# BETONOVÉ VOZOVKY
# *CONCRETE ROADS*

2022

## SBORNÍK PŘEDNÁŠEK
## *CONFERENCE PROCEEDINGS*

9. konference s mezinárodní účastí
*9th international conference*

3. listopadu 2022, AQUAPALACE HOTEL PRAGUE
3th November 2022, AQUAPALACE HOTEL PRAGUE



STRABAG WORK ON PROGRESS · SKANSKA · SVAZ VÝROBCŮ CEMENTU ČR · EUROVIA VINCI · metrostav infrastructure

**SBORNÍK**
**BETONOVÉ VOZOVKY 2022**

9. konference s mezinárodní účastí
Kolektiv autorů

Vydavatel: Výzkumný ústav maltovin Praha
1. vydání (brožované)
Listopad 2022

ISBN 978-80-906541-8-1

Publikace prošla jazykovou úpravou vydavatele.
Za věcný obsah příspěvků ve sborníku odpovídají autoři.

# Záštity



MINISTR DOPRAVY

Martin Kupka

přebírá

# ZÁŠTITU

nad konferencí organizovanou Výzkumným ústavem maltovin Praha

Betonové vozovky 2022

V Praze dne 16. září 2022



Martin Kupka
ministr dopravy

V Praze dne 21 -09- 2022

Č. j.: MD-30032/2022-072/1

Vážený pane jednateli,

děkuji Vám za pozvání na 9. mezinárodní konferenci Betonové vozovky, která se uskuteční 2. a 3. listopadu v Praze. Rozhodl jsem se podpořit akci udělením čestné záštity. Zohlednil jsem přitom její odborné zaměření a možný přínos pro zlepšení kvality českých silnic a dálnic.

Rád se odborného setkání zúčastním a přeji Vám, aby se po všech stránkách vydařilo.

V úctě

Martin Kupka

Vážený pan
Ing. Lukáš Peřka
jednatel
Výzkumný ústav maltovin Praha, s.r.o.
Na Cikánce 2
153 00 Praha 5 - Radotín



Ministerstvo dopravy

**Ing. Radek Mátl**
generální ředitel
Ředitelství silnic a dálnic ČR

V Praze 14.10.2022

Vážený pane jednateli,

dovolte mi Vás pozdravit a poděkovat za pozvání na odbornou národní konferenci Betonové vozovky 2022, která bude i se zahraniční účastí.

Velmi rád udělím záštitu nad touto konferencí, která bude jistě přínosem pro všechny, kteří se zabývají technologií staveb.

S pozdravem

Ing. Lukáš Peřka
jednatel
Výzkumný ústav maltovin Praha, s.r.o.
Na Cikánce 2
153 00 Praha 5 - Radotín

# Obsah

## 1. blok: **Budoucnost betonových vozovek**

**Betonové vozovky dnes a zítra – požadavky a možnosti řešení** ..... 10

**Betonstraßen von heute und morgen – Herausforderungen und Lösungsansätze** ..... 24

*Dipl.-Ing. Thomas Wolf – STRABAG Großprojekte GmbH*

**Betonové vozovky – udržitelné řešení určené pro místní silniční komunikace v Polsku** ..... 38

**Concrete pavement – a sustainable solution for local roads in Poland** ..... 49

*Prof. dr hab. Ing. Jan Deja – Svaz výrobců cementu v Polsku,*
*Vědecká a technická univerzita AGH, Krakov, Polsko*
*Piotr Kijowski, Piotr Piestrzyński – Svaz výrobců cementu v Polsku*

## 2. blok: **Životnost betonových vozovek**

**Udržitelná stavba betonových vozovek – od kolébky až ke kolébce** ..... 61

**Nachhaltiger Betonstraßenbau – Von der Wiege bis zur Wiege** ..... 80

*Dipl.-Ing. Stephan Villaret – VILLARET Ingenieurgesellschaft GmbH*
*Dr.-Ing. Marko Wieland – Otto Alte-Teigeler GmbH*

**Specifika diagnostiky vozovek s CB krytem se zaměřením na pohybové plochy letišť** ..... 98

*Ing. Luděk Mališ, Ing. Robert Kaděrka, PhD., Ing. Jiří Jareš, CSc. – PavEx Consulting, s.r.o.*

**Hlučnost cementobetonových krytů vozovek a jejich změna v čase** ..... 105

*Ing. Vítězslav Křivánek, Ph.D. – Centrum dopravního výzkumu v.v.i.*

## 3. blok: **Opravy, údržba a diagnostika – nové technologie a materiály**

**Vývoj protismykových vlastností cementobetonových krytů s obnaženým kamenivem a technologie obnovy protismykových vlastností cementobetonových krytů** ..... 112

*Leoš Nekula – Měření PVV – Leoš Nekula*

**Rychletuhnoucí beton pro obnovu provozní způsobilosti vozovek** ..... 118

**Rapid-hardening concrete for pavement rehabilitation** ..... 129

*Dogaç Özsar, Felicia Nägele – Concretum Construction Science AG*

**Trvanlivost cementobetonových krytů – vznik trhlin jako důsledek hydratace a vysychání** ..... 139

*prof. Ing. Vít Šmilauer, Ph.D., DSc., Ing. Jakub Veselý – ČVUT v Praze, Fakulta stavební*
*Ing. Bohuslav Slánský, Ph.D., Ing. Ladislav Vysloužil – Skanska, a.s.*
*Mgr. Radek Ševčík, Ph.D. – Ústav teoretické a aplikované mechaniky AV ČR, v. v. i.*

**Zkušenosti a vývoj protismykových vlastností u cementobetonových krytů s povrchem upraveným broušením (grindingem)** ..... 148

*Ing. Stanislav Bedřich – STRABAG a.s.*
*Leoš Nekula – Měření PVV – Leoš Nekula*

## 4. blok: **Další možnosti využití cementobetonových krytů**

**Vozovky z válcovaného betonu (RCC) – zkušenosti získané při realizaci pilotních projektů ve vybraných úsecích a výsledky analýzy životního cyklu (LCA)** ..... 167

**Roller compacted concrete (RCC) pavements – Experiences made at several pilot tracks and LCA-results** ..... 172

*DI Dr. Martin Peyerl – Smart Minerals GmbH*
*ass. Prof. DI. Dr. sc. ETHZ Florian Gschösser – Universität Innsbruck*
*DI Sebastian Spaun – VEREINIGUNG DER ÖSTERREICHISCHEN ZEMENTINDUSTRIE (VÖZ)*

**Využití cementobetonového krytu pro stavby nižšího dopravního významu** ..... 177

*Ing. Ladislav Vysloužil, David Šindelek, Miroslav Vašina – Skanska, a.s.*

**Whitetopping a ultra-thin whitetopping v ČR** ..... 183

*Ing. Bohuslav Slánský, Ph.D., Ing. Ladislav Vysloužil – Skanska a.s.*

**White Topping – nová rakouská směrnice pro dimenzování a pokládku vrstvy White Topping** ..... 191

**White Topping – a new Austrian Guideline for dimensioning and application of White Topping** ..... 199

*DI Dr. Martin Peyerl – Smart Minerals GmbH*
*Ass. Prof. DI Dr. Lukas Eberhardsteiner – Technische Universität Wien*
*DI Sebastian Spaun – VEREINIGUNG DER ÖSTERREICHISCHEN ZEMENTINDUSTRIE (VÖZ)*

## Příspěvky zařazené pouze do sborníku

**Sledování agresivních látek v blízkosti CB krytů vozovek** ..... 206

*Ing. Jiří Grošek, Ph.D., Ing. Božena Dohnálková, Ph.D., Ing. Josef Stryk, Ph.D. – Centrum dopravního výzkumu, v.v.i.*
*Ing. Bohuslav Slánský, Ph.D. – Skanska a.s.*

**Reaktivita jednotlivých alkálií a jejich uvolňování v procesu vzniku alkalicko-křemičité reakce a možnosti využití v praxi** ..... 214

*Ing. Tomáš Táborský, Ing. Kateřina Jiroušková – Výzkumný ústav maltovin Praha, s.r.o.*



1. blok:
# Budoucnost betonových vozovek

# Betonové vozovky dnes a zítra – požadavky a možnosti řešení

*Dipl.-Ing. Thomas Wolf*
*STRABAG Großprojekte GmbH*
*Leopoldstraße 250c, 80807 München*

*Tel.: +49 89 / 360 555 – 5721*
*E-mail: thomas.wolf@strabag.com*

Stavba betonových vozovek má v Německu dlouhou tradici. Za tu dobu prošla tato technologie mnoha různými vývojovými stupni. V současné době se používá nevyztužený cementobetonový kryt s příčnými spárami opatřenými kluznými trny, s kotvenými podélnými spárami a obnaženým kamenivem jako standardní povrchovou úpravou.
Tloušťka krytu pro nejvyšší třídu zatížení Bk100 podle RStO 12 [1] se pohybuje od 26 cm na asfaltové podkladní vrstvě přes 27 cm na hydraulicky stmelené podkladní vrstvě nebo zpevněné vrstvě až po 29 cm na podkladní vrstvě z mechanicky stmeleného kameniva.
Regionálně osvědčená technologie cementobetonového krytu spojeného přímo s hydraulicky stmelenou podkladní vrstvou se dnes stále používá na letištních nebo průmyslových plochách. V silničních stavbách je spojení zpravidla přerušeno netkanou textilií, v ojedinělých případech také asfaltovou mezivrstvou.
Cementobetonový kryt se na dálnicích ukládá ve dvou vrstvách s použitím moderních finišerů s posuvnými bočnicemi. Ukládání v jedné vrstvě se používá pouze na dodatečně zhotovovaných plochách, například na zrychlovacích a zpomalovacích pruzích, v místech napojení a na plochách, k jejichž zhotovení se nepoužívá finišer.
Pro výrobu a ukládání betonu jsou závazné předpisy společnosti FGSV (Společnost pro výzkum komunikací a dopravy) ZTV Beton-StB [3] a TL Beton-StB [4]. V nich se odrážejí zkušenosti odborníků z oblasti výstavby betonových vozovek za dobu několika posledních desetiletí a zajišťují tak vysokou kvalitu provedení a dlouhou životnost konstrukce.
Rostoucí nároky obyvatel na snižování hlučnosti a zvyšování jízdního komfortu představují další požadavky na výstavbu cementobetonových krytů. Těžištěm činnosti pracovní skupiny FGSV 8 Betonové konstrukce je vývoj alternativních betonových povrchů, samozřejmě se zachováním stávajících pozitivních vlastností cementobetonových krytů. Úprava povrchu metodou Grinding se vzhledem k vynikající rovnosti a drsnosti a vzhledem k velkému potenciálu snižování hlučnosti postupně krystalizuje jako betonový povrch budoucnosti německých dálnic.
Rychlý a intenzivní vývoj nových, moderních řešení je vedle technicky motivovaných výzkumných přístupů stále více podmíněn i společenskopolitickými aspekty. Zvlášť to platí o požadavku na větší udržitelnost při projektování, výstavbě a v závěru i udržitelnost hotové stavby. Betonové konstrukce jsou velmi dobře připraveny splnit tyto požadavky, a to především díky své dlouhé životnosti. Další potenciál pro optimalizaci spočívá například v používání cementu s nízkým obsahem slínku do spodní vrstvy betonu a v druhotném využívání starých cementobetonových krytů jako recyklovaného kameniva do betonu spodní vrstvy. Pro možnost využití starých cementobetonových krytů je však třeba prokázat již v úvodní fázi projektování – v zásadě ještě před vyhlášením výběrového řízení – že starý beton plánovaný k recyklaci není náchylný ke vzniku alkalicko-křemičité reakce.

# 1 Požadavky na moderní betonovou vozovku

Jaké požadavky jsou kladeny na moderní betonovou vozovku? Očekávání uživatelů a vlastníků se v některých ohledech liší, proto budou také v dalším textu posuzovány odděleně.

Uživatel, tedy řidič automobilu, motocyklu nebo nákladního vozidla, očekává v prvé řadě to, že se co nejrychleji dostane z bodu A do bodu B. Dopravní zácpy způsobené přetížením komunikace, pracemi na silnici nebo nehodami vnímá jako otravnou komplikaci. Mnoha řidičům motorových vozidel ale vadí také omezení rychlosti. Pro uživatele je tedy prioritou plná disponibilita komunikace (obr.**Obr. 1**).



Obr. 1: Cementobetonový kryt na německé dálnici BAB A73 u Coburgu krátce po zahájení provozu

Další vlastnosti, konkrétně jízdní komfort (rovnost, valivý hluk) a bezpečnost (drsnost, světlost, odtok vody atd.) vnímá uživatel pouze jako druhořadé faktory, i když mají rovněž velký význam.

Problematikou valivého odporu a spotřeby paliva se řidič automobilu dosud příliš nezabývá. V kontextu aktuálních diskusí o změně klimatu, emisích $CO_2$ a současných vysokých nákladů na energie se však význam těchto vlastností zvyšuje.

Pro vlastníka silnic jsou výše uvedené výhody důležité proto, že odpovídá jak za bezpečnost účastníků silničního provozu, tak i za ochranu lidí bydlících v blízkosti komunikace před hlukem. Navíc se nejen stavební firma, ale také investor okamžitě stane terčem pozornosti médií a veřejnosti, když například jízdní komfort nově vybudované vozovky neodpovídá očekávání uživatelů.

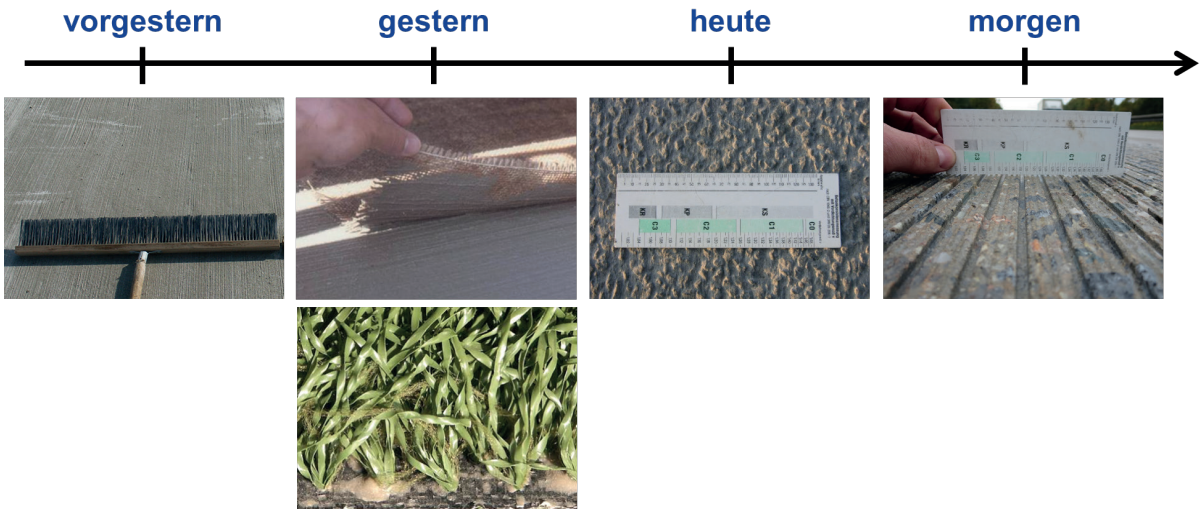
Pro vlastníky jsou kromě toho důležité i další aspekty. Jedná se např. o pořizovací náklady, náklady na údržbu a provoz a dále životnost vozovky.

Celkově lze z požadavků uživatelů a vlastníků vyvodit dva základní požadavky na moderní silnice, a tedy i úkoly, které musí řešit odborníci na výstavbu betonových vozovek:

- velmi dobré povrchové vlastnosti vozovky
- dlouhá životnost a zároveň malé nároky na údržbu.

## 2 Betonový povrch jako výzva

Standardní textura povrchu cementobetonového krytu na německých dálnicích se v posledních desetiletích několikrát změnila v souvislosti s tím, jak se měnily požadavky na drsnost a hlučnost (obr. 2).




*Obr. 2: Vývoj úpravy povrchu standardního cementobetonového krytu na německých dálnicích (zleva doprava: zdrsnění ocelovým koštětem, úprava povrchu jutovou tkaninou a umělým trávníkem, obnažené kamenivo, broušení s drážkováním (grinding/grooving)*

Příčné zdrsnění ocelovým koštětem bylo v minulosti, a i dnes ještě je velmi dobrá metoda pro zhotovení trvale drsného povrchu cementobetonového krytu. Vzhledem k horším akustickým vlastnostem se však dnes tato metoda vytváření textury používá už pouze u ploch s pomalu pojíždějícím provozem nebo tam, kde se nekladou vyšší požadavky na snižování hlučnosti. Sem patří hlavně odpočívky, dopravní plochy, jako například kruhové objezdy a vyhrazené pruhy pro autobusy a rovněž letištní a průmyslové plochy (např. terminály pro překládku kontejnerů).

Podélné texturování jutovou tkaninou se už na německých dálnicích nepoužívá, protože drsnost tohoto povrchu je časově omezená. Zde se zatím ještě preferuje podélné texturování umělým trávníkem, i když tato úprava může být z důvodu chybějící klasifikace hluku v RLS-19 [6], používaná pouze v úsecích, u kterých územní rozhodnutí nestanoví přísnější požadavky na hlučnost.

Povrch s obnaženým kamenivem představuje kombinaci velmi dobré a trvalé drsnosti s nízkou úrovní hlukových emisí, a proto je od svého zavedení předpisem ARS č. 05 BMVBS (Německého ministerstva pro dopravu, stavebnictví a rozvoj měst, dnes BMDV - Ministerstvo pro digitalizaci a dopravu) v roce 2006 [8] standardem pro povrch cementobetonových krytů na německých dálnicích.

I když v Rakousku úprava povrchu cementobetonového krytu technologií obnaženého kameniva představovala standardní technologii už dlouho před rokem 2006, v Německu bylo zpočátku její zavedení pro stavební firmy a investory neznámým územím. Firmy si však velmi rychle osvojily know-how v oblasti technologie pokládky betonu a úpravy povrchu. Díky neustálému zdokonalování v praxi a souběžně probíhajícímu výzkumu dosahuje dnes úprava povrchu technologií obnaženého kameniva velmi dobré kvality.

Potenciál úpravy povrchu technologií obnaženého kameniva má však své technologické limity při snižování hlučnosti, a proto je i v optimálních podmínkách sotva možné dosáhnout vyšších hodnot $D_{StrO}$ než minus 2 dB(A). Ke zhotovení povrchu z obnaženého kameniva (vymetání) se používají hydraulicky poháněná ocelová košťata, která jsou zpravidla namontovaná na kolových nakladačích (oObr. 3). Tím se dosáhne vysoké rovnoměrnosti povrchu.



*Obr. 3: Zhotovení povrchu z obnaženého kameniva odstraněním povrchové malty*

Protože je však kvalita vymetání v nikoli nevýznamné míře ovlivněna povětrnostními podmínkami během tvrdnutí betonu (teplota, srážky, poloha ve stínu atd.), a tedy také dobou vymetání, je nezbytnou podmínkou pro dosažení dobré kvality povrchu obnaženého kameniva, aby pracovníci byli řádně proškoleni a měli potřebné zkušenosti.

Technologicky podmíněné omezení potenciálu pro snížení hlučnosti u technologie obnaženého kameniva kartáčováním vedlo k tomu, že už před delší dobou začalo hledání dalších variant úpravy povrchu cementobetonového krytu / texturování, včetně intenzivního výzkumu v této oblasti. Jeho součástí bylo ověřování a rozpracování nových, ale i starých idejí, přičemž ne všechny obstály:

- texturování čerstvého betonu / povrchové malty pomocí matric, válečků apod.,
- beton s otevřenými póry,
- broušení povrchu s obnaženým kamenivem brusným kotoučem,
- technologie Grinding a Grooving.

