

ČESKÉ VYSOKÉ UČENÍ TECHNICKÉ V PRAZE

Fakulta stavební

Katedra betonových a zděných konstrukcí



DIPLOMOVÁ PRÁCE

Hodnocení železobetonových konstrukcí z hlediska
trvanlivosti a udržitelného rozvoje

Assessment of Reinforced Concrete Structures in Terms
of Durability and Sustainable Development

Vyhotovila: Anna Horáková

Vedoucí diplomové práce: doc. Ing. Jitka Vašková, CSc.

2017



ČESKÉ VYSOKÉ UČENÍ TECHNICKÉ V PRAZE



Fakulta stavební
Thákurova 7, 166 29 Praha 6

ZADÁNÍ DIPLOMOVÉ PRÁCE

I. OSOBNÍ A STUDIJNÍ ÚDAJE

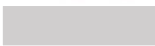
Příjmení: <u>Horáková</u>	Jméno: <u>Anna</u>	Osobní číslo: <u>396508</u>
Zadávající katedra: <u>133</u>		
Studijní program: <u>Stavební inženýrství</u>		
Studijní obor: <u>Konstrukce pozemních staveb</u>		

II. ÚDAJE K DIPLOMOVÉ PRÁCI

Název diplomové práce:	<u>Hodnocení železobetonových konstrukcí z hlediska trvanlivosti a udržitelného rozvoje</u>	
Název diplomové práce anglicky:	<u>Assessment of Reinforced Concrete Structures in Terms of Durability and Sustainable Development</u>	
Pokyny pro vypracování: Zpracujte:	<ul style="list-style-type: none">- Souhrn poznatků z literatury- Varianty návrhu železobetonové konstrukce se zhodnocením z hlediska trvanlivosti a udržitelného rozvoje	
Seznam doporučené literatury:		
Jméno vedoucího diplomové práce:	<u>Doc. Ing. Jitka Vašková, CSc.</u>	
Datum zadání diplomové práce:	<u>11. 10. 2016</u>	Termín odevzdání diplomové práce: <u>8. 1. 2017</u> <small>Údaj uveďte v souladu s datem v časovém plánu příslušného ak. roku</small>
		
	Podpis vedoucího práce	Podpis vedoucího katedry

III. PŘEVZETÍ ZADÁNÍ

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

<u>11. 10. 2016</u>	
Datum převzetí zadání	Podpis studenta(ky)

SPECIFIKACE ZADÁNÍ


Jméno diplomanta: Anna Horáková

Název diplomové práce: Hodnocení železobetonových konstrukcí z hlediska trvanlivosti a udržitelného rozvoje

Základní část: statická - Betonové konstrukce podíl: 100 %

Formulace úkolů: Shrnutí poznatků z literatury se zaměřením na: hodnocení vlivů stavební činnosti na životní prostředí, korozní vlivy na ŽB konstrukce, železobetonových konstrukcí užitím matematických modelů.

Variantní návrh ŽB konstrukce, hodnocení výše uvedených jevů, porovnání modelů, vyhodnocení variant.

Podpis vedoucího DP: 

Datum: 2. 11. 2016

Případné další části diplomové práce (části a jejich podíl určí vedoucí DP):

2. Část: _____ podíl: _____ %

Konzultant (jméno, katedra): _____

Formulace úkolů: _____

Podpis konzultanta:

Datum:

3. Část: _____ podíl: _____ %

Konzultant (jméno, katedra): _____

Formulace úkolů: _____

Podpis konzultanta:

Datum:

4. Část: _____ podíl: _____ %

Konzultant (jméno, katedra): _____

Formulace úkolů: _____

Podpis konzultanta:

Datum:

Poznámka: Zadání včetně vyplněných specifikací je nedílnou součástí diplomové práce a musí být přiloženo k odevzdané práci (vyplněné specifikace není nutné odevzdat na studijní oddělení spolu s 1.stranou zadání již ve 2.týdnu semestru)

Prohlášení

Prohlašuji, že jsem diplomovou práci vypracovala samostatně, pouze za odborného vedení vedoucí diplomové práce doc. Ing. Jitky Vaškové, CSc. Dále prohlašuji, že veškeré podklady, ze kterých jsem čerpala, jsou uvedeny v seznamu použité literatury.

V Praze dne 5. 1. 2017

..... Anna Horáková

Poděkování

Chtěla bych poděkovat vedoucí diplomové práce paní doc. Ing. Jitce Vaškové, CSc. za odborné vedení této práce, cenné připomínky a rady a za zapůjčení odborné literatury pro zpracování diplomové práce. Dále bych chtěla poděkovat své rodině a přátelům za podporu po celou dobu studia.

Anotace

Diplomová práce je věnována hodnocení železobetonových konstrukcí z hlediska udržitelného rozvoje a trvanlivosti. Je zde zpracován souhrn poznatků z literatury ohledně vlivů stavební činnosti na životní prostředí a ohledně metod hodnocení těchto vlivů. Dále práce obsahuje kapitoly věnující se korozním vlivům působícím na železobetonové konstrukce, faktorům ovlivňujícím trvanlivost těchto konstrukcí a matematickým modelům popisujícím jednotlivé korozní vlivy. Významná část práce je věnována variantnímu návrhu železobetonové konstrukce a posouzení jednotlivých variant z hlediska trvanlivosti a udržitelného rozvoje. Řešenou konstrukcí je stropní konstrukce hromadné garáže pro osobní automobily, konstrukce je tedy kromě karbonatace vystavena také působení chloridů. Variantní návrhy se liší třídou použitého betonu a tloušťkou stropní desky. Bylo zjištěno, že z hlediska trvanlivosti i udržitelného rozvoje je výrazně výhodnější použití vyšší třídy betonu. V rámci hodnocení z hlediska udržitelného rozvoje je nejvýhodnější varianta, ve které byly lepší mechanické vlastnosti vysokopevnostního betonu využity pro snížení tloušťky desky. Varianta, kde byly tyto výhody využity ke snížení množství výztuže, byla z hlediska udržitelného rozvoje hodnocena jako méně výhodná. V rámci hodnocení trvanlivosti konstrukce byly zjištěny výrazné rozdíly ve výsledcích v závislosti na použití různých matematických modelů korozních vlivů.

Klíčová slova

Beton, navrhování konstrukcí, železobetonové konstrukce, udržitelný rozvoj, dopady na životní prostředí, trvanlivost, koroze.

Annotation

This work is about assessment of reinforced concrete structures in terms of durability and sustainable development. You can find here a summary of findings from the literature about the environmental impacts of building activity and about evaluation methods for these impacts. The work includes chapters about corrosive influences acting on the reinforced concrete structure, about factors influencing the durability of these structures and mathematical models describing the corrosion impacts. Much of the work is devoted to the variant design of reinforced concrete structure and assessment of these variants in terms of durability and sustainability. The solved construction is a concrete ceiling structure of garage for cars, so the construction is except carbonation also exposed to the chloride attack. The variants are different in strength class of concrete and thickness of concrete slab. It was found that in terms of durability and sustainable development is significantly preferable to use higher class of concrete. In terms of sustainable development is the best the variant, in which the mechanical properties of high strength concrete are used to reduce the thickness of the slab. The variant, in which these benefits are used to reduce the amount of steel, was found as less preferable. Within the assessment the structures in terms of durability were detected significant differences in results according to use different mathematical models of corrosive influences.

Keywords

Concrete, structure design, reinforced concrete structures, sustainable development, environmental impacts, durability, corrosion.

Obsah

1. Úvod.....	8
2. Environmentální dopady výstavby	9
2.1. Úbytek surovin a využívání krajiny	9
2.2. Globální oteplování a klimatické změny	10
2.3. Acidifikace	11
2.4. Eutrofizace.....	12
2.5. Úbytek stratosférického ozonu.....	13
2.6. Vznik fotooxidantů	14
3. Metoda hodnocení staveb z hlediska udržitelného rozvoje	15
3.1. Environmentální značení a normy týkající se problematiky	15
3.2. Základní principy LCA.....	16
3.3. Postup při vypracovávání studie	18
3.4. Pravidla produktové kategorie PCR	25
4. Korozní vlivy působící na železobetonové konstrukce.....	28
4.1. Fyzikální koroze betonu	28
4.2. Chemická koroze cementového tmele	29
4.3. Koroze kameniva	32
4.4. Koroze výztuže	33
4.5. Biokoroze betonu.....	35
5. Faktory ovlivňující trvanlivost železobetonových konstrukcí	36
5.1. Struktura materiálu	36
5.2. Chemické složení cementu	40
5.3. Vlastnosti kameniva.....	41
5.4. Ochrana výztuže před korozí	42
5.5. Vlastnosti konstrukce	44
6. Matematické modelování životnosti železobetonových konstrukcí.....	44
6.1. Modely karbonatace	45
6.2. Modely působení chloridů	47
6.3. Modely koroze ocelové výztuže	48
7. Variantní návrh konstrukce se zhodnocením z hlediska trvanlivosti a udržitelného rozvoje ..	52
7.1. Popis konstrukce	52
7.2. Statický návrh jednotlivých variant	54
7.3. Vyhodnocení variant z hlediska udržitelného rozvoje	69
7.4. Vyhodnocení variant z hlediska trvanlivosti.....	78
7.5. Vyhodnocení upravených návrhů z hlediska udržitelného rozvoje	85
8. Závěr.....	91
9. Literatura.....	92

Seznam obrázků

Obrázek 2.1: Schéma popisující skleníkový jev	10
Obrázek 3.1: Příklady ekoznaček.....	16
Obrázek 3.2: Příklad vstupů a výstupů procesu (zde výroba železa)	17
Obrázek 3.3: Příklad inventarizační tabulky	20
Obrázek 3.4: Příklad charakterizačního profilu.....	20
Obrázek 4.1: Poškození betonového povrchu působením mrazu.....	29
Obrázek 4.2: Krystaly ettringitu.....	32
Obrázek 4.3: Ettringit ve struktuře betonu	31
Obrázek 4.4: Koroze ocelové výztuže	33
Obrázek 4.5: Pourbaixův diagram.....	34
Obrázek 5.1: Schéma struktury cementového tmele	36
Obrázek 5.2: Schéma účinku provzdušnění betonu	38
Obrázek 5.3: Detail struktury provzdušněného betonu.....	37
Obrázek 5.4: Závislost permeability na stupni hydratace	38
Obrázek 5.5: Závislost permeability na vodním součiniteli.	38
Obrázek 5.6: Zařízení pro zkoušku otěruvzdornosti kameniva.....	42
Obrázek 5.7: Vztah mezi pórovitostí kameniva a množstvím potrháných zrn	41
Obrázek 5.8: Detail mikrostruktury zinkového povlaku	42
Obrázek 5.9: Schéma vyhlazení žebírek výztuže epoxidovým povlakem	43
Obrázek 5.10: Schéma principu katodové ochrany ocelové výztuže	44
Obrázek 7.1: Schéma řešené konstrukce - půdorys.....	52
Obrázek 7.2: Schéma řešené konstrukce – řez A-A.....	53
Obrázek 7.3: Schéma řešené konstrukce – řez B-B.....	53
Obrázek 7.4: Schéma pro výpočet průřezových charakteristik (bez trhlin)	55
Obrázek 7.5: Schéma pro výpočet průřezových charakteristik (s trhlinami).....	58
Obrázek 7.6: Porovnání GWP pro jednotlivé varianty	75
Obrázek 7.7: Porovnání AP pro jednotlivé varianty	75
Obrázek 7.8: Porovnání EP pro jednotlivé varianty	76
Obrázek 7.9: Porovnání ODP pro jednotlivé varianty	76
Obrázek 7.10: Porovnání POCP pro jednotlivé varianty	76
Obrázek 7.11: Porovnání ADP element pro jednotlivé varianty	77
Obrázek 7.12: Porovnání ADP fossil pro jednotlivé varianty.....	77
Obrázek 7.13: Celkové porovnání jednotlivých variant.....	77
Obrázek 7.14: Porovnání různých modelů karbonatace pro variantu 1	78
Obrázek 7.15: Rozložení pH po tloušťce desky]	80
Obrázek 7.16: Schéma pro výpočet pH ($x_c < d$)	80
Obrázek 7.17 Schéma pro výpočet pH ($x_c > d$)	81
Obrázek 7.18: Porovnání iniciačních časů – model dle Boba.....	82
Obrázek 7.19: Porovnání iniciačních časů – model dle Papadakise.....	83
Obrázek 7.20: Porovnání životnosti jednotlivých variant	83
Obrázek 7.21: Porovnání životnosti jednotlivých variant po úpravě návrhů	85
Obrázek 7.22: Porovnání GWP pro jednotlivé varianty	87
Obrázek 7.23: Porovnání AP pro jednotlivé varianty	87
Obrázek 7.24: Porovnání EP pro jednotlivé varianty	88
Obrázek 7.25: Porovnání ODP pro jednotlivé varianty	88
Obrázek 7.26: Porovnání POCP pro jednotlivé varianty.....	88
Obrázek 7.27: Porovnání ADP element pro jednotlivé varianty	89
Obrázek 7.28: Porovnání ADP fossil pro jednotlivé varianty.....	89
Obrázek 7.29: Celkové porovnání jednotlivých variant.....	89

Seznam tabulek

Tabulka 3.1: Příklady endpointových a midpointových indikátorů kategorií dopadů.	21
Tabulka 3.2: Referenční látky pro midpointové indikátory kategorií dopadu	22
Tabulka 6.1: Hodnoty funkce f_{RH}	46
Tabulka 6.2: Hodnoty koeficientů pro model karbonatace dle Boba	47
Tabulka 7.1: Přehled navržených variant	53
Tabulka 7.2: Receptura betonu C35/45.....	69
Tabulka 7.3: Receptura betonu C90/105.....	69
Tabulka 7.4: Objemy betonu a oceli pro jednotlivé varianty.....	69
Tabulka 7.5: Charakterizační faktory sledovaných emisí.....	70
Tabulka 7.6: Příklad výpočtu hodnot kategorií dopadu.....	71
Tabulka 7.7: Příklad výpočtu obsahu prvků v surovině.....	72
Tabulka 7.8: Příklad výpočtu ADP	75
Tabulka 7.9: ADP pro jednotlivé suroviny.....	72
Tabulka 7.10: Příklad výpočtu hodnot kategorií dopadu pro 1m ³ betonu.....	73
Tabulka 7.11: Hodnoty kategorií dopadu pro variantu 1.	73
Tabulka 7.12: Hodnoty kategorií dopadu pro variantu 2A.....	74
Tabulka 7.13: Hodnoty kategorií dopadu pro variantu 2B.....	74
Tabulka 7.14: Zvolené váhy kategorií dopadu.....	75
Tabulka 7.15: Hodnota pH v úrovni výztuže dle polohy karbonatační fronty.....	81
Tabulka 7.16: Shrnutí výpočtových životností	83
Tabulka 7.17: Přehled parametrů původně navržených variant.....	84
Tabulka 7.18: Přehled parametrů upravených variant.....	84
Tabulka 7.19: shrnutí výpočtových životností po úpravě variant.....	84
Tabulka 7.20: Objemy betonu a oceli pro jednotlivé upravené varianty	85
Tabulka 7.21: Hodnoty kategorií dopadu pro variantu 1A.....	85
Tabulka 7.22: Hodnoty kategorií dopadu pro variantu 1B.....	86
Tabulka 7.23: Hodnoty kategorií dopadu pro variantu 2A.....	86
Tabulka 7.24: Hodnoty kategorií dopadu pro variantu 2B.....	87

Seznam použitých zkratk

LCA = Life Cycle Assessment = Hodnocení životního cyklu

EPD = Environmental Product Declaration = Environmentální prohlášení o produktu

PCR = Product Category Rules = Pravidla produktové kategorie

GWP = Global Warming Potential = Potenciál globálního oteplování

AP = Acidification Potential = Acidifikační potenciál

EP = Eutrophication Potential = Eutrofizační potenciál

ODP = Ozone Depletion Potential = Potenciál úbytku stratosférického ozonu

POCP = Photochemical Oxidant Creation Potential = Potenciál tvorby přízemního ozonu

ADP = Abiotic Depletion Potential = Potenciál úbytku surovin

PAF = Potentially Affected Fraction = Podíl ovlivněných druhů organismů

PDF = Potentially Disappeared Fraction = Podíl chybějících druhů

DALY = Disability Adjusted Life Years = Počet roků života ovlivněných nezpůsobností

1. Úvod

V posledních letech je často diskutována otázka udržitelné výstavby a dopadů stavební činnosti na životní prostředí. Tyto dopady jsou ve srovnání s ostatními odvětvími poměrně významné, především z hlediska spotřeby surovinových zdrojů a z hlediska produkce skleníkových plynů. Je žádoucí vlivy co nejvíce omezit vhodným návrhem i volbou materiálu. S otázkou dopadů na životní prostředí úzce souvisí problematika životnosti staveb. Stavby s velkou trvanlivostí vyžadují v průběhu své existence méně oprav. V případě trvanlivějších staveb také uplyne delší doba, než dospějí do stádia, kdy už je nutná jejich demolice a výstavba nového objektu. Environmentální dopady související s výstavbou jsou potom vykompenzovány delším provozem stavby bez nutných oprav.

Cílem této práce je porovnat varianty návrhu konstrukce z hlediska udržitelného rozvoje a trvanlivosti. Hodnocení z hlediska udržitelného rozvoje je provedeno na základě analýzy životního cyklu dle příslušných norem. Hodnoceny jsou základní dopady na životní prostředí, jako je například úbytek surovin, globální oteplování a změna klimatu, okyselování prostředí či tvorba fotooxidantů.

Způsob hodnocení staveb z hlediska životnosti zatím není normativně stanoven, hodnocení tedy bylo provedeno na základě zvolených matematických modelů popisujících průběh degradačních jevů v čase. Na tomto místě je třeba zmínit, že stanovení životnosti konstrukce je vždy zatíženo velkým množstvím nejistot, především z hlediska podmínek okolního prostředí a jejich změn v čase, ale i z hlediska některých materiálových parametrů. Pro některé degradační jevy existuje velké množství různých matematických modelů, pro jiné jevy a hodnoty zatím přesné matematické vztahy neexistují a je možné je pouze odhadovat.

Z výše uvedených skutečností plyne, že posuzování konstrukcí z těchto hledisek je často náročné a nejisté, přesto však je třeba k němu při návrhu přihlížet, protože environmentální aspekty výstavby a s nimi související trvanlivost staveb je čím dál významnějším problémem současného stavitelství.

2. Environmentální dopady výstavby

Jako většina činností lidské společnosti, má i stavebnictví vliv na životní prostředí. Mnoho pramenů uvádí, že vliv tohoto odvětví patří v porovnání s ostatními spíše k těm významnějším. Například na spotřebě surovinových zdrojů se podílí cca z 40 %, na tvorbě skleníkových plynů potom cca z 30 % [27]. V této kapitole jsou shrnuty nejvýznamnější dopady výstavby na životní prostředí, které jsou uvažovány v rámci hodnocení staveb z hlediska udržitelné výstavby. Následující text (kapitola 2) byl zpracován převážně s využitím publikací [26], [28], [35] a [46] - [49].

2.1. Úbytek surovin a využívání krajiny

Jedním ze základních dopadů lidské činnosti na životní prostředí je **spotřeba obnovitelných a neobnovitelných surovin**. Za obnovitelné suroviny jsou považovány ty, které se dostatečně rychle obnovují a jsou mezi ně řazeny zejména voda, zemědělská půda a biomasa. V případě těchto surovin je důležitá rovnováha mezi jejich spotřebou a obnovou. V případě, že obnova nestačí vyrovnávat rychlou spotřebu, dochází k úbytku suroviny a v extrémním případě může dojít k jejímu úplnému vyčerpání, což může vést ke ztrátě obnovitelnosti (například vymření rostlinného či živočišného druhu).

Typickým příkladem je intenzivní kácení lesů, které má za následek zvyšování koncentrace oxidu uhličitého CO₂, který byl původně zpracováván při fotosyntéze. Mezi další důsledky patří zvýšená půdní eroze, narušení vodního režimu krajiny, častější povodně a v neposlední řadě pokles biodiversity, protože mnoho živočišných i rostlinných druhů přijde v důsledku vykácení lesa o své přirozené životní prostředí či zdroj potravy. Dalším příkladem je ochuzení zemědělské půdy o humus v důsledku intenzivního zemědělství. Tato změna ve složení půdy potom vede ke snížení její výnosnosti. K problémům může také vést nadměrné čerpání vody z podzemních zdrojů. V případě, že je voda čerpána příliš rychle vzhledem k přítoku, dochází ke znehodnocení vody z tohoto zdroje v důsledku průniku nečistot z okolního prostředí.

Neobnovitelné suroviny jsou děleny na **fosilní a minerální**. Mezi minerální patří nerosty a horniny, například suroviny pro výrobu cementu nebo kovové rudy. Fosilní suroviny se sice přirozeně obnovují, ale jejich vznik je natolik pomalý, že se fosilní suroviny vzhledem k rychlosti jejich spotřeby řadí mezi suroviny neobnovitelné. Mezi fosilní suroviny patří především ropa, zemní plyn a uhlí.

Negativní důsledky plynou také z **nadměrného či nevhodného využívání krajiny**, když dochází k její přeměně pro zemědělské a průmyslové využití nebo pro zástavbu. Necitlivé zásahy do krajiny výrazně zhoršují její schopnost zadržovat vodu, což může vést k častějším povodním a zároveň k nedostatku vody v životním prostředí. Zástavba také ovlivňuje lokální klima, dochází k větší akumulaci tepla a zároveň je omezeno vypařování vody z vegetace. Tyto změny mohou vést ke snížení biodiversity, protože řada organismů přijde o své přirozené životní prostředí. Problémem mohou být také liniové stavby s nedostatkem nebo nevhodným řešením speciálních přechodů pro divokou zvěř (tzv. ekodukty).

2.2. Globální oteplování a klimatické změny

Pojmem globální oteplování se označuje klimatický vývoj přibližně v posledním století, charakteristický **trvalým vzrůstem průměrné teploty na Zemi**. Dle [48] patří čtrnáct z posledních patnácti let (1995–2009) mezi patnáct nejteplejších let v rámci období, kdy byla povrchová globální teplota měřena přístroji, tedy od roku 1850. Zaznamenaný teplotní rozdíl mezi obdobími 1850 – 1899 a 2001 – 2005 činí v průměru 0,76 °C.

Teplota na Zemi je dána množstvím tepelné energie v atmosféře. Energie na Zemi dopadá ze Slunce ve formě krátkovlnného záření a je vyzařována dlouhovlnným tepelným zářením. Rovnováha těchto dvou energetických toků zajišťuje stabilitu zemského klimatu. Sluneční záření, které na planetu dopadá, je z části odraženo zpět ovzduším, oblaky a zemským povrchem. Větší část tohoto záření je však na Zemi přeměněna na záření tepelné. Teplo je potom povrchem Země vyzařováno zpět do vesmíru, ale vlivem přítomnosti skleníkových plynů v atmosféře opouští planetu jen menší část energie. Většina tepelného záření je plyny absorbována a následně vyzařována zpět k zemskému povrchu. Tento proces je nazýván **skleníkový jev** a jeho příčinou je schopnost skleníkových plynů propouštět záření s kratší vlnovou délkou a pohlcovat záření s větší vlnovou délkou. Skleníkový jev je přirozený a byl jednou z podmínek pro vznik života na Zemi. Zvyšuje totiž průměrnou teplotu zemského povrchu přibližně o 33°C, bez něj by teplota byla jen -18°C. Schéma objasňující princip skleníkového jevu je na obrázku 2.1.



Obrázek 2.1: Schéma popisující skleníkový jev [47]

Mezi **skleníkové plyny** patří oxid uhličitý CO₂, metan CH₄, oxid dusný N₂O, halogenové uhlovodíky, fluorid sírový SF₆, tvrdé (CFC) a měkké freony (HCFC, halony) a řada dalších plynů. Významným skleníkovým plynem je také vodní pára. **Oxid uhličitý CO₂** vzniká při dýchání organismů a také spalováním organické hmoty, například fosilních paliv nebo biomasy. Zpět do organické hmoty se dostává fotosyntézou. Zvýšení produkce CO₂ nebo úbytek fotosyntetizujících organismů tedy způsobí nárůst koncentrace CO₂ v atmosféře. Zdrojem **metanu** je především spalování zemního plynu a biomasy, těžba uhlí, chov zvířectva, pěstování rýže, sládkové a odpadové hospodářství. Více než polovina množství metanu, které je uvolňováno do atmosféry,

vzniká v důsledku lidské činnosti. **Oxid dusný N_2O** se uvolňuje především při zemědělské činnosti denitrifikací dusíku dodávaného do půdy v rámci hnojení, dále při spalování fosilních paliv a biomasy, výrobě nylonu a kyseliny dusičné. **Halogenové uhlovodíky** obsažené v atmosféře jsou výhradně antropogenního původu, vznikají při výrobě rozpouštědel a izolačních pěn a také se používají v chladicích systémech. Fluorované uhlovodíky se dnes používají jako náhrada freonů, které poškozují ozonovou vrstvu Země. V posledních letech byl proto zaznamenán nárůst jejich emisí. Taktéž **fluorid sírový SF_6** je látka, která se v přírodě nevyskytuje a její obsah v atmosféře je výhradně důsledkem lidské činnosti. Tento plyn se používá jako elektrický izolant v transformátorech. Do atmosféry se uvolňuje při poškození zařízení, která ho obsahují. Skleníkovým plynem je také ozon, který však není do atmosféry přímo uvolňován, ale vzniká v atmosféře fotochemickými reakcemi. Sloučeniny, které se těchto reakcí účastní, jsou označovány jako tzv. **nepřímé skleníkové plyny** a jsou jimi například oxid uhelnatý CO, oxidy dusíku NO_x , oxidy síry SO_x a nemetanické těkavé organické látky (NMVOC).

Pokud dojde ke zvýšení množství skleníkových plynů v atmosféře, je v atmosféře zadržováno větší množství tepelné energie a dochází k jejímu zahřívání. Dle [32] dochází od poloviny 18. století ke zvyšování koncentrace skleníkových plynů v atmosféře. Například koncentrace oxidu uhličitého CO_2 se zvýšila z koncentrace 280 ppm na současných 385 ppm, tedy téměř o 30 %.

Důsledky globálního oteplování se předpovídají na základě klimatických modelů. Předpokládá se, že globální změna klimatu způsobí změny směrů hlavních oceánských proudů, což povede k tání ledovců. Tím dojde ke zvýšení hladiny oceánů a zaplavování území, přičemž v mnoha případech půjde o hustě osídlené oblasti. Dalším negativním důsledkem dlouhodobé klimatické změny bude pravděpodobně rozšiřování pouští a v mnohých oblastech také nedostatek pitné vody. Očekávají se také čím dál častější náhlé změny počasí a jeho extrémní projevy. Mimo jiné také zvýšení globální teploty ovlivní řadu ekosystémů a v mnoha oblastech způsobí pokles biodiversity.

2.3. Acidifikace

Pojmem acidifikace se označuje proces **okyselování životního prostředí** v důsledku nárůstu koncentrace vodíkových kationtů. Tento jev je způsoben přítomností kyselinotvorných látek v atmosféře, které reagují s vodou za vzniku kyselin. Mezi acidifikující látky patří například oxid siřičitý SO_2 , oxidy dusíku NO_x , kyseliny (HCl, H_2SO_4), sulfan H_2S a amoniak NH_3 .

Oxid siřičitý SO_2 se do atmosféry dostává převážně při spalování fosilních paliv, hlavním antropogenním zdrojem jsou tedy neodsířené tepelné elektrárny a lokální vytápění domácností. Dalšími zdroji jsou například chemický průmysl nebo výroba oceli. Přirozeně se tento plyn do ovzduší uvolňuje při sopečné činnosti. Zdrojem **oxidů dusíku** je především provoz motorových vozidel, chemický a energetický průmysl. **Sulfan** obsažený v ovzduší je z většiny přírodního původu, přičemž zdrojem je sopečná činnost, sirné prameny a mikrobiální rozklad organické hmoty obsahující síru. Mezi jeho antropogenní zdroje patří těžba zemního plynu, chov dobytka, výroba koksu, celulózy, kožedělný průmysl a čistírny odpadních vod. Na produkci **amoniaku** se podílí největší měrou zemědělství, dále pak vzniká při spalovacích procesech a při provozu motorových vozidel.

Kyselinotvorné látky se z atmosféry dostávají na zemský povrch srážkami (v tomto případě se hovoří o tzv. mokré depozici) nebo sedimentují ve formě plynných částic jako tzv. suchá depozice. Srážková voda je i v případě neznečištěné atmosféry mírně kyselá, což je způsobeno rozpuštěným atmosférickým oxidem uhličitým. O acidifikované srážce se hovoří, pokud její pH poklesne pod 5,6. Kyselé srážky ve velkých průmyslových oblastech mívají pH okolo hodnoty 4,5, lokálně může pH poklesnout i k hodnotě 3. [26]

V zasažených oblastech dochází k okyselování vodního i půdního prostředí. Postupně se snižuje **pufrační kapacita vody**, což je schopnost vody udržovat stálé pH a je dána přítomností hydrogenuhlíčanových iontů. Při zvyšující se koncentraci vodíkových iontů klesá množství hydrogenuhlíčanů, ale pH vody se výrazně nesnižuje. Po vyčerpání puфраční kapacity dochází ke snížení pH a v důsledku toho k úhynu vodních organismů. Při poklesu pH k hodnotě cca 4,5 se z podloží začínají uvolňovat rozpustné formy kovů - především hliníku, dále například železa, rtuti, manganu, olova. Ionty hliníku sice působí jako pufr a zpomalují další acidifikaci, ale zároveň jsou pro mnohé organismy toxické.

V půdě působí jako pufr huminové látky a bazické kationty Ca^{2+} , Mg^{2+} , Na^+ a K^+ . Citlivost půdy vzhledem k acidifikaci závisí na vlastnostech hornin, z kterých se skládá. Rychleji podléhají acidifikaci lokality s žulovým nebo rulovým podložím, oblasti s bazickými horninami, jako jsou vápence a magnezit, vzdorují okyselujícímu procesu déle. Horší odolnost vůči acidifikaci mají horské půdy a vodní toky, protože obsahují méně minerálů i organických látek. V zasažených oblastech dochází k odumírání rostlin, především jehličnatých stromů, a také k narušení přirozených rozkladných procesů a tím pádem k hromadění nerozložené rostlinné hmoty [26].

Acidifikace se také projevuje vznikem **kyselého smogu**, označovaného také jako smog zimního nebo Londýnského typu. Tento smog vzniká v oblastech, kde se spalují sirnatá paliva a způsobuje jej především oxid siřičitý SO_2 , popílký obsahující těžké kovy a saze. Oxidy těžkých kovů potom působí jako katalyzátory oxidace SO_2 na SO_3 , který reaguje s vodní párou za vzniku kyseliny sírové. Tento smog je velmi dráždivý pro dýchací cesty a může způsobit i vážnější zdravotní problémy.

Kyselé depozice mají také korozivní účinky pro stavební materiály, takže jejich účinkem dochází k poškozování budov včetně cenných historických památek.

2.4. Eutrofizace

Eutrofizace je **obohacování vodního a půdního prostředí živinami** a může být buďto přirozená nebo antropogenní. Přirozená eutrofizace probíhá uvolňováním fosforu, dusíku a silikátů z půdy a odumřelých organismů. Eutrofizace, ke které dochází v důsledku lidské činnosti, způsobuje nadměrné uvolňování živin do půdního a vodního prostředí. Příčinou je především intenzivní zemědělství a produkce odpadních vod, zejména komunálních, ale i některých průmyslových. Mezi látky, které se na eutrofizaci podílejí, patří především fosfáty, nitráty, amoniak a oxidy dusíku.

Hlavním důsledkem antropogenní eutrofizace je **nadměrné množení rychle rostoucích organismů** na úkor těch, které rostou pomaleji. Především se jedná o řasy a sinice, které v důsledku přemíry živin ve vodě rychle zarůstají jezera a vodní nádrže. Jejich přemnožení způsobuje **nedostatek kyslíku ve vodě**, protože tyto organismy sice přes den fotosyntetizují, ale v noci dýchají ve vodě přítomný kyslík. Zvláště v ranních hodinách je potom ve vodě nedostatek kyslíku pro ostatní

organismy. K úbytku kyslíku déle dochází při úhynu řas a sinic, kdy se odumřelá rostlinná hmota hromadí na dně jezera a kyslík je spotřebováván při jejím rozkladu. Přemnožené rostlinné organismy žijící v blízkosti vodní hladiny dále brání prostupu slunečních paprsků ke dnu, kde za normálních podmínek žije mnoho živočišných i rostlinných druhů. Přemnožení řas a sinic potom vede k úhynu těchto organismů, především těch, které jsou citlivé na přísun světla. Nadměrná eutrofizace tedy vede ke **snížení biodiversity a porušení rovnováhy v ekosystému**. Dalším důsledkem je potom zhoršení kvality vody kvůli toxinům, které produkují sinice. Tyto toxiny se uvolňují především při úhynu sinic, jsou škodlivé pro ostatní vodní organismy a představují i nebezpečí pro lidské zdraví. Zdravotní problémy mohou být způsobeny pitím závadné vody, často však i kontaktem s ní, například při koupání. Časté jsou alergické reakce a podráždění kůže, ve vážnějších případech i poškození jater a nervového systému a oslabení imunity.

2.5. Úbytek stratosférického ozonu

V atmosféře se přirozeně nachází **ozonová vrstva**, což je vrstva stratosféry s větší koncentrací ozonu O_3 . Tato vrstva chrání zemský povrch před pronikáním škodlivého UV záření (složky UV-B o vlnové délce 280–320 nm). V atmosféře přirozeně dochází k tvorbě i rozkladu molekul ozonu a za normálních podmínek jsou tyto dva děje v rovnováze. Činností člověka ovšem dochází k převažujícímu rozkladu molekul ozonu, a tedy k poklesu jeho koncentrace v ozonové vrstvě.

Molekuly ozonu vznikají **fotodisociací**, která sestává ze dvou dějů. Nejprve dochází k fotolytickému rozpadu molekuly kyslíku O_2 na dva atomy kyslíku, které potom reagují s molekulami kyslíku za vzniku ozonu. K přirozenému rozkladu ozonu dochází z větší části zářením o větších vlnových délkách kolem 1140 nm, z menší části rozkladnými reakcemi, na kterých se podílejí metan CH_4 , oxid dusný N_2O , vodní pára a sloučeniny chloru a bromu. Tyto látky mají přitom funkci katalyzátorů, takže se rozkladných reakcí mohou účastnit opakovaně.

Na antropogenním rozkladu ozonu se podílejí oxidy dusíku NO_x , metan CH_4 a především halogenové uhlovodíky - **freony**. Jedná se o sloučeniny fluoru a chloru s metanem, ethanem a cyklobutanem. Tyto látky jsou v atmosféře velmi stabilní, takže se mohou dostávat až do stratosféry, kde se účastní reakcí vedoucích k rozkladu ozonu. Freony byly používány cca od 30. let minulého století, kdy nahradily doposud užívaná chladicí média, kterými byly především amoniak a oxid siřičitý. Freony byly na rozdíl od těchto látek netoxické a nepodporovaly korozi kovových materiálů. Jejich používání se začalo omezovat v 80. letech minulého století, kdy byly nejprve zcela halogenované uhlovodíky (označované CFC nebo také tvrdé freony) nahrazovány částečně halogenovanými uhlovodíky, označovanými HCFC nebo také jako měkké freony. Tyto látky obsahují v molekulách atom vodíku, který snižuje jejich stabilitu v atmosféře. Oproti CFC jsou tedy HCFC rychleji rozložitelné a jejich schopnost rozkládat ozon je řádově nižší. Pokles emisí freonů byl zaznamenán v průběhu 90. let, především díky mezinárodním úmluvám o omezení jejich užívání. Dnes díky výraznému poklesu emisí freonů vchází do popředí vliv oxidu dusného N_2O na rozklad ozonu ve stratosféře. Jeho účinky na ozonovou vrstvu ještě nejsou zahrnuty v normách týkajících se posuzování dopadů na životní prostředí, ale zabývají se jimi některé současné studie. [39]

Důsledkem oslabení ozonové vrstvy je snadnější pronikání slunečního záření na zemský povrch. Místa, kde je ozonová vrstva zeslabena o více než 50 % průměrných hodnot, jsou označována jako **ozonové díry**. Důsledkem úbytku stratosférického ozonu je především ohrožení

lidského zdraví, neboť nadměrné pronikání slunečního záření na povrch Země způsobuje zvýšený výskyt rakoviny kůže a šedého zákalu a také oslabení imunity. Dále dochází k poškození fytoplanktonu, který slouží jako potrava pro další mořské živočichy a také je významným zdrojem kyslíku v atmosféře. Kromě toho se při fotosyntéze spotřebovává oxid uhličitý CO_2 , tudíž úbytek fytoplanktonu vede k nárůstu koncentrace CO_2 a podporuje tedy globální oteplování.

Nadměrné sluneční záření procházející atmosférou dále omezuje růst suchozemských rostlin, což je problémem pro zemědělství. Dalším důsledkem je také rychlejší koroze některých materiálů, které jsou citlivé vůči UV záření.

2.6. Vznik fotooxidantů

Tento environmentální dopad bývá také označován pojmem **tvorba přízemního ozonu**. Jako fotooxidanty jsou však označovány i další látky, které jsou velmi reaktivní a jsou schopné oxidačními reakcemi poškozovat zdraví organismů a také některé materiály. Kromě ozonu se jedná především o peroxyacetylnitrát $\text{CH}_3\text{COO}_2\text{NO}_2$ (označovaný PAN), oxid uhelnatý CO , peroxid vodíku H_2O_2 a radikály (např. OH-radikál, HO_2 -radikál, NO_3 -radikál).

Pro tvorbu přízemního ozonu a dalších fotooxidantů je třeba slunečního záření a dále přítomnost oxidů dusíku a **těkavých organických látek** (VOC), především těch nemetanických (NMVOC). Mezi zdroje NMVOC patří mimo jiné aplikace nátěrových hmot a použití rozpouštědel, lokální vytápění domácností, chemický průmysl a silniční doprava. V důsledku závislosti tvorby fotooxidantů na slunečním záření probíhá tento proces pouze během dne. Největší koncentrace fotooxidantů je obvykle zaznamenávána v průběhu odpoledne. V rámci roku pak bývá největší koncentrace těchto látek v ovzduší od dubna do poloviny září.

Fotooxidanty jsou schopné oxidovat biologické molekuly, jako jsou nenasycené kyseliny a bílkoviny. Mohou narušovat buněčné membrány a poškozovat DNA buněk. Tyto procesy podporují v lidském těle vznik nádorů a krevních sraženin a urychlují proces stárnutí tkání. Dále jsou tyto látky dráždivé pro oči, dýchací cesty a mohou způsobit i poškození dýchací soustavy. Důsledkem je také poškození rostlin, do kterých fotooxidanty pronikají prostřednictvím průduchů v listech a jehlicích. Nejprve se na listech rostlin vytváří světlé skvrny, později tyto listy odumírají. [49] Fotooxidanty se také podílejí na tvorbě **fotomogu**, označovaného také jako smog letní nebo smog Los Angeleského typu. Tento smog vzniká za přítomnosti alifatických a aromatických uhlovodíků, oxidů dusíku a fotooxidantů. Způsobuje dráždění očí a dýchacích cest.

3. Metoda hodnocení staveb z hlediska udržitelného rozvoje

S rostoucím povědomím společnosti o nutnosti ochrany životního prostředí a rozumného využívání zdrojů vyvstala potřeba nalézt jednotnou metodiku pro hodnocení výrobků z hlediska dopadů na životní prostředí. Postupně byly definovány principy udržitelného rozvoje, jehož hlavním cílem je plnit potřeby současné generace tak, aby nebyly ohroženy potřeby generací následujících. To obnáší především snahu o zachování přírodních podmínek a také o co nejehospodárnější čerpání kapacit životního prostředí – nejen surovin, ale také například prostoru pro ukládání odpadů. Důležitým bodem je také zachování rovnováhy mezi aspekty života lidské společnosti – ekonomickými, sociálními a environmentálními.

