se nacházejí dvě základní horniny. Jedná se o břidlici a vápenec, které jsou doplněny pískovcem ve formě malých čoček. Materiálové charakteristiky vápence a břidlice byly převzaty z následujících dvou tabulek (Tabulka 1 a 2) pro středně tvrdé horniny. Moduly přetvárnosti těchto dvou hornin byly odhadnuty na základě odborné literatury [22, 25]. Hodnoty pokryvných útvarů byly taktéž odhadnuty. Celkový přehled charakteristik jednotlivých hornin použitých do výpočtu bude zobrazen ve formě tabulky u výpočtu.

Tabulka 1. Pevnost hornin v prostém tlaku [25]

Pevnost hornin	Typy hornin (příklady)	Pevnost σ_c [MPa]	Poissonovo číslo ν	Objemová tíha horniny γ [kN/m ³]
Tvrdé horniny	žula hutná a celistvá, velmi tvrdé pískovce a vápence, křemité rudné žíly, tvrdý slepenec, velmi tvrdé železné rudy, tvrdé vápence, méně tvrdé žuly, pevné pískovce, mramory, dolomity, kyzy	80 - 100	0,20	25,00 - 26,00
Dostí tvrdé horniny	obyčejný pískovec, železné rudy středně tvrdé, písčité břidlice, břidličné pískovce	50 - 80	0,25	24,00
<u>Středně tvrdé horniny</u>	tvrdé hlinité břidlice, méně tvrdý pískovec a vápenec, měkký slepenec, různorodé nepřilíš tvrdé břidlice, hutný slín	<u>20 - 50</u>	<u>0,25 - 0,30</u>	<u>23 - 24,00</u>

Tabulka 2. Orientační parametry hornin v závislosti na pevnosti hornin v tlaku [22]

Pevnost horniny v prostém tlaku σ_{ci} [MPa]	Pevnostní parametr horniny podle Hoeka m_i [-]	GSI [-]	Soudržnost horniny c [kPa]	Úhel vnitřního tření horniny φ [°]
150	25	75	7000 - 13000	46 - 68
80	12	50	3000 - 4000	30 - 65
50	16	75	2000 - 4000	40 - 60
30	15	65	1000 - 2000	40 - 60
20	8	30	400 - 600	20 - 44
15	10	24	300 - 500	24 - 38
5	10	20	90 - 100	23 - 28

5.2.2 Materiálové charakteristiky hráze

Na základě příčných řezů se těleso hráze se skládá ze zemního těsnícího jádra, filtru 1 a 2 na návodní i vzdušné straně, a dále pak z filtru 3 na vzdušné straně. Filtry jsou na návodní i vzdušné straně chráněny stabilizační částí pomocí rockfillu. Opět ani k jednomu z těchto materiálů nejsou momentálně dostupné materiálové charakteristiky a musely být odhadnuty na základě literatury [27, 32, 33]. Základní odhady charakteristik materiálů byly provedeny za pomoci dnes již neplatné normy ČSN 73 1001. Pro těsnící jádro byla odhadována třída F6 následující tabulky (Tabulka 5) ze stejné normy.

Filtry 1 a 2 byly uvažovány jako písčité zeminy S1 a S2 (Tabulka 3) z normy ČSN 73 1001. Filtr číslo 3 byl uvažován obdobným způsobem a zaříděn do třídy G1 (Tabulka 4). Materiálové charakteristiky stabilizační části tvořeného kamenitým náspelem (rockfillem) byly odhadnuty na základě tabulky 5 a upřesněny odbornou literaturou [23].

Tabulka 3. Směrné normové charakteristiky písčitých zemín ČSN 73 1001

Třída	Symbol	ν	β	γ kN.m ⁻³	E_{def} MPa		φ_{ef} °		c_{ef} kPa	Činitelé ovlivňující stanovení charakteristik v rámci rozpětí třídy
					$I_D = 0,33$ až $0,67$	$I_D = 0,67$ až $1,0$	$I_D = 0,33$ až $0,67$	$I_D = 0,67$ až $1,0$		
S 1	SW	0,28	0,78	20	30 až 60	50 až 100	34 až 39	37 až 42	0	I_D , w, % g, tvar zrn, angularita
S 2	SP	0,28	0,78	18,5	15 až 35	30 až 50	32 až 35	34 až 37	0	
S 3	S-F	0,30	0,74	17,5	12 až 19	17 až 25	28 až 31	30 až 33	0	
S 4	SM	0,30	0,74	18	5 až 15		28 až 30		0 až 10	podíl jemných částic a konzistence zeminy
S 5	SC	0,35	0,62	18,5	4 až 12		26 až 28		4 až 12	

Tabulka 4. Směrné normové charakteristiky štěrkovitých zemín ČSN 73 1001

Třída	Symbol	ν	β	γ kN.m ⁻³	E_{def} MPa		φ_{ef} °		c_{ef} kPa	Činitelé ovlivňující stanovení charakteristik v rámci rozpětí třídy
					$I_D = 0,33$ až $0,67$	$I_D = 0,67$ až $1,0$	$I_D = 0,33$ až $0,67$	$I_D = 0,67$ až $1,0$		
G 1	GW	0,20	0,90	21	250 až 390	360 až 500	36 až 41	39 až 44	0	I_D , w, % g, tvar zrn, angularita
G 2	GP	0,20	0,90	20	100 až 190	170 až 250	33 až 38	36 až 41	0	
G 3	G-F	0,25	0,83	19	80 až 90	90 až 100	30 až 35	33 až 38	0	
G 4	GM	0,30	0,74	19	60 až 80		30 až 35		0 až 8	podíl jemných částic a konzistence zeminy
G 5	GC	0,30	0,74	19,5	40 až 60		28 až 32		2 až 10	

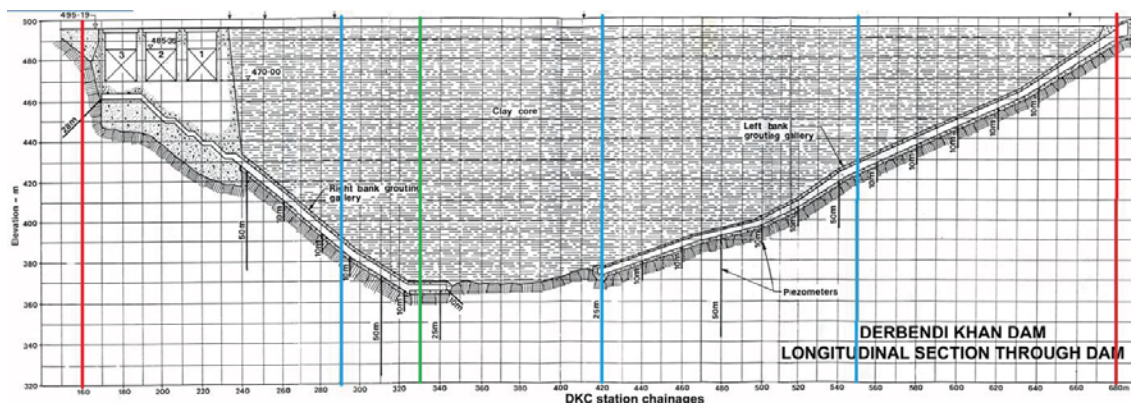
Tabulka 5. Směrné normové charakteristiky jemnozrnných zemin ČSN 73 1001

Třída	Symbol	Charakteristika	Konzistence							
			měkká	tuhá	pevná		tvrdá			
			—	—	$S_r > 0,8$	$S_r < 0,8$	$S_r > 0,8$	$S_r < 0,8$		
F 1	MG	ν, β, γ kN/m ³	$\nu = 0,35; \beta = 0,62; \gamma = 19,0;$				vyšetří se zkouškami			
		E_{def} MPa	5 až 10	10 až 20	12 až 21	15 až 30				
		c_u kPa	40	70	70	70 až 80				
		φ_v °	0	0	10	12 až 15				
		c_d kPa	4 až 12		8 až 16	16 až 12			16 až 24	vyšetří se zkouškami
		φ_d °	26 až 32							
F 2	CG	ν, β, γ kN/m ³	$\nu = 0,35; \beta = 0,62; \gamma = 19,5;$				vyšetří se zkouškami			
		E_{def} MPa	4 až 8	7 až 15	10 až 12	18 až 25				
		c_u kPa	30	60	60	60 až 70				
		φ_v °	0	0	10	12 až 15				
		c_d kPa	6 až 14		10 až 18	18 až 36			18 až 26	vyšetří se zkouškami
		φ_d °	24 až 30							
F 3	MS	ν, β, γ kN/m ³	$\nu = 0,35; \beta = 0,62; \gamma = 18,0;$				vyšetří se zkouškami			
		E_{def} MPa	3 až 6	5 až 8	8 až 12	12 až 15				
		c_u kPa	30	60	60	60 až 70				
		φ_v °	0	0	10	12 až 15				
		c_d kPa	8 až 16		12 až 20	20 až 40			20 až 28	vyšetří se zkouškami
		φ_d °	24 až 29							
F 4	CS	ν, β, γ kN/m ³	$\nu = 0,35; \beta = 0,62; \gamma = 18,5;$				vyšetří se zkouškami			
		E_{def} MPa	2,5 až 4	4 až 6	5 až 8	8 až 12				
		c_u kPa	30	50	70	70 až 80				
		φ_v °	0	0	5	8 až 14				
		c_d kPa	10 až 18		14 až 22	22 až 44			22 až 30	vyšetří se zkouškami
		φ_d °	22 až 27							
F 5	ML MI	ν, β, γ kN/m ³	$\nu = 0,40; \beta = 0,47; \gamma = 20,0$				vyšetří se zkouškami			
		E_{def} MPa	1,5 až 3	3 až 5	5 až 8	7 až 10			10 až 15	12 až 20
		c_u kPa	30	60	70	70 až 80			200	80 až 90
		φ_v °	0	0	5	8 až 14			0	15 až 20
		c_d kPa	8 až 16		12 až 20	20 až 40			20 až 28	vyšetří se zkouškami
		φ_d °	19 až 23							
F 6	CL CI	ν, β, γ kN/m ³	$\nu = 0,40; \beta = 0,47; \gamma = 21,0$				vyšetří se zkouškami			
		E_{def} MPa	1,5 až 3	3 až 6	6 až 8	8 až 12			10 až 15	12 až 20
		c_u kPa	25	50	80	80 až 90			170	80 až 90
		φ_v °	0	0	0	4 až 12			0	14 až 18
		c_d kPa	8 až 16		12 až 20	20 až 40			20 až 28	vyšetří se zkouškami
		φ_d °	17 až 21							
F 7	MH MV ME	ν, β, γ kN/m ³	$\nu = 0,40; \beta = 0,47; \gamma = 21,0$				vyšetří se zkouškami			
		E_{def} MPa	1 až 3	3 až 5	5 až 7	7 až 10			10 až 15	12 až 20
		c_u kPa	25	50	80	80 až 90			170	80 až 90
		φ_v °	0	0	0	4 až 12			0	14 až 18
		c_d kPa	4 až 10		8 až 16	14 až 28			16 až 24	vyšetří se zkouškami
		φ_d °	15 až 19							
F 8	CH CV CE	ν, β, γ kN/m ³	$\nu = 0,42; \beta = 0,37; \gamma = 20,5;$				vyšetří se zkouškami			
		E_{def} MPa	1 až 2	2 až 4	4 až 6	6 až 8			8 až 10	10 až 15
		c_u kPa	20	40	80	80 až 90			150	80 až 90
		φ_v °	0	0	0	3 až 10			0	12 až 16
		c_d kPa	2 až 8		6 až 14	14 až 28			14 až 22	vyšetří se zkouškami
		φ_d °	13 až 17							

5.3 Posouzení pomocí programu GEO 5

Program GEO 5 zahrnuje ucelený soubor podprogramů určených k řešení nejrůznějších geotechnických úloh. Pro účel této práce byl použit program Stabilita svahu. Tento program slouží k výpočtu stability svahu čili obecně vrstevnatého zemního tělesa. Program nabízí výpočet kruhové i polygonální smykové plochy. Kruhová smyková plocha může být řešena pomocí Bishopovy, Pettersonovy popřípadě Spencerovy metody. Polygonální smykovou plochu lze řešit v programu pomocí Sarmovy a Spencerovy metody [24].

Pomocí programu Stabilita svahu byly vyšetřeny 4 příčné řezy znázorněné na následujícím podélném řezu (Obrázek 40). Jedná se o řezy se staničením 290, 330, 420 a 550 m. Červeně jsou znázorněny krajní příčné řezy, které byly součástí podkladu geometrie. Modře jsou znázorněny vyšetřované příčné řezy v třetinách délky přehradního tělesa. Zeleně je znázorněn vyšetřovaný příčný řez s maximální vzdáleností mezi povrchem terénu pod hrází a korunou.



Obrázek 38. Podélný řez hrází s vyznačením řešených řezů

Geometrie včetně podloží těchto čtyřech vyšetřovaných příčných řezů byla vygenerována z 3D modelu. Z důvodů omezení povrchových smykových ploch, které pro posouzení nejsou vypovídající, byla stabilizační část (oba líce) doplněna o úzký, 3 m široký povrchový pás s mírně odlišnými charakteristikami.

Stabilitní výpočty pro zmíněné příčné řezy byly celkově řešeny dvojitým způsobem a lišily se primárně metodikou posouzení. V prvním případě byly příčné řezy řešeny podle normy ČSN EN 1997-1 (Eurokód 7: Navrhování geotechnických konstrukcí), na kterou odkazuje článek 12.3.3 normy ČSN 75 2310 (Sypané hráze). Norma ČSN EN 1997-1 stanovuje dílčí součinitele spolehlivosti a soudržnosti pro stabilitní posouzení.

