

# METODY MĚŘENÍ PEVNOSTI BETONU RANÉHO STÁŘÍ

Pavel Kasal, \*

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

## ABSTRAKT

Článek popisuje vhodné metody pro měření pevnosti betonu v tlaku raného stáří. Tyto pevnosti se na staveništi měří především za účelem pro stanovení správného času pro odbedňování či jiné důležité kroky v procesu výstavby. Popsané metody jsou rozděleny do dvou kategorií na nedestruktivní a destruktivní. V kategorii nedestruktivních metod je detailněji popsána tvrdoměrná metoda, ultrazvuková metoda a metoda zralosti. V případě destruktivních metod je popsáno zkoušení vzorků či vývrtů ve zkušebním lisu a to včetně problematiky vytváření a ošetřování zkušebních vzorků. U každé z uváděných metod je popsán princip, postup měření, vhodnost jejího použití a případně jsou tvrzení podložena příkladem měření, které autor prováděl.

## KLÍČOVÁ SLOVA

Beton raného stáří • Pevnost v tlaku • Tvrdoměrná metoda • Metoda zralosti • Destruktivní měření

## ABSTRACT

The paper describes suitable methods for the estimation of compressive strength of early-age concrete. Those methods are used especially for the determination of a suitable time for stripping the formwork or other key steps during the construction project execution. Described methods are divided into destructive and non-destructive approaches. Non-destructive category of methods includes a detailed description of surface hardness method, ultrasonic pulse method, and maturity method. Description of destructive methods is focused on testing of samples and drilled cores including the sampling and curing of samples. Principle, the procedure of measurement, and suitable usage are introduced for every mentioned method. In some cases, claims are demonstrated over examples of measurements, which were done by the author.

## KEYWORDS

Early-age concrete • Compressive strength • Surface hardness methods • Maturity method • Destructive testing

## 1. ÚVOD

Pevnost betonu v tlaku je jedna z klíčových vlastností betonu. V případě již vyzrálého betonu je spojena se správnou

funkcí konstrukce. V průběhu výstavby je ale hodnota pevnosti betonu raného stáří také důležitá například pro stanovení správného času pro odbedňování, zatížení či předpínání konstrukce. Znalost hodnoty pevnosti v tlaku v raném stáří může tak umožnit zkrácení doby pracovních záběrů a tím optimalizaci procesu výstavby. Důležité je správné stanovení hodnoty pevnosti, aby byla zachována bezpečnost během výstavby.

V současnosti se používají různé nedestruktivní i destruktivní metody pro stanovení pevnosti betonu raného stáří. V následujících kapitolách jsou tyto metody popsány včetně vhodnosti jejich aplikací.

Vzhledem k plánovaným publikacím se zaměřením na prezentaci výsledků je příspěvek zaměřen spíše rešeršně a úzce souvisí s tématem disertační práce.

## 2. NEDESTRUKTIVNÍ MĚŘENÍ PEVNOSTI

U nedestruktivních metod zkoumanou vlastnost stanovujeme pomocí měření jiné vlastnosti, kterou převádíme na pevnost v tlaku přes kalibrační vztah (matematicky přesněji regresní vztah). Poškození konstrukce či vzorku je u nedestruktivního měření buď žádné, nebo zanedbatelné. Příkladem zanedbatelného poškození může být otisk razníku odrazového tvrdoměru na povrchu betonu. Nejčastěji používanými metodami jsou: tvrdoměrné metody, metoda zralosti a ultrazvuková metoda. (Cikrle, 2021)

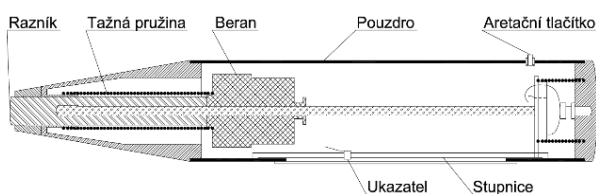
### 2.1. Tvrdoměrné zkoušení betonu

Rozšířenost stanovování pevnosti odrazovým tvrdoměrem spočívá v relativně jednoduchém postupu, při kterém se na základě zjištěného ukazatele tvrdosti stanovuje krychelná pevnost v tlaku betonu. Pojem tvrdoměrné zkoušení betonu se stal téměř synonymem pro měření Schmidovým tvrdoměrem. Před masivním rozšířením tohoto tvrdoměru však vznikla řada různým zejména vtiskových nebo vnikacích metod, jejímž principem bylo zarážení předmětu určitého tvaru definovanou silou do betonu. Zajímavým příkladem může být jedna z prvních metod představená sovětským profesorem Skramtajeve, který odstřeloval konstrukci ze vzdálenosti osmi metrů revolverem Nagant a poté počítal objem idealizovaného kužele, který střela do materiálu vytvořila. Na základě regresního vztahu pak pomocí vypočteného objemu stanovil pevnost v tlaku. (Cikrle, 2021; Cikrle, 2018)

\* Školitel: prof. Ing. Jan L. Vitek, CSc., FEng.

