VYSOKÉ UČENÍ TECHNICKÉ V BRNĚ
BRNO UNIVERSITY OF TECHNOLOGY

FAKULTA STAVEBNÍ
FACULTY OF CIVIL ENGINEERING

ÚSTAV BETONOVÝCH A ZDĚNÝCH KONSTRUKCÍ
INSTITUTE OF CONCRETE AND MASONRY STRUCTURES

STATICKÉ ŘEŠENÍ VĚŽOVÉHO VODOJEMU
ANALYSIS OF STRUCTURE OF WATERTOWER

DIPLOMOVÁ PRÁCE
DIPLOMA THESIS

AUTOR PRÁCE Bc. Tomáš Roudný
AUTHOR

VEDOUCÍ PRÁCE doc. Ing. MILOŠ ZICH, Ph.D.
SUPERVISOR

BRNO 2017

VYSOKÉ UČENÍ TECHNICKÉ V BRNĚ
FAKULTA STAVEBNÍ

STUDIJNÍ PROGRAM	N3607 Stavební inženýrství
TYP STUDIJNÍHO PROGRAMU	Navazující magisterský studijní program s prezenční formou studia
STUDIJNÍ OBOR	3608T001 Pozemní stavby
PRACOVIŠTĚ	Ústav betonových a zděných konstrukcí

ZADÁNÍ DIPLOMOVÉ PRÁCE

DIPLOMANT	**Bc. Tomáš Roudný**
NÁZEV	**Statické řešení věžového vodojemu**
VEDOUCÍ DIPLOMOVÉ PRÁCE	doc. Ing. Miloš Zich, Ph.D.
DATUM ZADÁNÍ	31. 3. 2016
DATUM ODEVZDÁNÍ	13. 1. 2017

V Brně dne 31. 3. 2016

.....	.....
prof. RNDr. Ing. Petr Štěpánek, CSc.	**prof. Ing. Rostislav Drochytka, CSc., MBA**
Vedoucí ústavu	Děkan Fakulty stavební VUT

PODKLADY A LITERATURA

1. Stavební podklady (půdorysy, řezy, pohledy).
2. Normy pro navrhování betonových konstrukcí ČSN, STN a EN.
3. Zich M., Bažant Z., Plošné konstrukce nádrže a zásobníky, Akademické nakladatelství Cerm, 2010.
4. Zich M., kol., Příklady posouzení betonových prvků dle Eurokódů, Nakl. Verlag Daschofer, Praha 2011.
5. L. Grenčík: Betonové konstrukce II. SNTL/ALFA 1986.
6. D. Majdúch: Zásady vystužovania betónových konštrukcií. ALFA 1984.

ZÁSADY PRO VYPRACOVÁNÍ (ZADÁNÍ, CÍLE PRÁCE, POŽADOVANÉ VÝSTUPY)

Provést návrh vodojemu dle předaných rozměrových, materiálových a zatěžovacích parametrů. Provést návrh nosných prvků. Řešení provést včetně nezbytné výkresové dokumentace (výkresy tvaru a výztuže). Vypracovat min. 2 základní varianty konstrukce.
Ostatní úpravy provádějte podle pokynů vedoucího diplomové práce.

Požadované výstupy:
Textová část (obsahuje průvodní zprávu a ostatní náležitosti podle níže uvedených směrnic)
Přílohy textové části:
P1. Použité podklady a varianty řešení
P2. Výkresy - přehledné, podrobné a detaily (v rozsahu určeném vedoucím diplomové práce).
P3. Stavební postup
P4. Statický výpočet (v rozsahu určeném vedoucím diplomové práce)

Prohlášení o shodě listinné a elektronické formy VŠKP (1x).
Popisný soubor závěrečné práce (1x).
Diplomová práce bude odevzdána v listinné a elektronické formě podle směrnic a 1x na CD.

STRUKTURA BAKALÁŘSKÉ/DIPLOMOVÉ PRÁCE

VŠKP vypracujte a rozčleňte podle dále uvedené struktury:

1. Textová část VŠKP zpracovaná podle Směrnice rektora "Úprava, odevzdávání, zveřejňování a uchovávání vysokoškolských kvalifikačních prací" a Směrnice děkana "Úprava, odevzdávání, zveřejňování a uchovávání vysokoškolských kvalifikačních prací na FAST VUT" (povinná součást VŠKP).
2. Přílohy textové části VŠKP zpracované podle Směrnice rektora "Úprava, odevzdávání, zveřejňování a uchovávání vysokoškolských kvalifikačních prací" a Směrnice děkana "Úprava, odevzdávání, zveřejňování a uchovávání vysokoškolských kvalifikačních prací na FAST VUT" (nepovinná součást VŠKP v případě, že přílohy nejsou součástí textové části VŠKP, ale textovou část doplňují).

.....

doc. Ing. Miloš Zich, Ph.D.

Vedoucí diplomové práce

ABSTRAKT

Práce se zabývá návrhem nosné konstrukce věžového vodojemu. Řešení obsahuje návrh a posouzení všech hlavních prvků vodojemu dle ČSN EN 1992 na 1. mezní stav únosnosti a 2. mezní stav použitelnosti s ohledem na omezení šířky trhlin.