Jako velmi slibná možnost se postupně ukázala úprava povrchu technologií Grinding (obr. 4). V tomto směru probíhal cílený výzkum a také v praxi bylo vybudováno velké množství zkušebních úseků, které budou v následujících letech sledovány a vyhodnocovány. Pracovní tým 8.4.2 Grinding, který působí v rámci pracovní skupiny FGSV 8, spojuje zkušenosti a výsledky a v současné době pracuje na informačním dokumentu Textura Grinding M TG,

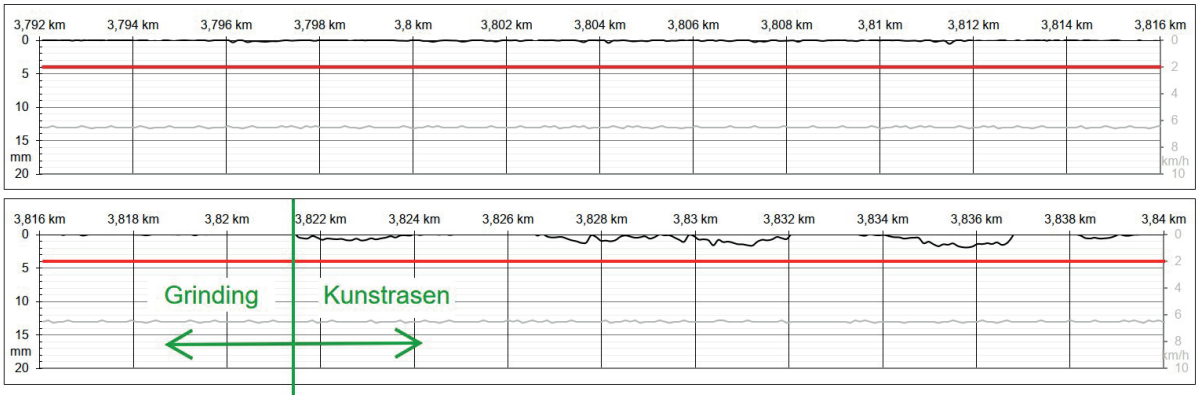
jehož dokončení a zveřejnění je plánováno na konec roku 2022. Kromě toho by textura Grinding měla být zařazena také do nového znění předpisu ZTV Beton-StB.



*Obr. 4: Cementobetonový kryt se standardní texturou povrchu Grinding*

Vedle velkého potenciálu snížení hlučnosti, který u technologie Grinding činí až -5 dB(A), jsou nesporné i četné další výhody. Výsledek broušení (textura povrchu) nezávisí na rozdíl od betonu s obnaženým kamenivem na povětrnostních podmínkách a jen minimálně závisí na pracovnících.

Pro grinding je kromě toho charakteristická velká drsnost a automaticky jako „vedlejší produkt“ také vynikající rovnost cementobetonového krytu (Obr. 5).




*Obr. 5: Rovnost nově zhotoveného cementobetonového krytu (měření planografem)*

Už nově zhotovený cementobetonový kryt – v tomto případě s texturou povrchu vytvořenou pomocí umělého trávníku – má velmi dobrou rovnost s malou nerovností do 2 mm / 4 m, přičemž maximální povolená hodnota činí 4 mm / 4 m (červená čára v grafu). U povrchu Grinding je černá

čára označující naměřené hodnoty na povrchu sotva vidět. Pohybuje se v rozmezí od nulové hodnoty do maximálně 0,5 mm / 4 m. Tato mimořádně dobrá rovnost znamená nejen velký jízdní komfort pro uživatele, ale také výrazné snížení dynamického namáhání vozovky, a tedy delší životnost konstrukce krytu.

Dalším významným aspektem, který hovoří ve prospěch grindingu, je složení betonu, které tato technologie vyžaduje. Pro horní vrstvu je možné opět použít beton s maximální velikostí zrna kameniva do 22 mm a sníženým obsahem cementu cca 350 kg/m³, což by zmírnilo problémy spojené s kamenivem (viz kapitola 4). V současné době se zkoumá, zda lze v některých regionech použít i horní beton s těženým kamenivem a zkoumá se také otázka vliv tvaru a maximální velikosti zrna na kvalitu povrchu Grinding.

A dále je nutno zmínit ještě další přednost. Pokud je to nutné, lze technologii Grinding použít i několikrát během plánované životnosti vozovky k obnovení potřebných vlastností povrchu, konkrétně drsnosti a ke snížení hlučnosti.

## 3 Trvanlivost jako výzva

Jak bylo zmíněno úvodem, uživatel, ale především vlastník očekává od vozovky dlouhou dobu provozu, resp. životnosti při minimální údržbě. Cementobetonové kryty tomuto požadavku velmi dobře vyhovují, protože beton je obecně velmi trvanlivý stavební materiál, který už jen vzhledem ke své velké odolnosti proti deformacím velmi dobře odolává statickému a dynamickému zatížení silničním provozem. To jde ale ruku v ruce s další významnou předností stavby betonových vozovek. Tloušťka cementobetonového krytu má přímý vliv na životnost vozovky. Obr. 6 názorně ilustruje významné faktory, které ovlivňují dobu životnosti cementobetonového krytu vozovky.

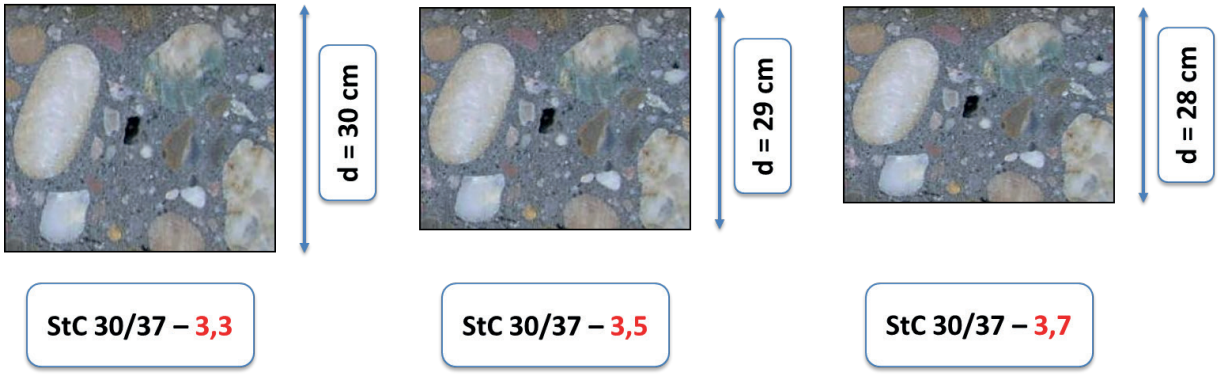



*Obr. 6: Významné faktory ovlivňující dobu životnosti cementobetonového krytu*

Zatížení dopravou má – nezávisle na technologii – zásadní vliv na délku životnosti vozovky. Zkušenosti uplynulých desetiletí nám ukázaly, že je obtížné přesně předpovídat vývoj dopravy. Tento parametr a stejně tak i povětrnostní podmínky a množství rozmrazovací soli použité během zimní údržby není možné ovlivnit a tím méně těmto jevům zabránit.
Pro životnost krytu vozovky je velmi důležité funkční odvodnění tělesa vozovky stejně jako splnění požadavků na ochrannou a podkladní vrstvu. V Německu je to zajištěno předpisy vypracovanými odbornými grémii FGSV.
Totéž platí pro spáry a jejich těsnění. Při výstavbě nového cementobetonového krytu, ale hlavně během provozu, je nutno věnovat zvýšenou pozornost stavu těsnění spár. Dosažení 100% těsnosti spár určitě není v praxi reálné, ale úkolem těsnění spár je zabránit rozhodující měrou pravidelnému vnikání vody a pevných materiálů do spáry.

## 3.1 Tloušťka krytu a pevnost betonu

Rozhodujícími parametry, které ovlivňují životnost krytu jsou pevnost betonu, a především tloušťka krytu.
Potřebná tloušťka krytu je stanovena v RStO [1] v závislosti na třídě zatížení a druhu podkladní vrstvy nebo se v konkrétním případě dimenzuje podle RDO Beton [2].
Dimenzování podle RDO Beton umožňuje snížit standardizovanou tloušťku krytu podle RStO, pokud se zvýší pevnost betonu (v tomto případě pevnost v příčném tahu). Tyto souvislosti samozřejmě nejsou nové a byly také – podle filozofie stavebních firem – aplikovány u jednotlivých projektů partnerství veřejného a soukromého sektoru (PPP projekty).
Obr. 7 ilustruje tuto souvislost na příkladu, přičemž vrstva podkladu použitá pro výpočet je pro další úvahy irelevantní.




*Obr. 7: Příklad dimenzování podle RDO Beton, počet přejezdů ekvivalentních náprav 135 mil., návrhová životnost 30 let*

V rámci revize předpisu ZTV Beton-StB [3] bylo po dlouhé a intenzivní diskuzi rozhodnuto nahradit dosavadní kritéria pevnosti v tlaku a pevnosti v tahu ohybem kritériem pevnosti v příčném tahu. Odborná grémia rovněž vedla intenzivní diskuse o výši požadované hodnoty a způsobu prokazování. Dosavadní zkušenosti z výsledků kontrolních zkoušek ukazují, že v některých regionech nelze vždy s dostupnými surovinami spolehlivě dosáhnout předepsané pevnosti horního betonu 3,3 MPa.
Postup snižování tloušťky krytu proti RStO při současném zvyšování požadavků na pevnost v příčném tahu v souvislosti s výběrem speciálních ložisek kameniva, který byl dosud aplikován u některých PPP projektů, proto není vhodný pro běžné stavební zakázky, a to i vzhledem k současnému a také předpokládanému budoucímu nedostatku surovin (viz kapitola 4). Naopak by bylo žádoucí zvolit opačnou cestu a to tak, že požadavek na pevnost v příčném tahu bude vycházet z parametrů kameniva dostupného v daném regionu. Případnou menší pevnost v příčném tahu pak bude možno kompenzovat větší tloušťkou krytu.

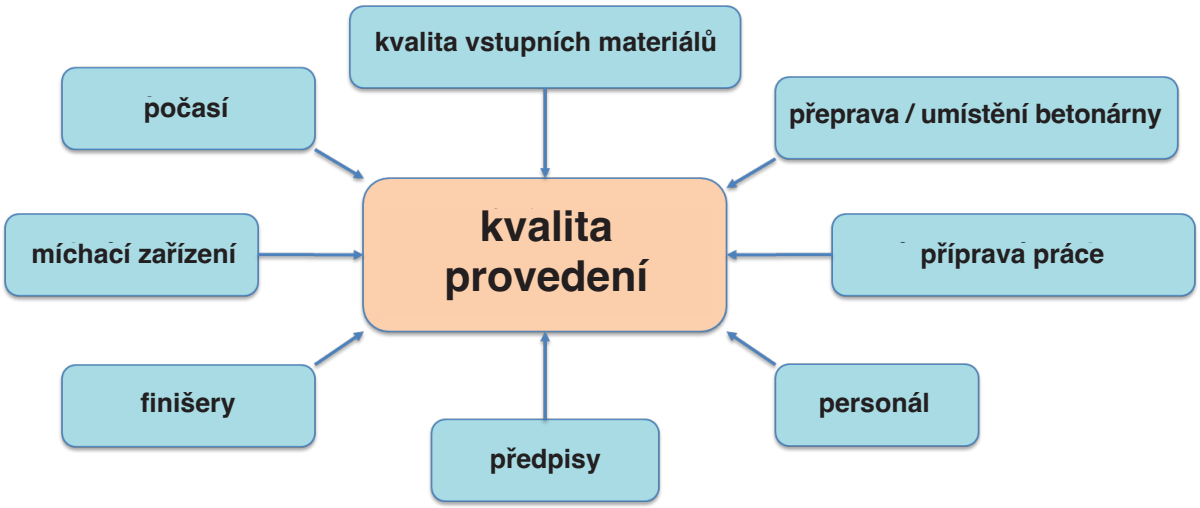
Jako odborníci v silničním stavitelství bychom si také měli společně s těmi, kdo rozhodují ve správě a politice silničního stavitelství položit otázku, zda je současná praxe dimenzování na dobu 30 let stále ještě aktuální. To platí ve stejné míře pro stavbu betonových i asfaltových vozovek.
Na naší stávající silniční síti vidíme, že mnoho cementobetonových krytů už dávno překročilo svou původně plánovanou dobu životnosti, a přesto je účastníci silničního provozu mohou dále užívat, i když je jízdní komfort určitě menší. Z toho bychom měli mít radost a také bychom to měli otevřeně prezentovat veřejnosti.
Pokud se v minulých letech v médiích často mluvilo o poškození cementobetonových krytů horkem, jednalo se vždy - s výjimkou jedné vozovky, která byla předtím poškozena alkalicko-křemičitou reakcí - o cementobetonové kryty, jejichž stáří činilo většinou až 40 let

a v jednotlivých případech i více a kryt měl tloušťku 20 až 22 cm, což bylo v době jejich výstavby běžné. Tyto cementobetonové kryty už nemohly vydržet enormní nárůst namáhání provozem těžkých vozidel a měly být rekonstruovány již mnohem dříve v rámci plánu údržby silniční sítě. S cementobetonovými kryty je to tedy podobné jako s našimi mosty – zanedbání rekonstrukce v několika minulých desetiletích je nyní až příliš zřejmé.

V této souvislosti bychom také měli diskutovat o tom, jestli není účelnější, a nakonec i hospodárnější, budovat hned od počátku o 1 až 2 centimetry tlustší kryt proti požadované výpočtové hodnotě a vytvořit si tak pro budoucnost přiměřenou rezervu únosnosti. S tím spojené vícenáklady jsou zanedbatelné ve srovnání s výhodami, k nimž například patří také výrazné snížení nákladů na údržbu (menší procento porušených desek), a to tím spíše, pokud do kalkulace započítáme i ekonomické ztráty způsobené dopravními zácpami z důvodu prací na vozovce.

## 3.2 Kvalita provedení

Na trvanlivost, resp. životnost vozovky, má samozřejmě také vliv kvalita výroby a provedení. Vysoká kvalita při provádění vede k tomu, že plánovaná doba životnosti bude dodržena nebo dokonce překročena. V opačném případě mohou mít nedostatky v počáteční fázi za následek brzký vznik vad a v nejhorším případě porušení celé konstrukce. To ostatně platí nejen pro stavbu cementobetonových krytů, ale pro všechny technologie. Následující Obr. 8 ukazuje, které podstatné faktory mohou určovat kvalitu provedení.




*Obr. 8: Podstatné vlivy na kvalitu provedení*

Důležitým faktorem pro kvalitu betonu a krytu je kvalita vstupních materiálů. Komplikované okrajové podmínky velkých projektů, například nutnost shromáždit velké množství materiálu ve velmi krátké době, zhotovitelům často působí velké problémy. Proto je naší prioritou udržet současnou vysokou kvalitu cementu, kameniva a přísad splňující naše předpisy.

Povětrnostní podmínky při pokládce krytu lze předem stěží odhadnout. Rozhodnutí o pokládce je pro odpovědného stavbyvedoucího často balancováním na ostří nože. Musí totiž vzít v úvahu riziko nepříznivého počasí a zároveň požadavek dodržení termínů, zajištění materiálu a nedostatek pracovních sil a techniky. Nesprávné rozhodnutí již může zásadně ovlivnit ekonomický úspěch nebo neúspěch stavby.

Povětrnostní podmínky v několika posledních letech, občas s dlouhotrvajícími velmi vysokými teplotami v letních měsících, představují komplikace pro stavebnictví, a zvláště pro výrobu betonu. Zimy jsou naproti tomu kratší a mírnější a díky tomu mohou stavební práce začít v průběhu roku dříve. Proto by bylo velmi výhodné, kdyby hlavní stavební činnost nebyla tak jako dosud soustředěna do druhé poloviny roku, ale přesunula se z velké části do jarních měsíců. To by na jedné straně znamenalo výhodu mírnějších teplot při pokládání betonu a na druhé straně by to zmírnilo známé potíže spojené s druhou polovinou roku. Mám na mysli hlavně nedostatek pracovních sil, techniky, vstupních materiálů a přepravních kapacit.
To si však vyžaduje změnu myšlení při vypisování výběrových řízení a zadávání zakázek, a za určitých okolností to znamená také omezení provozu v zimních měsících kvůli pracím na komunikaci.

Na kvalitu betonu má příznivý vliv malá vzdálenost betonárny od místa ukládání, a tedy krátká doba přepravy. V regionech s řídkou zástavbou není zpravidla problém najít dostatečně velkou a z dopravně technického hlediska výhodně umístěnou lokalitu pro umístění betonárny. V ideálním případě je betonárna umístěna přímo v areálu dodavatele jemného nebo hrubého kameniva.

Podstatnou součástí moderní stavby cementobetonových krytů jsou výkonné míchací a pokládací mechanismy. Samozřejmostí je neustálý vývoj a technické zdokonalování zařízení včetně jejich řídicích systémů.
Při zvažování požadavků na přesnost míchání a dávkování bychom však měli vzít v úvahu, že se jedná o staveništní míchačky, jejichž kapacita se zpravidla pohybuje mezi 200 a 300 m³ betonu za hodinu, a že podmínky na staveništi nelze srovnávat s podmínkami v laboratoři.

K zajištění vysoké kvality provedení přispívají vedle již zmíněných faktorů také kvalitní předpisy. Společnost pro výzkum komunikací a dopravy (Forschungsgesellschaft für Straßen und Verkehrswesen, FGSV) představuje v Německu ideální platformu pro výstavbu silničních komunikací. Lidé, kteří jsou zapojeni do práce jednotlivých komisí, by však měli vždy myslet na spojení s praxí a zajistit, aby předpisy byly jednoduché, srozumitelné a jasně formulované. Totéž platí pro zkoušky a metody měření. Proto je nezbytné, aby byl v komisích zastoupen vysoký podíl odborníků z praxe. V posledních letech však můžeme pozorovat spíše opačný trend. Je stále obtížnější najít pro práci v komisích prakticky orientované pracovníky ze správní oblasti a ze stavebních firem, protože ti jsou plně vytíženi svou běžnou činností. Ale právě tito kolegové z přímé stavební praxe by byli pro aktualizaci předpisů nesmírně důležití.

LEAN a BIM – to jsou ve stavebnictví aktuální hesla. LEAN lze výstižně přeložit jako „pracovní příprava“. Tato je především úkolem pracovníků na staveništi nebo stavbyvedoucího. Kvalitní příprava práce je důležitá a je základním předpokladem úspěšné pokládky betonu a celé realizace stavebních prací. Ve stavebních firmách stále existuje potenciál pro optimalizaci. Zásadní však je to, aby nově nastupující pracovníci byli pečlivě seznámeni s pracovními procesy a aby je přitom zaučovali a podporovali zkušení zaměstnanci. Tímto způsobem je možné účinně přecházet chybám v praxi.

Prostřednictvím koncepce BIM se digitalizace uplatňuje také ve stavebnictví. K podpoře a zvýšení efektivity přispěje hlavně propojení staveniště, mechanizace a lidského faktoru.
Jedno by nám ale mělo být jasné: LEAN ani BIM lidi na stavbě nenahradí! A tím se už dostáváme k současnému a budoucímu úkolu pro stavebnictví, kterým je dostupnost personálu.
V souvislosti s tím je třeba vyřešit několik problémů. Předně pociťujeme zásadní nedostatek mladých lidí, kteří by vůbec byli ochotni pracovat ve stavebnictví. Jedná se o profese jako

stavbyvedoucí, stavební dozor, polír, různá řemesla, laborant a řada dalších. Tomuto problému čelí jak zadavatelé staveb, tak i dodavatelé.

Pro mladé lidi přitom není rozhodující jenom výše platu. Spíše zde neustále narážíme na problém „rovnováhy mezi pracovním a soukromým životem“. Zásadní roli hraje sladění povolání, volného času a rodiny.
Úkolem stavebních firem proto musí být zatraktivnění vzdělávání a samotné profese. V posledních letech už v této oblasti došlo k určitému posunu. Nábor pracovních sil začíná už na školách a univerzitách, existují atraktivní vzdělávací programy a ani pojmy „rodičovská dovolená“ a „home office“ už nejsou ve stavebnictví neznámé. U administrativního personálu se to dá přirozeně zařídit jednodušeji než u pracovníků na stavbě.