První typ Schmidtova tvrdoměru byl představen v roce 1950 švýcarským inženýrem Ernstem Schmidtem. Největší sortiment odrazových tvrdoměrů nabízí švýcarská firma Proceq, která vznikla již v roce 1954. Nabízené tvrdoměry se liší zejména mechanickou konstrukcí, velikostí a energií provedeného rázu. Na zmíněných vlastnostech pak závisí pevnostní rozsah použití a vhodná tloušťka zkoušené konstrukce. (Cikrle, 2018)

Jedním ze stále nejrozšířenějších tvrdoměrů pro běžné konstrukce je Schmidt N s analogovou stupnicí hodnoty odrazu, jehož konstrukce je téměř nezměněná již od roku 1965. Rozsah použití je dle údajů výrobce od 10 MPa do 70 MPa krychelné pevnosti (viz **Chyba! Nenalezen zdroj odkazů.**) a energie prováděného rázu je přibližně 2,25 J. Princip stanovení tvrdosti, ze které se následně odhaduje pevnost, spočívá v měření velikosti odrazu, tedy délce vratné dráhy beranu, která je po měření zobrazena na stupnici. Obrázek 1 zobrazuje schéma tradičního tvrdoměru typu Schmidt N. (Cikrle, 2021; Cikrle, 2018)



Obrázek 1 - Tradiční odrazový tvrdoměr [Schéma: autor]

Novější variantou kladívka Schmidt N je digitální kladívko SilverSchmidt s rozsahem použití od 10 MPa do 100 MPa. Měření je založeno na odlišném principu, kdy se měří koeficient vrácené energie, který je následně zobrazen na displeji. Princip spočívá v měření rychlosti úderu pomocí optických čidel těsně před úderem a rychlosti zpětného rázu okamžitě po úderu. Na základě tohoto měření kladívko vypočte poměr vrácené a vstupní energie, který se v procentech rovná koeficientu odrazu  $Q$ . Tento koeficient tedy na rozdíl od velikosti odrazu měřené Schmidtem N nevyžaduje korekci směru zkoušení, kvůli gravitaci. Přístrojem vhodným pro měření pevností raného stáří je právě SilverSchmidt L osazený hříbovým nástavcem, který umožňuje měření pevností v rozsahu 5 MPa až 30 MPa. Zmíněné typy Schmidtových tvrdoměrů zobrazuje obrázek 2. (Cikrle, 2021; Cikrle, 2019)



Obrázek 2 – Odrazové tvrdoměry: Schmidt N, SilverSchmidt N, SilverSchmidt L s hříbovým nástavcem [Foto: autor]

Postup samotného měření je dle evropské normy ČSN EN 12504-2 následující. Před začátkem měření by se měl přístroj vždy ověřit zkušebními měřeními minimálně pěti úderů na kalibrační kovadlině. Kovadlina je ocelový válec s průměrem přibližně 150 mm a hmotností okolo 16 kg, který má na horní podstavě vodící trubku pro zajištění kolmosti úderu. Zkušební měření na kovadlině by se mělo pohybovat v rámci normou stanovené odchylky ( $\pm 3$  stupně tvrdosti) od výrobcem stanovené hodnoty pro daný přístroj. Po úspěšném absolvování měření na kalibrační kovadlině je možné zahájit měření na konstrukci. K získání spolehlivého odhadu tvrdosti povrchu na zkušební ploše konstrukce je třeba provést nejméně 9 úderů v bodech s minimální vzájemnou vzdáleností 25 mm a s minimální vzdáleností od kraje či hrany 25 mm. Každý vtisk od úderu razníku by měl být prohlédnut, zdali není rozdrčen a výsledek není tak ovlivněn dutinou pod místem úderu. (Cikrle, 2021; EN 13791, 2019; EN 12504-2, 2017)

Předběžným výsledkem zkoušky je střední hodnota ze všech zmíněných devíti úderů. Pro potvrzení platnosti výsledku je ale nutné zkontrolovat, jestli se některé z devíti čtení (odrazů) neliší od střední hodnoty více než o 30%. Pokud se více než 20% čtení liší od střední hodnoty o více než 30%, musí být celá sada zamítnuta. Proto je vhodné provést 10 úderů místo devíti a v případě, že dvě čtení nevyhoví výše uvedenému normovému požadavku, může být výsledná střední hodnota ze zbylých osmi čtení stále použita. (Cikrle, 2021; EN 12504-2, 2017)