Ve stavební výrobě byl požadavek na udržitelné využívání zdrojů životního prostředí poprvé stanoven v roce 2011 v Nařízení Evropského parlamentu a Rady (EU) č. 305/2011. V tomto nařízení, které začalo platit v roce 2013, je tento požadavek uveden mezi základními požadavky na stavební výrobky, jako je mechanická odolnost a stabilita, požární bezpečnost, hygiena, ochrana zdraví a životního prostředí, bezpečnost a přístupnost při užívání, ochrana proti hluku a úspora energie a tepla. V rámci tohoto požadavku je stanoveno, že *„Stavba musí být navržena, provedena a zbourána takovým způsobem, aby bylo zajištěno udržitelné využití přírodních zdrojů“* [7]. To znamená především použití takových materiálů a technologií, které umožňují znovupoužití nebo recyklaci částí stavby, snahu o co nejdelší životnost stavby a také použití takových materiálů, které jsou šetrné k životnímu prostředí (například druhotných surovin, které vznikají jako odpady při jiných průmyslových procesech).

Následující text (kapitoly 3.1. – 3.3.) byl zpracován převážně s využitím pramenů [5], [26] a [27].

3.1. Environmentální značení a normy týkající se problematiky

Environmentální prohlášení výrobků jsou ošetřena normami, které stanovují pravidla pro různé typy environmentálních značení. Hlavní zásady pro používání těchto značení jsou stanoveny v normě ČSN ISO 14020, jednotlivými typy značení se potom podrobněji zabývají normy ČSN ISO 14021, ČSN ISO 14024 a ČSN ISO 14025.

Značení prvního typu je také nazýváno jako tzv. **eko značka** zabývá se jím norma ČSN ISO 14024. Pokud je výrobek takto označen, znamená to, že splňuje určitá environmentální kritéria, která jsou stanovena v příslušné technické směrnici pro danou kategorii produktu. Struktura technických směrnic pro různé kategorie výrobků je obvykle obdobná, součástí je definice pojmů obsažených v textu, vymezení kategorie, základní požadavky (s uvedením zákonů, kterým musí výrobek vyhovovat), specifické a environmentální požadavky, údaj o organizaci, udělující dané označení a informaci o platnosti. Environmentální požadavky obsahují konkrétní pravidla například ohledně obsahu určitých látek, původu surovin a spotřeby energie. Obvykle je zde také uveden způsob prokázání, že výrobek toto kritérium splňuje. Existuje mnoho značek, označujících takto výrobky – například Ecolabel EU, Der Blaue Engel nebo Nordic Swan (obr.2.1.). V ČR se kromě evropského značení používá i české značení Ekologicky šetrný výrobek. Výhodou tohoto značení je jeho jednoduchost, problémem je však velké množství existujících značek a zhoršující se možnost orientace v jejich způsobu hodnocení.

Není souhlas autora.

Obrázek 3.1: Příklady ekoznaček (Ekologicky šetrný výrobek, Ecolabel EU, Der Blaue Engel)[45]

Jako značení druhého typu je nazýváno **vlastní environmentální tvrzení výrobce**. Ten prohlašuje, že výrobek má určitou vlastnost, která jej činí šetrnějším vůči životnímu prostředí. Toto tvrzení by mělo být vždy podloženo odborným hodnocením. Tento typ značení je ošetřen normou ČSN ISO 14021, která obsahuje popis vybraných termínů užívaných pro environmentální tvrzení, odůvodnění pro jejich použití a vyhodnocovací a ověřovací metodiku pro ně. Jako příklady tvrzení lze uvést například označení, že výrobek je recyklovatelný, opakovaně použitelný, s nižší spotřebou energie, vody nebo dalších zdrojů.

V rámci environmentálního značení třetího typu jsou pro výrobek uvedeny a kvantifikovány informace o jeho životním cyklu ve vztahu k životnímu prostředí. Toto značení se nazývá **Environmentální prohlášení o produktu** a je označováno zkratkou EPD (Environmental Product Declaration). Tento typ značení neurčuje, že daný výrobek je environmentálně šetrný, ale pouze poskytuje informace o vlivech na životní prostředí. Podkladem pro sestavení EPD je studie LCA (Life Cycle Assessment), která analyzuje dopady výrobku na životní prostředí v rámci celého životního cyklu. Tato studie se vypracovává podle norem ČSN EN ISO 14040 (obsahuje základní pravidla pro sestavení studie) a ČSN EN ISO 14044 (obsahuje podrobnější požadavky pro vypracování).

3.2. Základní principy LCA

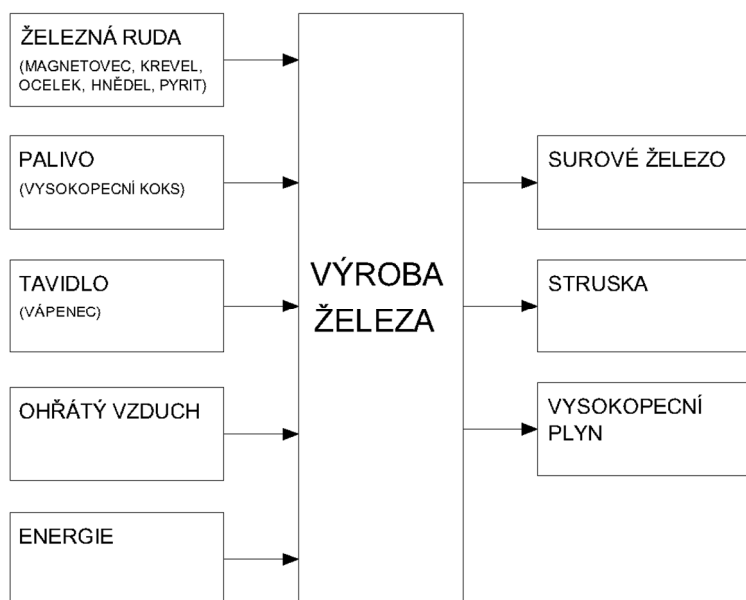
Studie LCA je metoda posuzování environmentálního dopadu produktu, která obvykle uvažuje celý jeho životní cyklus nebo alespoň jeho významnou část. Do hodnocení je tedy kromě samotné výroby zahrnuto získávání surovin, jejich doprava na místo zpracování, zpracování surovin na výchozí materiály, případné skladování, užívání produktu a případné opravy či údržba, a nakonec odstranění produktu včetně recyklace jeho částí. Obvykle se hodnocení provádí od získávání surovin až po odstranění, tzv. **od kolébky do hrobu** (from cradle to grave). V některých případech, kdy nelze dostatečně spolehlivě předpovědět průběh fáze užívání, se hodnocení provádí ve zkrácené formě: buďto od získávání surovin do okamžiku, kdy výrobek opustí výrobní, tzv. **od kolébky k bráně** (from cradle to gate) nebo od získávání surovin do přepravení výrobku na místo použití, tzv. **od kolébky na místo stavby** (from cradle to site).

Studie LCA umožňuje nalézt ve výrobě procesy, které mají, co se týče dopadů na životní prostředí, největší rezervy. Stejně tak slouží jako podklad pro návrh environmentálně šetrného

produktu, pro vytvoření EPD nebo pro rozhodnutí o tom, zda je možné daný produkt opatřit ekoznačkou.

V rámci LCA jsou dopady na životní prostředí popsány pomocí tzv. **kategorií dopadu**. Kategorií dopadu je myšlen určitý nežádoucí proces probíhající v životním prostředí, ke kterému dochází v důsledku lidské činnosti nebo je lidskou činností podporován. Kategorie dopadu, které jsou při zpracovávání LCA nejčastěji uvažovány, jsou popsány v kapitole 2. Jedná se tedy o úbytek surovin, globální oteplování, acidifikaci životního prostředí, eutrofizaci, úbytek stratosférického ozonu a vznik fotooxidantů. Někdy jsou používány i další kategorie dopadu jako humánní toxicita a vliv na lidské zdraví, ekotoxicita (toxické působení vůči ekosystémům), uvolňování prachových částic, vznik ionizačního záření a problém nadměrného či nevhodného využívání krajiny.

Při sestavování studie se životní cyklus produktu modeluje ve formě tzv. **produktového systému**. Produktový systém sestává ze souboru **jednotkových procesů**, které představují nejmenší prvky, které jsou v tomto systému uvažovány (nejsou již dále děleny na dílčí procesy). Jednotkové procesy jsou děje, které probíhají v rámci jednotlivých fází životního cyklu produktu a které přeměňují určité vstupy na výstupy. Procesy jsou vzájemně propojeny tzv. **toky**, které představují výstup z předchozího procesu a zároveň vstup do procesu následujícího. Jako příklad lze uvést proces výroby cementu, jehož výstupem je surovina, která je však zároveň vstupní surovinou do procesu výroby betonu. Tok, který spojuje jednotkové procesy v rámci produktového systému, se nazývá tok meziproduktů, přičemž meziproduktem je myšlen základní materiál (například složky betonu), montážní součásti (například ocelový příhradový vazník) nebo další produkty tvořící části produktu výsledného. Vzájemně propojené jsou však i celé produktové systémy. Obvyklým případem je využití druhotných materiálů, které vznikají jako odpad při výrobě jiného produktu. Jako příklad lze uvést přísady do betonu, které jsou často odpadem při jiné výrobě (mikrosilika jako odpad z hutnických provozů, popílek jako odpad z uhelných elektráren).



Toky, které spojují celé produktové systémy, se označují jako produktové toky. Při modelování produktových systémů se také můžeme setkat s toky, které jsou sice potřebné pro výrobu, ale nejsou obsaženy ve finálním produktu. Takové toky se nazývají pomocné a obvykle se jedná o energetické toky (toky vyjádřené jednotkou energie), vodu (například voda pro ošetřování betonu při tuhnutí a tvrdnutí), katalyzátory chemických reakcí nebo obalový materiál. Součástí produktového systému jsou také toky, které překračují jeho hranice a spojují jej s okolním prostředím.

Obrázek 3.2: Příklad vstupů a výstupů procesu (zde výroba železa)

Tyto toky jsou označovány jako **elementární toky** a jsou definovány jako vstupy, které dosud neprodělaly zásah lidskou činností nebo naopak výstupy, které již člověkem nebudou přeměňovány. Elementárními vstupy jsou suroviny a energie získaná přímo z okolního prostředí (například ze slunečního záření), elementárními výstupy potom emise do ovzduší, vody a půdy, případně uvolněné záření. Na výše uvedeném schématu (obr.3.2) je znázorněn příklad vstupů a výstupů do procesu výroby surového železa. Hlavní vstupní surovinou je v tomto případě železná ruda a palivo. Dále je jako pomocná surovina použit vápenec, který vytváří strusku potřebnou pro ochranu surového železa. Dalšími vstupy jsou energie a ohřátý vzduch, který se vhání do vysoké pece, ve které se železo vyrábí. Hlavním výstupem je surové železo, vzniká ale také struska a vysokopecní plyn. Oba tyto výstupy je možné dále využít v jiných procesech – vysokopecní plyn se používá pro vyhřívání pecí, struska se přidává do cementu pro úpravu jeho vlastností.

3.3. Postup při vypracování studie

Sestavení studie LCA sestává z několika fází, přičemž se jedná o proces iterativní, někdy je tedy třeba se vrátit k předchozím fázím a například upravit schéma produktového systému. Často se jedná například o vynechání některých procesů, které se z hlediska vlivu na životní prostředí ukáží jako zanedbatelné. **Fáze studie LCA** jsou celkem čtyři: Definice cíle a rozsahu, inventarizační analýza (life cycle inventory = LCI), posouzení dopadů (life cycle impact assessment = LCIA) a interpretace výsledků. V některých případech se vypracovává pouze studie LCI, která na rozdíl od studie LCA neobsahuje posouzení dopadů a sestává tedy pouze ze tří fází.

3.3.1. Definice cíle a rozsahu

Tato část studie zahrnuje základní informace o hodnoceném produktu, způsobu vypracování studie a uvažovaných předpokladech. Dle ČSN ISO 14040 je třeba mimo jiné uvést informace o produktovém systému a jeho funkci, stanovené hranice systému, posuzované kategorie dopadu, zvolené alokační postupy a požadavky na kvalitu vstupních údajů. Dále by měla studie obsahovat účel, pro který je zhotovována a také údaje o tom, kdo bude seznámen s jejími výsledky a zda budou tyto výsledky přístupné veřejnosti v rámci tzv. porovnávacích tvrzení [6]. Porovnávacím tvrzením se zde rozumí prohlášení, kterým je nějaký produkt v porovnání s jiným produktem se stejnou funkcí označen jako lepší, horší nebo stejný z hlediska dopadů na životní prostředí.

V rámci specifikace produktu se stanoví tzv. **funkční jednotka**, což je výkon produktového systému, ke kterému budou v dalších fázích výpočtu vztaženy vstupy a výstupy. Funkční jednotku je třeba určit kvůli možnému porovnávání různých produktů. Množství produktu, které je potřebné pro tento výkon se označuje jako tzv. referenční tok. Jako příklad lze uvést porovnání téže konstrukce zhotovené z různých druhů betonu (například běžný beton a vysokohodnotný beton). Funkční jednotkou je v tomto případě například určitá podlahová plocha konstrukce (v m²). Referenčním tokem je potom množství materiálu spotřebované na tuto konstrukci (v m³), přičemž je zřejmé, že vysokohodnotného betonu bude kvůli jeho lepším vlastnostem spotřebováno méně. V případě, že je hodnocení prováděno pouze pro určitou část životního cyklu produktu (from cradle to gate, from cradle to site), používá se místo pojmu funkční jednotka označení **deklarovaná jednotka**.

Hranice systému jsou určeny množstvím uvažovaných souvisejících procesů a časovým a geografickým rozsahem. Geografická specifikace je třeba pro určení lokality, ve které budou hodnoceny environmentální dopady. Dopady mohou být hodnoceny na úrovni lokální, regionální, státní, kontinentální či globální. Také je třeba zohlednit druh energetických zdrojů v dané lokalitě a významnost jednotlivých environmentálních dopadů v ní (například náchylnost vod a půd k acidifikaci). Časovým rozsahem se rozumí délka uvažovaného životního cyklu, tedy zda bude uvažován celý (from cradle to grave) nebo pouze jeho část (from radle to gate, from cradle to site).

Při výběru procesů, které budou v rámci studie uvažovány, je třeba rozumně volit mezi přesností výpočtu a jeho komplikovaností. Procesy, jejichž vliv na životní prostředí je v porovnání s ostatními zanedbatelný, je možné z analýzy vyloučit. Někdy se vyloučení procesů provádí dle procentuálního podílu hmotnosti jejich vstupů a výstupů na celkové hmotnosti vstupů a výstupů. Procentuální hranice, dle které se určí, zda bude proces do analýzy zahrnut, se nazývá **cut-off kritérium**. Použití tohoto postupu je však nutno důkladně zvážit, protože v případě jeho aplikace na toky některých (především toxických) látek může vést ke značnému zkreslení výsledků.

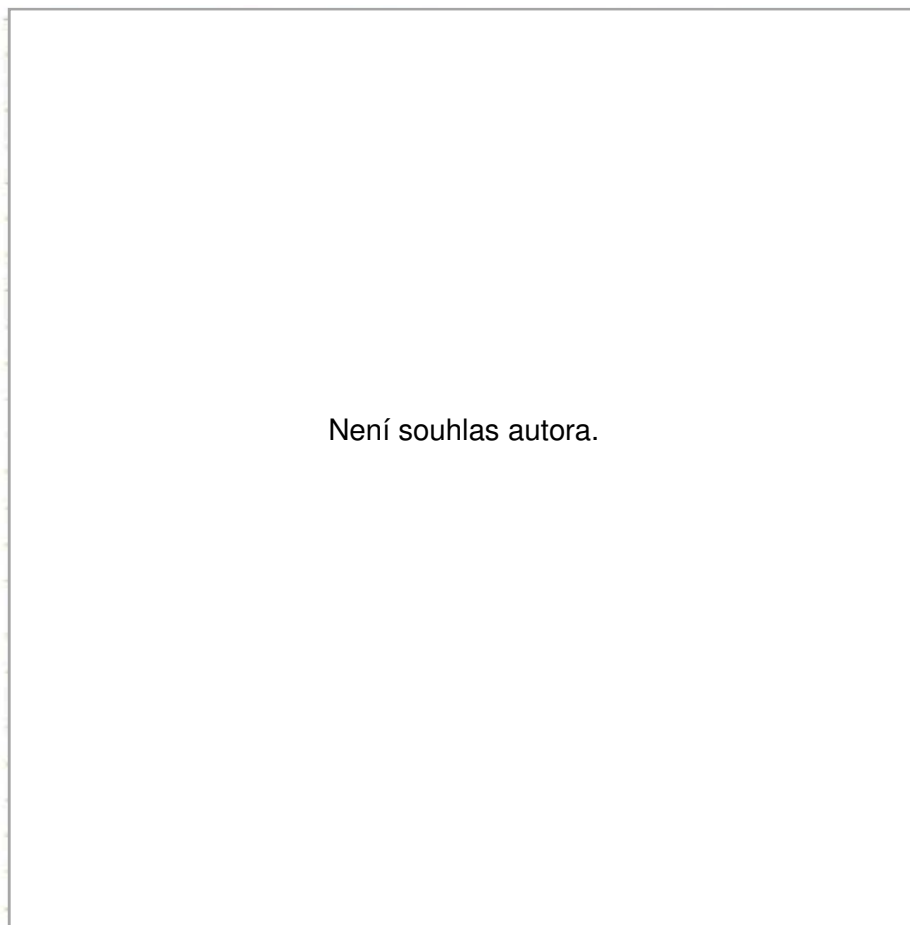
3.3.2. Inventarizační analýza

Cílem této fáze analýzy LCA je kvantifikovat toky v produktovém systému, což obnáší určení množství spotřebovaných surovin a uvolněných emisí do životního prostředí. Prvním krokem této fáze je sestavení modelu produktového systému a shromáždění potřebných údajů o vstupech a výstupech jednotlivých procesů. Následně je třeba tyto vstupy a výstupy kvantifikovat na základě množství produktu či meziprojektu příslušejícího danému procesu.

Často je při těchto výpočtech nutné uplatnit **alokaci**, což je rozdělení toku mezi více produktů nebo meziprojektů. K alokaci je třeba přistoupit v případě, že výsledkem nějakého procesu je více různých produktů nebo naopak v případě několika paralelních vstupů. Častým důvodem pro její použití je také recyklace materiálů a vyřazených produktů ve výrobě. Příkladem více produktů z jednoho procesu je výše uvedená výroba železa, při které vzniká kromě surového železa také struska a vysokopeční plyn. Více paralelních vstupů je například v případě společného čištění odpadních vod z více průmyslových závodů nebo využívání energie z více zdrojů. Recyklace se používá například při výrobě betonu, kdy je voda, používaná pro čištění autodomývačů a čerpadel, následně používána jako voda záměsová. Ve všech těchto případech je třeba určit, jak velký podíl má hodnocený produkt na celkovém environmentálním dopadu procesu. Tento podíl se označuje jako alokační faktor (AF) a obvykle se určuje na základě hmotnosti, objemu či ceny produktů. Způsob určení alokačního faktoru se uvádí v informacích o rozsahu studie (kap. 3.3.1) a je třeba jej důkladně zvážit, protože různé alokační postupy poskytují rozdílné výsledky.

Po stanovení vstupů a výstupů jednotkových procesů se vypočítají elementární toky produktového systému. Tento soubor hodnot je výsledkem inventarizační analýzy a je označován jako tzv. **inventarizační faktor** nebo také **ekovektor**. Výsledky inventarizační analýzy se obvykle udávají ve formě tzv. **inventarizačních tabulek**. Ty obsahují ve sloupcích jednotlivé meziprojektu a v řádcích jednotlivé elementární toky těchto meziprojektů (spotřebu surovin a emise do životního

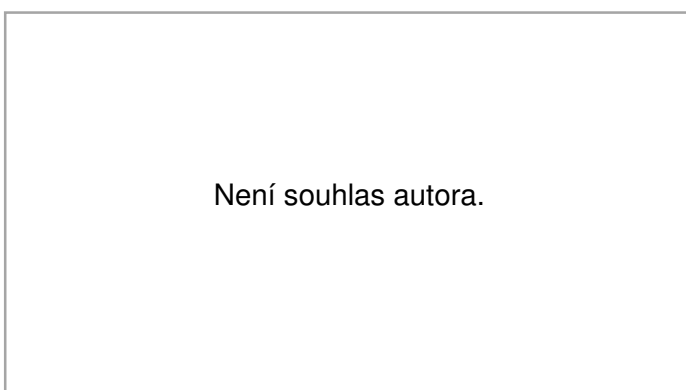
prostředí). Tabulky poskytují přehled o tom, jaké meziprodukty představují pro životní prostředí největší zátěž. Příklad podoby inventarizační tabulky je na obrázku 3.3.



Obrázek 3.3: Příklad inventarizační tabulky [26]

3.3.3. Posouzení dopadů

V tomto kroku se zpracovávají výsledky inventarizační analýzy do takové formy, z které je zřejmý vliv na jednotlivé kategorie dopadu. Tento výstup se nazývá **charakterizační profil** a obsahuje hodnoty indikátorů jednotlivých kategorií dopadu. Na obrázku 3.4 je příklad charakterizačního profilu pro cement portlandský 42,5. **Indikátor kategorie dopadu** je určitá měřitelná veličina, pomocí které je možné pozorovat změny v životním prostředí. Jeho hodnota udává míru poškození životního prostředí, ke kterému dochází při dané lidské činnosti. Indikátory kategorií dopadu mohou být midpointové nebo endpointové.



Obrázek 3.4: Příklad charakterizačního profilu [51]

Midpointové indikátory kategorií dopadu jsou založeny na měřitelných vlastnostech určité látky a na jejím vlivu na životním prostředí. Tyto indikátory vycházejí z exaktních fyzikálních, chemických a biologických jevů v životním prostředí a při jejich aplikaci se jednotlivé elementární toky porovnávají vždy s danou referenční látkou pro určitou kategorii dopadu. Na každém environmentálním dopadu se totiž vždy podílí více druhů látek, přičemž některé jsou pro životní prostředí škodlivější více a jiné méně. Všechny toky, které ovlivňují určitý environmentální aspekt, se tedy převádějí na ekvivalentní množství referenční látky.

Endpointové indikátory kategorie dopadu jsou založené přímo na pozorování měřitelných změn v životním prostředí. Tyto indikátory se používají méně, protože oproti midpointovým je jejich aplikace složitější a je třeba pracovat s velkým množstvím nejistot. Pro zpracování EPD se proto nepoužívají a uplatňují se spíše ve složitějších výzkumných analýzách. V tabulce 3.1. jsou uvedeny příklady midpointových a endpointových indikátorů pro jednotlivé kategorie dopadu. Tabulka byla zpracována s využitím [26].

Tabulka 3.1: Příklady endpointových a midpointových indikátorů kategorií dopadů.

Kategorie dopadu	Midpointový indikátor	Endpointový indikátor
Globální oteplování a klimatické změny	Emise skleníkových plynů	Zvýšení průměrné teploty, zvýšení hladiny oceánů, tání ledovců
Humánní toxicita	Množství toxických látek (např. 1,4-dichlorbenzen, olovo, rtuť...)	Zkrácení doby průměrného dožití, počet roků života ovlivněných nezpůsobilostí DALY (disability adjusted life years)
Ekotoxicita	Množství toxických látek (např. 1,4-dichlorbenzen, olovo, rtuť...)	Podíl ovlivněných druhů organismů PAF (potentially affected fraction), podíl chybějících druhů PDF (potentially disappeared fraction)
Úbytek stratosférického ozonu	Rozklad molekul ozonu	Lidské zdraví (DALY), zdraví ekosystémů (PAF, PDF)
Acidifikace	Počet potenciálně uvolněných protonů po jejich úplné disociaci vztahený k molární hmotnosti látky	Podíl chybějících druhů PDF
Eutrofizace	Ekvivalentní množství biodostupného fosforu či dusíku, úbytek kyslíku	Podíl chybějících druhů PDF
Tvorba fotooxidantů	Nárůst koncentrace troposférického ozonu	Lidské zdraví (DALY)
Úbytek surovin	Množství surovin	Množství energie potřebné na získávání surovin v budoucnosti (přEPDokládá se náročnější získávání hůře dostupných surovin)

Prvním krokem při posuzování dopadů na životní prostředí je **klasifikace**, která obnáší přiřazení jednotlivých elementárních toků ke kategoriím dopadu, které ovlivňují. Například tedy emise oxidu uhličitého CO₂ jsou přiřazeny do kategorie dopadu globální oteplování a emise oxidu siřičitého SO₂ se přiřadí k acidifikaci. Některé látky mohou zároveň spadat do několika kategorií dopadu, například oxid dusný N₂O se podílí na globálním oteplování i na úbytku stratosférického ozonu.

Následně se kvantifikuje vliv jednotlivých elementárních toků na kategorie dopadu. Tento proces se nazývá charakterizace a postupuje se při něm podle tzv. **charakterizačního modelu**. Charakterizační model určité kategorie dopadu je soubor hodnot, které vyjadřují schopnost různých látek škodit v rámci této kategorie dopadu. Pomocí těchto hodnot, tzv. **charakterizačních faktorů** (CF), se jednotlivé látky převádějí na ekvivalentní množství látky referenční. V tabulce 3.2. jsou uvedeny referenční látky pro jednotlivé kategorie dopadu.

Tabulka 3.2: Referenční látky pro midpointové indikátory kategorií dopadu

Kategorie dopadu	Referenční látka
Globální oteplování a klimatické změny	Oxid uhličitý CO ₂
Humánní toxicita	1,4-dichlorbenzen (1,4DCB)
Ekotoxicita	1,4-dichlorbenzen (1,4DCB)
Úbytek stratosférického ozonu	CFCl ₃ (CFC-11, R11)
Acidifikace	Oxid siřičitý SO ₂
Eutrofizace	Fosforečnanový aniont PO ₄ ⁻³
Tvorba fotooxidantů	Ethen C ₂ H ₄
Úbytek surovin	Antimon Sb

Výsledek indikátoru kategorie dopadu, což je výstup z procesu hodnocení dopadů na životní prostředí, se vypočte podle následujícího vztahu [27]:

$$V_{XY} = CF_{1,XY} \cdot \sum m_{1i} + CF_{2,XY} \cdot \sum m_{2i} + \dots + CF_{n,XY} \cdot \sum m_{ni}$$

- V_{XY} výsledek indikátoru kategorie dopadu (XY označuje kategorii dopadu)
 CF charakterizační faktor
 m množství elementárního toku určité látky

Existuje více charakterizačních modelů, některé jsou založené na midpointových indikátorech, jiné na endpointových. V normě, která stanovuje pravidla pro tvorbu EPD (ČSN ISO 140 25), není uvedeno, které charakterizační modely by se měly používat. Norma pouze stanovuje, které kategorie dopadu by se pro tvorbu EPD měly uvažovat. Jedná se o globální oteplování a změnu klimatu, acidifikaci, eutrofizaci, úbytek stratosférického ozonu, tvorbu fotooxidantů a úbytek surovin. Volba charakterizačního modelu pro jednotlivé kategorie dopadu je uvedena v **Pravidlech produktové kategorie PCR** (Product Category Rules) pro konkrétní skupiny výrobků (více v kapitole 3.4).

3.3.4. Interpretace

V rámci poslední fáze studie LCA jsou obvykle shrnuty výsledky, formulována doporučení a také provedené určité kontroly, které slouží k ověření správnosti a spolehlivosti provedení studie. Tyto výsledky by měly být vždy v souladu s definovaným cílem a rozsahem, které jsou stanoveny na začátku studie. Důležitou součástí výsledků studie jsou tzv. **významná zjištění**. Ta jsou získána analýzou dat z inventarizační analýzy (LCI) a zhodnocení dopadů na životní prostředí (LCIA). Jejich podstatou je obvykle identifikace hodnot, které jsou v porovnání s ostatními výraznější. Nejčastěji se jedná o proces či fázi životního cyklu produktu, které mají největší vliv na životní prostředí, emise určité látky, která se na poškozování životního prostředí podílí nejvíce nebo kategorii dopadu, která je v souvislosti s daným produktem nejvíce zasažena. Významná zjištění jsou získávána různými postupy, patří mezi ně například:

- analýza dominance
- analýza příspěvku
- analýza ovlivnění
- analýza bodu zvratu.

Analýza dominance spočívá v identifikaci procesu či fáze životního cyklu, které jsou původcem největšího množství emisí nebo spotřebovávají největší množství surovin. Pro tuto analýzu je třeba data uspořádat do tzv. strukturalizačních tabulek, které pro každý proces nebo fázi životního cyklu uvádějí množství emisí a spotřebovaných surovin nebo uvádějí přímo údaje o vlivu na jednotlivé kategorie dopadu a zároveň jejich procentuální podíl na celkových dopadech na životní prostředí. Někdy se využívá také ABC analýza, která spočívá v přiřazení označení dle procentuálního podílu (například označení A pro procesy s podílem větším než 50 %, označení B pro procesy s podílem mezi 25–50 %... atd.). Při použití ABC analýzy je tak na první pohled patrné, které procesy představují pro životní prostředí největší zátěž a které jsou ve vztahu k celkovému environmentálnímu dopadu zanedbatelné.

Analýza příspěvku se ve své podstatě podobá analýze dominance, na rozdíl od ní ovšem nejsou identifikovány nejvýznamnější procesy, ale nejvýznamnější elementární toky, které největší mírou přispívají k celkovému environmentálnímu dopadu.

Analýza ovlivnění slouží k ověření, do jaké míry se změní výsledek studie při změně části produktového systému, například při použití jiného materiálu.

Analýza bodu zvratu se používá při studiích sloužících k porovnání dvou produktů či variantních řešení. Obvykle je totiž jedno řešení výhodnější pouze za jistých podmínek – většinou záleží na velikosti funkční jednotky nebo na uvažovaném časovém období. Při změně podmínek často dochází ke změně výsledku a tento stav se nazývá bod zvratu. Jako příklad lze uvést porovnání aplikace dvou druhů produktů, které se liší svým celkovým dopadem na životní prostředí, ale zároveň ten environmentálně šetrnější je třeba dopravit na místo použití z větší dálky. V tomto případě záleží na celkovém množství produktu, při kterém rozdíl v environmentálních dopadech obou produktů vyrovná poškození životního prostředí v důsledku dopravy.

V případě porovnávání více produktů se někdy v této fázi provádí také **celkové hodnocení dopadů** na životní prostředí, při kterém jsou hodnoty z jednotlivých kategorií dopadu normovány a poté zprůměrovány váženým průměrem podle jejich důležitosti. Normování lze provést například pomocí **funkce užítku**, která v tomto případě spočívá ve stanovení největší a nejmenší hodnoty v

rámci jedné kategorie dopadu a určením polohy dalších hodnot mezi těmito dvěma limity. Použije se následující rovnice:

$$l_{i,norm}(\{x_j\}) = (l_i(\{x_j\}) - l_{i,min}) / (l_{i,max} - l_{i,min})$$

$l_{i,norm}(\{x_j\})$ normovaná hodnota kategorie dopadu

$l_i(\{x_j\})$ nenormovaná hodnota kategorie dopadu

$l_{i,min}$ nejmenší hodnota v rámci kategorie dopadu

$l_{i,max}$ největší hodnota v rámci kategorie dopadu

Největší hodnotě tedy bude přiřazena normovaná hodnota 1, nejmenší hodnotě normovaná hodnota 0.

Pro ověření spolehlivosti studie lze použít různé kontroly, přičemž každou z nich ověřujeme jinou požadovanou vlastnost studie. Jedná se o:

- kontrolu úplnosti
- kontrolu konzistence
- analýzu nejistot
- analýzu citlivosti
- analýzu obměny
- hodnocení citlivosti dat

V rámci **kontroly úplnosti** se ověřuje, zda byly zahrnuty všechny elementární toky a zda byla řádně zpracována všechna data z inventarizační analýzy. **Kontrolou konzistence** ověřujeme soulad předpokladů a použitých metod, respektování hranic systému a dodržení alokačních pravidel. **Analýza nejistot** spočívá ve zjištění míry vlivu nepřesnosti vstupních dat. Vliv se pro jednotlivé kategorie dopadu obvykle vyjadřuje v procentech. **Analýzou citlivosti** se ověřuje, jaký vliv mají na výsledky studie změny v průběhu zpracování studie, například jiné předpoklady a alokační pravidla, jiné charakterizační modely či jiná vstupní data. V případě, že studie vykazuje velkou citlivost, je třeba k jejím výsledkům přistupovat s větší opatrností, zejména v případě porovnávání více produktů. **Analýzou obměny** se zjišťuje vliv změn v životním cyklu produktu na výsledky studie (například změna dodavatele energie). **Hodnocení kvality dat** zahrnuje ověření, zda jsou použité vstupní údaje svou podrobností, stářím a původem v souladu s požadavky na kvalitu vstupních dat, které jsou uvedeny v rámci definice cíle a rozsahu studie.

Součástí studie bývá také tzv. **kritické přezkoumání**. Jedná se o kontrolu studie nezávislou osobou, jejíž účelem je zvýšit důvěryhodnost studie. To je důležité zejména při studiích určených k porovnání konkurenčních produktů. V rámci kritického přezkoumání se kontroluje především shoda použitých metod s platnými normami, vhodnost použitých metod a charakterizačních modelů, vhodnost použitých dat, správnost výpočtů a závěrů, ucelenost studie a její transparentnost.

V rámci interpretace studie jsou dále formulovány závěry a případná doporučení pro rozhodnutí. Zprávy z LCA studií mohou být vyhotoveny ve dvojí formě. Pro zadavatele studie je zpracována v úplné formě, obsahující všechny vstupní údaje, výpočty a popis použitých metod. Součástí jsou dále významná zjištění včetně podmínek jejich platnosti, informace o zhotoviteli studie a kritické přezkoumání. Pro veřejnost je potom vyhotovena zkrácená forma studie, která obsahuje výsledky a základní informace o zhotovení, nikoli však informace o výrobě, které mohou být tajné (například receptury). Tato zkrácená studie se dle ČSN EN ISO 14044 nazývá **third-party-report**.

3.4. Pravidla produktové kategorie PCR

Pravidla produktové kategorie PCR (Product Category Rules) upřesňují pravidla a požadavky při tvorbě studií LCA pro konkrétní skupiny výrobků. Obsahují detailnější informace, které nejsou uvedeny v příslušných normách a které jsou specifické pro konkrétní produkty. Dokumenty PCR jsou vytvářeny odborníky na zpracovávání studií LCA, kteří spolupracují s odborníky na danou skupinu výrobků. Tyto dokumenty obvykle obsahují popis a specifikaci produktů, kterých se týkají, určují požadavky na vstupní data z hlediska úplnosti, podrobnosti, původu a stáří, popisují alokační pravidla a určují volbu funkční jednotky. Dále specifikují hranice uvažovaného produktového systému a stanovují dobu platnosti EPD, vyhotoveného dle tohoto PCR. Následující kapitola byla zpracována s využitím [6].

3.4.1. PCR pro beton

V současné době platná pravidla produktové kategorie pro beton a betonové výrobky pochází z ledna roku 2015 a jsou platná do února 2018. Dokument PCR je volně dostupný na mezinárodních internetových stránkách pro tvorbu EPD [52].

Tato pravidla platí pro čerstvý beton, betonové bloky (ne však pro bloky z pórobetonu), betonové obrubníky (a podobné výrobky) a pro maltu. Pravidla neplatí pro vyztužený beton ani pro vláknobeton. Beton má být definován v souladu s EN 206-1:2001, uvedena má být tlaková pevnost, stupeň vlivu prostředí a optimálně také rozlití čerstvé betonové směsi.

V rámci tvorby EPD pro beton a betonové výrobky je uvažována část životního cyklu produktu od získávání surovin do okamžiku, kdy výrobek opustí výrobu (from cradle to gate), optimálně však až po transport výrobku na místo použití (from cradle to site). V některých případech je možné zahrnout do hodnocení ještě umístění výrobku přímo do konstrukce. Životní cyklus výrobku je možné rozložit do několika fází. Vždy musí být uvažovány tři základní fáze:

- získávání a zpracování surovin
- transport do výroby
- výroba

Dále je možné zařadit fázi dopravy na místo použití a fázi užití výrobku v konstrukci.

Fáze získávání surovin (označení A1) zahrnuje především těžbu surovin a paliv, jejich následné zpracování a také výrobu elektrické energie a tepla. Dále se do této fáze řadí procesy spojené s použitím sekundárních materiálů z předchozích produktových systémů, nikoli však procesy, během kterých byl původní odpad zpracován na materiál pro další použití (tyto procesy se řadí k předchozímu produktovému systému). Stejně pravidlo platí i pro výrobu energie ze sekundárních zdrojů – uvažovány jsou procesy, které nastávají od chvíle, kdy je daný materiál použitý pro výrobu energie (například vložení odpadu do spalovací pece), procesy spojené s produkcí a případným dalším zpracováním sekundárního materiálu jsou přiřazeny předchozímu produktovému systému. Fáze A1 také obsahuje zpracování dále využitelných odpadů vznikajících v jejím rozsahu a likvidaci nevyužitelných odpadů.

V rámci druhé fáze označované A2 jsou uvažovány všechny transportní procesy, při kterých se suroviny a pomocné materiály dopravují do výroby. Zahrnuty jsou zde dopady z těžby a zpracování paliva, které jsou spojeny s dopravou. Dopady spojené s transportem odpadu

z výroby se však započítávají až do fáze následující. Vliv transportu na životní prostředí se odvíjí od druhu dopravy a dopravního prostředku, jeho účinnosti, použitého paliva, hmotnosti nákladu a vzdálenosti. Tyto okolnosti jsou významné především pro objemné materiály a pro dopravu do velkých vzdáleností.

Fáze A3 zahrnuje vlastní výrobu produktu, včetně výroby vedlejších produktů a meziproduktů, balení produktů a také produkci energie použité pro výrobní proces. Jak bylo uvedeno výše, započítávají se do této fáze také dopady spojené s dopravou a zpracováním odpadů.

Fáze A4 je uvažována v případě, že je předem známo místo použití výrobku. Do této fáze se řadí především transport výrobku z výroby na místo použití. Dále sem patří dopady spojené se skladováním produktů před jejich transportem do místa použití (dopady se týkají především vytápění a chlazení skladovacích prostor) a dopady související s materiálovými ztrátami během dopravy, se zpracováním odpadu z obalového materiálu a dalších odpadů vznikajících během dopravy. V případě, že jsou dopravní prostředky vázány na jiné místo, než je místo použití výrobků, započítávají se do této fáze také vlivy způsobené mytím dopravních prostředků.

Fáze A5 se týká použití výrobku na stavbě. Patří do ní do ní skladování výrobků na místě použití, čerpání betonu, ochlazování nebo proteplování betonu zajišťující jeho správné tuhnutí a tvrdnutí, použití bednění a přípravků usnadňující odstranění bednění z konstrukce a čištění bednění. Dále je zde zahrnuto mytí dopravních prostředků, které jsou vázány na místo stavby, materiálové ztráty a zpracování odpadů vznikajících v této fázi.

