



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

ŽELEZOBETONOVÁ KONSTRUKCE CHLADÍCÍ VĚŽE

REINFORCED CONCRETE STRUCTURE OF THE COOLING TOWER

BAKALÁŘSKÁ PRÁCE

BACHELOR'S THESIS

AUTOR PRÁCE

AUTHOR

Lukáš Vostal

VEDOUCÍ PRÁCE

SUPERVISOR

Ing. PAVEL ŠULÁK, Ph.D.

BRNO 2019



VYSOKÉ UČENÍ TECHNICKÉ V BRNĚ FAKULTA STAVEBNÍ

Studijní program	B3607 Stavební inženýrství
Typ studijního programu	Bakalářský studijní program s prezenční formou studia
Studijní obor	3647R013 Konstrukce a dopravní stavby
Pracoviště	Ústav betonových a zděných konstrukcí

ZADÁNÍ BAKALÁŘSKÉ PRÁCE

Student	Lukáš Vostal
Název	Železobetonová konstrukce chladící věže
Vedoucí práce	Ing. Pavel Šulák, Ph.D.
Datum zadání	30. 11. 2018
Datum odevzdání	24. 5. 2019

V Brně dne 30. 11. 2018

prof. RNDr. Ing. Petr Štěpánek, CSc.
Vedoucí ústavu

prof. Ing. Miroslav Bajer, CSc.
Děkan Fakulty stavební VUT

PODKLADY A LITERATURA

Platné předpisy a normy (včetně změn a doplňků) zejména:

ČSN EN 1990 Zásady navrhování konstrukcí

ČSN EN 19901 -1 až 4 Zatížení stavebních konstrukcí

ČSN EN 1992-1-1 Navrhování betonových konstrukcí

Další potřebná literatura po dohodě s vedoucím bakalářské práce.

ZÁSADY PRO VYPRACOVÁNÍ

V rámci bakalářské práce bude posouzena železobetonová nosná konstrukce chladicí věže. Hlavní důraz bude kladen na zadání klimatických účinků zatížení. Posouzení prvků proveďte podle mezního stavu únosnosti. Kromě statické analýzy bude vypracována i výkresová dokumentace v odpovídající kvalitě a rozsahu bakalářské práce.

Ostatní úpravy provádějte podle pokynů vedoucího práce.

Požadované výstupy:

Textová část (obsahuje zprávu a ostatní náležitosti podle níže uvedených směrnic)

Přílohy textové části:

P1. Použité podklady

P2. Výkresy tvaru a výztuže (v rozsahu určeném vedoucím práce).

P3. Statický výpočet (v rozsahu určeném vedoucím práce)

Prohlášení o shodě listinné a elektronické formy VŠKP (1x)

Popisný soubor závěrečné práce (1x)

Bakalářská práce bude odevzdána v listinné a elektronické formě a pro ÚBZK 1x na CD.

STRUKTURA BAKALÁŘSKÉ PRÁCE

VŠKP vypracujte a rozčleňte podle dále uvedené struktury:

1. Textová část VŠKP zpracovaná podle Směrnice rektora "Úprava, odevzdávání, zveřejňování a uchování vysokoškolských kvalifikačních prací" a Směrnice děkana "Úprava, odevzdávání, zveřejňování a uchování vysokoškolských kvalifikačních prací na FAST VUT" (povinná součást VŠKP).

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

Ing. Pavel Šulák, Ph.D.
Vedoucí bakalářské práce

ABSTRAKT

Náplní bakalářské práce je statické posouzení základové konstrukce chladičí věže. Namodelování výpočetního modelu a následný výpočet vnitřních sil základové konstrukce chladičí věže v programu Scia Engineer. Železobetonové části konstrukce jsou posouzeny na mezní stav únosnosti a podloží je posouzeno na mezní stav použitelnosti. Součástí práce je návrh vyztužení základové konstrukce a zpracování výkresové dokumentace.

KLÍČOVÁ SLOVA

Chladičí věž, základová konstrukce, plášť, železobeton, sedání základu, podloží, zatížení větrem, Soilin, posouzení

ABSTRACT

The content of the bachelor thesis is structural analysis of cooling tower fundamental construction. Modeling of the computational model and the calculation of internal forces of cooling tower fundamental construction in Scia Engineer. The reinforced concrete parts of the structure are assessed at the ultimate limit state and the subsoil is assessed at serviceability limit state. Part of the thesis is also the desing of the reinforcement of the foundation structure and processing of the drawings.

KEYWORDS

Cooling tower, fundamental construction, skin, reinforced concrete, settlement of foundations, subsoil, wind load, Soilin, evaluation

BIBLIOGRAFICKÁ CITACE

Lukáš Vostal *Železobetonová konstrukce chladicí věže*. Brno, 2019. 41 s., 200 s. příl. Bakalářská práce. Vysoké učení technické v Brně, Fakulta stavební, Ústav betonových a zděných konstrukcí. Vedoucí práce Ing. Pavel Šulák, Ph.D.

PROHLÁŠENÍ O SHODĚ LISTINNÉ A ELEKTRONICKÉ FORMY ZÁVĚREČNÉ PRÁCE

Prohlašuji, že elektronická forma odevzdané bakalářské práce s názvem *Železobetonová konstrukce chladící věže* je shodná s odevzdanou listinnou formou.

V Brně dne 14. 5. 2019

Lukáš Vostal
autor práce

PROHLÁŠENÍ O PŮVODNOSTI ZÁVĚREČNÉ PRÁCE

Prohlašuji, že jsem bakalářskou práci s názvem *Železobetonová konstrukce chladící věže* zpracoval(a) samostatně a že jsem uvedl(a) všechny použité informační zdroje.

V Brně dne 14. 5. 2019

Lukáš Vostal
autor práce

PODĚKOVÁNÍ

Rád bych poděkoval panu Ing. Pavlu Šulákovi, Ph.D. za odborné vedení, ochotně poskytnuté rady a odborné jednání při konzultacích.

V Brně dne 14. 5. 2019

Lukáš Vostal
autor práce



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

ŽELEZOBETONOVÁ KONSTRUKCE CHLADÍCÍ VĚŽE

REINFORCED CONCRETE STRUCTURE OF THE COOLING TOWER

BAKALÁŘSKÁ PRÁCE

BACHELOR'S THESIS

AUTOR PRÁCE

AUTHOR

Lukáš Vostal

VEDOUCÍ PRÁCE

SUPERVISOR

Ing. PAVEL ŠULÁK, Ph.D.

BRNO 2019

Obsah

1	Úvod	4
2	Historie	5
3	Chladicí věže	6
4	Rozdělení chladicích věží podle způsobu chlazení	7
4.1	Mokrý chlazení	7
4.1.1	Věž s přirozeným prouděním vzduchu	8
4.1.2	Věž s nuceným prouděním vzduchu.....	9
4.2	Suché chlazení	9
4.3	Hybridní chlazení	10
5	Geometrie konstrukce.....	11
5.1	Plášť	11
5.1.1	Výchozí konstrukce.....	11
5.1.2	Model	12
5.2	Sloupy	13
5.2.1	Výchozí konstrukce.....	13
5.2.2	Model	13
5.3	Základová konstrukce	14
5.3.1	Výchozí konstrukce.....	14
5.3.2	Model	14
6	Zatížení	15
6.1	Předpisy pro navrhování a stanovení zatížení chladicích věží:.....	15
6.2	Zatížení pro model.....	15
6.3	Kombinace zatížení.....	16
6.3.1	Kombinace č.1 – prázdný bazén	16
6.3.2	Kombinace č.2 – plný bazén	16
6.3.3	Kombinace č.3 – Soilin.....	17
6.3.4	Kombinace č.4 – Dlouhodobé sedání.....	17
6.4	Použité typy zatížení.....	17
6.4.1	Vlastní tíha (G).....	17
6.4.2	Technologické zatížení.....	18
6.4.2.1	Chladicí zařízení + nosná konstrukce.....	18
6.4.2.2	Voda v chladicím bazénu	19
6.4.3	Klimatická zatížení	20
6.4.3.1	Zatížení větrem.....	20
6.4.4	Zatížení od zemních tlaků.....	22

7	Plošná podpora – podloží pod základovou konstrukcí.....	22
7.1	Soil-In.....	23
7.1.1	Typy podloží a profily vrtů.....	24
7.1.1.1	Typ 1.....	24
7.1.1.2	Typ 2.....	25
7.1.2	Sedání základu.....	26
7.1.3	Hloubka hladiny podzemní vody.....	26
8	Posouzení mezních stavů.....	27
9	Závěr.....	29
10	Seznam použitých zdrojů.....	30
10.1	Použitá literatura.....	30
10.2	Normy.....	30
10.3	Ostatní zdroje.....	31
11	Seznam použitých zkratk a symbolů.....	32
12	Seznam příloh.....	33

1 Úvod

Dle zadání bakalářské práce je řešena konstrukce chladicí věže, která je posouzena na působení účinků zatížení. Hlavním cílem práce je vypracování reálného modelu konstrukce pomocí výpočtového programu Scia Engineer v kombinaci s modulem Soilin a následné porovnání chování konstrukce v závislosti na typu podloží a výšce hladiny podzemní vody. Model je přibližnou simulací chladicí věže typu ITTERSON o výšce 125 m založené na základové desce. Následuje posouzení na maximální účinky od zatížení a jejich kombinace. Konstrukce je dimenzována na MSÚ dle platných zásad evropských norem pro rok 2019.



Obr. 1: Jaderná elektrárna Dukovany – Věž typu ITTERSON [a]

2 Historie

Koncept chladicích věží pochází z 19. století, kdy se pro chlazení parních strojů využívají kondenzátory. Kondenzací páry se snižuje tlak v pístech, díky tomu se snižuje spotřeba páry a tím i spotřeba paliva. Kondenzátory ale potřebují obrovské množství vody a cena chlazení často převyšuje cenu ušetřeného paliva. Na začátku 20. století bylo vyvinuto několik metod využívajících vypařování vody pro vnitrozemní oblasti, kde nebyl dostatečný přebytek vody. Tyto systémy se vyvinuly do forem chladicích nádrží a chladicích věží. [2]

Kolem roku 1930 se začaly stavět chladicí věže výšky asi 50 m, časem výška tohoto typu konstrukcí vzrostla postupně přes 100 m na 150 m a je zde předpoklad, že výška poroste až na 200 m. Vyvíjí se tvar chladicích věží, systém stojek, vyztužení skořepiny obvodovými prstenci a také základy. Vývojem v těchto směrech prochází funkce tvaru rotující hyperboly a zároveň dochází i k experimentům, které se týkají samotné podstaty tvaru skořepiny. Klasickým a často používaným tvarem skořepiny je rotační hyperboloid uložený na šikmých diagonálních stojkách. Mezi experimentální tvary patří například kónické či kónicko-toroidní skořepiny. Odlišností spočívající v uložení stojek je například uložení skořepiny chladicí věže na radiálních stojkách. Samotná skořepina může být vyztužena další (přídavnou) prstencovou výztuží v několika úrovních. Experimenty vznikají i ve způsobu vyztužování skořepiny. Nejčastějším typem vyztužování je vedení výztuže ve tvaru prstenců a kolmé (poledníkové) výztuže při obou površích skořepiny. Dále se často uplatňuje vyztužování, kdy je jedna výztuž vedena v diagonálním směru při jednom povrchu skořepiny a druhá výztuž při druhém povrchu v opačné diagonále. [3]

Z hlediska použitého materiálu se první věže začaly konstruovat ze dřeva. Dřevěné konstrukce postupně nahradily ocelové konstrukce, které se vyráběly až do konce padesátých let minulého století. Převrat nastává s příchodem moderních železobetonových skořepinových konstrukcí, které se ve většině případů vyrábí dodnes.

V Česku byly od třicátých let minulého století budovány věže typu Itterson, tyto věže dosahují výšky od 22 m do 153 m. Mezi největší chladicí věže na území ČR patří věž Jaderné elektrárny Dukovany o výšce 125 m, věž tepelné elektrárny Ledovice o výšce 145 m a věž Jaderné elektrárny Temelín, která je vysoká 153 m. Pro srovnání nejvyšší chladicí věž na světě měří 200 m a nachází se v německém Niederaussemu.