Po měření by se měl opět přístroj ověřit na kalibrační kovadlině. Vzhledem k tomu, že kalibrační kovadlina je relativně těžký předmět pro měření na staveništi, nabízí výrobce i menší alternativu pro ověřování v terénu. Tato menší varianta kovadliny ovšem nenahrazuje standardní kovadlinu, na které by se mělo provést kontrolní měření alespoň po návratu do laboratoře. (Cikrle, 2021)

Při provádění měření je důležité věnovat pozornost zkoušenému povrchu. Povrch by měl být hladký a případně i zbroušen, aby hodnota odrazu nebyla zmenšena vlivem podrcení drobných výstupků na povrchu. Zohledněny by měly být i vlhkostní podmínky, které mohou také ovlivnit výsledek. (EN 12504-2, 2017)

Posledním a nejdůležitějším krokem je převedení hodnoty odrazu na odhad pevnosti v tlaku. V případě měření pevnosti raného stáří u dnešních betonů není vhodné používat obecné regresní křivky. Příkladem může být křivka dodávaná k odrazovému tvrdoměru Schmidt N, která byla vytvořena před mnoho lety a reprezentuje betony z 60. let minulého století. Od té doby došlo v oblasti technologie betonu k výraznému vývoji, který se týká zejména použití superplastifikátorů a přísad obecně. Z tohoto důvodu není tento vztah pro použití pro dnešní betony vhodný, protože poskytuje zpravidla výrazněji nižší hodnoty oproti skutečné pevnosti. (Cikrle, 2021; Kocáb, 2019)

Existují ale i další používané jednoparametrické vztahy třeba i k novějším SilverSchmidtům, které mohou pro přibližný odhad poskytovat dostatečný výsledek. Optimálním a doporučeným řešením je vytvoření vlastní regresního vztahu přímo pro používanou recepturu betonu. S tímto regresním vztahem je pak možné dosahovat poměrně přesných výsledků. (Kocáb, 2019)

Stanovení regresního vztahu spočívá ve vytvoření určitého množství zkušebních těles z dané receptury, které jsou pak zkoušeny postupně v různém stáří, jak odrazovým tvrdoměrem, tak i destruktivně ve zkušebním lisu. V praxi to znamená, že je vzorek upnut do lisu silou, která odpovídá 10% maximální odhadované síly před jeho porušením. Následně je provedeno tvrdoměrné měření dle postupu popsaného výše, pro které je možné využít zpravidla dvě strany krychle. Po dokončení tvrdoměrného měření se pokračuje se zatěžováním. Destruktivně stanovená pevnost se zaznamená na osu y. Výsledek tvrdoměrného měření tedy střední hodnota zjištěného ukazatele tvrdosti se zaznamená na osu x a vznikne jeden bod pro vytvoření budoucího regresního vztahu. Norma ČSN 13791 doporučuje získání deseti párů hodnot, tedy popsané měření provést na deseti zkušebních vzorcích různého stáří. V případě deseti výsledků je vysoká pravděpodobnost, že po vyřazení odlehklých hodnot zbyde minimálně 8 párů hodnot tj. bodů pro regresní vztah. Tento počet je již dostačující pro vytvoření dobrého regresního vztahu. Na závěr této podkapitoly je nutné zmínit, že popsané postupy odpovídají evropským normám ČSN EN 13791 a ČSN EN 12504-2. Tvrdoměrné metody jsou popsány i v dalších normách, které předepisují odlišný postup měření a vyhodnocení. Příkladem velmi často používané normy u nás je ČSN 73 1373, jejíž budoucnost je nejistá. (Cikrle, 2021; EN 13791, 2019; EN 12504-2, 2017; ČSN 73 1373, 2011)

Měření pevnosti raného stáří pomocí odrazových tvrdoměrů může při správném provedení a při vytvoření vlastního regresního vztahu pro používanou recepturu poskytovat relativně přesné výsledky. Je třeba věnovat pozornost povrchu zkoušené konstrukce a hlavně správnému provedení zkoušky. Technik, který měření provádí, by měl být seznámen se základním principem metody a správným postupem zkoušky a jejího vyhodnocení. Příkladem vlivu lidského faktoru na výsledek lze uvést třeba v případě odrazového tvrdoměru SilverSchmidt L s hříbovým nástavcem, u kterého je zvláště důležitá kolmá poloha ke zkoušenému povrchu a již při drobném odklonu od kolmice snadno dochází k odchýlkám. (Cikrle, 2019; Kocáb, 2019)

## 2.2. Ultrazvuková metoda

Princip ultrazvukové metody pro stanovení jakosti či fyzikálně mechanických vlastností je založen na měření rychlosti ultrazvukového vlnění materiálem opakovaným vysíláním ultrazvukových impulzů. (Cikrle, 2021)