Pro EPD betonu a betonových výrobků se vždy používá **deklarovaná jednotka**, nikoli jednotka funkční, protože není uvažovaný celý životní cyklus (from cradle to grave), ale jen jeho část. Pro EPD je vhodné volit následující jednotky:

- 1 m³ pro čerstvý beton s danou tlakovou pevností a stupněm vlivu prostředí
- 1 betonový blok s danou tlakovou pevností
- 1 m² betonového zdiva s danou pevností
- 1 m nevyztuženého betonového potrubí s danou kapacitou
- 1 m³ malty

Hranice produktového systému mají být jasně definované, transparentní a použitelné pro daný produkt. Při stanovení hranic systému je třeba respektovat dva základní principy. Za prvé je nutné přiřazovat dopady k těm částem životního cyklu, v jejichž rámci nastaly. Za druhé je třeba procesy, při kterých je odpad zpracováván na dále využitelnou surovinu, přiřazovat k produktovému systému, který odpad produkuje. Do produktového systému, který zpracovaný odpad využívá, se zahrnují až procesy spojené s využitím těchto druhotných surovin. Stav, kdy je původní odpad zpracován na dále využitelnou surovinu, je považován za okamžik, kdy odpad přestává být odpadem (v původním znění dokumentu se tento stav označuje jako „**end-of-waste state**“). Tohoto stavu je dosaženo v případě splnění následujících kritérií:

- materiál musí sloužit k definovanému účelu
- materiál musí splňovat technické požadavky pro tento účel a platné legislativní požadavky
- jeho použití nesmí vést k nepříznivým dopadům na životní prostředí a lidské zdraví
- musí existovat poptávka po tomto materiálu

Hranice systému leží v bodě, ve kterém se z původního odpadu stává dále využitelná a poptávaná surovina. Pokud odpad do tohoto stavu nikdy nedospěje, protože ho nelze dále nijak

využít, zůstává v rámci hranic produktového systému a dopady na jeho likvidaci případnou produktovému systému, který jej vyprodukoval.

Produktový systém často kromě výrobku, pro který je LCA studie vypracována, opouští další produkty a také odpady, které lze dalšími procesy přeměnit na použitelné materiály. Někdy jsou naopak některé materiály či energie sdíleny několika výslednými produkty. V tomto případě je často třeba uplatnit **alokaci**. V Pravidlech produktové kategorie je doporučeno se alokaci co nejlépe vyhnout rozdělením procesu do několika menších podprocesů. Pokud je alokace nevyhnutelná, volí se jeden z následujících alokačních postupů.

V případě produktů, které se příliš neliší svojí ekonomickou hodnotou, je možné alokovat dle základních fyzikálních vlastností, jako je hmotnost nebo objem. V případě cenově odlišných produktů se potom provádí alokace dle ekonomické hodnoty. Pro materiály se specifickými vlastnostmi, jako je například energetický obsah (výhřevnost), je vhodné zvolit alokaci dle míry této specifické vlastnosti. Tento způsob alokace se typicky použije pro paliva. Alokace založená na ekonomické hodnotě je použitelná pro vstupy do procesu v případě, že těmito vstupy jsou materiály, které nejsou prodávány (jsou předávány zdarma nebo je dokonce placeno jejich příjemci). Naopak pro výstupy lze tento způsob alokace použít v případě, že jsou prodávány jako využitelná surovina. Pokud výrobce betonu neplatí za některou vstupní surovinu, není třeba používat alokaci, protože k výrobě betonu se v tomto případě žádné dopady nevztahují. Pokud výrobce betonu platí pouze dovoz určité suroviny, týkají se výroby betonu pouze dopady související s transportem. Mezi materiály, pro které je v rámci hodnocení životního cyklu používána alokace, patří například struska, vedlejší produkty uhelných elektráren (popílek, popel ze dna pece), popílek ze spaloven, slévárenský písek nebo mikrosilika.

Při zpracovávání studie LCA se mají výpočty provádět dle EN ISO 14044. Mají být používány jednotky SI, množství surovin (kromě vody) má být uváděno v kg, množství vody v m³ a energie v MJ nebo kWh.

Vstupní data pro vypracování studie mohou být získána od výrobců nebo z veřejných zdrojů, spočítaná nebo odhadnutá. V případě dat z veřejných zdrojů je třeba uvést jejich původ. Zejména v případě dat, která by mohla být významná pro závěry studie, je třeba uvést detaily o získání dat, jejich stáří a údaje o kvalitě. Pokud použitá data nesplňují požadavky na kvalitu, je nutné tuto skutečnost v rámci studie uvést. Vhodné je také soubor získaných dat doplnit popisem jednotlivých procesů, aby se snížilo riziko nedorozumění, které by mohlo vést k nezapočítání některých vlivů nebo naopak k dvojnásobnému započítání a tím ke znehodnocení studie. Pokud má EPD popisovat dopady způsobené běžným průměrným produktem, je vhodné používat vstupní data týkající se průměrných produktů. V případě, že se EPD týká specifického produktu, je třeba použít specifická data. Obecná data lze v tomto případě použít jen pro procesy, které výrobce nemůže ovlivnit (těžba surovin, výroba energie). Data použitá pro studii by měla být co nejaktuálnější, stáří specifických dat může být maximálně 5 let, obecných dat maximálně 10 let. Data by měla být zprůměrovaná za 1 rok a veškeré odchylky by měly být odůvodněné. Časový úsek, pro který se uvažuje působení dopadů, je 100 let.

Při hodnocení životního cyklu betonu a betonových výrobků by měly být uvažovány následující **kategorie dopadu**:

- globální oteplování a změna klimatu
- úbytek stratosférického ozonu
- acidifikace

- eutrofizace
- tvorba fotooxidantů
- úbytek fosilních a minerálních surovin.

Charakterizační faktory by měly být v Evropě převzaty z databáze CML (Institute of Environmental Sciences Faculty of Science University of Leiden, Netherlands) [14].

4. Korozní vlivy působící na železobetonové konstrukce

Trvanlivost je jednou ze základních vlastností stavební konstrukce a je dána schopností materiálu odolávat narušujícím vlivům okolního prostředí. Závisí především na parametrech prostředí, ve kterém je konstrukce umístěna a na vlastnostech materiálu, ze kterého je zhotovena. Požadavky na trvanlivost a metody pro její výpočet v současné době nejsou uvedeny v normě. Hledisko trvanlivosti je však normativně zohledněno v rámci konstrukčních zásad (požadavky na krycí vrstvu výztuže).

Následující text byl zpracován převážně s využitím zdrojů [34], [38] a [40].

4.1. Fyzikální koroze betonu

4.1.1. Abraze a kavítace

Abraze neboli obrus způsobuje postupný úbytek cementového tmele a následné uvolňování zrn kameniva. V důsledku tohoto jevu je potom výztuž méně chráněna vůči vnějším vlivům (zmenšení tloušťky krycí vrstvy). Abrazi jsou vystaveny zejména povrchy potrubí, vodních staveb (kanály, přehrady, čistírny odpadních vod), komunikací a parkovacích ploch. Pro tyto aplikace je proto vhodnější volit betony s vyšší hutností, které lépe odolávají těmto účinkům.

Kavitaci jsou vystaveny vodní stavby, které přicházejí do styku s proudící vodou. **Kavítace** je děj, ke kterému dochází v kapalinách již při poměrně nízkých rychlostech proudění (cca od 12 m/s). Je způsobena vznikem tahových sil v kapalném prostředí (lokálním podtlakem), které jsou větší než kohezní a hydrostatické síly v kapalině. Dochází tak ke vzniku bublin, které jsou vyplněny párami kapaliny a plyny, které jsou za normálních okolností v kapalině rozpuštěné. Bubliny obvykle vznikají v místech mikroskopických dutinek, které tvoří tzv. kavitační zárodky. Po poklesu tahových sil dochází ke zborcení těchto dutin. Většinou se nejprve prolomí stěna dutiny na jednom místě a kapalina proudí ve formě úzkého paprsku ke stěně protější. Tento paprsek má velkou rychlost a působí na pevné prostředí velkým tlakem. Důsledkem je vznik kráterů v materiálu.

4.1.2. Působení mrazu a rozmrazování

Velmi významným korozním účinkem je působení mrazu a rozmrazování. Těmto účinkům jsou vystaveny především dopravní a vodní stavby. Voda obsažená v pórech materiálu při poklesu teploty pod bod mrazu zamrzá a tím zvětšuje svůj objem (cca o 9%). Rozpínání ledu v pórech způsobuje tahové namáhání cementového tmele a po překročení lokální pevnosti v tahu dochází k porušení struktury materiálu. Z povrchu konstrukce postupně odpadají rozrušené části materiálu, nastává pokles pevnosti a modulu pružnosti a zvýšení propustnosti, což vede ke snadnějšímu

Není souhlas autora.

pronikání agresivních látek do struktury betonu. Současně s působením mrazu je konstrukce často vystavena působení **chemických rozmrazovacích látek** (CHRL). Nejčastěji se jedná o soli, v ČR se nejvíce používá chlorid sodný NaCl, v malé míře potom chlorid vápenatý CaCl_2 nebo chlorid manganatý MgCl_2 . Rozmrazovací látky zesilují korozivní účinky. Silná koncentrace roztoku soli v betonu způsobuje další zavlhčování materiálu vlivem osmózy. Stupeň vlivu prostředí se označuje XF, označení XF1 a XF3 je určeno pro působení mrazu a rozmrazování bez chemických rozmrazovacích látek, označení XF2 a XF4 s nimi.

Obrázek 4.1: Poškození betonového povrchu působením mrazu. [59]

4.2. Chemická koroze cementového tmele

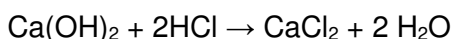
Chemickou korozi se rozumí rozrušování a změna vlastností materiálu v důsledku působení agresivních látek kapalného nebo plynného skupenství. Korozi způsobenou kapalnými látkami lze dále dělit na korozi I., II. a III. druhu. Příklady koroze způsobené plynnými látkami jsou karbonatace a méně významná sulfatace.

4.2.1. Koroze I. druhu

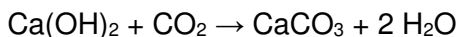
Koroze I. druhu spočívá ve **vyluhování hydroxidu vápenatého $\text{Ca}(\text{OH})_2$** z cementového tmele, což vede k postupnému snižování pevnosti. Snižování koncentrace hydroxidových iontů také způsobuje snížení pH cementového tmele a tím pádem postupné snižování ochrany ocelové výztuže před korozi. Při výrazném poklesu pH může dojít i k postupnému rozkladu slídkových minerálů na oxidy SiO_2 , Al_2O_3 a Fe_2O_3 . Slídkové minerály jsou totiž vysoce zásadité sloučeniny a jsou tedy stabilní pouze v zásaditém prostředí. Tímto druhem koroze jsou ohroženy konstrukce, které přicházejí do styku s tzv. hladovou vodou, tedy vodou, která obsahuje velmi málo vápenatých ahořečnatých iontů Ca^{2+} a Mg^{2+} . Jedná se především o vodu dešťovou a dále o povrchové vody (říční, rybníční). Na povrchu konstrukce zasažené tímto typem koroze jsou často pozorovatelné bílé výkvěty tvořené uhličitanem vápenatým $\text{Ca}(\text{CO})_3$.

4.2.2. Koroze II. druhu

Korozi II. druhu se označují **výměnné reakce působících látek s hydroxidem vápenatým $\text{Ca}(\text{OH})_2$** . Častým případem tohoto druhu je působení kyselin, při kterém dochází k přeměně hydroxidu vápenatého $\text{Ca}(\text{OH})_2$ a hydratovaných silikátů a aluminátů vápenatých na vápenaté soli kyselin. Z organických kyselin se jeví nejagresivněji kyselina chlorovodíková HCl a dusičná HNO_3 , dále se vyskytuje působení kyseliny sírové H_2SO_4 , fosforečné H_3PO_4 a kyseliny fluorovodíkové HF. Z organických kyselin jsou potom příčinou koroze například kyselina octová, mravenčí, máselná, mléčná a huminové kyseliny, přičemž nejvíce destruktivní efekt mají kyseliny mléčná a octová. S kyselinovou korozi se nejčastěji setkáváme v chemických a potravinářských provozech, v zemědělských zařízeních (například silážní jámy) a také u konstrukcí, které přicházejí do styku s odpadními vodami. Příkladem kyselinové koroze betonu je následující chemická rovnice:



Dalším příkladem je uhličitá koroze, při které je materiál poškozován agresivním oxidem uhličitým CO_2 , který je volně obsažen ve vodě a je částečně disociovaný na kyselinu uhličitou H_2CO_3 . Tento typ agresivní vody se nazývá voda kyselá. Oxid uhličitý reaguje s hydroxidem vápenatým za vzniku uhličitanu vápenatého CaCO_3 dle následující chemické rovnice:

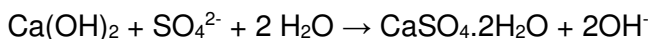


Vůči působení alkalických roztoků je beton poměrně odolný, pouze při kontaktu s koncentrovanými roztoky může dojít k rozpouštění silikátových a aluminátových složek z cementového tmele. Pro beton jsou také nebezpečné hořečnaté soli, které reagují výměnnými reakcemi s hydroxidem vápenatým za vzniku rozpustných vápenatých solí.

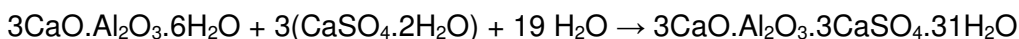
4.2.3. Koroze III. druhu

Koroze III. druhu se vyznačuje **tvorbou produktů velkého objemu**, které se tvoří v pórovém systému materiálu a působí na stěny pórů velkými tlaky. Tyto tlaky mohou dosahovat až desítek MPa. V případě tohoto typu degradace dochází nejprve k postupnému zaplňování pórů a zhutňování jeho struktury, což se projevuje jako přechodné zlepšení mechanických vlastností. Po zaplnění pórů a dalším růstu krystalů v pórech je však vyvíjen tlak na stěny pórů a po vyčerpání lokální tahové pevnosti materiálu dochází k jeho trhání. Příkladem je **solná koroze**, při které dochází k nasávání roztoku solí do struktury materiálu a zároveň k odpařování vody, čímž se zvyšuje koncentrace obsažené soli a dochází ke krystalizaci. Při opětovném zvýšení vlhkosti v materiálu se soli rozpouštějí a následně rekrystalizují. Dochází tak k cyklické krystalizaci v pórovém systému a k postupnému porušování struktury materiálu. Některé soli vytváří hydráty, při jejichž krystalizaci vznikají ještě větší tlaky.

Podobný destrukční mechanismus se vyskytuje také u **síranové koroze**, která je označována také jako sádrovcová koroze. Její příčinou jsou sírany, které jsou obsaženy v některých podzemních a průmyslových odpadních vodách. Zdrojem síranů může být i kamenivo nebo popílek (více v kapitole 5.3.). Síranové ionty reagují s hydroxidem vápenatým za vzniku sádrovce dle následující rovnice:

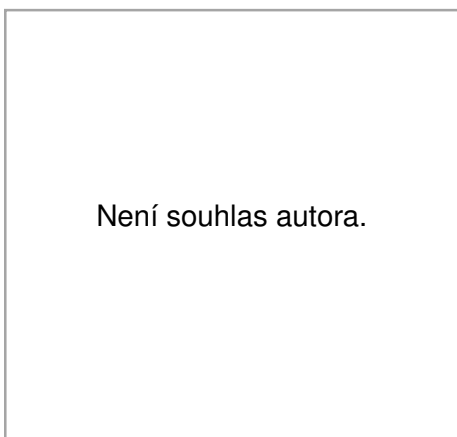


Vznik sádrovce je spojen s velkým nárůstem objemu a vznikem tlaku na stěny pórů. Následně může docházet k reakcím sádrovce s alumináty za vzniku ettringitu (obr.3.2). Tento proces se označuje jako sulfoaluminátová koroze a ettringit je někdy nazýván také jako Candlotova sůl nebo jako cementový bacil. Degradální děj lze popsat následující chemickou rovnicí:

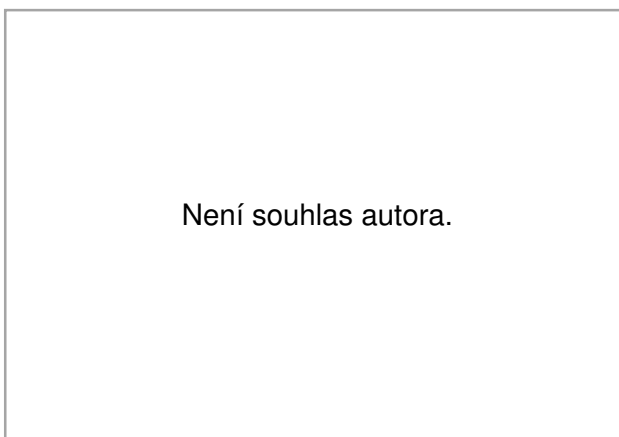


Růst krystalů ettringitu způsobuje výrazné potrhání struktury materiálu.

Při kombinovaném působení síranů a oxidu uhličitého může docházet ke vzniku thaumasitu $\text{CaSiO}_3 \cdot \text{CaSO}_4 \cdot \text{CaCO}_3 \cdot 15\text{H}_2\text{O}$, který má podobné vlastnosti jako ettringit a také způsobuje velké tahové síly ve struktuře betonu. Stejným způsobem poškozují beton vznik chloroaluminátu $3\text{CaO} \cdot \text{Al}_2\text{O}_3 \cdot \text{CaCl}_2 \cdot 10\text{H}_2\text{O}$, který je také označován jako Friedlova sůl. Příčinou vzniku krystalů této sloučeniny je obsah chloridů v pórovém roztoku.



Obrázek 4.2: Krystaly ettringitu [56]

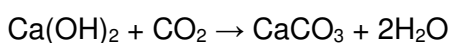


Obrázek 4.3: Ettringit ve struktuře betonu [58]

Karbonatace

Ve většině případů je rozhodujícím korozním vlivem pro beton karbonatace. Je to jev, ke kterému dochází v důsledku působení vzdušného oxidu uhličitého CO_2 na hydroxid vápenatý a další produkty hydratace. Důsledkem je **snížení pH vedoucí ke korozi ocelové výztuže** a v posledním stádiu také poškození struktury samotného betonu.

V rámci karbonatace lze rozlišit několik fází. V první fázi dochází k reakci oxidu uhličitého s hydroxidem vápenatým dle dále uvedené chemické rovnice:



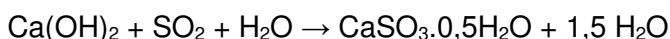
Uhličitan vápenatý v této fázi postupně zaplňuje póry v betonu a, stejně jako v případě solné koroze, dochází k přechodnému zvýšení pevnosti v důsledku zhutnění materiálu. V druhé fázi potom nastává přeměna ostatních hydratačních produktů za vzniku modifikací uhličitanu vápenatého a také amorfního gelu kyseliny křemičité. V této fázi se mechanické vlastnosti betonu výrazně nemění. V následující fázi dochází k překrystalizování dříve vzniklých produktů a ve struktuře se začínají vytvářet krystaly kalcitu a aragonitu. Tyto krystaly jsou objemné a jejich vznik v pórech způsobuje poškození materiálu a zhoršení mechanických vlastností. V poslední fázi je již struktura betonu značně potrhána velkými krystaly kalcitu a aragonitu, materiál ztrácí svoji pevnost a soudržnost a pH dosahuje hodnot okolo 8,3, což vede ke ztrátě ochrany ocelové výztuže před elektrochemickou korozi [40].

Rychlost karbonatace závisí na mnoha faktorech a je poměrně obtížné tento jev exaktně popsat. Velkou roli hrají vlastnosti betonu, především jeho hutnost. Vliv vlastností betonu na jeho trvanlivost je podrobněji popsán v kapitole 5. Zásadní vliv má také prostředí, ve kterém se konstrukce nachází. Koncentrace oxidu uhličitého v čistém vzduchu je cca 0,04 %, v blízkosti velkých průmyslových a zemědělských provozů, velkých měst a významných silničních tahů však může být několikanásobně větší. Na rychlost karbonatace má také velký vliv vlhkost okolního prostředí. Dle [40] je karbonatace nejvýraznější ve vlhkostním rozmezí 50–80 %. V suchém prostředí je karbonatace velmi pomalá až nulová, stejně tak ve vodou nasyceném betonu.

Poškození konstrukce karbonatácí lze ověřit aplikací fenolftaleinu na jejím povrchu. Pokud dosahuje pH betonu vyšší hodnoty než cca 9,5, dojde k fialovému zbarvení. Pro nižší hodnotu pH k zbarvení nedochází a tuto část konstrukce je třeba považovat za zkarbonatovanou.

4.2.4. Sulfatace

Sulfatace je degradační proces, ke kterému dochází v důsledku **působení vzdušného oxidu siřičitého SO₂**. Tento typ koroze je sice agresivnější než výše popsaná karbonatace, ale vzhledem k běžným koncentracím oxidu siřičitého ve vzduchu je jeho význam spíše lokální, především v oblastech s vyšším znečištěním ovzduší tímto plynem. Hydroxid vápenatý nejprve reaguje s oxidem siřičitým za vzniku hemihydrátu siřičitanu vápenatého:



V případě vyšší vlhkosti materiálu (více než cca 3%) dochází k další reakci přímo vedoucí ke vzniku sádrovce:



V případě nižší úrovně vlhkosti materiálu dochází nejprve k tvorbě hemihydrátu síranu vápenatého a teprve při dalším růstu vlhkosti se ve struktuře betonu tvoří sádrovec. Jak již bylo uvedeno výše, sádrovec vytváří v pórech materiálu velké krystaly, které při svém růstu způsobují poškození betonu. Působením oxidu siřičitého na betonové konstrukce může rovněž vznikat výše uvedený ettringit nebo monosulfát $3\text{CaO} \cdot \text{Al}_2\text{O}_3 \cdot \text{CaSO}_4 \cdot 12\text{H}_2\text{O}$. Oba tyto korozní produkty poškozují beton stejným způsobem jako sádrovec.

4.2.5. Působení dalších plynných agresivních látek

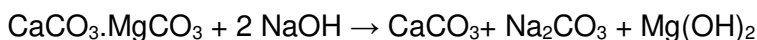
Působení plynných agresivních látek je obecně vázáno na vlhké prostředí. Škodlivost většiny agresivních plynů spočívá v jejich přeměně na kyselinu reakcí s vodou. Kyselina potom poškozují beton reakcí s hydroxidem vápenatým. Chlorovodík se tedy za přítomnosti vody přemění na kyselinu chlorovodíkovou, která potom reaguje s hydroxidem vápenatým a s dalšími hydratačními produkty za vzniku chloridů. Oxid dusičitý zase ve vlhkém prostředí přechází na kyselinu dusitou HNO₂ a dusičnou HNO₃. Kyselina dusičná potom reaguje s hydroxidem vápenatým za vzniku dusičnanu vápenatého Ca(NO₃)₂. Sulfan se za přítomnosti vody přeměňuje na kyselinu sulfanovou. Ta není příliš agresivní a vůči betonu nemá výrazné korozivní účinky. Pokud jsou však přítomny sírné bakterie, dochází ke vzniku kyseliny sírové H₂SO₄, která již reaguje s hydroxidem vápenatým za vzniku sádrovce CaSO₄·2H₂O. Fluorovodík reaguje za přítomnosti vlhkosti s hydroxidem vápenatým za vzniku fluoridu vápenatého CaF₂. Pokud se vyskytuje ve větších koncentracích, atakuje také silikátové a aluminátové složky cementového tmele za vzniku fluorokomplexů. Tyto reakce mohou vést až ke ztrátě soudržnosti materiálu.

4.3. Koroze kameniva

Kamenivo může být, stejně jako cementový tmel, degradováno několika korozními mechanismy. Některé složky kameniva mohou být z betonu vyluhovány. Příkladem je kamenivo s obsahem sádrovce, který je vyluhovatelný čistou vodou nebo kamenivo na bázi vápence a dolomitu, které je porušováno kyselými látkami. Vyluhováním složek kameniva dochází ke zvýšení pórovitosti a tím pádem ke snížení hutnosti a pevnosti.

Dalším korozním mechanismem je tvorba objemných produktů ve struktuře betonu. K té dochází nejčastěji při alkalicko-karbonátové nebo alkalicko-křemičité reakci. **Alkalicko-karbonátová reakce** vzniká působením alkálií obsažených v pórovém roztoku cementového tmele

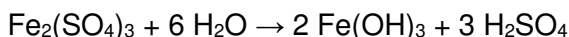
(NaOH, KOH) na určité druhy dolomitických vápenců, které jsou nazývány expanzivními dolomitickými vápenci. Obvykle se jedná o horniny s jemnozrnnou strukturou tvořenou mikritem a jílovými minerály a s většími krystaly dolomitu. Tato reakce je také označována jako dedolomitizace kameniva. Lze ji popsat následující chemickou rovnicí:



Reakce bývá poměrně prudká, projevuje se vznikem výrazných prasklin a dochází k ní obvykle dosti brzy po realizaci konstrukce (cca 5 let).

Objemné produkty vznikají také v případě **alkalicko-křemičité reakce**, která je způsobena přítomností kameniva obsahujícího amorfni oxid křemičitý SiO_2 . Oxid siřičitý reaguje s alkáliemi přítomnými v pórovém roztoku betonu za vzniku objemného alkalickosilikátového gelu. Tento typ koroze se projevuje neusměrněnými větvenými trhlinkami, v jejichž bezprostřední blízkosti je zvýšená vlhkost. V některých případech může dokonce docházet k vytlačování kapiček gelu na povrch betonové konstrukce. Tato reakce se projevuje později než alkalicko-karbonátová reakce, obvykle cca po 10 letech od realizace konstrukce.

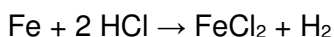
Korozi podléhá také kamenivo s obsahem pyritu. Ten může za vhodných podmínek oxidovat dle následujících reakcí:



Konečnými produkty jsou tedy hydroxid železitý a kyselina sírová, která může dále způsobovat sádrovcovou nebo sulfoaluminátovou korozi.

4.4. Koroze výztuže

Ke korozi výztuže může docházet buďto chemickým nebo elektrochemickým působením, přičemž elektrochemická koroze je mnohem častější případ. **Chemická koroze** může nastat v agresivním prostředí, nejčastěji působením kyselin na ocelovou výztuž. Příkladem je reakce s kyselinou chlorovodíkovou:



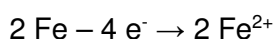
Není souhlas autora.

Typickým případem koroze ocelové výztuže je však **koroze elektrochemická**, jejíž princip spočívá v tvorbě lokálních elektrochemických článků vznikajících v důsledku rozdílných potenciálů při jakékoli nestejnorodosti v betonu či ve výztuži. Nestejnorodostí může být například rozdíl v tloušťce krycí vrstvy, lokální vlhkosti a teplotě materiálu, nerovnoměrnosti ve struktuře betonu (nestejněměrná hutnost), rozdíly v míře zkarbonatování, trhliny či odlišné napětí ve výztuži na různých místech v konstrukci.

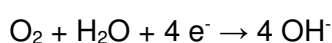
Obrázek 4.4: Koroze ocelové výztuže [21]

Při elektrochemické korozi ocelové výztuže dochází k přechodu železa z elementárního stavu Fe^0 ve vyšší oxidační stavy Fe^{2+} a Fe^{3+} . Tyto ionty potom dále reagují za tvorby produktů s větším objemem než byl objem původních látek. V důsledku toho dochází ke vzniku vnitřního napětí, což může vést až k odprýsknutí betonové krycí vrstvy.

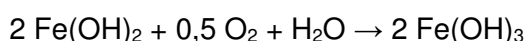
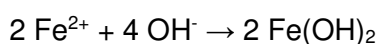
Z hodnoty redoxního potenciálu plyne, že se železo chová jako silné redukční činidlo. Redoxní potenciál je veličina určující míru oxidačních nebo redukčních podmínek v systému, její záporná hodnota značí redukční prostředí, kladná hodnota prostředí oxidační. Čím má tedy redoxní potenciál kovu zápornější hodnotu, tím snáze tento kov uvolňuje elektrony. Redoxní potenciál přechodu Fe^0 na Fe^{2+} je $-0,44$ V. Poměrně snadno tedy dochází k odštěpení elektronů při oxidační reakci probíhající na anodě:



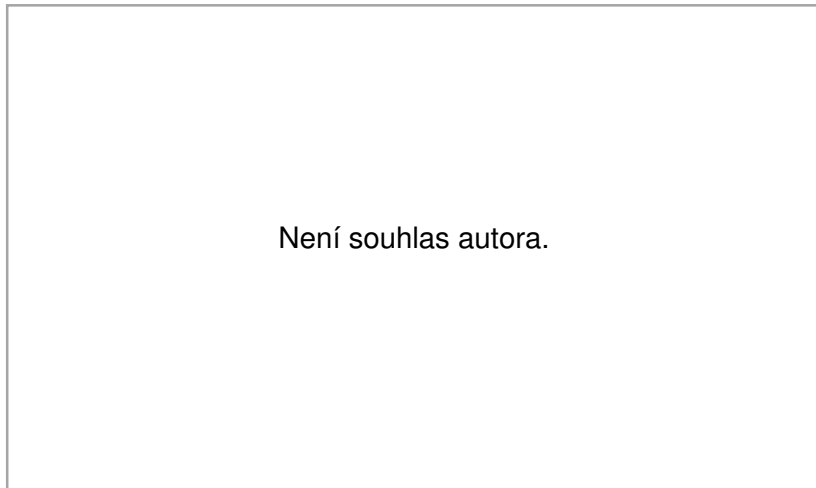
Na katodě dochází k redukční reakci, pro kterou jsou elektrony dodávány z reakce na anodě.



Vzniklé ionty následně vytvářejí hydroxid železnatý, který pak dále oxiduje na hydroxid železitý dle následujících reakcí.



Koroze ocelové výztuže je podmíněna hodnotou pH pórového roztoku. Podmínky, za kterých ke korozi dochází, znázorňuje **Pourbaixův diagram** uvedený na obr.4.5



Obrázek 4.5: Pourbaixův diagram [38]

Svislé ose diagramu přísluší napětí na výztuži, vodorovné ose hodnota pH. Pokud je na výztuži elektrické napětí menší než -600 mV, ocel nekoroduje. Při vyšším napětí je již možnost koroze závislá na pH okolního prostředí. Při hodnotách pH vyšších než cca 9 je výztuž chráněna pasivační vrstvou. V tomto případě je rychlost koroze zanedbatelná – cca $0,1$ μm za rok, přičemž po ztrátě pasivace bývá korozní rychlost větší než 10 μm za rok.

Pasivační vrstva vzniká krátce po hydrataci samovolně na povrchu oceli a je tvořena převážně oxidem železitým Fe_2O_3 . Je velmi tenká a má amorfni až mikrokystalický charakter. Funguje jako bipolární membrána, tedy vrstva, která brání průchodu kladných i záporných iontů: aniontů z elektrolytu a kationtů z kovu. Po snížení pH v důsledku karbonatce dochází

k depasivaci výztuže a k její korozi. Depasivaci může také způsobit přítomnost **chloridů**, a to i v případě nezkarbonatovaného betonu. Chloridy působí jako katalyzátor rozkladných reakcí poškozujících pasivační vrstvu. Prahová koncentrace chloridů, při které již dochází ke ztrátě pasivace, závisí především na vlastnostech struktury betonu a jeho chemickém složení, dále také na jakosti povrchu výztuže, ošetřování čerstvého betonu a podmínkách okolního prostředí (vlhkost, teplota).

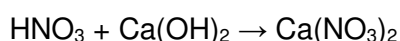
Hodnoty prahové koncentrace chloridů jsou obvykle stanovovány na základě experimentů, pro teoretický výpočet jsou k dispozici pouze vztahy pro přibližný odhad [18]. Prahová koncentrace se obvykle udává jako procentní obsah vzhledem k obsahu cementu, možné je však i vyjádření poměru chloridových iontů k iontům hydroxidovým.

Rychlost koroze oceli je také závislá na podmínkách okolního prostředí, největších hodnot dosahuje při vlhkosti prostředí v rozmezí 70–90 %. Při nižší vlhkosti se zpomaluje kvůli vyššímu měrnému odporu betonu, při vyšší vlhkosti je omezen průnik kyslíku k výztuži póry betonu, protože jsou póry částečně vyplněny vodní párou.

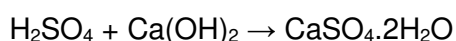
4.5. Biokoroze betonu

Někdy může být beton poškozován také působením organismů. Přestože se nejedná o typický případ korozního vlivu, může být trvanlivost konstrukce negativně ovlivněna přítomností organismů, které mají na materiál škodlivý chemický nebo fyzikální účinek.

Nejnebezpečnější je pro beton působení sirných a nitrifikačních bakterií. Nitrifikační bakterie, mezi které patří například *Nitrosomonas*, *Nitrosospira* nebo *Nitrosovibrio* [40], dokáží oxidovat amoniak NH_3 na kyselinu dusičnou HNO_3 , která potom reaguje s hydroxidem vápenatým a postupně tak rozkládá cementový tmel.



Sirné bakterie zase přeměňují sulfan H_2S na kyselinu sírovou H_2SO_4 , která potom s hydroxidem vápenatým tvoří sádrovec.



Zástupci sirných bakterií jsou například *Acidithiobacillus novellus*, *Acidithiobacillus thioeparus* nebo *Acidithiobacillus thiooxidans* [40]. Tyto případy koroze jsou typické zejména pro konstrukce, které přicházejí do styku s odpadními vodami.

Beton může být poškozován také plísněmi, řasami, mechy a lišejníky. V případě těchto organismů se nejčastěji jedná o kombinaci chemického a fyzikálního působení. Tyto organismy podporují hromadění vlhkosti v bezprostřední blízkosti konstrukce. Při snížení okolní teploty potom dochází k zamrznání vody v pórech a k poškozování struktury betonu vnitřními tlaky. Tyto organismy také často produkují různé organické kyseliny, které mohou reagovat s hydroxidem vápenatým. Z tohoto hlediska je výrazněji škodlivá například plíseň *Aspergillus niger*, která produkuje kyseliny glukonovou a šřavelovou. Výskyt této plísně je typický pro zemědělské a potravinářské provozy.

5. Faktory ovlivňující trvanlivost železobetonových konstrukcí

5.1. Struktura materiálu

Struktura betonu má na jeho trvanlivost zásadní vliv. Určuje totiž odolnost materiálu vůči vniknutí plynů, vody a agresivních chemických látek. **Propustnost** betonu je tedy podstatným faktorem ovlivňujícím životnost konstrukce. Matematické modely popisující obvyklé degradační vlivy (karbonatace, působení chloridů) jsou založeny na difuzi, často tedy pracují s difuzním koeficientem. To je konstanta charakterizující, jak snadno daná látka difunduje daným prostředím. Na tomto místě je třeba zmínit, že v případě betonu se ne vždy jedná o konstantu – difuzní koeficient se může v čase měnit například z důvodu probíhající karbonatace. Matematické modely některých degradačních jevů jsou podrobněji popsány v kapitole 6. Následující kapitola byla zpracována převážně s využitím zdrojů [25], [29] a [38].

Propustnost betonu je dána jeho otevřenou pórovitostí. Ve struktuře betonu lze rozlišit několik **druhů pórů** podle jejich velikosti a původu:

- gelové póry
- kapilární póry
- provzdušňovací póry
- technologické póry
- póry v kamenivu

Na obr. 5.1. je znázorněno schéma struktury cementového tmele.



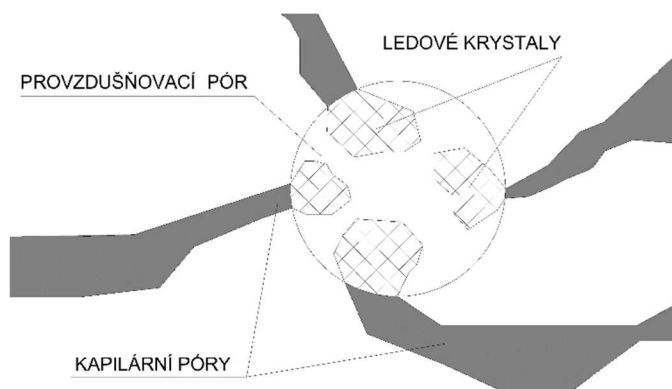
Obrázek 5.1: Schéma struktury cementového tmele [52]

Gelové póry vznikají jako mezery mezi útvary hydratačních produktů a také jako mezery mezi vrstvami C-S-H gelu. Jejich velikost se pohybuje přibližně od 0,05 nm do 10 nm. Kvůli jejich velikosti a nízké míře vzájemné propojenosti jsou tyto póry pro vodu nepropustné a na trvanlivost materiálu mají menší vliv. Odolnost konstrukce vůči vniku agresivních látek však mohou ovlivnit vznikem smršťovacích trhlin, protože mají významný vliv na dotvarování a smršťování.

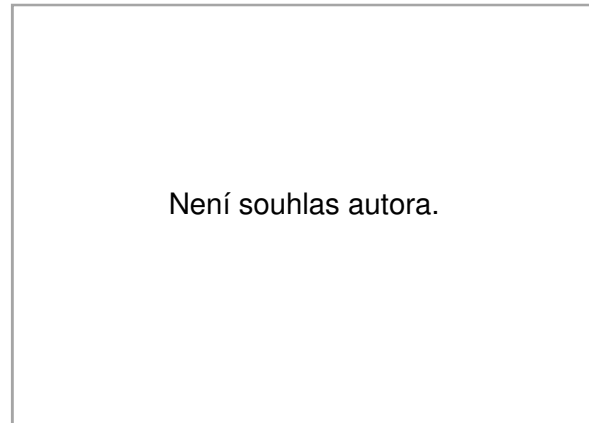
Kapilární póry jsou prostory mezi cementovými zrny, které nejsou vyplněny hydratačními produkty. Jejich objem tedy klesá s postupujícím růstem hydratačních produktů. Tyto póry jsou obvykle hlavní složkou celkové pórovitosti betonu a jejich velikost se u betonů s nižším vodním součinitelem obvykle pohybuje mezi 10 – 50 nm. V případě betonů s vyšším vodním součinitelem je jejich velikost větší, může dosahovat až 5 μm .

Provzdušňovací póry jsou uzavřené dutinky přibližně kulového tvaru o velikosti 50 – 200 μm . Tyto póry jsou záměrně vytvořené pro zvýšení odolnosti betonu vůči mrazu a rozmrazování. Optimální vzdálenost těchto pórů je 100 – 300 μm . Póry tvoří prostor pro růst ledových krystalů a omezují tak vnitřní krystalizační tlak na stěny kapilárních pórů. Póry jsou vytvářeny přidávkou provzdušňujících přísad do betonové směsi. Mezi provzdušňující přísady patří syntetické tenzidy, soli kyseliny naftenové, mastné a pryskyřičné kyseliny a jejich soli a pryskyřice na bázi dřeva, jejichž použití v současné době převládá [25]. Schéma účinku provzdušnění a detail struktury provzdušněného betonu jsou na obr. 5.2. a 5.3.

Technologické póry jsou největšími póry ve struktuře betonu, jejich velikost dosahuje až 3 mm. Tyto póry vznikají zachycením vzduchu při ukládání čerstvé betonové směsi a v důsledku nedostatečného ztuhnutí. Tyto póry mají velký vliv na trvanlivost betonu a jejich přítomnost je nežádoucí.



