

SOUHRN ÚČINKŮ NEPŘÍMÉHO ZATÍŽENÍ BETONOVÝCH KONSTRUKCÍ

Jan Rozkošný, *

Katedra betonových a zděných konstrukcí, Fakulta stavební,
České vysoké učení technické v Praze, Thákurova 7/2077, 166 29 Praha 6, Česká republika.

jan.rozkosny@fsv.cvut.cz

ABSTRAKT

Betonové konstrukce jsou vystaveny nejen přímému zatížení, ale i řadě nepřímých vlivů, které mohou ovlivnit jejich stabilitu a trvanlivost. Mezi tyto faktory patří např. teplotní a vlhkostní změny, smršťování, dotvarování či pohyby podloží. Tyto jevy mohou způsobit vnitřní napětí, deformace a v extrémních případech i vznik trhlin nebo snížení únosnosti konstrukce. Článek se zaměřuje na mechanismy vzniku nepřímého zatížení, jeho dopady na betonové konstrukce a způsoby, jak těmto negativním účinkům předcházet. Mezi ně patří například vhodný návrh dilatačních spár, úprava složení betonu nebo stabilizace podloží. Problematika nepřímých zatížení je klíčová zejména u rozsáhlých inženýrských staveb, jako jsou mosty, tunely či jaderné objekty. Správný návrh a důkladná analýza těchto vlivů jsou proto nezbytné pro zajištění bezpečnosti a dlouhodobé trvanlivosti betonových konstrukcí staveb.

KLÍČOVÁ SLOVA

Nepřímé zatížení • Beton • Objemové změny • Dotvarování

ABSTRACT

Concrete structures are exposed not only to direct loads, but also to a number of indirect effects that can affect their stability and durability. These factors include, for example, temperature and humidity changes, shrinkage, creep or subsoil movements. These phenomena can cause internal stresses, deformations and, in extreme cases, cracks or a reduction in the load-bearing capacity of the structure. The article focuses on the mechanisms of indirect loads, their impacts on concrete structures and ways to prevent these negative effects. These include, for example, appropriate design of expansion joints, modification of the concrete composition or stabilization of the subsoil. The issue of indirect loads is key, especially for large-scale engineering structures, such as bridges, tunnels or nuclear facilities. Correct design and thorough analysis of these effects are therefore essential to ensure the safety and long-term durability of concrete structures.

KEYWORDS

Indirect load • Concrete • Volume changes • Creep

1. ÚVOD

Betonové konstrukce tvoří základ moderní architektury a nacházejí široké uplatnění ve většině stavebních a inženýrských projektů. Pro jejich správný návrh je klíčové dobře znát vlastnosti použitého materiálu. Vyztužené betonové prvky se vyznačují vysokou trvanlivostí, značnou únosností, odolností vůči požáru, vodotěsností a efektivním využitím materiálu, což přispívá k jejich hospodárnosti.

Mezi slabší stránky patří poměrně vysoká hmotnost, objemová stálost, křehkost a velká tepelná vodivost. Tyto vlastnosti mohou negativně ovlivnit celkovou stabilitu a životnost konstrukce, a proto je důležité s nimi počítat již ve fázi návrhu. (Juračka et al. 1984)

Trvanlivost betonových konstrukcí závisí na celé řadě faktorů, které lze rozdělit na vnější a vnitřní. Vnější faktory zahrnují vlivy prostředí, jako jsou kolísání teplot, vlhkost, mechanické namáhání, chemické reakce a dynamické zatížení. Naopak vnitřní faktory souvisejí s vlastnostmi samotného betonu a jeho strukturou, která je ovlivněna použitou technologií výroby. (Valenta 1965)

2. NEPŘÍMÉ ZATÍŽENÍ

Nepřímé zatížení zahrnuje soubor silových a deformačních účinků, které na betonové konstrukce nepůsobí přímo v důsledku zákona síly, ale vznikají v důsledku vnějších vlivů, jako jsou změny teploty, vlhkosti, pohyby podloží, nebo důsledkem vnitřních chemických reakcí uvnitř materiálu. Mezi nejvýraznější projevy těchto nepřímých zatížení patří smršťování betonu, nerovnoměrné teplotní rozdíly, změny vlhkosti a jejich vzájemné působení. Ačkoliv toto zatížení působí na konstrukce zcela jiným způsobem než zatížení přímé, může výrazně ovlivnit její dlouhodobou stabilitu a celkové chování.