KLÍČOVÁ SLOVA

Vodojem, železobeton, předpjatý beton, dodatečné předpětí, deska, skořepina, sloup, vrubový kloub, protlačení, kotevní žebro, kanálek, kabel, kotva, zatížení, vrtaná pilota, omezení trhlin.

ABSTRACT

The work deals with design of load-bearing structure of watertower. The solution include design and assessment of all main parts of watertower according to ČSN EN 1992 in the ultimate limit state and the serviceability limit state (crack limitation).

KEYWORDS

Watertower, reinforced concrete, prestressed concrete, post-tensioning, slab, shell, column, mesnager hinge, punching, anchor pillar, channel, cable, anchor, load, drilled pile, crack limitation.

BIBLIOGRAFICKÁ CITACE VŠKP

Bc. Tomáš Roudný *Statické řešení věžového vodojemu.* Brno, 2016. 14 s., 162 s. příl. Diplomová práce. Vysoké učení technické v Brně, Fakulta stavební, Ústav betonových a zděných konstrukcí. Vedoucí práce doc. Ing. Miloš Zich, Ph.D.

PROHLÁŠENÍ

Prohlašuji, že jsem diplomovou práci zpracoval samostatně a že jsem uvedl všechny použité informační zdroje.

V Brně dne 5. 1. 2017

Bc. Tomáš Roudný
autor práce

Poděkování:
Chtěl bych poděkovat vedoucímu mé práce, doc. Ing. Miloši Zichovi, Ph.D., za cenné rady a pomoc při jejím zpracování.

VYSOKÉ UČENÍ TECHNICKÉ V BRNĚ
BRNO UNIVERSITY OF TECHNOLOGY

FAKULTA STAVEBNÍ
FACULTY OF CIVIL ENGINEERING

ÚSTAV BETONOVÝCH A ZDĚNÝCH KONSTRUKCÍ
INSTITUTE OF CONCRETE AND MASONRY STRUCTURES

STATICKÉ ŘEŠENÍ VĚŽOVÉHO VODOJEMU
ANALYSIS OF STRUCTURE OF WATERTOWER

TEXTOVÁ ČÁST
WRITTEN MATTER

DIPLOMOVÁ PRÁCE
DIPLOMA THESIS

AUTOR PRÁCE Bc. Tomáš Roudný
AUTHOR

VEDOUCÍ PRÁCE doc. Ing. MILOŠ ZICH, Ph.D.
SUPERVISOR

BRNO 2017

Obsah textové části

Úvod 2
Technická zpráva 2
Rešerše vodojemů 7
Závěr 9
Seznam použitých zdrojů 10
Seznam použitých zkratek a symbolů 11
Seznam příloh 14

Úvod

Práce se zabývá návrhem nosné konstrukce věžového vodojemu. Podle zadané studie byly zpracovány dvě varianty konstrukce a první z nich byla následně podrobně zpracována. Vodojem je tvořen válcovou předpjatou nádrží, která spočívá na lokálně podepřené předpjaté desce. Nádrž je podpírána kruhovými sloupy a celá stavba je ztužena kruhovým jádrem, které prochází vodojemem až pod střešní desky. Ty jsou rovněž podpírány obvodovou skořepinou a mezilehlé podpory tvoří spojité trámy, které jsou podpírány kruhovými sloupy. Založení stavby je navrženo na vrtaných pilotách, které jsou opřené o skalní podloží. Ztužující jádro je vetknuto do základové desky, která spočívá na pilotách. Hlavy ostatních pilot (pro sloupy) jsou ztuženy konstrukční deskou.

Jako materiály jsou navrženy zejména betony vyšších pevnostních tříd, betonářská výztuž B500B a dodatečně předpínaná výztuž se soudržností. Systémové provedení předpínacího systému je dle podkladů firmy Freyssinet. Zatížení je převážně rotačně symetrické s největšími účinky od vlastní tíhy konstrukce a náplně vodojemu. Uvažována byla i klimatická zatížení a sekundární účinky předpětí. Předpětí bylo modelováno pomocí ekvivalentních zatížení.

Výpočetní modely byly provedeny v softwaru SCIA Engineer, samotné dimenzování bylo provedeno převážně ručně, pro iterační výpočty byl zpravidla využíván MS Excel. Založení na pilotách bylo zpracováno geotechnickým softwarem GEO5.

Technická zpráva

Úvodní charakteristiky

Železobetonová konstrukce věžového vodojemu má maximální výšku 36,7 metru nad základovou konstrukcí. Dno nádrže je ve výšce 29 m a maximální výška hladiny činí 6 m. Maximální objem zadržované vody je 7110 m^3. Potřebná hydrostatická výška je dosažena podepřením sloupy s výškou 27,9 m. Ztužující jádro, které prochází celou konstrukcí, má vnitřní průměr 6 m a vnější průměr 6,7 m. Vnitřní průměr obvodové skořepiny je 39,5 m, vnější pak 40,3 m. Výška skořepiny (a světlá vnitřní výška nádrže) je 7,5 m. Celá nádrž vodojemu bude opatřena tepelnou izolací (tl. 200 mm). Založení je hlubinné, pomocí vrtaných pilot s průměrem výpažnice 1,62 m. Piloty budou opřené o skalní podloží v hloubce 14,5 m pod původním terénem. Střecha je plochá, její minimální spád je zajištěn spádovou tepelnou izolací. Přístup do vodojemu je umožněn po ocelovém samonosném schodišti, které je umístěno v jádru. Na střeše je lehká prefabrikovaná komora, která umožňuje krytý přístup do vnitřní části vodojemu a obsahuje potřebné technické zařízení.