V mnoha stavebních oborech je nicméně nezbytná práce venku. V tomto odvětví je sotva možné výrazněji zkrátit pracovní dobu.
Trend v silničním stavitelství je navíc právě opačný. Sjízdnost silnic a předcházení dopravním zácpám mají vysokou prioritu, což je samozřejmě v zájmu všech zúčastněných subjektů. Stále častější jsou ovšem pokusy zajistit splnění těchto požadavků zkrácením doby realizace stavby a prací na stavbě v noci.
Takzvané stavby „24/7“ (tedy nepřetržitý provoz 7 dní v týdnu) jsou vděčným tématem pro média, ale vážou obrovské množství zdrojů a znamenají velké zatížení pro zaměstnance. Pokud by měl tento trend pokračovat, pak se současná napjatá situace v personální oblasti sotva zmírní.

## 4 Zajištění zdrojů jako výzva

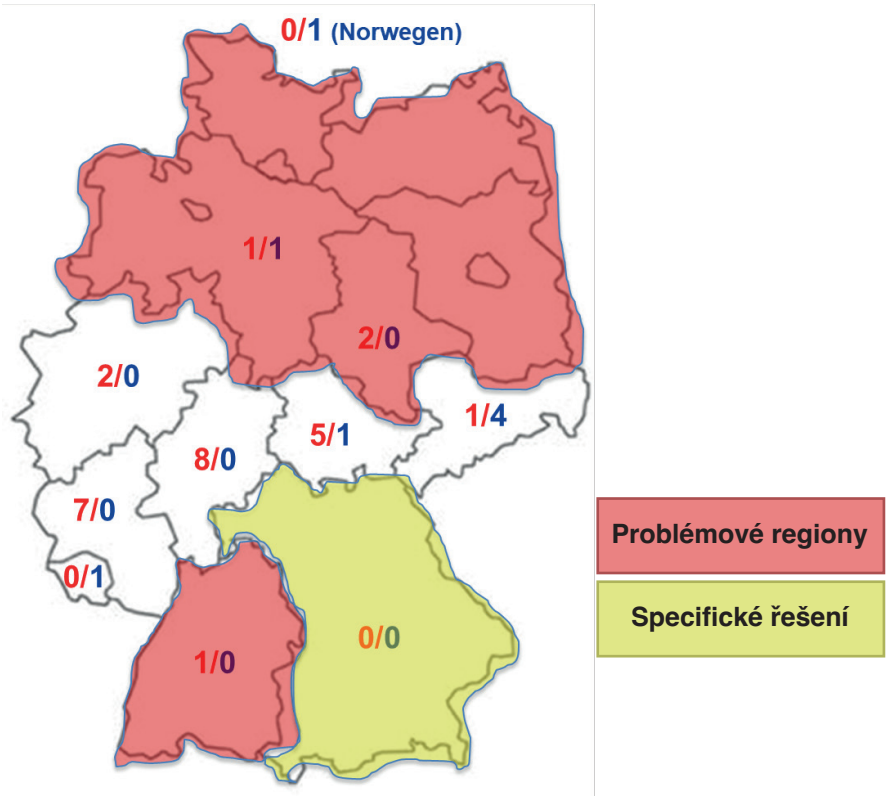
Mimo jiné i v důsledku stabilní konjunktury ve stavebnictví, která trvá už několik let a prakticky nebyla v oblasti výstavby dálnic postižena koronavirovou krizí – což je potěšitelné, dochází opakovaně k problémům v zásobování materiálem, což je zvlášť patrné v druhé polovině roku, kdy je intenzita stavebních prací vyšší.
Pro stavbu cementobetonových krytů s povrchem z obnaženého kameniva je například zapotřebí kvalitní kamenivo s maximálním zrnem 8 mm, hodnotou PSV minimálně 53 a tvarovým indexem $SI_{15}$. Tato frakce kameniva se však používá i pro jiné technologie (např. pro stavbu asfaltových vozovek), což už samo o sobě omezuje její dostupnost.

K tomu je třeba dodat, že k dosažení požadované pevnosti je nezbytný obsah cementu cca 420 kg/m³. Po zavedení předpisu ARS 04/2013 (AKR) [7] musí být veškeré kamenivo používané pro cementobetonové kryty ověřeno a schváleno znaleckým pracovištěm. Dosavadní zkušenosti s prováděnými funkčními zkouškami (ASR - performance prüfung) nebo základními zkouškami (WS - prüfung) ukázaly, že vysoký obsah cementu může mít negativní vliv na rozpínání betonu, což pak vedlo k vyloučení některých zdrojů kameniva pro beton horní vrstvy s obnaženým kamenivem.
*(Pozn. překladatele: WS – základní zkouška je zkouška reaktivnosti hrubého kameniva s minimální velikostí zrna d ≥ 2 mm, funkční zkouška ASR - performance prüfung je zkouška prováděná na navrženém betonu)*

Zdroje kameniva, které absolvovaly příslušné zkoušky a jsou schváleny pro stavbu cementobetonových krytů, jsou uvedeny v platném seznamu Spolkového úřadu pro stavbu silnic (BASt) [9]. Obr. 9 udává počet a rozložení schválených dodavatelských závodů kameniva na území Spolkové republiky Německo. V současné době (květen 2022) je k dispozici celkem 35 schválených ložisek kameniva. Z toho vyplývá potěšitelná skutečnost, že se počet ložisek, schválených pro stavbu silnic, téměř ztrojnásobil od vzniku uvedeného seznamu v roce 2013 (tehdy obsahoval 12 závodů).
Specifické řešení se uplatňuje v Bavorsku (žlutá barva): Tam lze od zkoušky alkalicko-křemičité reakce prováděné znaleckým pracovištěm upustit, pokud může výrobce kameniva doložit dlouhodobé pozitivní zkušenosti s jimi dodávaným kamenivem do cemento-

betonových krytů. Při použití příslušného kameniva do betonu s úpravou povrchu technologií obnaženého kameniva je však nutné používat cement s nízkým obsahem alkálií.

Pokud vynecháme spolkovou zemi Bavorsko s tamním specifickým řešením, jsou ihned patrné přetrvávající problémové oblasti (červená barva). V severním Německu je vzhledem ke geologickým poměrům nedostatek hrubého kameniva, ve východním Německu je použitelnost ložisek omezená kvůli alkalicko-křemičité reakci a v Bádensku-Württembersku je sice k dispozici těžené kamenivo pro spodní beton, ale chybí ložiska drceného kameniva pro použití v horním betonu. Další spolkové země naštěstí ještě mají k dispozici dostatečný počet ověřených a vhodných ložisek kameniva.




*Obr. 9: Počet a rozložení ložisek kameniva schválených pro stavbu cementobetonových krytů v Německu podle seznamů BASt, květen 2022 (červené číslo = WS základní zkouška, modré číslo = performance zkouška)*

Jaká možná řešení připadají v úvahu?
Platné předpisy TL Beton-StB [4] požadují použití cementů stejného druhu a pevnostní třídy do betonu obou vrstev dvouvrstvových cementobetonových krytů, tedy do spodního i horního betonu. Dosud byly – až na pár zkušebních úseků – v Německu použity pouze cementy CEM I, se kterými jsou nepochybně velmi dobré zkušenosti při stavbě cementobetonových krytů.
Jak už bylo uvedeno, mnoho ložisek kameniva musí být v současné době vyloučeno z použití při výstavbě cementobetonových krytů, protože v kombinaci s cementem CEM I nemají vyhovující základní nebo funkční (performance) zkoušku. Odborný výzkum však ukázal, že v kombinaci s cementem CEM II nebo CEM III lze použít další nikoliv zanedbatelný počet ložisek kameniva.

Protože však převládá určitá obava z použití cementů obsahujících vysokopecní strusku do horního betonu, mimo jiné i kvůli odolnosti proti mrazu/rozmrazovací soli, vydala pracovní skupina 8 FGSV doporučení, aby se až do získání dalších výsledků výzkumu používaly tyto cementy pouze do spodního betonu a do horního betonu se nadále používaly osvědčené cementy CEM I.

BMDV proto nedávno vydalo obecný oběžník (Allgemeines Rundschreiben, ARS 04/2022) [5], v němž rozšířilo a zjednodušilo používání cementů pro spodní beton, takže výběr cementů v budoucnosti rozšíří také počet lokalit kameniva použitelného pro spodní beton.
Z používání alternativních druhů cementu ve spodním betonu vyplývá další výhoda. Tyto cementy mají při výrobě mnohem lepší bilanci $CO_2$ a díky tomu se celkově zlepšuje udržitelnost betonových komunikací, kterou jsem zmínil na začátku.

Další možností, jak zvýšit dostupnost kameniva, by bylo značné snížení obsahu cementu v povrchu s obnaženým kamenivem betonu, který v současné době činí 420 kg/m³. Z hlediska technologie výroby betonu je to však možné jenom při zvýšení maximální velikosti zrna, což ale zase není možné z hlediska akustických parametrů povrchu s obnaženým kamenivem.
Na tomto místě je třeba znovu zmínit výhody textury Grinding, tj. maximální velikost zrn až 22 mm a nižší obsah cementu cca 350 kg/m³ ve srovnání s povrchem s obnaženým kamenivem, uvedeným v kapitole 2.

## 5 Závěr

Současné a budoucí technické úkoly spočívají ve vývoji dlouhodobě drsných, nehlučných a rovných povrchů, které – pokud to bude v průběhu užívání nezbytné – bude možné vytvořit v betonu i opakovaně bez větších nákladů. Takovým povrchem je textura Grinding, a ta by proto měla být co nejdříve zapracována do platných předpisů a klasifikována z akustického hlediska ve směrnicích pro ochranu proti hluku na pozemních komunikacích (RLS).

Dalším úkolem – a to ostatně platí pro všechny technologie – je zvýšení doby životnosti vozovky za současného snížení nákladů na její údržbu a s tím spojené minimalizace dopravních omezení a zácp.
Ke splnění těchto požadavků je nezbytné vytvořit další rezervy v únosnosti našich vozovek. Při stavbě betonových vozovek by se toho dalo bez problémů dosáhnout zvýšením tloušťky spodního betonu cementobetonového krytu o několik centimetrů.

Dostupnost surovin je již dnes klíčovým problémem a s tím související problémy se budou stále zvětšovat. Musíme si vystačit s dostupnými regionálními zdroji surovin a nesmíme plýtvat cennými surovinami, vhodnými do cementobetonových krytů, tím, že budou

používány pro méně důležité konstrukce. Cílem musí být využívat v co největší míře recyklované materiály z vybouraných krytů.
Technologie výstavby betonových vozovek a volba jejich konstrukce (podkladních vrstev) musí v budoucnosti nutně vycházet z dostupných surovin.

Betonové vozovky, které dnes v Německu stavíme s použitím našich moderních strojů a mechanismů a z kvalitních surovin, mají vysokou kvalitativní úroveň. Při revizi předpisů se v souvislosti s pojmem zvyšování kvality často diskutuje také o zpřísnění požadavků. To je však nesprávný přístup.
K tomu, abychom dosáhli dalšího, trvale udržitelného zvýšení kvality, musí také existovat nezbytné okrajové podmínky. Současné podmínky, které byly několikrát zmíněny v textu, např. sezónní nedostatek surovin, nedostatek pracovních sil, práce v noci a o víkendu atd., přitom jsou často v rozporu s vytýčeným cílem.

Největší pákou pro řízení kvality není technické vybavení, předpisy a požadavky, ale vysoce kvalifikovaní, motivovaní stavební dělníci, technici a inženýři, zapálení pro svou práci. Hlavním současným a také budoucím cílem a zároveň největší výzvou pro stavebnictví je mít k dispozici takové pracovní síly.
A právě v tomto ohledu je nezbytná podpora ze strany politiky a médií. Pouze pokud se podaří trvale pozvednout prestiž odvětví, rozhodne se pro tuto zajímavou profesi více mladých lidí.
K tomu patří jednak častější zveřejňování zpráv o úspěšně realizovaných projektech a jednak nutnost, aby politici informovali veřejnost o hodnotách, které toto odvětví vytváří a jak důležitá je funkční infrastruktura pro mobilitu, oběh zboží a hospodářství naší země.

## Zdroje

[1] Forschungsgesellschaft für Straßen- und Verkehrswesen (2012): Richtlinien für die Standardisierung des Oberbaus von Verkehrsflächen, Ausgabe 2012 (RStO 12), [Směrnice pro standardizaci horních staveb vozovek, vydání 2012 (RStO 12)] Köln, FGSV 499

[2] Forschungsgesellschaft für Straßen- und Verkehrswesen (2010): Richtlinien für die rechnerische Dimensionierung von Betondecken im Oberbau von Verkehrsflächen, Ausgabe 2009 (RDO Beton 09), [Směrnice pro dimenzování betonového povrchu vozovek výpočtem, vydání 2009 (RDO Beton 09)], Köln, FGSV 497

[3] Forschungsgesellschaft für Straßen- und Verkehrswesen (2007): Zusätzliche technische Vertragsbedingungen und Richtlinien für den Bau von Tragschichten mit hydraulischen Bindemitteln und Fahrbahndecken aus Beton, Ausgabe 2007 (ZTV Beton-StB 07) [Doplňující technické smluvní podmínky a směrnice pro stavbu podkladu s hydraulickými pojivy a krytů vozovek z betonu, vydání 2007 (ZTV Beton-StB 07), se změnami z března 2013, Köln, FGSV 899

[4] Forschungsgesellschaft für Straßen- und Verkehrswesen (2007): Technische Lieferbedingungen für Baustoffe und Baustoffgemische für Tragschichten mit hydraulischen Bindemitteln und Fahrbahndecken aus Beton, Ausgabe 2007 (TL Beton-StB 07) [Technické dodací podmínky pro stavební materiály a směsi s hydraulickými pojivy a kryty vozovek z betonu, vydání 2007 (ZTV Beton-StB 07), se změnami z března 2016, Köln, FGSV 891

[5] Bundesministerium für Digitales und Verkehr [Spolkové ministerstvo pro digitalizaci a dopravu] (BMDV, 2022): Allgemeines Rundschreiben Straßenbau Nr. 04/2022 [Obecný oběžník o výstavbě silnic č. 04/2022]

[6] Forschungsgesellschaft für Straßen- und Verkehrswesen (2019): Richtlinien für den Lärmschutz an Straßen RLS-19, Ausgabe 2019, [Směrnice o protihlukové ochraně na silnicích], Köln, FGSV 052

[7] Bundesministerium für Verkehr, Bau und Stadtentwicklung BMVBS [Spolkové ministerstvo dopravy, stavebnictví a rozvoje měst] (2013): Allgemeines Rundschreiben Straßenbau Nr. 04/2013 [Obecný oběžník o výstavbě silnic č. 04/2013]

[8] Bundesministerium für Verkehr, Bau und Stadtentwicklung BMVBS [Spolkové ministerstvo dopravy, stavebnictví a rozvoje měst] (2006): Allgemeines Rundschreiben Straßenbau Nr. 05/2006 [Obecný oběžník o výstavbě silnic č. 05/2006]

[9] Webová stránka Spolkového ústavu pro silniční stavitelství (BASt), https://www.bast.de/BASt_2017/DE/Strassenbau/Qualitaetsbewertung/Listen/listen_node.html

# Betonstraßen von heute und morgen – Herausforderungen und Lösungsansätze

*Dipl.-Ing. Thomas Wolf*
*STRABAG Großprojekte GmbH*
*Leopoldstraße 250c, 80807 München*

*Tel.: +49 89 / 360 555 – 5721*
*E-Mail: thomas.wolf@strabag.com*

Der Betonstraßenbau besitzt in Deutschland eine lange Tradition. Dementsprechend hat die Bauweise viele verschiedene Entwicklungsstufen durchlaufen und ist heute angekommen bei der unbewehrten Plattenbauweise mit verdübelten Querscheinfugen, verankerten Längsscheinfugen und Waschbeton als Standardoberfläche auf Autobahnen.
Die Deckendicken für die höchste Belastungsklasse Bk100 nach RStO 12 [1] reichen dabei von 26 cm auf einer Asphalttragschicht über 27 cm auf HGT oder Verfestigung bis zu 29 cm auf ungebundener Schottertragschicht.
Die regional bewährte Bauweise Betondecke im direkten Verbund zur HGT / Verfestigung kommt aktuell noch auf Flugbetriebs- oder Industrieflächen zur Anwendung. Im Straßenbau wird der Verbund in der Regel durch einen Vliesstoff, in seltenen Fällen auch durch eine Asphaltzwischenschicht, unterbrochen.
Der Einbau der Betondecke erfolgt auf Autobahnen zweischichtig oder zweilagig mit modernen Gleitschalungsfertigern. Der einschichtige Einbau beschränkt sich dabei auf nachträglich herzustellende Flächen wie z. B. Beschleunigungs- und Verzögerungsspuren an Anschlussstellen sowie auf Handfelder.
Für die Betonherstellung und den Einbau sind die FGSV-Regelwerke ZTV Beton-StB [3] und TL Beton-StB [4] bindend. Sie bilden die Erfahrungen der Betonstraßenfachleute der letzten Jahrzehnte ab und stellen damit eine hohe Ausführungsqualität und Dauerhaftigkeit der Bauweise sicher.
Das zunehmende Bedürfnis der Bevölkerung nach Lärmminderung und Fahrkomfort stellt auch die Betonbauweise vor weitere Herausforderungen. Die Entwicklung von alternativen Betonoberflächen, natürlich unter Beibehaltung aller bestehenden positiven Eigenschaften der Betonstraße, steht hierbei im Fokus der Arbeit der FGSV-Arbeitsgruppe 8 Betonbauweisen. Dabei kristallisiert sich die Grindingoberfläche aufgrund ihrer hervorragenden Ebenheit und Griffigkeit sowie einem hohen Lärmminderungspotential als zukünftige Betonoberfläche auf Bundesfernstraßen heraus.
Neben den technisch motivierten Forschungsansätzen drängen zunehmend gesellschaftspolitische Aspekte zur raschen und intensiven Entwicklung neuer, zeitgerechter Lösungen. Das betrifft insbesondere die Forderung nach mehr Nachhaltigkeit in der Planung, im Bau und schließlich im fertigen Bauwerk. Die Betonbauweise ist allein aufgrund ihrer hohen Lebensdauer bereits gut für diese Anforderungen gerüstet. Weiteres Optimierungspotential besteht beispielsweise in der Verwendung von klinkerärmeren Zementen im Unterbeton sowie in einer höherwertigeren Wiederverwendung der alten Betondecken, z. B. als neue Gesteinskörung im Unterbeton. Hierfür muss jedoch frühzeitig im Projekt – prinzipiell sogar noch vor der Ausschreibung - die AKR-Unbedenklichkeit des alten Recycling-Betons nachgewiesen werden.

# 1 Erwartungen an eine moderne Betonstraße

Welche Anforderungen werden an eine moderne Betonstraße gestellt? Da sich die Erwartungshaltung von Nutzer und Eigentümer teilweise unterscheidet, wird diese im weiteren Verlauf auch getrennt betrachtet.

Der Nutzer, also der Auto-, Motorrad- oder Lkw-Fahrer, erwartet zunächst einmal, dass er möglichst schnell von „A“ nach „B“ kommt. Staus durch Überlastung, Baustellen oder Unfälle sind stets ein Ärgernis. Aber auch Geschwindigkeitsbeschränkungen werden von vielen Fahrzeugführern als störend empfunden. Im Vordergrund für den Nutzer steht daher die volle Verfügbarkeit der Straße (Bild 1).



*Bild 1: Betonfahrbahn auf der BAB A73 bei Coburg kurz nach Verkehrsfreigabe*

Die Eigenschaften Fahrkomfort (Ebenheit, Rollgeräusche) und Sicherheit (Griffigkeit, Helligkeit, Entwässerung etc.) spielen für den Nutzer in der Wahrnehmung zunächst nur eine sekundäre Rolle, wenngleich sie ebenso bedeutend sind.

Mit den Themen Rollwiderstand und Treibstoffverbrauch setzt sich der Autofahrer bisher nicht auseinander. Aufgrund der aktuellen Debatten zu Klimawandel, $CO_2$-Ausstoß und den derzeit hohen Energiekosten werden diese Eigenschaften mehr an Bedeutung gewinnen.