Nepřímé zatížení ovlivňuje nejen mechanické vlastnosti konstrukce, ale také její trvanlivost a provozní spolehlivost. Významné je zejména u rozsáhlých inženýrských staveb, jako jsou mosty, tunely nebo výškové budovy, kde dochází k nerovnoměrnému působení teplotních a vlhkostních změn. Tento článek se zaměřuje na základní mechanismy nepřímého zatížení betonových konstrukcí, jejich příčiny, důsledky a možné způsoby eliminace negativních účinků.

* Školitel: doc. Ing. Josef Novák, Ph.D.

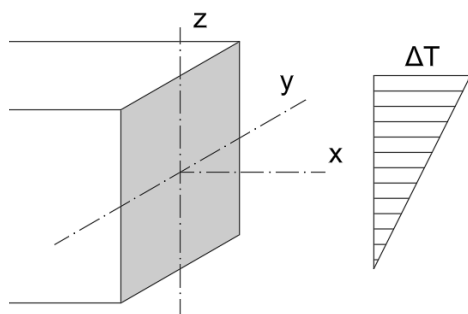
3. DRUHY NEPRÍMÉHO ZATÍŽENÍ

Na betonové konstrukce může mít vliv celá řada činitelů. Mohou to být např. změny teploty a vlhkosti, chemicko-fyzikální procesy probíhající uvnitř materiálu, mechanické účinky nebo objemové změny vyvolané různými vnějšími a vnitřními podmínkami.

3.1. Změna teploty

U betonových prvků vystavených přímému slunečnímu záření dochází k nárůstu teploty. Na exponovaném povrchu dosahují změny teploty maximálních hodnot, zatímco na opačném povrchu zůstává teplota beze změny (viz Obr. 1).

Změny teploty vyvolávají objemové změny betonu vlivem teplotní roztažnosti materiálu. Součinitel teplotní roztažnosti pro beton se pohybuje v rozmezí $(5-15) \times 10^{-6} \text{ } ^\circ\text{C}^{-1}$ závisí na několika faktorech. Nejvíce je součinitel ovlivňován druhem kameniva (resp. jeho mineralogickým složením) a vlhkosti betonu. (Modrý 2001). Důsledkem dochází k objemovým změnám, a tudíž k nepříznivému namáhání kameniva, cementu a jejich styčných ploch. (Valenta 1965)



Obrázek 1: Průběh teploty po výšce betonového prvku při ohřátí horního povrchu vlivem slunečního záření.

Změny objemu v důsledku teplotních výkyvů mají výrazný dopad především na staticky neurčitě konstrukce. Omezení volného pohybu v podporách vede ke vzniku dodatečných vnitřních sil, které mohou způsobit větší deformace v jiných částech konstrukce. Proto je důležité zohlednit teplotní účinky už při analýze a návrhu, zejména u konstrukcí vystavených výrazným změnám teploty, jako jsou mosty, nechráněné rámové konstrukce nebo venkovní potrubní systémy. Naopak u staticky určitých konstrukcí dochází při teplotních změnách pouze k deformacím bez vzniku dodatečného namáhání, a tudíž je kladen důraz na návrh podpor, které umožní dostatečně volný pohyb konstrukce. (Juračka et al. 1984)

3.2. Mráz

Mráz působí na beton prostřednictvím mechanismu, který zahrnuje změny teploty, vlhkosti a skupenské přeměny vody v led. Beton je porézní materiál s mikroskopickými póry, do kterých může pronikat voda. Při poklesu teploty pod bod mrazu dojde k zamrznutí vody, což má za následek zvětšení objemu zhruba o 9 %. (Valenta 1965)

Pokud voda zmrzne v pórech cementového tmelu, nárůst objemu vlivem fázové přeměny způsobí tahové napětí v cementovém tmelu a tlakové napětí v oblasti přiléhajícího kameniva.