V programu Stabilita svahu byl zvolen návrhový přístup 3 – redukce zatížení GEO, STR a materiálu. V druhém případě byly příčné řezy řešeny metodou mezní rovnováhy vycházející z rovnováhy na smykové ploše podle článku 12.3.2 normy ČSN 75 2310. Na základě tabulky 7 (Zatěžovací stavy), na kterou taktéž odkazuje článek 12.3.2 normy ČSN 75 2310, a stupňů bezpečnosti svahu, lze pak posoudit bezpečnost svahu. Dále pak článek 12.3.2 odkazuje na posouzení sypaných hrází se středním těsnícím jádrem proti posunutí. Stupeň bezpečnosti pak musí být větší než 1,5 při maximální hladině vody v nádrži a minimální hladině pod hrází. Tato práce se omezuje pouze na stabilitu svahu, posouzení posunutí zde není řešeno.

5.3.1 Vstupy do programu GEO 5

Na základě kapitoly 5.2. Materiálové charakteristiky byly uvažovány následující vlastnosti podloží a tělesa hráze (Tabulka 6).

Tabulka 3. Materiálové vlastnosti užití v programu Stabilita svahu

Materiálové vlastnosti Geo5					
Typ	γ [kN/m ³]	γ_{sat} [kN/m ³]	c_{ef} [kN/m ²]	ϕ_{ef} [°]	X [-]
Rockfill	20	21	0	50	1.00
Rockfill_2	20	21	10	50	1.00
Core	21	22	30	21	0.05
Filter_1	18	19	0	38	0.50
Filter_2	18	19	0	42	0.75
Filter_3	21	22	0	44	0.90
Foundation	24	24	3000	50	0.00

Jelikož se na koruně hráze nachází veřejná komunikace spojující přilehlé oblasti, je zde zohledněno také zatížení od dopravy. Jelikož nám není znám charakter dopravy, bude ve výpočtu započteno zatížení nákladní dopravy. Na základě normy ČSN 73 6101 (Projektování silnic a dálnic) byla komunikace na koruně hráze zatříděna do kategorie

dvoupruhových silnic S 9,5. Po přepočtení těžkého nákladního vozidla na plošnou hmotnost je ve výpočtech uvažováno zatížení 16 kN/m. Toto zatížení je uvažováno po celou šíři komunikace.

Zatěžovací stav zemětřesením je zahrnut do výpočtu v programu Stabilita svahu následujícím způsobem. Podle normy ČSN 75 2310 Sypané hráze mají být hráze schopné odolávat zemětřesení o síle 8 ° MSK 64. Program Stabilita svahu umožňuje počítat účinky zemětřesení pomocí dvou proměnných, a to faktoru vodorovné akcelerace K_h a koeficientu svislého zemětřesení K_v . Na základě následující tabulky (Tabulka 7) pro odečtení faktoru vodorovného zrychlení K_h pomocí MSK 64 byl stanoven faktor K_h na 0,04. Koeficient svislého zemětřesení K_v podle normy ČSN EN 1998-5 je polovina K_h , tedy 0,02.

Tabulka 4. Stupeň M-C-S a faktoru vodorovného zrychlení K_h [21]

Stupeň M-C-S	Vodorovné zrychlení			Faktor vodorovného		
(MSK-64)	[mm/s ²]			zrychlení K_h		
1	0,0	-	2,5	0,0	-	0,00025
2	2,5	-	5,0	0,00025	-	0,0005
3	5,0	-	10,0	0,0005	-	0,001
4	10,0	-	25,0	0,001	-	0,0025
5	25,0	-	50,0	0,0025	-	0,005
6	50,0	-	100,0	0,005	-	0,01
7	100,0	-	250,0	0,01	-	0,025
8	250,0	-	500,0	0,025	-	0,05
9	500,0	-	1000,0	0,05	-	0,1
10	1000,0	-	2500,0	0,1	-	0,25
11	2500,0	-	5000,0	0,25	-	0,5
12		>	5000,0		>	0,5

5.3.2 Výpočtové fáze jednotlivých příčných řezů

Podle tabulky 7 (Zatěžovací stavy) uvedené v normě ČSN 75 2310 (Tabulka 16) se mají sypané hráze posuzovat podle stupně bezpečnosti svahu:

- A) Během výstavby
 - Pro vypočtené pórové tlaky
 - Pro měřené pórové tlaky
- B) Po dokončení výstavby
 - a. Nádrž prázdná
 - Pro vypočtené pórové tlaky
 - Pro měřené pórové tlaky
 - b. Nádrž částečně naplněná
 - c. Nádrž plná
 - Náhlý pokles hladiny v nádrži
 - d. Z maximální na kritickou
 - e. Podle manipulačního řádu
- C. Zemětřesení do 8 ° MSK 64 včetně

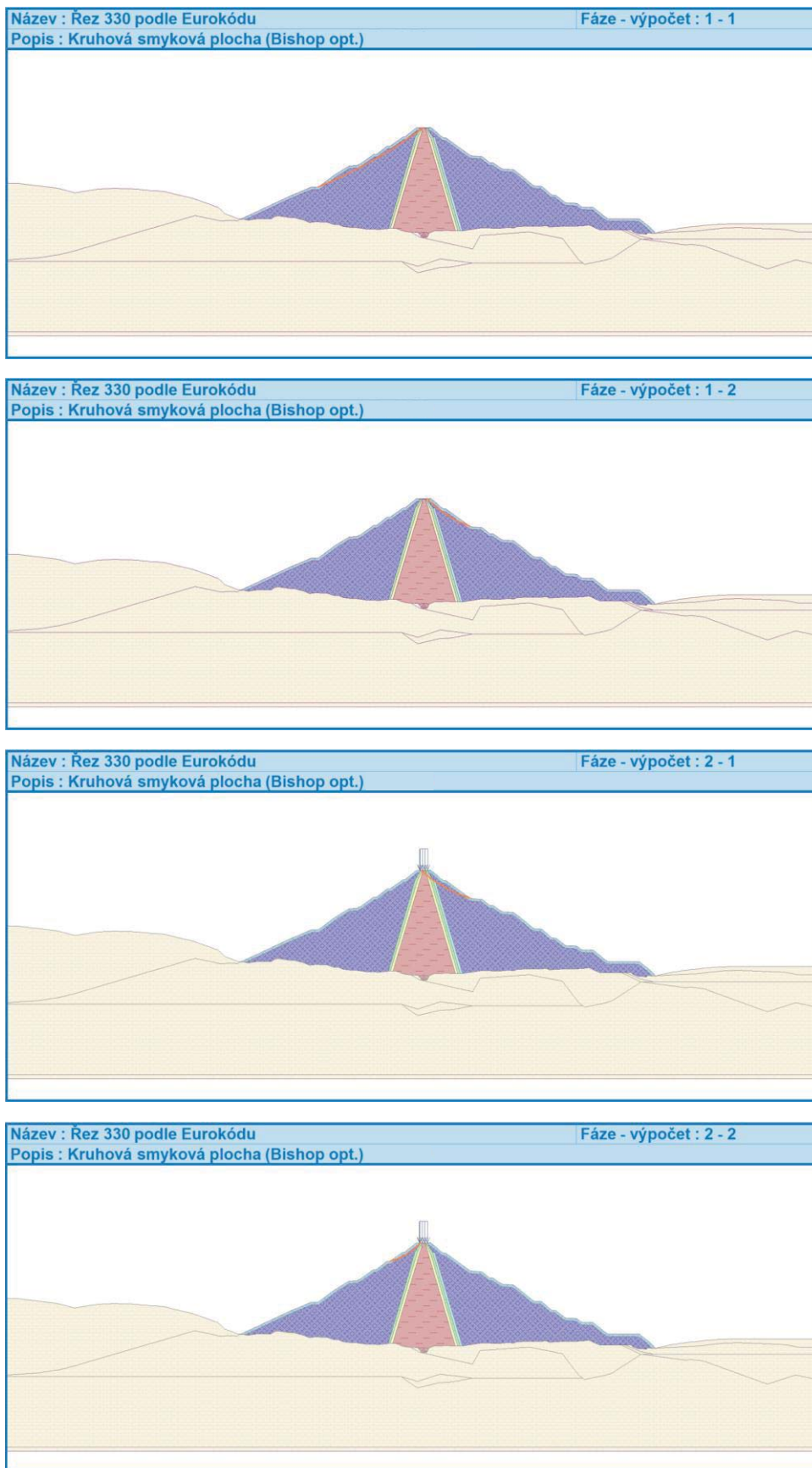
S ohledem na skutečnost, že stavba již desetiletí plní svou funkci, je fáze výstavby přeskočena. Pro výpočty stability svahu jsou uvažovány následující výpočtové fáze a jejich výpočty:

- **Fáze 1.** Nezátížené přehradní těleso s kruhovou smykovou plochou podle Bishopa s optimalizací na návodním i vzdušném líci.
- **Fáze 2.** Zátížené přehradní těleso s kruhovou smykovou plochou podle Bishopa s optimalizací na návodním i vzdušném líci.
- **Fáze 3.** Zátížené přehradní těleso s polygonální smykovou plochou podle metody Janbu s optimalizací na návodním i vzdušném líci.
- **Fáze 4.** Částečně napuštěná přehradní nádrž se zatížením přehradního tělesa. Smyková plocha je v prvním případě uvažována jako kruhová podle Bishopa s optimalizací. Ve druhém případě je uvažována polygonální smyková plocha podle metody Janbu s optimalizací. Oba výpočty provedeny na návodním líci.

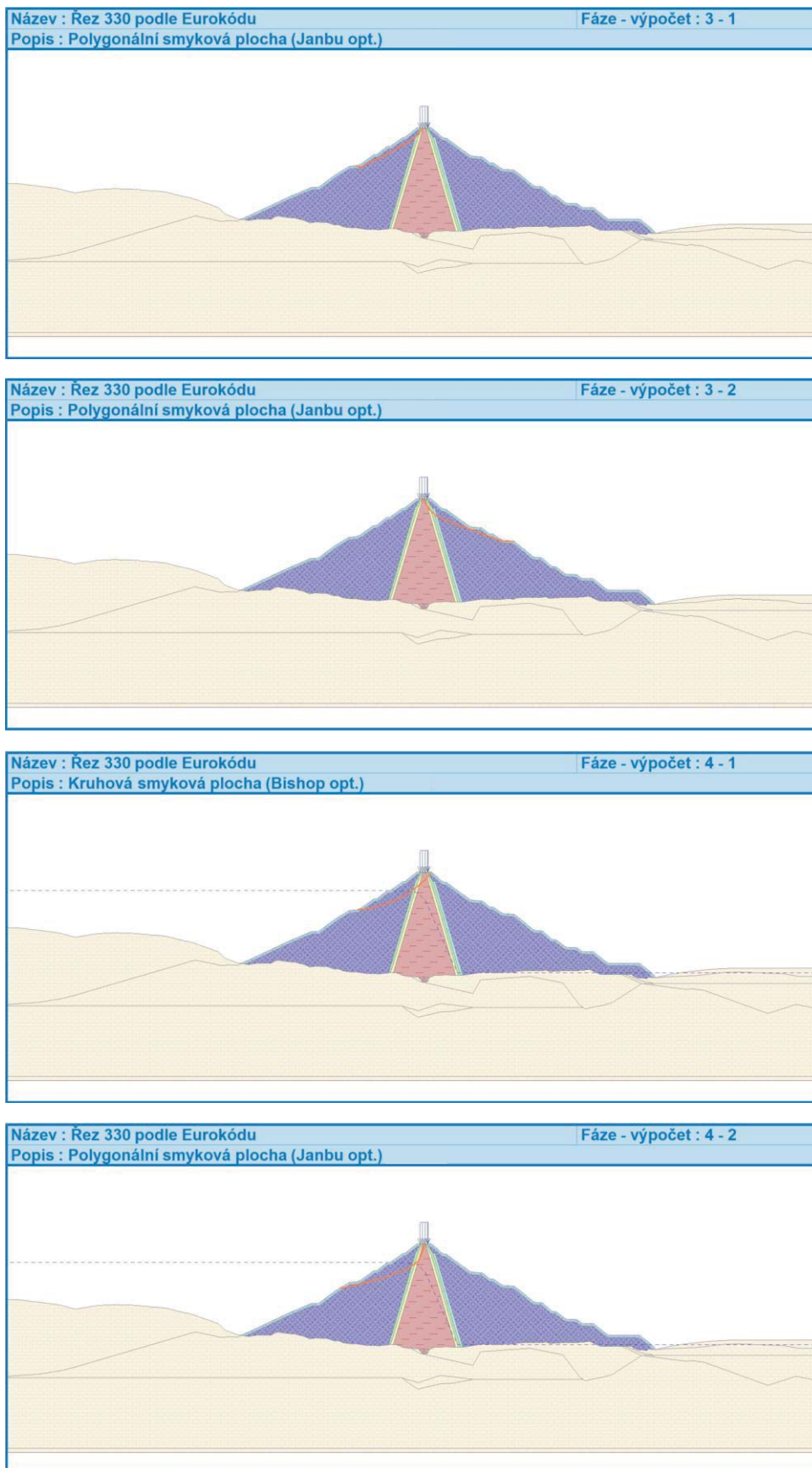
- **Fáze 5.** Plně napuštěná přehradní nádrž se zatížením přehradního tělesa. Fáze obsahuje 4 výpočty. První výpočet s uvažováním kruhové smykové plochy metodou Bishop s optimalizací na návodním líci. Druhý výpočet uvažuje polygonální smykovou plochu metodou Janbu s optimalizací taktéž na návodním líci. Třetí výpočet je obdobou druhého na vzdušném líci. Čtvrtý výpočet metodou Janbu bez optimalizace reprezentuje hlubokou smykovou plochu.
- **Fáze 6–9.** Cílem těchto fází je najít největší využití smykové pevnosti předpokládané smykové plochy při různých výškách hladiny v nádrži. Přehradní těleso je zatížené a vodní hladina v nádrži kolísá.
- **Fáze 10.** Fáze předpokládá zatížení tělesa hráze spolu s rychlým poklesem hladin z maximální možné na výšku hladiny s maximálním využitím smykové pevnosti potenciální smykové plochy zjištěné ve fázích 6 až 9. Obsahuje 3 výpočty. První výpočet uvažuje kruhovou smykovou plochu podle Bishopovy metody bez optimalizace. Druhý výpočet uvažuje optimalizaci prvního. Třetí výpočet uvažuje polygonální smykovou plochu podle metody Janbu s optimalizací. Všechny výpočty jsou provedeny na návodním líci.
- **Fáze 11** Fáze uvažuje maximální hladinu v nádrži spolu se zatížením přehradního tělesa spolu se seismickým zemětřesením. Obsahuje celkem 4 výpočty, první 2 uvažují kruhovou smykovou plochu metodou Bishop s optimalizací na návodním a vzdušném líci. Zbýlé uvažují polygonální smykové plochy metodou Janbu s optimalizací, taktéž každý na jednom líci.
- **Fáze 12** Poslední uvažovanou fází je rychlý pokles hladiny v nádrži z maximální na minimální, tedy z výšky hladiny 493,5 na 434 m.