Obr. 2.1: Ocelové věže [b]



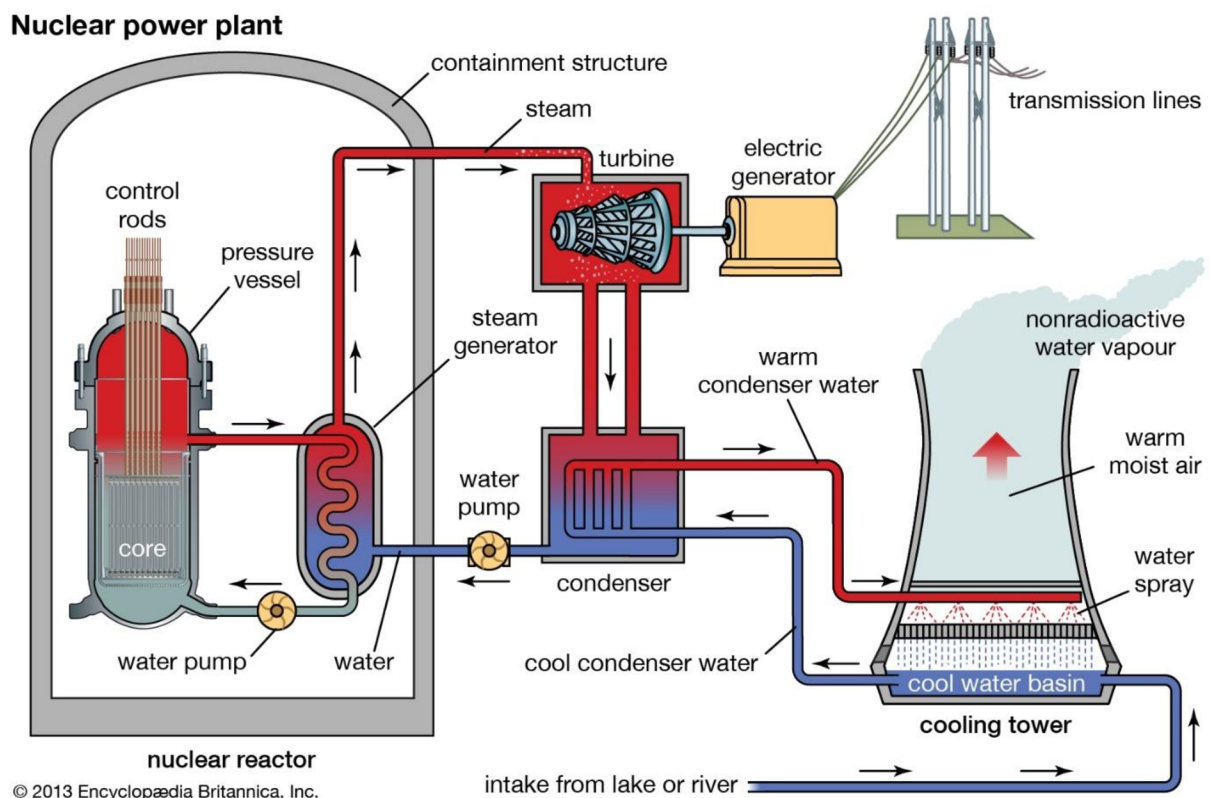
Obr. 2.2: Dřevěné věže [c]

3 Chladicí věže

Chladicí věže jsou konstrukce, které jsou součástí velké většiny elektráren, tepláren a jiných průmyslových podniků využívajících procesu chlazení pro odvod odpadního tepla. Veškerá výrobní činnost je spojená se vzájemnou přeměnou různých forem energie. Tyto procesy obecně neprobíhají se stoprocentní účinností. Pro zachování kontinuity výrobního procesu nebo procesu přeměny v případě tepelné energie, je nutný určitý podíl tepelné energie plynule odvádět. V případě, že se jedná o energii, kterou již nelze vhodným způsobem využít, označujeme ji jako nízkopotenciální a teplo se hodnotí jako odpadní. [1]

K odvádění tohoto tepla se využívají specifická strojní zařízení určená k předávání tepla mezi dvěma látkami s rozdílnou teplotou. Obecně jsou tato zařízení nazývána jako výměníky tepla. Mezi takováto zařízení patří chladiče, otopná tělesa, kondenzátory apod.

Chladicí věž je rovněž zařízení sloužící k předávání tepla, dochází zde k ochlazování použitého média (nejčastěji vody) a zároveň odvodu nadbytečného tepla do atmosféry. Tento princip přenosu tepla můžeme rozdělit podle více druhů použité technologie chladicí věže. Samotný proces chlazení je stále velice aktuální téma z důvodu možných ekonomických i ekologických úspor.



Obr. 3: Zařazení věže do systému elektrárny [d]

4 Rozdělení chladicích věží podle způsobu chlazení

Nejrozšířenějším způsobem chlazení průmyslových vod je tzv. chlazení cirkulační.

V principu jde o vodní okruh, ve kterém cirkuluje voda, která je při technologickém výrobním procesu oteplována a v další části okruhu – chladiči – je ochlazována. Po doplnění ztrát, které vznikají odparem, netěsnostmi, únosem apod., je voda okruhem opět vrácena k použití jako voda chladičí.

Cirkulační chlazení průmyslových vod se může provádět více způsoby:

- s použitím odpařovacích chladičů, kde dochází k ochlazování vody jejím přímým stykem s atmosférickým vzduchem a částečným odpařováním, tzv. mokré (výparné) chlazení.
- s použitím povrchových chladičů, kde nedochází k přímému styku ochlazované vody se vzduchem – oteplená voda je rozváděna do soustavy žebrovaných těles, na jejichž povrchu je teplo odebíráno a odváděno do proudícího vzduchu, tzv. suché chlazení. [4]
- kombinace způsobu mokrého a suchého chlazení, tzv. hybridní chlazení.

4.1 Mokré chlazení

Principem mokrého chlazení je přenos tepla a hmoty při vzájemném styku oteplené vody a chladícího vzduchu. Teplá voda je přímo vstřikovávána do ovzduší, kde padá na chladicí výplň, přes kterou proudí chladnější vzduch, dochází tak k přímému kontaktu chladící vody s ovzduším, a tím ke vzájemnému předání tepelné energie. Podstatným kvalitativním ukazatelem v oblasti chlazení je vlhkost vzduchu. [1] Ta mimo jiné ovlivňuje parametry jako je hustota, tepelný obsah (entalpie), tlak a další parametry, které mají vliv na účinnost chlazení a s tím spjaté proudění (tah) vzduchu přes chladicí věž. Z hlediska vzniku proudění rozdělujeme chladicí věže s mokrým chlazením na dvě základní kategorie. Do první kategorie patří věže s přirozeným tahem, do druhé kategorie patří věže s nuceným tahem.



Obr. 4.1.1: Chladicí výplň [e]

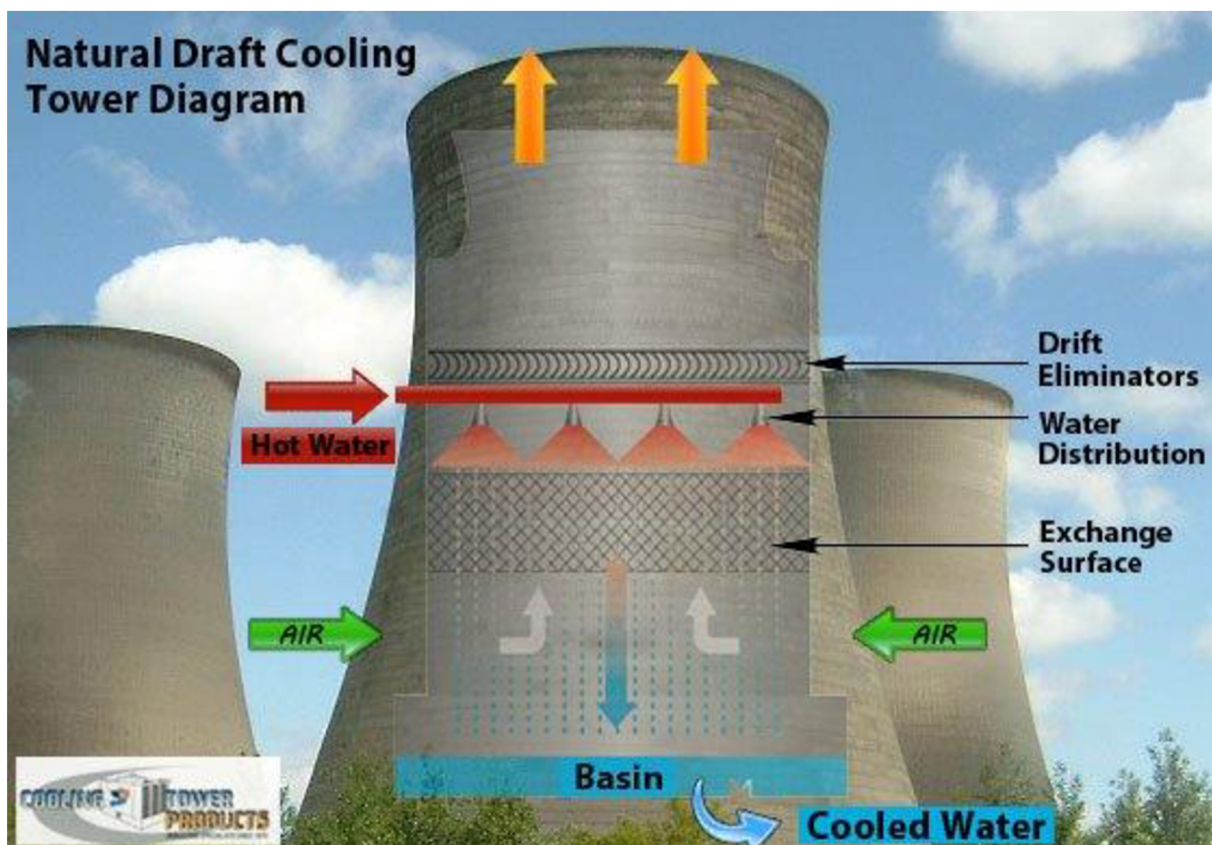


Obr. 4.1.2: Vstřikovací zařízení [c]

4.1.1 Věž s přirozeným prouděním vzduchu

V odborné literatuře také často nazývaná jako: „Natural draft wet – cooling tower“ ve zkratce NDWCT. Do češtiny byl tento termín převzat jako chladičí věž s přirozeným tahem. Ty na rozdíl od věží s nuceným tahem nevyužívají žádných mechanických součástí (větráků) k vytvoření proudění vzduchu věží.

U tohoto druhu je tah vyvolán komínovým efektem, který spočívá v rozdílné hustotě vzduchu uvnitř a vně věže, což vede ke vzniku tlakového spádu. Tento jev vzniká při předání tepla ochlazované vody chladičímu vzduchu, dochází zde ke zvýšení teploty a snížení hustoty ohřívaného vzduchu ve věži. Vzduch v okolí věže má teplotu závislou na počasí, ale i přes to má vždy menší teplotu (je chladnější) než vzduch ve věži, z toho vyplývá i jeho větší hustota. Rozdíl těchto hustot způsobuje změnu tlaku uvnitř a vně věže. Rozdílné tlaky na výstupu z věže mají tendenci o vyrovnání a tím zapříčiňují proudění vzduchu neboli tah. Pro dobrý tah musí mít věž dostatečnou konstrukční výšku. [4] [5] [7]



Obr. 4.1.3: Věž s přirozeným prouděním vzduchu – princip mokrého chlazení [f]

4.1.2 Věž s nuceným prouděním vzduchu

Často také nazvaná jako ventilátorová chladičí věž, která využívá k vytvoření proudění vzduchu jeden nebo i více ventilátorů. Ty mohou být umístěny ve spodní části v místě vstupu vzduchu, kde vtlačují vzduch do věže, nebo v horní části na výstupu vzduchu (obvykle jeden ventilátor), kde nasává vzduch ze spodní části věže. Výhodou této věže je její velikost, v porovnání s věží s přirozeným prouděním vzduchu je několiknásobně menší. Další výhodou je možnost regulace objemu proudícího vzduchu, díky čemuž je proud vzduchu stabilní a můžeme tak udržovat stálý výkon i za proměnlivých klimatických podmínek v okolí věže. [5] [6] [7]

Ventilátorové chladiče dělíme na:

- *mikrochladiče* výkonnosti do 0,06 t/s vody (216 t/h)
- *střední a velké ventilátorové chladiče* výkonnosti od 0,08 do 0,6 t/s vody (od 300 do 2 200 t/h) [1]



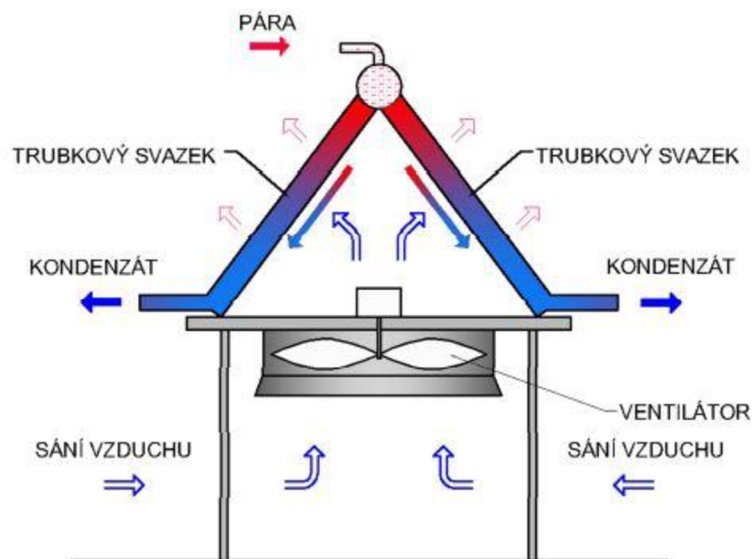
Obr. 4.1.4: Věž s horními ventilátory [e]



Obr. 4.1.5: Věž se spodními ventilátory [g]