Materiály

Beton

Většina prvků je navržena z betonu třídy C30/37. Hlavní předpjatá deska D1 je z betonu C40/50. Piloty jsou z betonu nižší třídy C20/25. Příslušné pevnostní charakteristiky jsou uvedeny ve statickém výpočtu. Maximální zrno kameniva je 16 mm. Charakteristiky betonové směsi dle EN 206-1 a EN 1992-1-1.

Betonářská výztuž

Všechny prvky jsou vyztuženy výztuží B500B, v naprosté většině ve formě vázané výztuže z tyčí. Vlastnosti výztuže musí vyhovovat EN 1992-1-1 a být rovněž v souladu s EN 10080 a ČSN 420139.

Předpínací výztuž

V desce D1 a skořepině S1 je navržena předpínací výztuž se soudržností. Předpětí je vneseno do konstrukce dodatečně. Systémové řešení je dle podkladů firmy Freyssinet. Jako výztuž jsou navržena lana Y1860S7-15,7-A s průřezovou plochou jednoho lana 150 mm^2. Tyto lana jsou sdružena do kabelů, které jsou umístěny do plastových (HDPE) kanálků odpovídajícího průměru. Lana jsou holá a bez úprav. Pro ukotvení jsou navrženy systémové kotvy Freyssinet, které budou po předepnutí ochráněny proti korozi a překryty kontaktním zateplovacím systémem.

Zatížení

Vlastní tíha

Kvůli poměrně masivním ŽB prvkům je vlastní tíha velmi výrazným zatížením. Zatížení je rotačně symetrické. Malý přírůstek vlastní tíhy činí opláštění vodojemu zateplovacím systémem a souvrství střešního pláště.

Náplň vodojemu

Zcela dominantním užitným zatížením je náplň vodojemu. Jedná se o pitnou vodu a její maximální objem je 7110 m^3. Zatížení hydrostatickým tlakem je rotačně symetrické. Maximální výška hladiny je 6 m od dna nádrže. Součinitel γ_Q je snížen na 1,35, neboť objemová tíha kapaliny a její množství je jasně definované.

Klimatická zatížení

Zatížení sněhem bylo uvažované pro III. sněhovou oblast. Zatížení větrem pro II. větrnou oblast a otevřenou krajinu. Hodnoty namáhání vzniklé kvůli klimatickým vlivům nejsou příliš výrazné, nicméně jsou rozhodující pro návrh střešní konstrukce.

Předpětí

Účinky předpětí byly modelovány pomocí ekvivalentních zatížení. Zároveň byly do výpočtů zahrnuty sekundární účinky, neboť posuzované konstrukce jsou mnohonásobně staticky neurčité. Součinitel pro předpětí γ_P byl uvažován hodnotou 1,0. Předpětí v kombinacích pro 2. MSP bylo navíc upraveno součiniteli s hodnotami 0,9 nebo 1,1 podle toho, jakým způsobem předpětí působí. Z hlediska časového byla konstrukce posuzována ve dvou časech. A sice v čase t_0, kdy je konstrukce předepnutá, ale vodojem je prázdný, a pak v čase t_∞, který představoval konec návrhové životnosti (100 let).

Ostatní zatížení

Mezi ostatní zatížení patří užitné zatížení na schodišti, které umožňuje vstup do vodojemu a údržba střechy.

Technologie výstavby

Stavba je založena na soustavě vrtaných pilot s průměrem ocelové výpažnice 1,62 m. Přibližná délka pilot je 14,5 m. Základové desky jsou betonovány na podkladový beton. Všechny prvky vodojemu jsou monolitické a betonované na místě. Výztuž je rovněž z velké většiny vázaná až na stavbě, jednotlivé položky se připraví v armovně dle výkresové dokumentace. Bednění jednotlivých prvků bude systémové. Mnoho prvků má rotačně symetrický (kruhový) charakter, na což je třeba přihlížet při volbě vhodného bednění. Vzhledem k poměrně nízkým a subtilním plošným prvkům, není nutné použít posuvné bednění.

Dodatečné předpětí

HDPE kanálky s odpovídajícím počtem předpínacích lan budou osazeny do prvků spolu s ostatní výztuží před betonáží. Podrobnější informace o jejich poloze, poloze kotev, způsobu napínání a tvaru kotevních sklípků jsou uvedeny ve výkresové dokumentaci. Dominantní krátkodobé ztráty předpětí jsou tvořeny třením lan o stěny kanálku a pokluzem v kotvení. Dlouhodobé ztráty jsou tvořeny kombinací smršťování, dotvarování a relaxací předpínací výztuže. Kotvy (a kabely) jsou pouze třílanové ve skořepině S1 a čtyřlanové v desce D1. Kvůli tomu nejsou třeba velké napínací lisy (pistole) a kolem kotev je dostatek místa pro umístění nutných předpínacích zařízení. Způsob předpínání (typ 1) začíná napnutím lan na hodnotu napětí $\sigma_{p,max}$ = 1476 MPa. Na tuto hodnotu bude výztuž dopnuta po vyčkání po dobu 300 s. Po vnesení přepětí do konstrukce nebude díky krátkodobým ztrátám nikde překročena hodnota $\sigma_{pm0,max}$ = 1394 MPa. Všechny materiály, předpínací zařízení, dodatečné vyztužení, kotevní prvky a injektážní malty jsou navrženy a budou provedeny v souladu s podklady a doporučeními firmy Freyssinet.