Obrázek 5.2: Schéma účinku provzdušnění



Obrázek 5.3: Detail struktury provzdušněného betonu [57]

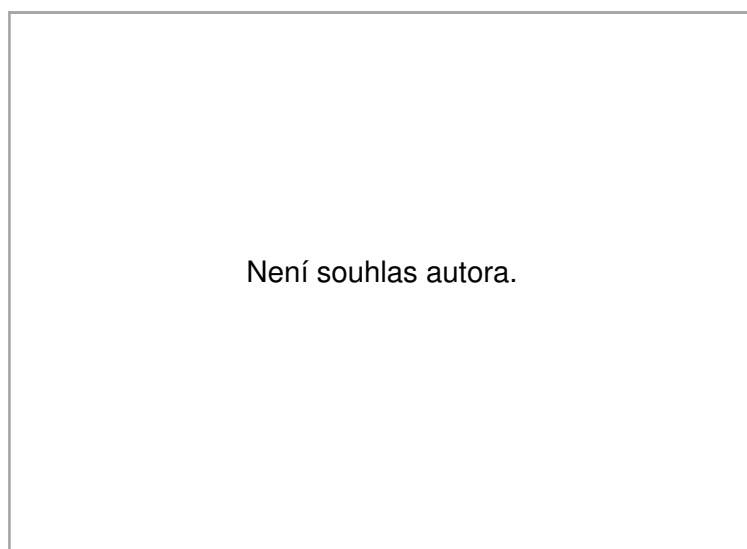
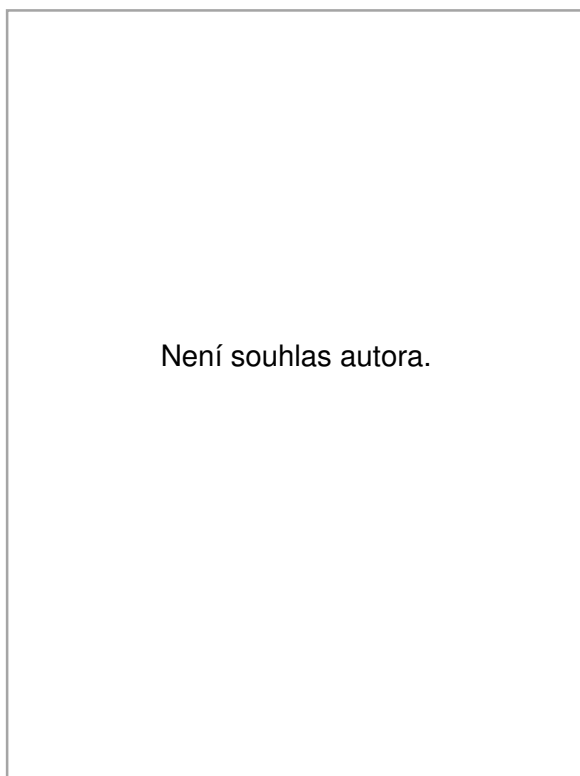
Na pórovitost betonu má vliv mnoho faktorů, mezi nejvýznamnější patří:

- poměr hmotnosti cementu a vody (vodní součinitel)
- vlastnosti kameniva
- přísady
- příměsi

- druh a jemnost mletí cementu
- stupeň hydratace
- ošetřování betonu
- zhutnění
- obsah vzduchových pórů

Vodní součinitel má na pórovitost zásadní vliv. Čím více vody betonová směs obsahuje, tím větší je množství hydratačních produktů. Toto ovšem platí jen do určité hodnoty, při které dojde ke zhydratování všech cementových zrn. K tomu dochází při hodnotě vodního součinitele cca 0,38. Při menší hodnotě vodního součinitele obsahuje struktura určité množství nezhydratovaných cementových zrn, při větší hodnotě potom vzrůstá množství kapilárních pórů v důsledku větší vzájemné vzdálenosti cementových zrn. Větší hodnota vodního součinitele se nejvíce projevuje ve styčné zóně mezi cementovým tmelem a kamenivem (interfacial zone). Dochází zde k tvorbě rozměrných krystalů hydroxidu vápenatého a ettringitu, přičemž hydroxid vápenatý má zde tendenci krystalizovat ve vrstvách kolmo orientovaných k povrchu kameniva. To je příčinou větší pórovitosti cementového tmele v této zóně. [29] Závislost permeability na vodním součiniteli znázorňuje graf na obr. 5.5.

Stupeň hydratace narůstá s časem. Postupně dochází k růstu hydratačních produktů a k vyplňování prostoru mezi cementovými zrny. S postupující hydratací tedy nastává zhuštění struktury cementového tmele a snížení pórovitosti. Při hydrataci je třeba udržovat vhodné podmínky z hlediska teploty a vlhkosti pro získání co nejhutnější struktury a omezení vzniku trhlin. Závislost permeability na stupni hydratace znázorňuje graf na obr. 5.4.



Obrázek 5.4: Závislost permeability na stupni hydratace [13]

Obrázek 5.5: Závislost permeability na vodním součiniteli [44].

Vlastnosti kameniva ovlivňují pórovitost několika způsoby. Pórovitost kameniva pro běžný beton bývá obvykle relativně malá, tudíž nemá podstatný vliv na celkovou pórovitost betonu. Obvyklé hodnoty pórovitosti kameniva jsou cca 1–5 %. Nejvýznamnější vlastností kameniva z hlediska výsledné pórovitosti je jeho granulometrie, tedy rozdělení velikosti zrn. Důležitý je také tvar zrn kameniva. V případě velkého obsahu rozměrných zrn kameniva nebo v případě obsahu plochých zrn dochází ke zvýšení množství vody v okolí zrn a tím ke zvětšení pórovitosti v těchto oblastech. Vliv na pórovitost může mít také chemické složení kameniva. Při použití vápencového nebo dolomitického kameniva dochází k chemické reakci mezi složkami kameniva a cementovým tmelem. Vznikají přitom karboalumináty a vápenaté komplexní sloučeniny, které zhutňují strukturu ve styčné zóně mezi kamenivem a cementovým tmelem. [29]

Druh a jemnost mletí cementu ovlivňují průběh hydratace, mají tedy vliv i na vývoj pórovitosti cementového tmele v čase. Portlandský cement hydratuje rychleji než cementy směsné, dochází tedy k rychlejšímu poklesu pórovitosti. V případě použití hruběji mletého cementu jsou vzdálenosti mezi jednotlivými cementovými zrny větší, tudíž je třeba delší doby pro vyplnění kapilárních pórů hydratačními produkty a pokles pórovitosti je nižší než u jemně mletých cementů. [12].

Latentně hydraulické **příměsi**, mezi které patří například popílek, mikrosilika, struska a přírodní pucolány (pemza, tufy, tras, křemelina) snižují pórovitost cementového tmele. Zhuštění struktury se projevuje zejména ve styčné zóně mezi cementovým tmelem a kamenivem. Jemnozrné příměsi vyplňují póry v betonu a tím přispívají k jeho hutnosti.

Mezi **přísady** ovlivňující pórovitost patří především plastifikátory, superplastifikátory a provzdušňující přísady, o nichž bylo pojednáno výše. Plastifikátory a superplastifikátory jsou polymerní látky, které zvyšují zpracovatelnost betonové směsi a tím umožňují snížení vodního součinitele. Jejich použití má tedy příznivý vliv na hutnost cementového tmele. Plastifikátory působí na povrchu cementových zrn, kde vytváří záporný elektrický náboj. Díky tomu dochází ke vzájemnému odpuzování cementových zrn a k lepšímu tečení materiálu. Mezi plastifikátory se řadí například kyselina lignosulfonová a hydroxycarboxylová a jejich soli. Superplastifikátory jsou účinnější než plastifikátory a působí dvojnásobem. Kromě tvorby negativního elektrického náboje na povrchu cementových zrn způsobují také prostorovou blokáci molekulami vody. Mezi superplastifikátory patří především modifikované lignosulfonany (MLSs), sulfonované melaminformaldehyd kondenzáty (SMFs), sulfonované naftalenformaldehyd kondenzáty (SNFs), polykarboxyláty (PCLs), polyakryláty, akrylové ethery (PCE - polycarboxylatethery) a sulfonované polystyreny. [25].

Obsah vzduchu závisí na způsobu ukládání betonové směsi a na kvalitě zhutnění a dále na použití provzdušňujících přísad. Důvody pro použití provzdušňujících přísad byly popsány výše. Kvalitním **zhutněním** jsou eliminovány technologické póry a dochází také ke snížení množství kapilárních pórů, protože je snížena vzájemná vzdálenost mezi cementovými zrny.

Ošetřování betonu je důležité kvůli zabránění rychlému vysychání, které by mohlo negativně ovlivnit probíhající hydrataci. Ošetřování má význam pro trvanlivost také z důvodu omezení vzniku smršťovacích trhlin.

5.2. Chemické složení cementu

Chemické složení cementu ovlivňuje průběh hydratace cementového tmele, jak již bylo popsáno v předcházející kapitole. Má však také významný vliv na odolnost betonu vůči agresivnímu prostředí. Existuje pět základních druhů cementu:

- CEM I – portlandský cement
- CEM II – portlandský cement směsný
- CEM III – vysokopecní cement
- CEM IV – pucolánový cement
- CEM V – směsný cement

Dále jsou vyráběny speciální cementy pro zvláštní podmínky použití.

V případě agresivního prostředí není vhodné volit portlandský cement CEM I, protože jeho odolnost vůči chemickým vlivům je ve srovnání s jinými typy cementu malá. Portlandský cement směsný zahrnuje několik typů cementu dle použité příměsi. Cement s obsahem strusky má obecně vysokou odolnost vůči agresivnímu prostředí, cement s obsahem pucolánu disponuje větší odolností vůči uhličitánovým a odpadním vodám, cement s kalcinovanou břidlicí je vhodný pro konstrukce vystavené působení chemikálií (chemické provozy). Cement s příměsí vápence dobře odolává degradačním účinkům plísní, je tedy vhodný pro konstrukce v potravinářských a zemědělských provozech.

Vysokopecní cement CEM III obsahuje větší množství vysokopecní strusky. Zahrnuje tři typy cementu, které se liší obsahem strusky. Typ A obsahuje strusku z 35–65 % a je vhodný především pro konstrukce, které jsou ve styku se zemínou (základy, suterénní stěny). Typ B obsahuje 66–80 % strusky a používá se pro konstrukce vystavené agresivním látkám, například síranovým vodám nebo organickým kyselinám. Typicky se tedy používá například pro kanalizace nebo sila. Typ C obsahuje strusky z 81–95 % a je využíván pro konstrukce vystavené vysokým teplotám (například konstrukce v blízkosti pecí) nebo pro konstrukce zhotovované za velmi horkého počasí.

Pucolánový cement CEM IV dobře odolává uhličitánovým a slatinným vodám. Také je vhodný pro konstrukce, které přicházejí do styku s mořskou vodou. V současné době se v ČR nevyrábí. [50]

Ze speciálních cementů má zvláštní vlastnosti z hlediska trvanlivosti síranovzdorný cement. Tento cement má snížený obsah tricalcium silikátu C_3S , kterého smí obsahovat maximálně 3,5 %. Tento cement se používá v případě konstrukcí vystavených silnému degradačnímu vlivu síranů pro zabránění síranové korozi (vznik druhotného ettringitu). Jeho použití je typické pro konstrukce vystavené působení odpadních vod nebo mořské vody.

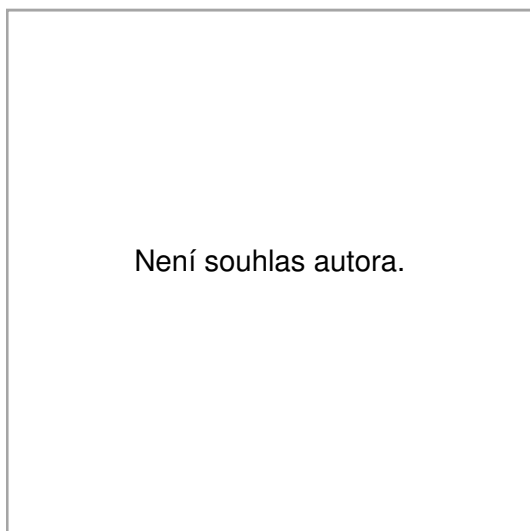
V případě kameniva obsahujícího reaktivní křemen je nutné použít speciální cement s nízkým obsahem alkalií (low-alkali cement). Použití tohoto cementu zabraňuje vzniku alkalicko-křemičité reakce popsané v kapitole 4.3.

Druh použitého cementu má vliv také na odolnost betonu vůči průniku chloridů. Výzkumy ukazují [23], že z tohoto hlediska je nejvhodnější cement s obsahem strusky – beton, ve kterém byl tento cement použit, vykazoval nejnižší difuzní koeficient pro chloridy. Nízkého difuzního koeficientu pro chloridy bylo také dosaženo v případě použití síranovzdorného cementu. Nejhorší výsledky z hlediska propustnosti pro chloridy byly dosaženy při použití portlandského cementu.

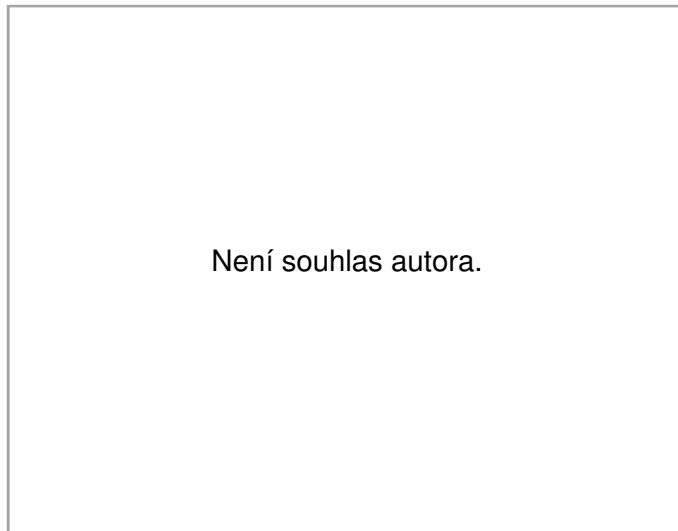
5.3. Vlastnosti kameniva

O vlivu kameniva na celkovou pórovitost betonu bylo již pojednáno v kapitole 5.1. Kamenivo však kromě propustnosti ovlivňuje i další vlastnosti významné pro trvanlivost. Vlivy mohou být fyzikální i chemické.

Mezi fyzikální vlastnosti kameniva ovlivňující trvanlivost patří především odolnost proti abrazi a mrazuvzdornost. **Otěruvzdornost** kameniva je nejčastěji hodnocena pomocí zkoušky Los Angeles abrasion test (obr.5.6.). Při této zkoušce je vzorek kameniva umístěn do rotujícího bubnu obsahujícího ocelové kuličky. Měří se úbytek materiálu ze zrn kameniva. Otěruvzdornost je ovlivněna především tvrdostí a pórovitostí kameniva. Pro konstrukce vystavené abrazi je nejvhodnější čedičové kamenivo, vhodný je také granit či granodiorit. Sedimentární horniny, jako jsou vápence či dolomity, jsou pro takové aplikace méně vhodné. [41]



Obrázek 5.6: Zařízení pro zkoušku kameniva otěruvzdornosti kameniva [50]



Obrázek 5.7: Vztah mezi pórovitostí a množstvím potrháných zrn [17]

Mrazuvzdornost kameniva se obvykle určuje procentem potrháných zrn po určitém počtu zmrazovacích cyklů, při kterých je kamenivo na určitou dobu vystaveno teplotám mezi - 30 až - 35 °C. Mrazuvzdornost je ovlivněna především pórovitostí kameniva. Dle experimentálních výzkumů vykazuje kamenivo značnou mrazuvzdornost do pórovitosti cca 2 %. Naopak při pórovitosti větší než 11 % má kamenivo odolnost velmi malou [20]. Vztah mezi pórovitostí kameniva a množstvím potrháných zrn po čtyřech zmrazovacích cyklech znázorňuje graf na obr. 5.7. Vyvřelé a metamorfované horniny mají obecně větší mrazuvzdornost než horniny sedimentární, přičemž ze sedimentárních hornin se jeví nejlépe vápenec, nejhůře dolomit.

Chemické vlastnosti kameniva se projevují v případě působení kyselin na beton. V tomto případě je zcela nevhodné použití hornin, které jsou rozpustné v kyselinách, jako je dolomit nebo vápenec.

Složení kameniva může také vyvolat některé druhy degradace. O mechanismu **alkalicko-křemičité reakce** bylo již pojednáno v kapitole 4.3. Nebezpečí tohoto typu koroze hrozí v případě

použití kameniva obsahujícího amorfni oxid křemičitý SiO_2 . Jedná se například o opál, chalcedon, fylity, rohovec, tridymit nebo cristobalit.

Nebezpečí může pro beton představovat také kamenivo obsahující větší množství síranů nebo kamenivo znečištěné sádrou (například v případě recyklovaných materiálů). Při jeho použití hrozí **síranová koroze** vyvolaná vnitřním zdrojem síranů, která je označována zkratkou ISA (internal sulfate attack). Obvykle dochází k dodatečné tvorbě ettringitu ve struktuře betonu (delayed ettringite formation, DEF). K tomuto jevu může dojít na základě dvou mechanismů [8]:

- tepelný rozklad ettringitu a následně jeho opětovná tvorba
- vznik mikrotrhlin ve struktuře betonu, pozdější uvolňování síranů a tvorba ettringitu za přítomnosti vody

Při dodatečné tvorbě ettringitu potom dochází k potrhání struktury materiálu v důsledku působení velkých krystalizačních tlaků.

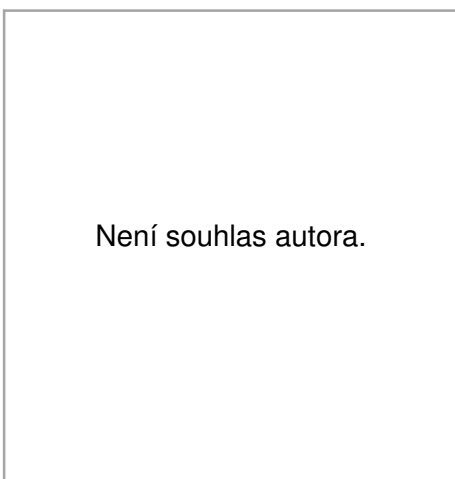
5.4. Ochrana výztuže před korozi

5.4.1. Použití výztuže z korozi vzdorné oceli

Výztuž může být chráněna před korozi několika způsoby. Jednou z možností je použití výztuže z **nerezové oceli**. Nerezová ocel je vysoce legovaná ocel, která disponuje větší odolností vůči chemické i elektrochemické korozi. Mezi nejčastější legury patří chrom, nikl, mangan a molybden. Při použití této výztuže je prahová koncentrace chloridů přibližně 10 x větší než při použití běžné výztuže. Nárůst trvanlivosti takové konstrukce je tedy značný, nevýhodou je však velmi vysoká cena výztuže z nerezové oceli (cca 4–10 x dražší než běžná ocel). Výztuž z nerezové oceli se používá především v případě rekonstrukcí.

5.4.2. Žárové pozinkování výztuže

Další možností ochrany výztuže před korozi je aplikace **zinkového povlaku**. Povlak se vytváří ponořením ocelové výztuže do zinkové lázně o teplotě cca 440-460 °C. Při ponoření dojde k metalurgické reakci mezi zinkem a železem a vznikne slitinový difuzní povlak, ve kterém obsah železa klesá směrem k povrchu. V mikrostruktuře povlaku lze rozlišit několik vrstev:

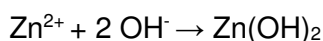


- η – vrchní vrstva obsahující téměř čistý zinek
- ζ – vrstva tvořená dlouhými krystaly kolnými k povrchu výztuže, s vysokou tvrdostí a obsahem železa 5,8 – 6,7 %
- δ – vrstva tvořená kratšími krystaly, s nejvyšší tvrdostí a obsahem železa 7 – 11 %
- Γ – spodní vrstva obsahující větší množství železa, cca 21 – 28 %

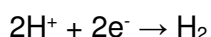
Obrázek 5.8: Detail mikrostruktury zinkového povlaku [29]

Tloušťka zinkové vrstvy se pohybuje v rozmezí 35-120 μm , délka ponoření v lázni ovlivňuje pouze tloušťku vrchní vrstvy η . Detail mikrostruktury zinkového povlaku je na obr. 5.8.

Mechanismus ochrany je v případě zinkového povlaku dvojitý. Zinek vytváří bariérovou ochranu pro ocelovou výztuž, jeho odolnost vůči působení chloridů je cca 2 – 4x větší a odolává korozi až do hodnoty pH cca 7. Dále vytváří zinek pro ocelovou výztuž galvanickou ochranu, která je funkční i v případě lokálního porušení ochranného povlaku. Zinek působí jako anoda, na které probíhají následující chemické reakce:



Na anodě potom probíhá reakce, při které vzniká plynný vodík:

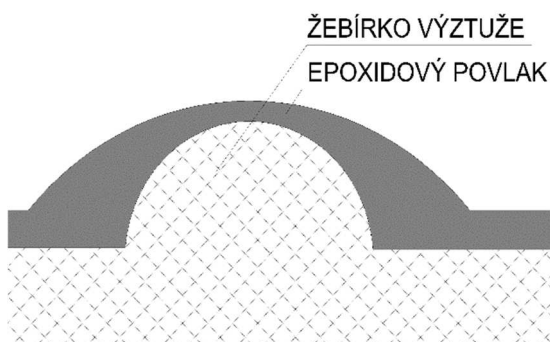


Uvolňování plynného vodíku je však nevýhodou tohoto druhu ochrany. Vznikající bublinky zvyšují pórovitost cementového tmele v zóně přiléhající k výztuži a tím snižují velikost styčné plochy na rozhraní obou materiálů. Dochází tak ke **snižování soudržnosti** mezi betonem a výztuží. [32].

5.4.3. Povlaková ochrana výztuže

Výztuž může být před korozi chráněna také vrstvou **epoxidu**, popřípadě epoxyesteru nebo akrylátu. Tyto povlaky působí na principu bariérové ochrany výztuže. Ochranná vrstva je obvykle nanášena metodou elektrostatického nebo elektrokinetického práškování. Obvyklá tloušťka ochranné vrstvy je 20 - 400 μm .

Nevýhodou tohoto způsobu ochrany je vysoká citlivost povlakované výztuže na **mechanické poškození** při manipulaci, zejména při ukládání do konstrukce a při ohýbání. Korozi potom může způsobit i lokální porušení ochranné vrstvy. K poškození může dojít i při dlouhodobém vystavení výztuže působení mrazu.



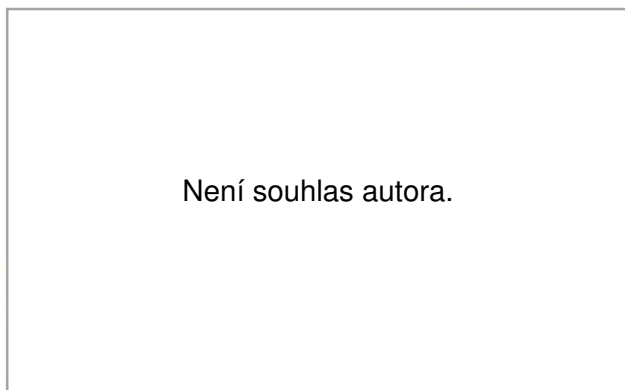
Další nevýhodou je **snižování soudržnosti** mezi betonem a výztuží, ke kterému dochází ze dvou příčin. Při namáhání konstrukce dochází k pružnému přetváření povlaku na žebříkách, což způsobuje určitý prokluz. Druhou příčinou je vyhlazení žebírek naneseným povlakem. Povlak na žebříkách totiž obvykle nemá po celém povrchu stejnou tloušťku, na vrchu žebírek bývá slabší, u jejich paty zase silnější (obr. 5.9.) [54].

Obrázek 5.9: Schéma vyhlazení žebírek výztuže epoxidovým povlakem

5.4.4. Katodová ochrana výztuže

Při ochraně výztuže železobetonových konstrukcí před korozi lze použít také elektrochemický způsob ochrany – katodovou ochranu výztuže. Tento způsob ochrany je založen na vyvození takového elektrického napětí ve výztuži, které způsobí její imunitu vůči korozi. Pro ochranu se použije vnější zdroj napětí uložený mimo konstrukci. Výztuž se připojí k zápornému pólu, kladný pól se připojí k nerozpustné anodě, kterou je třeba umístit do konstrukce. Schéma připojení

je na obr. 5.10. Jako anoda slouží obvykle síť z grafitu, titanu, olova nebo nerezové oceli. Nevýhodou tohoto způsobu ochrany je nutnost trvalého přísunu elektrického proudu.



Obrázek 5.10: Schéma principu katodové ochrany ocelové výztuže [21]

5.5. Vlastnosti konstrukce

V neposlední řadě je trvanlivost ovlivněna vlastnostmi samotné konstrukce. Významný vliv má tvar a celkové uspořádání konstrukce. V rámci celého objektu je podstatné, zda jsou konstrukce chráněny kvalitně provedenou hydroizolací a zda nemůže v některých místech docházet k hromadění vody. Pokud je konstrukce vystavena působení vody, bývá více ohrožena některými druhy koroze – působení mrazu, v případě agresivních vod také různými druhy chemické koroze.

Pro trvanlivost je dále zásadní **vznik trhlin**, který souvisí s namáháním konstrukce a také s faktory ovlivňujícími smršťování. Při návrhu je třeba ověřit šířku trhlin ohýbaných prvků a také co nejvíce eliminovat možný vznik smršťovacích trhlin. Významným faktorem pro trvanlivost je také **tloušťka krycí vrstvy** a případně další vrstvy chránící konstrukci, například omítka. Důležité je vždy kvalitní provedení konstrukce, řádné zhutnění betonu a také jeho ošetřování.

6. Matematické modelování životnosti železobetonových konstrukcí

Životnost železobetonových konstrukcí není snadné určit, protože ji ovlivňuje velké množství faktorů. Existují však mnohé matematické modely, s jejichž pomocí lze životnost alespoň přibližně stanovit. Univerzální model, pomocí něhož by bylo možné přímo určit životnost, zatím nebyl navržen. Takový model by byl velmi složitý, protože by bylo nutno do něj zahrnout velké množství parametrů týkajících se nejen konstrukce, ale i okolního prostředí. Existující modely se zabývají nejvýznamnějšími jevy rozhodujícími o životnosti železobetonové konstrukce:

- karbonatace
- působení chloridů
- koroze ocelové výztuže

V této kapitole jsou shrnuty nejobvyklejší matematické modely popisující uvedené jevy.

6.1. Modely karbonatace

Modelů popisujících časový průběh karbonatace existuje velké množství, protože tento degradační jev je považován v rámci železobetonových konstrukcí za nejvýznamnější. Pro trvanlivost konstrukce je zásadní doba, za kterou dojde vlivem karbonatace k depasivaci ocelové výztuže – tedy doba, za kterou zkarbonatovaná vrstva dosáhne úrovně výztužných vložek. Tato doba je v literatuře označována jako iniciační čas t_i . Modely potom popisují závislost tloušťky zkarbonatované vrstvy na čase.

Fyzikální podstatou těchto modelů je difuze, vycházejí tedy z **II. Fickova zákona**, který je popsán diferenciální rovnicí:

$$\frac{\partial c}{\partial t} = D \cdot \frac{\partial c^2}{\partial x^2}$$

kde c je koncentrace, t čas a x vzdálenost, v tomto případě vzdálenost od povrchu.

Tloušťku zkarbonatované vrstvy lze tedy určit ze vztahu:

$$x_c = A \cdot \sqrt{t}$$

kde x_c je tloušťka zkarbonatované vrstvy (mm), t je uplynulý čas (roky) a A je parametr spočtený dle použitého modelu. Právě parametrem A se jednotlivé modely liší.

Všechny modely obsahují parametr, který zohledňuje druh použitého betonu. Nejčastěji se jedná o hodnotu vodního součinitele nebo pevnost v tlaku. Některé modely pracují s hodnotami hmotností jednotlivých složek betonu a s jejich objemovými hmotnostmi. Někdy bývá také zohledněn druh použitého cementu. Často jsou potom zohledněny také vlivy prostředí, zejména vlhkost a obsah oxidu uhličitého ve vzduchu.

Model, který je v současnosti považován za nejkompexnější, zahrnuje podrobnější údaje o složení betonu a hodnotu koncentrace oxidu uhličitého. Jedná se o **model podle Papadakis a kol.** z roku 1992 [31].

$$A = \sqrt{\frac{2[CO_2] \cdot D_{e,CO_2}}{[CH] + 3[CSH]}}$$

kde D_{CO_2} je efektivní difuzní koeficient CO_2 v betonu (m^2/s), $[CO_2]$ je koncentrace CO_2 v okolním prostředí (mol/m^3), $[CH]$ je molární koncentrace $Ca(OH)_2$ a $[CSH]$ je molární koncentrace hydratovaných calciumsilikátů vápenatých. Model platí pro beton, ve kterém již proběhla podstatná část hydratace a který má konstantní difuzní koeficient, konstrukce by se tedy měla nacházet v relativně stálém prostředí. Nicméně, model pro kolísavé podmínky okolního prostředí zatím nebyl vytvořen. V případě použití tohoto modelu pro konstrukci v nestálých podmínkách je tedy třeba pohlížet na výsledky s rezervou. Výpočet difuzního koeficientu je poměrně náročný a vyžaduje podrobnější informace o použitém materiálu. Lze však použít i zjednodušenou verzi tohoto modelu, která je založena na obsahu jednotlivých složek v betonové směsi a na okolní vlhkosti:

$$A = 350 \cdot \frac{\rho_c}{\rho_v} \cdot \frac{(w - 0,3)}{(1 + w \cdot \frac{\rho_c}{\rho_v})} \cdot f_{RH} \cdot \sqrt{\left(1 + \frac{\rho_c}{\rho_v} \cdot w + \frac{\rho_c}{\rho_a} \cdot \frac{m_a}{m_c}\right) \cdot c_{CO_2}}$$

kde ρ_c, ρ_a, ρ_v jsou objemové hmotnosti cementu, kameniva a vody (kg/m^3), m_a a m_c jsou hmotnosti kameniva a vody (kg), w je vodní součinitel, c_{CO_2} je koncentrace oxidu uhličitého v okolním vzduchu (mol/m^3). Hodnota f_{RH} je závislá na relativní vlhkosti vzduchu a v původním modelu byla dána vztahem:

$$f_{RH} = (1 - RH/100)$$

kde RH je relativní vlhkost vzduchu (%). Model platí pro vlhkosti vzduchu 50 % a větší. Karbonatace je nejvýraznější v rozmezí 50–80%, přičemž v tomto intervalu vlhkostí se rychlost karbonatace zvyšuje spolu s vlhkostí. Dle výše uvedeného vztahu však vychází největší karbonatační rychlost pro 50 %. Funkce f_{RH} byla tedy nahrazena po částech lineární funkcí, jak je uvedeno v tabulce.

Tabulka 6.1: Hodnoty funkce f_{RH} [38]

Relativní vlhkost RH [%]	0	7	50	93	100
Hodnota funkce f_{RH} [-]	0	0	0,425	0,5	0

Pro modely pracující s hodnotou vodního součinitele lze pro zpřesnění výpočtu použít hodnotu efektivního vodního součinitele w_{eff} . [22] Jedná se o upravenou hodnotu vodního součinitele zohledňující vliv příměsí na chování materiálu.

$$w_{eff} = m_v / (m_c + k \cdot SCM)$$

kde m_v a m_c jsou hmotnosti vody a cementu, k je hodnota závislé na druhu příměsí a SCM je celkové množství hydraulicky reagujících příměsí (Supplementary Cementing Materials – SCM),

Modely jsou velmi často založeny na hodnotě vodního součinitele. Tato hodnota má totiž, jak již bylo uvedeno v předchozí kapitole, přímý vliv na pórovitost a tedy i na trvanlivost. V těchto modelech však nejsou vždy zohledněny další faktory ovlivňující rychlost karbonatace. Výhodou je nenáročnost na výpočet a vstupní údaje.

Příkladem je **model dle De Sittera** z roku 1985 [38]:

$$A = \sqrt{\frac{46w - 17,6}{2,7} \cdot R \cdot k}$$

kde w je vodní součinitel, R je součinitel závislý na druhu cementu a k je součinitel zohledňující vlhkost okolního prostředí.

Podobný je **model dle Kishitaniho** z roku 2005 [15]:

$$\text{Pro } w < 0,6: a = R_1 \cdot \sqrt{0,639w - 0,244}$$

$$\text{Pro } w \geq 0,6: a = R_2 \cdot \sqrt{\frac{(w - 0,25)^2}{0,345 + w}}$$

kde w je vodní součinitel a R_1 a R_2 jsou koeficienty zohledňující vliv cementu. Pro portlandský cement jsou rovny jedné, pro ostatní druhy cementu zatím nebyly definovány. Model je výpočetně velmi jednoduchý, nezohledňuje však nijak podmínky okolního prostředí.

Mnoho modelů používá pro vyjádření vlastností betonu hodnotu tlakové pevnosti. Například **model dle Boba** z roku 1990 [10]:

$$A = \frac{150 \cdot C \cdot k \cdot d}{f_c}$$

kde f_c je tlaková pevnost betonu (MPa), C je součinitel závislý na druhu cementu, k je součinitel zohledňující vlhkostní podmínky prostředí a d je součinitel zohledňující obsah CO_2 v okolním prostředí. Doporučené hodnoty těchto koeficientů jsou uvedeny v následující tabulce:

Tabulka 6.2: Hodnoty koeficientů pro model karbonatace dle Boba [10]

Cement	I 52,5 (R)	I 42,5 (R)	II A-S32,5R	II B	III A
C	0,8	1,0	1,2	1,4	2,0
Vlhkost prostředí	do 60 %		70 - 75 %	80 - 85 %	nad 90 %
k	1,0		0,7	0,5	0,3
Koncentrace CO_2	0,03			0,10	
d	1,0			2,0	

Na hodnotě tlakové pevnosti je založen také **model dle Duvala** z roku 1992 [16]:

$$A = \sqrt{365} \cdot \left(\frac{1}{2,1 \cdot \sqrt{f_c}} - 0,06 \right)$$

kde f_c je tlaková pevnost betonu po 28 dnech (MPa). Tento model je velmi jednoduchý, nezohledňuje však nijak vliv okolního prostředí.

Principiálně je podobný **model dle Parrota** z roku 1987, který také pracuje s hodnotou tlakové pevnosti betonu [16]:

$$A = \sqrt{251} \cdot \exp(-0,05 \cdot f_c)$$

kde f_c je tlaková pevnost betonu po 28 dnech (MPa).

6.2. Modely působení chloridů

Pro vyjádření transportu chloridů betonovou krycí vrstvou k výztuži jsou v literatuře dostupné dva modely. Jeden z nich je založen na postupu pomyslné chloridové fronty x_{Cl} krycí vrstvou, druhý umožňuje určit koncentraci chloridových iontů v určitém místě konstrukce v jistém časovém okamžiku.

Model pracující se **vzdáleností chloridové fronty od povrchu** konstrukce je z roku 1996 a má následující podobu [38]:

$$x_{Cl} = 1000 \cdot \sqrt{\frac{2 \cdot D_{e,Cl^-} [Cl^-(aq)]_0}{3 \cdot 1536 [Cl^-(s)]_{sat}} \cdot t \cdot 10^{-7}}$$

kde x_{Cl} je vzdálenost chloridové fronty od povrchu (mm), D_{e,Cl^-} je efektivní difuzní koeficient pro chloridy (m^2/s), $[Cl^-(aq)]_0$ je koncentrace chloridů Cl^- v kapalně fázi blízko povrchu konstrukce

(mol/m³), $[Cl^-]_{sat}$ je koncentrace chloridů Cl⁻ v pevné fázi v saturovaném stavu (mol/m³) a t je čas (roky). D_{e,Cl^-} lze vyjádřit následujícím způsobem:

$$D_{e,Cl^-} = 0,15 \cdot \frac{1 + \rho_c \cdot w}{1 + \rho_c \cdot w + \frac{\rho_c}{\rho_a} \cdot \frac{m_a}{m_c}} \cdot \left(\frac{\rho_c \cdot w - 0,85}{1 + \rho_c \cdot w} \right)^3 \cdot D_{Cl^-H_2O}$$

kde ρ_c a ρ_a jsou objemové hmotnosti cementu a kameniva (kg/m³), m_a a m_c jsou hmotnosti kameniva a vody (kg), w je vodní součinitel a $D_{Cl^-H_2O}$ je difuzní koeficient pro chloridy Cl⁻ v nekonečném roztoku, tj. 50491,08 mm²/rok [19].

Druhý model je založen na určení koncentrace chloridových iontů v libovolném čase a místě v konstrukci. Byl uveden v roce 1972. [33]

$$c(x,t) = c_{s,0} \left[1 - \operatorname{erf} \left(\frac{x}{2\sqrt{t \cdot D_{e,Cl^-}}} \right) \right]$$

kde $c(x,t)$ je koncentrace chloridových iontů (% hm.pojiv), D_{e,Cl^-} je efektivní difuzní koeficient pro chloridy (mm²/rok), $c_{s,0}$ je koncentrace chloridů na povrchu konstrukce (% hm. pojiv), x je vzdálenost od povrchu konstrukce (mm) a t je čas expozice (roky). Erf je chybová funkce definovaná vztahem:

$$\operatorname{erf}(x) = \frac{2}{\sqrt{\pi}} \int_0^x e^{-t^2} \cdot dt$$

6.3. Modely koroze ocelové výztuže

Základní model koroze ocelové výztuže popisuje úbytek plochy výztužných vložek v čase [38]:

$$D(t) = D_i - 0,0116 \cdot i_{corr} \cdot \alpha \cdot (t - t_i)$$

kde D je průměr výztužné vložky v určitém časovém okamžiku (mm), t je čas, ve kterém ověřujeme průměr výztužné vložky (roky), D_i je původní průměr výztužné vložky (mm), t_i je iniciační čas (čas depasivace výztuže) (roky), i_{corr} je hustota proudu při elektrochemické korozi (μA/cm²) a α je koeficient zohledňující typ koroze – pro rovnoměrnou korozi je rovný 2, pro důlkovou cca 8.

Iniciační čas t_i je čas, kdy je dosaženo depasivace výztuže – tedy čas, kdy zkarbonatovaná zóna dosáhne úrovně výztuže nebo kdy koncentrace chloridových iontů v úrovni výztuže dosáhne prahové hodnoty. Iniciační čas lze také uvažovat jako okamžik, kdy poměr hydroxidových a chloridových iontů v úrovni výztuže dosáhne prahové hodnoty.

Pro vyjádření **hustoty proudu i_{corr}** existuje větší množství modelů. Hustota proudu závisí na mnoha faktorech, mezi které patří například [30]:

- obsah vlhkosti
- cyklické zavlhčování a vysychání
- kvalita betonu
- odpor betonu
- obsah příměsí v betonu
- tloušťka krycí vrstvy

- přítomnost trhlin a jejich rozsah
- působící zatížení a jeho historie
- teplota prostředí
- koncentrace kyslíku rozpuštěného ve vodě v kontaktu s konstrukcí

Pro tvorbu modelů je nepraktické začleňovat do výpočetních vztahů všechny faktory. Některé faktory je však možné začlenit do modelu nepřímo – například odpor betonu je závislý na kvalitě betonu, jeho vlhkosti a teplotě.

Pro vytváření matematických modelů koroze výztuže je obecně využíváno tří přístupů:

- elektrochemické principy koroze výztuže v betonu
- statistická analýza výsledků experimentálních měření
- kombinace výše uvedených přístupů

V následujícím textu jsou uvedeny nejznámější vztahy pro výpočet hustoty proudu [30]:

Model dle Alonsa a kol. z roku 1988 je založen na statistické analýze experimentálního měření závislosti hustoty proudu na odporu betonu.

$$i_{corr} = k_{corr} / \rho_{ef}$$

kde ρ_{ef} je rezistivita betonu příslušná aktuálnímu stupni nasycení ($\Omega \cdot \text{cm}$) a k_{corr} je konstanta o hodnotě $3 \cdot 10^4 \mu\text{A}/\text{cm}^2 \cdot \text{k}\Omega \cdot \text{cm}$.

Model dle Yalcyna a Erguna z roku 1996 byl vyvinut na základě studia vlivu chloridových iontů na korozi výztuže.

$$i_{corr} = i_0 \cdot e^{-Ct}$$

kde i_0 je hustota proudu v okamžiku depasivace výztuže (iniciační čas) ($\mu\text{A}/\text{cm}^2$), t je čas (dny) a C je konstanta závislá na stupni nasycení pórů v betonu, na pH, na permeabilitě betonu a na tloušťce krycí vrstvy.