Rychlost šíření ultrazvukového vlnění závisí na kvalitě materiálu. V případě kvalitního betonu je rychlost šíření ultrazvuku vyšší (> 4000 m/s), naopak u betonu velmi nízké kvality je rychlost nižší (< 3000 m/s). Tato metoda je velmi vhodná pro stanovení modulu pružnosti či rovnoměrnosti betonu, protože rychlost šíření ultrazvukového impulzu v materiálu je ovlivněna hlavně modulem pružnosti a hutností betonu. Ultrazvuková metoda je užitečná zvláště při průzkumu stávajících staveb či stanovení modulu pružnosti vzorků v laboratoři. (Cikrle, 2021)

Pro měření ultrazvuku se používá přístroj se dvěma sondami. Jedna sonda slouží jako budič ultrazvukového impulzu a druhá jako snímač. Kontakt sond se vzorkem či konstrukcí

zajišťuje akustický vazebný prostředek (plastelína či gel). Všechny naměřené hodnoty je nutné opravit tak, aby nezahrnovali i čas, kdy ultrazvuk prochází akustickým vazebným prostředkem, případně konstrukcí sondy. Tento čas se nazývá mrtvý čas a stanovuje se na etalonu (skleněný váleček - obrázek 3) se známou časovou charakteristikou. Komerční přístroje umožňují stanovení mrtvého času před měřením a na jeho základě upravují dále měřené hodnoty. (Cikrle, 2021)



Obrázek 3 - Ultrazvukový přístroj [Foto: autor]

Vztahy pro odhad pevnosti v tlaku na základě rychlosti šíření impulzu se liší v závislosti na receptuře betonu a mohou vykazovat určité nepřesnosti. Měření je také velmi citlivé na vlhkost materiálu. Je třeba rovněž brát v úvahu vyztužení prvku, které může při výběru nevhodného místa měření výrazně ovlivnit rychlost šíření ultrazvukových impulzů. Použití této metody v prostředí stavby ke stanovení pevnosti betonu raného stáří je poměrně problematické. Měření s ultrazvukovým přístrojem vyžaduje proškoleného technika, který je schopen nastavit přístroj (např. správnou hodnotu zisku a napětí), stanovit mrtvý čas, správně provádět měření. Ultrazvuková metoda je popsána v evropské normě ČSN EN 12504-4. (Cikrle, 2021; EN 12504-4, 2021)

## 2.3. Metoda zralosti

Metoda zralosti, jejíž základy vznikly již v 50. letech minulého století, umožňuje výpočtem stanovit hodnoty pevnosti v tlaku u betonu raného stáří. Princip výpočtu využívá předpoklad, že pevnost v tlaku je funkcí zralosti, tedy času a teplotní historie. Pro její použití je nejdříve třeba provedení kalibrace pro konkrétní betonovou směs, dále měření a záznam času a teploty betonu od momentu uložení čerstvého betonu do bednění. Na základě měřených dat a předem provedené kalibrace je odhadována hodnota pevnosti betonu v tlaku. Nejnížší hodnotou pevnosti, kterou je možno stanovit pomocí této metody je cca 5 MPa. Horní hranice je 70% hodnoty pevnosti po 28 dnech. (pozn.: Spíše než o kalibraci se jedná o regresní vztah, ale vzhledem k tomu, že norma to nazývá kalibrací, je to tak nazýváno i v tomto článku.) (Malhotra, 2004; NEN 5970, 2001)

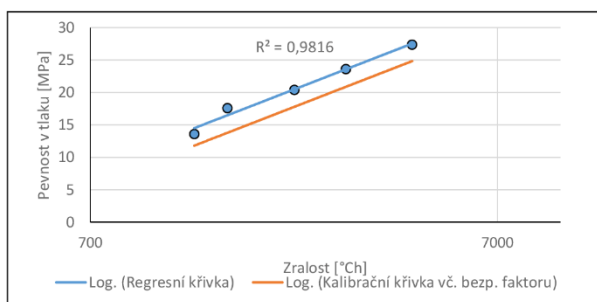
Cílem kalibrace je získání vztahu mezi zralostí a pevností v tlaku betonu raného stáří. Zralost betonu je možné snadno spočítat na základě snadno měřitelných dat (teploty a času) a pevnost v tlaku je jedna z klíčových vlastností, kterou chceme zjistit. Postup kalibrace je nutné předem stanovit s ohledem na to, pro jaký účel bude metoda zralosti použita (optimální od-

bedňování, předpínání, apod.). Pro účel použití se stanoví cílová hodnota pevnosti, ke které se kalibrace bude provádět, tedy například pro optimální odbedňování stropů 70% hodnoty pevnosti po 28 dnech. (Malhotra, 2004; NEN 5970, 2001)