5.3.3 Výsledky programu Stabilita svahu

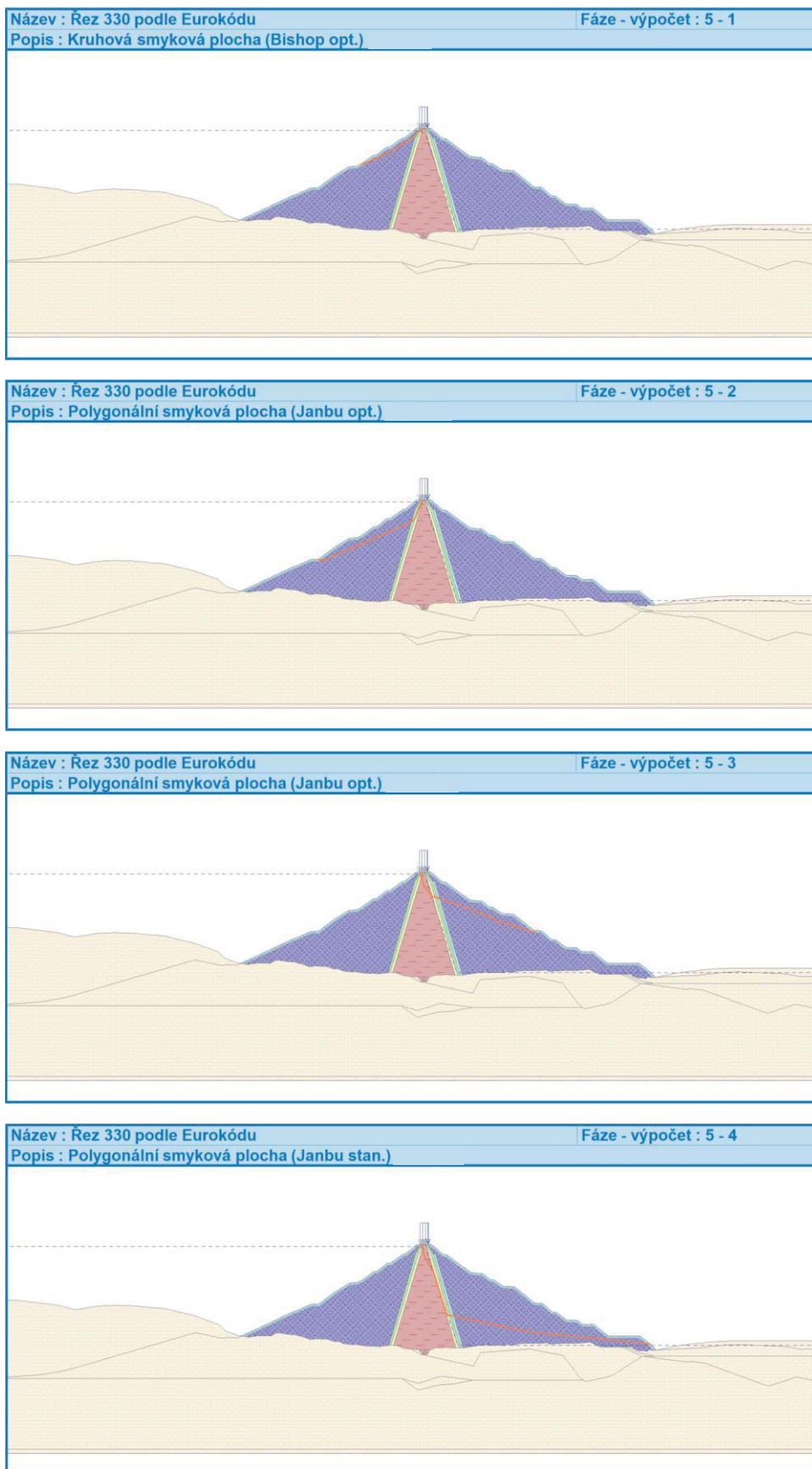
Příčné řezy byly zatíženy jednotlivými fázemi tak, jak je uvedeno v předchozí kapitole. Na následujících obrázcích (Obrázek 41–47) jsou výsledky programu Stabilita svahu včetně zobrazení potenciálních smykových ploch pro řez 330, které byly řešeny podle Eurokódů s vlivem dílčích součinitelů. V další podkapitole jsou výsledky následně uvedeny pro všechny příčné řezy v přehledných tabulkách.



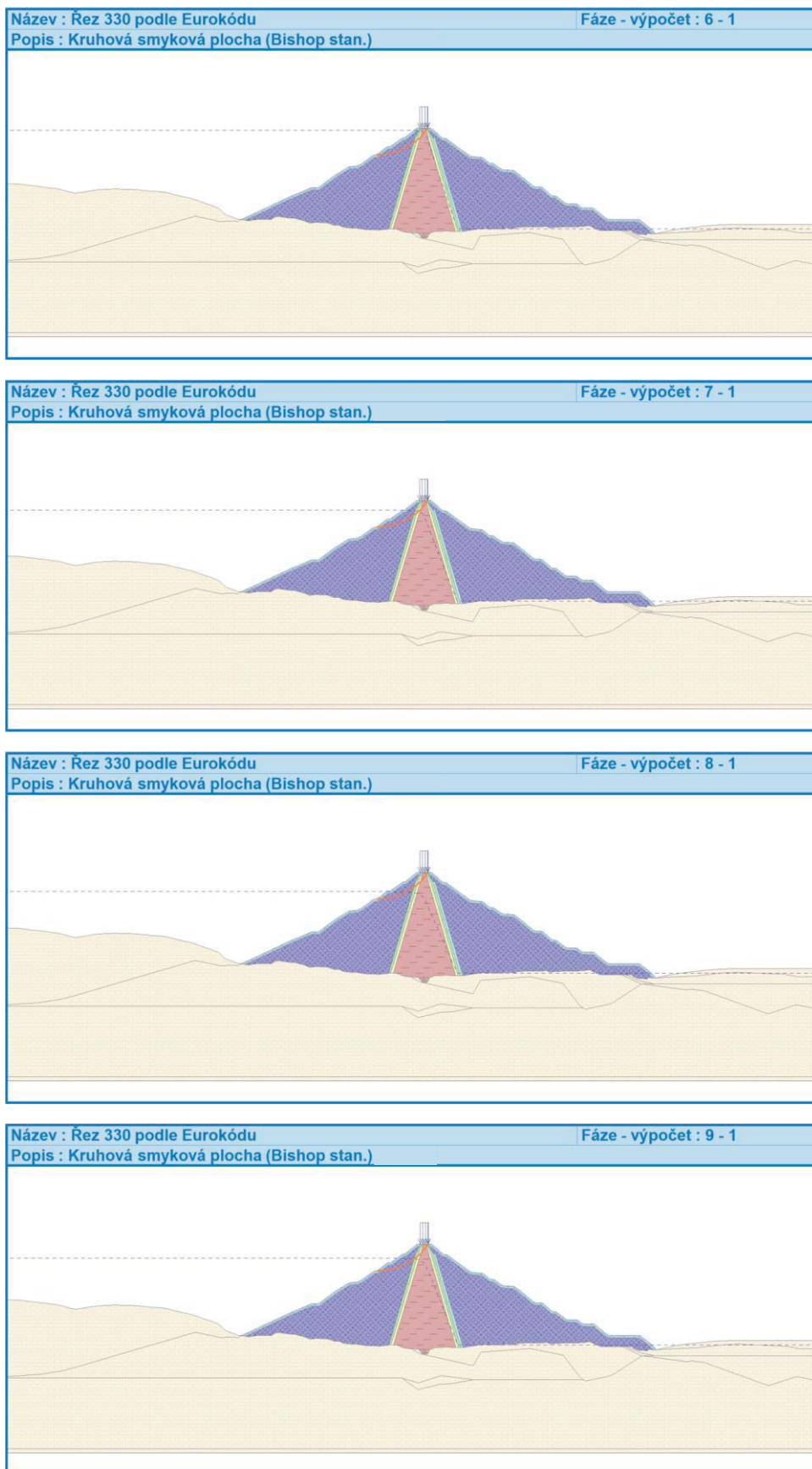
Obrázek 39. Výsledky řezu 330 podle Eurokódů 1



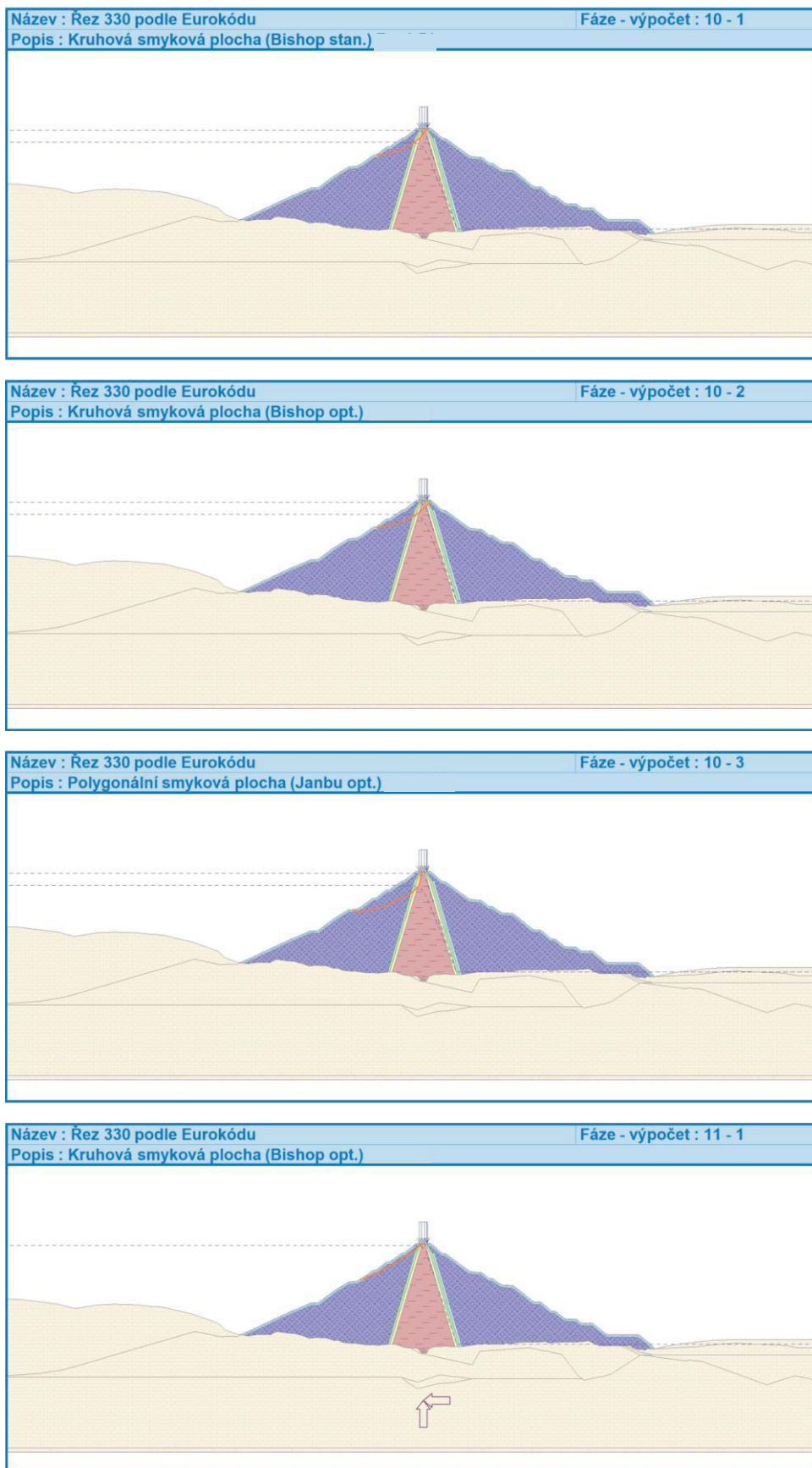
Obrázek 40. Výsledky řezu 330 podle Eurokódů 2