Für den Eigentümer der Straßen sind die erstgenannten Punkte wichtig, da er sowohl für die Sicherheit der Verkehrsteilnehmer als auch für den Lärmschutz der Anwohner zuständig ist. Zudem steht nicht nur die Baufirma, sondern auch der Bauherr sofort im Fokus der Medien und der Öffentlichkeit, wenn z. B. bei einer neu hergestellten Fahrbahn der Fahrkomfort nicht den Erwartungen der Nutzer entspricht.

Zusätzlich spielen für den Eigentümer weitere Punkte eine Rolle. Das sind z. B. die Herstellkosten, die Unterhalts- bzw. Betriebskosten (Wartung, Pflege) und die Nutzungsdauer der Fahrbahn.

Zusammenfassend lassen sich aus den Erwartungshaltungen der Nutzer und Eigentümer zwei wesentliche Anforderungen an moderne Fahrbahnen und damit Herausforderungen für die Betonstraßenfachleute ableiten:

- sehr gute Oberflächeneigenschaften und
- eine hohe Dauerhaftigkeit bei geringem Wartungsaufwand.

## 2 Herausforderung Betonoberfläche

Die Standard-Oberflächentextur der Betondecke auf Bundesfernstraßen hat sich in den letzten Jahrzehnten mehrfach entsprechend der Griffigkeits- und Lärmanforderungen verändert (Bild 2).

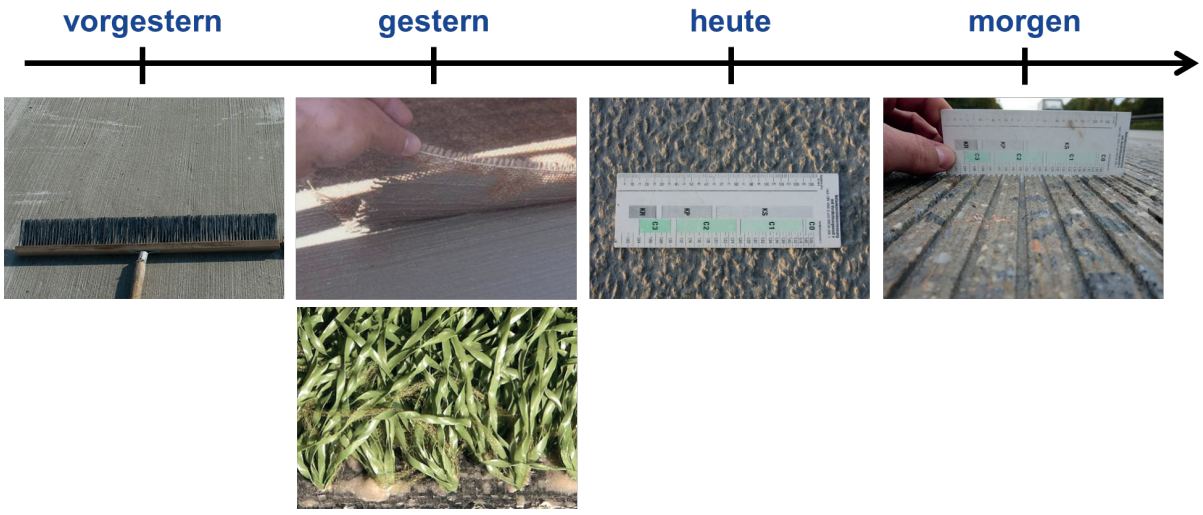



*Bild 2: Entwicklung der Standard-Betonoberfläche auf Bundesfernstraßen (von links nach rechts: Stahlbesen, Jutetuch und Kunstrasen, Waschbeton, Grinding mit Grooving)*

Der Stahlbesenquerstrich war und ist noch heute eine sehr gute Methode für der Herstellung einer dauerhaft griffigen Betonoberfläche. Aufgrund seiner schlechteren Lärmeigenschaften kommt diese Texturierungsmethode heute nur noch bei Flächen mit langsam fahrendem Verkehr zum Einsatz bzw. dort, wo keine erhöhten Anforderungen an die Lärmminderung bestehen. Dies sind vor allem Rastanlagen, kommunale Flächen wie Kreisverkehre und Busspuren sowie Flugbetriebs- und Industrieflächen (z. B. Containerumschlag-Terminals).

Der Jutetuchlängsstrich wird auf Bundesfernstraßen aufgrund seiner bedingt dauerhaften Griffigkeit nicht mehr angewendet. Hier wird noch eher dem Kunstrasenlängsstrich der Vorzug gegeben, wobei dieser aufgrund seiner fehlenden Lärmeinstufung in den RLS-19 [6] nur in Bereichen eingesetzt werden kann, für die keine erhöhten Lärmanforderungen aus der Planfeststellung bestehen.

Die Waschbetonoberfläche vereint eine sehr gute und dauerhafte Griffigkeit mit geringen Lärmemissionen und ist daher seit ihrer Einführung durch das ARS Nr. 05 des BMVBS (heute BMDV) im Jahr 2006 [8] die Standard-Betonoberfläche auf Bundesfernstraßen.

Auch wenn die Waschbetonherstellung in Österreich bereits lange vor 2006 zum Standard gehörte, so war ihre Einführung in Deutschland für Baufirmen und Bauherren zunächst Neuland. Bereits nach kürzester Zeit hatte sich das Know-how für Betontechnologie, Einbau und Herstellung der Oberfläche bei den Firmen entwickelt. Durch permanente Verbesserungen in der Praxis sowie parallele Forschung ist die Waschbetonbauweise heute auf einem hohen Qualitätsniveau angekommen.

Dem Lärmminderungspotential der Waschbetonbauweise sind jedoch technologische Grenzen gesetzt, so dass selbst unter optimalen Voraussetzungen kaum höheren $D_{StrO}$-Werte als minus 2 dB(A) möglich sind. Die Herstellung der Waschbetonoberfläche (Auskehren) erfolgt maschinell durch hydraulisch angetriebene, i. d. R. an Radladern montierte Stahlbesen (Bild 3). Damit wird eine hohe Gleichmäßigkeit der Oberfläche erzielt.



*Bild 3: Herstellung der Waschbetonoberfläche durch Entfernen des Oberflächenmörtels*

Da das Auskehrergebnis aber in nicht unerheblichem Maße von der Witterung während der Erhärtung des Betons (Temperatur, Niederschlag, Schattenlage usw.) und damit vom Auskehrzeitpunkt beeinflusst wird, ist ein gut geschultes und erfahrenes Personal für die Qualität der Waschbetonoberfläche unerlässlich.

Das technologisch begrenzte Lärmminderungspotential der Waschbetonbauweise hat bereits vor mehreren Jahren zu einer Suche nach zusätzlichen Betonoberflächen / Texturierungsvarianten sowie zu weitergehender Forschung geführt. Hierbei wurden verschiedene neue, aber auch alte Ideen geprüft, weiterverfolgt oder wieder verworfen:

- Texturierung des Frischbetons / Oberflächenmörtels mit Matrizen, Walzen und dgl.,
- Offenporiger Beton,
- Tellerschleifen von Waschbetonoberflächen,
- Grinding und Grooving.

Als sehr erfolgversprechende Oberfläche hat sich inzwischen die Grindingtextur herauskristallisiert (Bild 4). Es wurde dahingehend sehr gezielte Forschung betrieben und auch in der Praxis eine Vielzahl von Erprobungsstrecken errichtet, die in den nächsten Jahren weiter messtechnisch betreut und ausgewertet werden. Innerhalb der FGSV-Arbeitsgruppe 8 bündelt der Arbeitskreis 8.4.2 Grinding die Erfahrungen und Ergebnisse und erarbeitet derzeit das Merkblatt Texturgrinding M TG, dessen Fertigstellung und Veröffentlichung für Ende 2022 geplant ist. Zudem soll die Grindingtextur auch Eingang in die Neufassung der ZTV Beton-StB finden.



*Bild 4: Betonoberfläche mit Standard-Grindingtextur*

Neben einem hohen Lärmminderungspotential von bis zu minus 5 dB(A) beim akustischen Grinding liegen viele weitere Vorteile auf der Hand. Das Schneidergebnis (Oberflächentextur) ist im Gegensatz zum Waschbeton nicht witterungs- und kaum personalabhängig.

Das Grinding führt zudem zu einer sehr hohen Griffigkeit und praktisch als „Nebenprodukt“ automatisch auch zu einer hervorragenden Ebenheit der Betonoberfläche (Bild 5).

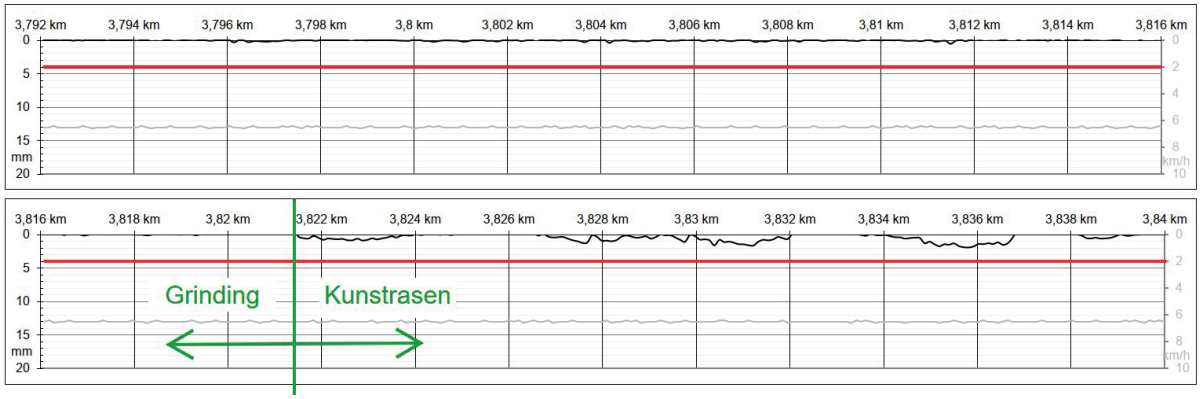



*Bild 5: Ebenheit einer neu hergestellten Betondecke (Planographenmessung)*

Bereits eine neu hergestellte Betondecke – im vorliegenden Fall mit einer durch Nachschleppen eines Kunstrasen erzeugten Oberflächentextur – zeigt eine sehr gute Ebenheit mit Abweichungen von lediglich bis zu 2 mm / 4 m bei einem Anforderungswert von maximal 4 mm / 4 m (rote Linie im Diagramm). Bei der Grindingoberfläche ist die schwarze Messlinie im Diagramm kaum zu erkennen. Sie bewegt sich im Bereich der Nulllinie bis maximal 0,5 mm / 4 m. Diese außergewöhnlich gute Ebenheit führt nicht nur zu einem hohen Fahrkomfort für

den Nutzer, sondern auch zu einer deutlichen Reduzierung der dynamischen Beanspruchung der Fahrbahn und folglich zu einer längeren Lebensdauer der Deckenkonstruktion.

Ein weiterer wesentlicher Aspekt, der für das Grinding spricht, ist die dafür erforderliche Betonzusammensetzung. Es können wieder Oberbetone mit einem Größtkorn von bis zu 22 mm und reduziertem Zementgehalt von ca. 350 kg/m³ eingesetzt werden, was die Verfügbarkeitsthematik der Gesteinskörnungen (siehe Abschnitt 4) entspannen würde. Ob in manchen Regionen ggf. auch reine Kiesoberbetone möglich sind, wird derzeit untersucht, ebenso wie der Einfluss der Kornform und des Größtkorns auf das Grindingergebnis.

Und noch einen weiteren positiven Punkt gilt es zu erwähnen. Das Grinding kann, falls nötig, auch mehrmals während der geplanten Nutzungsdauer der Fahrbahn zur Wiederherstellung der erforderlichen Oberflächeneigenschaften wie Griffigkeit und Lärmminderung durchgeführt werden.

## 3 Herausforderung Dauerhaftigkeit

Wie eingangs erwähnt, erwartet der Nutzer, in erster Linie aber der Eigentümer, eine hohe Nutzungs- bzw. Lebensdauer der Straße bei gleichzeitig geringem Unterhaltungsaufwand. Die Betonbauweise kann dies in besonderem Maße leisten, denn Beton ist generell ein sehr dauerhafter Baustoff, der allein aufgrund seines hohen Verformungswiderstandes den statischen und dynamischen Beanspruchungen aus Verkehr sehr gut gewachsen ist. Hinzu kommt aber noch ein weiterer wesentlicher Vorteil der Betonbauweise. Die Dicke der Betondecke hat einen direkten Einfluss auf die Lebensdauer der Fahrbahn. Bild 6 soll wesentliche Einflussfaktoren auf die Nutzungsdauer einer Betonstraße verdeutlichen.

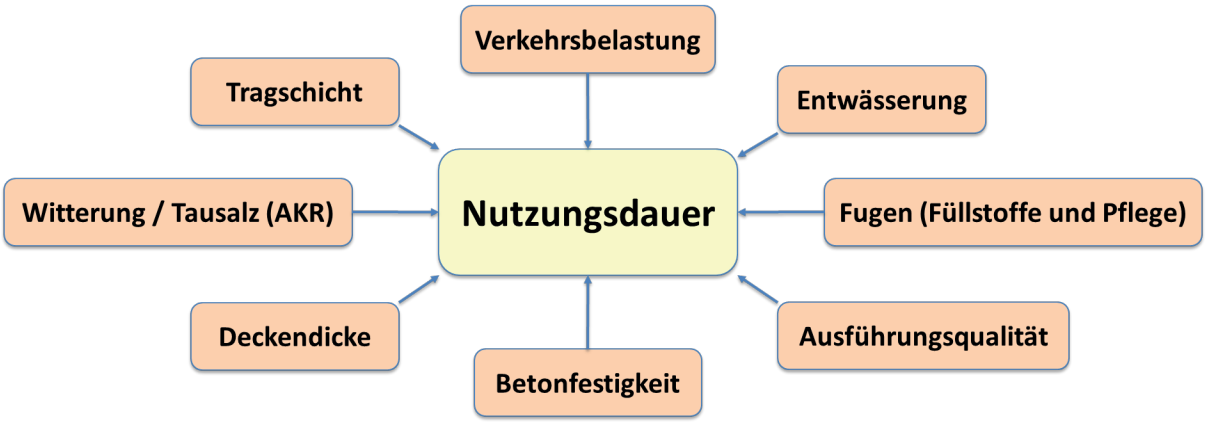



*Bild 6: Wesentliche Einflussfaktoren auf die Nutzungsdauer einer Betonstraße*

Die Verkehrsbelastung hat – unabhängig von der Bauweise – einen maßgeblichen Einfluss auf die Lebensdauer einer Straße. Die Erfahrungen der vergangenen Jahrzehnte haben uns gezeigt, dass es schwierig ist, genaue Prognosen zur Verkehrsentwicklung abzugeben. Sowohl dieser Parameter als auch die Witterung und der Tausalzeintrag im Winter lassen sich nicht beeinflussen oder verhindern.
Für einen dauerhaften Straßenoberbau sind eine funktionierende Entwässerung des Straßenkörpers ebenso wesentlich, wie anforderungsgerechte Frostschutz- bzw. Tragschichten. Dies wird in Deutschland durch die in den Fachgremien der FGSV erarbeiteten Regelwerke sichergestellt.
Gleiches gilt für die Fugen und Fugenfüllstoffe. Sowohl bei der Neuherstellung, aber vor allem auch während der Nutzungsdauer, ist besonderes Augenmerk auf den Zustand der Fugenfüllung zu legen. Eine 100 %-ige Dichtheit der Fugen ist sicher nicht praxisnah, jedoch

ist es Aufgabe der Fugenfüllung, einen regelmäßigen Wasserzutritt sowie das Eindringen von Feststoffen in die Fuge maßgeblich zu verhindern.

## 3.1 Deckendicke und Betonfestigkeit

Die Betonfestigkeit, vor allem aber die Deckendicke, sind entscheidende Parameter im Betonstraßenbau, mit denen sich die Nutzungsdauer einer Betonfahrbahn steuern lässt.
Die erforderliche Deckendicke ist in Abhängigkeit von Belastungsklasse und Tragschicht in den RStO geregelt [1] oder wird im Einzelfall nach den RDO Beton [2] dimensioniert.
Die Dimensionierung nach RDO Beton ermöglicht auch eine Reduzierung der standardisierten Deckendicke gemäß RStO, wenn dafür die Betonfestigkeit (in diesem Falle die Spaltzugfestigkeit) erhöht wird. Diese Zusammenhänge sind selbstverständlich nicht neu und wurden – je nach Philosophie der Baufirmen – auch bei einzelnen ÖPP-Projekten so angewendet.
Bild 7 zeigt beispielhaft diesen Zusammenhang, wobei die in der Berechnung angesetzte Tragschicht für die weitere Betrachtung unerheblich ist.

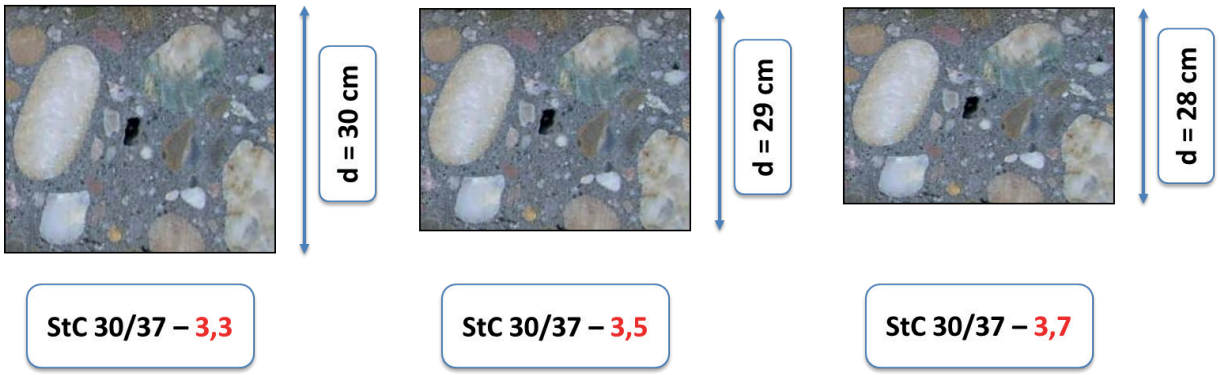



*Bild 7: Beispiel für eine Dimensionierung nach RDO Beton, B-Zahl 135 Mio, Nutzungsdauer 30 Jahre*

Im Rahmen der Überarbeitung der aktuellen ZTV Beton-StB [3] wurde nach langer und intensiver Diskussion beschlossen, die Druck- und Biegezugfestigkeit als bisheriges Anforderungskriterium künftig durch die Spaltzugfestigkeit zu ersetzen. Über die Höhe der Anforderung und das Nachweisverfahren wurde in den Gremien ebenso intensiv beraten. Die bislang gesammelten Erfahrungen aus Ergebnissen von Kontrollprüfungen zeigen, dass in einigen Regionen bereits ein Anforderungswert von 3,3 MPa im Oberbeton mit den verfügbaren Rohstoffen nicht immer zielsicher zu erreichen ist.
Das bisher zum Teil bei ÖPP-Projekten angewendete Vorgehen einer Dickenreduzierung gegenüber den RStO bei gleichzeitiger Anhebung der Anforderungen an die Spaltzugfestigkeit in Verbindung mit der Auswahl spezieller Gesteinslagerstätten scheidet daher für herkömmliche Bauverträge sowieso und im Hinblick auf die aktuelle und auch zukünftig zu erwartende Rohstoffverknappung (siehe Abschnitt 4) generell aus. Vielmehr sollte der umgekehrte Weg beschritten werden, indem sich die Anforderung an die Spaltzugfestigkeit an der Leistungsfähigkeit der regional verfügbaren Gesteinskörnungen orientiert. Eine möglicherweise geringere Spaltzugfestigkeit ist dann über eine größere Deckendicke auszugleichen.

Wir Straßenbau-Fachleute sollten uns zusammen mit den Entscheidern in Straßenbauverwaltung und Politik auch einmal die grundsätzliche Frage stellen, ob im Hinblick auf die eingangs bereits erwähnte möglichst lange Nutzungsdauer der Fahrbahnen (Verfügbarkeit) die derzeitige Praxis einer Dimensionierung auf 30 Jahre noch zeitgemäß ist. Dies betrifft die Beton- und Asphaltbauweise gleichermaßen.