4.2 Suché chlazení

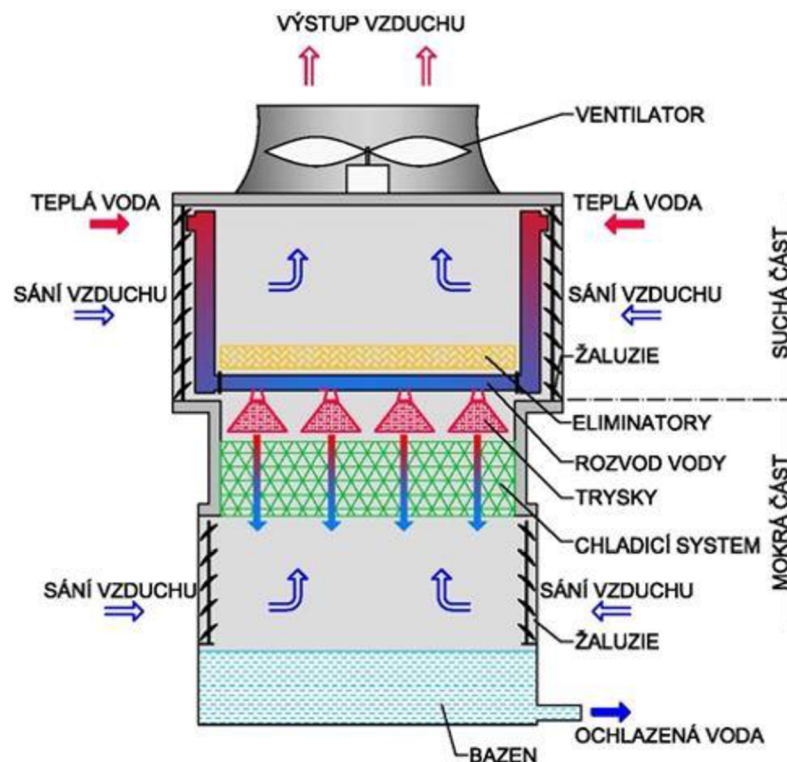
Principem suchého chlazení je odvod odpadního tepla do atmosféry. Nedochozí však k rozstříkávání ohřátého média do ovzduší jako u mokrého chlazení, ale chladičí voda koluje v uzavřeném systému. Voda je vháněna do rozsáhlého výměníku (např. žebrovaných trubek), kolem kterého proudí studený vzduch, jenž přebírá odpadní teplo. Nedochozí tak k přímému kontaktu vody se vzduchem a tím ke ztrátám chladičí vody a její značné spotřebě vypařováním. Z tohoto důvodu jsou věže se suchým chlazením vhodné pro místa s omezenými zdroji vody a zároveň působí šetrněji na životní prostředí. Nevýhodou však zůstává nutnost rozsáhlé plochy výměníku pro dostatečný výkon a potřeba většího množství přiváděného vzduchu. Proto jsou tyto věže převážně konstruovány jako věže s nuceným prouděním vzduchu (viz 4.1.2.). [7]



Obr. 4.2.1: Věž s nuceným prouděním vzduchu – princip suchého chlazení [e]

4.3 Hybridní chlazení

Princip hybridního chlazení spočívá na kombinaci suchého a mokrého chlazení, kdy vhodně kombinuje tyto dva způsoby a stává se tak úspornějším a šetrnějším řešením s ohledem na životní prostředí. Ohřátá voda je v první řadě ochlazena pomocí výměníku v sekci pro suché chlazení a až následně rozstříkována na chladicí výplň v sekci pro mokré chlazení. Díky tomu nedochází ke vzniku tak velkého množství vodní páry jako u samotného mokrého chlazení. Tím se snížena spotřeba chladicí vody a tento způsob se tak stává úspornějším. [8]



Obr. 4.3.1: Věž s nuceným prouděním vzduchu – princip hybridního chlazení [e]

5 Geometrie konstrukce

Samotná geometrie prošla postupem času výrazným vývojem. Z počátku se jednalo o tvar válce, komolého jehlanu či různě zalomené kombinace již jmenovaných tvarů. Tvar geometrie vyspěl až do dnešní podoby symetrického rotačního hyperboloidu uloženého na svislých či šikmých sloupech různých průřezů. Ve své práci jsem použil jako výchozí geometrii tvar chladičí věže z Jaderné elektrárny v Dukovanech o výšce 125 m, která má právě tvar již zmiňovaného rotačního hyperboloidu.



Obr. 5: Věž Jaderné elektrárny v Dukovanech [a]

5.1 Plášť

5.1.1 Výchozí konstrukce

Jedná se o železobetonovou skořepinu s proměnnou tloušťkou, která vzrůstá lineárně po výšce. V patě má tloušťku 600 mm, která se průběžně snižuje zhruba do 1/3 výšky věže na 150 mm. Zbývající část pláště má konstantní tloušťku 150 mm až po kontrolní lávku v koruně věže, která vzrůstá ze zmiňovaných 150 mm na tloušťku 800 mm. Materiál skořepiny je betonu III (250) podle dřívější normy ČSN 73 1201 (1967), což odpovídá dnešnímu betonu C20/25 podle stávající normy ČSN EN 206-1 (2001). V betonu je žebříková betonářská výztuž 10335 od průměru 12 mm ve spodní části, přes 10 mm až po 8 mm ve vrchní části skořepiny. V extrémně namáhaných místech, jako je uložení sloupů ve spodní části nebo rozšíření v koruně, jsou pruty betonářské výztuže o průměru 20 mm. Krytí výztuže je po celé výšce uvažováno 25 mm, což bylo v 70. letech poměrně velké krytí používané pro extrémní prostředí. Samotná skořepina začíná ve výšce 7 m nad terénem, kde má poloměr 44,27 m uvažovaný od osy skořepiny po osu tloušťky pláště v dané úrovni. Hodnota poloměru je po výšce proměnná, z počátku klesá od největší hodnoty, která je v patě až po nejmenší hodnotu 28 m, jenž je v 95,19 m nad terénem. Odtud opět narůstá až do koruny, kde dosahuje hodnoty 30,32 m. Na plášti věže jsou z venkovní strany pravidelně rozmístěna žebírka ve tvaru lichoběžníků o rozměrech rovnoběžných stran 80 a 120 mm a výšce 50 mm, která slouží pro snížení přilnavosti větru na povrch pláště. Skořepina je ve spodní části uložena na železobetonové sloupy, o kterých se více dočteme v kapitole 5.2.1.

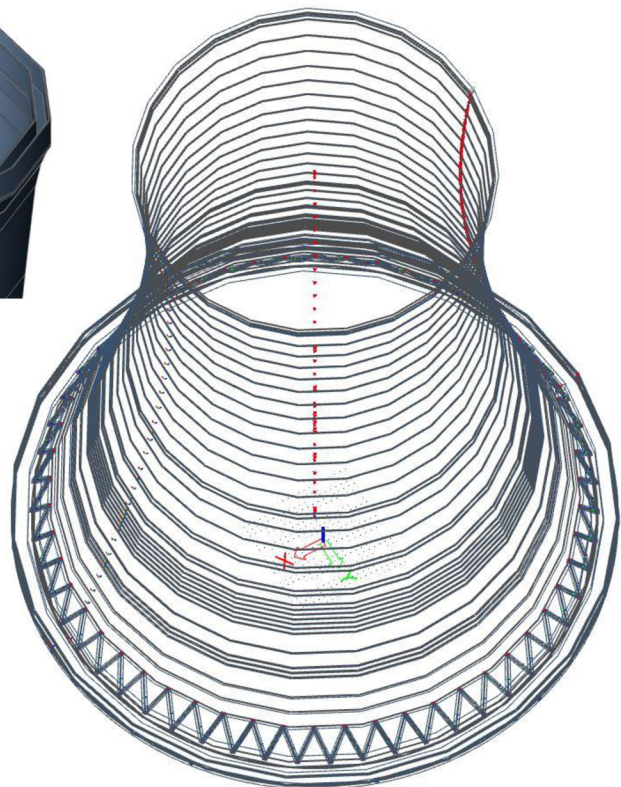
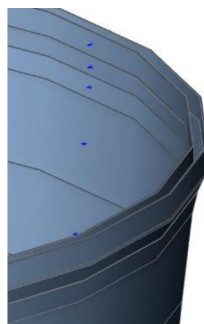
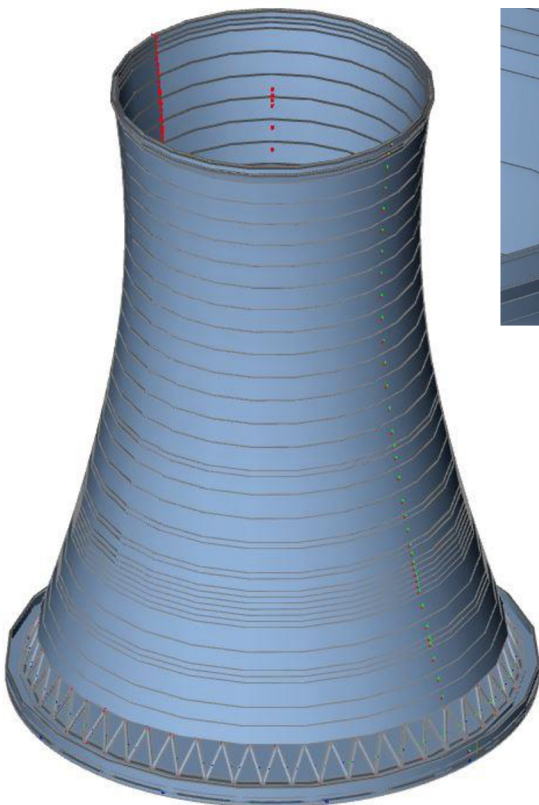


Obr. 5.1.1: Kontrolní lávka v Dukovanech [c]

Obr. 5.1.2: Pohled na plášť z koruny věže [c]

5.1.2 Model

V tomto projektu jsem pomocí programu Scia Engineer vymodeloval téměř totožnou konstrukci pláště ve tvaru rotačního hyperboloidu s proměnnou tloušťkou. Pro vytvoření jsem využil funkci skořepina s proměnnou tloušťkou po výšce. Plášť jsem rozdělil na segmenty po 1,15 m z důvodu přesného vymodelování proměnné tloušťky pláště a proměnného poloměru skořepiny v závislosti na výškové úrovni od stávajícího terénu. (viz obr. 5.1.3 a 5.1.4) Pro výpočet jsem použil beton C30/37. Konstrukce pláště je ve spodní části uložena na železobetonové sloupy, o kterých se více dočteme v kapitole 5.2.2.



Obr. 5.1.3: Model z programu Scia Engineer (uprostřed – detail kontrolní lávky)

Obr. 5.1.4: Drátový model z programu Scia Engineer

5.2 Sloupy

5.2.1 Výchozí konstrukce

Sloupy jsou částí konstrukce, která přenáší zatížení z pláště do základové konstrukce. Sloupy v hlavě podepírají skořepinu a v patě jsou vetknuty do základových patek, které jsou součástí základové desky či základového pasu. Mají osmiúhelníkový průřez o poloměru opsané kružnice 300 mm. Sloupy vynášející plášť konstrukce jsou šikmo uloženy. Každý sloup je uložen od hlavy sloupu z levé strany k patě sloupu z pravé strany. Součástí konstrukce jsou také sloupy vynášející chladicí zařízení uložené uvnitř věže, které jsou uloženy v kruhovém rastru a mají výšku 10 m od základové patky po nosné trámy chladicího zařízení.



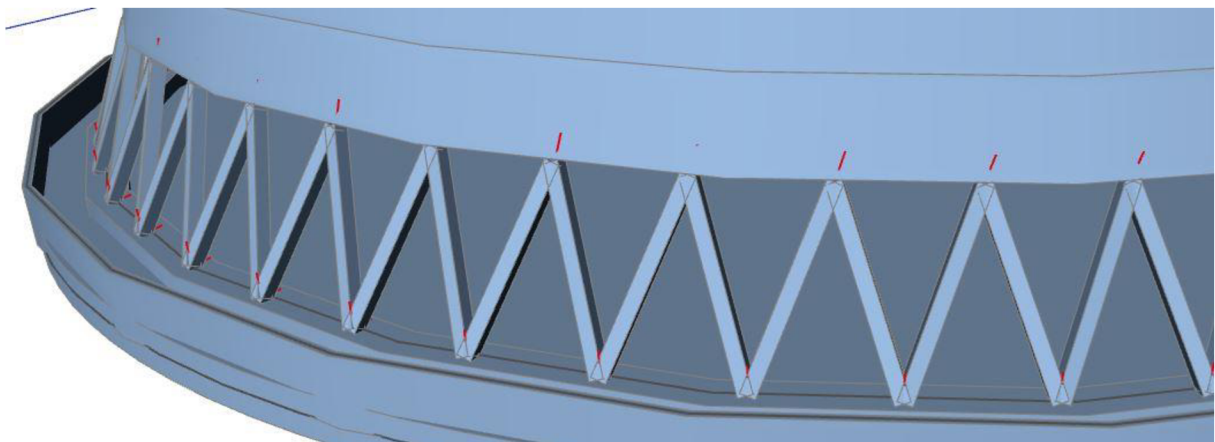
Obr. 5.2.1: Šikmé vnější sloupy [c]



Obr. 5.2.2: Svislé vnitřní sloupy [c]

5.2.2 Model

V této práci jsem použil sloupy z betonu C30/37 o čtvercovém průřezu 600 x 600 mm kvůli jednoduššímu modelování. Skořepinu v mém projektu vynášejí 108 šikmých sloupů vetknutých do železobetonového prstence, kterým jsem nahradil původní základové patky z důvodu zjednodušení modelu (viz 5.3.2). Pro sloupy vynášející chladicí zařízení jsem použil také čtvercový průřez 600 x 600 mm, jejich uspořádání jsem uvažoval v kruhovém rastru s osovou vzdáleností sloupů 5 m. Tyto sloupy jsem však nemodeloval z důvodu přepočtu na plošné zatížení (viz 6.4.2.1).