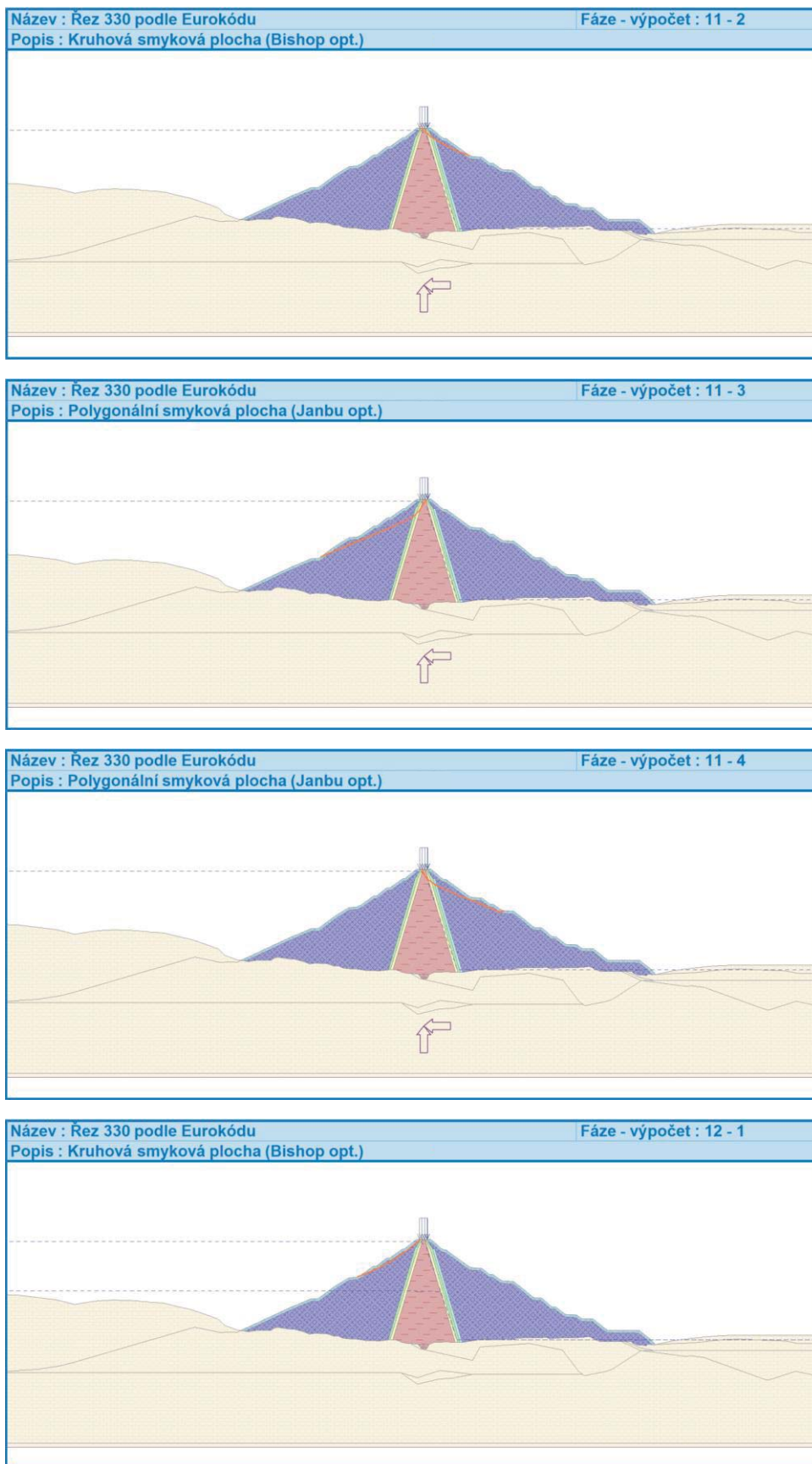
Obrázek 41. Výsledky řezu 330 podle Eurokódů 3



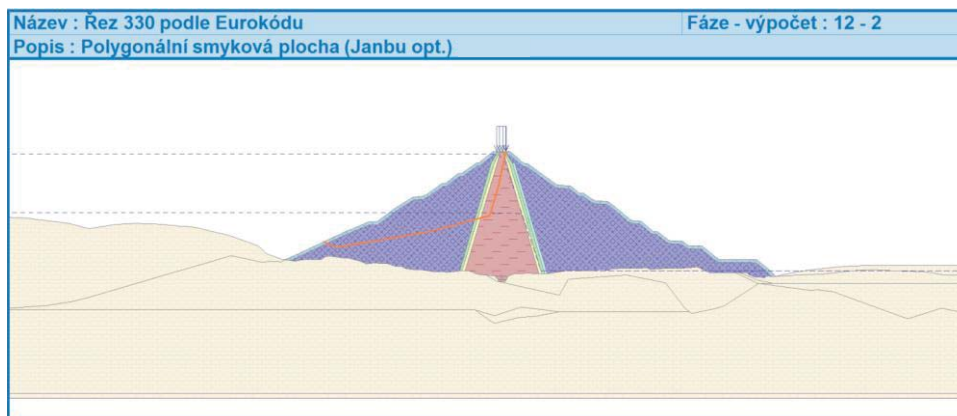
Obrázek 42. Výsledky řezu 330 podle Eurokódů 4



Obrázek 43. Výsledky řezu 330 podle Eurokódů 5



Obrázek 44. Výsledky řezu 330 podle Eurokódů 6



Obrázek 45. Výsledky řezu 330 podle Eurokódů 7

5.3.3.1 Výpočet podle Eurokódů

Tabulka 5. Stupně stability pro řez 290

Řez 290								
	Výpočet 1		Výpočet 2		Výpočet 3		Výpočet 4	
	F_{geo}	Metoda/typ	F_{geo}	Metoda/typ	F_{geo}	Metoda/typ	F_{geo}	Metoda/typ
Fáze 1	1.79	Bishop/opt.	1.58	Bishop/opt.				
Fáze 2	1.56	Bishop/opt.	1.80	Bishop/opt.				
Fáze 3	1.82	Janbu/opt.	1.60	Janbu/opt.				
Fáze 4	1.70	Bishop/opt.	1.84	Janbu/opt.				
Fáze 5	1.90	Bishop/opt.	1.87	Janbu/opt.	1.54	Janbu/opt.	3.19	Janbu/stan.
Fáze 6	1.99	Bishop/stan.						
Fáze 7	1.72	Bishop/stan.						
Fáze 8	1.72	Bishop/stan.						
Fáze 9	1.68	Bishop/stan.						
Fáze 10	1.61	Bishop/stan.	1.56	Bishop/opt.	1.62	Janbu/opt.		
Fáze 11	1.44	Bishop/opt.	1.61	Bishop/opt.	1.75	Janbu/opt.	1.87	Janbu/opt.
Fáze 12	1.75	Bishop/opt.	1.51	Janbu/opt.				

Tabulka 6. Stupně stability pro řez 330

Řez 330								
	Výpočet 1		Výpočet 2		Výpočet 3		Výpočet 4	
	F_{geo}	Metoda/typ	F_{geo}	Metoda/typ	F_{geo}	Metoda/typ	F_{geo}	Metoda/typ
Fáze 1	1.72	Bishop/opt.	1.55	Bishop/opt.				
Fáze 2	1.55	Bishop/opt.	1.67	Bishop/opt.				
Fáze 3	1.64	Janbu/opt.	1.74	Janbu/opt.				
Fáze 4	1.55	Bishop/opt.	1.63	Janbu/opt.				
Fáze 5	1.64	Bishop/opt.	1.75	Janbu/opt.	1.80	Janbu/opt.	2.52	Janbu/stan.
Fáze 6	1.79	Bishop/stan.						
Fáze 7	1.59	Bishop/stan.						
Fáze 8	1.65	Bishop/stan.						
Fáze 9	1.58	Bishop/stan.						
Fáze 10	1.51	Bishop/stan.	1.49	Bishop/opt.	1.57	Janbu/opt.		
Fáze 11	1.39	Bishop/opt.	1.42	Bishop/opt.	1.45	Janbu/opt.	1.56	Janbu/opt.
Fáze 12	1.65	Bishop/opt.	1.53	Janbu/opt.				

Tabulka 7. Stupně stability pro řez 420

Řez 420								
	Výpočet 1		Výpočet 2		Výpočet 3		Výpočet 4	
	F _{geo}	Metoda/typ	F _{geo}	Metoda/typ	F _{geo}	Metoda/typ	F _{geo}	Metoda/typ
Fáze 1	1.50	Bishop/opt.	1.74	Bishop/opt.				
Fáze 2	1.58	Bishop/opt.	1.57	Bishop/opt.				
Fáze 3	1.65	Janbu/opt.	1.72	Janbu/opt.				
Fáze 4	1.69	Bishop/opt.	1.61	Janbu/opt.				
Fáze 5	1.62	Bishop/opt.	1.67	Janbu/opt.	1.90	Janbu/opt.	3.12	Janbu/stan.
Fáze 6	1.73	Bishop/stan.						
Fáze 7	1.55	Bishop/stan.						
Fáze 8	1.56	Bishop/stan.						
Fáze 9	1.57	Bishop/stan.						
Fáze 10	1.46	Bishop/stan.	1.44	Bishop/opt.	1.46	Janbu/opt.		
Fáze 11	1.34	Bishop/opt.	1.46	Bishop/opt.	1.48	Janbu/opt.	1.67	Janbu/opt.
Fáze 12	1.56	Bishop/opt.	1.55	Janbu/opt.				

Tabulka 8. Stupně stability pro řez 550

Řez 550								
	Výpočet 1		Výpočet 2		Výpočet 3		Výpočet 4	
	F _{geo}	Metoda/typ	F _{geo}	Metoda/typ	F _{geo}	Metoda/typ	F _{geo}	Metoda/typ
Fáze 1	1.47	Bishop/opt.	1.41	Bishop/opt.				
Fáze 2	1.47	Bishop/opt.	1.41	Bishop/opt.				
Fáze 3	1.64	Janbu/opt.	2.84	Janbu/opt.				
Fáze 4	1.56	Bishop/opt.	1.57	Janbu/opt.				
Fáze 5	1.62	Bishop/opt.	1.72	Janbu/opt.	1.76	Janbu/opt.	2.94	Janbu/stan.
Fáze 6	2.09	Bishop/stan.						
Fáze 7	1.85	Bishop/stan.						
Fáze 8	1.90	Bishop/stan.						
Fáze 9	1.84	Bishop/stan.						
Fáze 10	1.77	Bishop/stan.	1.59	Bishop/opt.	1.62	Janbu/opt.		
Fáze 11	1.29	Bishop/opt.	1.31	Bishop/opt.	1.44	Janbu/opt.	1.73	Janbu/opt.
Fáze 12	1.47	Bishop/opt.	1.64	Janbu/opt.				

5.3.3.2 Výpočet bez dílčích součinitelů

Tabulka 9. Stupně bezpečnosti svahu pro řez 290

Řez 290								
	Výpočet 1		Výpočet 2		Výpočet 3		Výpočet 4	
	Fs	Metoda/typ	Fs	Metoda/typ	Fs	Metoda/typ	Fs	Metoda/typ
Fáze 1	2.23	Bishop/opt.	1.98	Bishop/opt.				
Fáze 2	1.96	Bishop/opt.	2.25	Bishop/opt.				
Fáze 3	2.27	Janbu/opt.	2.00	Janbu/opt.				
Fáze 4	2.12	Bishop/opt.	2.29	Janbu/opt.				
Fáze 5	2.38	Bishop/opt.	2.34	Janbu/opt.	1.93	Janbu/opt.	4.00	Janbu/stan.
Fáze 6	2.51	Bishop/stan.						
Fáze 7	2.16	Bishop/stan.						
Fáze 8	2.17	Bishop/stan.						
Fáze 9	2.11	Bishop/stan.						
Fáze 10	2.02	Bishop/stan.	1.96	Bishop/opt.	2.01	Janbu/opt.		
Fáze 11	1.81	Bishop/opt.	2.02	Bishop/opt.	2.18	Janbu/opt.	2.34	Janbu/opt.
Fáze 12	2.18	Bishop/opt.	1.85	Janbu/opt.				

Tabulka 10. Stupně bezpečnosti svahu pro řez 330

Řez 330								
	Výpočet 1		Výpočet 2		Výpočet 3		Výpočet 4	
	Fs	Metoda/typ	Fs	Metoda/typ	Fs	Metoda/typ	Fs	Metoda/typ
Fáze 1	2.16	Bishop/opt.	1.94	Bishop/opt.				
Fáze 2	1.94	Bishop/opt.	2.09	Bishop/opt.				
Fáze 3	2.06	Janbu/opt.	2.15	Janbu/opt.				
Fáze 4	1.95	Bishop/opt.	2.04	Janbu/opt.				
Fáze 5	2.05	Bishop/opt.	2.18	Janbu/opt.	2.24	Janbu/opt.	3.14	Janbu/stan.
Fáze 6	2.26	Bishop/stan.						
Fáze 7	2.01	Bishop/stan.						
Fáze 8	2.07	Bishop/stan.						
Fáze 9	1.99	Bishop/stan.						
Fáze 10	1.90	Bishop/stan.	1.87	Bishop/opt.	1.96	Janbu/opt.		
Fáze 11	1.75	Bishop/opt.	1.78	Bishop/opt.	1.77	Janbu/opt.	1.95	Janbu/opt.
Fáze 12	2.06	Bishop/opt.	1.90	Janbu/opt.				

Tabulka 11. Stupně bezpečnosti svahu pro řez 420

Řez 420								
	Výpočet 1		Výpočet 2		Výpočet 3		Výpočet 4	
	Fs	Metoda/typ	Fs	Metoda/typ	Fs	Metoda/typ	Fs	Metoda/typ
Fáze 1	1.87	Bishop/opt.	2.17	Bishop/opt.				
Fáze 2	1.98	Bishop/opt.	1.96	Bishop/opt.				
Fáze 3	2.07	Janbu/opt.	2.10	Janbu/opt.				
Fáze 4	2.11	Bishop/opt.	2.02	Janbu/opt.				
Fáze 5	2.15	Bishop/opt.	2.09	Janbu/opt.	2.38	Janbu/opt.	3.89	Janbu/stan.
Fáze 6	2.19	Bishop/stan.						
Fáze 7	1.95	Bishop/stan.						
Fáze 8	1.96	Bishop/stan.						
Fáze 9	1.98	Bishop/stan.						
Fáze 10	1.83	Bishop/stan.	1.81	Bishop/opt.	1.84	Janbu/opt.		
Fáze 11	1.68	Bishop/opt.	1.82	Bishop/opt.	1.84	Janbu/opt.	2.08	Janbu/opt.
Fáze 12	1.96	Bishop/opt.	1.93	Janbu/opt.				