Wir sehen an unserem Bestandsnetz, dass viele Betondecken ihre ursprünglich geplante Nutzungsdauer weit überschritten haben und trotzdem noch immer – wenn auch mit sicherlich vermindertem Fahrkomfort – für den Verkehrsteilnehmer verfügbar sind. Darüber sollten wir froh sein und dies auch offen in der Bevölkerung kommunizieren.
Wenn in den Medien in den vergangenen Jahren immer wieder von Hitzeschäden an Betondecken berichtet wurde, so handelte es sich hierbei – mit Ausnahme von durch eine AKR vorgeschädigten Fahrbahnen – um Betonautobahnen, die teilweise bis zu 40 Jahre alt, in Einzelfällen sogar noch älter waren und Deckendicken von damals üblichen 20 bis 22 cm aufwiesen. Diese Betondecken konnten den massiv gestiegenen Beanspruchungen durch den Schwerverkehr nicht mehr standhalten und hätten bereits deutlich früher im Rahmen der Erhaltungsplanung erneuert werden müssen. Den Betondecken geht es also ähnlich wie unseren Brücken – der Sanierungsstau der letzten Jahrzehnte macht sich nun sehr deutlich bemerkbar.

In diesem Zusammenhang sollten wir auch diskutieren, ob es nicht sinnvoller und am Ende wirtschaftlicher ist, unsere Fahrbahnen von vornherein 1 bis 2 Zentimeter dicker zu bauen, als rechnerisch erforderlich, um entsprechende Tragfähigkeitsreserven für die Zukunft zu haben. Die Mehrkosten dafür sind im Vergleich zu den Vorteilen, hierzu zählt beispielsweise auch eine deutliche Reduzierung des Unterhaltungsaufwandes (geringere Ausfallrate von Platten), zu vernachlässigen, erst recht, wenn man die volkswirtschaftlichen Verluste durch Baustellenstaus in die Rechnung mit einbezieht.

## 3.2 Ausführungsqualität

Die Herstell- bzw. Ausführungsqualität hat selbstverständlich auch einen Einfluss auf die Dauerhaftigkeit bzw. Nutzungsdauer einer Fahrbahn. Dabei führt eine hohe Qualität beim Einbau dazu, dass die geplante Nutzungsdauer der Fahrbahn auch erreicht bzw. sogar übertroffen wird. Im umgekehrten Fall können Ausführungsprobleme in der Anfangsphase zu einem frühzeitigen Mangel bzw. im schlimmsten Fall zum Ausfall der Konstruktion führen. Dies gilt im Übrigen nicht nur für die Betonbauweise, sondern Bauweisen übergreifend. Das nachfolgende Bild 8 zeigt, welche wesentlichen Faktoren die Ausführungsqualität bestimmen können.

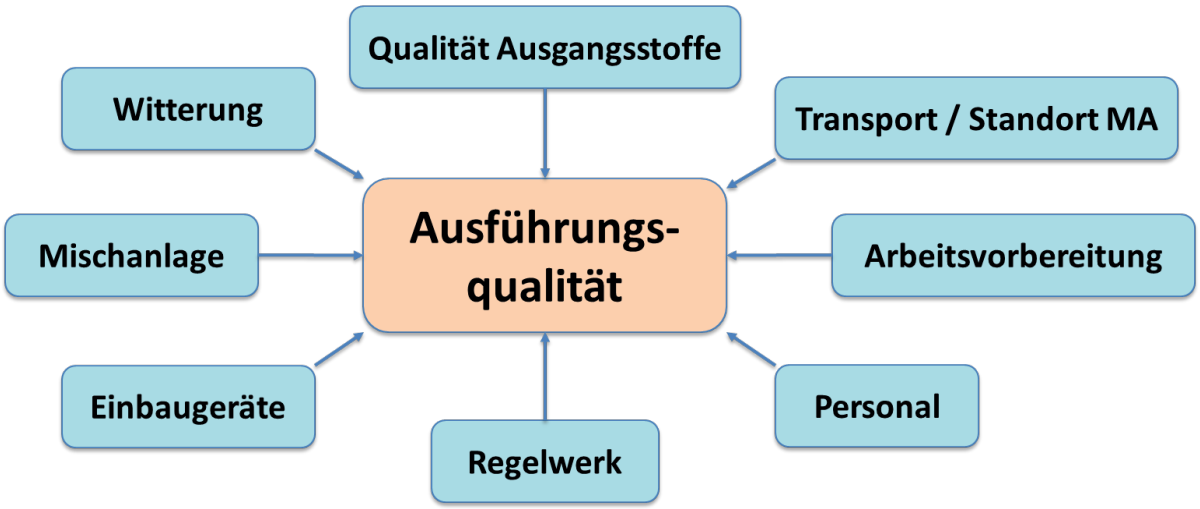



*Bild 8: Wesentliche Einflüsse auf die Ausführungsqualität*

Die Qualität der Ausgangsstoffe ist ein wichtiger Faktor für die Güte des Betons bzw. das Endprodukt Straße. Die nicht einfachen Randbedingungen der Großprojekte, wie beispiels-

weise die Notwendigkeit großer Materialmengen in sehr kurzen Zeiträumen, stellt die Hersteller oft vor größere Herausforderungen. Die Beibehaltung des aktuellen hohen Qualitätsstandards auf der Grundlage unserer Regelwerke für Zement, Gesteinskörnung und Zusatzmittel ist daher oberstes Ziel.

Die Witterung beim Einbau ist nur bedingt kalkulierbar. Die Einbauentscheidung ist oft eine Gratwanderung für den verantwortliche Bauleiter vor Ort. Er muss dabei das Wetterrisiko u. a. abwägen gegen die Einhaltung der Bauzeit, Materialversorgung sowie Personal- und Geräteengpässe. Eine falsch getroffen Entscheidung kann hierbei bereits über den wirtschaftlichen Erfolg oder Misserfolg einer Baustelle entscheiden.

Die Wetterbedingungen der letzten Jahre mit teilweise langanhaltenden, sehr hohen Temperaturen in den Sommermonaten sind eine Erschwernis für den Bau im Allgemeinen und die Betonherstellung im Besonderen. Im Gegensatz dazu werden die Winter kürzer und milder, so dass die Bautätigkeit bereits früher im Jahr beginnen kann. Daher wäre es von großem Vorteil, wenn die Hauptbautätigkeit nicht wie derzeit in der zweiten Jahreshälfte stattfindet, sondern zu großen Teilen auch in das Frühjahr verlegt würde. Dies hätte zum einen den Vorteil von moderateren Einbautemperaturen und andererseits würde es die in der Branche bekannten Schwierigkeiten der zweiten Jahreshälfte mindern. Dies betrifft insbesondere die Engpässe bei Personal, Gerät, Rohstoffen und Transportraum.
Dazu ist aber ein Umdenken bei Ausschreibung und Vergabe nötig, und zudem erfordert dies unter Umständen auch Baustellenverkehrsführungen während der Wintermonate.

Ein möglichst naher Standort der Mischanlage am Einbauort und damit kurze Transportzeiten fördern die Qualität des Betons. In Regionen mit geringer Bebauung gelingt es i. d. R. problemlos, einen großen und verkehrstechnisch günstig gelegenen Mischplatz zu finden. Idealerweise wird die Mischanlage auch gleich im Lieferwerk für die feine oder grobe Gesteinskörnung stationiert.

Leistungsfähige Misch- und Einbaugeräte sind ein wesentlicher Bestandteil des modernen Betonstraßenbaus. Die stetige Weiterentwicklung und Verbesserung der Geräte inkl. ihrer Steuerungen sind dabei selbstverständlich.
Bei den Überlegungen zu den erforderlichen Anforderungen an die Misch- und Dosiergenauigkeit sollte man aber bedenken, dass es sich um Baustellenmischanlagen mit Durchsätzen i. d. R. zwischen 200 und 300 m³ Beton je Stunde handelt und die Baustellenbedingungen nicht mit den Verhältnissen im Labor gleichzusetzen sind.

Zur Sicherstellung einer hohen Ausführungsqualität trägt neben den bereits erwähnten Punkten auch ein gutes Regelwerk bei. Die Forschungsgesellschaft für Straßen und Verkehrswesen (FGSV) stellt in Deutschland für den Verkehrswegebau die ideale Plattform dar. Bei der Arbeit innerhalb der Gremien sollten die mitwirkenden Personen aber immer den Praxisbezug vor Augen haben und sicherstellen, dass die Regelwerke einfach, verständlich und lesbar bleiben. Gleiches gilt für die Prüfungen und Messverfahren. Ein hoher Anteil von Praktikern in den Gremien ist daher unabdingbar. Jedoch zeigt sich auch hier in den letzten Jahren ein eher gegenläufiger Trend. Es fällt zunehmend schwerer, praxisorientierte Mitarbeiter aus Verwaltung und Baufirmen für die Gremienarbeit zu finden, da diese bereits mit ihrem Tagesgeschäft mehr als ausgelastet sind. Aber genau diese Kolleginnen und Kollegen aus der direkten Baustellenpraxis wären für die Fortschreibung der Regelwerke eminent wichtig.

LEAN und BIM – das sind aktuelle Schlagworte in der Baubranche. Dabei lässt sich LEAN sicherlich gut mit Arbeitsvorbereitung übersetzen. Diese ist von jeher Aufgabe der Baustelle bzw. des Bauleiters. Eine gute Arbeitsvorbereitung ist wichtig und Grundvoraussetzung für das Gelingen des Betoneinbaus bzw. der Baustelle. Hierbei besteht sicherlich innerhalb der Firmen noch Optimierungspotential. Wesentlich ist aber, dass die neu hinzukommenden

Kolleginnen und Kollegen behutsam in die Abläufe eingeführt und dabei von erfahrenen Mitarbeitern angeleitet und unterstützt werden. So lassen sich Fehler in der Praxis bereits im Vorfeld vermeiden.

Die Digitalisierung schreitet mit BIM auch in der Bauindustrie voran. Insbesondere wird die Vernetzung von Baustelle, Maschine und Mensch zur Unterstützung und Effizienzsteigerung beitragen.
Über eines sollten wir uns alle aber im Klaren sein, weder LEAN noch BIM werden den Menschen auf der Baustelle ersetzen! Und damit sind wir bereits bei der aktuellen und auch zukünftig größten Herausforderung für die Bauindustrie angekommen – der Verfügbarkeit von Personal.
Dabei gilt es, mehrere Probleme zu meistern. Es fehlt zunächst einmal grundsätzlich an Nachwuchs, der überhaupt bereit ist, in der Baubranche zu arbeiten. Hierbei geht es um Bauleiter, Bauüberwacher, Poliere, gewerbliches Personal, Laboranten u.v.m. Davon betroffen sind Auftraggeber und Auftragnehmer gleichermaßen.

Gute Bezahlung allein ist für die jungen Menschen dabei nicht allein ausschlaggebend. Vielmehr taucht immer wieder der Begriff „Work-Life-Balance“ auf. Die Vereinbarkeit von Beruf, Freizeit und Familie spielt eine tragende Rolle.
Die Aufgabe der Baufirmen muss es daher sein, die Ausbildung und den Job noch attraktiver zu gestalten. In den letzten Jahren hat sich auf diesem Gebiet bereits einiges getan. Die Werbung beginnt schon an den Schulen und Universitäten, es gibt attraktive Trainee-Programme, und auch die Begriffe „Elternzeit“ und „Homeoffice“ sind inzwischen in der Baubranche angekommen. Für Angestellte im Büro lässt sich dies natürlich einfacher umsetzen als für das Personal auf den Baustellen.

Trotz alledem ist in vielen Bauberufen die Auswärtstätigkeit unvermeidlich. Deutliche Arbeitszeitverkürzungen lassen sich in der Branche kaum umsetzen.
Der Trend im Straßenbau ist zudem ein anderer. Die Verfügbarkeit der Straße und die Stauvermeidung haben eine hohe Priorität, was grundsätzlich auch im Interesse aller Beteiligten liegt. Allerdings wird immer häufiger versucht, dies in der Praxis durch kürzer werdende Bauzeiten und Nachtbaustellen umzusetzen.
Die sogenannten 24/7-Baustellen (rund um die Uhr, 7 Tage die Woche) sind medienwirksam, sie führen aber zu einer massiven Bindung von Ressourcen sowie zu einer hohen Belastung des Personals. Sollte sich dieser Trend weiter fortsetzen, so wird das die aktuell angespannte Personalsituation kaum entspannen.

## 4 Herausforderung Rohstoffverfügbarkeit

Unter anderem aufgrund der seit einigen Jahren anhaltenden stabilen Baukonjunktur, die im Fernstraßenbau auch durch die Corona-Pandemie erfreulicherweise kaum beeinträchtigt wurde, kommt es immer wieder zu Materialengpässen, was sich insbesondere in der bauintensiven zweiten Jahreshälfte bemerkbar macht.
Für die Waschbetonbauweise werden beispielsweise hochwertige Splitte mit GK 8 mm, einem PSV-Wert von mindestens 53 und einer Kornform $SI_{15}$ benötigt. Diese Korngruppen werden jedoch auch für andere Bauweisen (z. B. im Asphaltstraßenbau) verwendet, was die grundsätzliche Verfügbarkeit bereits einschränkt.

Weiterhin kommt hinzu, dass zur Erzielung der erforderlichen Festigkeiten Zementgehalte von ca. 420 kg/m³ nötig sind. Mit Einführung des ARS 04/2013 (AKR) [7] sind alle Gesteinskörnungen, die für Betonstraßen verwendet werden, durch eine gutachterliche Stelle zu prüfen und freizugeben. Die bisherigen Erfahrungen mit den hierfür durchzuführenden Performance- bzw. WS-Grundprüfungen zeigen, dass sich die hohen Zementgehalte nachteilig

auf die Dehnungen in den Betonversuchen auswirken können, was wiederum zum Ausschluss von einigen Gesteinskörnungsvorkommen für die Verwendung im Waschbeton geführt hat.

Die derzeit geprüften und für den Betonstraßenbau freigegebenen Lieferwerke sind bei der BASt gelistet [9]. Bild 9 zeigt die Anzahl und Verteilung der Lieferwerke über die Fläche der Bundesrepublik Deutschland. Insgesamt stehen derzeit (Stand Mai 2022) 35 geprüfte Werke zur Verfügung. Erfreulicherweise hat sich somit die Anzahl der für den Betonstraßenbau zugelassenen Werke seit Beginn der Listenführung im Jahr 2013 (damals 12 Werke) fast verdreifacht.
Eine Sonderlösung gilt in Bayern (gelb): Dort kann eine AKR-Prüfung durch die gutachterliche Stelle entfallen, wenn der Gesteinskörnungshersteller positive Langzeiterfahrungen mit seinem Material im Betonstraßenbau nachweisen kann. Für den Einsatz der jeweiligen Gesteinskörnung im Waschbeton ist jedoch zusätzlich zwingend ein NA-Zement (Zement mit niedrigem wirksamen Alkaligehalt) zu verwenden.

Nimmt man das Bundesland Bayern mit der dort vorliegenden Sonderlösung einmal aus, werden die weiterhin bestehenden Problembereiche (rot) schnell deutlich. In Norddeutschland fehlen geologisch bedingt die groben Gesteinskörnungen, in Ostdeutschland ist die Verwendbarkeit der Lagerstätten aus AKR-Gründen eingeschränkt und in Baden-Württemberg sind zwar Kiese für den Unterbeton verfügbar, jedoch fehlt es an Festgesteinslagerstätten für den Einsatz im Oberbeton. Die weiteren Bundesländer verfügen glücklicherweise über eine noch ausreichende Anzahl von geprüften und geeigneten Festgesteinslagerstätten.

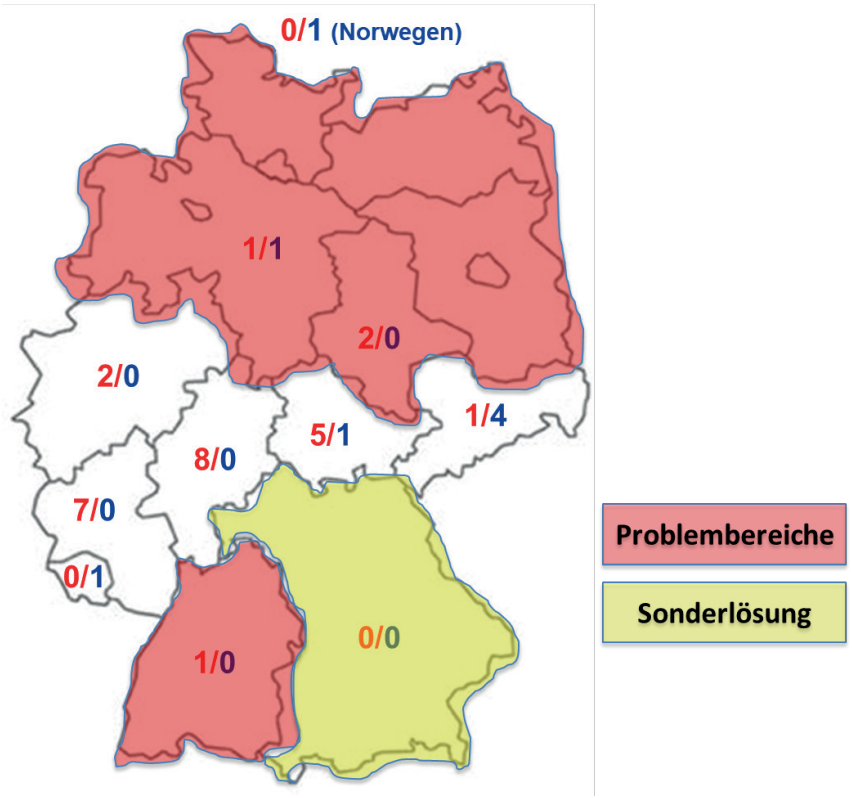



*Bild 9: Anzahl und Verteilung der für den Betonstraßenbau in Deutschland zugelassenen Lieferwerke gemäß BASt-Listen mit Stand Mai 2022 (rote Zahl = WS-Grundprüfung, blaue Zahl = Performance-Prüfung)*

Welche Lösungsmöglichkeiten sind denkbar?
Die aktuellen TL Beton-StB [4] fordern für zweischichtige Decken im Ober- und Unterbeton die Verwendung von Zementen gleicher Art und Festigkeitsklasse. Somit kommen bisher – mit Ausnahme von wenigen Erprobungsstrecken – nur CEM I – Zemente zum Einsatz, mit denen zweifelsohne im Betonstraßenbau in Deutschland auch sehr gute Erfahrungen vorliegen.
Wie bereits beschrieben, müssen derzeit noch viele Gesteinslagerstätten aufgrund nicht bestandener WS-Grund- bzw. Performanceprüfungen in Verbindung mit CEM I-Zementen von der Verwendung im Betonstraßenbau ausgeschlossen werden. Untersuchungen haben jedoch gezeigt, dass eine nicht unerhebliche Anzahl von Kies- und Splittwerken in Kombination mit einem CEM II - oder CEM III - Zement eingesetzt werden könnte.

Da jedoch bei der Verwendung von hüttensandhaltigen Zementen im Oberbeton, u. a. aus Gründen des Frost-Tausalzwiderstandes, eine gewisse Zurückhaltung vorherrscht, wurde in den Fachgremien der AG 8 der FGSV angeregt, diese Zemente bis zum Vorliegen weitere Forschungsergebnisse nur im Unterbeton zu verwenden und im Oberbeton weiterhin die bewährten CEM I - Zemente einzusetzen.

Das BMDV hat daher kürzlich über ein Allgemeines Rundschreiben (ARS 04/2022) [5] die Zementanwendung für den Unterbeton erweitert und vereinfacht, so dass mit der Auswahl der Zemente zukünftig auch die Palette der verwendbaren Gesteinskörnungen für den Unterbeton größer wird.
Mit dem Einsatz alternativer Zemente im Unterbeton liegt ein weiterer Vorteil auf der Hand. Diese Zemente haben in ihrer Herstellung eine deutlich bessere $CO_2$-Bilanz, womit sich die eingangs erwähnte Nachhaltigkeit der Betonbauweise insgesamt verbessert.