Kalibrace se provádí v laboratoři pomocí minimálně pěti vytvořených standardních zkušebních vzorků z betonové směsi, která bude použita na staveništi. Po zhotovení zkušebních vzorků se v pravidelných intervalech měří jejich teplota a je postupně dle stanoveného rozvrhu destruktivně zkoušena jejich pevnost v tlaku pomocí lisu. Z naměřeného průběhu teploty v čase je možné pro každou zkušební krychli spočítat zralost v době provádění destruktivní zkoušky pevnosti v tlaku a přiřadit jí k výsledné pevnosti z lisu. (NEN 5970, 2001)

Výpočet zralosti si lze zjednodušeně představit jako integrál křivky průběhu teploty v čase od uložení betonu (vytvoření vzorku). Jednotkou zralosti jsou pak °Ch. Na základě vypočtených zralostí a destruktivně stanovených pevností zkušebních těles je možné za pomoci lineární regrese vynést regresní přímku, která je obvykle posunuta v grafu směrem dolů o faktor bezpečnosti. S ohledem na možné odchylky měření teploty a odchylky v průběhu výroby betonu se zavádí tento faktor bezpečnosti, který minimalizuje riziko, že pevnost stanovená metodou bude vyšší než skutečná pevnost. (NEN 5970, 2001)

Výsledkem kalibrace je kalibrační přímka zakreslená v grafu, kde na svislé ose je pevnost v tlaku a na vodorovné ose v logaritmickém měřítku zralost. Jedná se tedy o zmíněný vztah mezi pevností v tlaku a zralostí. Obrázek 4 zobrazuje příklad kalibrační křivky pro konkrétní recepturu betonu pevnostní třídy C25/30. Cílovou hodnotou kalibrace bylo 70% pevnosti betonu po dvaceti osmi dnech, což odpovídá 21 MPa. Dle normy stanovený bezpečnostní faktor dosahuje hodnoty 2,7 MPa. (NEN 5970, 2001)



Obrázek 4 - Příklad kalibrační křivky

Po provedení kalibrace je možné zahájit měření realizovaných konstrukcí na staveništi. Měření se provádí pomocí minimálně dvou měřících zařízení (sensorů). Zaznamenává se teplota betonu v čase ve dvou různých částech pracovního záberu konstrukce. Z průběhu teploty lze vypočítat zralost – kterou si lze zjednodušeně představit jako postupnou akumulaci průměrných teplot v jednotlivých hodinách od uložení betonu do konstrukce. Ze zralosti pomocí kalibrační křivky lze získat aktuální pevnost betonu v tlaku. (NEN 5970, 2001)

Pravidelnou validací se ověřuje platnost kalibrace s časovým odstupem po určitém intervalu. Princip validace spočívá v odběru vzorku betonu při betonáži a vytvoření alespoň jednoho zkušebního tělesa, u kterého se měří teplota v čase od

jeho vytvoření. Na základě teploty je předpovídána pevnost a po dosažení cílové pevnosti je provedena zkouška pevnosti v tlaku na zkušebním lisu. Destruktivně stanovená hodnota pevnosti je porovnána s hodnotou předpovídanou pomocí metody zralosti, a pokud je její odchylka větší než bezpečnostní faktor, musí se validace opakovat. V případě druhé neúspěšné validace je nutné provést znovu kalibraci. (NEN 5970, 2001)



Obrázek 5 - Ověření kalibrační křivky validací [Foto: autor]

Tabulka 1 – Výsledky validačních vzorků

Vzorek		Validace				
ID	Date	Metoda zralosti vč. bezp. faktoru [MPa]	Bezp. faktor [MPa]	Metoda zralosti bez bezp. faktoru [MPa]	Destruktivně stanovená hodnota [MPa]	Rozdíl (nedestruk. - destruktivní) [MPa]
V1	12.21	18,4	2,7	21,1	23,1	-2,0
V2		18,9		21,6	23,2	-1,6
V1	01.22	15,2	2,7	17,9	17,6	0,3
V2		15,8		18,5	18,7	-0,2
V1	02.22	14,5	2,7	17,2	15,1	2,1
V2		15,0		17,7	15,2	2,5

Tato metoda je relativně jednoduchá pro použití v praxi a její výhodou je, že umožňuje nejen stanovení aktuálního vývoje pevnosti, ale i předpověď vývoje pevnosti při uvažování určité teploty zrajícího betonu v nadcházejících hodinách či dnech. Vliv lidského faktoru na výsledky měření je výrazně omezen, protože pokud je správně osazen senzor, měření může probíhat automaticky a je také jednoduše implementovatelné do měřících systémů, které nevyžadují manuální sběr výsledků, ale přenášejí data bezdrátově.