Střídavý mráz je klíčovým faktorem ovlivňujícím trvanlivost betonu, který je vystavený vlivům počasí. Tento proces zahrnuje opakované změny teploty a s tím spojené skupenské přeměny vody.

Odolnost betonu vůči mrazu je definována odolností dílčích složek (cementového tmelu a kameniva). Zlepšení mrazuvzdornosti cementového tmelu lze dosáhnout snížením vodního součinitele v/c , přičemž se doporučuje maximální hodnota $v/c = 0,45$. Druhou možností, jak zvýšit odolnost betonu vůči mrazu, je provzdušňování betonu. U toho je důležité dodržet rovnoměrné rozpojení vzduchových dutinek v prostoru a jejich optimální obsah, a to v rozmezí 4 – 8 %. (Modrý 2001)

3.3. Hydratační teplo

Hydratace cementu je exotermní chemická reakce, při níž se uvolňuje hydratační teplo. Množství tohoto tepla závisí na typu cementu a vodním součiniteli. Vzhledem k tomu, že část tepla se odvádí do okolního prostředí, vzniká v betonu teplotní gradient. Teplota uvnitř prvku bývá vyšší než na jeho povrchu a může dosahovat až několika desítek $^\circ\text{C}$. Tento rozdíl způsobuje vznik vnitřního napětí, které může ovlivnit jak strukturu betonu, tak i jeho mechanické vlastnosti. (Juračka et al. 1984)

Problém nastává především u masivních betonových konstrukcí. Odvod tepla do okolí je pomalejší než u tenkých prvků, což prodlužuje dobu potřebnou k dosažení teplotní rovnováhy a zvyšuje riziko poškození betonu. (Potůčková et al. 2023)

Největší nárůst teploty obvykle nastává během prvních 12 hodin po smíchání cementu se záměsovou vodou, přičemž přibližně 65–85 % z celkového množství hydratačního tepla se uvolní během prvních 7 dnů. (Holt 2001)

Uvolněné hydratační teplo ovlivňuje nejen teplotu uvnitř betonu, ale také rychlost hydratace. Při vyšších teplotách probíhá hydratace rychleji, což vede k vytvoření méně kvalitní struktury betonu, a tudíž má vliv i na jeho dlouhodobou pevnost. (Potůčková et al. 2023).

3.4. Smršťování

Smršťování betonu je proces, při kterém dochází ke zmenšení objemu betonu v důsledku několika fyzikálně-chemických procesů probíhajících během jeho tvrdnutí. Smršťování lze obecně rozdělit na dvě hlavní složky:

- autogenní smršťování
- smršťování od vysychání

Autogenní smršťování vzniká jako výsledek chemické reakce mezi vodou a cementem, známé jako hydratace. Během této reakce se tvoří hydratační produkty pevné fáze, které mají menší objem než je objem původní směsi vody a cementu, a tudíž dochází ke smrštění. Po dokončení hydratace dochází k vysychání, při němž se zvětšuje povrchové napětí v kapi-

lárách, což má za následek jejich zúžení a tedy makroskopické zmenšení objemu.

Míra smršťování závisí především na teplotě a vlhkosti prostředí. Povrch betonu, který je vystaven přímému působení okolního prostředí, vysychá rychleji než jeho vnitřní část. To vede k nerovnoměrnému smršťování. Na povrchu vzniká tahové napětí, zatímco uvnitř betonu vzniká tlakové napětí. Tento rozdíl napětí ovlivňuje rozložení vnitřních sil, zvyšuje celkové napětí v konstrukci a může vést ke vzniku trhlin.