Tabulka 12. Stupně bezpečnosti svahu pro řez 550

Řez 550								
	Výpočet 1		Výpočet 2		Výpočet 3		Výpočet 4	
	Fs	Metoda/typ	Fs	Metoda/typ	Fs	Metoda/typ	Fs	Metoda/typ
Fáze 1	1.83	Bishop/opt.	1.77	Bishop/opt.				
Fáze 2	1.83	Bishop/opt.	1.77	Bishop/opt.				
Fáze 3	2.04	Janbu/opt.	3.56	Janbu/opt.				
Fáze 4	1.95	Bishop/opt.	1.95	Janbu/opt.				
Fáze 5	2.02	Bishop/opt.	2.16	Janbu/opt.	2.20	Janbu/opt.	3.69	Janbu/stan.
Fáze 6	2.63	Bishop/stan.						
Fáze 7	2.33	Bishop/stan.						
Fáze 8	2.39	Bishop/stan.						
Fáze 9	2.31	Bishop/stan.						
Fáze 10	2.23	Bishop/stan.	2.00	Bishop/opt.	2.00	Janbu/opt.		
Fáze 11	1.62	Bishop/opt.	1.63	Bishop/opt.	1.80	Janbu/opt.	2.17	Janbu/opt.
Fáze 12	1.83	Bishop/opt.	2.04	Janbu/opt.				

5.3.4 Vyhodnocení programu Stabilita svahu

Norma ČSN 75 2310 Sypané hráze podle odstavce 12.3.2 odkazuje na tabulku 7 (Tabulka 16) též normy s požadovaným stupněm bezpečnosti svahu.

Tabulka 13. Tabulka 7 normy ČSN 75 2310 Sypané hráze

Tabulka 7 – Zatěžovací stavy

Zatěžovací stav		Stupeň bezpečnosti svahu s	Poznámka
A. Během výstavby	Pro vypočtené pórové tlaky Pro měřené pórové tlaky	1,2 1,1	Pro stacionární filtrační proudění ¹⁾
B. Po dokončení výstavby	a) nádrž prázdná – pro vypočtené pórové tlaky – pro měřené pórové tlaky	1,5 1,3	
	b) nádrž částečně naplněná c) nádrž plná	1,5 ⁴⁾ 1,5 ⁴⁾	
	Náhlý pokles hladiny v nádrži	d) z maximální na kritickou ³⁾ e) podle manipulačního řádu	
C. Zemětřesení do 8° MSK 64 včetně		1,0	Platí pro všechny zatěžovací stavy mimo náhlý pokles hladiny
¹⁾ U jednoúčelových retenčních nádrží lze připustit předpoklad, že k ustálenému průsaku dojde při hladině nižší než maximální. ²⁾ Pro vzdušný svah je nutno stanovit stupeň bezpečnosti pro náhlý pokles dolní vody na minimální hladinu při maximální hladině v nádrži, pokud tento zatěžovací stav má praktický může nastat. ³⁾ Kritickou hladinou se rozumí mezilehlá hladina, pro kterou je stupeň bezpečnosti na vyšetřované smykové ploše minimální. ⁴⁾ Pro smykové plochy, procházející pouze propustnými šterky nebo kamenitou sypaninou, je možno stupeň bezpečnosti snížit až na 1,2.			

Podle odstavce 12.3.2 je stupeň bezpečnosti svahu vypočten metodou mezní rovnováhy za použití charakteristických hodnot bez vlivu dílčích součinitelů. Pro vyhodnocení tedy byly použity stupně bezpečnosti svahu. Tyto výsledky byly taktéž porovnány s výsledky numerické analýzy. Následující tabulky (Tabulka 17–20) obsahují kompletní přehled vyhodnocení.

Tabulka 14. Vyhodnocení řezu 290 (Stupeň bezpečnosti svahu)

Řez 290				
Zatěžovací stav	Fáze	Minimální vypočtený stupeň bezpečnosti	Požadovaný stupeň bezpečnosti	Vyhodnocení
a	Fáze 1	1.98	1.50	OK
a	Fáze 2	1.96	1.50	OK
a	Fáze 3	2.00	1.50	OK
b	Fáze 4	2.12	1.50	OK
c	Fáze 5	1.93	1.50	OK
d	Fáze 12	1.85	1.10	OK
C	Fáze 11	1.81	1.00	OK

Tabulka 15. Vyhodnocení řezu 330 (Stupeň bezpečnosti svahu)

Řez 330				
Zatěžovací stav	Fáze	Minimální vypočtený stupeň bezpečnosti	Požadovaný stupeň bezpečnosti	Vyhodnocení
a	Fáze 1	1.94	1.50	OK
a	Fáze 2	1.94	1.50	OK
a	Fáze 3	2.06	1.50	OK
b	Fáze 4	1.95	1.50	OK
c	Fáze 5	2.05	1.50	OK
d	Fáze 12	1.90	1.10	OK
C	Fáze 11	1.75	1.00	OK

Tabulka 16. Vyhodnocení řezu 420 (Stupeň bezpečnosti svahu)

Řez 420				
Zatěžovací stav	Fáze	Minimální vypočtený stupeň bezpečnosti	Požadovaný stupeň bezpečnosti	Vyhodnocení
a	Fáze 1	1.87	1.50	OK
a	Fáze 2	1.96	1.50	OK
a	Fáze 3	2.07	1.50	OK
b	Fáze 4	2.02	1.50	OK
c	Fáze 5	2.09	1.50	OK
d	Fáze 12	1.93	1.10	OK
C	Fáze 11	1.68	1.00	OK

Tabulka 17. Vyhodnocení řezu 550 (Stupeň bezpečnosti svahu)

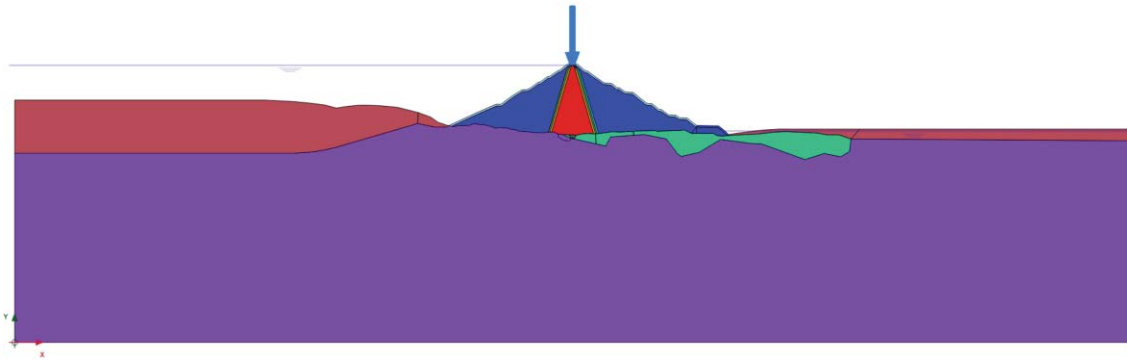
Řez 550				
Zatěžovací stav	Fáze	Minimální vypočtený stupeň bezpečnosti	Požadovaný stupeň bezpečnosti	Vyhodnocení
a	Fáze 1	1.77	1.50	OK
a	Fáze 2	1.77	1.50	OK
a	Fáze 3	2.04	1.50	OK
b	Fáze 4	1.95	1.50	OK
c	Fáze 5	2.02	1.50	OK
d	Fáze 12	1.83	1.10	OK
C	Fáze 11	1.62	1.00	OK

Výsledky programu Stabilita svahu naznačují, že přehradní těleso je, s uvážením výše zmíněných materiálových charakteristik, bezpečné a nehrozí jeho porušení. Je však nutno dodat, že vstupní parametry zemin a hornin byly odhadovány na základě odborné literatury a mohou se od skutečnosti značně lišit. Z tohoto důvodu by bylo potřeba dále v této problematice pokračovat a zaměřit se zejména na materiálové vstupní parametry výpočetních modelů. Kompletní výstupy všech řešených příčných řezů z programu Stabilita svahu jsou součástí příloh 1 až 8.

5.4 Posouzení pomocí programu Plaxis 2D

Program Plaxis 2D, vyvinutý Nizozemskou firmou PLAXIS BV, je na rozdíl od programu Stabilita svahu založen na dnes hojně využívané a rozšířené metodě konečných prvků. Tento program je obecně vhodný pro deformační a stabilitní analýzu geotechnických úloh. Dále nachází uplatnění i ve strojírenství. Aplikovat jej lze v geotechnice na širokou škálu úloh od výkopů, násypů, základů, až po ražbu tunelů, těžbu ropy a plynu [26].

V této úloze byl metodou konečných prvků posuzován příčný řez 330. Geometrie úlohy byla, stejně jako v případě programu Stabilita svahu, exportována z 3D modelu konstrukce. Obdobně jako v programu Stabilita svahu byla geometrie upravena přidáním povrchové vrstvy o síle 3 m podél stabilitní části s mírně odlišnými parametry, aby byly vyloučeny povrchové poruchy, které nejsou vypovídající pro celkovou stabilitu hráze.



Obrázek 46. Geometrie příčného řezu 330 v Plaxis 2D včetně zatížení

5.4.1 Modelové rozhraní 2D

Modelové rozhraní patří k důležitým nastavením výpočtu. Musí být voleno takovým způsobem, aby napjatost a deformace nebyly ovlivněny okrajovými podmínkami.

5.4.2 Vstupy do programu Plaxis 2D

Základní materiálové charakteristiky užitě v programu Plaxis 2D jsou totožné s těmi, jaké byly použity v programu Stabilita svahu. Následně byly rozšířeny o další materiálové charakteristiky jako je úhel dilatance, deformační modul, rychlost proudění a materiálový model (Tabulka 21).

Úhel dilatance byl na základě literatury stanoven jako úhel vnitřního tření mínus 30. Deformační moduly byly stanoveny podle směrných normových charakteristik dnes neplatné normy ČSN 73 1001. Rychlosti proudění podzemní vody pro jednotlivé materiály byly stanoveny na základě literatury pomocí součinitele filtrace [23]. Zatížení koruny hráze od veřejné dopravy je uvažováno 16 kN/m na šířce 9,5 m, stejně jako v posouzení programem Stabilita svahu.

Tabulka 18. Materiálové vlastnosti užívané v programu Plaxis 2D

Materiálové vlastnosti Plaxis 2D										
Typ	γ [kN/m ³]	γ_{sat} [kN/m ³]	c_{ef} [kN/m ²]	ϕ_{ef} [°]	Ψ [°]	E_{def} [kN/m ²]	ν [-]	k_x [m/day]	k_y [m/day]	Model
Rockfill	20	21	1	50	20	450 000	0.20	864	864	Mohr - Coulomb
Rockfill_2	20	21	10	50	20	450 000	0.20	864	864	Mohr - Coulomb
Core	21	22	30	21	0	25 000	0.30	0.0000864	0.0000864	Mohr - Coulomb
Filter_1	18	19	1	38	8	60 000	0.28	86.4	86.4	Mohr - Coulomb
Filter_2	18	19	1	42	12	70 000	0.28	86.4	86.4	Mohr - Coulomb
Filter_3	21	22	1	44	14	400 000	0.20	273	273	Mohr - Coulomb
Concrete	25	25	1500	50	0	30 000 000	0.20	0.00864	0.00864	Mohr - Coulomb
Limestone	22	22	3000	50	0	40 000 000	0.25	0.00864	0.00864	Mohr - Coulomb
Cover	22	23	100	25	0	185 000	0.20	0.00864	0.00864	Mohr - Coulomb
Shale_or_marl	24	24	3000	50	0	30 000 000	0.20	0.00864	0.00864	Mohr - Coulomb

5.4.3 Materiálový model 2D

Materiály v tomto programu byly modelovány Mohr-Coulombovým modelem, který patří k nejpoužívanějším materiálovým modelům využívaných při modelování chování zemin v geotechnických úlohách. Tento materiálový model definuje porušení zemin usmýknutím ve chvíli vyčerpání smykové pevnosti zeminy. Smyková pevnost je definována následující rovnicí:

$$\tau = c + \sigma \cdot \tan\phi$$

kde:

- τ smykové napětí
- c soudržnost
- σ normálové napětí
- ϕ úhel vnitřního tření

5.4.4 Síť konečných prvků 2D

Správná volba sítě konečných prvků patří mezi nejdůležitější úkony, jelikož se od její kvality odvíjí celková kvalita výsledků. Z tohoto důvodu je nutné tomuto kroku věnovat velkou pozornost. Vytvořená síť musí mít správnou hustotu v zájmových oblastech pro dosažení maximální přesnosti a nesmí mít velké rozdíly ve velikostech jednotlivých prvků. Síť konečných prvků je v programu PLAXIS 2D generována automaticky ve formě trojúhelníků. Tuto síť je však možno v rozsahu celého modelu editovat, a to buďto jejím zahušťováním či naopak zjednodušováním.

Pro potřeby tohoto modelu byla síť lokálně zahuštěna a celkově byla generována hustotou „Fine“. Následně byla síť mnohokrát upravována tak, aby její kvalita dosahovala přijatelné meze. Výsledkem je vygenerovaná síť konečných prvků (Obrázek

49) s 5729 elementy. Na obrázku je vidět síť konečných prvků barevně rozlišených v závislosti na výsledné kvalitě sítě. Minimální hodnota kvality elementu je 0,5027 (element 3103).