Obr. 5.2.3: Konstrukce sloupů v programu Scia Engineer

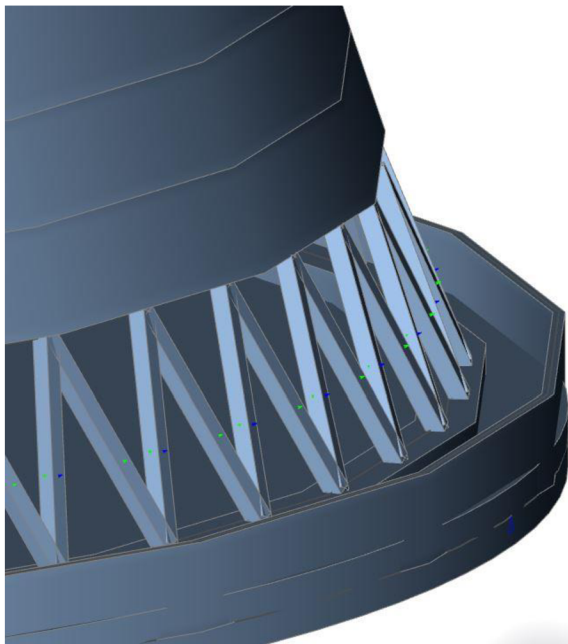
5.3 Základová konstrukce

5.3.1 Výchozí konstrukce

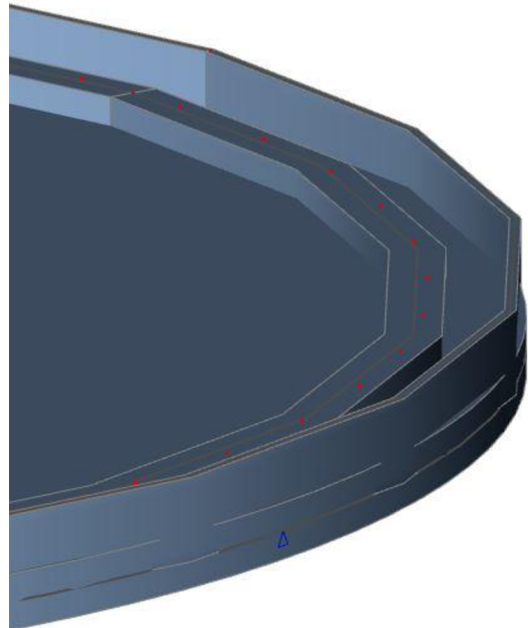
Základové poměry jsou v Dukovanech poměrně specifické z důvodu složitého podloží, proto jsou dvě z dukovanských věží založeny na základových pasech s podporou pilot a zbývajících 6 věží je založeno plošně. Bohužel z důvodu nedostatečného množství podkladů nebylo možné zjistit konkrétnější parametry základové konstrukce jako jsou rozměry, materiálové vlastnosti či výškové parametry stávajících základů.

5.3.2 Model

Z důvodů již zmíněných nedostatečných podkladů jsem navrhl pro svůj model přibližnou simulaci základové konstrukce v podobě základové desky o tloušťce 2 m a poloměru 50,5 m. Hodnota poloměru vychází z rozměrů stávající konstrukce v úrovni paty sloupů. Z důvodu srovnání více druhů podloží jsem použil beton C30/37. Do desky je z horní strany vetknutý železobetonový prstenec s obdélníkovým průřezem o rozměrech 2 000 x 1 000 mm určený pro připojení sloupů. Na okraji desky je lemovací (obvodová) zídka, která tvoří stěny chladičích bazénů a je taktéž vetknuta do základové desky. Zídka je tvořena obdélníkovým průřezem 400 x 2 000 mm s horní hranou v rovině stávajícího terénu.



Obr. 5.3.1: Základová konstrukce – vetknutí sloupů



Obr. 5.3.2: Detail základové konstrukce do železobetonového prstence

6 Zatížení

Na základovou konstrukci chladicí věže působí převážně tyto typy zatížení:

- Vlastní tíha konstrukce (G) (viz 6.4.1)
- Technologické zatížení (viz 6.4.2)
 - Nosná konstrukce chladicího zařízení (sloučeno – viz 6.4.2.1)
 - Chladicí zařízení (sloučeno – viz 6.4.2.1)
 - Voda v chladícím bazénu (viz 6.4.2.2)
- Klimatická zatížení
 - Zatížení větrem (viz 6.4.3.1)
 - Sání na vnitřní povrch věže dané komínovým efektem (Wi)
 - Vliv oslunění + zatížení teplotou (léto, zima) (T)
 - Zatížení sněhem a ledem (námraza v zimních měsících)
- Zatížení od zemních tlaků (viz 6.4.4)
- Seismické zatížení (konstrukce chladicí věže nepatří obecně mezi vybraná zařízení, která musí být odolná vůči přírodním seismickým vlivům)
- Ostatní speciální zatížení (časový faktor, strojní zařízení, ochranné prvky, dynamické zatížení, náraz letadla, výbuch a další)

6.1 Předpisy pro navrhování a stanovení zatížení chladicích věží:

Konstrukce chladicích věží v EDU byla navržena dle soustavy norem ČSN, konkrétně zatížení bylo uvažováno dle ČSN 73 0035. Platnost soustavy těchto norem skončila rokem 2009. V současné době se navrhování a posuzování nových konstrukcí provádí dle norem patřících do skupiny Eurokódů. Případně lze využít jiné mezinárodní standardy, pokud jejich platnost je vztažena i na Českou republiku. Pro stávající konstrukce je třeba postupovat dle ČSN ISO 13822 - Hodnocení existujících konstrukcí.

Z důvodu odlišnosti zásad navrhování konstrukcí (definice spolehlivostního přístupu, výpočet zatížení atd.) není ale možné přístupy dle těchto norem kombinovat. Pro výpočet zatížení lze z jednotlivých předpisů převzít za určitého předpokladu jen některé „nezávislé“ parametry, například rozdělení tlaků větru po obvodě pláště.

6.2 Zatížení pro model

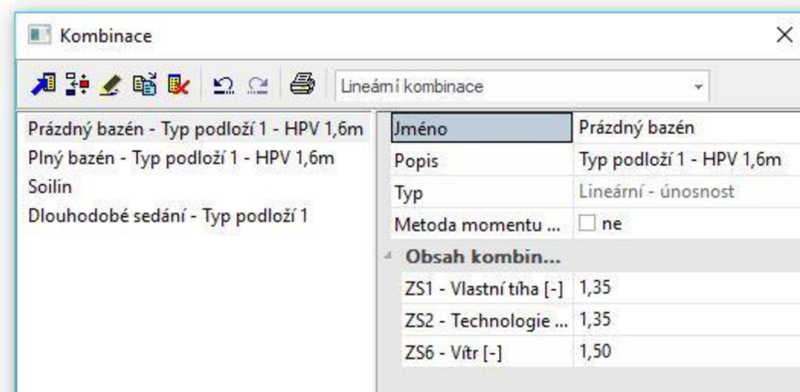
Rozhodujícím zatížením pro základové konstrukce chladicích věží je zatížení od vlastní tíhy, technologického zařízení, zatížení od klimatických vlivů (primárně větru a námrazy) a zatížení od zemních tlaků. Ve svém projektu jsem počítal pouze s těmito druhy zatížení s výjimkou námrazy, kterou jsem neuvažoval ve své bakalářské práci z důvodu jejího rozsahu. Ze stejného důvodu jsem neuvažoval ani další druhy zatížení (zatížení sněhem a ledem, zatížení teplotou, seismické zatížení apod.) působící na konstrukci.

6.3 Kombinace zatížení

Za pomoci programu Scia Engineer jsem vytvořil kombinace zatížení (viz obr. 6.3.1) pro zjištění extrémů v konstrukci, které jsou společným působením jednotlivých zatížení vyvozovány. Pro kombinace jsem zvolil jeden ze tří geotechnických návrhových přístupů. Z důvodu primárního řešení únosností základové desky, nikoliv zemního masivu, jsem zvolil geotechnický návrhový přístup NP2, který aplikuje dílčí součinitele na zatížení a na odpor materiálu (únosnost). Redukční součinitelé pro zatížení jsou $\gamma_G=1,35$ pro stálé zatížení a $\gamma_Q=1,5$ pro proměnné zatížení. Součinitelé pro redukci odporu materiálu jsou $\gamma_{Rvs}=1,4$ pro svislou únosnost a $\gamma_{Rhs}=1,1$ pro vodorovnou únosnost.

6.3.1 Kombinace č.1 – prázdný bazén

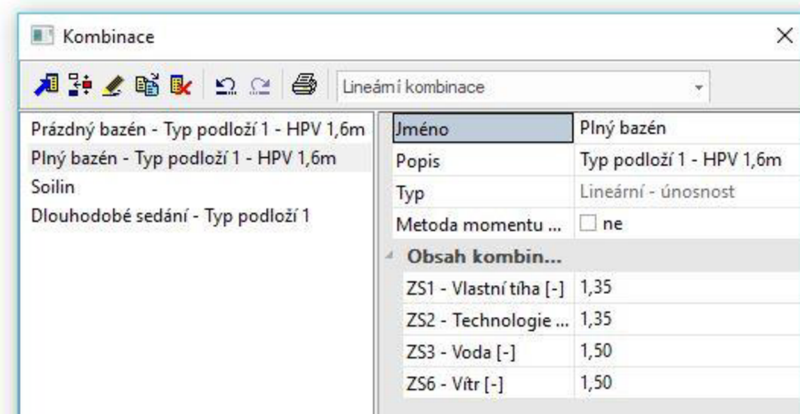
Do první kombinace jsem použil zatížení od vlastní tíhy, technologické zatížení (pouze chladicí zařízení + nosná konstrukce), klimatické zatížení (zatížení větrem) a zatížení od zemních tlaků (viz obr. 6.3.1). Tato kombinace slouží pro zjištění extrému na okraji základové desky, respektive v obvodové zídce a neobsahuje zatížení od vody v chladicím bazénu.



Obr. 6.3.1: Zadání kombinace č.1 v programu Scia Engineer

6.3.2 Kombinace č.2 – plný bazén

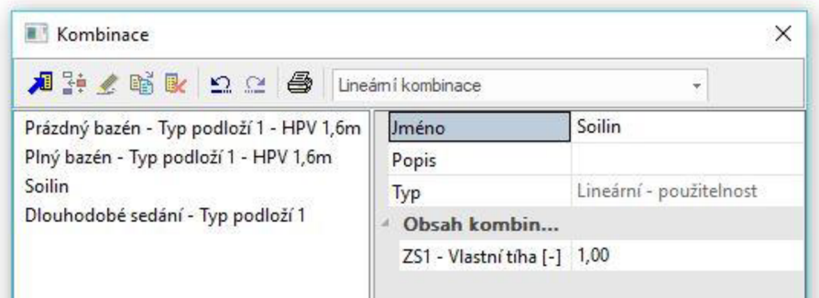
Do druhé kombinace jsem použil zatížení od vlastní tíhy, technologické zatížení (chladicí zařízení + nosná konstrukce i voda v chladicím bazénu), klimatické zatížení (zatížení větrem) a zatížení od zemních tlaků (viz obr. 6.3.2). Tato kombinace slouží pro zjištění extrému v základové desce a obsahuje všechny typy zatížení.



Obr. 6.3.2: Zadání kombinace č.2 v programu Scia Engineer

6.3.3 Kombinace č.3 – Soilin

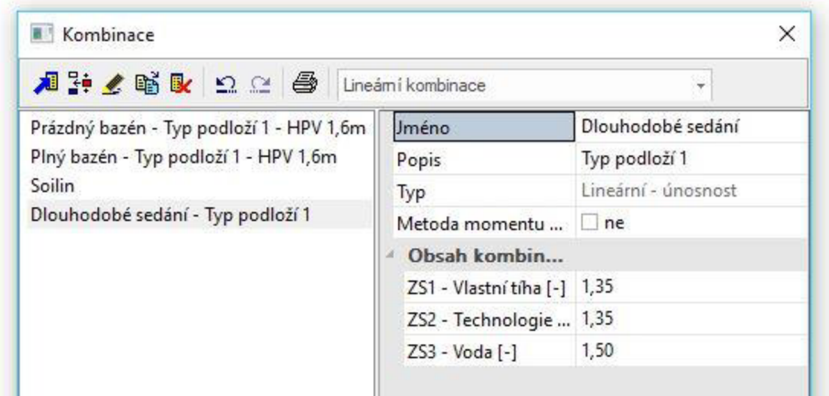
Do třetí kombinace jsem použil pouze zatížení od vlastní tíhy, jelikož se jedná o kombinaci vytvořenou pro výpočet tuhosti podloží v modulu soilin (viz obr. 6.3.3).



Obr. 6.3.3: Zadání kombinace č.3 v programu Scia Engineer

6.3.4 Kombinace č.4 – Dlouhodobé sedání

Do čtvrté kombinace jsem použil zatížení od vlastní tíhy, technologické zatížení (chladicí zařízení + nosná konstrukce, voda v chladícím bazénu) a zatížení od zemních tlaků (viz obr. 6.3.4). Tato kombinace slouží pro zjištění maximální hodnoty dlouhodobého sedání, nezahrnuje tedy klimatická zatížení.



Obr. 6.3.4: Zadání kombinace č.4 v programu Scia Engineer

6.4 Použité typy zatížení

6.4.1 Vlastní tíha (G)

Vlastní tíha je zatížení tvořené vlastní vahou železobetonové konstrukce závislou na geometrii a objemové tíze železobetonu o hodnotě 25 KN/m^3 . Jedná se tedy o součet hmotností jednotlivých konstrukčních prvků věže (kontrolní lávka, plášť, sloupy, základová deska, železobetonový prsteneček, obvodová zídka). Vlastní tíha je automaticky vygenerované zatížení z výpočtového modelu v programu Scia Engineer. Pro výpočet jsem použil beton C30/37.