Eine weitere Option, die Verfügbarkeit von Gesteinskörnungen zu erhöhen, wäre eine deutliche Reduzierung des Zementgehaltes von derzeit 420 kg/m³ im Waschbeton. Dies ist aber betontechnologisch nur möglich bei gleichzeitiger Erhöhung des Größtkorns, was wiederum aus lärmtechnischer Sicht für Waschbeton nicht möglich ist.
An dieser Stelle soll daher nochmals auf die im Abschnitt 2 bereits erläuterten Vorteile der Grindingoberfläche mit einem Größtkorn von bis zu 22 mm und dem im Vergleich zu Waschbeton reduzierten Zementgehalt von ca. 350 kg/m³ verwiesen werden.

## 5 Fazit

Die aktuellen und zukünftigen technischen Herausforderungen bestehen in der Entwicklung von dauerhaft griffigen, leisen und ebenen Oberflächentexturen, die – falls im Laufe der Nutzung erforderlich – ohne nennenswerten Aufwand auch mehrfach neu in den Beton eingebracht werden können. Die Grindingtextur ist eine solche Oberfläche, und sie sollte daher auch schnellstmöglich in das geltende Regelwerk überführt sowie in den Richtlinien für den Lärmschutz an Straßen (RLS) lärmtechnisch eingestuft werden.

Eine weitere Herausforderung – dies gilt im Übrigen für alle Bauweisen – besteht in der Erhöhung der Nutzungsdauer einer Straße bei gleichzeitiger Reduzierung des Unterhaltungsaufwand sowie damit verbunden der Vermeidung von Baustellen und Staus.
Dafür ist es erforderlich, zusätzliche Tragfähigkeitsreserven für unsere Straßen zu schaffen. Bei der Betonbauweise wäre dies problemlos durch die Erhöhung der Deckendicke im Unterbeton um wenige Zentimeter möglich.

Die Verfügbarkeit von Rohstoffen ist bereits heute ein wesentliches Thema und wird zu einer zunehmenden Herausforderung. Wir müssen mit den regional verfügbaren Rohstoffen auskommen und dürfen dabei nicht die wertvollen Deckenbeton-Gesteine für untergeordnete

Anwendungen verschwenden. Ziel muss es sein, hierfür weitestgehend die beim Rückbau anfallenden RC-Materialien einzusetzen.
Die Betontechnologie sowie die Wahl des Aufbaus (Tragschichten) werden sich zukünftig zwangsläufig auch an der Verfügbarkeit der Rohstoffe orientieren müssen.

Die Betonstraßen, die wir heute in Deutschland mit unserer modernen Maschinen- und Gerätetechnik sowie den hochwertigen Rohstoffen herstellen, befinden sich qualitativ auf einem sehr hohen Niveau. Oftmals wird bei der Überarbeitung von Regelwerken im Zusammenhang mit dem Begriff Qualitätssteigerung auch die Verschärfung von Anforderungen diskutiert. Dies ist jedoch der falsche Ansatz.
Um eine weitere, nachhaltige Qualitätssteigerung zu erzielen, müssen auch die dafür erforderlichen Randbedingungen gegeben sein. Die im Text mehrfach erwähnten derzeitigen Voraussetzungen wie z. B. saisonale Rohstoffknappheit, Personalmangel, Nacht- und Wochenendarbeit usw. sind dabei oftmals gegenläufig zu den angestrebten Zielen.

Der größte Hebel zur Steuerung der Qualität sind nicht die Geräte, Regelwerke und Anforderungen, sondern gut ausgebildete, hoch motivierte und von Ihrer Arbeit leidenschaftlich überzeugte Baufacharbeiter, Techniker und Ingenieure. Das oberste Ziel und zugleich die größte Herausforderung für die Baubranche besteht aktuell und auch zukünftig darin, dieses Personal verfügbar zu haben.
Und genau an dieser Stelle müssen auch Politik und Medien unterstützend wirken. Nur wenn es gelingt, den Ruf der Branche nachhaltig aufzuwerten, werden sich wieder mehr junge Menschen für diesen interessanten Berufszweig entscheiden.
Dazu gehört einerseits mehr positive Berichterstattung über erfolgreich abgewickelte Bauprojekte, und andererseits muss die Politik der Bevölkerung vermitteln, welche Werte durch diese Branche geschaffen werden und wie bedeutend eine funktionierende Infrastruktur für Mobilität, Warenverkehr und Wirtschaft in unserem Land ist.

# 6 Literaturverzeichnis

[1] Forschungsgesellschaft für Straßen- und Verkehrswesen (2012): Richtlinien für die Standardisierung des Oberbaus von Verkehrsflächen, Ausgabe 2012 (RStO 12), Köln, FGSV 499

[2] Forschungsgesellschaft für Straßen- und Verkehrswesen (2010): Richtlinien für die rechnerische Dimensionierung von Betondecken im Oberbau von Verkehrsflächen, Ausgabe 2009 (RDO Beton 09), Köln, FGSV 497

[3] Forschungsgesellschaft für Straßen- und Verkehrswesen (2007): Zusätzliche technische Vertragsbedingungen und Richtlinien für den Bau von Tragschichten mit hydraulischen Bindemitteln und Fahrbahndecken aus Beton, Ausgabe 2007 (ZTV Beton-StB 07), mit Änderungen März 2013, Köln, FGSV 899

[4] Forschungsgesellschaft für Straßen- und Verkehrswesen (2007): Technische Lieferbedingungen für Baustoffe und Baustoffgemische für Tragschichten mit hydraulischen Bindemitteln und Fahrbahndecken aus Beton, Ausgabe 2007 (TL Beton-StB 07), mit Änderungen März 2016, Köln, FGSV 891

[5] Bundesministerium für Digitales und Verkehr BMDV (2022): Allgemeines Rundschreiben Straßenbau Nr. 04/2022

[6] Forschungsgesellschaft für Straßen- und Verkehrswesen (2019): Richtlinien für den Lärmschutz an Straßen RLS-19, Ausgabe 2019, Köln, FGSV 052

[7] Bundesministerium für Verkehr, Bau und Stadtentwicklung BMVBS (2013): Allgemeines Rundschreiben Straßenbau Nr. 04/2013

[8] Bundesministerium für Verkehr, Bau und Stadtentwicklung BMVBS (2006): Allgemeines Rundschreiben Straßenbau Nr. 05/2006

[9] Homepage der Bundesanstalt für Straßenwesen (BASt), https://www.bast.de/BASt_2017/DE/Strassenbau/Qualitaetsbewertung/Listen/listen_node.html

# Betonové vozovky – udržitelné řešení určené pro místní silniční komunikace v Polsku

*Jan Deja*
*Polské sdružení výrobců cementu*
*Vědecká a technická univerzita AGH, Krakov, Polsko*

*Piotr Kijowski*
*Polské sdružení výrobců cementu*

*Piotr Piestrzyński*
*Polské sdružení výrobců cementu*

*Tel .: +48 12 / 423 33 55*
*Mail: biuro@polskicement.pl*

## Souhrnný úvod

V posttransformačním období byl v Polsku vybudován první dálniční úsek s cementobetonovým krytem již v roce 1995. Od té doby uplynulo 27 roků a do konce roku 2021 bylo touto technologií dokončeno 962,3 km rychlostních silnic a dálnic. Celková délka sítě rychlostních silnic a dálnic v Polsku činí v současnosti 4624,9 km, přičemž podíl silnic a dálnic s cementobetonovým krytem dosahuje 20,8 %.
Jen v roce 2021 uvedla organizace GDDKiA (Generální ředitelství státních silnic a dálnic) do provozu 181,8 km úseků s betonovou vozovkou. Tyto úseky jsou součástmi dálnice A1 a rychlostních silnic S2, S7 a S61. V roce 2022 je plánováno otevření dalších úseků s cementobetonovým krytem v celkové délce 149,9 km: 46,1 km na dálnicích A1 a A18 a 103,8 km na rychlostních silnicích: S7 – 49,1 km a S61 – 54,7 km.
Pokládka cementobetonových krytů se však neprovádí pouze na rychlostních silnicích a dálnicích. Polsko zaujímá postavení vedoucí země i v oblasti výstavby místních komunikací touto technologií. Z výsledků průzkumů zadaných Polským sdružením výrobců cementu a provedených s využitím údajů, které byly poskytnuty místními správními orgány přitom vyplývá, že v posledních letech bylo vybudováno přibližně 150 km těchto komunikací, jejichž celková délka tak dosahuje 1500 km.

## Komunikace budované pro celé generace, nikoli pouze roky

Na začátku jsme se učili používat tuto technologii pro místní komunikace od našich belgických kolegů. Obdivovali jsme jejich dovednost při předvádění výhod betonových vozovek regionálním investorům.
Výsledkem systematického a soustavného úsilí, které bylo spojeno s předáváním informací místním správním orgánům a s propagací technologie výstavby, pak byla realizace mnoha investičních projektů výstavby a rekonstrukce místních komunikací.
Současně již většina místních správních orgánů pohlíží na cementobetonové kryty jako na dlouhodobé řešení, které může obyvatelům příslušných oblastí sloužit po několik desetiletí, aniž by vyžadovalo neustálé opravy nebo modernizace. Díky skutečnosti, že na betonových vozovkách nevznikají vyjeté koleje a že životnost těchto vozovek je 2,5 až 3,5krát delší než asfaltových vozovek lze očekávat, že tyto vozovky bude možno používat nikoli po dobu několika roků, nýbrž po dobu odpovídající několika generacím. Betonové vozovky tedy nejsou na místní úrovni budovány s výhledem 5 let, nýbrž alespoň 50 let.



*Obrázek 1. Cementobetonový kryt položený na okresní silnici č. 1305 W v lokalitě Wilga, s předpokládanou provozní životností 62 let*

## Stavíme pro budoucnost na základě získaných zkušeností

V 80. letech minulého století byl v Polsku spuštěn program výstavby betonových vozovek. Z Belgie byl dovezen moderní silniční finišer, jehož pomocí bylo vybudováno více než deset úseků komunikací s cementobetonovým krytem o celkové délce 50 km. Všechny tyto silniční úseky se nacházejí ve východní části Polska, v blízkosti měst Hrubieszów a Zamość. Tyto vozovky se stále používají, což obecně potvrzuje jejich odolnost a trvanlivost.



*Obrázek 2. Pohled na místní silnici s cementobetonovým krytem v blízkosti města Hrubieszów*

Polské sdružení výrobců cementu (SPC) přijalo rozhodnutí, podle kterého je výstavba komunikací jednou z hlavních oblastí, které jsou podporovány dodávkami cementu a betonu. Již od prvního ročníku mezinárodního veletrhu silničního stavitelství Autostrada-Polska, který byl pořádán v městě Kielce v roce 1994, se sdružení aktivně podílí na organizaci této akce určené pro obor silničního stavitelství, a to zejména prezentací výhod betonových vozovek.




*Obrázek 3. Stánek SPC během veletrhu Road Fair v roce 2022.*

V roce 1999 byla zorganizována první celostátní konference „Místní komunikace“. Této konference se zúčastnilo téměř 200 zástupců vyslaných místními správními orgány z celého Polska. Účastníci měli příležitost seznámit se s četnými výhodami betonových vozovek. Získali také informace o evropských zkušenostech s výstavbou místních komunikací s cementobetonovým krytem. Představeny byly zkušenosti shromážděné v Belgii, Německu, Rakousku a Velké Británii.
V následujících letech pak Polské sdružení výrobců cementu důsledně šířilo znalosti o betonových vozovkách, a to zejména organizováním seminářů a vydáváním odborných publikací. V této souvislosti byla například vydána brožura „Cementobetonové kryty na obecních komunikacích“ a rovněž byl natočen instruktážní film „Jak postavit dobrou silnici“.
Ukázka výstavby komunikace s cementobetonovým krytem pak byla připravena pro návštěvníky veletrhu Autostrada-Polska pořádaného v roce 2005.




*Obrázek 4. Konference „Místní komunikace“, Krakov, 1999*




*Obrázek 5. Titulní strana příručky „Cementobetonové kryty na obecních komunikacích“*

Mnoho roků působnosti Polského sdružení výrobců cementu a pravidelné účasti jeho zástupců na konferencích souvisejících se silničním stavitelstvím, která umožnila představování různých výhod betonových vozovek, jakými jsou například dlouhá životnost, povrchy bez vyjetých kolejí, vyšší úroveň bezpečnosti, nižší provozní náklady, dostupnost surovin z domácích zdrojů a možnost recyklace, je přesvědčivým dokladem toho, že betonové vozovky jsou dobrou alternativou k asfaltovým a mohou být úspěšně aplikovány i na úrovni místní správy silničních komunikací a dalších místních správních orgánů.

## Výroba z přírodních složek, které jsou šetrné k životnímu prostředí

V případě betonové vozovky začíná péče o klima již v době zahájení výstavby. Beton, z něhož je kryt vozovky vytvářen, sestává z přírodních složek, které jsou šetrné k životnímu prostředí: cementu, kameniva a vody, k nimž se přidávají chemické přísady, které zlepšují vlastnosti betonu. Hlavní složky betonu jsou přitom dostupné z místních zdrojů a nemusí tedy být dováženy. Cementárny, které používají vápenec jako hlavní surovinu, se nacházejí v 8 vojvodstvích, především v jižní části Polska. Kromě toho jsou v Polsku k dispozici vydatné zdroje kameniva.
Cementobetonové kryty plní také funkci specifické čističky vzduchu. Pro výstavbu silnic, cyklostezek nebo stezek pro chodce lze připravovat beton s přísadou oxidu titaničitého. Fotokatalytická reakce, která na takovém betonovém povrchu probíhá, účinně snižuje množství oxidu dusíku (NOx), čímž příznivě ovlivňuje čistotu vzduchu.



*Obrázek 6. Chodník u kruhového objezdu Daszyński ve Varšavě, položený za použití cementu obsahujícího oxid titaničitý.*

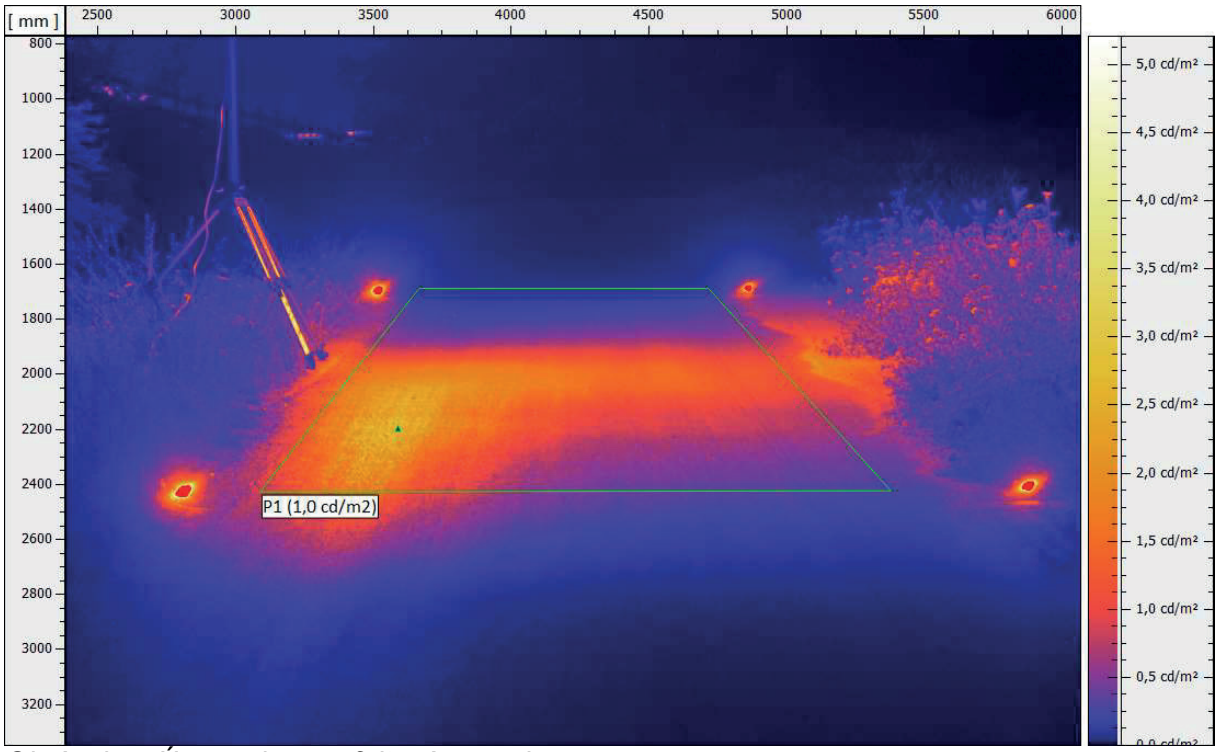
## Menší objem silničních prací

Péče o životní prostředí znamená také zajištění delší životnosti betonových vozovek, která odhadem dosahuje alespoň 50 let. Při takto dlouhé životnosti bude betonová vozovka potřebovat méně oprav a rekonstrukcí. Co je spojeno s rekonstrukcí komunikací? Tato činnost je obecně spojena s vysokými společenskými i ekologickými náklady. Zahrnuje spotřebovávání stále většího množství stavebních materiálů, vlastní rekonstrukční činnosti prováděné stavebními podniky, které nepříznivě ovlivňují životní prostředí, objížďky znesnadňující cestování řidičům, pomalejší provoz a vznik dopravních zácp, které jsou spojeny se zvýšenou spotřebou paliva. Mnohdy také způsobuje poškození nebo dokonce zničení silnic nižších kategorií, které jsou využívány jako naplánované objízdné trasy. Jak navíc zřetelně vyplývá z rekonstrukcí silničních komunikací v Polsku, zejména pak dálnic, znamenají silniční práce a s nimi související komplikace také větší výskyt dopravních nehod, včetně nehod se smrtelnými následky.

## Světlá barva znamená vyšší bezpečnost a úspornější provoz

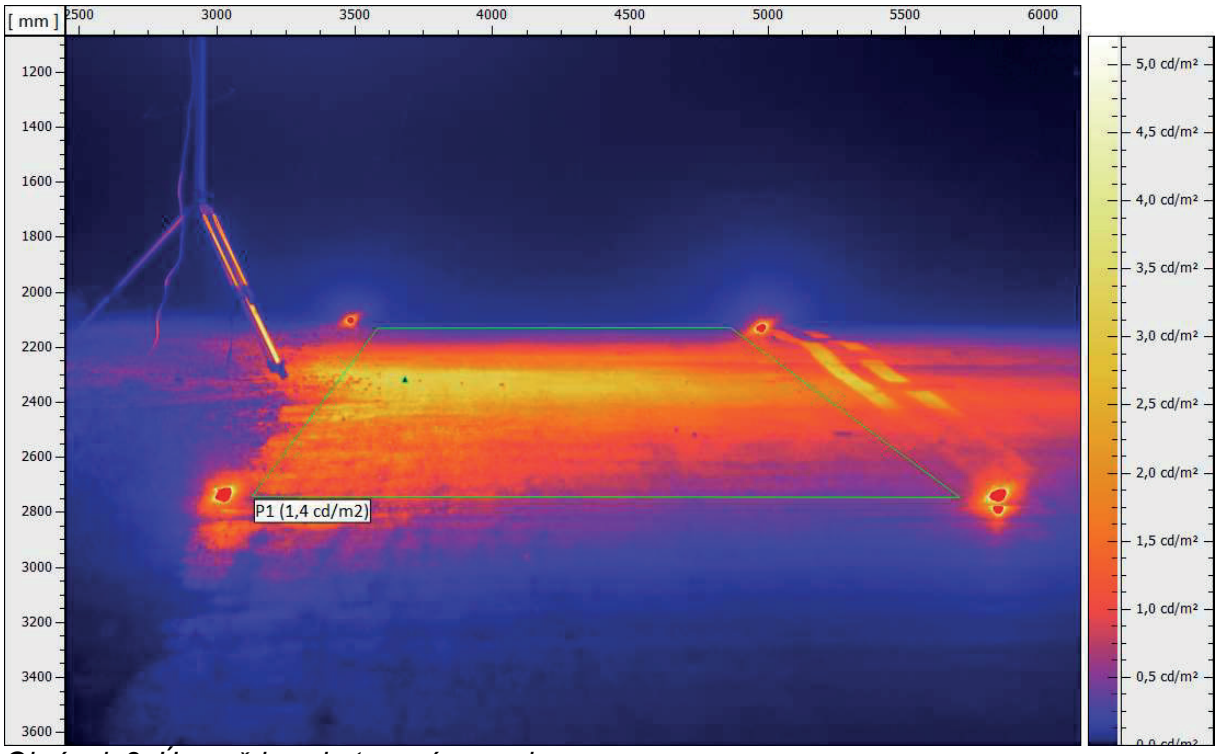
Světlá barva cementobetonových krytů poskytuje lepší viditelnost za soumraku a snižuje spotřebu elektrické energie potřebné k osvětlování těchto vozovek. Při jízdě v noci lze snáze zpozorovat světla jiných vozidel, chodce, cyklisty a silniční překážky proti světlému pozadí cementobetonového krytu, což přispívá ke zvýšení bezpečnosti provozu.
Ve Švýcarsku a USA byl proveden srovnávací výzkum, který se týkal osvětlení cementobetonových a asfaltových krytů. Poznatky, které byly při tomto výzkumu získány,

přesvědčivě dokládají, že díky světlé barvě umožňují cementobetonové kryty snížit náklady na osvětlení. Podle výzkumu, který proběhl ve Švýcarsku, jsou náklady na osvětlení cementobetonových krytů o 43 % nižší než odpovídající náklady na osvětlení asfaltových krytů. Výzkum, který byl prováděn americkým sdružením Portland Cement Association, dospěl k podobným závěrům. Z výsledků uvedených výzkumů vyplývá, že při zajištění správného osvětlení úseku cementobetonového krytu o délce 1 km lze snížit počet světel z 22 na 14.
Také v Polsku byl proveden srovnávací výzkum osvětlení cementobetonových a asfaltových krytů, který spočíval v měření úrovně jasu na obou typech krytů.