Pracovní a dilatační spáry

Většina prvků je spojena monoliticky. Výjimkou je skořepina S1, která je spojena s předpjatou deskou D1 pomocí vrubového kloubu, a střešní deska D2, která je prostě uložena na podpíraných konstrukcích. Dodatečný těsnící prvek do pracovní spáry bude umístěn do spoje desky D1 a vnitřního horního jádra J2. Jde o těsnící plech s bitumenovým povlakem. Připevněn bude na horní výztuž desky D1. Druhý prvek je tvořen přiloženým pryžovým těsnícím pásem, který bude přiložen do vnitřního rohu skořepiny S1 a desky D1, protože vrubový kloub znemožňuje použití těsnících plechů. Pracovní spáry budou umístěny v hlavě pilot, v úrovni horního líce základových desek, hlavě hlavních nosných sloupů a jádra J1, v úrovní horního líce desky D1 a v hlavě vnitřních sloupů.

Popis jednotlivých prvků

Deska D1

Jedná se o ŽB kruhovou desku o vnějším poloměru 21 400 mm a tloušťce 1100 mm. Uprostřed je kruhový otvor o poloměru 3 350 mm. Deska je uložena na kruhovém jádru J1 tl. 350 mm (kolem otvoru) a soustavě 24 sloupů o průměru 1200 mm. Třídy prostředí na horní straně desky jsou XC2 a XD2, na dolní straně je prostředí třídy XC3. Třída navrženého betonu je C 40/50 a navržená třída betonářské výztuže B500B. Jako předpínací výztuž jsou navrženy kabely dodatečně předpjaté soudržné výztuže. V každém kabelu jsou čtyři lana Y1860S7-15,7-A.

Deska D2

Jedná se o ŽB kruhovou spojitě uloženou desku. Pro umožnění vstupu do vodojemu jsou v desce dva malé pravoúhlé otvory. Tloušťka desky h činí 200 mm. Nad otvorem je umístěna lehká prefabrikovaná komora o rozměrech 3 x 2,5 x 2,6 m. Deska má čtyři pole se světlými rozpětími 5200 mm, 4900 mm, 5100 mm a 6000 mm. Výztuž je navržena jako radiální, ve dvou vrstvách, vždy u příslušného povrchu desky. Třídy prostředí jsou XC3 a XD1. Třída navrženého betonu C 30/37 a navržená třída výztuže B500B.

Deska D3

Jedná se o ŽB kruhovou desku, která roznáší zatížení ze ztužujícího jádra na čtyři piloty o průměru 1620 mm. Tloušťka desky h činí 1000 mm. Výztuž je navržena jako radiální, ve dvou vrstvách, vždy u příslušného povrchu desky, střed desky je vyztužen ortogonálním způsobem. Třídy prostředí jsou XC2. Třída navrženého betonu C 30/37 a navržená třída výztuže B500B.

Deska D4

Jedná se o ŽB konstrukční kruhovou desku, která ztužuje hlavy pilot a zároveň paty hlavních sloupů. Tloušťka desky h činí 300 mm. Výztuž je navržena jako radiální, ve dvou vrstvách, vždy u příslušného povrchu desky. Třídy prostředí jsou XC2. Třída navrženého betonu C 30/37 a navržená třída výztuže B500B.

Skořepina S1

Jedná se o ŽB kruhovou skořepinu o vnitřním poloměru 19 750 mm, tloušťce 400 mm a světlé výšce 7 500 mm. Dolní hrana je kloubově připojena vrubovým kloubem k předpjaté desce D1, horní hrana není přímo podepřena. Z pohledu vyšetřování vnitřních sil jde o nízkou „nádrž“. Třídy prostředí na vnitřní straně konstrukce jsou XC2 a XD2, na vnější straně je prostředí třídy XC3. Třída navrženého betonu je C 30/37 a navržená třída betonářské výztuže B500B. Jako předpínací výztuž jsou navrženy kabely dodatečně předpjaté soudržné výztuže. V každém kabelu jsou tři lana Y1860S7-15,7-A.

Hlavní sloupy S1, S2 a S3

Jedná se o ŽB kruhové sloupy o průměru 1 200 mm a světlé výšce 27 900 mm. Sloupy jsou dole vetknuty do základové konstrukce a na horním konci jsou vetknuty do desky D1, kterou podpírají. Půdorysně jsou sloupy umístěny na třech kružnicích. Třída prostředí je XC4. Třída navrženého betonu je C 30/37 a navržená třída výztuže B500B.

Vnitřní sloupy S4 a S5

Jedná se o ŽB kruhové sloupy o průměru 300 mm a světlé výšce 7 000 mm. Sloupy jsou dole vetknuty do desky a na horním konci jsou vetknuty do trámů, které podpírají. Půdorysně jsou sloupy umístěny na dvou kružnicích. Třídy prostředí jsou XC2 a XD2. Třída navrženého betonu je C 30/37 a navržená třída výztuže B500B.