Konečná hodnota smršťování závisí na množství vytvořených hydratačních produktů. Lze ji omezit například vyšším zhutněním betonu nebo udržením vyšší vlhkosti v okolí konstrukce. (Juračka et al. 1984)

3.5. Dotvarování

Dotvarování betonu představuje postupnou dlouhodobou deformaci, která je závislá na napětí vyvolaném trvalým vnějším zatížením. (Juračka et al. 1984) Tento proces začíná už v rané fázi tuhnutí betonu a souvisí s přeměnou cementového gelu na krystalické složky cementu. Vnesené vnější zatížení působí na betonový prvek a jeho vnitřní strukturu. To vyvolává v cementovém gelu vazné tečení, které způsobí postupné přenášení napětí do krystalické složky cementu a následně i na kamenivo. S probíhající hydratací, dochází k růstu krystalických složek cementu a ke zvyšování jejich pružnosti. S časem zároveň ubývá objem cementového gelu, což zvyšuje jeho vazkost. (Bažant 1966)

Dotvarování je ovlivněno nejen působícím napětím, ale také dalšími faktory, přičemž významnou roli hraje stáří betonu.

Podle experimentálních výsledků (Šmerda & Křístek 1978) závisí míra dotvarování na čase, kdy je betonová konstrukce zatížena. Pokud je zatížení aplikováno později, bude nejen konečná hodnota dotvarování nižší, ale také jeho průběh v čase se bude lišit od konstrukce, která byla zatížena dříve.

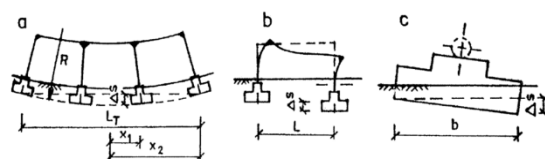
3.6. Vynucené posuny podpor

Vynucené posuny podpory (pohyby v základové spáře) představují závažný problém u betonových konstrukcí. Tyto posuny vznikají v důsledku vzájemné interakce mezi podloží a nosnou konstrukcí, což může negativně ovlivnit stabilitu a celkovou integritu. Proto jsou při návrhu klíčové geomechanické vlastnosti podloží, které lze určit na základě geotechnického průzkumu.

Mezi hlavní příčiny posunů v základové spáře patří nejen nedostatečně provedený geotechnický průzkum, ale také nesprávně navržený nebo realizovaný typ základu (Valenta 1965). Pokud není půdní profil dostatečně prozkoumán nebo jsou použity nevhodné základové konstrukce, může dojít k celkovému sedání základů a následnému poklesu stavby.

V případě, že je geologický profil složen z více vrstev s odlišnými vlastnostmi, může docházet k nerovnoměrnému sedání základů (viz Obr. 2). To způsobuje vznik dodatečných vnitřních sil v betonové konstrukci, což může vést k výskytu

trhlin, deformací konstrukčních prvků nebo až k jejich poškození.



Obrázek 2: Nerovnoměrné složky sedání: a) relativní průhyb; b) relativní pokles (úhlové přetvoření); c) naklonění (Lahuta 2009).

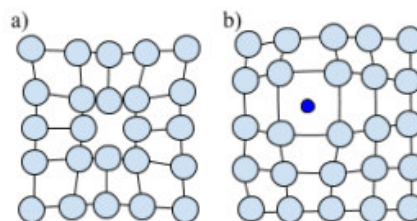
V případě rizika nestability podloží se k jeho zpevnění často využívají technologie, jako jsou injektáže, nebo dodatečné hlubinné základy. Tyto metody mohou účinně eliminovat nebo alespoň zmírnit negativní dopady pohybů podloží.

3.7. Objemové změny vlivem ozařování

Kamenivo, které tvoří jednu ze základních složek betonu, se skládá převážně z minerálů, jejichž chemické složení závisí na druhu použitého kameniva. Působením vysoce energetických neutronů může dojít k vyražení atomů z jejich původních pozic v krystalové mřížce, což vede ke vzniku dvou typů bodových defektů – vakance (prázdného místa v mřížce) a intersticiálního defektu (atomu mimo svou obvyklou pozici). Tyto dva defekty dohromady tvoří takzvaný Frenkelův pár. (Khmurovska 2019)

Tyto strukturální poruchy způsobují změny objemu v krystalové mřížce. Vakance vedou ke smršťování mřížky (kontrakci), zatímco intersticiální defekty naopak vyvolávají rozšiřování (expanzi), viz Obr. 3.