*Obrázek 7. Úroveň jasu asfaltové vozovky*

Zkoušky úrovně jasu betonových a asfaltových vozovek byly provedeny za použití stejné metody a se stejnou pečlivostí. Srovnávací měření, která byla provedena za použití dvou postupů, umožnila prokázání skutečnosti, že střední úroveň jasu zkušebního pole je na cementobetonovém krytu o více než 35 % vyšší než na asfaltové vozovce (1,365 cd/m$^2$ vůči 1,006 cd/m$^2$). Dále je vhodné zmínit tu skutečnost, že osvětlení úseků s cementobetonovým krytem je rovnoměrnější, což je příznivé pro řidiče i chodce, zejména pak za soumraku při použití umělého osvětlení.




*Obrázek 8. Úroveň jasu betonové vozovky*

Výsledky zkoušek přesvědčivě dokládají, že použití cementobetonových krytů zajistí možnost podstatného snížení počtu světel, a tedy i množství energie spotřebovávané v souvislosti s osvětlením, což samozřejmě vede k odpovídajícímu snížení nákladů.

## Beton vhodný pro chráněná území

Zápach. Cítili jste vůbec někdy zápach betonu za horkého dne? Zaznamenali jste jakýkoli nepříjemný zápach? Ne. Totéž však nemůžete prohlásit o asfaltu, který při teplotách nad 30 °C vydává nepříjemný zápach, jehož zdrojem jsou obsažené uhlovodíky.
Neexistence zápachu, světlá barva a přírodní suroviny určitě přispěly také k tomu, že cementobetonové kryty jsou upřednostňovány při výstavbě cyklostezek a cest v chráněných oblastech, včetně zpevněných lesních cest.
V roce 2021 byla dokončena výstavba betonové vozovky v blízkosti Błędowské pouště. Tato oblast je pod zvláštní ochranou evropských zákonů. Místní správní orgány zvolily použití betonu, k tomuto rozhodnutí je přivedly ekologické vlastnosti betonových vozovek.



*Obrázek 9. Cementobetonový kryt příjezdové cesty do oblasti Błędowské pouště.*

Z hlediska ochrany životního prostředí mají betonové vozovky další výhodu, která spočívá v jejich příznivém vlivu na omezování množství výfukových plynů. Vysoká tuhost, která snižuje valivý odpor, totiž umožňuje jízdu s nižší spotřebou paliva. Betonové vozovky tak umožňují snižování spotřeby paliva i o několik procent, což při celkového rozsahu silniční dopravy může přinášet nejen značné finanční úspory, nýbrž také významně snížené úrovně emisí $CO_2$.

## „Posmrtný život“ betonu

Recyklace je fáze, která následuje po dosažení definitivního konce životnosti cementobetonového krytu. Recyklovaný materiál lze využít při další výrobě betonu. Tím je umožněno, že cementobetonový kryt, který dosáhl konce své životnosti, poslouží jako materiál pro výstavbu jiné komunikace. Toto je tedy „posmrtný život“ betonu, který je jedním z požadavků, k nimž se v moderním světě, který bojuje s klimatickými změnami, přihlíží při přijímání zodpovědných rozhodnutí.

## Místní správní orgány investují do nové technologie

Většina místních silničních komunikací byla vybudována místními malými podniky působícími v oboru silničního stavitelství. Místní správní orgány však také samy investovaly do stavebních strojů a zařízení a zahájily výstavbu betonových vozovek, jako je tomu například v případě obce Brańsk, která se nachází v severovýchodní části Polska. Tato obec zakoupila vlastní betonárnu, domíchávač betonu, vibrační trámy, pily pro řezání betonu a další pomocné technické vybavení. Během dvou let zde bylo vybudováno 5 km betonových vozovek a v současnosti pokračuje realizace dalších projektů využívajících tuto technologii. K zakoupení vybavení pro výstavbu betonových vozovek se na základě zkušeností obce Brańsk připravuje také obec Bełchatów, která se nachází ve středním Polsku.



*Obrázek 10. Domíchávač betonu a betonárna, které byly zakoupeny obcí Brańsk.*



*Obrázek 11. Betonová vozovka v obci Brańsk*

## Závěr

Výhody cementobetonových krytů, které jsou prezentovány v tomto příspěvku a které byly u příležitosti četných konferencí a setkání předloženy také místním orgánům, jsou měřitelné. Více než 25 roků působnosti Polského sdružení výrobců cementu je doba, která je dostatečně dlouhá k tomu, aby umožňovala odpovědět na otázku – vyplatilo se to? Výsledky těchto činností nejsou až tak zřetelně viditelné v každodenním životě. Při pohledu na statistické údaje by však odpověď měla určitě znít ANO. V Polsku bylo vybudováno téměř 1000 km cementobetonových krytů v rámci hlavních celostátních silničních tahů. Místní správní orgány jsou stále ochotnější k hledání dlouhodobých technických řešení v oblasti výstavby místních silničních komunikací, přičemž právě cementobetonové kryty jsou jimi považovány za přijatelné řešení. Bylo vybudováno asi 1500 km místních betonových vozovek a další projekty jsou ve fázi plánování.
V této souvislosti je vhodné zdůraznit, že betonové vozovky jsou díky svým četným výhodám a důsledné propagaci v Polsku stále rozšířenější.

# Concrete pavement – a sustainable solution for local roads in Poland

*Jan Deja*
*The Polish Cement Association*
*AGH University of Science and Technology, Kraków, Poland*

*Piotr Kijowski*
*The Polish Cement Association*

*Piotr Piestrzyński*
*The Polish Cement Association*

*Tel .: +48 12 / 423 33 55*
*Mail: biuro@polskicement.pl*

## Summary

In post-transformation Poland, the first section of motorway with concrete pavement was built in 1995. 27 years have since passed, and by the end of 2021 there were already 962.3 km of express roads and motorways with concrete pavements. The whole length of the express road and motorway network in Poland is 4624.9 km, and roads with concrete pavements account for 20.8% of this figure.
Only in 2021, the GDDKiA (General Directorate for National Roads and Motorways) commissioned 181.8 km of concrete roads with on motorway A1 and express roads S2, S7 and S61. It is planned to open further 149.9 km of concrete roads in 2022: 46.1 km on motorways A1 and A18, and 103.8 km on express roads: S7 – 49.1 km and S61 – 54.7 km.
But it is not only express roads and motorways that are concrete-paved. Poland is a leading country in constructing concrete pavements on local roads. Based on surveys of local authorities commissioned by the Polish Cement Association, in recent years approximately 150 km of these roads have been built, and there length has totalled 1500 km.

## Roads built for generations, not years

At the beginning, we learned to use this technique on local roads from our Belgian colleagues. We admired their skill in showcasing the advantages of concrete local roads to local investors. Systematic and consistent activities related to information and promotion, addressed to local authorities, have led to many investment projects on local roads.
Now, most local authorities perceive concrete pavements as a long-lasting solution that can serve residents for a few decades without the constant need to repair or refurbish them. Because of no rutting and the fact that concrete roads' lifespan is 2.5 to 3.5 times longer than asphalt roads, they can be used not for a few years, but for a few generations. Concrete roads are not built for one local authorities term of 5 years, but at least 50 years.



*Figure 1. Concrete pavement on district road no. 1305 W in Wilga, service life 62 years*

## We build the future on experience

In the 1980s, a programme for construction of concrete roads was launched in Poland. A modern spreader was imported from Belgium and a dozen or so sections of concrete-paved roads with a total length of 50 km were built. All roads were made in the eastern part of Poland, near Hrubieszów and Zamość. These pavements are still in use, confirming the durability of concrete roads.



*Figure 2. View of a local concrete-paved road near Hrubieszów*

The Polish Cement Association (SPC) has made a decision that road construction will be one of the main areas of promotion for cement and concrete. Starting from the first issue of the International Road Fair Autostrada-Polska, which was held in Kielce in 1994, the Association has actively participated in this road industry event, presenting the advantages of concrete pavements.




*Figure 3. The SPC stand during the Road Fair in 2022.*

In 1999, the first nationwide conference “Local Roads” was organised. Almost 200 people from local authorities from all over Poland attended this conference. The participants had an opportunity to learn about the numerous advantages of concrete pavements. They also obtained information on European experience of constructing local concrete-paved roads. The experience from Belgium, Germany, Austria and the UK was put forward.
In subsequent years, the Polish Cement Association has consistently disseminated knowledge of concrete roads by organising seminars, and publishing. An information brochure “Concrete Pavements on Municipal Roads” was issued, a film “How to build a good road” was also made. Demonstration of the construction of a concrete-paved road was organised and showed during the Autostrada-Polska Fair in 2005.




*Figure 4. Conference “Local Roads”, Kraków, 1999*




*Figure 5. The cover of Guide "Concrete Pavements on Municipal Roads"*

Many years of activity and regular attendance by the Polish Cement Association at road-related conferences, and presenting the various advantages of concrete pavements such as: long life, no rutting, better safety, lower operating costs, availability of domestic raw materials, possibility of recycling, have confirmed that concrete roads are a good alternative to asphalt and can successfully be applied by road administration and local authorities.

## Made of natural, environmentally friendly components

In the case of a concrete road, caring for the climate starts at the time of its construction. The concrete mix, which is incorporated into the road pavement, is made of natural, environmentally friendly components: cement, aggregate and water, as well as chemical admixtures to improve the concrete's properties. The main components of the concrete mix are available locally, they do not need to be imported. Cement plants, using limestone as a raw material, are located in 8 voivodships, primarily in the southern part of Poland. In addition, aggregates are abundant in Poland.

Concrete pavements also perform the function of being a specific air purifier. A concrete mix with added titanium dioxide can be prepared for construction of a road or bicycle and foot path. A photocatalytic reaction occurring at the concrete surface effectively reduces the amount of nitrogen oxides (NOx) and favourably impacts air cleanliness.



*Figure 6. Walkway at Daszyński Roundabout in Warsaw, made of cement containing titanium dioxide.*

## Less roadworks

Taking care of the climate also means ensuring the longer life of concrete roads, estimated for at least 50 years. With such a long life, a concrete road will need less refurbishments. What does road refurbishment involve? Generally, it involves high social and environmental costs. It involves consuming more and more construction materials, activities of refurbishment contractors affecting the environment, diversions for drivers, slower driving and traffic jams that generate higher fuel consumption. Many times, it also involves destruction of lower category roads, on which diversions are planned. As shown by the examples of road refurbishments in Poland, e.g. on motorways, roadworks and related difficulties also mean more traffic accidents, including fatal ones.

## Light colour means safety and savings

The light colour of concrete pavements means better visibility at dusk and a reduction of electricity consumption for its illumination. Driving at night, and using car lights, it is easier to notice pedestrians, cyclists and road obstructions on the light background of the concrete pavement, which improves traffic safety.
Comparative research on lighting of concrete and asphalt pavements has been carried out by the Swiss and Americans. The research findings have shown that due to the light colour, concrete pavements enable lighting costs to be reduced. According to the Swiss research, the cost of concrete pavement illumination is 43% less than that of asphalt pavement illumination costs. American research, carried out by the Portland Cement Association, gave similar

conclusions. It follows that the number of lights can be reduced from 22 to 14, for the correct illumination of 1 km of concrete road.
Also in Poland, comparative research of concrete and asphalt pavement illumination has been carried out, by measuring luminance on both types of road pavements.

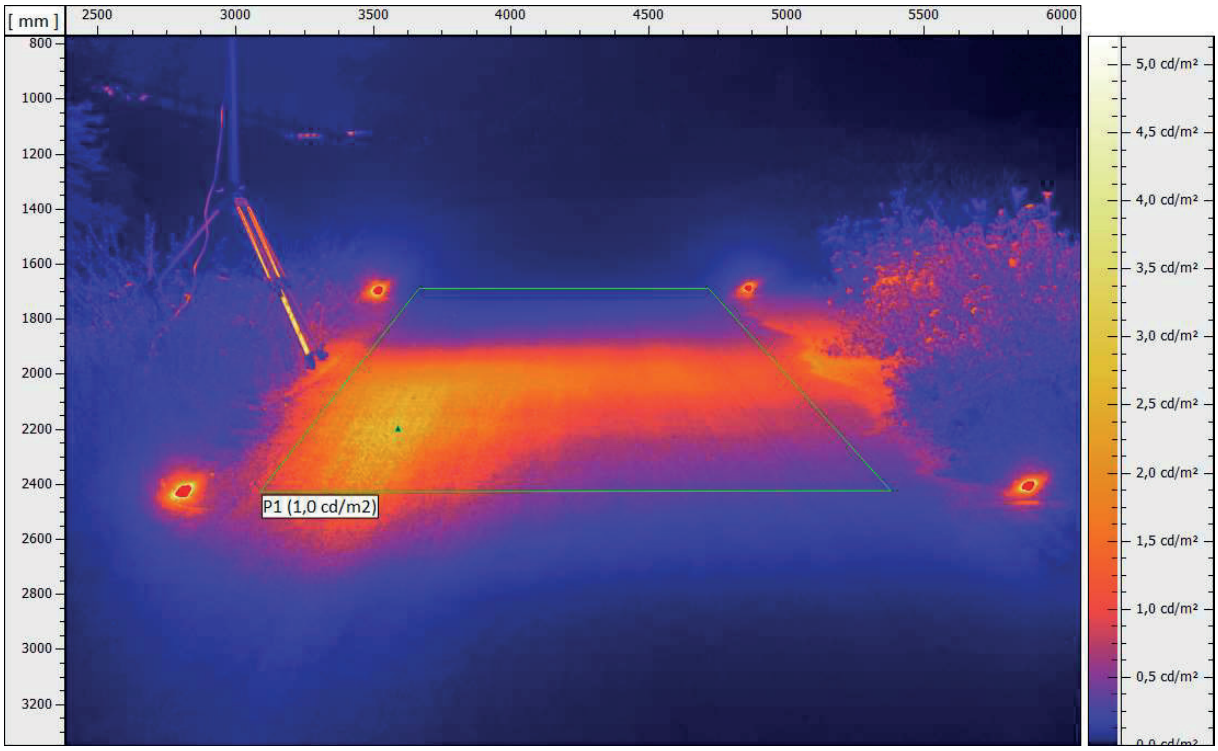


*Figure 7. Luminance of an asphalt road*

Tests of illumination of concrete and asphalt roads have been made using the same method and with due diligence. Comparative measurements of roads made with two techniques have shown that the mean luminance of the test field for the concrete pavement is higher by over 35%, compared to the asphalt road (1.365 cd/m$^2$ in relation to 1.006 cd/m$^2$). It is worth noting that the concrete section illumination is more uniform, which is good for drivers and pedestrians, in particular at dusk when artificial lighting is used.

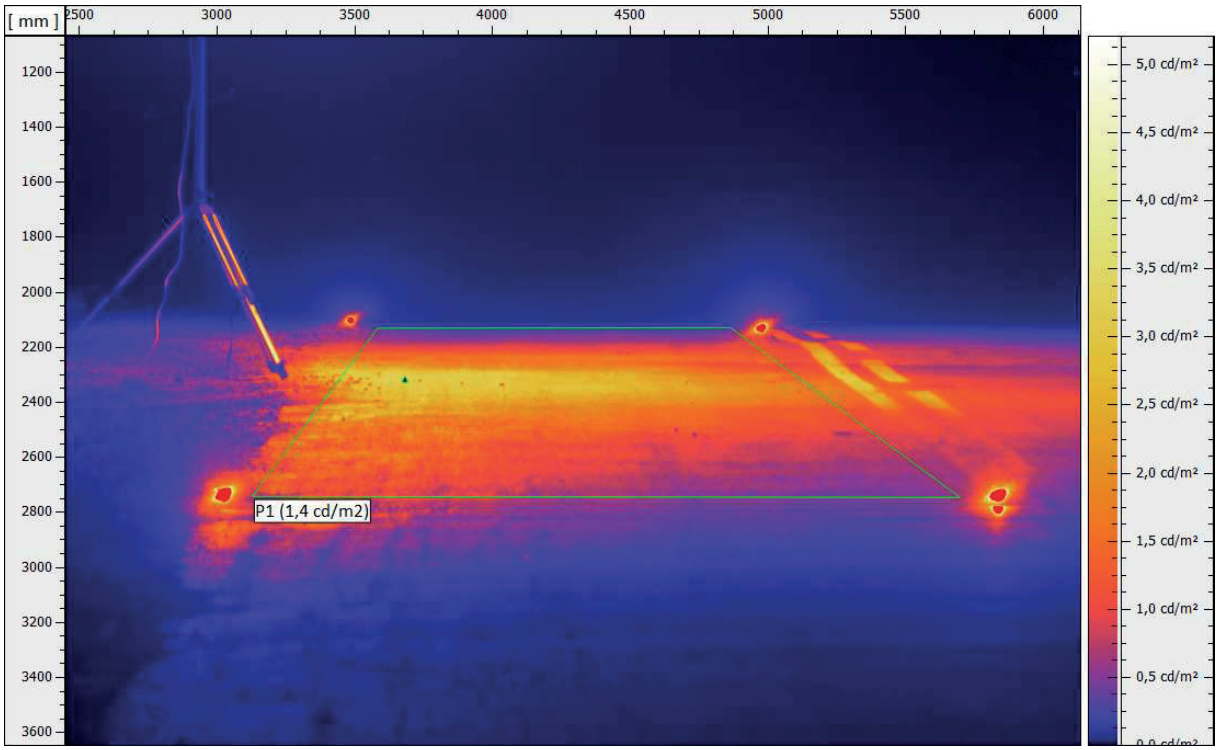



*Figure 8. Luminance of a concrete road*

The test results are clear and they show that the application of concrete pavements will ensure that the number of lights or the power they use can be substantially reduced, which will, in turn, reduce electricity consumption and costs.

## Concrete suits protected lands

Smell. Have you ever smelt concrete on a hot day? Have you noticed any unpleasant odour? No. You cannot say the same about asphalt, which at temperatures over 30°C gives off the unpleasant odour of hydrocarbons.

For sure, the smell, light colour and natural raw materials has ensured concrete pavements are favoured for construction of bicycle paths and trails in protected areas and forests.