Katwanův model z roku 1996 je empirický model založený na metodě měření elektrochemického šumu. Elektrochemickým šumem je nazývána fluktuace signálu elektrochemického potenciálu. Katwan experimentálně hledal vztah mezi hustotou proudu i_{corr} a standardní odchylkou (standard deviation, SD) půlčlánkového potenciálu (half-cell potential, HCP), kterou získával měřením elektrochemického šumu. Katwan sice nevytvořil matematický vztah pro tuto závislost, ale výsledky jeho experimentů odpovídaly matematickému modelu, který v roce 1986 navrhli Page a Lambert:

$$\log(i_{corr}) = 0,171 + 0,823 SD$$

kde SD je standardní odchylka půlčlánkového potenciálu (μV).

Model podle Duracreta z roku 1998 je pokusem o zdokonalení modelu dle Alonsa začleněním dalších faktorů ovlivňujících hustotu proudu při elektrochemické korozi. Model je tedy rozšířen o několik korekčních součinitelů:

$$i_{corr} = \frac{k_{corr}}{\rho(t)} \cdot F_{cl} \cdot F_{Galv} \cdot F_{oxide} \cdot F_{Oxy}$$

kde k_{corr} je konstantní parametr rovný 10^4 , $\rho(t)$ je rezistivita ($\Omega \cdot m$), součinitel F_{cl} zohledňuje obsah chloridů v betonu, součinitel F_{Galv} zohledňuje galvanické vlivy, součinitel F_{oxide} zahrnuje do výpočtu vliv kontinuální tvorby a stárnutí oxidů na povrchu výztuže a F_{Oxy} zohledňuje dostupnost kyslíku. Rezistivita je vyjádřena jako funkce času:

$$\rho(t) = \rho_0 \cdot f_e \cdot f_t \cdot (t/t_0)$$

kde ρ_0 je rezistivita v čase t_0 ($\Omega \cdot m$), f_e je součinitel zohledňující vlivy okolního prostředí a f_t je součinitel zohledňující vliv použité metody pro měření rezistivity.

Model dle Vu a Stewarta pochází z roku 2000 a byl vyvinutý na základě předpokladu, že dostupnost kyslíku je rozhodujícím předpokladem pro rychlost koroze ocelové výztuže. Dostupnost kyslíku je ovlivněna především kvalitou betonu, tloušťkou krycí vrstvy a podmínkami okolního prostředí, jako je vlhkost a teplota. Model je vhodný pro použití v případě, že vlhkost okolního prostředí se blíží 75 % a teplota je cca 20 °C. Je vyjádřený následujícím vztahem:

$$i_{corr} = \left(\frac{32,13 \cdot (1 - w/b)^{-1,64}}{c} \right) \cdot t_p^{-0,29}$$

kde c je tloušťka krycí vrstvy (cm), w/b je poměr hmotností vody a pojiva v betonové směsi a t_p je čas uplynulý od iniciačního času, tedy $t_p = t - t_i$ (roky).

Model dle Scotta z roku 2004 byl získán z výsledků experimentů na betonových trámcích s trhlinami. Trámky měly různé šířky trhlin, různé tloušťky krycích vrstev a byly zhotoveny z různých typů pojiv. Poměr vody a pojiva byl však pro materiál všech trámků stejný.

$$i_{corr} = \left(1,43 \cdot \frac{C_c}{f} + 0,02 \right) \cdot e^{\left[\left(\frac{40-x}{20} \right) \cdot 1,2 \cdot \left(\frac{C_c}{f} \right)^3 \right]}$$

kde C_c je hodnota indexu chloridové konduktivity (mS/cm), x je tloušťka krycí vrstvy (mm) a f je korekční součinitel zohledňující obsah strusky:

$$f = 10^{(10,5 - S) - 0,5 + S}$$

kde S je obsah strusky vyjádřený desetinným číslem.

Empirický **model dle Liu a Weyerse** [11] je založen na statistické analýze výsledků experimentů, během kterých byla po dobu 5 let měřena rychlost koroze ocelové výztuže v trhlinami neporušených deskách. Vzorky měly různé tloušťky krycích vrstev, byly zhotoveny z betonu s různými poměry vody a pojiva a různým obsahem cementu. Také byly vystaveny různým koncentracím chloridů. Model má podobu funkce koncentrace chloridů, teploty, odporu betonu a času.

$$i_{corr} = 0,0092 \cdot \exp(8,37 + 0,618 \cdot \ln(1,69 Cl) - 3034/T - 0,000105 R_c + 2,35t^{0,25})$$

kde Cl je obsah chloridových iontů v úrovni výztuže (kg/m^3), T je teplota betonu v úrovni výztuže (K), R_c je odpor betonu a t je čas uplynulý od depasivace výztuže (roky). Odpor betonu je zde vyjádřen jako funkce vlhkosti okolního prostředí.

$$R_c = 90,537 \cdot h^{-7,2548} \cdot [1 + \exp(5 - 50(1 - h))]$$

kde h je relativní vlhkost okolního prostředí vyjádřená desetinným číslem (tedy např. pro 50 % hodnotou 0,5).

Výpočetně nejnáročnější jsou **modely založené na elektrochemickém principu koroze**. Tyto modely vycházejí z řešení rovnic ke stanovení rozložení elektrického potenciálu na povrchu výztuže. Modely jsou založené na předpokladu izotropní vodivosti a zachování elektrického náboje. Základní rovnice má podobu:

$$\frac{\partial^2 \Phi}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 \Phi}{\partial y^2} = \nabla^2 \Phi = 0$$

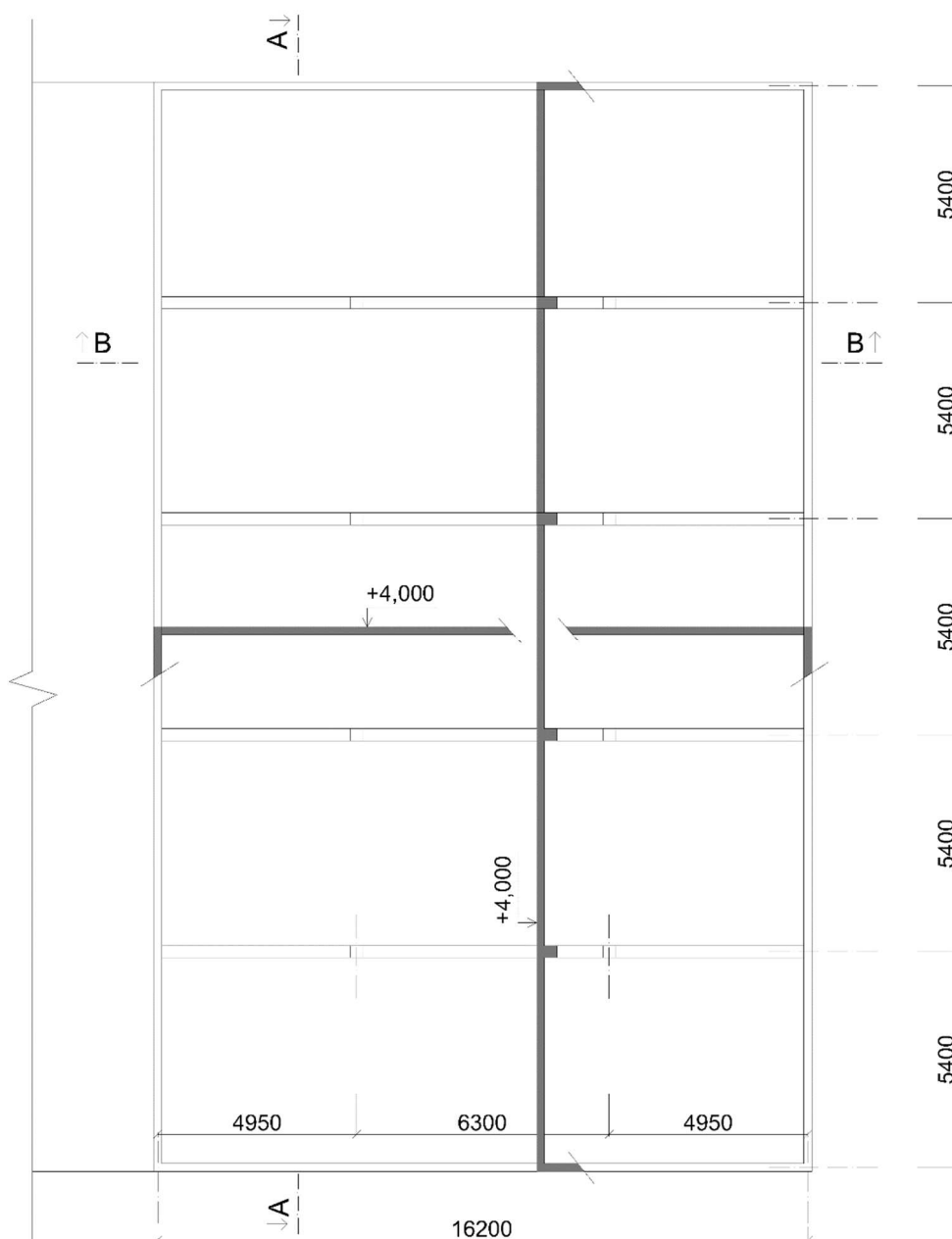
kde x a y jsou souřadnice místa na povrchu výztuže, Φ je elektrický potenciál a ∇ je Laplaceův operátor. Při řešení se předpokládají příslušné okrajové podmínky, mezi které patří například elektrický odpor betonu, difuzní koeficient betonu pro kyslík a pH pórového roztoku. Pro řešení je třeba užít vhodné numerické metody, například metodu konečných prvků, metodu konečných diferencí nebo metodu hraničních prvků. Modely, které využívají tyto metody tedy nelze vyjádřit pomocí jedné matematické rovnice. Hustota proudu i_{corr} je potom stanovena z rozdělení elektrického potenciálu na povrchu výztuže.

7. Variantní návrh konstrukce se zhodnocením z hlediska trvanlivosti a udržitelného rozvoje

7.1. Popis konstrukce

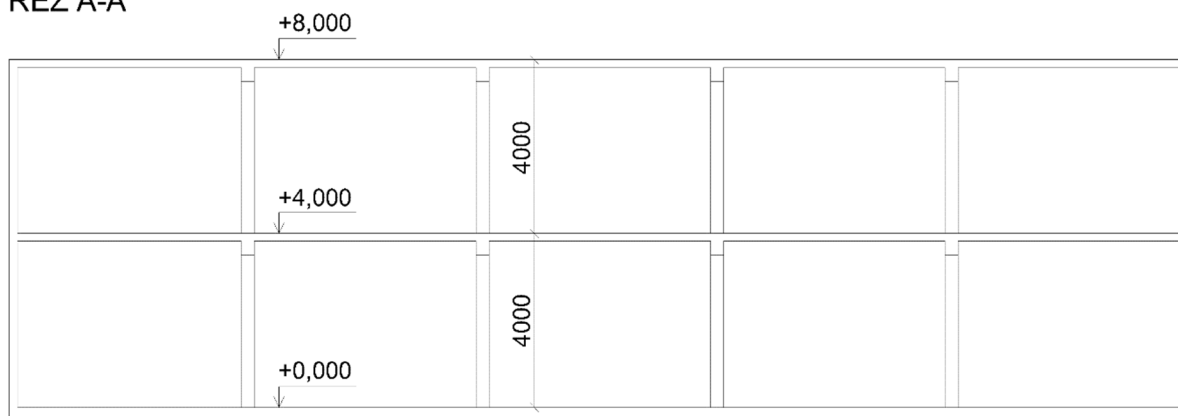
Pro posouzení byla navržena jednoduchá konstrukce o dvou podlažích, hodnocena bude stropní konstrukce nad 1. NP. Jedná se o železobetonový strop s jednosměrně pnutými deskami mezi trámy. Rozpon desek je 5,4 m. Umístění stavby je uvažováno v Mrači ve Středočeském kraji.

Schéma konstrukce:



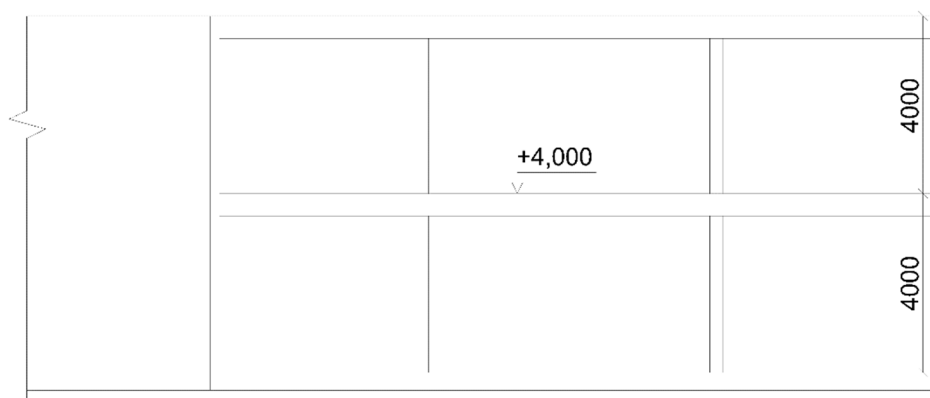
Obrázek 7.1: Schéma řešené konstrukce - půdorys

ŘEZ A-A



Obrázek 7.2: Schéma řešené konstrukce – řez A-A

ŘEZ B-B



Obrázek 7.3: Schéma řešené konstrukce – řez B-B

V rámci hodnocení je konstrukce uvažována jako garáž pro osobní automobily. Je tedy kromě karbonatace (XC4) vystavena také působení chloridů (XD3).

Konstrukce je navržena ve třech variantách – **ve variantě 1** je navržena z betonu pevnostní třídy **C35/45** (indikativní pevnostní třída pro stupeň vlivu prostředí XD3), v dalších dvou variantách je navržen beton pevnostní třídy **C90/105**. Tato pevnostní třída je zvolena z důvodu porovnání z hlediska trvanlivosti a dopadů na životní prostředí, v reálných podmínkách by takováto třída betonu pravděpodobně pro řešenou konstrukci zvolena nebyla. Varianty 2A a 2B se liší navrženou tloušťkou stropní desky, rozměry trámů a množstvím výztuže. Ve variantě 2A je navržena deska menší tloušťky s větším množstvím výztuže, ve variantě 2B je navržena deska stejné tloušťky jako ve variantě 1 a je použito menší množství výztuže. V následující tabulce je uveden přehled navržených variant:

Tabulka 7.1: Přehled navržených variant

	Třída betonu	Tloušťka stropní desky [mm]	Rozměry trámů H x B [mm]	Výztuž desky
Varianta 1	C35/45	180	500 x 300	Ø 8 po 120 mm
Varianta 2A	C90/105	140	450 x 250	Ø 8 po 100 mm
Varianta 2B	C90/105	180	500 x 300	Ø 8 po 130 mm

Konstrukční varianty byly pro možné lepší porovnání posouzeny na mezní stav přetvoření přesným výpočtem průhybu. Ve všech navržených variantách však rozhoduje mezní stav únosnosti kvůli vysokým třídám betonu vzhledem k nenáročnosti konstrukce.

7.2. Statický návrh jednotlivých variant

7.2.1. Varianta 1

Vstupní údaje do výpočtu:

Beton: C35/45 – XC3 – Cl 0,2 – D_{max} 16mm – S4

$$f_{ck} = 35 \text{ MPa}$$

$$f_{cm} = 43 \text{ MPa}$$

$$f_{ctm} = 3,2 \text{ MPa}$$

$$f_{ctk,0,05} = 2,2 \text{ MPa}$$

$$E_{cm} = 34 \text{ GPa}$$

Ocel: B500B

$$f_{yk} = 500 \text{ MPa}$$

Předpoklady výpočtu: vlhkost vzduchu: RH = 50 %

doba uvedení do provozu: 10 dní

doba ošetřování: 3 dny

třída cementu: N

Uvažované zatížení: užité: kategorie F (dopravní a parkovací plochy pro lehká vozidla do 30 kN celkové tíhy)

$$q_k = 2,5 \text{ kN/m}^2 \text{ [2]}$$

$$\psi_2 = 0,6 \text{ [1]}$$

Návrh stropní desky:

Krycí vrstva byla stanovena dle [3] pro stupeň vlivu prostředí XC4 a XD3 na 50 mm.

Výztuž byla navržena běžnými postupy dle [3].

Dolní povrch: celoplošně Ø 8 po 120 mm

Horní povrch: celoplošně Ø 8 po 240 mm, v blízkosti trámů Ø 8 po 120 mm

Rozdělovací výztuž: Ø 8 po 400 mm

Celoplošné vyztužení u obou povrchů je navrženo kvůli omezení smršťování.

Tloušťka desky: Navržena byla tloušťka desky 180 mm.

Výpočet průhybu:

Kombinace zatížení:

Konstrukce je na mezní stav průhybu posouzena při kvazi-stálé kombinaci zatížení:

$$\sum_{j \geq 1} G_{k,j} \text{ " + " P " + " } \sum_{i \geq 1} \psi_{2,i} Q_{k,i}$$

$$f_{gk} = g_{0,k} + \psi_2 \cdot g_k = 4,5 + 0,6 \cdot 2,5 = 6 \text{ kN/m}^2$$

$$g_{0,k} = h_{\text{deska}} \cdot \gamma_{\text{beton}} = 0,18 \cdot 25 = 4,5 \text{ kN/m}^2$$

Vznik trhlin je posouzen při charakteristické kombinaci zatížení:

$$\sum_{j \geq 1} G_{k,j} \text{ " + " P " + " } \sum_{i \geq 1} Q_{k,i}$$

$$f_k = g_{0,k} + \psi_2 \cdot g_k = 4,5 + 2,5 = 7 \text{ kN/m}^2$$

Účinky zatížení:

Ohybový moment:

$$\text{Kvazi-stálá kombinace: } m_{gk} = 1/12 \cdot f_{gk} \cdot l^2 = 1/12 \cdot 6 \cdot 5,4^2 = 14,580 \text{ kNm/m}$$

$$\text{Charakteristická kombinace: } m_{Ek} = 1/12 \cdot f_k \cdot l^2 = 1/12 \cdot 7 \cdot 5,4^2 = 17,010 \text{ kNm/m}$$

Součinitel dotvarování a efektivní modul pružnosti betonu:

Součinitel dotvarování byl určen pomocí grafu uvedeného v platné normě [3] (strana 34).

$$\varphi = 2,5$$

$$E_{c,eff} = E_{cm} / (1 + \varphi) = 34000 / (1 + 2,5) = 9714,286 \text{ MPa}$$

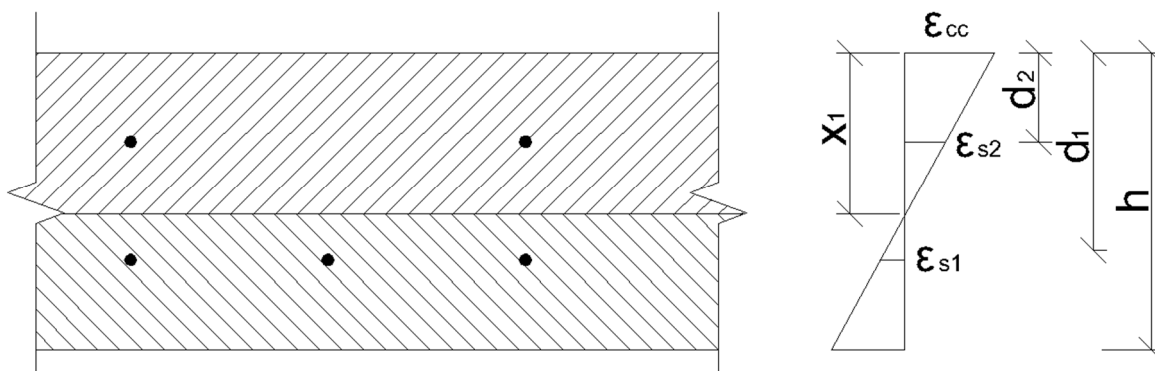
Pracovní součinitel (poměr modulů pružnosti):

$$\alpha = E_s / E_{c,eff} = 200000 / 9714,286 = 20,588$$

Průřezové charakteristiky průřezu bez trhlin v poli:

$$\text{Horní výztuž: } \varnothing 8 \text{ po } 240 \text{ mm, } A_{s2} = 209,440 \text{ mm}^2$$

$$\text{Dolní výztuž: } \varnothing 8 \text{ po } 120 \text{ mm, } A_{s1} = 418,479 \text{ mm}^2$$



Obrázek 7.4: Schéma pro výpočet průřezových charakteristik (bez trhlin)

$$d_1 = h - c - \varnothing/2 = 180 - 50 - 8/2 = 126 \text{ mm}$$

$$d_2 = c + \varnothing/2 = 50 + 8/2 = 54 \text{ mm}$$

síla v tlačném betonu: $F_{cc} = E_{eff} \cdot \epsilon_{cc} \cdot 0,5 \cdot x \cdot b$

síla v taženém betonu: $F_{ct} = E_{eff} \cdot \epsilon_{ct} \cdot 0,5 \cdot (h-x) \cdot b$

síla v horní výztuži: $F_{s2} = E_s \cdot \epsilon_{s2} \cdot A_{s2}$

síla v dolní výztuži: $F_{s1} = E_s \cdot \epsilon_{s1} \cdot A_{s1}$

platí rovnováha sil: $F_{cc} + F_{s2} = F_{ct} + F_{s1}$

z podobnosti trojúhelníků plyne: $\epsilon_{cc} = \epsilon_{ct} \cdot x/(h-x)$

$$\epsilon_{s1} = \epsilon_{ct} \cdot (d_1-x)/(h-x)$$

$$\epsilon_{s2} = \epsilon_{ct} \cdot (x-d_2)/(h-x)$$

Po dosazení výše uvedených vztahů do rovnice rovnováhy sil:

$$0,5 \cdot b \cdot x \cdot \epsilon_{ct} \cdot E_{eff} \cdot x/(h-x) + A_{s2} \cdot \epsilon_{ct} \cdot E_s \cdot (x-d_2)/(h-x) = 0,5 \cdot b \cdot (h-x) \cdot \epsilon_{ct} \cdot E_{eff} + A_{s1} \cdot \epsilon_{ct} \cdot E_s \cdot (d_1-x)/(h-x)$$

Po úpravě a dosazení α za E_s/E_{eff} :

$$x_1 = \frac{0,5 \cdot b \cdot h^2 + \alpha \cdot d_2 \cdot A_{s2} + \alpha \cdot d_1 \cdot A_{s1}}{\alpha \cdot A_{s2} + \alpha \cdot A_{s1} + b \cdot h} = \frac{0,5 \cdot 1000 \cdot 180^2 + 20,588 \cdot 54 \cdot 209,440 + 20,588 \cdot 126 \cdot 418,879}{20,588 \cdot 209,440 + 20,588 \cdot 418,879 + 1000 \cdot 180}$$

$$x_1 = 90,805 \text{ mm (poloha neutrální osy)}$$

$$a = h/2 - x_1 = 180/2 - 90,805 = 0,805 \text{ mm}$$

Moment setrvačnosti:

$$I_1 = bh^3/12 + b \cdot h \cdot a^2 + \alpha \cdot A_{s1} \cdot (d_1 - x)^2 + \alpha \cdot A_{s2} \cdot (x - d_2)^2$$

$$I_1 = 1000 \cdot 180^3/12 + 1000 \cdot 180 \cdot 0,805^2 + 20,588 \cdot 418,879 \cdot (126 - 90,805)^2 + 20,588 \cdot 209,440 \cdot (90,805 - 54)^2 = 502640121 \text{ mm}^4 = 0,000503 \text{ m}^4$$

Ohybová poddajnost:

$$C_1 = 1/(I_1 \cdot E_{c,eff}) = 1/(0,000503 \cdot 9714286) = 0,000205 \text{ kN}^{-1} \text{ m}^{-2}$$

Průřezové charakteristiky průřezu bez trhlin nad podporou jsou větší než průřezu v poli, je tedy zřejmé, že o vzniku trhlin tento průřez nerozhoduje.

Ověření vzniku trhlin:

Ověření je provedeno pro průřez v poli, protože zde je moment setrvačnosti menší.

Ohybový moment při vzniku trhlin:

$$m_{cr} = f_{ctm} \cdot I_1 / (h-x_1) = 3200 \cdot 0,000503 / (0,18-0,091) = 18,033 \text{ kNm}$$

$$m_{cr} = 18,033 \text{ kNm} > m_{Ek} = 17,010 \text{ kNm/m}$$

→ trhliny při charakteristické kombinaci zatížení nevznikají

Výpočet křivosti od zatížení:

Křivost uprostřed rozpětí:

$$(1/r_m)_g = m_{gk} \cdot C_1 = 14,580 \cdot 0,000205 = 0,002986 \text{ m}^{-1}$$

$\xi = 0$ (pro průřezy bez trhlin)

Výpočet průhybu od zatížení:

$$w_g = k \cdot l^2 \cdot (1/r_m)_g = 1/12 \cdot 5,4^2 \cdot 0,002986 = 0,007256 \text{ m} = 7,256 \text{ mm}$$

k je součinitel zohledňující statické schéma konstrukce, jeho hodnoty jsou uvedeny v normě [3]

$$k = 5/48 \cdot (1-0,1 \cdot 2 \cdot m_{gk,podpora} / m_{gk,pole}) = 5/48 \cdot (1-0,1 \cdot 2 \cdot 14,580 / 14,580) = 1/12$$

Výpočet křivosti od smršťování:

Celkové poměrné smršťování:

$$\varepsilon_{cs} = \varepsilon_{cd} + \varepsilon_{ca} = 0,000556 + 6,25 \cdot 10^{-5} = 0,000619$$

Poměrné smršťování vysycháním ε_{cd} :

$$\varepsilon_{cd}(t) = \beta_{ds}(t, t_s) \cdot k_h \cdot \varepsilon_{cd,0} = 1,000 \cdot 0,88 \cdot 0,000632 = 0,000556$$

$$\beta_{ds}(t, t_s) = \frac{(t-t_s)}{(t-t_s) + 0,04 \cdot \sqrt{(h_0)^3}} = \frac{(18250-3)}{(18250-3) + 0,04 \cdot \sqrt{(180)^3}} = 1,000$$

$$t_s = 3 \text{ dny (doba ošetřování)}$$

$$t = 18250 \text{ dní (50 let; životnost konstrukce)}$$

$$k_h = 0,88 \text{ (součinitel závisící na náhradní tloušťce } h_0, \text{ dle [3], strana 36, tabulka 3.3)}$$

$$h_0 = 2A_c/u = 2 \cdot b \cdot h / (2b) = h = 180 \text{ mm}$$

Základní poměrné smršťování vysycháním $\varepsilon_{cd,0}$:

$$\varepsilon_{cd,0} = 0,85 \cdot [(220 + 110\alpha_{ds1}) \cdot \exp. (-\alpha_{ds2} \cdot f_{cm}/f_{cm0})] \cdot 10^{-6} \cdot \beta_{RH}$$

$$\beta_{RH} = 1,55 \cdot [1 - (RH/RH_0)^3] = 1,55 \cdot [1 - (50/100)^3] = 1,356$$

$$f_{cm0} = 10 \text{ MPa}$$

$$\alpha_{ds1} = 6$$

$$\alpha_{ds2} = 0,11 \text{ (součinitel závisící na druhu cementu, v tomto případě cement R)}$$

$$\varepsilon_{cd,0} = 0,85 \cdot [(220 + 110 \cdot 6) \cdot \exp. (-0,11 \cdot 43/10)] \cdot 10^{-6} \cdot 1,356 = 0,000632$$

Poměrné autogenní smršťování:

$$\varepsilon_{ca}(t) = \beta_{as}(t) \cdot \varepsilon_{ca}(\infty) = 1,000 \cdot 6,25 \cdot 10^{-5} = 6,25 \cdot 10^{-5}$$

$$\beta_{as}(t) = 1 - \exp(-0,2 \cdot t^{0,5}) = 1 - \exp(-0,2 \cdot 18250^{0,5}) = 1,000$$

$$\varepsilon_{ca}(\infty) = 2,5 \cdot (f_{ck} - 10) \cdot 10^{-6} = 2,5 \cdot (35 - 10) \cdot 10^{-6} = 6,25 \cdot 10^{-5}$$

Křivost od smršťování prvku bez trhlin:

$$(1/r)_{cs1} = \varepsilon_{cs} \cdot \alpha \cdot \frac{S_{s0} - (A_{s1} + A_{s2}) \cdot a_{gi}}{I_1} = 0,000619 \cdot 20,588 \cdot$$

$$\frac{6,409 \cdot 10^{-5} - (418,479 + 209,440) \cdot 10^{-6} \cdot 0,091}{0,000503} = 0,000178 \text{ m}^{-1}$$

$$S_{s0} = (A_{s1} + A_{s2}) \cdot a_{gs} = (418,479 + 209,440) \cdot 102 \cdot 10^{-9} = 6,409 \cdot 10^{-5} \text{ m}^3$$

(statický moment výztuže)

$$a_{gs} = (A_{s1} \cdot d_1 + A_{s2} \cdot d_2) / (A_{s1} + A_{s2}) \text{ (těžiště výztuže)}$$

$$a_{gs} = (418,479 \cdot 126 + 209,440 \cdot 54) / (418,479 + 209,440) = 102 \text{ mm}$$

$$a_{gi} = [\alpha \cdot S_{s0} + A_c \cdot h / 2] / [\alpha \cdot (A_{s1} + A_{s2}) + A_c] \text{ (těžiště ideálního průřezu)}$$

$$a_{gi} = [20,588 \cdot 6,409 \cdot 10^{-5} + 0,180 \cdot 0,180 / 2] / [20,588 \cdot (418,479 + 209,440) + 0,18] = 0,091 \text{ m}$$

Výsledná křivost od smršťování:

$$(1/r_m)_{cs} = (1/r_m)_{cs1} = 0,000178 \text{ m}^{-1}$$

$$\xi = 0 \text{ (pro prvek bez trhlin)}$$

Výpočet průhybu od smršťování:

$$w_{cs} = k \cdot l^2 \cdot (1/r_m)_{cs} = 1/12 \cdot 5,4^2 \cdot 0,000178 = 0,000433 \text{ m} = 0,433 \text{ mm}$$

Výpočet celkového průhybu:

$$w = w_g + w_{cs} = 7,256 + 0,433 = 7,689 \text{ mm}$$

Posouzení průhybu:

Limitní průhyb (dle [3]):

$$w_{lim} = l/250 = 5400/250 = 21,600 \text{ mm}$$

$$w = 7,689 \text{ mm} < w_{lim} = 21,600 \text{ mm}$$

→ Navržená konstrukce vyhovuje z hlediska mezního stavu přetvoření.

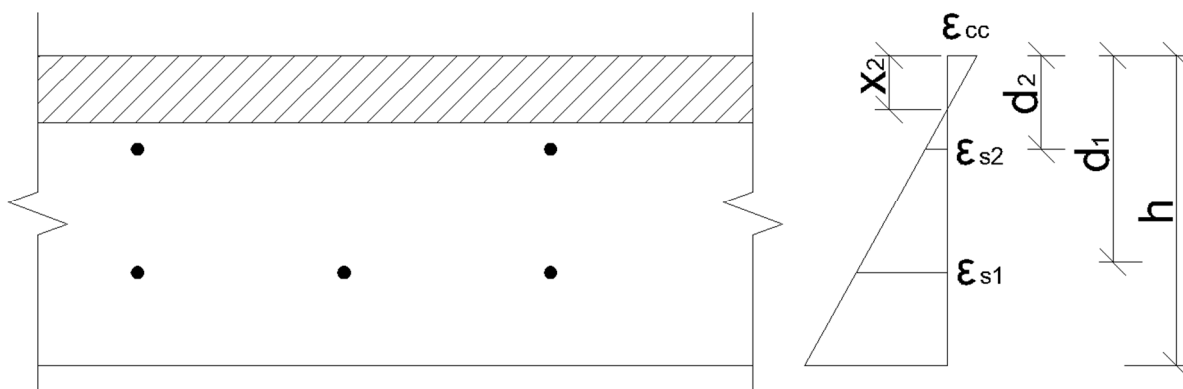
Posouzení ostatních MSP:

Průřezové charakteristiky průřezu s trhlinami v poli:

Horní výztuž: $\varnothing 8$ po 240 mm, $A_{s2} = 209,440 \text{ mm}^2$

Dolní výztuž: $\varnothing 8$ po 120 mm, $A_{s1} = 418,479 \text{ mm}^2$

Ve výpočtu je vzhledem k větší vzdálenosti výztuže od hrany průřezu předpokládáno, že obě řady výztuže jsou tažené.



Obrázek 7.5: Schéma pro výpočet průřezových charakteristik (s trhlinami)

síla v tlačném betonu: $F_{cc} = E_{eff} \cdot \epsilon_{cc} \cdot 0,5 \cdot x \cdot b$

síla v horní výztuži: $F_{s2} = E_s \cdot \epsilon_{s2} \cdot A_{s2}$

síla v dolní výztuži: $F_{s1} = E_s \cdot \epsilon_{s1} \cdot A_{s1}$

platí rovnováha sil: $F_{cc} = F_{s2} + F_{s1}$

z podobnosti trojúhelníků plyne: $\epsilon_{s1} = \epsilon_{cc} \cdot (d_1 - x)/x$

$$\epsilon_{s2} = \epsilon_{cc} \cdot (d_2 - x)/x$$

Po dosazení výše uvedených vztahů do rovnice rovnováhy sil:

$$A_{s1} \cdot \epsilon_{cc} \cdot E_s \cdot (d_1 - x)/x + A_{s2} \cdot \epsilon_{cc} \cdot E_s \cdot (d_2 - x)/x = 0,5 \cdot b \cdot x \cdot \epsilon_{cc} \cdot E_{cm}$$

Po úpravě a dosazení α za E_s/E_{cm} :

$$0,5 b \cdot x^2 + x \cdot (A_{s1} \cdot \alpha + A_{s2} \cdot \alpha) - \alpha \cdot (A_{s1} \cdot d_1 + A_{s2} \cdot d_2)$$

$$500 x^2 + 12935,970 x - 1319468,915 = 0$$

$x_{2,pole} = 40,038 \text{ mm}$ (poloha neutrální osy; předpoklad o tažené horní výztuži splněn)

Moment setrvačnosti:

$$I_{2,pole} = bh^3/3 + \alpha \cdot A_{s1} \cdot (d_1 - x)^2 + \alpha \cdot A_{s2} \cdot (x - d_2)^2$$

$$I_{2,pole} = 1000 \cdot 180^3/3 + 20,588 \cdot 418,879 \cdot (126 - 40,038)^2 + 20,588 \cdot 209,440 \cdot (40,038 - 54)^2 = 85961360,37 \text{ mm}^4 = 8,596 \cdot 10^{-5} \text{ m}^4$$

Stejným způsobem byly spočteny průřezové charakteristiky průřezu nad podporou:

$$x_{2,podpora} = 41,080 \text{ mm}$$

$$I_{2,podpora} = 8,680 \cdot 10^{-5} \text{ m}^4$$

Omezení napětí v tažené výztuži (spočteno pro průřez v poli – větší hodnota):

$$\sigma_s = \alpha \cdot m_{EK} \cdot (d_1 - x_{2,pole}) / I_{2,pole} = 20,588 \cdot 17,01 \cdot (0,126 - 0,040) / 8,596 \cdot 10^{-5} = 350207 \text{ kPa} = 350,207 \text{ MPa}$$

$$\sigma_s = 350,207 \text{ MPa} > 0,8 \cdot f_{yk} = 0,8 \cdot 500 = 400 \text{ MPa} \text{ (limitní hodnota pro napětí ve výztuži dle [3])}$$

→ Navržená konstrukce vyhovuje z hlediska omezení napětí v tažené výztuži

Omezení napětí v tlačeném betonu (spočteno pro průřez nad podporou – větší hodnota):

Z důvodu zamezení vzniku podélných trhlin:

$$\sigma_{cc} = m_{EK} \cdot x_{2,podpora} / I_{2,podpora} = 17,01 \cdot 0,041 / 8,680 \cdot 10^{-5} = 8050 \text{ kPa} = 8,050 \text{ MPa}$$

$$\sigma_{cc} = 8,050 \text{ MPa} > 0,6 \cdot f_{ck} = 0,6 \cdot 35 = 21 \text{ MPa} \text{ (limitní hodnota pro napětí v betonu dle [3])}$$

Z důvodu zamezení nelineárnímu dotvarování:

$$\sigma_{cc} = m_{gk} \cdot x_{2,podpora} / I_{2,podpora} = 14,580 \cdot 0,041 / 8,680 \cdot 10^{-5} = 6900 \text{ kPa} = 6,900 \text{ MPa}$$

$$\sigma_{cc} = 6,900 \text{ MPa} > 0,45 \cdot f_{ck} = 0,45 \cdot 35 = 15,750 \text{ MPa} \text{ (limitní hodnota pro napětí v betonu dle [3])}$$

→ Navržená konstrukce vyhovuje z hlediska omezení napětí v betonu.

Omezení šířky trhlin:

Minimální průřezová plocha betonářské výztuže:

$$A_{s,min} = k_c \cdot k \cdot A_{ct} \cdot f_{ct,eff} / \sigma_s = 0,4 \cdot 1,0 \cdot 0,030 \cdot 3,2 / 350,207 = 109,649 \cdot 10^{-6} \text{ m}^2 = 109,649 \text{ mm}^2$$

$$k_c = 0,4 \text{ (prvek je namáhán pouze ohybem)}$$

$$k = 1,0$$

$$A_{ct} = b \cdot \min[2,5 \cdot (h-d); (h-x_1)/3; h/2] = 1 \cdot \min[2,5 \cdot (0,180 - 0,126); (0,180 - 0,090)/3; 0,180/2]$$

$$A_{ct} = 1 \cdot \min(0,135; 0,030; 0,090) = 0,030 \text{ m}^2$$

$$f_{ct,eff} = f_{ctm} = 3,2 \text{ MPa}$$

$$\sigma_s = 350,207 \text{ MPa}$$

$$A_{s,min} = 109,649 \text{ mm}^2 > A_{s,prov} = 418,879 \text{ mm}^2$$

→ Navržené množství výztuže je dostatečné z hlediska omezení šířky trhlin.

Omezení šířky trhlin bez přímého výpočtu [3]:

Napětí ve výztuži při kvazi-stálé kombinaci zatížení:

$$\sigma_s = \alpha \cdot m_{gk} \cdot (d_1 - x_2) / I_2 = 20,588 \cdot 14,580 \cdot (0,126 - 0,040) / 8,596 \cdot 10^{-5} = 300178 \text{ kPa}$$

$$\sigma_s = 300,178 \text{ MPa}$$

Dle [3] je pro daný stupeň vlivu prostředí šířka trhliny omezena hodnotou 0,3 mm.

Podle tabulky je při vypočteném napětí ve výztuži a při limitní šířce trhlin maximální možný průměr výztužných vložek 13 mm. Navržená konstrukce tomuto požadavku vyhovuje, není tedy nutné ověřovat šířku trhlin výpočtem.

Návrh trámů:

Rozměry trámu: Navrženy byly rozměry $h = 500 \text{ mm}$ a $b = 300 \text{ mm}$.

Krycí vrstva byla stanovena dle [3] pro stupeň vlivu prostředí XC4 a XD3 na 55 mm.

Výztuž byla navržena běžnými postupy dle [3].

Schéma výztuže je přiloženo k práci.

7.2.2. Varianta 2A

Vstupní údaje do výpočtu:

Beton: C90/105 – XC3 – CI 0,2 – $D_{\max} 16\text{mm}$ – S4

$$f_{ck} = 90 \text{ MPa}$$

$$f_{cm} = 98 \text{ MPa}$$

$$f_{ctm} = 5 \text{ MPa}$$

$$f_{ctk,0,05} = 3,5 \text{ MPa}$$

$$E_{cm} = 44 \text{ GPa}$$

Ocel: B500B

$$f_{yk} = 500 \text{ MPa}$$

Předpoklady výpočtu a uvažované užité zatížení jsou stejné jako v případě varianty 1.

Návrh stropní desky:

Krycí vrstva byla stanovena dle [3] pro stupeň vlivu prostředí XC4 a XD3 na 45 mm.

Výztuž byla navržena běžnými postupy dle [3].