Trámy T1, T2

Jedná se o ŽB spojité trámy. Půdorysně jsou uzpůsobeny do tvaru kruhů a jsou podpírány kruhovými sloupy o průměru 300 mm. Rozpětí jednotlivých polí jsou shodné. Šířka trámů činí 400 mm, výška trámů je 500 mm. Trámy jsou monoliticky spojeny s ŽB deskou D2 tl. 200 mm, která je na nich uložena. Třídy prostředí jsou XC3 a XD1. Třída navrženého betonu je C 30/37 a navržená třída výztuže B500B.

Piloty

Vodojem je založen na vrtaných pilotách o průměru 1620 mm (průměr výpažnice). Piloty jsou navrženy jako opřené o skalní podloží v přibližné hloubce 14,5

m. Každý hlavní sloup je podpírán jednou pilotou. Ztužující jádro je uloženo na desce D3, která je založena na čtyřech pilotách. Třída prostředí je XC2. Třída navrženého betonu je C 20/25 a navržená třída výztuže B500B.

Rešerše vodojemů

Úvod, dělení a základní terminologie

Vodojem je objekt, který slouží k akumulaci vody, zpravidla pitné nebo užitkové. Funkce vodojemů může být různorodá a jeden objekt může plnit několik z nich zároveň. Nejčastějšími funkcemi je vytvoření dostatečné zásoby vody, vyrovnání odběrových rozdílů a zajištění dostatečných tlaků v rozvodné síti.

Základní dělení vodojemů je na zemní a věžové. Zemní vodojemy se sestávají z jedné nebo více nádrží a všechny jsou umístěny v úrovni přirozeného terénu. Vodojemy věžové jsou umístěny na vlastní nosné konstrukci nad úrovní terénu a to zejména kvůli dosažení potřebné hydrostatické výšky. Konkrétním typem vodojemů jsou vodojemy zásobní, které zajišťují zásobování vodou v určitém tlakovém pásmu a současně svým výškovým umístěním určují tlakové poměry. Dále vodojemy přerušovací, které naopak rozdělují rozvodnou síť a přerušují tlaky (zejména v území s velkým výškovým rozdílem). Dalšími druhy jsou např. vodojemy prací vody, které akumulují vodu na praní filtrů, vodojemy provozní, které zajišťují vodu pro provoz vodárenským objektů, požární vodojemy, které zajišťují dostatek požární vody nebo průmyslové vodojemy (nádrže obecně), které zajišťují vodu pro průmyslové účely.

Objem akumulační nádrže (nádrží) se stanovuje podle funkce vodojemu, je-li funkcí více a mohou-li působit společně, stanoví se celkový objem součtem objemů pro jednotlivé funkce. Konkrétní objem vychází vždy z konkrétního využití a požadavků. Pro zemní vodojemy je dána velikostní řada v rozsahu objemů od 15 m^3 do 5000 m^3. Větší objemy se navrhují individuálně. Je-li to možné, zemní vodojemy by měli být upřednostňovány, popř. je vhodné kombinovat zemní vodojem s menším věžovým vodojemem.

Konstrukční řešení

V dnešní době je dominantním materiálem pro vodojemy (zejména zemní) železobeton, popř. předpjatý beton. Malé věžové vodojemy jsou často prováděny z ocelových prvků, popř. kombinací s ŽB. Základové konstrukce jsou vždy železobetonové. Vzhledem k charakteru zatížení kapalinou je nejvýhodnějším tvarem nádrže kruhový válec. Základové konstrukce jsou zpravidla realizovány pomocí základových desek, zastropení nádrže je řešeno rovným nebo zaklenutým stropem. U nádrží s velkým průměrem je nezbytné zastropení podepřít, zpravidla sloupy nebo stěnami. Spoje základové desky, válcové skořepiny a stropní konstrukce lze realizovat různými způsoby. Vetknutí, kdy je zabrá-

něno posunům i pootočení, neposuvný kloub a konečně posuvný (částečný kloub), kdy je zabráněno jen svislému posunutí. Ať je již řešení jakékoli, je vždy třeba věnovat pozornost správně provedenému výpočtovému modelu, konstrukčním detailům a možnostem utěsnění spár.

Protože dominantním materiálem je ŽB, provádí se návrh a posouzení konstrukce dle platných norem pro navrhování ŽB konstrukcí, zpravidla s přihlédnutím ke specializovaným normám, týkající se vodohospodářských objektů, nádrží a vodojemů. Dle platných Eurokódů je nutné postupovat v souladu s požadavky na mezní stavy únosnosti a použitelnosti. Co se týká trvanlivosti konstrukce při náležité údržbě, je doporučeno uvažovat s návrhovou životností 100 let, místo obvyklých 50 let. Doporučená třída je tedy 5. Životnost 50 let je možné uvažovat u méně významných staveb s malým objemem a vždy se souhlasem investora.

Dno a stěny vodojemů musí být vodotěsné. Proto se zpravidla postupuje při návrhu dle zásad pro tzv. „bílé vany“. To hlavně znamená použití dostatečně kvalitního betonu, důsledné dodržení mezního stavu trhlin a vhodné řešení všech spár s dilatací. Beton však není zcela vodotěsný materiál. Proto je možné kombinovat vodotěsnost betonu s dodatečnou ochranou betonového povrchu v kontaktu s kapalinou. Ta je realizována pomocí vhodných a zdravotně nezávadných ochranných nátěrů, stěrek, obkladů, vystýlek apod. U zemních vodojemů je nutné rovněž zabránit průsaku podzemní i povrchové vody z vnějšího prostředí.