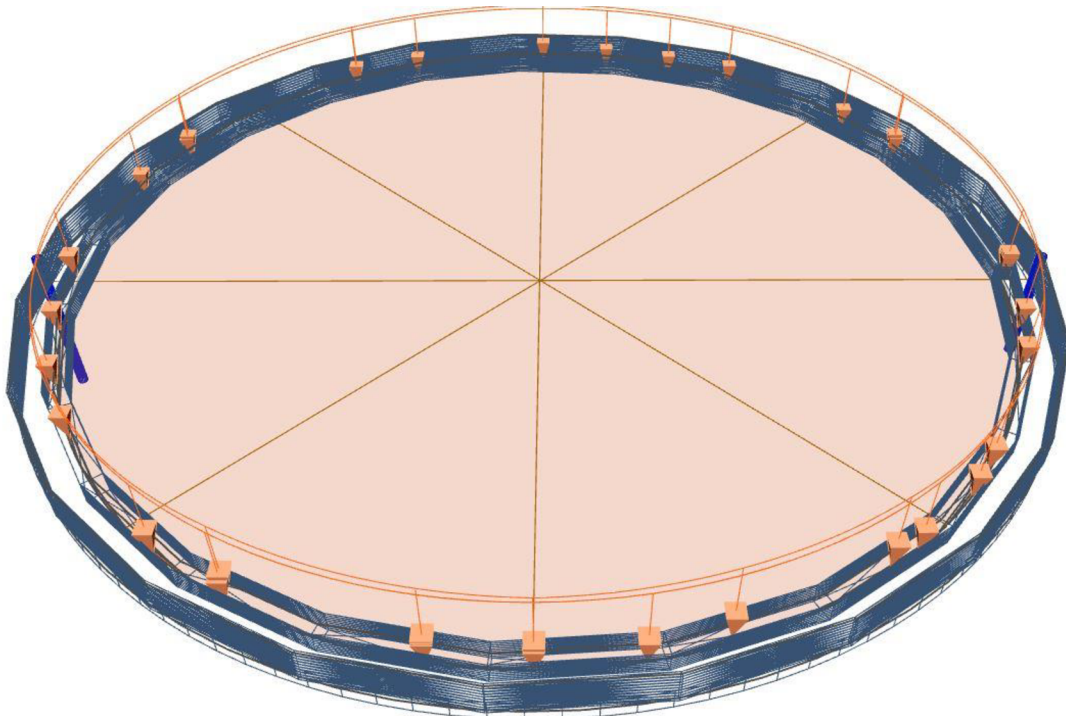
6.4.2 Technologické zatížení

6.4.2.1 Chladicí zařízení + nosná konstrukce

Jedná se o stálé zatížení, které bylo poměrně složité zjistit z důvodu různých chladicích technologií a s tím spojených použitých materiálů pro chladicí zařízení.

Uvažoval jsem tedy vlastní tíhu sloupů podpírajících nosný rám chladicího zařízení, pro které jsem uvažoval parametry zmíněné v kapitole 5.2.2. K této tíze jsem přičetl vlastní tíhu hlavního nosného trámu, pro který jsem uvažoval průřez o rozměrech 150 x 300 mm s efektivní šířkou 5000 mm, která je rovna osové vzdálenosti vnitřních sloupů. Na hlavním trámu jsou uloženy další příčné trámy, které tvoří nosnou konstrukci pro samotné chladicí zařízení (chladicí výplň – uvažuji v tloušťce 1 m, rozvody vody, koryta atd.). Hodnotu zatížení celého chladicího zařízení včetně příčných trámů a zatížení od chladicí kapaliny, která je v chladicí výplni zadržována, uvažuji 250 kg/m². [9] Tuto hodnotu zatížení jsem rozpočítal na plochu 25 m², kterou přenáší jeden svislý sloup. Součtem všech již zmíněných zatížení (sloup, trám, zařízení) vznikla hodnota 158,125 kN/m², tu jsem zaokrouhlil na 160 kN/m².

Vypočtenou hodnotu jsem následně zadal do modelu jako volné plošné zatížení, nejprve jsem si však ověřil roznos zatížení ze sloupu do základové konstrukce. Pro ověření jsem uvažoval zmiňovaný průřez sloupu 600 x 600 mm (viz 5.2.2), tloušťku základové konstrukce 2 m (viz 5.3.2) a roznášecí úhel pro železobetonovou konstrukci 45°. Za těchto předpokladů se ramena roznosů jednotlivých sloupů protнула v základové desce, z čehož vyplývá možnost zadání zatížení jako plošné rovnoměrné zatížení.

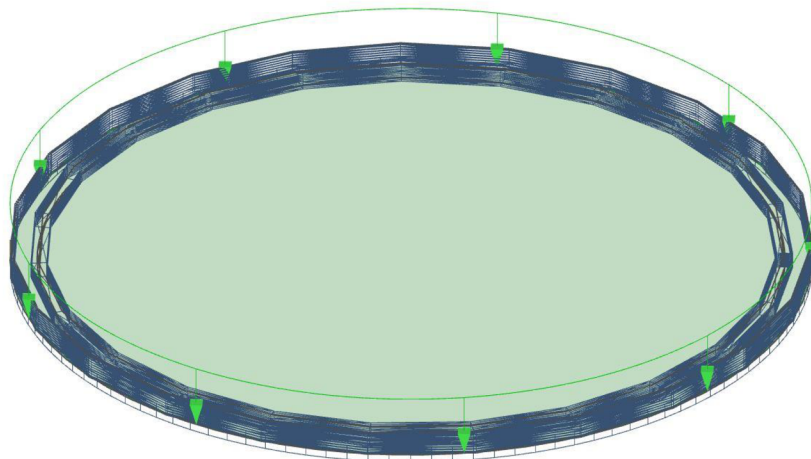


Obr. 6.4.1: Plošné rovnoměrné zatížení od chladicího zařízení a jeho nosná konstrukce

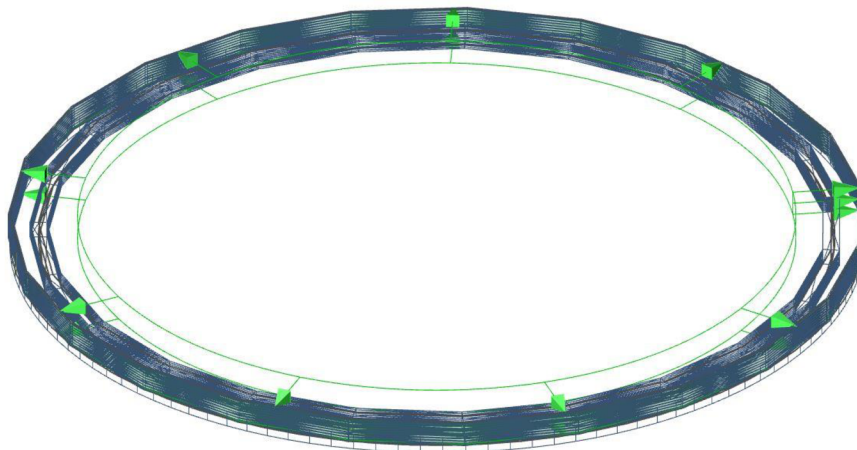
6.4.2.2 Voda v chladícím bazénu

Jde o velice specifické zatížení, které se řadí do proměnných zatížení. Nejde však přesně určit stálou hladinu chladicí vody v bazénu, jelikož voda cirkuluje chladícím systémem, který ji podle své potřeby využívá a tím pádem dochází ke kolísání hladiny.

Pro maximální vyvození účinků od tohoto zatížení jsem zvolil dvě kombinace zatížení (viz 6.3.1 a 6.3.2), pro které jsem v prvním případě uvažoval extrém v podobě prázdného bazénu a v druhém případě extrém v podobě plného bazénu až po horní okraj obvodové zídky. V prvním případě dochází k odlehčení obvodové zídky z vnitřní strany bazénu, což maximalizuje napětí od zemních tlaků z vnější strany zídky (aktivní zemní tlaky). Vzniká tak větší napětí v konstrukci než v původním stavu, kdy se „aktivní“ zemní tlaky z vnější strany a „pasivní“ vodní tlaky z vnitřní strany částečně vyrušovaly, a tím v podstatě stabilizovaly zídku (vznik klidového tlaku). Hodnota zatížení od chladicí kapaliny je tedy v této situaci rovna 0 kN/m^2 , abych dosáhl maximálního účinku od aktivních zemních tlaků působících na konstrukci. Ve druhém případě jsem uvažoval zaplnění bazénu až po okraj za předpokladu havárie (ucpané potrubí) nebo přírodní katastrofy v podobě povodní či přívalových dešťů. Hodnotu toho zatížení jsem spočítal na 20 kN/m^2 při uvažované výšce obvodové zídky 2 m. Do modelu jsem jej zadal jako plošné rovnoměrné zatížení na základovou desku. Z důvodu omezených možností zadávání proměnného plošného zatížení na kruhové dílce v programu Scia Engineer jsem použil pro obvodovou zídku taktéž rovnoměrné plošné zatížení.



Obr. 6.4.2: Plošné rovnoměrné zatížení od vody působící na základovou desku



Obr. 6.4.3: Plošné rovnoměrné zatížení od vody působící na obvodovou zídku

6.4.3 Klimatická zatížení

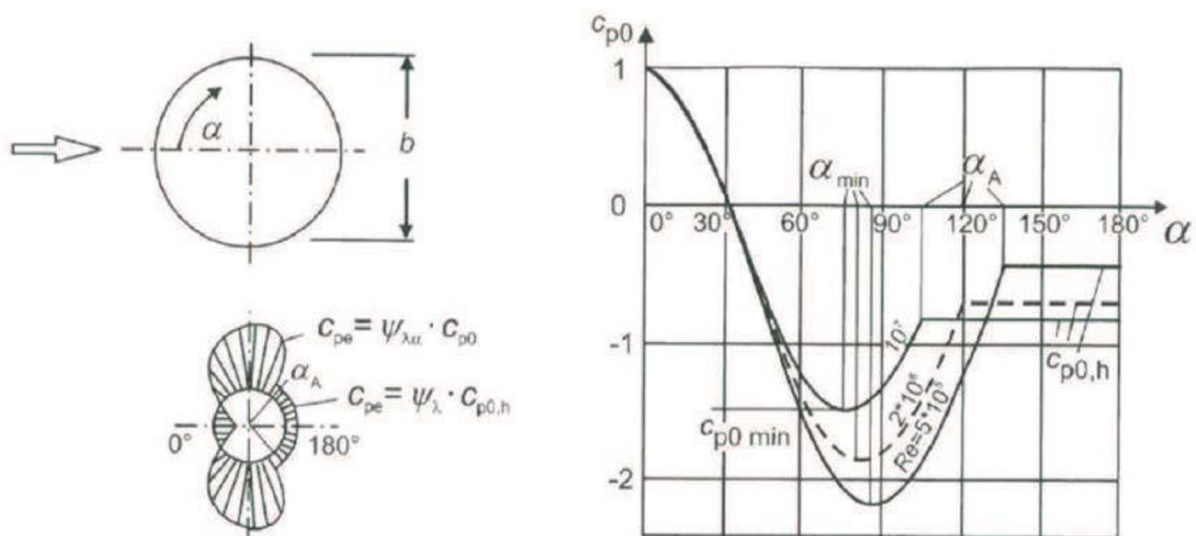
6.4.3.1 Zatížení větrem

Konstrukce chladicích věží se navrhuje na zatížení větrem s dobou návratu 100 let. Chladicí věže jaderných elektráren musí splňovat podmínku odolnosti na extrémní vítr s dobou návratu 10 000 let.

Působením větru vzniká na konstrukci tlak nebo i sání. Další podstatnou částí jsou výrazné dynamické účinky. Ty jsou způsobené nárazy, změnami směru větru, rychlostí větru a jeho turbulentním chováním. Rozdíly hodnot zahrne ve výpočtu součinitel fluktuace a součinitel turbulence. Cílem výpočtu zatížení větrem je získat ekvivalentní zatížení, které můžeme nazývat maximální dynamický tlak $q_p(z_e)$. Účinky větru jsou proměnné po výšce a obvodu celé konstrukce, z tohoto důvodu je nutné přepočítat hodnotu zatížení pro různé úseky konstrukce pomocí součinitele vnějších a vnitřních tlaků větru.

Pod pojmem úseky konstrukce se rozumí řezy po výšce a jednotlivé kruhové výseče v dané úrovni výšky konstrukce podle úhlu θ nebo α . [II.] V každém řezu (segmentu) je zatížení řešeno jako působení větru na kruhový profil.

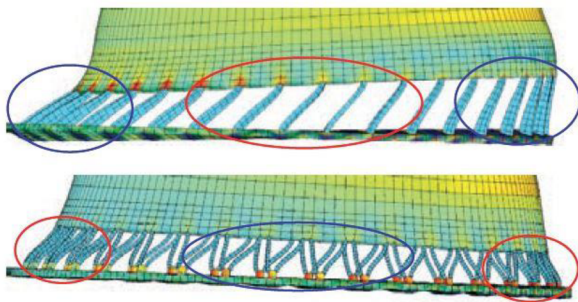
Každé této oblasti náleží jiný externí součinitel tlaku c_{pe} (viz obr. 6.4.4). Pokud se uvažuje vnitřní tlak, potom se interní součinitel tlaku c_{pi} má dle literatury uvažovat hodnotou 0,5 po celém obvodu konstrukce a znaménkem, které značí v konvenci sání.