Dolní povrch: celoplošně Ø 8 po 100 mm

Horní povrch: celoplošně Ø 8 po 200 mm, v blízkosti trámů Ø 8 po 100 mm

Rozdělovací výztuž: Ø 8 po 400 mm

Celoplošné vyztužení u obou povrchů je navrženo kvůli omezení smršťování.

Tloušťka desky: Navržena byla tloušťka desky 140 mm.

Výpočet průhybu:

Kombinace zatížení:

Konstrukce je na mezní stav průhybu posouzena při kvazi-stálé kombinaci zatížení:

$$\sum_{j \geq 1} G_{k,j} \text{ " + " } P \text{ " + " } \sum_{i \geq 1} \psi_{2,i} Q_{k,i}$$

$$f_{gk} = g_{0,k} + \psi_2 \cdot g_k = 3,5 + 0,6 \cdot 2,5 = 5 \text{ kN/m}^2$$

$$g_{0,k} = h_{\text{deska}} \cdot \gamma_{\text{beton}} = 0,14 \cdot 25 = 3,5 \text{ kN/m}^2$$

Vznik trhlin je posouzen při charakteristické kombinaci zatížení:

$$\sum_{j \geq 1} G_{k,j} + P + \sum_{i \geq 1} Q_{k,i}$$

$$f_k = g_{0,k} + \psi_2 \cdot g_k = 3,5 + 2,5 = 6 \text{ kN/m}^2$$

Účinky zatížení:

Ohybový moment:

$$\text{Kvazi-stálá kombinace: } m_{gk} = 1/12 \cdot f_{gk} \cdot l^2 = 1/12 \cdot 5 \cdot 5,4^2 = 12,150 \text{ kNm/m}$$

$$\text{Charakteristická kombinace: } m_{Ek} = 1/12 \cdot f_{gk} \cdot l^2 = 1/12 \cdot 6 \cdot 5,4^2 = 14,580 \text{ kNm/m}$$

Součinitel dotvarování a efektivní modul pružnosti betonu:

Součinitel dotvarování byl určen pomocí grafu uvedeného v platné normě [3] (strana 34).

$$\varphi = 1,2$$

$$E_{c,eff} = E_{cm} / (1 + \varphi) = 44000 / (1 + 1,2) = 20000 \text{ MPa}$$

Pracovní součinitel (poměr modulů pružnosti):

$$\alpha = E_s / E_{c,eff} = 200000 / 20000 = 10$$

Průřezové charakteristiky průřezu bez trhlin v poli:

$$\text{Horní výztuž: } \varnothing 8 \text{ po } 200 \text{ mm, } A_{s2} = 251,327 \text{ mm}^2$$

$$\text{Dolní výztuž: } \varnothing 8 \text{ po } 100 \text{ mm, } A_{s1} = 502,655 \text{ mm}^2$$

$$d_1 = h - c - \varnothing/2 = 140 - 45 - 8/2 = 91 \text{ mm}$$

$$d_2 = c + \varnothing/2 = 45 + 8/2 = 49 \text{ mm}$$

$$x_1 = \frac{0,5 \cdot b \cdot h^2 + \alpha \cdot d_2 \cdot A_{s2} + \alpha \cdot d_1 \cdot A_{s1}}{\alpha \cdot A_{s2} + \alpha \cdot A_{s1} + b \cdot h} = \frac{0,5 \cdot 1000 \cdot 140^2 + 10 \cdot 49 \cdot 251,327 + 10 \cdot 91 \cdot 502,655}{10 \cdot 251,327 + 10 \cdot 502,655 + 1000 \cdot 140}$$

$$x_1 = 70,358 \text{ mm (poloha neutrální osy)}$$

$$a = h/2 - x = 140/2 - 70,358 = 0,358 \text{ mm}$$

Moment setrvačnosti:

$$I_1 = bh^3/12 + b \cdot h \cdot a^2 + \alpha \cdot A_{s1} \cdot (d_1 - x)^2 + \alpha \cdot A_{s2} \cdot (x - d_2)^2$$

$$I_1 = 1000 \cdot 140^3/12 + 1000 \cdot 140 \cdot 0,358^2 + 10 \cdot 502,655 \cdot (91 - 70,358)^2 + 10 \cdot 251,327 \cdot (70,358 - 49)^2 = 231972848 \text{ mm}^4 = 0,000232 \text{ m}^4$$

Ohybová poddajnost:

$$C_1 = 1 / (I_1 \cdot E_{c,eff}) = 1 / (0,000232 \cdot 20000000) = 0,000216 \text{ kN}^{-1} \text{ m}^{-2}$$

Průřezové charakteristiky průřezu bez trhlin nad podporou jsou větší než průřezu v poli, je tedy zřejmé, že o vzniku trhlin tento průřez nerozhoduje.

Ověření vzniku trhlin:

Ohybový moment při vzniku trhlin:

$$m_{cr} = f_{ctm} \cdot I_1 / (h - x_1) = 5000 \cdot 0,000232 / (0,18 - 0,091) = 16,655 \text{ kNm}$$

$$m_{cr} = 16,655 \text{ kNm} > m_{Ek} = 14,580 \text{ kNm/m}$$

→ trhliny při charakteristické kombinaci zatížení nevznikají

Výpočet křivosti od zatížení:

Křivost uprostřed rozpětí:

$$(1/r_m)_g = m_{gk} \cdot C_1 = 12,150 \cdot [0,000216 + 0,061 \cdot 0,001763] = 0,002619 \text{ m}^{-1}$$

$\xi = 0$ (průřezy bez trhlin)

Výpočet průhybu od zatížení:

$$w_g = k \cdot l^2 \cdot (1/r_m)_g = 1/12 \cdot 5,4^2 \cdot 0,002619 = 0,006364 \text{ m} = 6,364 \text{ mm}$$

$$k = 1/12$$

Výpočet křivosti od smršťování:

Celkové poměrné smršťování:

$$\epsilon_{cs} = \epsilon_{cd} + \epsilon_{ca} = 0,000324 + 0,0002 = 0,000524$$

Poměrné smršťování vysycháním ϵ_{cd} :

$$\epsilon_{cd}(t) = \beta_{ds}(t, t_s) \cdot k_h \cdot \epsilon_{cd,0} = 1,0 \cdot 0,94 \cdot 0,000345 = 0,000324$$

$$\beta_{ds}(t, t_s) = \frac{(t - t_s)}{(t - t_s) + 0,04 \cdot \sqrt{(h_0)^3}} = \frac{(18250 - 3)}{(18250 - 3) + 0,04 \cdot \sqrt{(140)^3}} = 1,0$$

$$t_s = 3 \text{ dny (doba ošetřování)}$$

$$t = 18250 \text{ dní (50 let; životnost konstrukce)}$$

$$k_h = 0,94 \text{ (součinitel závisící na náhradní tloušťce } h_0, \text{ dle [3], strana 36, tabulka 3.3)}$$

$$h_0 = 2A_c/u = 2 \cdot b \cdot h / (2b) = h = 140 \text{ mm}$$

Základní poměrné smršťování vysycháním $\epsilon_{cd,0}$:

$$\epsilon_{cd,0} = 0,85 \cdot [(220 + 110\alpha_{ds1}) \cdot \exp(-\alpha_{ds2} \cdot f_{cm}/f_{cm0})] \cdot 10^{-6} \cdot \beta_{RH}$$

$$\beta_{RH} = 1,356$$

$$f_{cm0} = 10 \text{ MPa}$$

$$\alpha_{ds1} = 6$$

$$\alpha_{ds2} = 0,11$$

$$\epsilon_{cd,0} = 0,85 \cdot [(220 + 110 \cdot 6) \cdot \exp(-0,11 \cdot 98/10)] \cdot 10^{-6} \cdot 1,356 = 0,000345$$

Poměrné autogenní smršťování:

$$\epsilon_{ca}(t) = \beta_{as}(t) \cdot \epsilon_{ca}(\infty) = 1,000 \cdot 0,0002 = 0,0002$$

$$\beta_{as}(t) = 1 - \exp(-0,2 \cdot t^{0,5}) = 1 - \exp(-0,2 \cdot 182500,5) = 1,000$$

$$\epsilon_{ca}(\infty) = 2,5 \cdot (f_{ck} - 10) \cdot 10^{-6} = 2,5 \cdot (90 - 10) \cdot 10^{-6} = 0,0002$$

Křivost od smršťování prvku bez trhlin:

$$(1/r)_{cs1} = \epsilon_{cs} \cdot \alpha \cdot \frac{S_{s0} - (A_{s1} + A_{s2}) \cdot a_{gi}}{I_1} = 0,000524 \cdot 10.$$

$$\frac{5,806 \cdot 10^{-5} - (502,655 + 251,327) \cdot 10^{-6} \cdot 0,070}{0,000232} = 1,132 \cdot 10^{-4} \text{ m}^{-1}$$

$$S_{s0} = (A_{s1} + A_{s2}) \cdot a_{gs} = (502,655 + 251,327) \cdot 77 \cdot 10^{-9} = 5,806 \cdot 10^{-5} \text{ m}^3$$

(statický moment výztuže)

$$a_{gs} = (A_{s1} \cdot d_1 + A_{s2} \cdot d_2) / (A_{s1} + A_{s2}) \text{ (těžiště výztuže)}$$

$$a_{gs} = (502,655 \cdot 91 + 251,327 \cdot 49) / (502,655 + 251,327) = 77 \text{ mm}$$

$$a_{gi} = [\alpha \cdot S_{s0} + A_c \cdot h/2] / [\alpha \cdot (A_{s1} + A_{s2}) + A_c] \text{ (těžiště ideálního průřezu)}$$

$$a_{gi} = [10 \cdot 5,806 \cdot 10^{-5} + 0,140 \cdot 0,140/2] / [10 \cdot (502,655 + 251,327) + 0,14] = 0,070 \text{ m}$$

Výsledná křivost od smršťování:

$$(1/r_m)_{cs} = (1/r_m)_{cs1} = 1,132 \cdot 10^{-4} \text{ m}^{-1}$$

Výpočet průhybu od smršťování:

$$w_{cs} = k \cdot l^2 \cdot (1/r_m)_{cs} = 1/12 \cdot 5,4^2 \cdot 1,132 \cdot 10^{-4} = 0,000275 \text{ m} = 0,275 \text{ mm}$$

Výpočet celkového průhybu:

$$w = w_g + w_{cs} = 6,364 + 0,275 = 6,639 \text{ mm}$$

Posouzení průhybu:

Limitní průhyb (dle [3]):

$$w_{lim} = l/250 = 5400/250 = 21,600 \text{ mm}$$

$$\underline{w = 6,639 < w_{lim} = 21,600 \text{ mm}}$$

→ Navržená konstrukce vyhovuje z hlediska mezního stavu přetvoření.

Posouzení ostatních MSP:

Průřezové charakteristiky průřezu s trhlinami v poli:

Horní výztuž: Ø 8 po 240 mm, $A_{s2} = 251,327 \text{ mm}^2$

Dolní výztuž: Ø 8 po 120 mm, $A_{s1} = 502,655 \text{ mm}^2$

Ve výpočtu je vzhledem k větší vzdálenosti výztuže od hrany průřezu předpokládáno, že obě řady výztuže jsou tažené.

$$x_{2,pole} = 27,360 \text{ mm (poloha neutrální osy; předpoklad o tažené horní výztuži splněn)}$$

Moment setrvačnosti:

$$I_{2,pole} = bh^3/3 + \alpha \cdot A_{s1} \cdot (d_1 - x)^2 + \alpha \cdot A_{s2} \cdot (x - d_2)^2$$

$$I_{2,pole} = 1000 \cdot 140^3/3 + 10 \cdot 502,655 \cdot (126 - 27,360)^2 + 10 \cdot 251,327 \cdot (27,360 - 49)^2 = 28361664,6 \text{ mm}^4 = 2,836 \cdot 10^{-5} \text{ m}^4$$

Stejným způsobem byly spočteny průřezové charakteristiky průřezu nad podporou:

$$x_{2,podpora} = 28,786 \text{ mm}$$

$$I_{2,podpora} = 2,954 \cdot 10^{-5} \text{ m}^4$$

Omezení napětí v tažené výztuži (spočteno pro průřez v poli – větší hodnota):

$$\sigma_s = 327,158 \text{ MPa}$$

$$\sigma_s = 327,158 \text{ MPa} > 0,8 \cdot f_{yk} = 0,8 \cdot 500 = 400 \text{ MPa (limitní hodnota pro napětí ve výztuži dle [3])}$$

→ Navržená konstrukce vyhovuje z hlediska omezení napětí v tažené výztuži.

Omezení napětí v tlačeném betonu (spočteno pro průřez nad podporou – větší hodnota):

Z důvodu zamezení vzniku podélných trhlin:

$$\sigma_{cc} = 11,841 \text{ MPa}$$

$$\sigma_{cc} = 11,841 \text{ MPa} > 0,6 \cdot f_{ck} = 0,6 \cdot 90 = 54 \text{ MPa (limitní hodnota pro napětí v betonu dle [3])}$$

Z důvodu zamezení nelineárnímu dotvarování:

$$\sigma_{cc} = 14,209 \text{ MPa}$$

$$\sigma_{cc} = 14,209 \text{ MPa} > 0,45 \cdot f_{ck} = 0,45 \cdot 90 = 40,5 \text{ MPa (limitní hodnota pro napětí v betonu dle [3])}$$

→ Navržená konstrukce vyhovuje z hlediska omezení napětí v betonu .

Omezení šířky trhlin:

Minimální průřezová plocha betonářské výztuže:

$$A_{s,min} = 142,643 \text{ mm}^2$$

$$A_{s,min} = 142,643 \text{ mm}^2 > A_{s,prov} = 502,655 \text{ mm}^2$$

→ Navržené množství výztuže je dostatečné z hlediska omezení šířky trhlin

Omezení šířky trhlin bez přímého výpočtu [3]:

Napětí ve výztuži při kvazi-stálé kombinaci zatížení:

$$\sigma_s = \alpha \cdot m_{gk} \cdot (d_1 - x_2) / l_2 = 10 \cdot 12,150 \cdot (0,091 - 0,027) / 2,836 \cdot 10^{-5} = 272632 \text{ kPa}$$

$$\sigma_s = 272,632 \text{ MPa}$$

Dle [3] je pro daný stupeň vlivu prostředí šířka trhliny omezena hodnotou 0,3 mm.

Podle tabulky je při vypočteném napětí ve výztuži a při limitní šířce trhlin maximální možný průměr výztužných vložek 17 mm. Navržená konstrukce tomuto požadavku vyhovuje, není tedy nutné ověřovat šířku trhlin výpočtem.

Návrh trámů:

Rozměry trámu: Navrženy byly rozměry $h = 450 \text{ mm}$ a $b = 250 \text{ mm}$.

Krycí vrstva byla stanovena dle [3] pro stupeň vlivu prostředí XC4 a XD3 na 50 mm.

Výztuž byla navržena běžnými postupy dle [3].

Schéma výztuže je přiloženo k práci.

7.2.3. Varianta 2B

Vstupní údaje do výpočtu:

Beton: C90/105 – XC3 – CI 0,2 – D_{max} 16mm – S4

$$f_{ck} = 90 \text{ MPa}$$

$$f_{cm} = 98 \text{ MPa}$$

$$f_{ctm} = 5 \text{ MPa}$$

$$f_{ctk,0,05} = 3,5 \text{ MPa}$$

$$E_{cm} = 44 \text{ GPa}$$

Ocel: B500B

$$f_{yk} = 500 \text{ MPa}$$

Předpoklady výpočtu a uvažované užité zatížení jsou stejné jako v případě varianty 1.

Návrh stropní desky:

Krycí vrstva byla stanovena dle [3] pro stupeň vlivu prostředí XC4 a XD3 na 45 mm.

Výztuž byla navržena běžnými postupy dle [3].

Dolní povrch: celoplošně Ø 8 po 130 mm

Horní povrch: celoplošně Ø 8 po 260 mm, v blízkosti trámů Ø 8 po 130 mm

Rozdělovací výztuž: Ø 8 po 400 mm

Celoplošné vyztužení u obou povrchů je navrženo kvůli omezení smršťování.

Tloušťka desky: Navržena byla tloušťka desky 180 mm.

Výpočet průhybu:

Kombinace zatížení:

Zatížení a jeho účinky jsou stejné jako v případě varianty 1.

$$f_{gk} = 6 \text{ kN/m}^2$$

$$f_k = 7 \text{ kN/m}^2$$

Ohybový moment:

$$\text{Kvazi-stálá kombinace: } m_{gk} = 14,580 \text{ kNm/m}$$

$$\text{Charakteristická kombinace: } m_{Ek} = 17,010 \text{ kNm/m}$$

Součinitel dotvarování a efektivní modul pružnosti betonu:

Stejně jako v případě varianty 2A: $\varphi = 1,2$

$$E_{c,eff} = 20000 \text{ MPa}$$

Pracovní součinitel (poměr modulů pružnosti):

Stejně jako v případě varianty 2A: $\alpha = 10$

Průřezové charakteristiky průřezu bez trhlin v poli:

Horní výztuž: Ø 8 po 260 mm, $A_{s2} = 193,329 \text{ mm}^2$

Dolní výztuž: Ø 8 po 130 mm, $A_{s1} = 386,658 \text{ mm}^2$

$$d_1 = 91 \text{ mm}$$

$$d_2 = 49 \text{ mm}$$

$$x_1 = \frac{0,5 \cdot b \cdot h^2 + \alpha \cdot d_2 \cdot A_{s2} + \alpha \cdot d_1 \cdot A_{s1}}{\alpha \cdot A_{s2} + \alpha \cdot A_{s1} + b \cdot h} = \frac{0,5 \cdot 1000 \cdot 180^2 + 10 \cdot 49 \cdot 193,329 + 10 \cdot 91 \cdot 386,658}{10 \cdot 193,329 + 10 \cdot 386,658 + 1000 \cdot 180}$$

$$x_1 = 90,427 \text{ mm (poloha neutrální osy)}$$

$$a = h/2 - x = 180/2 - 90,427 = 0,427 \text{ mm}$$

Moment setrvačnosti:

$$I_1 = bh^3/12 + b \cdot h \cdot a^2 + \alpha \cdot A_{s1} \cdot (d_1 - x)^2 + \alpha \cdot A_{s2} \cdot (x - d_2)^2$$

$$I_1 = 1000 \cdot 180^3/12 + 1000 \cdot 180 \cdot 0,427^2 + 10 \cdot 386,658 \cdot (91 - 90,427)^2 + 10 \cdot 193,329 \cdot (90,427 - 49)^2 = 495715754,8 \text{ mm}^4 = 0,000496 \text{ m}^4$$

Ohybová poddajnost:

$$C_1 = 1/(I_1 \cdot E_{c,eff}) = 1/(0,000496 \cdot 20000000) = 0,000101 \text{ kN}^{-1}\text{m}^{-2}$$

Průřezové charakteristiky průřezu bez trhlin nad podporou jsou větší než průřezu v poli, je tedy zřejmé, že o vzniku trhlin tento průřez nerozhoduje.

Ověření vzniku trhlin:

Ohybový moment při vzniku trhlin:

$$m_{cr} = f_{ctm} \cdot I_1 / (h - x_1) = 500 \cdot 0,000496 / (0,18 - 0,091) = 27,671 \text{ kNm}$$

$$m_{cr} = 27,671 \text{ kNm} > m_{Ek} = 17,010 \text{ kNm/m}$$

→ trhliny při charakteristické kombinaci zatížení nevznikají

Výpočet křivosti od zatížení:

Křivost uprostřed rozpětí:

$$(1/r_m)_g = m_{gk} \cdot C_1 = 14,580 \cdot 0,000101 = 0,001471 \text{ m}^{-1}$$

$$\xi = 0 \text{ (pro průřezy bez trhlin)}$$

Výpočet průhybu od zatížení:

$$w_g = k \cdot l^2 \cdot (1/r_m)_g = 1/12 \cdot 5,4^2 \cdot 0,001471 = 0,003575 \text{ m} = 3,575 \text{ mm}$$

$$k = 1/12$$

Výpočet křivosti od smršťování:

Celkové poměrné smršťování:

$$\epsilon_{cs} = \epsilon_{cd} + \epsilon_{ca} = 0,000304 + 0,0002 = 0,000504$$

Poměrné smršťování vysycháním ϵ_{cd} :

$$\epsilon_{cd}(t) = \beta_{ds}(t, t_s) \cdot k_h \cdot \epsilon_{cd,0} = 1,0 \cdot 0,88 \cdot 0,000345 = 0,000304$$

$$\beta_{ds}(t, t_s) = \frac{(t - t_s)}{(t - t_s) + 0,04 \cdot \sqrt{(h_0)^3}} = \frac{(18250 - 3)}{(18250 - 3) + 0,04 \cdot \sqrt{(180)^3}} = 1,0$$

$$t_s = 3 \text{ dny (doba ošetřování)}$$

$$t = 18250 \text{ dní (50 let; životnost konstrukce)}$$

$$k_h = 0,88 \text{ (součinitel závisící na náhradní tloušťce } h_0, \text{ dle [3], strana 36, tabulka 3.3)}$$

$$h_0 = 2A_c/u = 2 \cdot b \cdot h / (2b) = h = 180 \text{ mm}$$

Základní poměrné smršťování vysycháním $\varepsilon_{cd,0}$:

$$\varepsilon_{cd,0} = 0,000345 \text{ (stejně jako v případě varianty 2A)}$$

Poměrné autogenní smršťování:

$$\varepsilon_{ca}(t) = 0,0002 \text{ (stejně jako v případě varianty 2A)}$$

Křivost od smršťování prvku bez trhlin:

$$(1/r)_{cs1} = \varepsilon_{cs} \cdot \alpha \cdot \frac{S_{s0} - (A_{s1} + A_{s2}) \cdot a_{gi}}{I_1} = 0,000504 \cdot 10.$$

$$\frac{6,013 \cdot 10^{-5} - (386,658 + 193,329) \cdot 10^{-6} \cdot 0,090}{0,000496} = 7,804 \cdot 10^{-5} \text{ m}^{-1}$$

$$S_{s0} = (A_{s1} + A_{s2}) \cdot a_{gs} = (386,658 + 193,329) \cdot 104 \cdot 10^{-9} = 6,013 \cdot 10^{-5} \text{ m}^3$$

(statický moment výztuže)

$$a_{gs} = (A_{s1} \cdot d_1 + A_{s2} \cdot d_2) / (A_{s1} + A_{s2}) \text{ (těžiště výztuže)}$$

$$a_{gs} = (386,658 \cdot 91 + 193,329 \cdot 49) / (386,658 + 193,329) = 104 \text{ mm}$$

$$a_{gi} = [\alpha \cdot S_{s0} + A_c \cdot h/2] / [\alpha \cdot (A_{s1} + A_{s2}) + A_c] \text{ (těžiště ideálního průřezu)}$$

$$a_{gi} = [10 \cdot 5,806 \cdot 10^{-5} + 0,180 \cdot 0,180/2] / [10 \cdot (386,658 + 193,329) + 0,14] = 0,090 \text{ m}$$

Výsledná křivost od smršťování:

$$(1/r_m)_{cs} = (1/r_m)_{cs1} = 7,804 \cdot 10^{-5} \text{ m}^{-1}$$

$$\xi = 0$$

Výpočet průhybu od smršťování:

$$w_{cs} = k \cdot l^2 \cdot (1/r_m)_{cs} = 1/12 \cdot 5,4^2 \cdot 7,804 \cdot 10^{-5} = 0,000190 \text{ m} = 0,190 \text{ mm}$$

Výpočet celkového průhybu:

$$w = w_g + w_{cs} = 3,575 + 0,190 = 3,765 \text{ mm}$$

Posouzení průhybu:

Limitní průhyb (dle [3]):

$$w_{lim} = l/250 = 5400/250 = 21,600 \text{ mm}$$

$$\underline{w = 3,765 < w_{lim} = 21,600 \text{ mm}}$$

→ Navržená konstrukce vyhovuje z hlediska mezního stavu přetvoření.

Posouzení ostatních MSP:

Průřezové charakteristiky průřezu s trhlinami v poli:

$$\text{Horní výztuž: } \varnothing 8 \text{ po } 260 \text{ mm, } A_{s2} = 193,329 \text{ mm}^2$$

$$\text{Dolní výztuž: } \varnothing 8 \text{ po } 130 \text{ mm, } A_{s1} = 386,658 \text{ mm}^2$$

Ve výpočtu je vzhledem k větší vzdálenosti výztuže od hrany průřezu předpokládáno, že obě řady výztuže jsou tažené.

$$x_{2,pole} = 29,359 \text{ mm (poloha neutrální osy; předpoklad o tažené horní výztuži splněn)}$$

Moment setrvačnosti:

$$I_{2,pole} = bh^3/3 + \alpha \cdot A_{s1} \cdot (d_1 - x)^2 + \alpha \cdot A_{s2} \cdot (x - d_2)^2$$

$$I_{2,pole} = 1000 \cdot 140^3 / 3 + 10 \cdot 386,658 \cdot (126 - 29,359)^2 + 10 \cdot 193,329 \cdot (29,359 - 49)^2 = 49126319 \text{ mm}^4 = 4,913 \cdot 10^{-5} \text{ m}^4$$

Stejným způsobem byly spočteny průřezové charakteristiky průřezu nad podporou:

$$x_{2,podpora} = 30,369 \text{ mm}$$

$$I_{2,podpora} = 4,987 \cdot 10^{-5} \text{ m}^4$$

Omezení napětí v tažené výztuži (spočteno pro průřez v poli – větší hodnota):

$$\sigma_s = 351,932 \text{ MPa}$$

$$\sigma_s = 351,932 \text{ MPa} > 0,8 \cdot f_{yk} = 0,8 \cdot 500 = 400 \text{ MPa (limitní hodnota pro napětí ve výztuži dle [3])}$$

→ Navržená konstrukce vyhovuje z hlediska omezení napětí v tažené výztuži.

Omezení napětí v tlačeném betonu (spočteno pro průřez nad podporou – větší hodnota):

Z důvodu zamezení vzniku podélných trhlin:

$$\sigma_{cc} = 10,358 \text{ MPa}$$

$$\sigma_{cc} = 10,358 \text{ MPa} > 0,6 \cdot f_{ck} = 0,6 \cdot 90 = 54 \text{ MPa (limitní hodnota pro napětí v betonu dle [3])}$$

Z důvodu zamezení nelineárnímu dotvarování:

$$\sigma_{cc} = 8,878 \text{ MPa}$$

$$\sigma_{cc} = 8,878 \text{ MPa} > 0,45 \cdot f_{ck} = 0,45 \cdot 90 = 40,5 \text{ MPa (limitní hodnota pro napětí v betonu dle [3])}$$

→ Navržená konstrukce vyhovuje z hlediska omezení napětí v betonu.

Omezení šířky trhlin:

Minimální průřezová plocha betonářské výztuže:

$$A_{s,min} = 170,487 \text{ mm}^2$$

$$A_{s,min} = 170,487 \text{ mm}^2 < A_{s,prov} = 386,658 \text{ mm}^2$$

→ Navržené množství výztuže je dostatečné z hlediska omezení šířky trhlin

Omezení šířky trhlin bez přímého výpočtu [3]:

Napětí ve výztuži při kvazi-stálé kombinaci zatížení:

$$\sigma_s = 301,656 \text{ MPa}$$

Dle [3] je pro daný stupeň vlivu prostředí šířka trhliny omezena hodnotou 0,3 mm.

Podle tabulky je při vypočteném napětí ve výztuži a při limitní šířce trhlin maximální možný průměr výztužných vložek 13 mm. Navržená konstrukce tomuto požadavku vyhovuje, není tedy nutné ověřovat šířku trhlin výpočtem.

Návrh trámů:

Rozměry trámu: Navrženy byly rozměry $h = 500 \text{ mm}$ a $b = 300 \text{ mm}$.

Krycí vrstva byla stanovena dle [3] pro stupeň vlivu prostředí XC4 a XD3 na 50 mm.

Výztuž byla navržena běžnými postupy dle [3].

Schéma výztuže je přiloženo k práci (je shodné se schématem výztuže trámu pro variantu 1).

7.3. Vyhodnocení variant z hlediska udržitelného rozvoje

Posouzení je zhotoveno na základě hodnocení části životního cyklu: od získávání surovin po výrobu konstrukce. V hodnocení jsou tedy zahrnuty dopady související s výrobou betonu i oceli, s dopravou těchto materiálů na místo stavby a s umístěním těchto materiálů do konstrukce.

Receptura betonu C35/45-XC4, XD3-CI 0,2-D_{max}16-S4:

Tabulka 7.2: Receptura betonu C35/45

Cement 42,5 R	335 kg/m ³
Voda	135 kg/m ³
Kamenivo hrubé (8-16 mm)	780 kg/m ³
Kamenivo střední (4-8 mm)	290 kg/m ³
Kamenivo jemné (0-4 mm)	750 kg/m ³
Vápenec	110 kg/m ³
Plastifikátor Stachement	3,7 kg/m ³
Mikrosilika Stachesil	14 kg/m ³

Receptura betonu C90/105-XC4, XD3-CI 0,2-D_{max}16-S4:

Tabulka 7.3: Receptura betonu C90/105

Cement 52,5 R	500 kg/m ³
Voda	165 kg/m ³
Kamenivo hrubé (8-16 mm)	700 kg/m ³
Kamenivo střední (4-8 mm)	220 kg/m ³
Kamenivo jemné (0-4 mm)	860 kg/m ³
Plastifikátor Stachement	4,5 kg/m ³

Pro vyztužení je navržena ocel B500B.

V následující tabulce jsou uvedeny **objemy betonu a oceli** pro jednotlivé varianty:

Tabulka 7.4: Objemy betonu a oceli pro jednotlivé varianty

	Objem betonu [m ³]	Množství výztuže [kg]
Varianta 1	86,438	4361,946
Varianta 2A	67,411	4759,971
Varianta 2B	86,438	4111,496

Pro hodnocení variant z hlediska udržitelného rozvoje byla použita data o emisích a spotřebovaných zdrojích z publikace [17].

Uvažovány byly kategorie dopadu doporučené v Pravidlech produktové kategorie (PCR) pro betonové výrobky [6], tedy:

- změna klimatu a globální oteplování
- acidifikace
- eutrofizace
- úbytek stratosférického ozonu
- tvorba fotooxidantů
- úbytek surovin a energie.

V rámci hodnocení jsou uvažovány emise následujících látek:

- oxid uhličitý CO₂
- oxid siřičitý SO₂
- oxidy dusíku NO_x
- oxid uhelnatý CO
- metan CH₄
- nemetanové těkavé organické látky NMVOC
- oxid dusný N₂O
- kyselina chlorovodíková HCl
- kyselina fluorovodíková HF
- sulfan H₂S
- amoniak NH₃

Pro stanovení vlivů na jednotlivé kategorie dopadu bylo v případě většiny emisí vycházeno z **charakterizačních modelů**, které jsou doporučeny PCR pro betonové výrobky [14]. Charakterizační faktory týkající se nemetanových těkavých organických látek NMVOC byly převzaty z internetových stránek Quality Management and Safety Engineering - module MST 326 for BSc MST [9], protože ve výše uvedené databázi doporučené v PCR nejsou uvedeny souhrnné údaje pro celou skupinu látek NMVOC. Jsou zde uvedeny pouze údaje pro jednotlivé látky této skupiny, naproti tomu data o uvolněných emisích při výrobě konstrukce obsahují pouze hodnoty celkového množství NMVOC. V rámci celkového hodnocení však hodnoty charakterizačních faktorů pro tyto látky nehrají příliš velkou roli, protože kategorie, na které mají tyto látky vliv, jsou celkově zasaženy dosti malou měrou. V následující tabulce jsou uvedeny charakterizační faktory sledovaných emisí pro hodnocené kategorie dopadu.

Tabulka 7.5: Charakterizační faktory sledovaných emisí

	GWP	AP	EP	ODP	POCP
CO ₂	1	0	0	0	0
SO ₂	0	1	0	0	0,048
NO _x	5	0,5	0,13	0	0
CO	3	0	0	0	0,027
CH ₄	28	0	0	0	0,006

NMVOC	11	0	0	0,005	0,416
N ₂ O	265	0	0,27	0	0
HCl	0	0,88	0	0	0
HF	0	1,6	0	0	0
H ₂ S	0	1,88	0	0	0
NH ₃	0	1,6	0,35	0	0

V následující tabulce je uveden příklad výpočtu hodnot kategorií dopadu pro použitou surovinu (v tomto případě mikrosilika):

Tabulka 7.6: Příklad výpočtu hodnot kategorií dopadu

MIKROSILIKA	Množství uvolněné látky	GWP [kg CO ₂ ekv.]	AP [kg SO ₂ ekv.]	EP [kg PO ₄ ³⁻ ekv.]	ODP [kg CFC-11 ekv.]	POCP [kg C ₂ H ₄ ekv.]
CO ₂	1,100E+0 0	1,100E+00	0,000E+00	0,000E+00	0,000E+00	0,000E+00
SO ₂	7,800E-04	0,000E+00	7,800E-04	0,000E+00	0,000E+00	3,744E-05
NO _x	1,280E-03	6,400E-03	6,400E-04	1,664E-04	0,000E+00	0,000E+00
CO	4,720E-04	1,416E-03	0,000E+00	0,000E+00	0,000E+00	1,274E-05
CH ₄	2,270E-03	6,356E-02	0,000E+00	0,000E+00	0,000E+00	1,362E-05
NMVOC	7,000E-05	7,700E-04	0,000E+00	0,000E+00	3,500E-07	2,912E-05
N ₂ O	4,000E-05	1,060E-02	0,000E+00	1,080E-05	0,000E+00	0,000E+00
HCl	0,000E+0 0	0,000E+00	0,000E+00	0,000E+00	0,000E+00	0,000E+00
HF	0,000E+0 0	0,000E+00	0,000E+00	0,000E+00	0,000E+00	0,000E+00
H ₂ S	0,000E+0 0	0,000E+00	0,000E+00	0,000E+00	0,000E+00	0,000E+00
NH ₃	0,000E+0 0	0,000E+00	0,000E+00	0,000E+00	0,000E+00	0,000E+00
celkem		1,183E-03	1,420E-06	1,772E-07	3,500E-10	9,292E-08

Pro hodnocení **úbytku minerálních surovin** (ADP) byla použita tatáž databáze charakterizačních faktorů jako pro ostatní kategorie dopadu [14]. Použita byla data založená na konečných rezervách daných látek. Charakterizační faktory pro tuto kategorii dopadu mohou být založené také na rychlosti těžby nebo na kombinaci hodnocení dle konečných zásob a rychlosti těžby. Data založená na konečných zásobách těchto látek byla dostupná pro největší množství chemických prvků, proto byla pro hodnocení použita. Při hodnocení této kategorie dopadu bylo vycházeno z chemického složení daných materiálů. Pro jednotlivé složky těchto materiálů byly spočteny procentuální podíly (hmotnostní zlomky) jednotlivých prvků na základě jejich molární hmotnosti. Příklad výpočtu je níže uveden pro mikrosiliku (tab. 7.7):

Tabulka 7.7: Příklad výpočtu obsahu prvků v surovině

MIKROSILIKA								
Látka	Prvek	Molární hmotnost M_m [kg/mol]	Počet atomů v molekule	Celková molární hmotnost [kg/mol]	Hmotnostní zlomek w [-]	Obsah prvku v 1 kg látky [g]	Procentní obsah látky [%]	Obsah prvku v 1kg materiálu [kg]
SiO ₂	Si	28,086	1	28,086	0,467	467,435	95,949	0,448
	O	15,999	2	31,999	0,533	532,565		0,511
				60,084				
Al ₂ O ₃	Al	26,982	2	53,963	0,529	529,250	1,066	0,006
	O	15,999	3	47,998	0,471	470,750		0,005
				101,961				
Na ₂ O	Na	22,990	2	45,980	0,742	741,858	0,533	0,004
	O	15,999	1	15,999	0,258	258,142		0,001
				61,979				
CaO	Ca	40,078	1	40,078	0,715	714,691	0,853	0,006
	O	15,999	1	15,999	0,285	285,309		0,002
				56,077				
MgO	Mg	24,305	1	24,305	0,603	603,036	1,599	0,010
	O	15,999	1	15,999	0,397	396,964		0,006

Každému prvku byl přiřazen charakterizační faktor dle výše uvedeného zdroje a byl převeden na referenční látku pro tuto kategorii dopadu (antimon Sb). Následně byly sečteny příspěvky jednotlivých prvků a tak byla získána hodnota ADP pro 1 kg tohoto materiálu (tab. 7.8).

Tabulka 7.8: Příklad výpočtu ADP

Prvek	Obsah prvku v 1 kg látky [g]	kg Sb ekv.
Si	0,448	7,090E-07
Al	0,006	2,400E-06
Na	0,004	8,260E-06
Ca	0,006	4,820E-06
Mg	0,010	8,560E-06
O	0,526	0,000E+00
celkem		2,47E-05

Tabulka 7.9: ADP pro jednotlivé suroviny

Materiál	ADP [kg Sb ekv.]
Vápenec	1,930E-06
Sádrovec	6,431E-04
Granit	4,740E-04
Popílek	7,296E-05
Struska	1,649E-05
Železná ruda	3,550E-06

Obsah látek v mikrosilice byl převzat z technického listu výrobce [43]. Stejným způsobem byly stanoveny ADP ostatních materiálů použitých pro konstrukci. ADP jsou uvedeny v tabulce 7.9. Chemické složení granitu bylo uvažováno dle [42], chemické složení popílku bylo uvažováno jako průměrné chemické složení popílků z několika tepelných elektráren v ČR [36]. Informace o zdrojích železné rudy v ČR byly převzaty z [37].