Velmi důležitá je rovněž tepelná ochrana vodojemů. Ta má za úkol chránit nejen kapalinu uvnitř, ale v některých případech i samotnou konstrukci vodojemu. U zemních vodojemů, které jsou zpravidla obsypány zeminou (často i vrstvou zeminy na stropě nádrží), nedochází k velkým teplotním změnám a následnému teplotnímu namáhání konstrukce. Nevýhodou je zvýšení zatížení zemními tlaky. Věžové vodojemy nejsou zemními tlaky zatíženy, nicméně musí být více tepelně izolované a často jsou velmi teplotně namáhané nerovnoměrným osluněním nebo kolísáním teplot.

Zatížení vodojemů

Zcela zřejmými druhy zatížení vodojemů je vlastní tíha konstrukce, tlak náplně (kapalina) a u zasypaných a obsypaných nádrží i zemní tlaky. Dle konkrétní situace se může uplatnit i zatížení sněhem nebo větrem (popř. i dynamické účinky větru). U zemních vodojemů v oblastech s napjatou hladinou spodní vody nelze neposoudit možnost vyplavání nebo prolomení dna. Stejně tak v seizmicky aktivních oblastech nebo v poddolovaných územích je nutné přijmout vhodná opatření.

Protože se zpravidla jedná o relativně tenké plošné konstrukce, je třeba věnovat pozornost vlivům smršťování, dotvarování a teplotním účinkům. Velký

vliv může mít rovněž nerovnoměrné sedání, neboť konstrukce vodojemů mohou být navrženy poměrně tuhé a při následných deformacích může dojít k výrazným změnám vnitřních sil.

I když po drtivou většinu životnosti zemních vodojemů bude zatížení náplní působit zároveň se zatížením zemními tlaky, je nezbytné posoudit a nadimenzovat konstrukci na působení samostatné náplně a rovněž samostatných zemních tlaků.

Technické vybavení vodojemů

Přístup do vodojemu (údržba, kontrola) musí být navržen přes manipulační komoru. Vstup samotný se musí nacházet nad úrovní maximální hladiny vody. Dveře se navrhují těsné proti vniknutí prachu a celá komora se rovněž posuzuje z hlediska tepelně-technického. Velká pozornost je věnována větracím zařízením, které musí být v každé části vodojemu. Součástí je prachová filtrace a systém odvodu kondenzátu. Filtrační zařízení nesmí být umístěné vně objektu. Manipulační komora musí být chráněna proti vniknutí deště, sněhu, prachu, dalších nežádoucích části a organismů a proti vniknutí nepovolaných osob. Technologie a čerpadla v komoře nesmí ovlivňovat okolní konstrukce (zejména vibracemi). Potrubí musí být vedeno přehledně, účelně a všechna potrubí musí být opatřena popisem a barevným označením. Přednostně navrhovaným materiálem je nerezová ocel. Rovněž pro žebříky, zábradlí apod. se také navrhuje nerez. Přívodní potrubí může být horní nebo dolní, upřednostňováno by mělo být horní plnění. Odběrné potrubí musí být schopné odvést všechny vodu nad úrovní minimální hladiny bez případných nečistot. Výpustné potrubí vypouští všechnu vodu i včetně případných nečistot a je tedy umísťováno do nejnižšího bodu dna. Důležitou součástí je přelivné potrubí, které se zpravidla navrhuje na nejvyšší hodnotu přítoku zvýšenou o 5% až 10%. Součástí jsou i elektrická zařízení, která musí být navržena dle příslušných platných norem (zabezpečení, krytí, izolace, apod.). Jedná se zejména o transformační stanice, elektrické ovládání armatur a zařízení, osvětlení, signalizace a kontrola, atd. Je-li to nutné, navrhuje se rovněž záložní zdroj elektřiny.

Závěr

Byla navržena jedna varianta věžového vodojemu. Návrh byl proveden dle platných norem pro navrhování betonových konstrukcí s přihlédnutím k doplňujícím normám pro nádrže, zásobníky a vodojemy. Byla určena extrémní namáhání konstrukce, na které byly poté dimenzovány jednotlivé prvky. Řešení bylo provedeno pro mezní stav únosnosti a mezní stav použitelnosti (zejména šířka trhlin). Součástí je i řešení příslušných detailů, spojů a spár. Výstupem

této práce je výkresová dokumentace, statický výpočet a nastínění stavebního postupu.

Seznam použitých zdrojů

Podklady

[1] ZICH, M., *Watertower, Schema of structural system, Version A,* červenec 2014.

Odborná literatura

[2] ZICH, Miloš. *Příklady posouzení betonových prvků dle eurokódů*. Praha: Dashöfer, 2010. ISBN 978-80-86897-38-7.

[3] ZICH, Miloš a Zdeněk BAŽANT. *Plošné betonové konstrukce, nádrže a zásobníky*. Brno: Akademické nakladatelství CERM, 2010. ISBN 978-80-7204-693-5.