Obrázek 47. Síť konečných prvků Plaxis 2D

5.4.5 Výpočtové fáze 2D

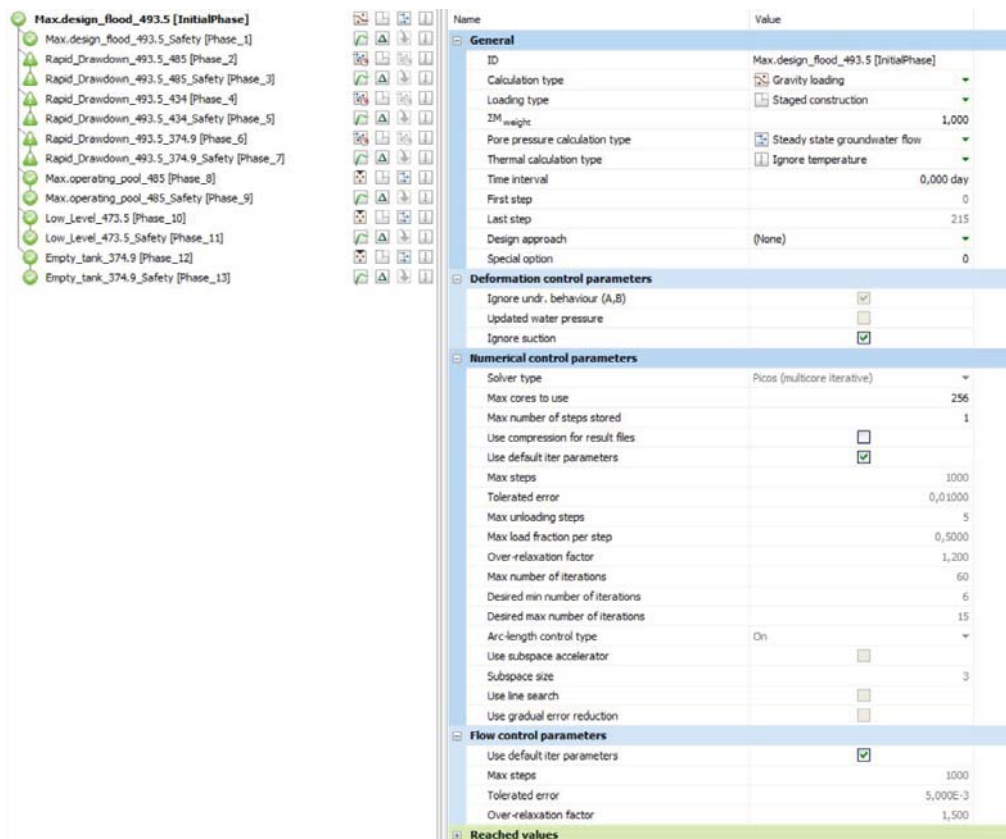
Výpočtové fáze byly zvoleny tak, aby se shodovaly s fázemi z programu Stabilita svahu a mohly být navzájem porovnávány. Dále byly doplněny o další varianty. Fáze výpočtu užití v programu:

- Fáze 0 (Iniciační fáze) Přehradní těleso je zatížené od dopravy a nádrž je maximálně napuštěná (výška hladiny 493,5 m).
- Fáze 1 Výpočet stupně bezpečnosti fáze 0.
- Fáze 2 Zatížení od dopravy a pokles hladiny z výšky 493,5 m na 485 m během 7 dnů. Tato fáze byla zvolena pro možný rychlý pokles hladiny v nádrži z maximální na maximální operativní hladinu.
- Fáze 3 Výpočet stupně bezpečnosti fáze 2.
- Fáze 4 Zatížení od dopravy a pokles hladiny z výšky 493,5 m na 434 m během 98 dnů. Tato fáze simuluje rychlý pokles hladiny v nádrži z maximální na úroveň potrubí přivádějící vodu k turbínám elektrárny.
- Fáze 5 Výpočet stupně bezpečnosti fáze 4.
- Fáze 6 Zatížení od dopravy a pokles hladiny z výšky 493,5 m na 374,9 m během 120 dnů (hrana dolních výpustí). Fáze simuluje rychlé vypuštění nádrže v případě poruchy tělesa.

- Fáze 7 Výpočet stupně bezpečnosti fáze 6.
- Fáze 8 Plastický výpočet zatíženého přehradního tělesa od dopravy a s vodní hladinou 485 m (mezivýpočet pro výpočet stupně bezpečnosti).
- Fáze 9 Výpočet stupně bezpečnosti fáze 8.
- Fáze 10 Plastický výpočet zatíženého přehradního tělesa od dopravy a s vodní hladinou 473,5 m (mezivýpočet pro výpočet stupně bezpečnosti).
- Fáze 11 Výpočet stupně bezpečnosti fáze 10.
- Fáze 12 Plastický výpočet zatíženého přehradního tělesa od dopravy a s vodní hladinou 374,9 m, tedy prázdnou nádrží (mezivýpočet pro výpočet stupně bezpečnosti).
- Fáze 13 Výpočet stupně bezpečnosti fáze 11.

5.4.6 Nastavení výpočtových fází

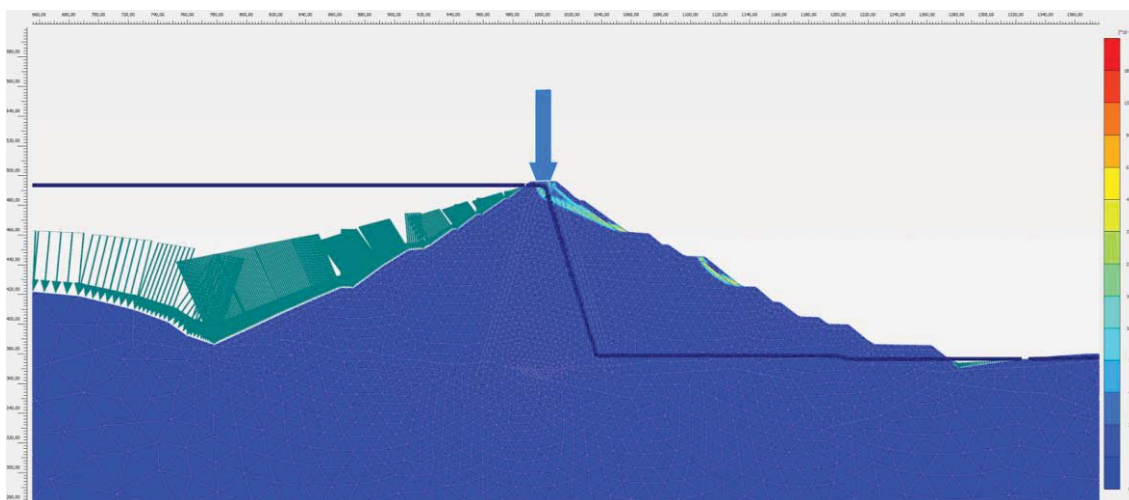
Výpočtové fáze byly nastaveny tak, aby výsledky byly co nejpřesnější. V některých fázích bylo využito defaultního nastavení, jako například v iniciační fázi (Obrázek 50).



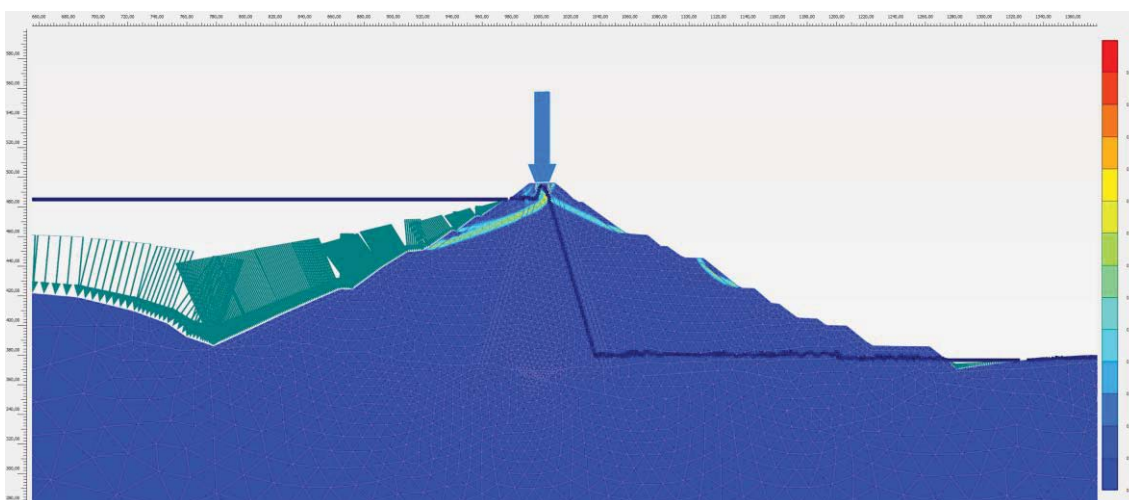
Obrázek 48. Nastavení výpočtových fází programu Plaxis 2D

5.4.7 Výsledky výpočtu 2D

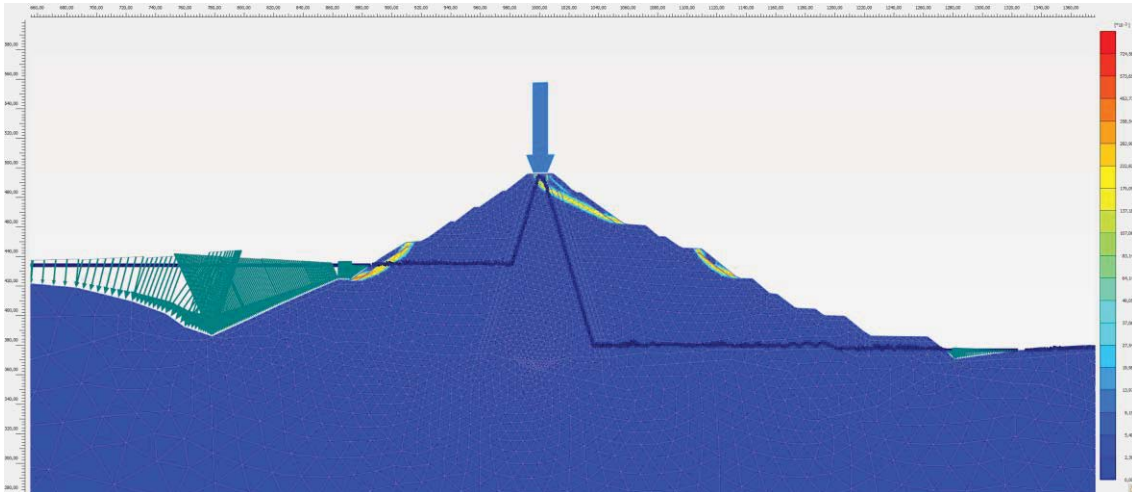
Na obrázcích 51 až 57 jsou znázorněny výsledky programu Plaxis 2D příčného řezu 330 pro vypočtené stupně bezpečnosti. Obrázek 58 pak znázorňuje průběhy výpočtů stupňů bezpečnosti v závislosti na výpočtovém kroku.



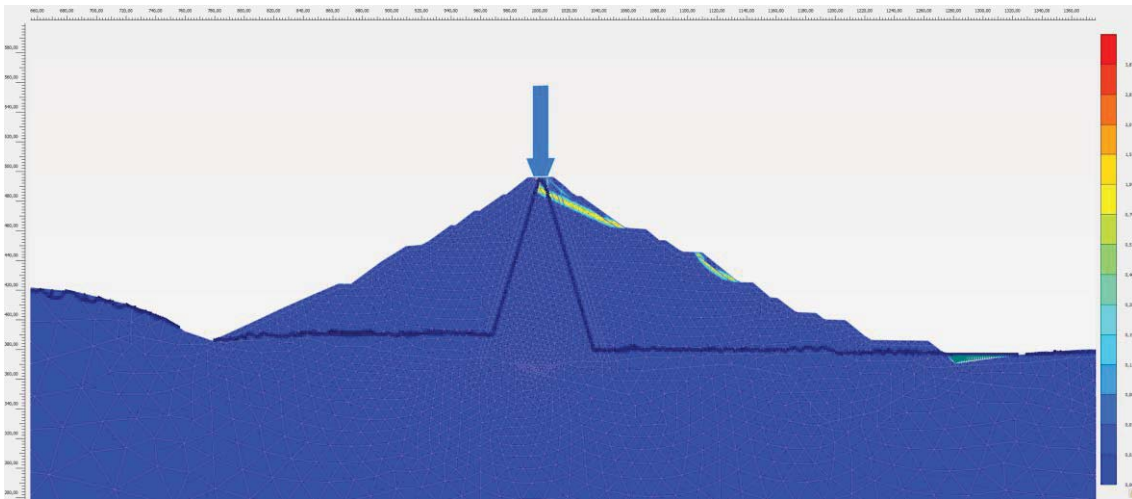
Obrázek 49. Výsledek Fáze 1 $F_s = 1.931$



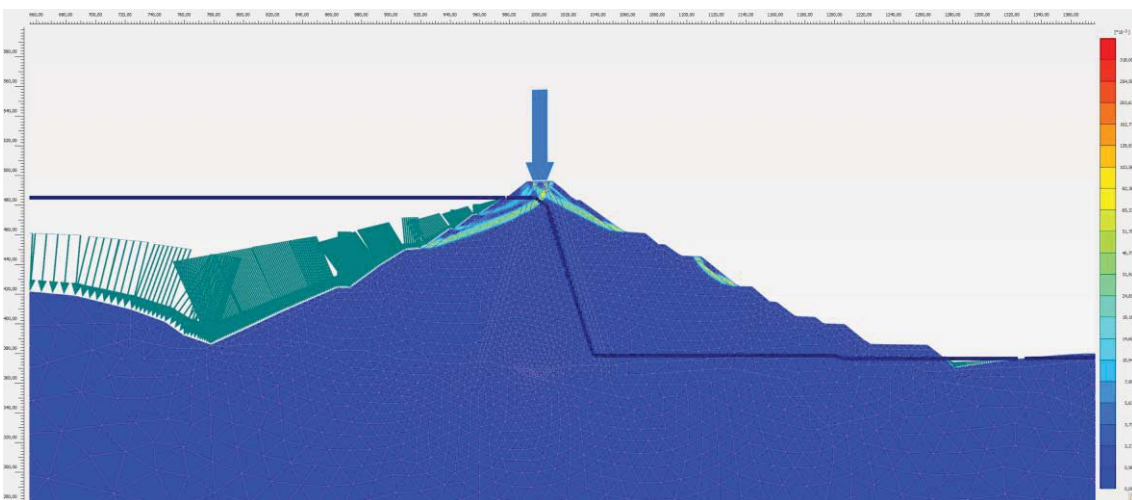
Obrázek 50. Výsledek Fáze 3 $F_s = 1.921$