Hodnoty kategorií dopadu pro 1 kg materiálu byly následně přepočteny na obsah v 1 m³ betonu a dále na množství skutečně použitého materiálu. Započítány byly také dopady související s výrobou betonové směsi. V následující tabulce je jako příklad uveden výpočet hodnot kategorií dopadu pro 1m³ betonu v případě varianty 1:

Tabulka 7.10: Příklad výpočtu hodnot kategorií dopadu pro 1m³ betonu (C35/45)

Beton (1 m ³)								
Surovina	Množství v 1m ³ [kg]	GWP [kg CO ₂ ekv.]	AP [kg SO ₂ ekv.]	EP [kg PO ₄ ⁻³ ekv.]	ODP [kg CFC-11 ekv.]	POCP [kg C ₂ H ₄ ekv.]	ADP element [kg Sb ekv.]	ADP fossil [MJ]
cement	335	2,779E+02	7,916E-01	3,111E-02	2,821E-04	6,482E-02	1,438E-05	3,774E+03
těžené kamenivo	0	0,000E+00	0,000E+00	0,000E+00	0,000E+00	0,000E+00	4,740E-04	2,034E-02
drcený štěrk	1070	2,592E+00	8,175E-03	1,267E-03	1,017E-06	3,220E-04	4,740E-04	2,612E-02
mletý písek	750	1,745E+01	3,536E-02	4,030E-03	2,513E-06	1,506E-03	4,740E-04	1,251E-01
mikromletý písek	110	6,275E+00	7,550E-01	7,834E-02	7,975E-07	5,262E-04	1,930E-06	0,000E+00
mikrosilika	14	1,656E-02	1,988E-05	2,481E-06	4,900E-09	1,301E-06	2,475E-05	5,840E-03
popílek	0	0,000E+00	0,000E+00	0,000E+00	0,000E+00	0,000E+00	7,296E-05	5,840E-03
voda	135	4,205E-02	3,085E-04	7,232E-06	1,620E-07	2,925E-05	0,000E+00	2,690E-03
plastifikátor	3,7	1,058E+01	6,993E-02	1,847E-03	3,739E-05	6,945E-03	7,461E-04	2,093E+01
celkem		3,148E+02	1,660E+00	1,166E-01	3,239E-04	7,415E-02	2,282E-03	3,795E+03

výroba betonu	1,495E+01	1,300E-02	7,803E-04	4,610E-05	1,297E-01	0,000E+00	0,000E+00
celkem s výrobou	3,298E+02	1,673E+00	1,174E-01	3,700E-04	2,038E-01	2,282E-03	3,795E+03

Dále byly vypočteny hodnoty environmentálních dopadů souvisejících s **dopravou materiálů** na místo stavby. Pro hodnocení byla uvažována doprava betonu a výztuže z nejbližší betonárny a armovny. **Armovna** je od místa stavby vzdálená **36,7 km** (Praha 10), **betonárna 10,6 km** (Benešov). Nakonec byly vyčísleny dopady související s umístěním materiálů do konstrukce pomocí jeřábu. V následujících tabulkách jsou uvedeny konečné hodnoty kategorií dopadu pro jednotlivé varianty:

Varianta 1:

Tabulka 7.11. Hodnoty kategorií dopadu pro variantu 1

Tabulka dopadů	GWP [kg CO ₂ ekv.]	AP [kg SO ₂ ekv.]	EP [kg PO ₄ ⁻³ ekv.]	ODP [kg CFC-11 ekv.]	POCP [kg C ₂ H ₄ ekv.]	ADP element [kg Sb ekv.]	ADP fossil [MJ]
Výroba betonu	28503,666	144,645	10,146	0,032	17,618	1,97E-01	332066,402

Výroba oceli	11762,454	18,836	1,605	0,012	4,477	1,55E-02	107266,347
Doprava materiálů	6,596	0,009	0,001	0,003	0,227	0,000	7,611
Realizace konstrukce	39,632	0,004	0,004	0,000	0,009	0,00E+00	39,010
Celkem	40312,347	163,495	11,756	0,047	22,331	2,13E-01	439379,370

Varianta 2A:

Tabulka 7.12: Hodnoty kategorií dopadu pro variantu 2A

Tabulka dopadů	GWP [kg CO ₂ ekv.]	AP [kg SO ₂ ekv.]	EP [kg PO ₄ ⁻³ ekv.]	ODP [kg CFC- 11 ekv.]	POCP [kg C ₂ H ₄ ekv.]	ADP element [kg Sb ekv.]	ADP fossil [MJ]
Výroba betonu	31372,030	91,287	3,910	0,035	16,048	1,35E-01	267973,928
Výroba oceli	12835,773	20,555	1,751	0,013	4,886	1,69E-02	117054,357
Doprava materiálů	5,346	0,007	0,001	0,002	0,184	0,000	6,169
Realizace konstrukce	31,561	0,003	0,003	0,000	0,007	0,00E+00	31,066
Celkem	44244,709	111,853	5,665	0,050	21,125	1,52E-01	385065,519

Varianta 2B:

Tabulka 7.13: Hodnoty kategorií dopadu pro variantu 2B

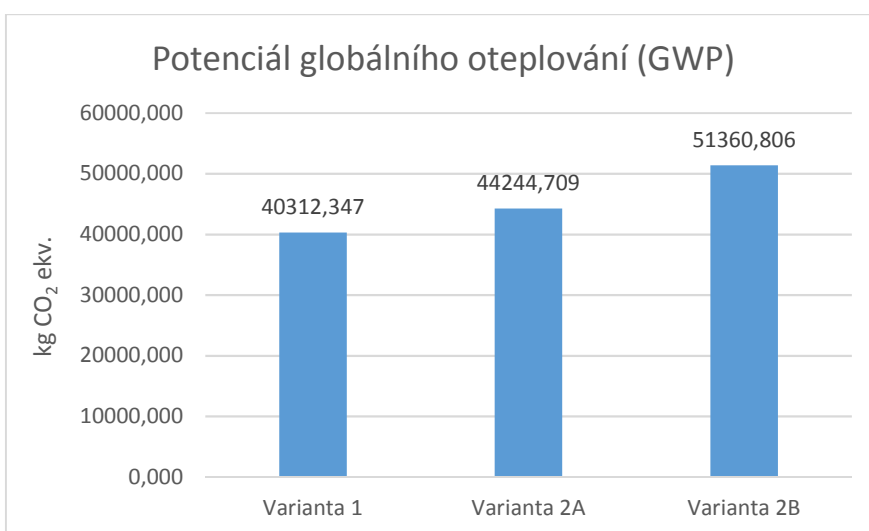
Tabulka dopadů	GWP [kg CO ₂ ekv.]	AP [kg SO ₂ ekv.]	EP [kg PO ₄ ⁻³ ekv.]	ODP [kg CFC- 11 ekv.]	POCP [kg C ₂ H ₄ ekv.]	ADP element [kg Sb ekv.]	ADP fossil [MJ]
Výroba betonu	40226,966	117,054	5,013	0,045	20,577	1,74E-01	343567,895
Výroba oceli	11087,089	17,755	1,513	0,012	4,220	1,46E-02	101107,437
Doprava materiálů	6,652	0,009	0,001	0,003	0,229	0,000	7,676
Realizace konstrukce	40,099	0,004	0,004	0,000	0,009	0,00E+00	39,470
Celkem	51360,806	134,822	6,531	0,059	25,035	1,88E-01	444722,478

V rámci porovnání environmentálních dopadů jednotlivých variant se výsledky liší dle kategorií dopadu. Ve většině kategorií vychází jako **environmentálně nejšetrnější varianta 2A**, tedy varianta navržená z betonu C90/105 s deskou tl. 140 mm. Pro kategorii dopadu globální oteplování se jeví jako environmentálně nejšetrnější varianta 1 a nejméně šetrná varianta 2B, což lze vysvětlit vyšším obsahem cementu v betonu vyšší třídy. Z toho plyne, že pro tuto kategorii dopadu je zásadní množství použitého cementu.

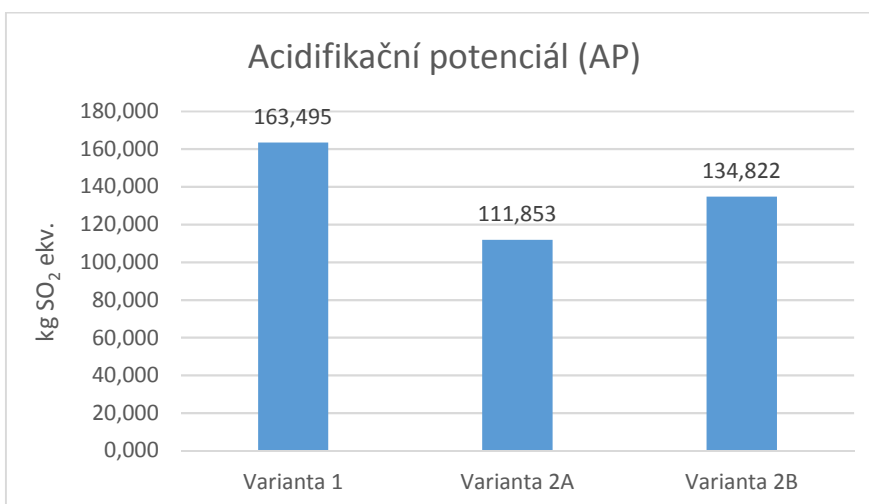
Podobné výsledky byly získány také pro úbytek stratosférického ozonu, což je opět způsobeno vysokým obsahem cementu a také vyšším množstvím použitého plastifikátoru pro beton C90/105. Pro acidifikaci, eutrofizaci a úbytek minerálních surovin se jeví varianta 1 jako nejméně příznivá, pro tvorbu fotooxidantů a úbytek fosilních surovin vychází nejméně příznivé výsledky pro variantu 2B. V celkovém hodnocení, které bylo vyhotoveno s použitím funkce užítka a za předpokladu vah kategorií dopadů uvedených v následující tabulce, vychází nejhorší výsledky pro variantu 2B. Celkové hodnocení je však silně závislé na zvolených váhách pro jednotlivé kategorie, proto je vhodnější sledovat spíše výsledky pro jednotlivé kategorie dopadu.

Tabulka 7.14: Zvolené váhy kategorií dopadu

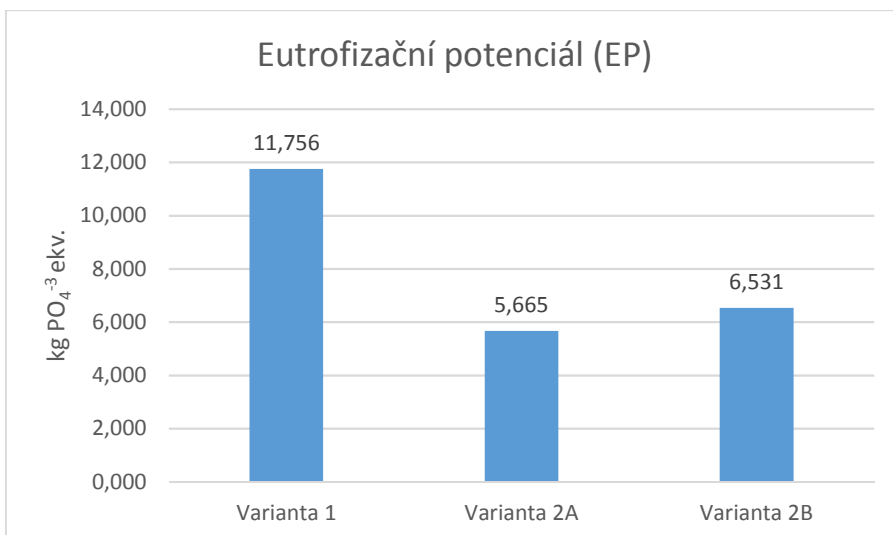
Váhy dopadů	GWP [kg CO ₂ ekv.]	AP [kg SO ₂ ekv.]	EP [kg PO ₄ ⁻³ ekv.]	ODP [kg CFC-11 ekv.]	POCP [kg C ₂ H ₄ ekv.]	ADP element [kg Sb ekv.]	ADP fossil [MJ]
Zvolená váha	0,2	0,1	0,1	0,05	0,05	0,2	0,3



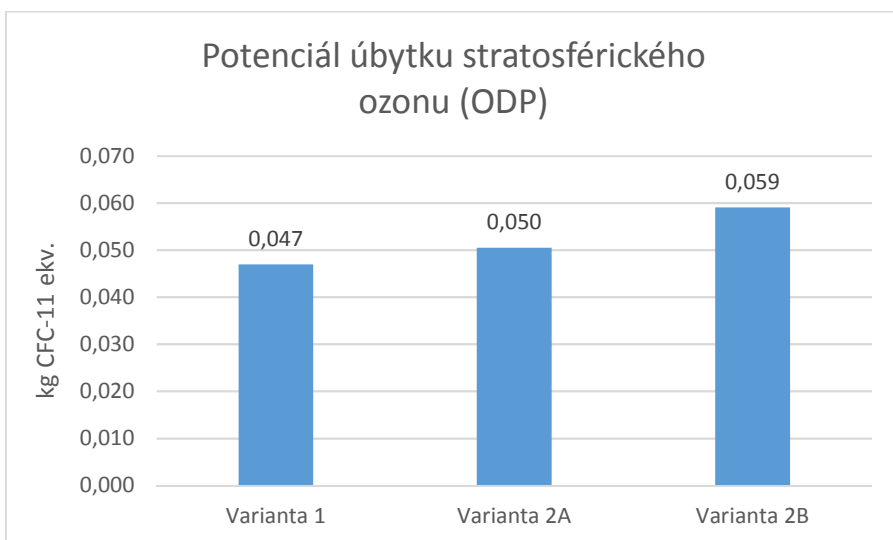
Obrázek 7.6: Porovnání GWP pro jednotlivé varianty



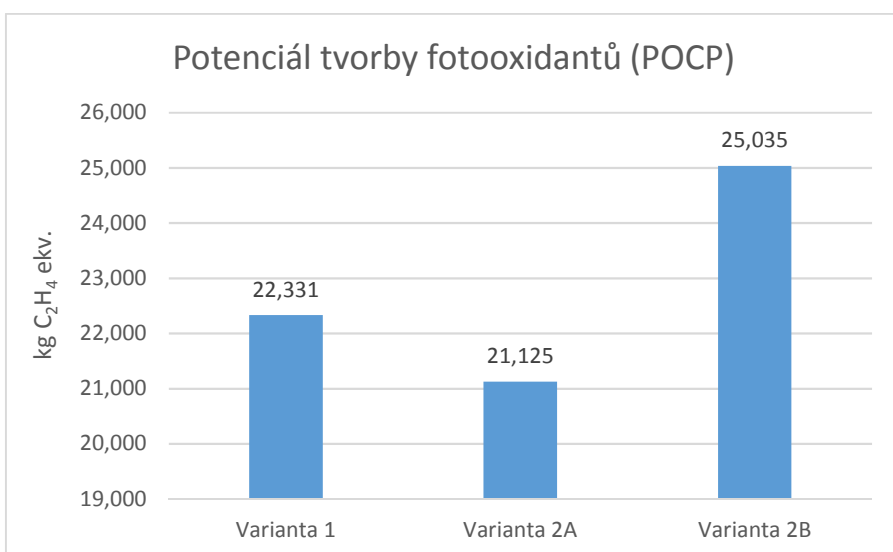
Obrázek 7.7: Porovnání AP pro jednotlivé varianty



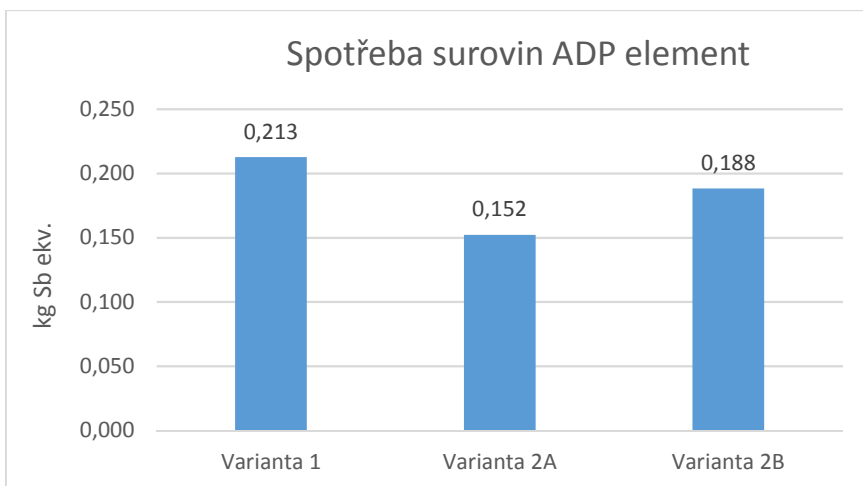
Obrázek 7.8: Porovnání EP pro jednotlivé varianty



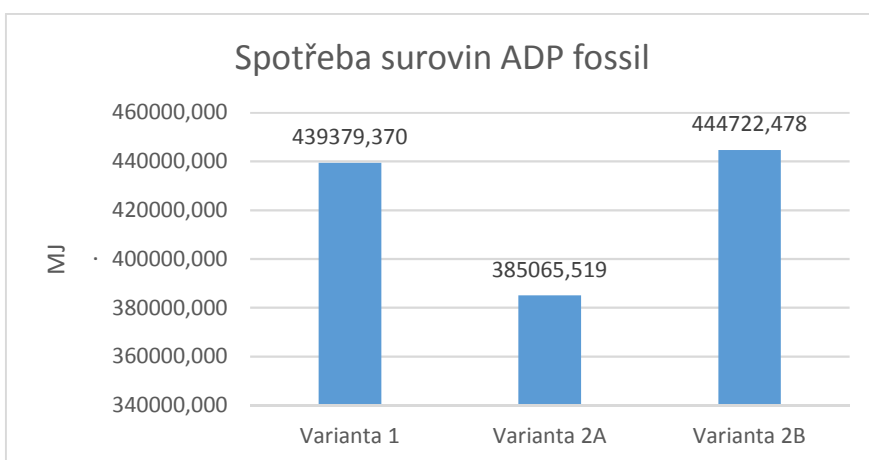
Obrázek 7.9: Porovnání ODP pro jednotlivé varianty



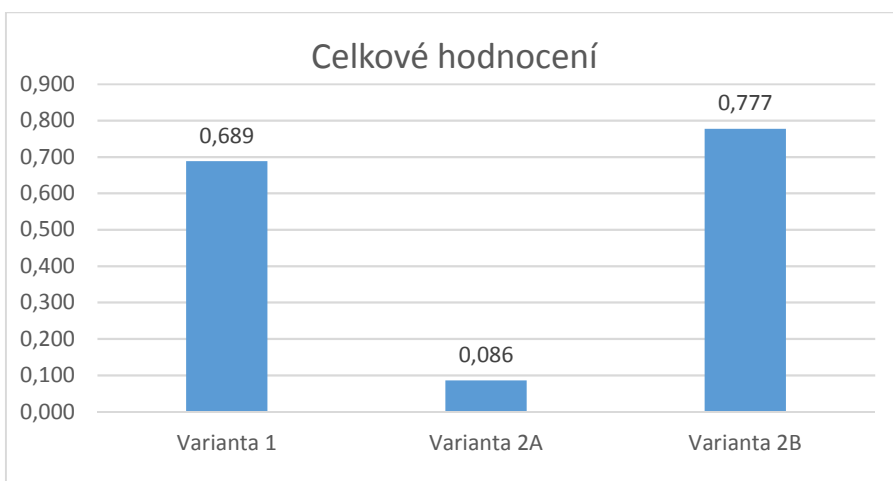
Obrázek 7.10: Porovnání POCP pro jednotlivé varianty



Obrázek 7.11: Porovnání ADP element pro jednotlivé varianty



Obrázek 7.12: Porovnání ADP fossil pro jednotlivé varianty



Obrázek 7.13: Celkové porovnání jednotlivých variant

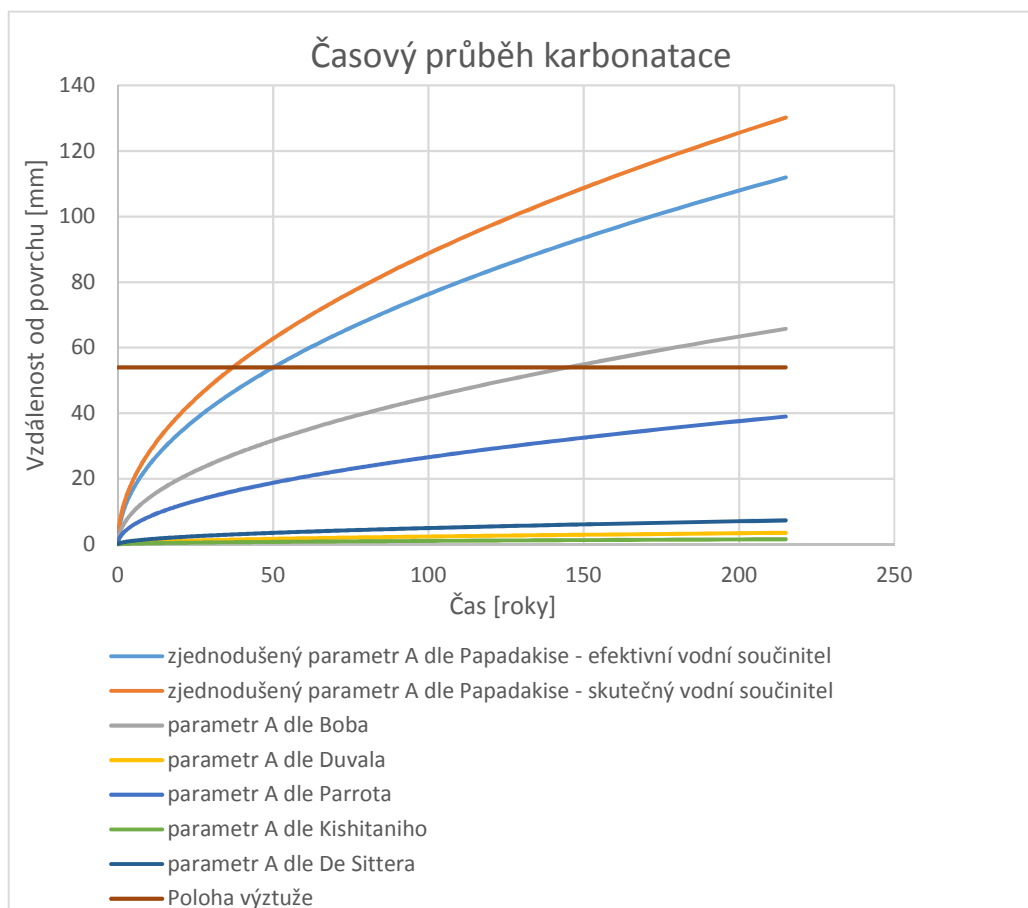
Z hlediska dopadů na životní prostředí vychází tedy nejpříznivěji varianta 2A, kde je plně využita možnost snížení množství použitého betonu, a to i za cenu většího množství použité oceli. Využití lepších mechanických vlastností betonu vyšší třídy ke snížení množství použité oceli se z tohoto hlediska jeví jako nevýhodné.

7.4. Vyhodnocení variant z hlediska trvanlivosti

Z hlediska trvanlivosti byla hodnocena stropní deska. Vzhledem k tomu, že nosné prvky jsou navrženy s velmi malou rezervou, je pro trvanlivost zásadní tloušťka krycí vrstvy, která je u deskové konstrukce menší. O trvanlivosti tedy rozhoduje stropní deska, nikoli trámy, jejichž výztuž je opatřena větší krycí vrstvou. V rámci hodnocení trvanlivosti byly posuzovány dva působící vlivy – karbonatace a působení chloridů. Působení chloridů bylo uvažováno pouze pro polovinu roku – od října do března, kdy je pravděpodobná aplikace chloridů na vozovkách. Pro modelování karbonatace bylo pro variantu 1 použito **sedm různých matematických modelů**:

- zjednodušený model dle Papadakise a kol. s použitím skutečné hodnoty vodního součinitele [31]
- zjednodušený model dle Papadakise a kol. s použitím efektivní hodnoty vodního součinitele [31], [22]
- model dle Boba [10]
- model dle de Sittera [38]
- model dle Kishitaniho [15]
- model dle Duvala [16]
- model dle Parrota [16]

Vztahy odpovídající těmto modelům jsou uvedeny v kapitole 6. Tyto modely dávají velmi odlišné výsledky. Velké odchylky jsou pravděpodobně způsobeny nepřesností modelů pracujících s menším množstvím parametrů – například modely dle Parrota a Duvala (pouze funkce tlakové pevnosti a času) nebo model dle Kishitaniho (pouze funkce vodního součinitele a času).



Obrázek 7.14:
Porovnání různých
modelů
karbonatace pro
variantu 1

V těchto modelech nejsou zohledněny vlivy prostředí, jako je teplota, vlhkost či koncentrace oxidu uhličitého. Tyto modely dávají často nesmyslně příznivé výsledky, obzvláště pro betony vysokých pevností. Z literatury je známo, že hloubka karbonatace pro běžné propustnější betony dosahuje po 1 roce cca 9 mm, po 10 letech cca 30 mm. [40]. Tyto hodnoty přibližně odpovídají modelu dle Papadakise (se skutečnou hodnotou vodního součinitele), podle kterého je hloubka karbonatace po 1 roce 8,878 mm a po 10 letech 28,074 mm.

Vzhledem k tomu, že se jedná o beton C35/45, jehož propustnost je v porovnání s nejčastěji používanými betony nižší, blíží se pravděpodobně skutečnosti nejvíce model pracující s efektivním vodním součinitelem. Zde vychází hloubka karbonatace po 1 roce 7,633 mm a po 10 letech 24,136 mm. Na výše uvedeném obrázku (obr. 7.14) je graf znázorňující závislost hloubky karbonatace na čase dle různých modelů.

Pro porovnání jednotlivých variant byly nadále použity **dva modely**:

- zjednodušený model dle Papadakise s použitím efektivní hodnoty vodního součinitele
- model dle Boba

První z použitých modelů se jeví jako nejbližší skutečnému chování materiálu, druhý model je zvolen pro porovnání, aby byl zřejmý velký vliv volby modelu na celkové výsledky.

Pro modelování **působení chloridů** byl použit model dle [33], koncentrace chloridů na povrchu konstrukce byla uvažována 0,6. Prahová koncentrace chloridů byla pro obě receptury betonu odhadnuta dle [18].

Vztah pro odhad **prahové koncentrace chloridů** má zde podobu:

$$C_{cr} = k_{cr,env} \cdot \exp(-1,5 \cdot w)$$

kde C_{cr} je prahová koncentrace chloridů [% hmotnosti pojiv], $k_{cr,env}$ je součinitel zohledňující vlhkostní podmínky prostředí a w je vodní součinitel. Pro vlhké silniční prostředí je součinitel $k_{cr,env}$ rovný jedné.

Pro navržené receptury betonu vycházejí prahové koncentrace následovně:

Pro C35/45: 0,560 % hmotnosti cementu

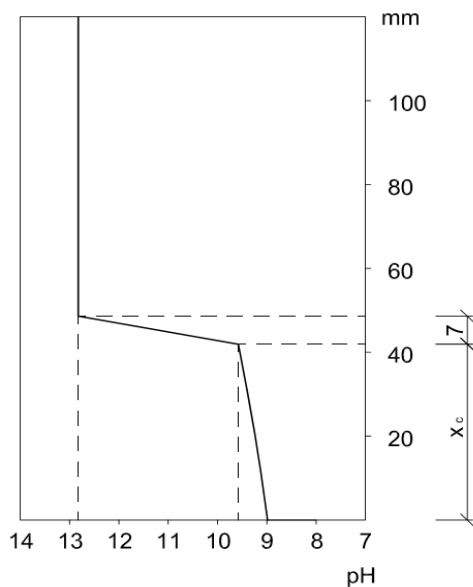
Pro C90/105: 0,610 % hmotnosti cementu

Životnost byla posuzována nejprve s **odděleným působením vlivů**, přičemž byl uvažován méně příznivý (tj. dřívější) čas depasivace výztuže. Čas depasivace výztuže byl tedy uvažován jako menší z časů:

- dosažení prahové koncentrace chloridů v úrovni výztuže
- postup zkarbonatované zóny do úrovně výztuže

Vyhodnocení bylo provedeno pro oba uvažované modely karbonatace.

Dále bylo provedeno hodnocení na základě **spolupůsobení obou vlivů**. Hodnocen byl čas dosažení prahové hodnoty poměru chloridových a hydroxidových iontů $c(\text{Cl}^-)/c(\text{OH}^-)$. Prahová hodnota byla uvažována 0,58 dle [38].



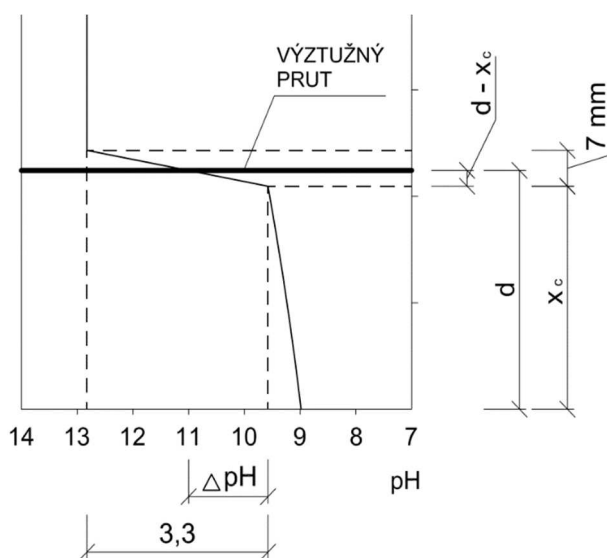
Rozložení pH po tloušťce desky bylo uvažováno přibližně dle následujícího grafu (obr.7.15) [24], přičemž na hranici x_c (hloubka zkarbonatované zóny) byla uvažována hodnota pH 9,5 – tedy hodnota pH, při které po aplikaci fenolftaleinu již nedochází ke změně zbarvení.

Obrázek 7.15: Rozložení pH po tloušťce desky [24]

Od úrovně x_c směrem od povrchu pH prudce stoupá, na úseku o délce cca 7 mm dochází k vzestupu pH o cca 3,3 - tedy na původní hodnotu 12,8. Naopak směrem k povrchu dochází od hranice x_c k pozvolnému poklesu pH – při větší hloubce karbonatace by pH dosáhlo konečné hodnoty cca 8,3 a to na úseku o délce cca 90 mm (za předpokladu stejného sklonu větve grafu).

Vzhledem k tomu, že dle výše uvedeného grafu lze průběh pH po výšce desky zjednodušeně popsat lineárními funkcemi, byla hodnota pH v úrovni výztuže určena z podobnosti trojúhelníků.

V případě, že $x_c < d$ (d značí vzdálenost výztuže od povrchu konstrukce), nedosáhla ještě zkarbonatovaná zóna úrovně výztuže. Hodnota pH v úrovni výztuže však již může být nižší než původní hodnota 12,8.



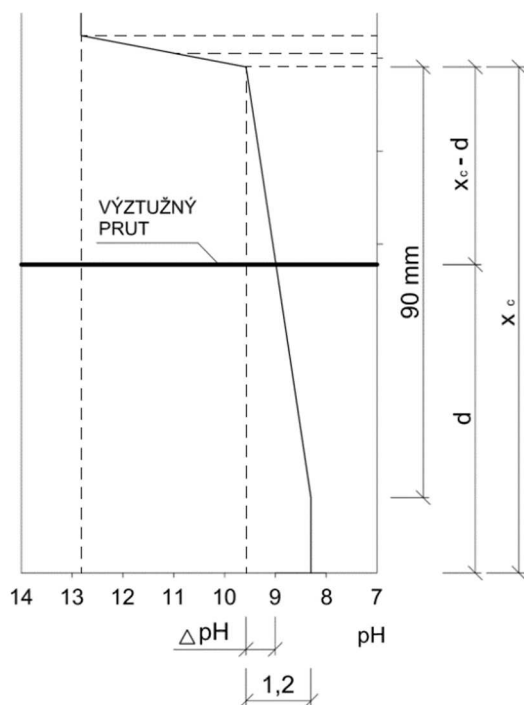
Z podobnosti trojúhelníků plyne:

$$3,3 / 7 = \Delta pH / (d - x_c)$$

V úrovni výztuže je hodnota pH rovna:

$$pH_d = 9,5 + 3,3 \cdot (d - x_c) / 7$$

Obrázek 7.16: Schéma pro výpočet pH ($x_c < d$)



Toto však platí v případě, že $(x_c + 7) < d$, v opačném případě ještě pH v úrovni výztuže není ovlivněno karbonatací a má tedy hodnotu 12,8. V případě, že karbonatační zóna dosáhne úrovně výztuže, bude pH rovno 9,5.

V případě, že $x_c > d$, postoupila již karbonatační zóna za úroveň výztuže. Hodnota pH v úrovni výztuže se tedy pohybuje mezi 9,5 a 8,3.

Z podobnosti trojúhelníků plyne:

$$1,2 / 90 = \Delta pH / (x_c - d)$$

V úrovni výztuže je hodnota pH rovna:

$$pH_d = 9,5 - 1,2 \cdot (x_c - d) / 90$$

Obrázek 7.17 Schéma pro výpočet pH ($x_c > d$)

Toto platí v případě, že $(x_c - 90) > d$, v opačném případě je již beton plně zkarbonatován a hodnota pH je cca 8,3.

Pro přehlednost jsou hodnoty pH shrnuty v následující tabulce:

Tabulka 7.15: Hodnota pH v úrovni výztuže dle polohy karbonatační fronty

Poloha karbonatační fronty [mm]	Hodnota pH v úrovni výztuže
$x_c < d - 7$	12,8
$d - 7 < x_c < d$	$9,5 + 3,3 (d - x_c) / 7$
$d < x_c < d + 90$	$9,5 - 1,2 (x_c - d) / 90$
$d + 90 < x_c$	8,3

Hodnota pH byla následně přepočítána na obsah hydroxidových iontů dle následujících vztahů:

$$pH = -\log c(H^+)$$

$$pOH = -\log c(OH^-)$$

$$pH + pOH = 14$$

$$\text{a tedy } c(OH^-) = 10^{(14 - pH)}$$

kde c je koncentrace [mol/dm³]

Nakonec byla hodnota v mol/dm³ přepočítána na kg/m³ pomocí molární hmotnosti OH⁻ iontu (tj. 17,00737 kg/mol).

Po dosažení depasivace výztuže byla hodnocena zbytková životnost korodující oceli. Pro výpočet hustoty proudu byl použit **model dle Liu a Weyerse**. [11] Protože byl návrh ve všech variantách navržen pro téměř stoprocentní využití, nemá tento časový úsek pro životnost velký význam, životnost konstrukce je u konce krátce po dosažení depasivace. Konečné životnosti je dosaženo v okamžiku, kdy průřezová plocha výztuže zmenšená postupující korozí dosáhne hodnoty $A_{s,req}$, tedy nezbytné plochy výztuže pro přenos účinků zatížení. Z tohoto důvodu vychází velmi podobná hodnota životnosti pro varianty 2A a 2B.

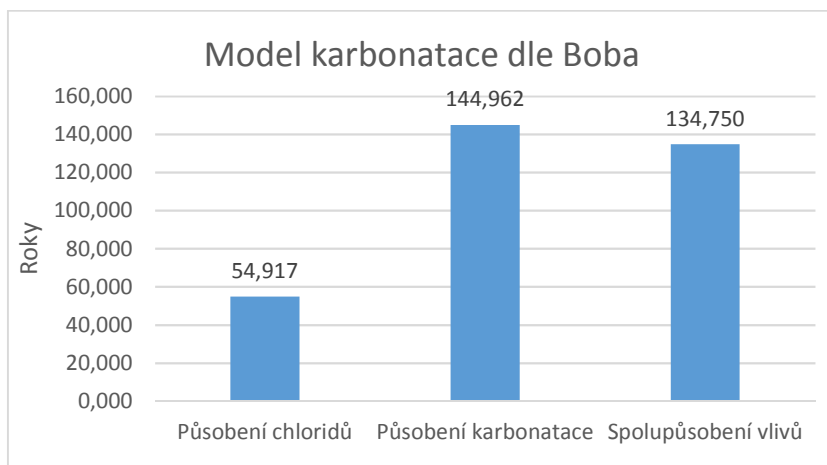
Výsledky se značně liší dle použitého modelu a dle postupu výpočtu. V případě varianty 1 rozhoduje při použití modelu karbonatace dle Papadakise čas depasivace, kdy karbonatační zóna dosáhne úrovně výztuže. Naopak při aplikaci modelu dle Boba je pro životnost konstrukce rozhodující působení chloridů – prahové koncentrace chloridů je v ose výztuže dosaženo dříve, než do této úrovně postoupí karbonatační zóna. V případě variant 2A a 2B rozhoduje vždy karbonatace. Dle použitých modelů a vztahů dojde k překročení prahové koncentrace chloridů až po uplynutí nereálně dlouhé doby. Z toho plyne, že použitý vztah pro odhad prahové koncentrace chloridů [18] není vhodný pro betony s takto nízkým vodním součinitelem.

Paradoxně **pro spolupůsobení obou vlivů nevychází životnost vždy kratší**. Je to dáno tím, že při tomto výpočtu není hodnoceno dosažení prahové koncentrace chloridů či postup karbonatační zóny do osy výztuže, ale poměr chloridových a hydroxidových iontů. Vliv, který v případě odděleného hodnocení nerozhoduje o životnosti, zde výpočtovou životnost může prodlužovat. Těchto výsledků je dosaženo v případě výrazně vyšší hodnoty iniciačního času jednoho z vlivů. V tomto případě tedy při uvažování modelu karbonatace dle Boba. V případě podobných hodnot iniciačních časů pro působení karbonatace a chloridů vychází hodnota iniciačního času pro společné působení menší (model dle Papadakise).

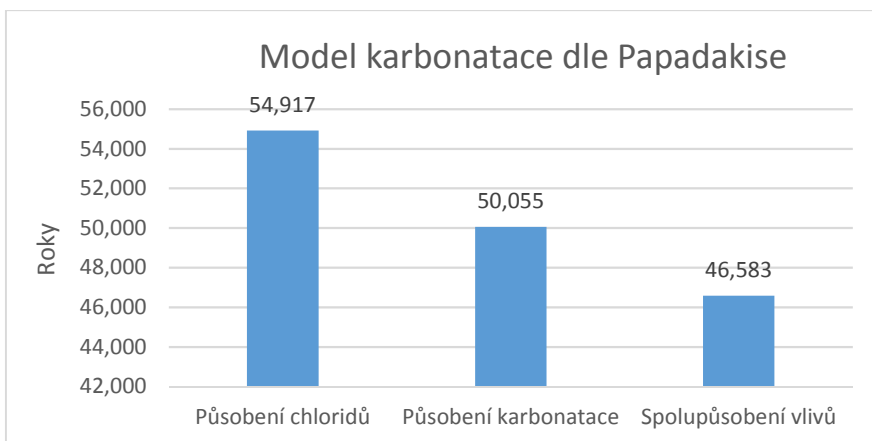
Pro ukázkou bylo provedeno **porovnání iniciačních časů** pro:

- působení chloridů
- působení karbonatace – model dle Papadakise
- působení karbonatace – model dle Boba
- spolupůsobení obou vlivů

Porovnání bylo provedeno pro variantu 1. Pro varianty 2A a 2B nebylo porovnání provedeno, protože dle výpočtového modelu zde nedochází k překročení prahové koncentrace chloridů v reálně možných časech.



Obrázek 7.18: Porovnání iniciačních časů – model dle Boba



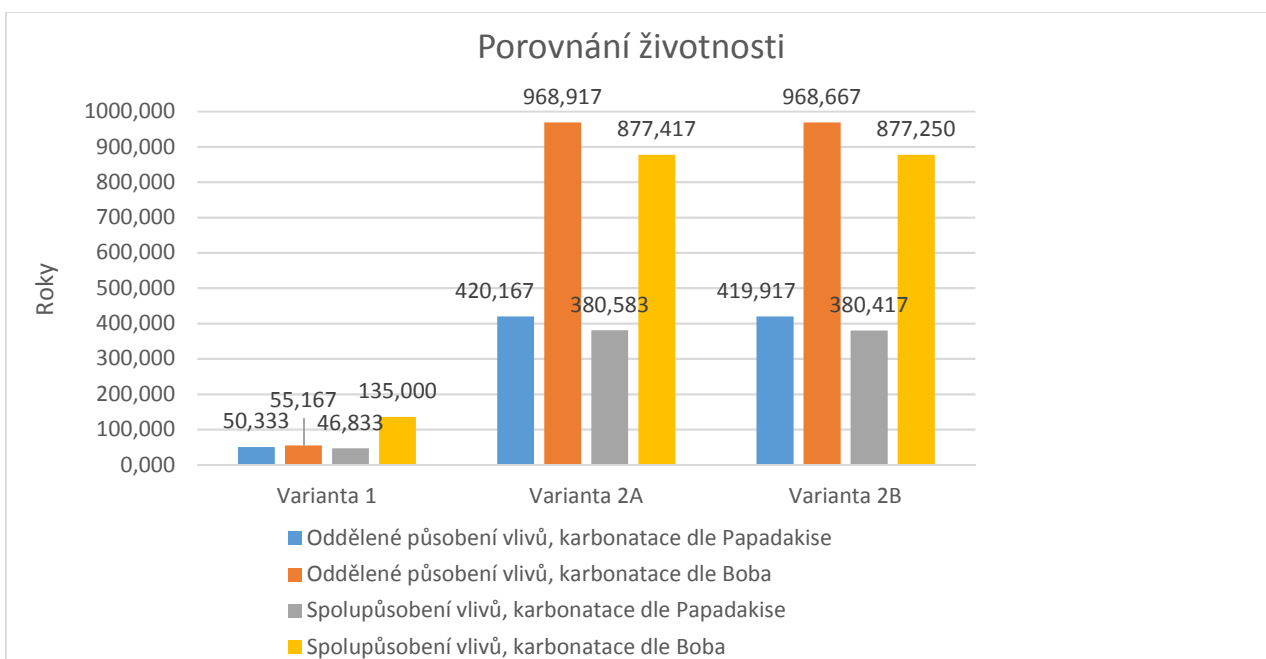
Obrázek 7.19: Porovnání iniciačních časů – model dle Papadakise

Dle všech způsobů výpočtu i uvažovaných modelů vychází životnost variant 2A a 2B výrazně vyšší. V případě užití modelu karbonatace dle Boba potom vycházejí nereálné časy životnosti. Pro další hodnocení navržených variant je tedy brán v úvahu pouze výpočetní postup s použitím modelu dle Papadakise.