[4] PROCHÁZKA, Jaroslav. *Navrhování betonových konstrukcí: příručka k ČSN EN 1992-1-1 a ČSN EN 1992-1-2*. Praha: Pro Ministerstvo pro místní rozvoj a Českou komoru autorizovaných inženýrů a techniků činných ve výstavbě (ČKAIT) vydalo Informační centrum ČKAIT, 2010. Technická knižnice (ČKAIT). ISBN 978-80-87438-03-9.

[5] HARVAN, Ivan. *Predpätý betón: navrhovanie podľa spoločných európskych noriem*. Bratislava: Vydavateľstvo STU, 2008. Edícia skrípt. ISBN 978-80-227-2797-6.

Normové předpisy

[6] ČSN EN 1990: Eurokód: Zásady navrhování konstrukcí, Praha: ČNI, 2015, 100 stran.

[7] ČSN EN 1991-1-1: Eurokód 1: Zatížení konstrukcí - Část 1-1: Obecná zatížení - Objemové tíhy, vlastní tíha a užitná zatížení pozemních staveb, Praha: ČNI, 2004, 44 stran.

[8] ČSN EN 1991-1-4: Eurokód 1: Zatížení konstrukcí - Část 1-4: Zatížení zásobníků a nádrží, Praha: ČNI, 2013, 98 stran.

[9] ČSN EN 1992-1-1: Eurokód 2: Navrhování betonových konstrukcí - Část 1-1: Obecná pravidla a pravidla pro pozemní stavby, Praha: ČNI, 2011, 202 stran.

[10] ČSN EN 1992-3: Eurokód 2: Navrhování betonových konstrukcí - Část 3: Nádrže na kapaliny a zásobníky, Praha: ČNI, 2007, 24 stran.

[11] ČSN EN 1997-1: Eurokód 7: Navrhování geotechnických konstrukcí - Část 1: Obecná pravidla, Praha: ČNI, 2006, 138 stran.

[12] ČSN 75 5355: Vodojemy, Praha: ČNI, 2011, 20 stran.

[13] ČSN EN 206: Beton - specifikace, vlastnosti, výroba a shoda, Praha: ČNI, 2014, 88 stran.

Software

[14] SCIA Engineer 15.3

[15] ArchiCAD 16

[16] GEO5 2017

[17] Microsoft Word 2010

[18] Microsoft Excel 2010

Seznam použitých zkratek a symbolů

$\sum$	suma
A	plocha
A_c	plocha betonové části průřezu
$A_{c,c}$	plocha tlačené části betonového průřezu
$A_{c,eff}$	efektivní plocha
A_i	plocha ideálního průřezu
A_p	plocha předpínací výztuže
a_p	pokluz v kotvení předpínací výztuže
$A_{s,i}$	plocha výztuže
$A_{s,max}$	maximální plocha výztuže
$A_{s,min}$	minimální plocha výztuže
A_{sw}	plocha smykové výztuže
b_w	šířka průřezu
c_{min}	minimální hodnota krycí vrstvy výztuže
c_{nom}	návrhová hodnota krycí vrstvy výztuže
C_{pe}	součinitel vnějšího tlaku větru
d	účinná výška průřezu
E_{cm}	modul pružnosti betonu
E_{def}	modul přetvárnosti zemin
E_p	modul pružnosti předpínací výztuže
E_s	modul pružnosti betonářské výztuže
f_{bd}	mezní napětí v soudržnosti
F_c	síla v tlačené části betonového průřezu
f_{cd}	návrhová pevnost betonu v tlaku
f_{ck}	charakteristická pevnost betonu v tlaku
f_{ctd}	návrhová pevnost betonu v tahu
f_{ctm}	charakteristická pevnost betonu v tahu
F_k	síla v charakteristické hodnotě
$f_{p,0,1,k}$	charakter. pevnost předpínací výztuže v tahu pro smluvní mez kluzu
f_{pd}	návrhová pevnost předpínací výztuže v tahu
f_{pk}	charakteristická pevnost předpínací výztuže v tahu

F_s	síla ve výztuži
f_{yd}	návrhová pevnost výztuže v tahu (tlaku)
f_{yk}	charakteristická pevnost výztuže v tahu (tlaku)
f_{ywd}	návrhová pevnost smykové výztuže
g_k	liniové stálé zatížení v charakteristické hodnotě
h	výška průřezu, tloušťka vrstvy
h_0	náhradní rozměr prvku
$h_{c,ef}$	efektivní výška
I_{ci}	moment setrvačnosti neporušeného ideálního průřezu
I_{cr}	moment setrvačnosti porušeného průřezu
I_D	index relativní ulehlosti zeminy
I_y	moment setrvačnosti průřezu kolem osy y
k	nezamýšlený úhlový posun vnitřní předpínací vložky na jednotku délky
l_0	stykovací kotevní délka
$l_{0,min}$	minimální stykovací kotevní délka
$l_{b,min}$	minimální kotevní délka
$l_{b,rqd}$	základní kotevní délka
l_{bd}	návrhová kotelní délka
M_{cr}	kritický moment na mezi vzniku trhlin
M_d	návrhová hodnota ohybového momentu
M_k	charakteristická hodnota ohybového momentu
M_{max}	maximální hodnota ohybového momentu
M_{Rd}	výpočtový moment únosnosti průřezu
N^0	síla ve stavu dekomprese
N_d	návrhová hodnota normálové síly
N_k	charakteristická hodnota normálové síly
P.S.	pracovní spára
P.T.	původní terén
P_m	střední hodnota předpínací síly
q_k	liniové proměnné zatížení v charakteristické hodnotě
R_e	Reynoldsovo číslo
RH	relativní vlhkost
s	vzdálenost smykové výztuže
s_i	vzdálenosti výztuže
s_{max}	maximální vzdálenost výztuže
$s_{r,max}$	maximální vzdálenost trhlin
$T_{Ed,b,d}$	příčné tahové síly v kotevní oblasti pro směr b, resp. směr d
t_i	vzdálenost těžišť ideálního průřezu a betonového průřezu
u	průhyb
U.T.	upravený terénu
u_{lim}	limitní hodnota průhybu