Při ozařování dochází zpravidla k větší expanzi než kontrakci, což vede k hromadění defektů. Tento efekt může vyústit až v metamiktizaci (amorfizaci) minerálů, tedy narušení pravidelné struktury krystalové mřížky a způsobit objemovou expanzi vyvolanou zářením (Radiation-Induced Volumetric Expansion = RIVE). Tento jev může výrazně změnit vlastnosti minerálů v kamenivu a tím i výsledné vlastnosti betonu. (Khmurovska 2019)



Obrázek 3: Frenkelův pár – vakance (vlevo) a intersticiální defekt (vpravo). (Khmurovska 2019)

4. ZÁVĚR

Železobetonové konstrukce jsou ve většině případů navrhovány převážně jen na přímé zatížení. Pouze v některých případech se uvažuje i s nepřímými účinky, a to zejména tam, kde mají podstatný vliv na návrh konstrukcí.

Mohou to být např. běžné mostní konstrukce, které jsou vystaveny intenzivním změnám teplot, nebo kontejnmenty jaderných elektráren, kde je nutné při návrhu zohlednit zatížení způsobené předpokládanou havárií (zatížení zvýšenou teplotou a tlakem). Nedostatečné posouzení těchto faktorů může vést k nežádoucím deformacím nebo dokonce ke vzniku trhlin, což následně ovlivňuje únosnost, trvanlivost a životnost konstrukce.

V dalším zkoumání bych se rád zaměřil na modelování a simulace nepřímého zatížení betonových konstrukcí. Plánuji se zaměřit na betonové prvky v raném stáří, vývin hydratačního tepla, monitorování teplotních změn a celkový dopad na betonové konstrukce. Tyto poznatky by mohly přispět k efektivnějším návrhům betonových směsí a konstrukčních opatření zvyšujících odolnost staveb vůči nepříznivým vlivům.

PODĚKOVÁNÍ

Tento článek byl vytvořen v rámci Studentské grantové soutěže ČVUT, č. projektu SGS25/038/OHK1/1T/11 - Konstrukce z moderních cementových kompozitů a jejich optimalizace.

Reference

- Modrý, S. (2001). Trvanlivost betonu a železobetonu: vybraná témata. Studijní texty. Praha: SEKURKON. ISBN 80-902756-3-X.
- Juračka, M., Sedlák, J. & Šanda, M. (1984). Betonové konstrukce I: navrhování betonových prvků. 4. vyd. Brno: Ediční středisko Vysokého učení technického.
- Valenta, O. (1965). Trvanlivost betonu a betonových konstrukcí. Praha: Státní nakladatelství technické literatury.
- Lahuta, H. (2009). Sednutí a průhyb základu. Online. VŠB-TU Ostrava. Dostupné z: <https://www.geotechnici.cz/wp-content/uploads/2012/08/ZS-cviko-06.pdf>.
- Khurovska, Y. (2019). Influence of Neutron and Gamma Irradiation on Concrete Properties and Structural Performance In: Mechanika 2016 Proceedings of the 21st International Scientific Conference. Prague. Doctoral thesis.
- Bažant, Z. (1966). Dotvarování betonu při výpočtu konstrukcí. Stavební aktuality. Řada stavební literatury. Praha: SNTL.
- Šmerda, Z. & Křístek, V. (1978). Dotvarování a smršťování betonových prvků a konstrukcí. Praha: Nakladatelství technické literatury.
- Potůčková, S, Holý, M. & Kolísko, J. (2023). Vznik trhlin v důsledku vývoje hydratačního tepla v masivních betonových konstrukcích - skluz VD Orlik. Online. Beton. Dostupné z: https://www.ebeton.cz/clanky/2023_4_90-vznik-trhlin-v-dusledku-vyvoje-hydratacniho-tepla-v-masivnich-betonovych-konstrukcich-skluz-vd-orlik/.
- Holt, E. E. (2001). Early age autogenous shrinkage of concrete. VTT publications. Espoo: Technical Research Centre of Finland, 2001. ISBN 951-38-5870-7.