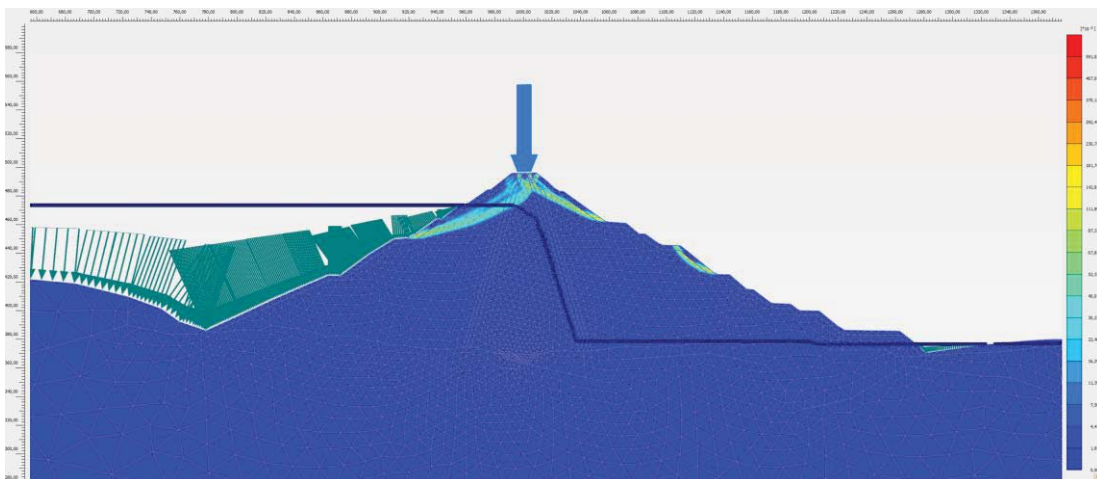
Obrázek 51. Výsledek Fáze 5 $F_s = 1.917$



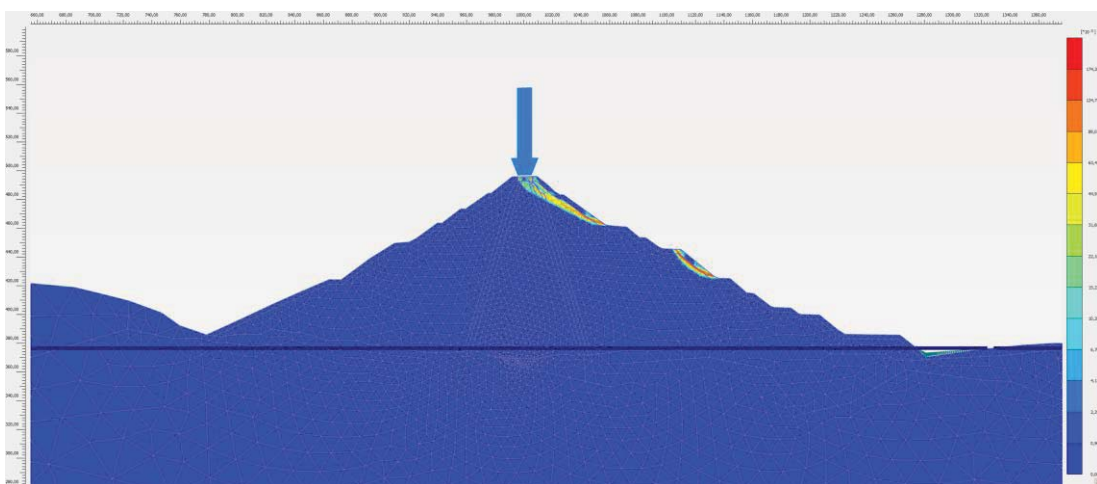
Obrázek 52. Výsledek Fáze 7 $F_s = 1.907$



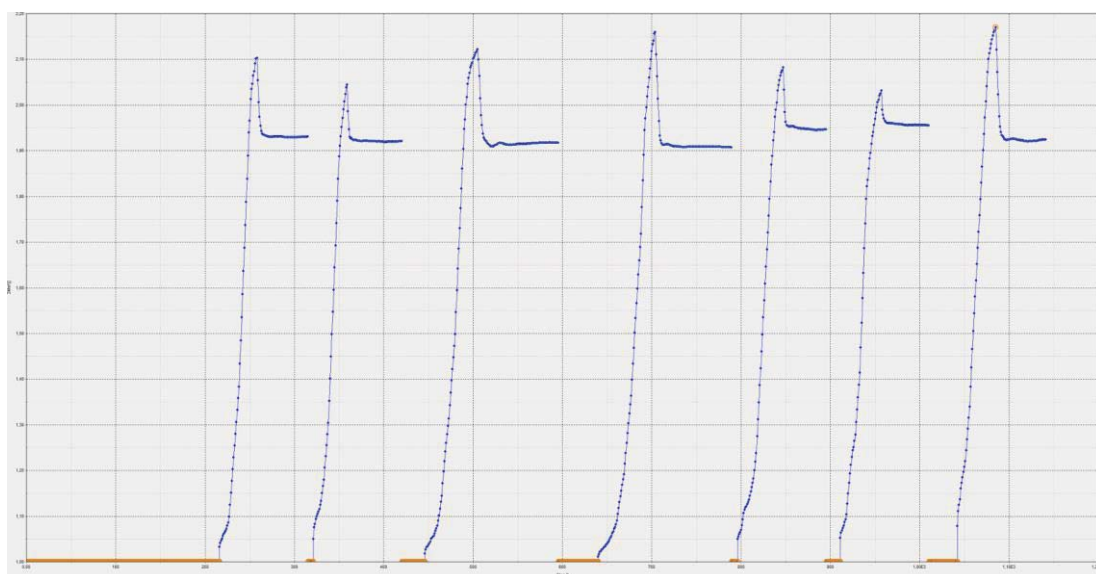
Obrázek 53. Výsledek Fáze 9 $F_s = 1.947$



Obrázek 54. Výsledek Fáze 11 $F_s = 1.956$



Obrázek 55. Výsledek Fáze 13 $F_s = 1.924$



Obrázek 56. Průběhy výpočtů stupňů bezpečnosti jednotlivých Safety fází

Z výše uvedených výsledků je patrné, že těleso hráze je při těchto zatěžovacích stavech a použití výše zmíněných materiálových charakteristik stabilní a nehrozí jeho poškození. Obdobně jako u programu Stabilita hráze je potřeba upozornit na to, že vstupní parametry zemin a hornin byly stanoveny pro tento výpočet na základě literatury a mohou se od skutečnosti značně lišit. Z tohoto důvodu by se měl další výzkum této problematiky zabývat právě vstupními charakteristikami materiálů.

5.5 Porovnání hodnot 2D výpočtů

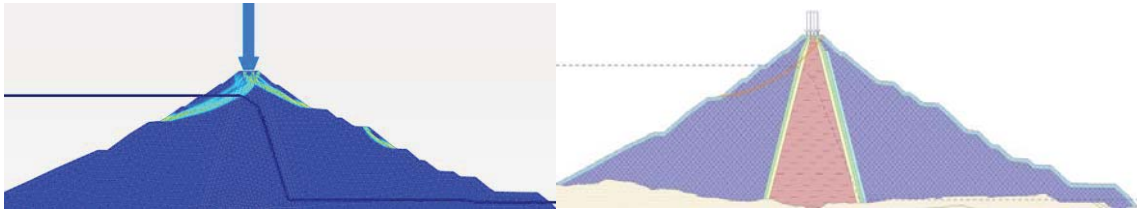
Pro přehledné porovnání výsledků obou programů byla vytvořena tabulka 22, kterou graficky doplňují obrázky 59 až 62. Z grafického znázornění výsledků patrná shoda potenciálních porušení (Obrázek 59–61).

Tabulka 19. Vyhodnocení výsledků 2D analýz

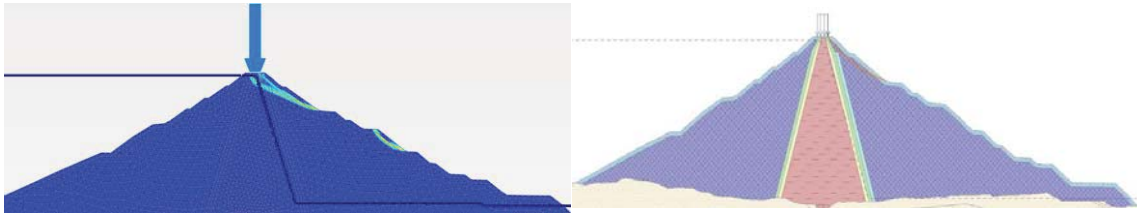
Vyhodnocení výsledků 2D analýz						
Zatěžovací stav normy	GEO5 Stabilita Svahu		Plaxis 2D		Požadovaný stupeň bezpečnosti normou ČSN 75 2310	Vyhodnocení
	Název fáze	Minimální vypočtený stupeň bezpečnosti	Název fáze	Stupeň bezpečnosti		
a	Fáze 2	1.940	Fáze 13	1.924	1.5	OK
b	Fáze 4	1.950	Fáze 11	1.956	1.5	OK
c	Fáze 5	1.940	Fáze 1	1.931	1.5	OK
d	Fáze 12	1.900	Fáze 5	1.917	1.1	OK
C	Fáze 11	1.750	X	X	1	X



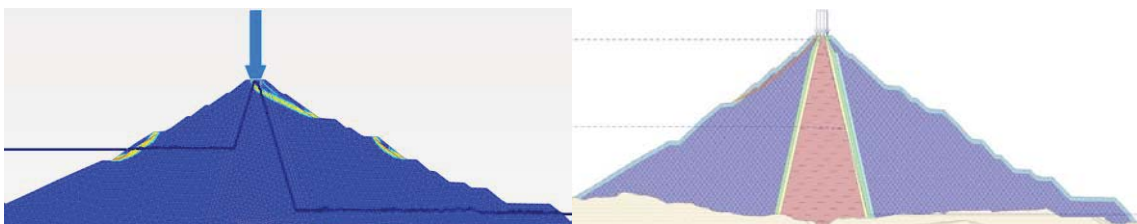
Obrázek 57. Porovnání výsledků programu Plaxis 2D a GEO5 (zatěžovací stav a)



Obrázek 58. Porovnání výsledků programu Plaxis 2D a GEO5 (zatěžovací stav b)



Obrázek 59. Porovnání výsledků programu Plaxis 2D a GEO5 (zatěžovací stav c)



Obrázek 60. Porovnání výsledků programu Plaxis 2D a GEO5 (zatěžovací stav d)

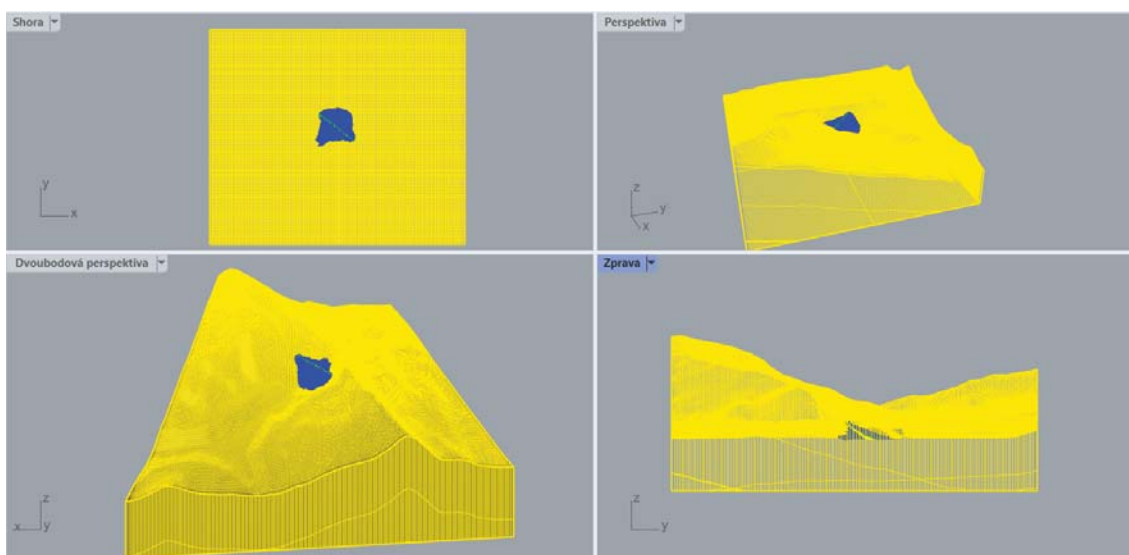
5.6 Posouzení pomocí programu Plaxis 3D

Plaxis 3D je rozvinutější formou svého dvourozměrného předchůdce. Taktéž umožňuje provádět deformační a stabilitní analýzu geotechnických i jiných úloh. Umožňuje modelovat hydrodynamické i hydrostatické účinky vody či interakci mezi konstrukcí a okolním zeminovým či horninovým prostředím. Obdobně jako v 2D úlohách program pracuje s metodou konečných prvků, které si automaticky generuje ve formě trojúhelníkové sítě [31].

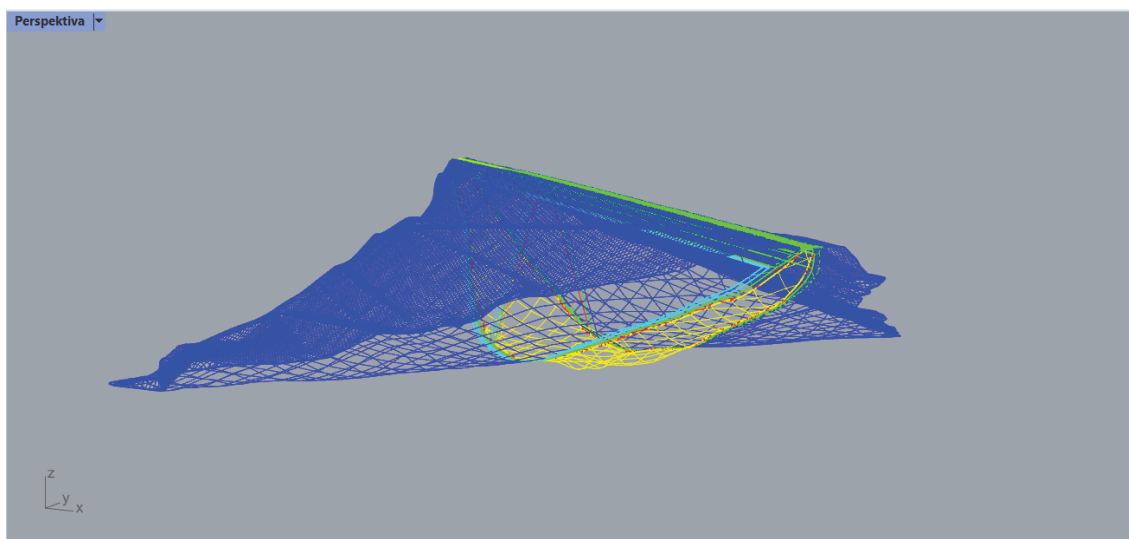
5.6.1 Importovaný 3D model

Pro import přehradního tělesa včetně okolí bylo zapotřebí model značně zjednodušit, jelikož přímý import modelu z programu Civil 3D nebyl možný. Z tohoto důvodu bylo zapotřebí vyhotovit nový model v programu Rhinoceros 7 Evaluation (Obrázek 63 a 64) tak, jak doporučuje výrobce programu Plaxis, společnost Bentley

Systems, Incorporated. Pro tento nový model bylo využito dat exportovaných z Civil 3D ve formě bodů. Z těchto bodů byly vyhotoveny povrchy a následně objemová tělesa. Na následujících dvou obrázcích je vidět model vyrobený programem Rhinoceros 7 Evaluation. Následně byla objemová tělesa ve formátu STP importována do programu Plaxis 3D.