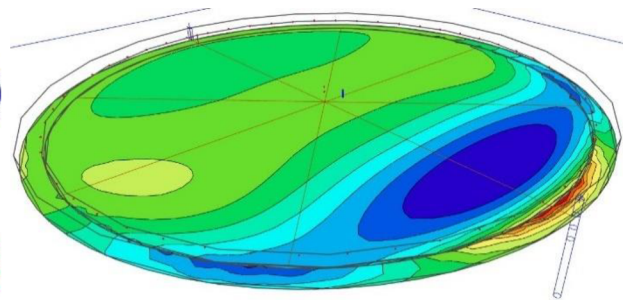
Obr. 6.4.4: Rozdělení tlaku (c_{pe}) po obvodě válce [11]

Vnitřní tlak v chladicí věži je způsobený komínovým efektem při provozu, víry proudícími při horním okraji věže a také profukováním větru mezi sloupy a následnými turbulencemi uvnitř chladicí věže. Dochází ke sčítání účinků vnitřních a vnějších tlaků v každém místě konstrukce a tím vzniká výsledná hodnota zatížení od větru. Vnitřní tlak výrazně ovlivňuje rozmístění zatížení větrem po obvodu pláště konstrukce. Tím způsobuje změnu chování proudění větru kolem věže, které díky tomu téměř neodpovídá standardnímu chování proudění větru. [11]

V tomto projektu jsem účinky vnitřních tlaků neuvažoval z důvodu lepšího pochopení chování větru působícího na plášť chladicí věže, ale především z důvodu rozsahu své práce, která je zaměřená hlavně na základovou konstrukci. Potřebuji tedy maximální účinky od zatížení větrem vyvozené na plášť konstrukce, na který působí vítr primárně. Tyto účinky jsou následně přenesené přes sloupy do základové konstrukce (viz obr. 6.4.5 a 6.4.6). Z důvodu zjednodušení výpočtu takto komplikovaného zatížení, od kterého jsou pro mě podstatné pouze výsledné účinky na základ, jsem použil výchozí hodnoty součinitele c_{pe} z literatury [11], kde jsou vypočteny podle normy ČSN EN 1991-1-4 – Eurokód 1: Zatížení konstrukcí – Část 1-4: Obecná zatížení – Zatížení větrem [II.] za pomoci zahraniční literatury VGB PowerTech – Structural Design of Cooling Towers. Tyto hodnoty jsem následně upravil pro svoji geometrii modelu. Uvažoval jsem tedy větrnou oblast II, základní rychlost větru v této oblasti $V_{b0}=25$ m/s, kdy tato hodnota odpovídá hodnotě základní rychlosti větru V_b . V závislosti na součinitelích c_{dir} , c_{season} a c_{prob} , které jsou rovny 1,0 jsem zvolil kategorii terénu II – Oblasti s nízkou vegetací jako je tráva s izolovanými překážkami (stromy, budovy), jejichž vzdálenost je větší než maximálně 20násobek výšky překážek. Parametr drsnosti terénu $z_0=0,05$ m a minimální výška $z_{min}=2$ m.



Obr. 6.4.5: Deformace konstrukce od větru [h]



Obr. 6.4.6: Účinek zatížení na základ věže

Základními parametry pro výpočet účinků větru jsou průměry konstrukce věže odpovídající různým výškám od paty věže v 7 m až po korunu věže ve 125 m. Model jsem proto rozdělil na segmenty po 1,15 m a stanovil jednotlivé hodnoty pro každý segment. Určil jsem tedy i hodnoty $w_e(z_e, \alpha)$ vypočtené ze vzorce (vz. 4.1) vycházejícího z již zmíněné normy ČSN EN 1991-1-4. Použil jsem stejný postup jako je udáván v literatuře [11]. Dalším krokem bylo upravení hodnot zatížení větrem w_e po obvodu konstrukce z důvodu zjednodušení zadání zatížení do výpočtového modelu. Z tohoto důvodu jsem obvod rozdělil na několik různých výsečí o velikosti přibližně 10° od počátečního úhlu $\alpha=0^\circ$ po úhel, kde dochází k odtržení větru $\alpha=120^\circ$ (viz obr. 6.4.4). Úhel α je úhel vymežující směr působení větru a bod řešené kruhové výseče. V každé z výsečí je zadáno zatížení o intenzitě, která odpovídá maximální hodnotě v dané výseči. Ve skutečnosti je průběh hodnot zatížení w_e závislý na průběhu hodnot c_{pe} , což z důvodu omezených možností programu vyžaduje použití jiného výpočtového programu. Hodnoty zatížení v určitých výškách a jednotlivých výsečích byly zpracovány pomocí programu MS Excel a následně zadány jako volné zatížení v programu Scia Engineer pomocí tabulkového zadávání zatížení.

$$w_e(z_e, \alpha) = c_{pe}(\alpha) \cdot q_p(z_e)$$

vz. 4.1

6.4.4 Zatížení od zemních tlaků

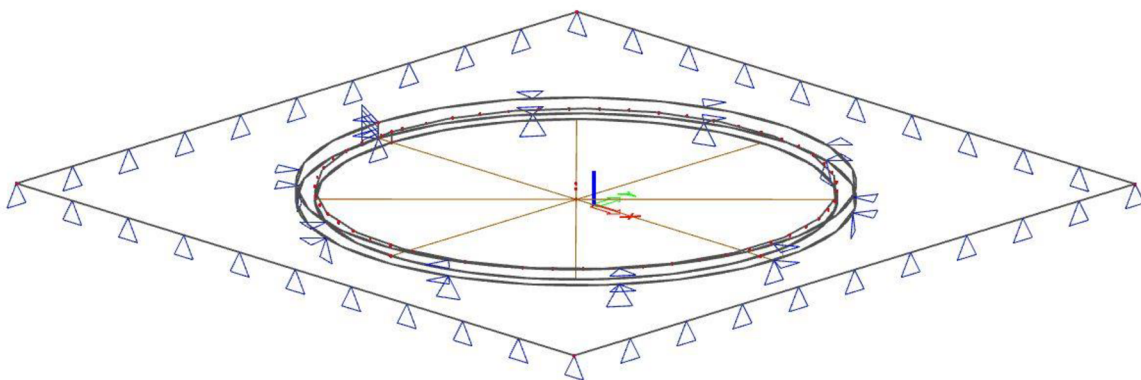
Zemním tlakem nazýváme síly, kterými na sebe navzájem působí zemina a stavební konstrukce (pažící, opěrná, v mém případě obvodová zídka základu apod.). Velikost zemního tlaku závisí na vlastnostech základové půdy neboli na jejich stabilitních parametrech (objemové tíže γ , úhlu vnitřního tření – ϕ a soudržnosti – c). Dále závisí na druhu konstrukce, její tuhosti a uložení v základové půdě, tedy především na velikosti posunu, potočení či jiného přetvoření zatížené části konstrukce. V závislosti na velikosti této deformace může nabýt zemní tlak jakékoliv velikosti mezi dvěma mezními hodnotami, kterými jsou aktivní a pasivní zemní tlak. Všechny tyto mezilehlé hodnoty kromě aktivního, pasivního a klidového zemního tlaku lze stanovit pouze přibližně. [12]

V mém případě se jedná pouze o aktivní zemní tlak vyvozený zeminou na obvodovou zídku. Můžeme jej definovat jako jakoukoliv deformaci pažení (obvodové zídky) směrem do jámy (bazénu), kdy dochází k postupnému klesání velikosti zemního tlaku z výchozí hodnoty na mezní velikost, kterou nazýváme aktivním zemním tlakem. Účinky tohoto tlaku jsem v této práci získal pomocí programu Scia Engineer a jeho modulu Soilin (více viz 7.1).

7 Plošná podpora – podloží pod základovou konstrukcí

Pro zjišťování napětí (kontaktního napětí), které v základové půdě způsobují zatížení vyvolaná stavebními konstrukcemi, se základová půda obvykle nahrazuje pružným poloprostorem. Předpokládá se, že látka vyplňuje poloprostor souvisle, je ideálně pružná, homogenní a izotropní. Platí zde Hookův zákon (lineární závislost mezi napětím a deformací), ze kterého vyplývají malé výsledné deformace. Platí také zákon superpozice, kde lze zjišťovat různé účinky zvlášť a výsledky sčítat. Platnost teorie v reálném prostředí tvořeném základovou půdou je pouze přibližná, k praktickým účelům je však přesnost postačující. [12]

Z těchto důvodů jsem v této práci použil plošnou podporu typu „pružné podloží“ (viz obr. 7.1.1), abych zjistil co nejpřesněji chování konstrukce v reálném prostředí tvořeném základovou půdou a přiblížil se tak co nejlíže skutečným účinkům zatížení na základovou konstrukci. Pro výpočet tuhosti pružného podloží jsem využil již zmiňovaný program Scia Engineer a jeho modul pro výpočet podloží Soilin.

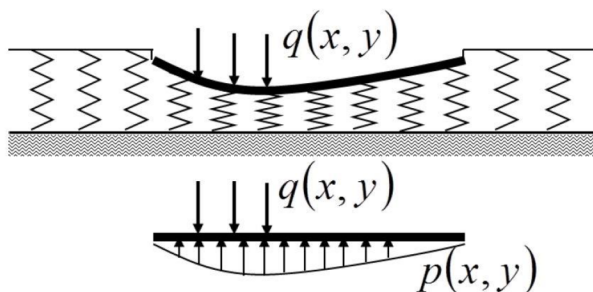


Obr. 7.1.1: Plošné podepření typu pružné podloží

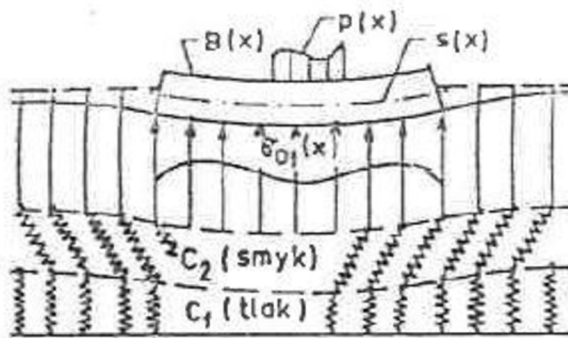
7.1 Soil-In

V dnešní době je nejlepším řešením pro výpočet základu v kontaktu s podložím využití 2D modelu podloží, který přibližně představuje deformační vlastnosti celého masívu pod základem pomocí modelu povrchu. Vlastnosti takového modelu jsou vyjádřeny interakčními parametry označovanými jako parametry C . Ty jsou určovány přímo na konstrukčních prvcích, které jsou v kontaktu s podložím a ovlivňují matici tuhosti.

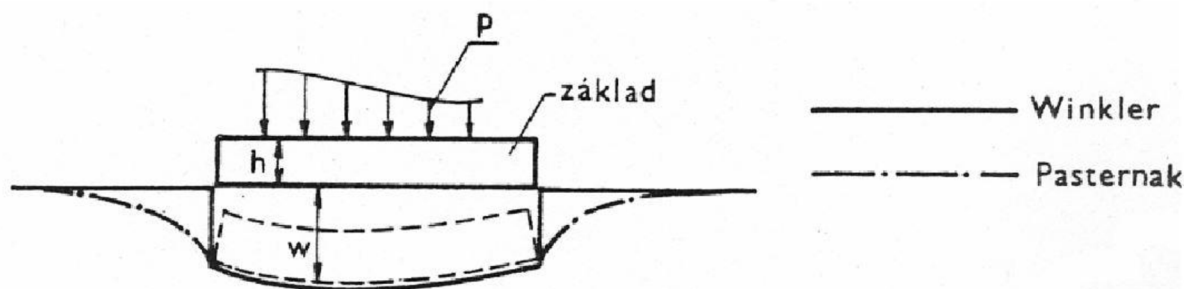
Zjednodušeně si můžeme představit, že parametr C je charakteristika pružného (pseudoelastického) kontaktu konstrukce s podložím nebo také charakteristikou povrchových pružinových konstant, jejichž změna odpovídá skutečnému stavu řešené konstrukce. Můžeme jej tedy nazývat podle odborného slangu, který toto označuje jako „podpora na parametrech C “, která je zevšeobecněním standardní Winklerovy myšlenky o podepření ve formě nekonečně hustého systému svislých elastických pružin působících mezi základovou konstrukcí a podložím. Winklerův pružný podklad je nejjednodušším modelem podloží (viz obr. 7.1.2). Napětí pod základem je přímo úměrné průhybu základu. Konstantou C_1 se vyjadřuje poměr napětí a průhybu. Tento model zanedbává smykové napětí v zemině, proto nejsou možná plastická přetvoření. Jedná se tedy o jednaparametrický model, u kterého se mimo základ pružiny simulující podloží nedeformují, což neodpovídá realitě. Z toho důvodu došlo k modifikaci Winklerova modelu, který je rozšířen o parametr C_2 a zohledňuje roznos smykového napětí v zemině. Jedná se tedy o dvouparametrický model, který nazýváme jako Pasternakův model podloží (viz obr. 7.1.3). Zde je nespojitě zaboření základů, jak udává Winkler, definováno průhybovou kotlinou (viz obr. 7.1.4), kterou způsobuje sedání základu (viz 7.2). [13] [14] [15]



Obr. 7.1.2: Winklerův model podloží [14]



Obr. 7.1.3: Pasternakův model podloží [15]



Obr. 7.1.4: Rozdíl mezi Winklerovým a Pasternakovým modelem (poklesová kotlina) [14]

Výpočtový modul Soilin bere v úvahu všechny zmíněné závislosti. Uvažuje tedy s normálovými i smykovými silami v podloží jako v Pasternakově modelu. Předpokládá také, že konstrukce, která je v kontaktu s podložím je více či méně vodorovná. Technicky řečeno, náklon základové konstrukce nesmí přesáhnout 5-8°, aby bylo možné spustit výpočet. Parametry C_{1x} a C_{1y} jsou vždy definovány uživatelem a zbývající parametry C_{1z} , C_{2x} a C_{2y} jsou vypočteny pomocí modulu soilin. Obvykle se uvažuje C_{2x} rovno C_{2y} a C_{1x} rovno C_{1y} , protože se tyto hodnoty počítají tzv. izotropní variantou výpočtu C_2 . [13]

➤ Výsledné parametry:

- C_{1z} - Odpor prostředí proti wP (mm) [C_{1z} in MN/m³]
- C_{2x} - Odpor prostředí proti wP/xP (mm/m) [C_{2x} in MN/m]
- C_{2y} - Odpor prostředí proti wP/yP (mm/m) [C_{2y} in MN/m]
- C_{1x} - Odpor prostředí proti uP (mm) [C_{1x} in MN/m³]
- C_{1y} - Odpor prostředí proti vP (mm) [C_{1y} in MN/m³]

7.1.1 Typy podloží a profily vrtů

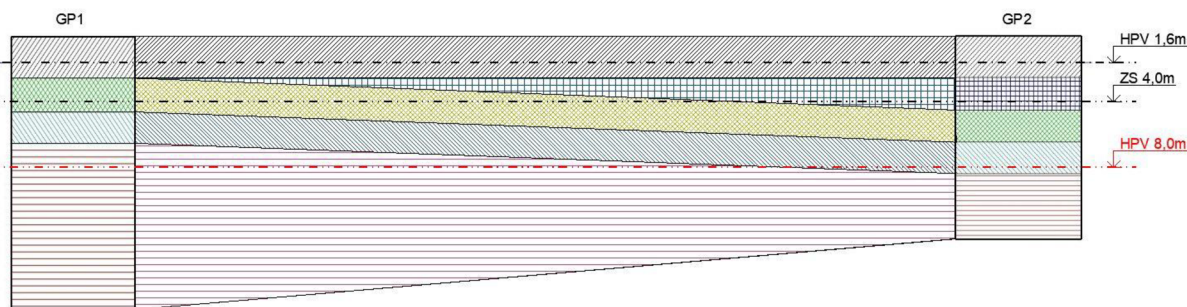
Jelikož jsem v tomto projektu modeloval 3D model, použil jsem také 3D model podloží. Ten se liší od 2D modelu pouze přidáním 3. dimenze v podobě profilu vrtu. Ke každému vrtu je přiřazen geologický profil, který udává pozici a složení podloží. V mém případě se jedná o dva typy podloží určené k porovnání chování konstrukce v závislosti na druhu podloží a k ověření vhodné volby založení v různých základových poměrech. Součástí jsou dále čtyři profily vrtů a dvě rozdílné hloubky hladiny podzemní vody měnící kvalitu podloží (více viz 7.1.4).