ν	Poissonovo číslo
V_d	návrhová hodnota posouvající síly
V_k	charakteristická hodnota posouvající síly
V_{max}	maximální hodnota posouvající síly
v_{min}	minimální smykové napětí v průřezu
V_{Rd}	výpočtová smyková únosnost průřezu
$V_{Rd,c}$	výpočtová smyková únosnost betonu
w_k	vypočtená šířka trhlin
$w_{k,lim}$	limitní šířka trhlin
W_y	modul průřezu kolem osy y
x	poloha neutrální osy v průřezu
z	rameno vnitřních sil
z_g	vzdálenost k těžišti průřezu
z_{pod}	délka podzemní stěny
α	sklon smykové výztuže
α_1	součinitel tvaru prutů
α_2	součinitel pro krycí vrstvu
α_3	součinitel ovinutí příčnou výztuží
α_4	součinitel ovinutí přivařenou příčnou výztuží
α_5	součinitel ovinutí příčným tlakem
α_6	součinitel pro stykovací délku výztuže
α_p	pracovní součinitel předpínací výztuže
α_s	pracovní součinitel betonářské výztuže
$\beta(f_{cm})$	součinitel vlivu pevnosti betonu
$\beta(t_0)$	součinitel vlivu stáří betonu
$\beta_{c(t;t0)}$	součinitel časového průběhu dotvarování po zatížení
β_H	součinitel závislý na relativní vlhkosti
γ	objemová tíha
γ_c	materiálový součinitel pro beton
γ_G	součinitel stálého zatížení
γ_Q	součinitel proměnného zatížení
γ_s	materiálový součinitel pro výztuž
Δc_{dev}	návrhová odchylka krycí vrstvy výztuže
ε_{cu3}	poměrné přetvoření betonu pro návrhový diagram
ε_s	poměrné přetvoření ve výztuži
ε_{yd}	poměrné přetvoření výztuže na mezi pevnosti
θ	součet úhlových posuvů
μ	součinitel tření mezi předpínací výztuží a kanálkem
ρ	stupeň vyztužení
$\rho_{p,eff}$	efektivní stupeň vyztužení
σ_{ct}	napětí v tažených vláknech betonu

$\sigma_{p,max}$ maximální napětí v předpínací vložce
σ_p^0 základní napětí
σ_{pm0} napětí v předpínací vložce pro vnesení předpětí do konstrukce
σ_s napětí ve výztuži
ϕ průměr prutů výztuže
$\varphi_{(t;t0)}$ součinitel dotvarování
φ_{RH} součinitel vlivu relativní vlhkosti
$\psi_{0,i}$ kombinační součinitel
ψ_λ součinitel koncového efektu

Seznam příloh

P1 - Použité podklady a varianty řešení

P1.01 - Původní studie pro návrh vodojemu
P1.02 - Studie 1. varianty věžového vodojemu
P1.03 - Studie 2. varianty věžového vodojemu

P2 - Výkresová dokumentace

P2.01 - Výkres výztuže pilot	1:50
P2.02 - Výkres tvaru základových desek D3, D4	1:200
P2.03 - Výkres výztuže desky D3	1:50
P2.04 - Výkres výztuže desky D4	1:100/1:50
P2.05 - Výkres tvaru a výztuže sloupů S1, S2 a S3	1:100/1:50
P2.06 - Výkres tvaru a výztuže jádra J1	1:100/1:50
P2.07 - Výkres tvaru desky D1	1:200/1:100
P2.08 - Výkres předpínací výztuže desky D1	1:200/1:50
P2.09 - Výkres výztuže desky D1	1:50/1:10
P2.10 - Výkres tvaru a výztuže jádra J2	1:100/1:50
P2.11 - Výkres tvaru a výztuže sloupů S4 a S5	1:50/1:10
P2.12 - Výkres tvaru skořepiny S1	1:200/1:10
P2.13 - Výkres předpínací výztuže skořepiny S1	1:50/1:10
P2.14 - Výkres výztuže skořepiny S1	1:25/1:10
P2.15 - Výkres tvaru střešní konstrukce	1:100
P2.16 - Výkres výztuže trámu T1	1:20/1:10
P2.17 - Výkres výztuže trámu T2	1:20/1:10
P2.18 - Výkres výztuže desky D2	1:50

P3 - Stavební postup

Stavební postup (3 strany)

P4 - Statický výpočet

Statický výpočet (138 stran)