Obrázek 61. Model v Rhinoceros 7 Evaluation



Obrázek 62. Model přehradního tělesa v Rhinoceros 7 Evaluation

5.6.2 Nastavení výpočtu Plaxis 3D

Modelové rozhraní patří, obdobně jako síť konečných prvků, k důležitým vstupním parametrům. Musí být dostatečně velká tak, aby napjatost a deformace horninového masivu nebyly ovlivněny okrajovými podmínkami. V 3D modelu byly použity materiály a jejich vlastnosti stejné jako v 2D. Celkový přehled materiálů a jejich vlastností je v tabulce 21. U užitých materiálů byl taktéž použit Mohr-Coulombový model, stejně jako v případě 2D analýzy. Pro tvorbu 3D sítě konečných prvků platí stejná pravidla jako v 2D variantě. Tento krok se s ohledem na složitost úlohy doposud nepodařilo zvládnout.

6. Závěr

Přehrady jsou jedny z největších, nejstarších a nejvýznamnějších inženýrských vodohospodářských staveb. Irácká přehrada Darbandikhan je víceúčelové vodní dílo dostavěné na konci 60. let, které bylo, mimo jiné, poškozeno zemětřesením v roce 2017.

Tato diplomová práce stanovila celkově tři hlavní cíle. Prvním cílem byla digitalizace přehradního díla Darbandikhan včetně přílehlého okolí a geologie. Pro tuto digitalizaci byly použity nejrůznější aplikace a doporučení k docílení optimálního modelu. Podkladem pro tvorbu modelu byla oskenovaná výkresová dokumentace provedení stavby, z které bylo nutno nejprve zdlouhavým způsobem odečítat potřebné hodnoty. Následně byly tyto hodnoty importovány do programů, v kterých byl vytvořen výsledný model. Tento cíl závěrečné práce hodnotím jako splněný.

Pro další cíle bylo zapotřebí mít charakteristické hodnoty zemin a hornin. Bohužel zahraniční výjezd k přehradě byl několikrát posunut z mnoha důvodů. Iráckou stranu byla taktéž pověřena provedením laboratorních a polních zkoušek *in situ*. Tento výjezd se sice nakonec uskutečnil ještě před odevzdáním práce, nicméně doposud nebyly Iráckou stranou dodány žádné výsledky, a tudíž pro splnění dalších cílů práce musely být potřebné charakteristiky stanoveny na základě literatury.

Druhým cílem této práce bylo posouzení stability přehradního díla za 2D podmínek. Posouzení bylo provedeno na příčném řezu 330 pomocí dvou programů (GEO5 Stabilita svahu a Plaxis 2D), jejichž výsledky byly navzájem porovnány. Výsledky obou programů jsou v zásadě totožné a lze na jejich základě konstatovat, že přehradní těleso je, s uvážením zvolených materiálových charakteristik, bezpečné a nehrozí jeho porušení. Je však nutno dodat, že vstupní parametry zemin a hornin byly odhadovány na základě odborné literatury a mohou se od skutečnosti značně lišit. Tuto část práce hodnotím jako splněnou.

Posledním cílem práce bylo posouzení stability za 3D podmínek. Pro splnění tohoto cíle byl zvolen program Plaxis 3D, do kterého byl naimportován 3D model, ale bohužel s ohledem na rozsah úlohy se doposud nepovedlo vyhotovit funkční síť konečných prvků a spustit výpočtové fáze. Z tohoto důvodu hodnotím splnění tohoto cíle za částečné. S ohledem na význam přehrady Darbandikhan pro místní region je potřeba se problematice stability a bezpečnosti hráze dále věnovat. V tomto směru je potřeba se zaměřit zejména na laboratorní a polní zkoušky použitých materiálů, protože tato data zatím nejsou dostupná.

Přehled použité literatury

- [1] Lukáč, M., Bednárová, E. Navrhovanie a prevádzka vodných stavieb: sypané priehrady a hrádze. Bratislava: Jaga, 2006. ISBN 80-8076-031-4.
- [2] Historie přehrad a nádrží proti povodním. Estav. [Online]. [Citace:30.3.2022] Dostupné z <https://www.estav.cz/cz/2176.vystava-ukazuje-historii-vystavby-prehrad-a-nadrzi-proti-povodnim>.
- [3] Wikipedie: Otevřená encyklopedie: Vltavská kaskáda [online]. 2022 [citováno 30. 03. 2022]. Dostupné z https://cs.wikipedia.org/w/index.php?title=Vltavsk%C3%A1_kask%C3%A1da&oldid=20826147.
- [4] Marešová, V. 2018. Systémové přístupy přípravy a realizace vodohospodářských staveb. Praha. Diplomová práce. ČVUT. Fakulta stavební. Vedoucí práce doc. Ing. Dana Měšťanová, CSc. [Online]. [Citace: 30.03.2022]. Dostupné z https://dspace.cvut.cz/bitstream/handle/10467/74247/F1-DP-2018-Maresova-Veronika-DP_Veronika%20Maresova.pdf?sequence=-1&isAllowed=y.
- [5] Broža, V. Vodohospodářské stavby. Vydání 3. Praha: Vydavatelství ČVUT, 2005. ISBN 80-01-03175-6.
- [6] Milerski, R., Mičín, J., Veselý, J. Vodohospodářské stavby. Brno: Akademické nakladatelství CERM, 2005. ISBN 80-214-2896-1.
- [7] Vodní cesty České republiky [Online]. [Citace: 1.4.2022]. Dostupné z <https://geoportal.plavebnurad.cz/apps/vodni-cesty-verejnost/>.
- [8] Vodní turbíny [Online]. [Citace: 1.4.2022]. Dostupné z http://hgf10.vsb.cz/546/VHZ3/vodni_turbiny.html.
- [9] Francisovy turbíny [Online]. [Citace: 2.4.2022]. Dostupné z <https://strojirnybrno.com/vodni-turbiny/francis/>.
- [10] Wikipedia: Otevřená encyklopedie: Kaplanova turbína [Online]. [Citace: 2.4.2022] Dostupné z https://cs.wikipedia.org/wiki/Kaplanova_turb%C3%ADna.
- [11] Virská přehrada [Online]. [Citace: 2.4.2022]. Dostupné z <https://www.vysocina.eu/vylety/2104-okolo-virske-prehrady>.
- [12] Darbandikhan dam [Online]. [Citace: 4.4.2022]. Dostupné z https://www.researchgate.net/figure/General-view-of-Darbandikhan-Dam-from-the-upstream-Source6_fig8_337317985.

- [13] Wikipedie: Otevřená encyklopedie: Sypaná hráz [online]. c2021 [citováno 4. 04. 2022]. Dostupný z [www: https://cs.wikipedia.org/w/index.php?title=Sypan%C3%A1_hr%C3%A1z&oldid=20346166](https://cs.wikipedia.org/w/index.php?title=Sypan%C3%A1_hr%C3%A1z&oldid=20346166).
- [14] Přehrada Solina [Online]. [Citace: 5.4.2022]. Dostupné z <http://www.poloniny.cz/prehrada-solina/>.
- [15] Mapio [Online]. [Citace: 5.4.2022]. Dostupné z <https://mapio.net/pic/p-5095202/>.
- [16] Drenážní potrubí [Online]. [Citace: 6.4.2022]. Dostupné z <http://xtarh.com/jak-polozit-potrubu-sami-do-prikopu-pred-vstupem/>.
- [17] Drenážní trubky [Online]. [Citace: 6.4.2022]. Dostupné z https://www.dek.cz/pobocka-valasske-mezirici/produkty/detail/4410100468-ff-dran-dn-100-celoperf-znaceni-po-1m-pvc-u-zluta-50m?gclid=Cj0KCQjw6J-SBhCrARIsAH0yMZiS_0KSv5B01Row-94PPIP-FUmV7bcYDoiJiBUY7-IuHLGbfEO3RgaAkzIEALw_wcB
- [18] Odvodňovací stavby [Online]. [Citace: 7.4.2022]. Dostupné z https://storm.fsv.cvut.cz/data/files/p%C5%99edm%C4%9Bty/YHYS/ODVODNE NI/XHYS_aktualizace.pdf.
- [19] Vodohospodářské stavby. Fakulta stavební. VÚT. [Online]. [Citace:7.4.2022]. Dostupné z <https://docplayer.cz/8642164-Vodohospodarske-stavby.html>.
- [20] Wikipedie: Otevřená encyklopedie: Darbandikhan Dam. [Online]. [Citace: 7.4.2022] Dostupné z https://en.wikipedia.org/wiki/Darbandikhan_Dam.
- [21] GEO5 Online nápověda. [Online]. [Citace: 10.4.2022]. Dostupné z <https://www.fine.cz/napoveda/geo5/cs/parametry-pro-vypocet-unosnosti-zakladu-01/>.
- [22] GEO5 Online nápověda. [Online]. [Citace: 11.4.2022]. Dostupné z <https://www.fine.cz/napoveda/geo5/cs/parametry-hornin-01/>.
- [23] Vaníček, I. Pevnost zemin. Mechanika zemin. Přednáška č. 8. [Online]. [Citace: 12.4.2022]. Dostupné z <http://departments.fsv.cvut.cz/k135/data/wp-upload/2020/04/prednaska-c-8-pevnost-zemin-vanicek.pdf>.
- [24] GEO5 Stabilita svahu. [Online]. [Citace: 12.4.2022]. Dostupné z <https://www.fine.cz/geotechnicky-software/stabilita-svahu/>.

- [25] GEO5 Online nápověda. [Online]. [Citace: 12.4.2022]. Dostupné z <https://www.fine.cz/napoveda/geo5/cs/vliv-zemetreseni-standardni-postup-01/>.
- [26] Plaxis 2D Advanced. GEOgrup. [Online]. [Citace: 14.4.2022]. Dostupné z <https://www.geogrup.com.tr/tr/urun-gruplari/1420/plaxis-2d.html>.
- [27] Šimek, J. Mechanika zemin. Praha: SNTL, 1990. ISBN 80-03-00428-4.
- [28] Yousif O. S., Zaidn K., Alshkane Y., Khani A., Hama S. K., Performance of Darbandikhan Dam during a major earthquake on November 12.2017, EWG2019 – 3rd Meeting of EWG Dams and Earthquakes. An International Symposium. [Online]. [Citované 10.4.2022]. Dostupné z https://www.researchgate.net/publication/332913232_EWG2019_Darbandikhan_dampdf.
- [29] CREA Hydro & Energy. Derbandikhan Dam in Sulaymaniyah Governorate, Iraq - Inspection and Investigation of Dam Body. CREA Hydro & Energy 2019.
- [30] Wikipedie: Otevřená encyklopedie: Diyala River. [Online]. [Citace: 16.4.2022]. Dostupné z https://en.wikipedia.org/wiki/Diyala_River.
- [31] Plaxis 3D. Bentley. [Online]. [Citace:11.5.2022]. Dostupné z <https://www.bentley.com/cs/products/product-line/geotechnical-engineering-software/plaxis-3d>.
- [32] Fell, R., MacGregor, P., Stapledon, D., Bell, G. Geotechnical Engineering of Dams. Taylor & Francis, London, 2005. ISBN 041536440x.
- [33] Kjaernsli, B., Valstad, T., Hoeg, K. Rockfill Dams, Design and Construction. Norwegian Institute of Technology, Division of Hydraulic engineering, 1992. ISBN 82-7598-014-3.
- [34] ŠJů, Wikimedia Commons. 2014. Staroměstský jez. Dostupné z https://cs.wiktionary.org/wiki/Soubor:Starom%C4%9Bstsk%C3%BD_jez,_Muzeum_Kampa_a_Pet%C5%99%C3%ADn,_z_Novotn%C3%A9ho_1%C3%A1vky.jpg
- [35] Abdulrahman K. Z., Yousif O. S. Q., Alshkene Y., Khani A., Battal T., Hama S. K., Lessons Learned from Darbandikhan Dam after the Major Earthquake on Nov. 12, 2017 [Online]. 1st Baghdad International Water Conference, 13th -14th March 2021, Bagdad. Dostupné z <https://baghdadiwc.com/wp-content/uploads/2021/03/Kawa-Zaidan.pdf>.

Přílohy

Přílohy jsou nahrány na samostatném CD.

Seznam příloh:

Příloha č. 1 Řez 290 podle Eurokódů

Příloha č. 2 Řez 330 podle Eurokódů

Příloha č. 3 Řez 420 podle Eurokódů

Příloha č. 4 Řez 550 podle Eurokódů

Příloha č. 5 Řez 290 bez součinitelů

Příloha č. 6 Řez 330 bez součinitelů

Příloha č. 7 Řez 420 bez součinitelů

Příloha č. 8 Řez 550 bez součinitelů