Nutností získání relevantních výsledků je používání receptury, pro kterou byla stanovena kalibrační křivka. Přesnost metody při běžné výstavbě za použití transport betonu ukazuje tabulka 1. Z výsledků je zřejmé, že dle normy stanovený bezpečnostní faktor pokrývá případné odchylky.

### 3. DESTRUKTIVNÍ MĚŘENÍ PEVNOSTI

U destruktivních metod měříme přímo zkoumanou vlastnost materiálu – pevnost v tlaku a jak již vypovídá z názvu při destruktivním zkoušení je zkušební těleso nevratně poškozeno. Do destruktivních metod se řadí zkoušení vytvořených či z konstrukce odvrtaných vzorků betonu ve zkušebním lisu.



### 3.1. Zkoušení vzorků vytvářených na staveništi

Jedná se o nejpoužívanější zkoušku pro ověřování pevností raného i pozdějšího stáří. Princip zkoušky spočívá v zatěžování zkušebního tělesa (např. krychle) až do porušení ve zkušebním lisu. Pevnost betonu v tlaku se spočítá na základě maximálního zatížení, tedy síly působící na těleso těsně před porušením. Aby výsledek zkoušky poskytoval relevantní informaci o pevnosti, je nutné věnovat pozornost správnému vytvoření vzorků, ošetřování a provedení zkoušky. (EN 12390-3, 2019)



Obrázek 6 - Vytváření zkušebních vzorků [Foto: autor]

Před vytvořením zkušebních těles je nutné odebrat nejméně 1,5 násobek odhadovaného množství betonu pro zkušební tělesa. Prováděný odběr betonu by měl být v souladu s doporučeními uvedenými v ČSN EN 12350-1. Následně se beton plní do forem, jejichž vnitřní povrch je ošetřen separačním prostředkem. Norma ČSN EN 12350-1 uvádí 4 možné způsoby hutnění betonu (malý ponorný vibrátor, vibrační stůl, propichovací tyč a hutnicí tyč) mezi nejvíce používané patří vibrační stůl a propichovací tyč. Je-li k dispozici vibrační stůl, doporučuje se plnění formy ve dvou vrstvách, které jsou vibrovány. Pokud není vibrační stůl k dispozici, používá se zpravidla propichovací tyč (viz obrázek 6 vpravo), která má průměr 16 mm a délku 600 mm. Plnění je vhodné provádět ve třech vrstvách a každou vrstvu ztuhnout dvaceti pěti vpichy

rovnoměrně po průřezu. Dále provedením lehkého poklepu pružným předmětem o stěny umožnit vyplavání velkých vzduchových pórů na povrch. V závěru vytváření vzorků před nasazením víka na formu se provede v případě potřeby opatrné odstranění přebytečného betonu a urovňání zednickou lžící. (EN 12350-1, 2019; EN 12390-2, 2019)

Ošetřování vzorků je nutné provádět dle ČSN EN 12390-2. Vzorky je možné skladovat v uzavřené formě 16 hodin až 3 dny po vytvoření v prostředí o teplotě  $20^{\circ}\text{C} \pm 5^{\circ}\text{C}$ . Vzorek musí být uložen tak, aby nebyl vystaven vibracím a předešlo se tak segregaci kameniva u neztuhlého betonu či případným mikrotrhlinám během začátku tvrdnutí. Po odbednění, tedy nejpozději po třech dnech, by měl být skladován při teplotě  $20^{\circ}\text{C} \pm 2^{\circ}\text{C}$  ve vodní lázni či v místnosti s vlhkostí  $>95\%$ . (EN 12390-2, 2019)

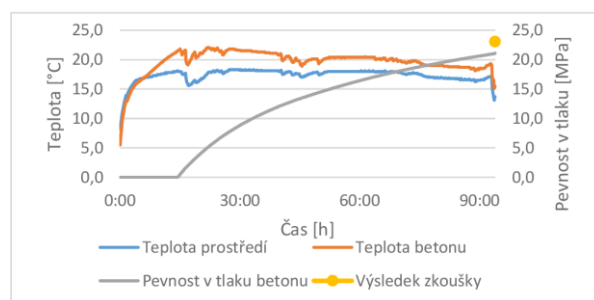
Před zkoušením se vzorek vyndá z vodní lázně či komory s vysokou vlhkostí. Následně se změří a zváží, v případě stanovení objemové hmotnosti se provede i vážení pod vodou. Po očištění vody z povrchu vzorku je možné vzorek umístit do lisu a zahájit zkoušku. Zatěžování je vhodné provádět rychlostí

$0,6 \pm 0,2 \text{ MPa/s}$  v souladu s ČSN EN 12390-3, to odpovídá  $13,5 \text{ kN/s}$ . Jak již bylo zmíněno v úvodu, pevnost v tlaku se spočítá na základě maximální síly, která na plochu vzorku ( $22500 \text{ mm}^2$  v případě standardních krychlí) působila těsně před porušením. Hodnota pevnosti se následně zaokrouhlí na  $0,1 \text{ MPa}$ . (EN 12390-3, 2019; EN 12390-2, 2019)