V následující tabulce jsou shrnuty výpočtové životnosti pro jednotlivé varianty a použité výpočetní modely a postupy:

Tabulka 7.16: Shrnutí výpočtových životností [roky]

	Oddělené působení vlivů, karbonatace dle Papadakise	Oddělené působení vlivů, karbonatace dle Boba	Spolupůsobení vlivů, karbonatace dle Papadakise	Spolupůsobení vlivů, karbonatace dle Boba
Varianta 1	50,333	55,167	46,833	135,000
Varianta 2A	420,167	968,917	380,583	877,417
Varianta 2B	419,917	968,667	380,417	877,250



Obrázek 7.20: Porovnání životnosti jednotlivých variant

Pokud budou nejnižší hodnoty životnosti považovány za rozhodující, vychází životnost varianty 1 menší než návrhová životnost, naopak pro varianty 2A a 2B vyšší. V případě varianty 1 by tedy bylo třeba životnost zvýšit zvětšením krycí vrstvy výztuže nebo plochy výztuže (vytvoření rezervy v únosnosti). U variant 2A a 2B je naopak možné zmenšit krycí vrstvu. Krycí vrstva byla v rámci teoretického porovnávání variant stanovena na 15 mm, ve skutečnosti by v případě monolitické konstrukce byla nutná větší krycí vrstva kvůli přídatku na návrhovou odchylku nebo by musela být zajištěna kontrola krycí vrstvy během realizace.

Návrh variant byl tedy upraven, pro variantu 1 byly navrženy obě možnosti pro zvýšení životnosti. Návrhové varianty byly upraveny tak, aby byla dosažena životnost minimálně 50 let pro všechny výpočetní postupy a modely.

Tabulka 7.17: Přehled parametrů původně navržených variant

Původní návrh			
Varianta	1	2A	2B
vzdálenost vložek [mm]	120	100	130
D [mm]	8	8	8
$A_{s,req}$ [mm ²]	408,0263	486,7253	384,4082
$A_{s,prov}$ [mm ²]	418,879	502,6548	386,6576
krytí [mm]	50	45	45
poloha výztuže [mm]	54	49	49
tloušťka desky [mm]	180	140	180

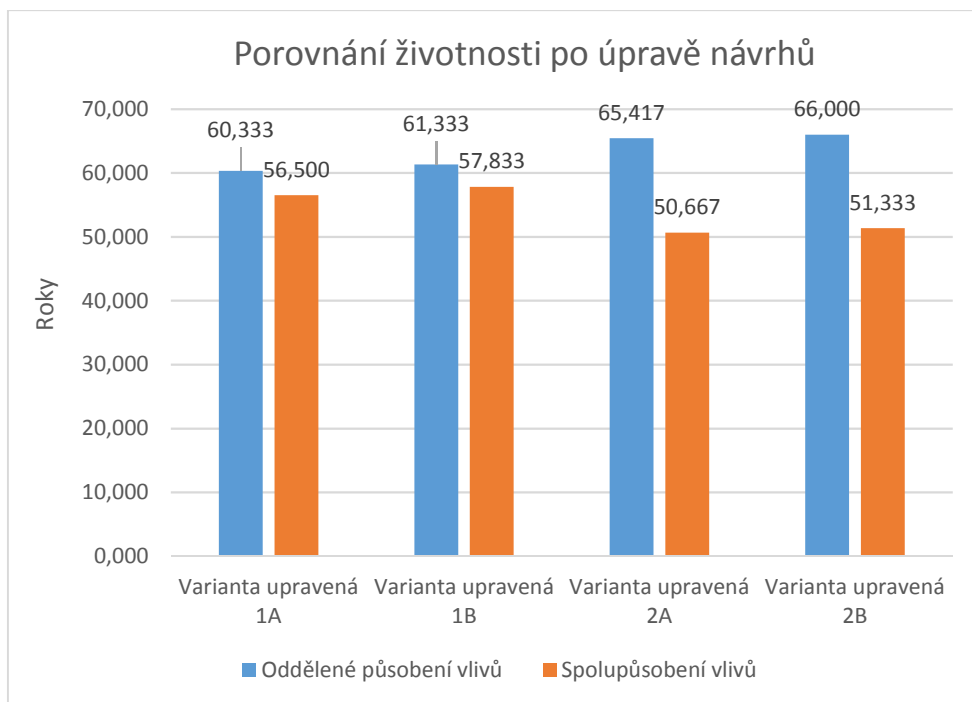
Tabulka 7.18: Přehled parametrů upravených variant

Změna návrhu				
Varianta	1A upravená	1B upravená	2A upravená	2B upravená
D [mm]	8	8	8	8
vzdálenost vložek [mm]	120	100	120	130
$A_{s,req}$ [mm ²]	404,5897	410,6514	381,8171	347,2935
$A_{s,prov}$ [mm ²]	418,879	502,6548	418,879	386,6576
krytí [mm]	55	50	15	15
poloha výztuže [mm]	59	54	19	19
tloušťka desky [mm]	190	180	130	150

Po úpravě navržených variant vychází životnost následovně:

Tabulka 7.19: Shrnutí výpočtových životností po úpravě variant

	Oddělené působení vlivů	Spolupůsobení vlivů
Varianta upravená 1A	60,333	56,500
Varianta upravená 1B	61,333	57,833
Varianta upravená 2A	65,417	50,667
Varianta upravená 2B	66,000	51,333



Obrázek 7.21: Porovnání životnosti jednotlivých variant po úpravě návrhů

7.5. Vyhodnocení upravených návrhů z hlediska udržitelného rozvoje

Bylo provedeno nové posouzení z hlediska udržitelného rozvoje.

Tabulka 7.20: Objemy betonu a oceli pro jednotlivé upravené varianty

	Objem betonu [m ³]	Množství výztuže [kg]
Varianta upravená 1A	90,707	4601,434
Varianta upravená 1B	86,246	4880,837
Varianta upravená 2A	58,810	4480,568
Varianta upravená 2B	63,110	4241,080

V následujících tabulkách jsou uvedeny konečné hodnoty kategorií dopadu pro jednotlivé varianty:

Varianta 1A:

Tabulka 7.21: Hodnoty kategorií dopadu pro variantu 1A

Tabulka dopadů	GWP [kg CO ₂ ekv.]	AP [kg SO ₂ ekv.]	EP [kg PO ₄ ⁻³ ekv.]	ODP [kg CFC-11 ekv.]	POCP [kg C ₂ H ₄ ekv.]	ADP element [kg Sb ekv.]	ADP fossil [MJ]
Výroba betonu	29911,333	151,789	10,647	0,034	18,488	0,207	348465,653

Výroba oceli	11762,454	18,836	1,605	0,012	4,477	0,015	107266,347
Doprava materiálů	6,899	0,009	0,001	0,003	0,238	0,000	7,962
Realizace konstrukce	41,549	0,005	0,004	0,000	0,009	0,000	40,898
Celkem	41722,235	170,639	12,257	0,049	23,212	0,222	455780,859

Varianta 1B:

Tabulka 7.22: Hodnoty kategorií dopadu pro variantu 1B

Tabulka dopadů	GWP [kg CO ₂ ekv.]	AP [kg SO ₂ ekv.]	EP [kg PO ₄ ⁻³ ekv.]	ODP [kg CFC-11 ekv.]	POCP [kg C ₂ H ₄ ekv.]	ADP element [kg Sb ekv.]	ADP fossil [MJ]
Výroba betonu	28440,353	144,324	10,124	0,032	17,579	0,197	331328,804
Výroba oceli	13161,701	21,077	1,796	0,014	5,010	0,017	120026,621
Doprava materiálů	6,635	0,009	0,001	0,003	0,229	0,000	7,656
Realizace konstrukce	39,642	0,004	0,004	0,000	0,009	0,000	39,020
Celkem	41648,330	165,415	11,924	0,048	22,826	0,214	451402,102

Varianta 2A:

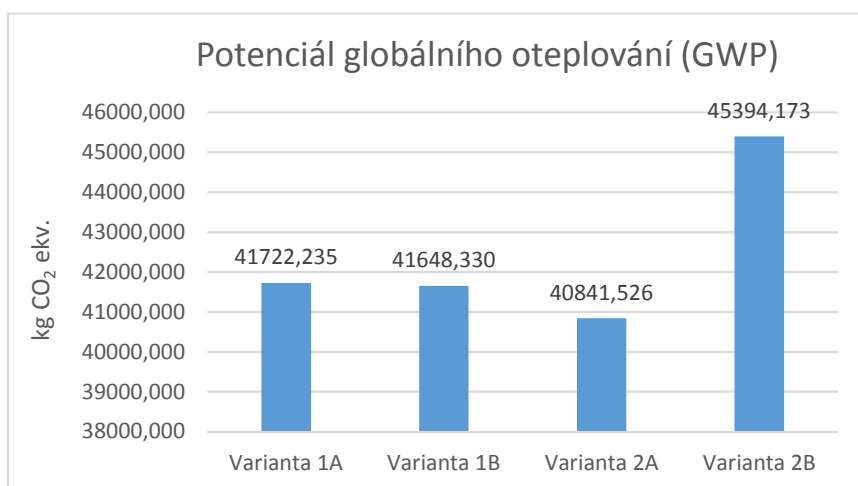
Tabulka 7.23: Hodnoty kategorií dopadu pro variantu 2A

Tabulka dopadů	GWP [kg CO ₂ ekv.]	AP [kg SO ₂ ekv.]	EP [kg PO ₄ ⁻³ ekv.]	ODP [kg CFC-11 ekv.]	POCP [kg C ₂ H ₄ ekv.]	ADP element [kg Sb ekv.]	ADP fossil [MJ]
Výroba betonu	29370,510	85,463	3,660	0,033	15,024	0,127	250877,329
Výroba oceli	11436,526	18,314	1,560	0,012	4,353	0,015	104294,082
Doprava materiálů	4,983	0,007	0,001	0,002	0,172	0,000	5,750
Realizace konstrukce	29,507	0,003	0,003	0,000	0,006	0,000	29,045
Celkem	40841,526	103,788	5,224	0,047	19,555	0,142	355206,205

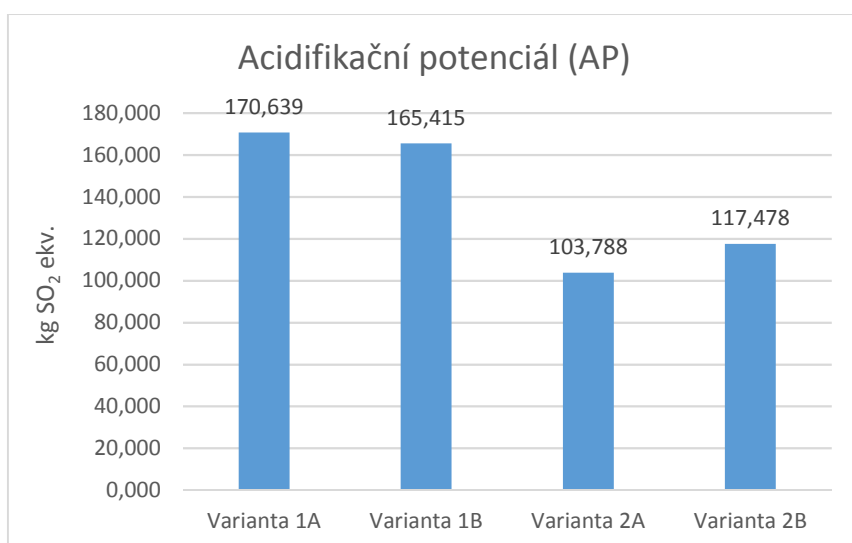
Varianta 2B:

Tabulka 7.24: Hodnoty kategorií dopadu pro variantu 2B

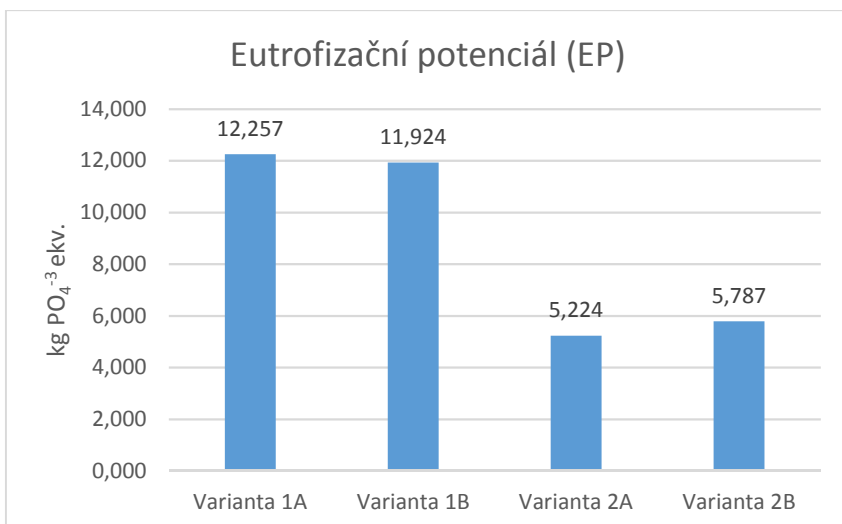
Tabulka dopadů	GWP [kg CO ₂ ekv.]	AP [kg SO ₂ ekv.]	EP [kg PO ₄ ⁻³ ekv.]	ODP [kg CFC- 11 ekv.]	POCP [kg C ₂ H ₄ ekv.]	ADP element [kg Sb ekv.]	ADP fossil [MJ]
Výroba betonu	34267,085	99,711	4,271	0,038	17,529	0,148	292702,937
Výroba oceli	11087,089	17,755	1,513	0,012	4,220	0,015	101107,437
Doprava materiálů	5,728	0,008	0,001	0,002	0,197	0,000	6,610
Realizace konstrukce	34,271	0,004	0,003	0,000	0,008	0,000	33,734
Celkem	45394,173	117,478	5,787	0,052	21,954	0,162	393850,718



Obrázek 7.22: Porovnání GWP pro jednotlivé varianty



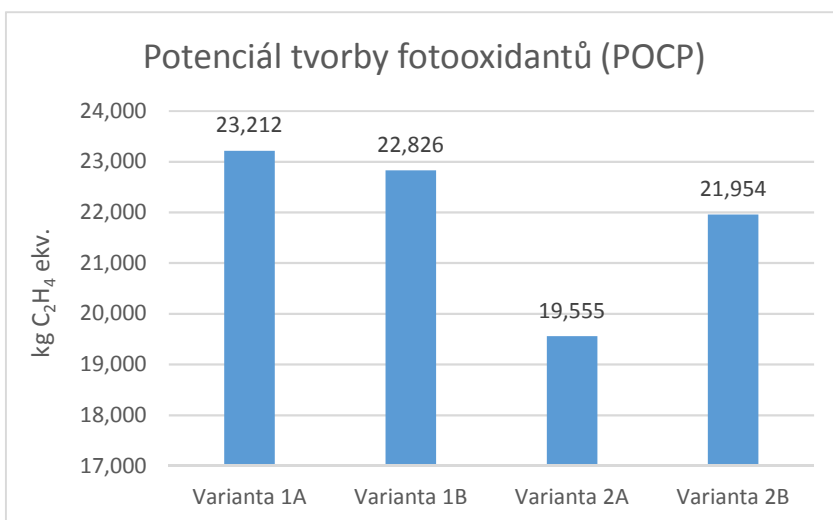
Obrázek 7.23: Porovnání AP pro jednotlivé varianty



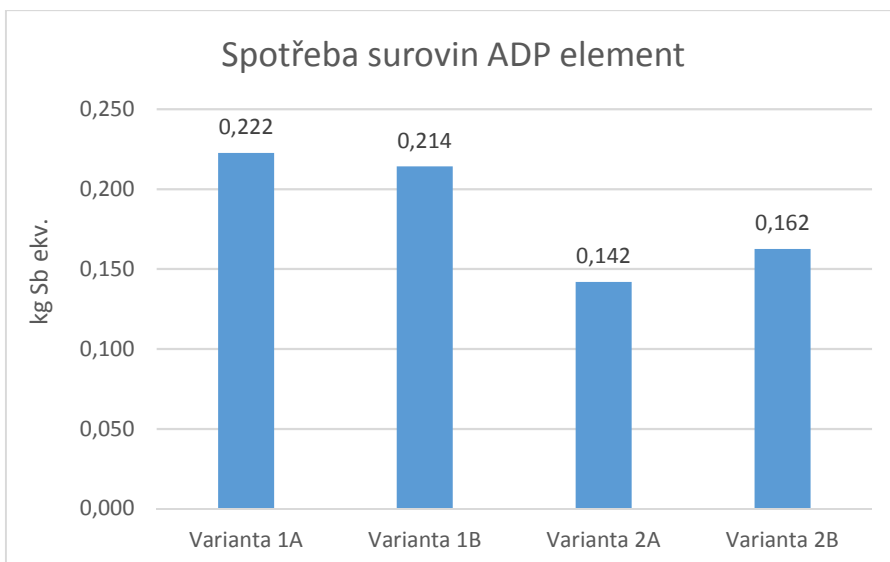
Obrázek 7.24: Porovnání EP pro jednotlivé varianty



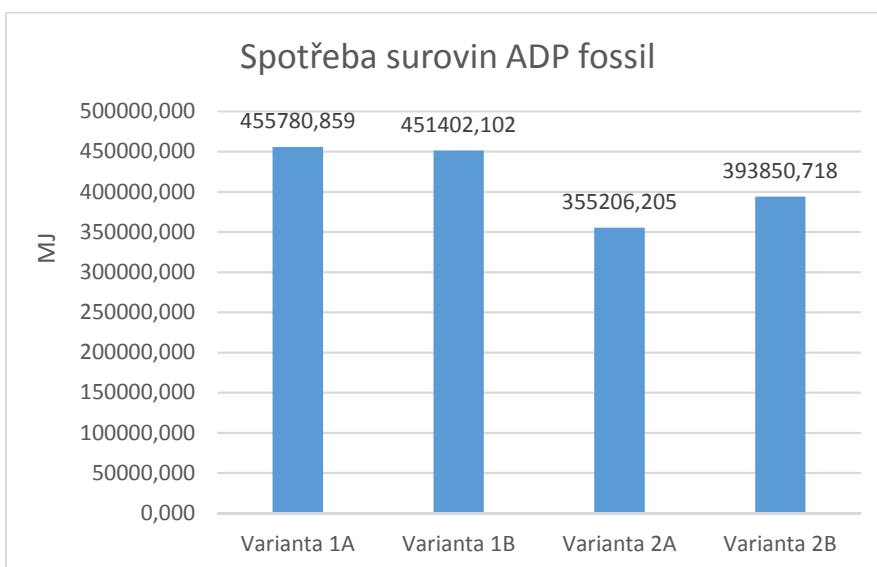
Obrázek 7.25: Porovnání ODP pro jednotlivé varianty



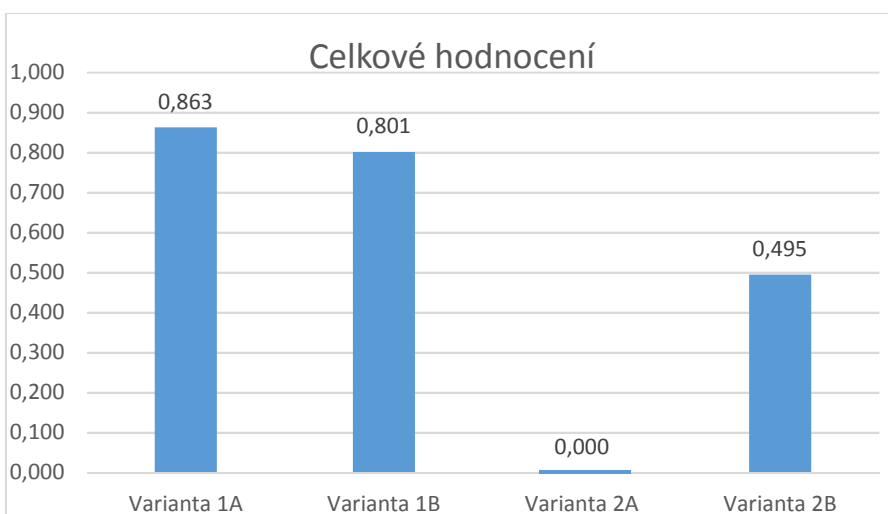
Obrázek 7.26: Porovnání POCP pro jednotlivé varianty



Obrázek 7.27: Porovnání ADP element pro jednotlivé varianty



Obrázek 7.28: Porovnání ADP fossil pro jednotlivé varianty



Obrázek 7.29: Celkové porovnání jednotlivých variant

Z porovnání plyne, že šetrnější k životnímu prostředí jsou opět varianty navržené z vysokopevnostního betonu, přičemž úplně nejlépe vychází varianta 2A. V rámci celkového hodnocení vychází pro tuto variantu nulová hodnota, protože pro ni vycházejí nejmenší hodnoty ve všech kategoriích dopadu. Při vyhodnocení s použitím funkce užítka je jí tedy pro všechny kategorie přiřazena nulová hodnota. Environmentálně nejméně šetrná je potom varianta 1A, jejíž výsledky jsou ve všech hodnocených kategoriích mírně horší než v případě varianty 1B. Z environmentálního hlediska je tedy vhodnější prodloužit životnost návrhem většího množství výztuže. Varianta 2B vychází pro většinu kategorií dopadu jako druhá nejlepší, s výjimkou kategorií dopadu globální oteplování (GWP) a úbytek stratosférického ozonu (ODP). V těchto kategoriích se jeví varianta 2B jako nejméně příznivá, což je dáno vysokou spotřebou cementu a plastifikátoru pro tuto variantu.

8. Závěr

Z provedeného hodnocení jsou jasně zřejmé výhody použití vysokohodnotného betonu. Tento materiál z důvodu svých mechanických vlastností umožňuje výraznou úsporu celkového množství materiálu. To vyrovnává jeho větší environmentální dopady pro jednotkové množství betonu, které jsou dány zejména větším obsahem cementu a plastifikátoru. Z porovnání hodnocených variant dále plyne, že v případě vysokohodnotného betonu je vhodnější plně využít možnosti snížení objemu použitého betonu, a to i za cenu návrhu většího množství výztuže. V případě vysokopevnostních betonů totiž při návrhu ohýbané konstrukce obvykle rozhoduje mezní stav únosnosti, což je dáno vysokou tahovou pevností a malým množstvím vznikajících trhlin. V případě využití lepších mechanických vlastností betonu pro snížení množství nutné výztuže (při stejné nebo podobné tloušťce stropní desky jako v případě použití běžného betonu), mohou být dopady na životní prostředí v rámci některých kategorií i vyšší než v případě konstrukce z běžného betonu. Jedná se především o globální oteplování a úbytek stratosférického ozonu, protože tyto kategorie výrazně závisí na množství použitého cementu.

Také z hlediska trvanlivosti má vysokohodnotný materiál nesrovnatelně lepší vlastnosti. Z hodnocení vyplynulo, že v případě použití těchto betonů je možné snížit tloušťku krycí vrstvy mnohem více, než umožňuje norma. Zvláště v případech konstrukcí v agresivním prostředí je tak možné docílit velmi výrazné úspory materiálu. Jinou možností je potom ponechání původní krycí vrstvy a využití výrazně delší životnosti konstrukce. Druhá možnost je environmentálně šetrnější, protože dopady na životní prostředí před a po změně návrhu se v rámci výstavby liší mnohem méně výrazně než jejich životnost. Například v případě varianty 2A před úpravou návrhu je celková hodnota potenciálu globálního oteplování (GWP) 44244,709 kg CO₂ ekv. a životnost 380,6 let. Po změně krycí vrstvy je celková hodnota GWP 40841,526 kg CO₂ ekv. a životnost 50,7 let. Pokud by byla produkce skleníkových plynů přepočítána na roky existence konstrukce, vychází pro původní variantu hodnota 116,2 kg CO₂ ekv./rok a pro upravenou variantu hodnota 805,6 kg CO₂ ekv./rok, tedy cca 7 x větší. Dále je třeba přičíst další negativní vlivy na životní prostředí související s demolicí. Je ovšem třeba uvážit, zda je vůbec možné využít takto dlouhé životnosti stavby, především v souvislosti s její morální životností a jejím účelem.

Přesnější hodnocení konstrukcí z hlediska trvanlivosti je však značně problematické. Údaje vstupující do výpočtu často nelze přesně určit, zejména se jedná o parametry okolního prostředí, které se navíc s časem mohou měnit. Dalším problémem tohoto hodnocení je velké množství různých matematických modelů popisujících degradační děje. Výsledná životnost se totiž výrazně liší v závislosti na použitém modelu či výpočetním postupu, a to často i několikanásobně. Potom je nutné přihlídnout k obvyklým průběhům degradačních procesů známých ze zkušenosti a zvolit tak nejuvhodnější postup pro výpočet.

9. Literatura

Normy a předpisy

- [1] ČSN EN 1990 (ČSN 73 0002). *Eurokód: Zásady navrhování konstrukcí*. Praha : ČNI, 2004.
- [2] ČSN EN 1991-1-1 (ČSN 73 0035). *Eurokód 1: Zatížení konstrukcí – Část 1-1: Obecná zatížení – Objemové tíhy, vlastní tíha a užitná zatížení pozemních staveb*. Praha : ČNI, 2004.
- [3] ČSN EN 1992-1-1 (ČSN 73 1201). *Eurokód 2: Navrhování betonových konstrukcí – Část 1-1: Obecná pravidla a pravidla pro pozemní stavby*. Praha : ČNI, 2006.
- [4] ČSN 736058. *Jednotlivé, hromadné a řadové garáže*. Praha : Úřad pro technickou normalizaci, metrologii a státní zkušebnictví , 20011.
- [5] ČSN ISO 14040. *Environmentální management - Posuzování životního cyklu - Zásady a osnova*. Praha: ČNI, 2006.
- [6] PRODUCT CATEGORY RULES ACCORDING TO ISO 14025:2006. *Product group classification: UN CPC 375*. The international EPD systém, 2015
- [7] Nařízení evropského parlamentu a rady (EU) č. 305/2011.

Publikace

- [8] ALI, Esam Mohammed. Internal Sulphate Attack On Self Compacting Concrete. *Journal of Babylon University/Engineering Sciences*. Vol.21, No.5, 2013.
- [9] AZAPAGIC, Adisa. Quality Management and Safety engineering. *www.tech.plym.ac.uk*. [online]. Dostupné z: <http://www.tech.plym.ac.uk/sme/mst324/MST324-05%20Azapagic.htm>
- [10] BADEA, Cătălin, BOB, Corneliu, BALCU, Ionel, DAN, Sorin, BUCHMAN, Iosif, GRUIN, Aurelian. The Carbonation Process Influence on Concrete Durability. *1st WSEAS International Conference on MATERIALS SCIENCE (MATERIALS'08)*, 2008. ISBN: 978-960-474-024-6.
- [11] BALAFAS, I., BURGOYNE, C.J. Environmental effects on cover cracking due to corrosion. *Cement and Concrete Research*. 2010, Vol. 40, s. 1429–1440. ISSN: 0008-8846
- [12] BENTZ, D.P., GARBOCZI, E.J., HAECKER, C.J., JENSEN, O.M. Effects of cement particle size distribution on performance properties of portland cement-based materials. *Cement and Concrete Research*. Vol. 29 (10), 1663-1671, 1999. ISSN: 0008-8846
- [13] BREUGEL, K. Van., FILHO, Romildo Dias Toledo, HANSEN, Will, KOENDERS, Eduardus A.B. Modelling Pore Continuity and Durability of Cementitious Sealing Material. *Journal of Energy Resources Technology*. 2013, Vol. 136(4). ISSN 0195-0738
- [14] CML - DEPARTMENT OF INDUSTRIAL ECOLOGY. *CML-IA Characterisation Factors*. Institute of Environmental Sciences Faculty of Science University of Leiden, 2016. Dostupné z: <https://www.universiteitleiden.nl/en/research/research-output/science/cml-ia-characterisation-factors>

- [15] CZARNECKI, L., WOYCIECHOWSKI, P. Modelling of concrete carbonation; is it a process unlimited in time and restricted in space?. *Bulletin of the Polish Academy of Sciences Technical Sciences*. 2015, Vol. 63, No. 1. ISSN 2300-1917,
- [16] DHIR, Ravindra K. a Michael J. MCCARTHY. *Concrete durability and repair technology: proceedings of the international conference held at the University of Dundee, Scotland, UK on 8-10 September 1999*. London: T. Telford, 1999. ISBN 0727728261.
- [17] FIALA, Ctislav. *Optimalizace betonových konstrukcí v environmentálních souvislostech*. V Praze: CIDEAS - Centrum integrovaného navrhování progresivních stavebních konstrukcí, c2011. ISBN 978-80-01-04663-0.
- [18] FREDERIKSEN, Jens M. *Chloride threshold values for service life design*. RILEM Workshop TMC in Paris, 2000. Dostupné z: [http://www.germann.org/TestSystems/RCT% 20&%20RCTW /rct_3.6.pdf](http://www.germann.org/TestSystems/RCT%20&%20RCTW/rct_3.6.pdf)
- [19] GRANTHAM, Michael, MECHTCHERINE, Viktor, SCHNECK, Ulrich. *Concrete Solutions 2011*. CRC Press, 2012. ISBN 9780415616225
- [20] HAVENS, Jas H., LAUGHLIN Geo. R., SCOTT, John W. Freeze-thaw characteristics of aggregates. *16th Annual Highway Geology Symposium*. University of Kentucky, March 25-27, 1965.
- [21] HOŠEK, Stanislav. Katodová ochrana železobetonových konstrukcí. *Realizace staveb*. 2011, č. 5. ISSN 1802-0631.
- [22] CHROMÁ, Markéta, ROVNANÍKOVÁ, Pavla, TEPLÝ, Břetislav. Trvanlivost: EN 206 – Koncept k-hodnoty – Modelování. *Beton TSK*. 2013, roč. 13, č. 6, s. 56-59. ISSN 1213-3116
- [23] ILICA, Tolga, YILDIRIM, Hasan, ŞENGÜL, Özkan. Effect of Cement Type on the Resistance of Concrete against Rapid Chloride Permeability. *11DBMC International Conference on Durability of Building Materials and Components*. Istanbul, 11-14 May 2008.
- [24] ISHIDA, Tetsuya, MAEKAWA, Koichi. *Modeling Of pH Profile In Pore Water Based On Mass Transport And Chemical Equilibrium Theory*. Translation from Proceedings of JSCE, No.648/V-47, May 2000. Dostupné z: <http://library.jsce.or.jp/jsce/open/00670/No37/CLI-37-0131.pdf>
- [25] JIŘIČKOVÁ, Milena, Zbyšek PAVLÍK a Jiří HOŠEK. *Materiálové inženýrství I. 2.*, přeprac. vyd. V Praze: České vysoké učení technické, 2011. ISBN 978-80-01-04932-7.
- [26] KOČÍ, Vladimír. *Environmentální dopady: posuzování životního cyklu*. Praha: Vysoká škola chemicko-technologická v Praze, 2013. ISBN 978-80-7080-858-0.
- [27] KOČÍ, Vladimír. *LCA a EPD stavebních výrobků: posuzování životního cyklu a environmentální prohlášení o produktu jako cesta k udržitelnému stavebnictví*. Praha: Česká rada pro šetrné budovy, 2012. ISBN 978-80-260-3504-6.
- [28] LOUČKA, Tomáš. *Chemie životního prostředí*. Ústí nad Labem: Univerzita J.E. Purkyně v Ústí nad Labem, Fakulta životního prostředí, 2014. ISBN 978-80-7414-751-7.
- [29] NAIK, Tarun R. Concrete durability as influenced by density and/or porosity. *Cement and Concrete Institute of Mexico Symposium "World of Concrete - Mexico"*. The University of Wisconsin – Milwaukee, 1997.
- [30] OTIENO, Mike, BEUSHAUSEN, Hans and ALEXANDER, Mark. Prediction of Corrosion Rate in RC Structures – a Critical Review. Department of Civil Engineering, University of Cape Town, South Africa, 2011. Dostupné z: www.springer.com/cda/content/.../9789400706767-c2.pdf

- [31] PAPADAKIS, V. G, FARDIS, M. N., VAYENAS, C. G. Effect of composition, environmental factors and cement-lime mortar coating on concrete carbonation. *Materials and structures*. 1992, Vol. 25, issue 4, 293-304. ISSN: 1359-5997.
- [32] POKORNÝ, Petr. Vliv koroze zinkované oceli na soudržnost s betonem. *Koroze a ochrana materiálů*. č. 56(4), s. 119-135, 2012. ISSN 1804-1213
- [33] ROVNANÍKOVÁ, Pavla, TEPLÝ, Břetislav. Stanovení povrchové koncentrace chloridů spojením laboratorních zkoušek a analytického modelu. *Beton TSK*. 2013, roč. 10, č. 4, s. 75-77. ISSN 1213-3116.
- [34] ROVNANÍKOVÁ, Pavla. *Stavební chemie : Modul 3 - Degradace stavebních materiálů a chemie kovů*. 1. vyd. Brno: CERM, 2005. 48 s. ISBN 80-7204-410-9.
- [35] SLÁBOVÁ, Markéta. *Tvorba a ochrana životního prostředí*. České Budějovice: Vysoká škola evropských a regionálních studií, 2006. ISBN 80-86708-29-2.
- [36] SMETANOVÁ, L., SOKOLÁŘ, R. Elektrárenské popílky jako základní surovina páleného keramického střepe. Vysoké učení technické v Brně, Fakulta stavební, Ústav technologie stavebních hmot a dílců.
- [37] STARÝ, Jaromír, KAVINA, Pavel, VANĚČEK, Mirko, SITENSKÝ, Ivo. *Surovinové zdroje české republiky. Nerostné suroviny*. Ministerstvo životního prostředí Česká geologická služba – Geofond, 2005. ISBN 80-7212-352-1.
- [38] ŠMERDA, Zdeněk. *Životnost betonových staveb*. Praha: Český svaz stavebních inženýrů, 1999. Technická knihovnice autorizovaného inženýra a technika. ISBN 80-902697-8-8.
- [39] WANG, W., TIAN, W., DHOMSE, S., XIE, F., SHU, J., AUSTIN, J. Stratospheric ozone depletion from future nitrous oxide increases. *Atmospheric Chemistry Physics*, 14, 12967–12982, 2014. ISSN 1680-7316
- [40] WITZANY, Jiří. *PDR - Poruchy, degradace a rekonstrukce*. V Praze: České vysoké učení technické, 2010. ISBN 978-80-01-04488-9.
- [41] WU, Yiping, PARKER, Frazier KANDHAL, Ken. Aggregate toughness/ abrasion resistance and durability/soundness tests related to asphalt concrete performance in pavements. *NCAT Report No. 98-4*. March 1998.

Webové zdroje

- [42] ACTFORLIBRARIES. The Chemical Composition of Granite. www.actforlibraries.org. [online]. Dostupné z: <http://www.actforlibraries.org/the-chemical-composition-of-granite/>
- [43] BAUTON. Technický list produktu KEMA Mikrosilika. www.bauton.cz. [online]. Dostupné z: http://www.bauton.cz/soubory/TL_KEMA_MIKROSILIKA.pdf
- [44] BENNISON, Paul. The design of reinforced cement-based protective coatings. www.cortecvci.com. [online]. Dostupné z: https://www.cortecvci.com/Publications/Papers/MCIProducts/Aston_U/Aston.html
- [45] CENIA. Environmentální značení. Přehled typů environmentálního značení produktů v České republice. www.cenia.cz. [online]. Dostupné z: [http://www.cenia.cz/web/www/web-pub2.nsf/\\$pid/CENMSFNRQD65/\\$FILE/CENIA_typy%20znaceni04.pdf](http://www.cenia.cz/web/www/web-pub2.nsf/$pid/CENMSFNRQD65/$FILE/CENIA_typy%20znaceni04.pdf)

- [46] ČESKÝ HYDROMETEOROLOGICKÝ ÚSTAV. Historická data – Ovzduší – Znečištění ovzduší na území České republiky. *www.chmi.com*. [online]. Dostupné z: http://portal.chmi.cz/files/portal/docs/uoco/isko/grafroc/grafroc_CZ.html
- [47] ČESKÝ HYDROMETEOROLOGICKÝ ÚSTAV. Historická data – Počasí – Změna klimatu – Základní informace. *www.chmi.com*. [online]. Dostupné z: <http://portal.chmi.cz/historicka-data/pocasi/zmena-klimatu/zakladni-informace>
- [48] ČESKÝ HYDROMETEOROLOGICKÝ ÚSTAV. Historická data – Počasí – Územní teploty. *www.chmi.com*. [online]. Dostupné z: <http://portal.chmi.cz/historicka-data/pocasi/uzemni-teploty>
- [49] ČESKÝ HYDROMETEOROLOGICKÝ ÚSTAV. Přizemní (troposférický) ozon. *www.chmi.com*. [online]. Dostupné z: http://portal.chmi.cz/files/portal/docs/meteo/om/weather_links/Pocasi/Navody/Prizemni_ozon/text_ozon.htm
- [50] EBETON. Druhy cementů. *www.ebeton.cz*. [online]. Dostupné z: <http://www.ebeton.cz/pojmy/druhy-cementu>
- [51] ENVIMAT. Katalog materiálů. *www.envimat.cz*. [online]. Dostupné z: <http://www.envimat.cz/materialy/sypke-materialy/cement-portlandsky-42-5.html>
- [52] ENVIRONDEC. The international EPD systém, Product category rules (PCR). *www.environdec.com*. [online]. Dostupné z: <http://www.environdec.com/PCR/>
- [53] GEOCITIES. Chapter 2: Hardening of the cement paste. *www.geocities.ws*. [online]. Dostupné z: <http://www.geocities.ws/concretesite/tmch2.htm>
- [54] MLTEST. Durability - Los Angeles Abrasion Machine. *www.mltest.com*. [online]. Dostupné z: <http://www.mltest.com/index.php/aggregate/durability>
- [55] POKORNÝ, Petr, KOUŘIL, Milan. Faktory ovlivňující soudržnost povlakované výztuže s betonem. *www.tribotechnika.sk*. [online]. Dostupné z: <http://www.tribotechnika.sk/tribotechnika-22014/faktory-ovlivnujici-soudrznost-povlakovane-vyztuze-s-betonem.html>
- [56] TESCAN. Material for Building & Civil Engineering. *www.tescan.com*. [online]. Dostupné z: <http://www.tescan.com/applications/materials-science/material-for-building-civil-engineering>
- [57] THECONSTRUCTOR. Effect of air entrained concrete on concrete strength. *www.theconstructor.org*. [online]. Dostupné z: <http://theconstructor.org/concrete/air-entrained-concrete-strength-effects/8427/>
- [58] UNDERSTANDING-CEMENT. Sulfate attack in concrete and mortar. *www.understanding-cement.com*. [online]. Dostupné z: <http://www.understanding-cement.com/sulfate.html>
- [59] VÁVRA, Zdeněk, DOHNÁLEK Pavel. Sanace železobetonu v chemicky náročném prostředí – metody a možnosti. *www.stavebnictvi3000.cz*. [online]. Dostupné z: <http://www.stavebnictvi3000.cz/clanky/sanace-zelezobetonu-v-chemicky-narocnem-prostredi-metody-a-moznosti/>

Seznam příloh:

1. Schéma výztuže stropní desky - varianta 1 (1:100)
2. Schéma výztuže trámu - varianta 1, 2B (1:50)
3. Schéma výztuže stropní desky - varianta 2A (1:100)
4. Schéma výztuže trámu - varianta 2A (1:50)
5. Schéma výztuže stropní desky - varianta 2B (1:100)