7.1.1.1 Typ 1

U prvního typu se jedná o středně únosné až únosné podloží složené převážně ze štěrku a písku. Specifikují ho dva geologické profily vrtů (GP1 a GP2) o proměnné tloušťce jednotlivých vrstev, které jsou vidět na obr. 7.1.5. vyznačené žlutou barvou. Skladba těchto geologických vrtů byla převzata z geologické mapy podle reálných vývrtů. Každý z vrtů jsem umístil na jednu stranu základové konstrukce podle osy symetrie. Podloží mezi vrtů je automaticky interpolováno podle tlouštěk jednotlivých vrstev zadaných geologických profilů (viz obr. 7.1.6).

Profil	Jednotlivé vrstvy	Tloušťka	E_{def}	Poisson	Objemová tíha suché zeminy	Objemová tíha mokré zeminy	Opravný součinitele
GP1:	Násyp štěrk G1	2,5	30	0,35	21	23	0,1
	Štěrk hlinitý G5	0,01	45	0,3	19,5	21,5	0,3
	Štěrk G3 stř. ulehlý	2	80	0,25	19	19	0,3
	Písek S3 stř. ulehlý	1,9	20	0,3	17,5	19	0,3
	Písek S3 hlinitý zvodnělý	10	22	0,3	17,5	19	0,3
GP2:	Násyp štěrk G1	2,5	30	0,35	21	23	0,1
	Štěrk hlinitý G5	2	45	0,3	19,5	21,5	0,3
	Štěrk G3 stř. ulehlý	2	80	0,25	19	19	0,3
	Písek S3 stř. ulehlý	1,9	20	0,3	17,5	19	0,3
	Písek S3 hlinitý zvodnělý	4	22	0,3	17,5	19	0,3

Obr. 7.1.5: Typ podloží 1 – skladby jednotlivých geologických profilů



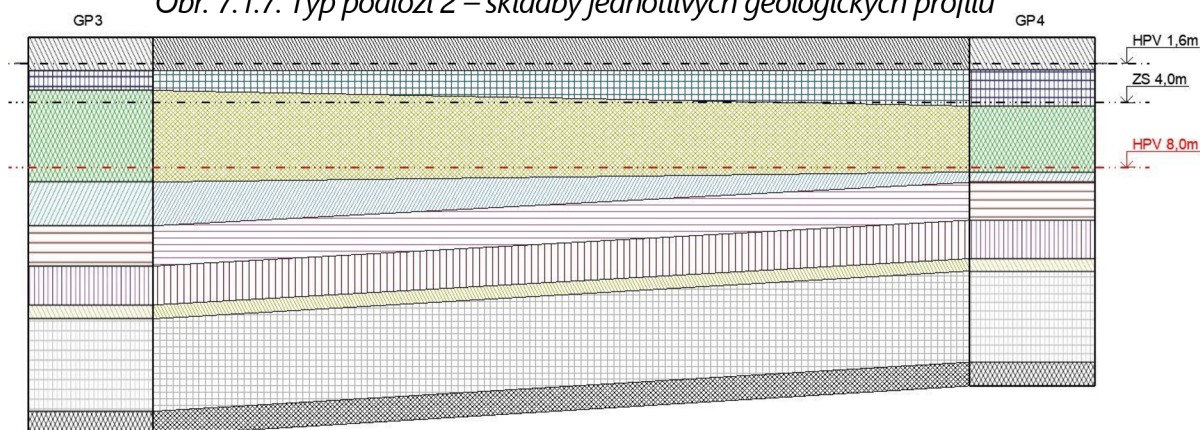
Obr. 7.1.6: Interpolace podloží mezi vrty GP1 a GP2

7.1.1.2 Typ 2

U druhého typu se jedná o málo únosné až neúnosné podloží složené převážně z jílu a písků. Specifikují ho dva geologické profily vrtů (GP3 a GP4) o proměnné tloušťce jednotlivých vrstev, které jsou vidět na obr. 7.1.7. vyznačené žlutou, zelenou a modrou barvou. Skladba těchto geologických vrtů byla převzata z geologické mapy podle reálných vývrtů v okolí Brna. Profily vrtů jsem umístil na stejné místo v ose symetrie jako u prvního typu podloží. Podloží mezi vrty je automaticky interpolováno podle tloušťek jednotlivých vrstev zadaných geologických profilů (viz obr. 7.1.8).

Profil	Jednotlivé vrstvy	Tloušťka	E_{def}	Poisson	Objemová tíha suché zeminy	Objemová tíha mokré zeminy	Opravný součinitele
GP3:	Navázka - hlína písčité F3	2	12	0,35	18	20,5	0,1
	Sprašová hlína	2,3	2,96	0,37	20,5	23	0,1
	Jíl měkký	4,2	2,15	0,35	20,5	22,5	0,3
	Jíl měkký, písčité	0,6	3	0,33	20,5	23,5	0,1
	Jíl tuhý, písčité	2,5	3,62	0,33	20,5	23	0,2
	Jíl tuhý s úlomky	2,4	8,91	0,37	20,5	22,5	0,2
	Eluvium - Jílovec zvětralý	0,8	20,84	0,35	21	24	0,4
	Eluvium - Jílovec zvětralý	5,7	26,49	0,32	21	23	0,4
	Eluvium - Jílovec zvětralý	1,5	31,69	0,31	21	22	0,3
GP4:	Navázka - hlína písčité F3	2	12	0,35	18	20,5	0,1
	Sprašová hlína	1,2	2,96	0,37	20,5	23	0,1
	Jíl měkký	5,6	2,15	0,35	20,5	22,5	0,3
	Jíl měkký, písčité	2,7	3	0,33	20,5	23,5	0,1
	Jíl tuhý, písčité	2,5	3,62	0,33	20,5	23	0,2
	Jíl tuhý s úlomky	2,4	8,91	0,37	20,5	22,5	0,2
	Eluvium - Jílovec zvětralý	0,8	20,84	0,35	21	24	0,4
	Eluvium - Jílovec zvětralý	5,7	26,49	0,32	21	23	0,4
	Eluvium - Jílovec zvětralý	1,5	31,69	0,31	21	22	0,3

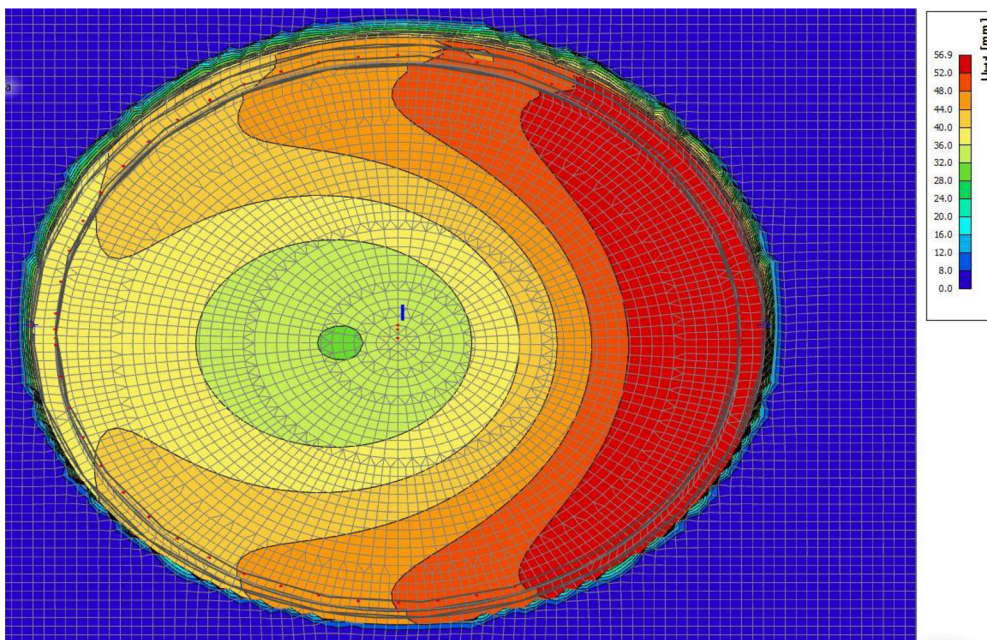
Obr. 7.1.7: Typ podloží 2 – skladby jednotlivých geologických profilů



Obr. 7.1.8: Interpolace podloží mezi vrty GP3 a GP4

7.1.2 Sedání základu

Stejně jako parametry C ovlivňují kontaktní napětí, tak v opačném případě – rozložení kontaktního napětí má vliv na sedání základu, z toho důvodu se pro parametry C používá iterativní řešení. Sedání je počítáno pro každý prvek sítě (v jeho těžišti) a pro každý vkladací bod profilu vrtu. Ve své práci jsem sedání spočítal za pomoci soilinu pro oba typy podloží i obě výšky hladiny podzemní vody. Následně znázornil poklesovou kotlinu (viz obr. 7.1.9), které jsem dosáhl díky namodelování okolního terénu v podobě tenké desky. Tu jsem podepřel plošnou podpěrou typu „pružné podloží“ a nechal spočítat její vnitřní síly přes modul „jednotlivé podloží“ se zadanými parametry tuhostí z knihovny programu Scia Engineer. Pomocí sedání konstrukce jsem posoudil mezní stav použitelnosti pro podloží (MSP) s ohledem na mezní hodnoty sedání a náklon celé věže vycházející z normy (více viz. kapitola 8). Pro toto posouzení jsem uvažoval hodnotu sedání v čase jako dlouhodobé sedání, tudíž jsem pro zjištění účinků od zatížení použil kombinaci č.4, která neobsahuje krátkodobé zatížení od klimatických účinků. [13]



Obr. 7.1.9: Poklesová kotlina od kombinace č.4 v podloží 1. typu s HPV v 1,6 m

7.1.3 Hloubka hladiny podzemní vody

Podzemní voda se nepříznivě uplatňuje při návrhu objektů a znesnadňuje postup jejich zakládání. Má vliv na určení výpočtové únosnosti základové konstrukce. Ovlivňuje především objemovou tíhu základové půdy (dle Archimedova zákona) a zejména v případě soudržných zemin může mít vliv na velikost smykové pevnosti. Objemová tíha propustných (nesoudržných) zemin pod vodou je dána vztahem:

$$\gamma_{su} = (1 - n) \cdot (\gamma_s - \gamma_w)$$

Objemová tíha málo propustných zemin nasycených vodou (soudržných) je dána:

$$\gamma_{sat} = (1 - n) \cdot \gamma_s + S_r \cdot n \cdot \gamma_w$$

S ovlivněním smykových parametrů základové půdy podzemní vodou se obvykle nepočítá, neboť k tomu většinou nejsou potřebné podklady. Pokud je podzemní voda nad úrovní základové spáry, vzniká menší kontaktní napětí a roste hodnota sedání konstrukce. Nachází-li se však podzemní voda v úrovni základové spáry nebo hlouběji pod ní, vzrůstá kontaktní napětí a naopak klesá hodnota sedání. V této práci jsem pro porovnání těchto rozdílů napětí a sedání při změně hloubky HPV zvolil dvě mezní hodnoty. Jednu v hloubce 1,6 m, což odpovídá hloubce HPV nad základovou spárou, která se nachází ve 2 m pod terénem. Druhou hodnotu v hloubce 8 m pod terénem, což odpovídá hloubce HPV 6 m pod základovou spárou (viz obr. 7.1.7 a 7.1.8). Tyto hodnoty jsou stanoveny konkrétně pro moji práci s ohledem na geometrii a členitost podloží, jelikož z výchozích skladeb geologických profilů nebyla známá hloubka HPV.

8 Posouzení mezních stavů

Pro konstrukce chladicích věží je stanovena pro mezní stavy návrhová doba životnosti 100 let, z čehož vyplývá použitá konstrukční třída S5. Třída prostředí pro návrh krytí je určena jako XD2 pro horní výztuž a XA2 pro spodní výztuž (viz příloha P.1 – statický posudek).