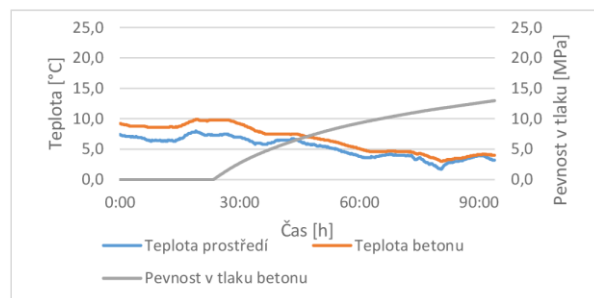
Plastové formy, a především ty méně kvalitní, se mohou časem vyboulit, proto je vhodné občas zkontrolovat stav forem. Pokud je forma a následně pak i strana krychle vyboulená, může to negativně ovlivňovat výsledky zkoušek z důvodu menší plochy strany krychle, která je plně v kontaktu s plochami zkušebního lisu.

Pokud jsou dodrženy zmíněné zásady a doporučení pro výrobu a ošetřování vzorků, tak je výhodou této metody přesnost výsledku. Zde je nutné vést v patrnosti, že výsledná pevnost platí pro zkušební vzorek a není totožná s pevností betonu v konstrukci, který byl jinak ošetřován – při jiné teplotě a vlhkosti.

Vliv teploty ošetřování lze ukázat na následujících měřeních. Obrázek 7 zobrazuje měření teploty zkušebního vzorku (první vzorek - tabulka 1), který byl odebrán na stavbě a umístěn v kanceláři stavby. Na základě kalibrační křivky (obrázek 4) použité receptury betonu pevnostní třídy C25/30 je vypočten i vývoj pevnosti v tlaku. Po dosažení cílové hodnoty  $21 \text{ MPa}$  pro odbedňování stropní konstrukce byl vzorek přepraven do laboratoře a destruktivně stanovena pevnost v tlaku s výsledkem  $23,1 \text{ MPa}$ .



Obrázek 7 - Vývoj teploty a pevnosti: zkušební vzorek



Obrázek 8 - Vývoj teploty a pevnosti: stropní konstrukce

V ten samý okamžik dosahoval dle výpočtu beton v konstrukci (obrázek 8) pevnosti pouze  $13,0 \text{ MPa}$ . Tento příklad je dobrou demonstrací, že je nutné vést v patrnosti teplotu zrání betonu, samozřejmě je nutné zmínit, že se jedná o zimní měření, proto je zde výrazná odchylka na nebezpečnou stranu.

Rozdílné vlhkostní podmínky mohou také odchylovat hodnoty pevnosti betonu ve vzorku a v konstrukci. To lze demonstrovat na výsledcích vzorků po dvaceti osmi dnech,

kteře byly zhotoveny z již zmíněné receptury. Tři z nich byly po odbednění skladovány v místnosti s běžnou vlhkostí vzduchu a tři ve vodní lázni, v obou případech byla teplota prostředí 20°C. Výsledky ukázaly, že průměrný rozdíl těchto jinak ošetřovaných vzorků je 7,6 MPa. Při nedostatečném ošetřování konstrukce a dobrém skladování vzorků také dochází k odchylkám mezi pevností betonu v konstrukci a pevností vzorku.

Stanovování pevnosti raného stáří pomocí zkušebních těles je velmi rozšířena a při správném provedení velmi přesná metoda. Je nutné mít na paměti při interpretaci výsledků zkušebních vzorků raného stáří, že beton v konstrukci zraje v jiných podmínkách. V porovnání s nedestruktivním zkoušením tato metoda vyžaduje větší úsilí z hlediska pracnosti. K velké výhodě této metody na rozdíl od nedestruktivních metod patří její akceptace při výstavbě. Jako příklad je možné zmínit společnosti, které se starají o dálniční sítě u nás, na Slovensku či Maďarsku a při výstavbě vyžadují výhradně destruktivní zkoušky pro pevnost raného stáří (ŘSD, NDS, Nif).

### 3.2. Zkoušení jádrových vývrtů

Pokud je nutné zjistit pevnost betonu, který zral přímo v konstrukci, lze udělat jádrový vývrt, který je následně vyzkoušen destruktivně ve zkušebním lisu stejným způsobem jako zkušební vzorek. Tato metoda se pro stanovování pevnosti raného stáří během výstavby téměř nepoužívá. Nejčastější použití je při ověřování pevnosti u existující starší konstrukce. Důvodem méně častého použití je extrémní náročnost provedení, které je spojené především s vlastním vrtáním. Povrchy jádrového vývrtu, které jsou v kontaktu s lisem, je nutné zabrousit či „zakoncovat“ sírovým roztokem. Další nevýhodou jsou také otvory v konstrukci, které je nutné následně vyplnit. Z hlediska přesnosti se jedná o téměř ideální metodu, protože je zkoušen přímo beton z konstrukce. (EN 12390-3, 2019; EN 12390-2, 2019)

### 3.3. Zkoušení vzorků zrajících v konstrukci

Poslední velmi zřídka používanou metodou je vytvoření zkušebních vzorků a umístění přímo do konstrukce. Základní myšlenou je přiblížení podmínek zrání betonu ve vzorku a v konstrukci. Tato metoda se používá zejména v USA či v Kanadě, kde je zvykem měření pevnosti na válcích. V tomto případě lze zvolit menší rozměr válců s průměrem 100 mm a výškou 200 mm, použít jednorázové formy a tím odpadá i obtížné hledání místa s větší roztečí výztuže. Po vyjmutí formy se vzorkem pevnosti raného stáří z konstrukce je nutné vyřešit zaslepení otvoru v konstrukci.

## 4. ZÁVĚR

Po stanovení regresního vztahu pro používanou recepturu lze Schmidovým tvrdoměrem i metodu zralosti dosahovat velmi přesných výsledků při stanovování pevnosti v tlaku raného stáří na staveništi. I přes to, že moderní tvrdoměry umožňují bezdrátové sdílení informací po naměření, je nutné manuální provádění měření na stavbě proškoleným technikem. V případě metody zralosti je třeba pouze osadit senzor a data

mohou být dále sbírána automaticky a je možné tuto metodu používat i pro odhad vývoje pevnosti.

Destruktivní stanovení pevnosti vzorků raného stáří je považováno za referenční metodu, která bezesporu poskytuje velmi přesné výsledky. Velmi vhodné je vést v patrnosti rozdílné podmínky zrání vzorku betonu a betonu v konstrukci zejména v zimním období.

## PODĚKOVÁNÍ

Rád bych poděkoval kolegům z Ústavu stavebního zkušebnictví fakulty stavební VUT v Brně za předání teoretických i praktických zkušeností během kurzu certifikace NDT techniků ve stavebnictví. Oceňuji jejich odborný přístup a nadšení pro obor nedestruktivního měření.

Dílič výsledky prezentovány v článku byly získány v rámci SGS22/034/OHK1/1T/11.

## POUŽITÁ LITERATURA

- CIKRLE, Petr a Dalibor KOCÁB, 2018. Rebound Hammer Testing of Concrete - Part I. *Beton TKS*. Prague, (6), 45-47.
- CIKRLE, Petr, Dalibor KOCÁB a Josef ČERVENKA, 2019. Rebound Hammer Testing of Concrete - Part II. *Beton TKS*. Prague, (2), 14-18.
- CIKRLE, Petr, Petr MISÁK, Tereza KOMÁRKOVÁ, Ondřej ANTON a Petr DANĚK, 2021. *Nedestruktivní metody ve stavebním zkušebnictví*. Brno: Vysoké učení technické.
- ČSN 73 1373, 2011. *Non-destructive testing of concrete: Determination of compressive strength by hardness testing methods*. Prague: Česká agentura pro standardizaci.
- EN 12350-1, 2019. *Testing fresh concrete: Part 1: Sampling and common apparatus*. Brussels: European Committee for Standardization.
- EN 12390-2, 2019. *Testing hardened concrete: Part 2: Making and curing specimens for strength tests*. Brussels: European Committee for Standardization.
- EN 12390-3, 2019. *Testing hardened concrete: Part 3: Compressive strength of test specimens*. Brussels: European Committee for Standardization.
- EN 12504-2, 2017. *Testing concrete in structures: Part 2: Non-destructive testing - Determination of rebound hammer*. Brussels: European Committee for Standardization.
- EN 12504-4, 2021. *Testing concrete in structures: Part 4: Determination of ultrasonic pulse velocity*. Brussels: European Committee for Standardization.
- EN 13791, 2019. *Assessment of in-situ compressive strength in structures and precast concrete components*. Brussels: European Committee for Standardization.
- KOCÁB, Dalibor, Petr CIKRLE a Petr MISÁK, 2019. Rebound Hammer Testing of Concrete - Part III. *Beton TKS*. Prague, (5), 42-47.
- MALHOTRA, V. M. a Nicholas J. CARINO, 2004. *Handbook on nondestructive testing of concrete*. 2nd ed. Boca Raton, Fla.: CRC Press. ISBN 08-031-2099-0.
- NEN 5970, 2001. *Determination of the compressive strength development of early age concrete on the basis of the weighted maturity*. 1. Netherlands: Dutch Standard.