Při posuzování základových konstrukcí chladicích věží je nutno posoudit tyto mezní stavy:

1) Mezní stav únosnosti (MSÚ)

Na MSÚ posuzujeme v trvalých a dočasných návrhových situacích za použití kombinací stálých, ostatních stálých a nahodilých zatížení podle kombinačních pravidel Eurokódů pro návrh železobetonových konstrukcí (viz kapitola 6.3). Na MSÚ posuzujeme také zeminu pro tři geotechnické kategorie (GK). V této práci jsem posuzoval pouze železobetonovou konstrukci na maximální návrhové (dimenzační) vnitřní síly vyvozuující napětí na spodní i horní vlákna desky. Maximální účinky jsou vyvozeny kombinací zatížení č.2 na modelu s podložím typu 1 a hladinou podzemní vody v 8 m pod terénem. Samotné posouzení MSÚ (viz příloha P.1 – statický posudek)

$$V_{Rd} \geq V_{Ed}$$

$$N_{Rd} \geq N_{Ed}$$

$$M_{Rd} \geq M_{Ed}$$

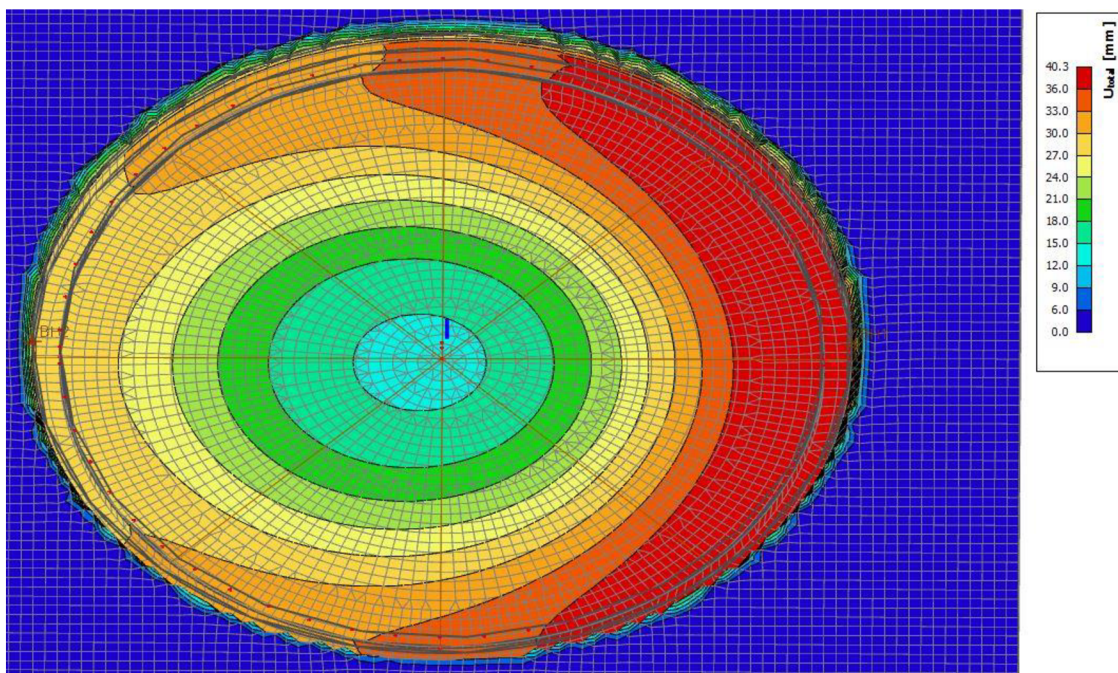
2) Mezní stav použitelnosti (MSP)

MSP slouží pro ověření omezení šířky trhliny v základové konstrukci na $w_{max} = 0,3$ mm od charakteristické kombinace zatížení podle kombinačních pravidel Eurokódů pro návrh železobetonových konstrukcí. Na MSP posuzujeme také zeminu pro tři geotechnické kategorie (GK), z nichž pro 1.GK mezní stav použitelnosti neposuzujeme. Z důvodu rozsahu této práce jsem neposuzoval MSP pro železobetonovou konstrukci za předpokladu použití sekundární ochrany konstrukce (bazénu) proti nepříznivým účinkům vodního prostředí a proti vniknutí vody do konstrukce. MSP jsem posuzoval pouze z pohledu zeminu pro 2.GK z důvodu ověření vhodné volby základové konstrukce pro daný typ podloží a s tím souvisejících limitních hodnot deformací. Obsahem 2.GK je posouzení na limitní hodnotu rovnoměrného a nerovnoměrného sedání (naklonění) (viz kapitola 7.1.3).

Dle normy ČSN 73 1001 lze chladicí věže zařadit mezi železobetonové konstrukce staticky neurčité s mezní hodnotou celkového rovnoměrného sednutí $S_{m,lim} = 60$ mm. Hodnota nerovnoměrného sednutí vyplývající též z ČSN 73 1001 a je stanovena pro náklon tuhé konstrukce jako celku na hodnotu $\Delta s/b = 0,002$. Pro posouzení uvažují maximální deformace u obou typů podloží s ohledem na hloubku hladiny podzemní vody. Deformace konstrukce uložené na podloží typu 1 nepřesahují limitní hodnoty ani za předpokladu základové spáry pod hladinou podzemní vody (HPV v 1,6 m) (viz příloha P.1 – statický posudek, obr. 8.1). Konstrukce uložená na druhém typu podloží však vykazuje několikanásobně větší deformace, než jsou limitní hodnoty sedání či naklonění (viz příloha P.1 – statický posudek, obr. 7.1.9). Je tedy třeba pro tento typ podloží (jíly) zvolit případnou úpravu podloží v podobě zlepšení, zhutnění či výměny nenosných vrstev za únosnější. Dalším řešením je změna typu základové konstrukce z plošného založení na kombinované či hlubinné založení. [10]

$$S \leq S_{m,lim}$$

$$\Delta s/b \leq (\Delta s/b)_{lim}$$



Obr. 8.1: Poklesová kotlina od kombinace č.4 v podloží 1. typu s HPV v 8 m

9 Závěr

V této bakalářské práci je hlavní důraz kladen na posouzení základové konstrukce chladicí věže, kterou jsem v rámci své práce vymodeloval a spočítal v programu Scia Engineer s pomocí modulu pro zakládání staveb Soil-In. Pro založení věže jsem zvolil dva typy nerovnoměrného podloží, které jsem následně posoudil na MSP z pohledu geotechniky. Ukázalo se, že jílovitá podloží nejsou vhodná pro zakládání chladicích věží na plošných základech z důvodu velkých hodnot sedání celé konstrukce. Zvolil jsem tedy pro podepření modelu a následný výpočet vnitřních sil první typ podloží, které je šterko-pískového charakteru a vykazuje hodnoty sedání menší než limitní. Takto podepřený model jsem následně zatížil několika druhy zatížení, z nichž nejkomplicovanějším zatížením bylo zatížení klimatické, a to konkrétně od větru. Všechna zatížení jsem zkombinoval a s těmito kombinacemi vypočítal návrhové vnitřní síly, na které jsem poté dimenzoval základovou desku, železobetonový prstenec a obvodovou zídku. Posouzení konstrukce na MSÚ jsem provedl podle zásad vycházejících z ČSN EN 1992-1-1: Navrhování betonových konstrukcí.

Tato práce byla zaměřena primárně na volbu a řešení plošné základové konstrukce chladicí věže, což je významnou, ale poměrně malou částí konstrukčního systému takto rozmanité konstrukce. Práce by měla posloužit jako přiměřený podklad pro další případnou práci zabývající se navazujícím či stejným tématem.

10 Seznam použitých zdrojů

10.1 Použitá literatura

1. MIKYŠKA, Ladislav a Jaroslav ŠEBEK. *1. Chladicí věže: provoz a údržba*. Knižnice technických aktualit: Praha: SNTL-Nakladatelství technické literatury, 1989.
2. Bc. Tomáš Ehrlich, *Diplomová práce – Zatížení větrem na chladicí věž*, Brno: Vysoké učení technické v Brně, 2015.
3. JUHÁSOVÁ, Emília a Ján HÁJEK. *1. Namáhania betónových komínov a chladiacich veží pri dynamických účinkoch*. Bratislava: Věda, 1990. ISBN 80-224-0017-3.
4. ŠAPOŠNIKOV, Vsevolod Vladimirovič, POSSELT, Ivo a POMAŽL, František. *1. Atmosférické chladiče a chladicí věže*. Praha: Státní nakladatelství technické literatury, 1977.
5. Bc. Ilona Machovská, *Diplomová práce – Modelování proudění vlhkého vzduchu v oblasti deště mokré chladicí věže*, Praha: České vysoké učení technické v Praze, 2015.
6. Types of Towers. HVAC Troubleshooting. 2011 (citováno 20.4.2019).
[online na: <http://www.hvacspecialists.info/condensers/types-of-towers.html>]
7. HESHLEY, John C., *Cooling Tower Fundamentals*. United States of America: SPX Cooling Technologies, 2009.
8. Hybridní chladicí věže, Fans complete technology. (citováno 1.5.2019).
[online na: <https://www.fansct.com/cz/>]
9. Pavla Reichová, *Bakalářská práce – Varianty řešení rekonstrukce rozvodových žlabů chladicí věže Unipetrol Litvínov*, Praha: České vysoké učení technické v Praze, 2017.
10. *Konstrukce chladících věží, podklady od vedoucího práce*.
11. Ondřej Karel, *Bakalářská práce – Železobetonová konstrukce chladicí věže*, Brno: Vysoké učení technické v Brně, 2014.
12. MASOPUST, Jan a Věra Glisníková, *Zakládání staveb: Modul M01*. Brno: Vysoké učení technické v Brně, 2006.
13. Scia Engineer, *Manuál Soil-In (výpočet parametrů C)*, Brno, 2019
14. MACHÁČEK, Michael, *Interakce základových pasů se základovou půdou*, Ostrava: Technická univerzita Ostrava, 2011.
15. BRADÁČ, Jiří, *Základové konstrukce*, Brno: Vysoké učení technické v Brně.

10.2 Normy

- I. ČSN EN 1990: Zásady navrhování konstrukcí
- II. ČSN EN 1991-1 až 4: Zatížení stavebních konstrukcí
- III. ČSN EN 1992-1-1: Navrhování betonových konstrukcí

10.3 Ostatní zdroje

- a. Virtuální prohlídky, ČEZ. (citováno 10.5. 2019).
[online na: <http://virtualniprohlidky.cez.cz/cez-dukovany/>]
- b. Chladicí věž, Wikiwand. (citováno 10.5. 2019)
[online na: <http://www.wikiwand.com>]
- c. Google obrázky. (citováno 10.5. 2019)
[online na: <https://www.google.cz/imghp?hl=cs>]
- d. Nuclear power, Encyclopedia Britannica. (citováno 12.5. 2019)
[online na: <https://www.britannica.com/technology/nuclear-power>]
- e. Průmyslové chlazení, FANS COMPLETE TECHNOLOGY. (citováno 15.5. 2019)
[online na: <https://www.fansct.com/cz/prumyslove-chlazení/>]
- f. Natural draft, Cooling tower products. (citováno 15.5. 2019)
[online na: <https://www.coolingtowerproducts.com/blog/how-cooling-towers-work-diagram-pictures-2015.htm>]
- g. Marley Round Forced Draft, SPX. (citováno 15.5. 2019)
[online na: <https://spxcooling.com/products/round-forced-draft>]
- h. HARTE, Reinhard a Klaus KAEMMER. *International conference on Industrial chimneys & cooling towers: ICCT 2014 (Prague - Czech republic)*. Německo: Bergische Universität Wuppertal, 2014. ISBN 978-3-925795-97-8.

11 Seznam použitých zkratek a symbolů

B	šířka základu
C	odpor prostředí
c	soudržnost
C_{dir}	součinitel směru větru
c_{pe}	součinitel vnějšího tlaku větru
c_{pi}	součinitel vnitřního tlaku větru
C_{prob}	součinitel pravděpodobnosti
C_r	součinitel drsnosti terénu
C_{season}	součinitel ročního období
C30/37	třída pevnosti betonu
G	vlastní tíha konstrukce
GK	geotechnická kategorie
GP	geologický profil
M_{Ed}	návrhový moment působící na konstrukce
M_{Rd}	návrhový moment odporu konstrukce
n	pórovitost zeminy
N_{Ed}	návrhová normálová síla působící na konstrukci
N_{Rd}	návrhová normálová síla odporu konstrukce
$q_p(z_e)$	maximální dynamický tlak
S	sedání
$S_{m,lim}$	limitní sedání
S_r	stupeň nasycení (pro plně saturovanou zeminu $S_r = 1,0$)
S5	konstrukční třída
Δs	rozdíl sedání
T	vliv oslunění + zatížení teplotou (léto, zima)
v_b	základní rychlost větru
v_{b0}	výchozí hodnota základní rychlosti větru
V_{Ed}	návrhová posouvající síla působící na konstrukci
V_{Rd}	návrhová posouvající síla odporu konstrukce
w_e	vnější tlak větru
W_i	sání na vnitřní povrch věže dané komínovým efektem
XD2, XA1	třída prostředí
Z_{min}	minimální výška
α	úhel natočení směru větru
γ	objemová tíha
γ_s	měrná tíha zrn zeminy (průměrně 27 kN.m^{-3})
γ_{su}	objemová tíha propustných zemin
γ_{sat}	objemová tíha málo propustných zemin
γ_w	objemová tíha vody (10 kN.m^{-3})
ϕ	úhel vnitřního tření

12 Seznam příloh

P.1 – Statický posudek

- Návrh konstrukce
- Zatížení
- Výpočet
- Kontrola modelu pomocí vlastní tíhy
- Vnitřní síly v základové konstrukci
- Návrh výztuže
- Posouzení konstrukce

P.2 – Výkresová dokumentace

- 01 – Výkres dolní výztuž úsek A + výkaz výztuže
- 02 – Výkres horní výztuže úsek A + výkaz výztuže
- 03 – Výkres dolní výztuže úsek B (1, 3, 5, ..., 15) + výkaz výztuže
- 04 - Výkres horní výztuže úsek B (1, 3, 5, ..., 15) + výkaz výztuže
- 05 - Výkres dolní výztuže úsek B (2, 4, 6, ... 14) + výkaz výztuže
- 06 - Výkres horní výztuže úsek B (2, 4, 6, ... 14) + výkaz výztuže
- 07 – Výkres distanční výztuže + výkaz výztuže