In 2021, a concrete road close to Błędów Desert was built. This area is under special protection of European Law. The local authorities decided to choose concrete, guided by the environmental features of concrete roads.



*Figure 9. Concrete pavement on road entering Błędów Desert.*

From an environmental aspect, concrete roads have an additional advantage, which is their impact on exhaust gas limitation. High rigidity, which reduces rolling resistance, causes lower fuel consumption. Concrete roads allow reduced fuel consumption by several percent, which on the scale of road transport can bring about not only vast financial savings, but also significantly reduce $CO_2$ emissions.

## Concrete's "life after life"

Recycling is at the very end of a concrete pavement life. Recycled aggregate can be used in the production of concrete mix. Thereby end-of-use concrete pavement can be used as a material for construction of another road. This is the concrete's "life after life", which is required from responsible decision-makers in a modern world combating climate changes.

## Local authorities invest in technology

Most local roads have been built by local, small, road construction companies. However, local authorities have also invested in construction equipment and started constructing concrete roads on their own, for instance, the municipality of Brańsk, located in the north-eastern part of Poland. The municipality has bought a concrete batching plant, truck concrete mixer, vibrator beams, saws for concrete cutting and other minor technical equipment. In two years, almost 5 km of concrete roads have been built, and further projects made using this technique are continuing. The municipality of Bełchatów, located in Central Poland, taking the experience of Brańsk, is also getting ready to purchase equipment to build concrete roads on their own.



*Figure 10. Truck concrete mixer and concrete batching plant purchased by the municipality of Brańsk.*



*Figure 11. Concrete road in the municipality of Brańsk*

## Conclusion

The benefits of concrete pavements presented in this paper, which have been shown at numerous conferences and meetings with local authorities, bring measurable advantages. Over 25 years of activity of the Polish Cement Association is long enough to answer the question – was it worth it? The effects of these activities are not so clearly visible on an everyday basis. However, looking at statistics, one should definitely answer YES. Almost 1000 km of concrete pavements have been built on main national roads in Poland. Local authorities are more and more willing to look for durable technological solutions in the construction of local roads – concrete pavements are a fine solution for them. About 1500 km of local concrete roads have been built and further projects are being planned.
It is worth emphasising that concrete roads, thanks to their numerous advantages and consistent promotion, are becoming more and more common in Poland.



# 2. blok:
# **Životnost betonových vozovek**

# Udržitelná stavba betonových vozovek– od kolébky až ke kolébce

*Dipl.-Ing. Stephan Villaret a Dr.-Ing. Marko Wieland*

*Tel.č.: +49 3342 / 303180*
*E-mail: svi@villaret.de / Marko.Wieland@oat.de*

Svět, ve kterém žijeme, se stále více stává světem omezených zdrojů. Zásoby stavebních materiálů, spotřeba energie, zachování životního prostředí v lokálním i globálním měřítku a demograficky podmíněný nedostatek pracovních sil vyžadují ve všech oblastech změnu myšlení.

Společným jmenovatelem těchto nových přístupů bývá pojem trvalé udržitelnosti. V tomto příspěvku se zabýváme základy, nezbytnou systematikou a konkrétními metodami a návrhy řešení pro stavbu betonových vozovek.

Těžištěm je komplexní posouzení životního cyklu horní stavby (pozn. překl.: kryt + podkladní vrstvy) vozovky, které zahrnuje mimo počátečních fází (například plánování, dimenzování, zhotovení a stavební údržbu) také závěrečné fáze životního cyklu (LZ), aby tak byl vytvořen plynulý přechod do následujícího životního cyklu.

## 1. Globální rámec a politické požadavky

Evropská unie už na mezinárodní a celoevropské úrovni dlouhou dobu usiluje o pokrok v trvale udržitelném rozvoji a hlásí se tím ke globálním cílům Světové komise Organizace spojených národů pro životní prostředí a rozvoj (World Commission on Environment and Development, WCED). V této souvislosti je třeba uvést zprávu, označovanou podle její předsedkyně Bruntlandové, v níž byly stanoveny hlavní směry trvale udržitelného rozvoje a vysloven požadavek na strategii, která bere ohled na rozvoj a životní prostředí. „Společným cílem a měřítkem veškerého jednání je trvale zabezpečit přírodní základ života na Zemi a umožnit všem lidem dnes i v budoucnosti důstojný život (Světová komise OSN pro životní prostředí a rozvoj“, UNO 1987).

V Německu je trvale udržitelný rozvoj (trvalá udržitelnost) základním principem politiky spolkové vlády. Německo proto od roku 2002 prosazuje národní strategii trvale udržitelného rozvoje, která popisuje dlouhodobý proces politického vývoje a určuje jeho orientaci. Kromě toho je na základě klíčových indikátorů definováno 38 oblastí trvale udržitelného rozvoje. Ve strategii, která byla aktualizována v roce 2021, jsou mimo jiné uvedeny následující oblasti indikátorů, respektive postuláty trvale udržitelného rozvoje.

- zatížení ovzduší (zachování zdravého životního prostředí)
- šetrný přístup ke zdrojům (šetrné a efektivní využívání zdrojů)
- mobilita (zajištění mobility – šetrný přístup k životnímu prostředí)

Měřitelnost se přitom realizuje prostřednictvím příslušných indikátorů tak, aby bylo možné ověřit dosažení cílů a zajistit řízení trvalé udržitelnosti. Pro mobilitu jsou například zakotveny indikátory spotřeby energie v nákladní a osobní dopravě. Jako cílová hodnota je nyní pro tyto indikátory stanoven koridor minus 15 až minus 20 procent do roku 2030.

V návaznosti na tuto globální strategii má věda a výzkum za úkol zkoumat mimo jiné cíle a výzvy trvalého rozvoje dopravní infrastruktury se zaměřením na silniční dopravu. Přitom by se měly důsledně zabývat aspekty trvalé udržitelnosti inovačních procesů tak, aby pokud možno v co nejvyšší míře vyčerpaly všechny možnosti trvalého rozvoje.

V oblasti silničního stavitelství a zvlášť stavby betonových vozovek kráčíme už několik let cestou, která systematicky a pružně sleduje výše uvedenou strategii trvalé udržitelnosti. Cílem tohoto článku je popsat aktuální stav a nastínit další možné kroky.

## 2. Stanovení cílů pro stavbu betonových vozovek

Hlavním cílem je systémová integrace principu a myšlenky trvalé udržitelnosti v oblasti stavby silnic. Vypracovaný postup by zde měl být v maximální možné míře začleněn do systematiky nadřazených strategií trvale udržitelného rozvoje, respektive by s nimi měl být kompatibilní. To je důležité proto, že výsledky spojené s dosažením stanovených cílů představují základní stavební kameny celku – například národní a evropské strategie trvalé udržitelnosti – a jsou nezbytné pro dosažení těchto cílů.

Dalšími významnými odvozenými cíli jsou:

- Vytvoření teoretických předpokladů a praktických nástrojů pro realizaci aspektů trvalé udržitelnosti v kontextu životního cyklu (LZ), respektive fází životního cyklu (LZP)
- Vytvoření podmínek pro měřitelnost a řízení rozvoje trvalé udržitelnosti

Bez ohledu na konkrétní definici trvalé udržitelnosti a s tím spojenými cíli vždy platí následující tvrzení:

- Nejlepší dosažitelný výsledek ve smyslu trvalé udržitelnosti je vždy kompromis mezi různými aspekty, parametry nebo vlastnostmi.
- Trvale udržitelného rozvoje je možné dosáhnout pouze společným úsilím zúčastněných aktérů.
- Pro dosažení cílů je vedle změny myšlení nezbytné také vydat se novými cestami.

## 3. Udržitelnost

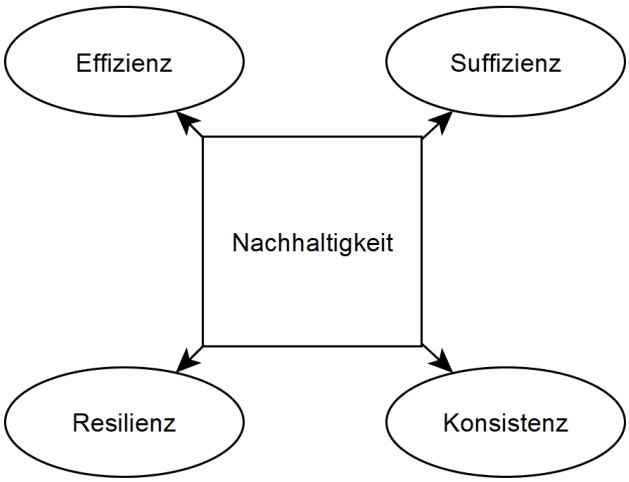
Pojem trvalé udržitelnosti existuje už od prvních desetiletí 18. století a po zařazení do dokumentu Agenda 21 na konferenci OSN v Rio de Janeiru v roce 1992 (AGENDA 21, 1992) se stále více používá i mimo vědecké diskuse. Postupem času získal tento pojem silný sémantický náboj a už několik let je s variabilními interpretacemi součástí hlavního proudu.

Pojmy „trvalá udržitelnost“ a „trvale udržitelný rozvoj“ by obecně měly být spojeny s normativním tvrzením nebo cílem, pro které existuje konkrétní koncepce nebo strategie jednání. V tzv. Zprávě Brundtlandové se k tomu říká: „Svět musí brzy vypracovat strategie, které jednotlivým zemím umožní, aby od svých současných, často destruktivních procesů růstu a rozvoje přešly k trvale udržitelným cestám vývoje.“ (UNO 1987). V současné době existují adekvátní strategie pro příslušné úrovně působení – například globální, nadnárodní a národní. Strategie trvale udržitelného rozvoje pro Německo byla přijata v dubnu 2022.

Ve vědeckém výzkumu problematiky trvalé udržitelnosti se v souvislosti s trvale udržitelným rozvojem často sledují a diskutují následující strategické přístupy:

- efektivita (lépe vyrobit totéž: například spotřebovat méně zdrojů)
- dostatečnost (vyrábět jinak: například produkt s uzavřeným koloběhem látek)
- stálost (méně vyrábět a méně spotřebovávat: například užívat více místo vlastnit více)
- pružnost (vlastní princip činnosti pro budoucí užití v souvislosti s kritickými změnami: např. způsobené změnou klimatu)

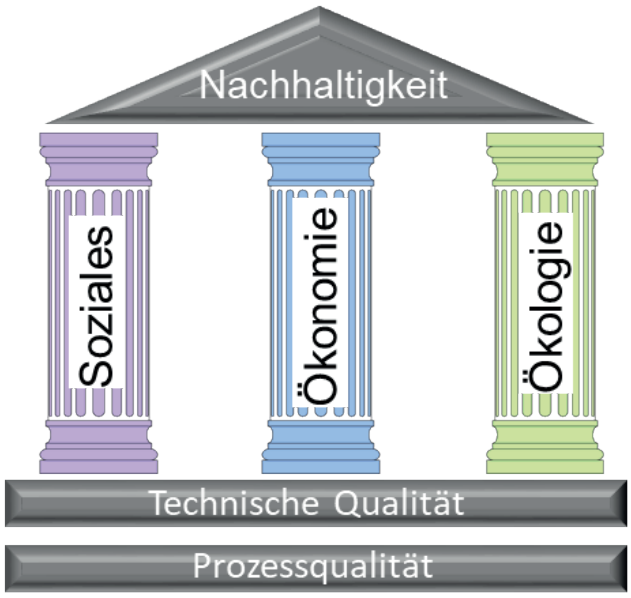
Ty jsou v této souvislosti výstižně reprezentovány známým „magickým čtyřúhelníkem“ trvalé udržitelnosti (viz Obr. 1).




*Obr. 1: Schematické znázornění trvalé udržitelnosti – „magický čtyřúhelník“.*

| | |
|---|---|
| Effizienz | Efektivita |
| Suffizienz | Dostatečnost |
| Nachhaltigkeit | Trvalá udržitelnost |
| Resilienz | Pružnost |
| Konsistenz | Stálost |

Bez ohledu na strategii mají v souvislosti s trvalou udržitelností význam tři aspekty – sociální, ekonomický a ekologický. V Německu je v této souvislosti známý tzv. „model tří pilířů“. Jak je schematicky znázorněno na Obr. 2, je výše uvedené aspekty třeba chápat jako základní pilíře trvalé udržitelnosti. Pro technické stavby a tedy také pro silniční dopravní plochy, byl model rozšířen o aspekty „technická kvalita“ a „kvalita procesů“, které lze společně chápat jako základ pilířů.

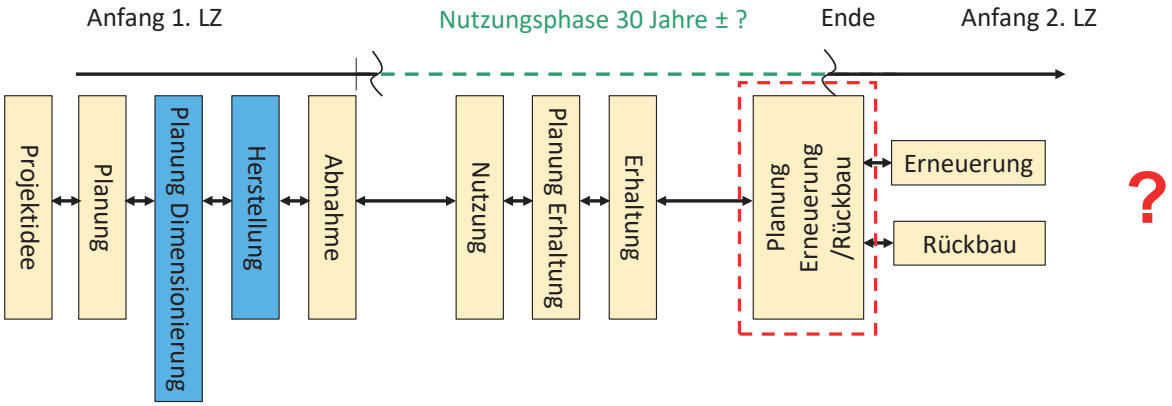



*Obr. 2: Princip trvalé udržitelnosti (BMI 2019, graf byl upraven autorem příspěvku)*

| | |
|---|---|
| Nachhaltigkeit | Trvalá udržitelnost |
| Soziales-Ökonomie-Ökologie | Sociální – ekonomické – ekologické |
| Technische Qualität | Technická kvalita |
| Prozessqualität | Kvalita procesů |

## 4. Důležité integrační aspekty trvalé udržitelnosti v silničním stavitelství

Pokud vezmeme v úvahu „model tří pilířů“ (Obr. 2), je u staveb třeba vedle zahrnutí uvedených tří dimenzí – sociální, ekonomické a ekologické – přihlížet ve smyslu holistického (celostního) posuzování také k časové dimenzi. Ta je důležitá proto, že u silničních staveb činí zpravidla doba jejich používání několik desetiletí. Na Obr. 3 je zjednodušeně zachycen celkový životní cyklus silnice, respektive vrchní stavby vozovky, včetně důležitých fází životního cyklu a s tím souvisejících procesů. V tomto schématu jsme upustili od striktního systémového vymezení. Spíše šlo o názornou ilustraci toho, že je nutno vzít v úvahu komplex různých stavů, kterými prochází objekt „silnice“. Zde plní klíčovou funkci především rozhraní, resp. přechodová fáze mezi prvním (primárním) životním cyklem a následujícím druhým (sekundárním) životním cyklem.

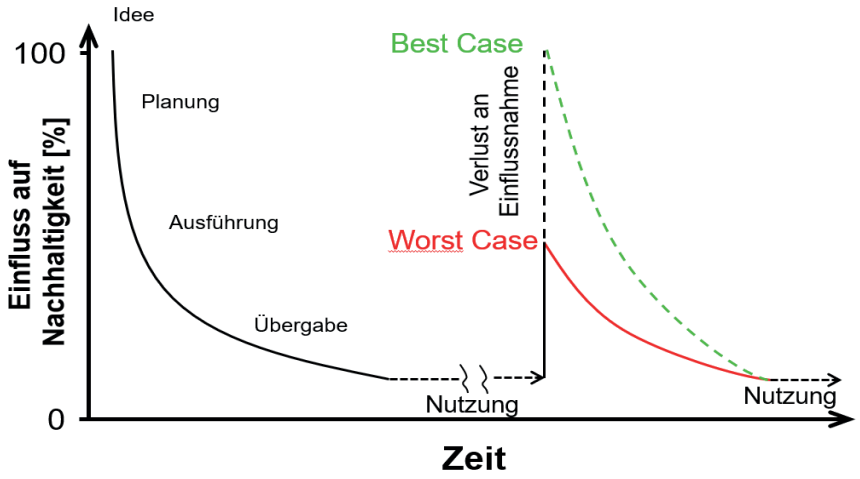



*Obr. 3: Životní cyklus silnice včetně důležitých fází životního cyklu a procesu*

Začátek 1. LZ – Fáze užívání 30 let ± ? – Konec – Začátek 2. LZ

| | |
|---|---|
| LZ LebensZyklus | životní cyklus |
| Projektidee | idea projektu |
| Planung | projektování |
| Planung Dimensionierung | projektování dimenzování |
| Herstellung | zhotovení |
| Abnahme | přejímka |
| Nutzung | užívání |
| Planung Erhaltung | plánování stavební údržby |
| Erhaltung | stavební údržba |
| Planung Erneuerung/ Rückbau | projektování obnovy/bourání |
| Rückbau | bourání |

Z časového sledu fází je zřetelně patrné, že současné aktivity mají dopad na možnosti budoucích akcí a budoucí rámcové podmínky. Jak je zřejmé z Obr. 4, možnost ovlivnění trvalé udržitelnosti uvažovaného objektu „silnice“ má v časovém průběhu životního cyklu klesající tendenci. Je obecně známo, že tento vliv je největší ve fázi rozpracování ideje, projektování a realizace. Dále je známo, že hlavně rozpracování ideje a příprava projektu má významný vliv na následující (první) životní cyklus, resp. na další životní cyklus, který na něj navazuje. Graf na obr. 4 zachycuje příklad fiktivního nejlepšího a nejhoršího scénáře. U stavebního díla „silnice“ je proto třeba uvažovat o nejméně jednom životním cyklu „od kolébky ke kolébce“.

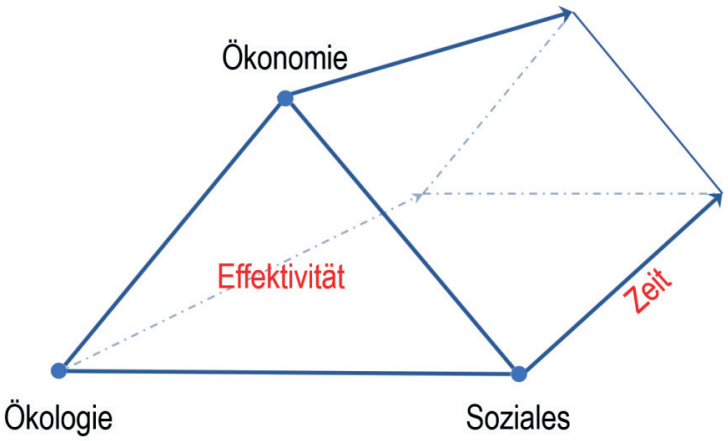



*Obr. 4: Kvalitativní průběh ovlivnění trvalé udržitelnosti s úvahou o překročení rámce jednoho životního cyklu*

| | |
|---|---|
| Einfluss auf Nachhaltigkeit | vliv na trvalou udržitelnost |
| Idee | idea |
| Planung | projektování |
| Ausführung | zhotovení |
| Übergabe | přejímka |
| Nutzung | užívání |
| Best Case | nejlepší scénář |
| Worst Case | nejhorší scénář |
| Verlust an Einflussnahme | ztráta možnosti ovlivňování |
| Zeit | čas |

Závěrem je třeba poznamenat, že obecnou souvislost „možnosti ovlivnění trvalé udržitelnosti“, zachycenou ve schématu na Obr. 4 lze bez omezení přenést také na „možnost ovlivnění nákladů“. V rámci integrace trvalé udržitelnosti do životního cyklu silnice je proto třeba věnovat pozornost v prvé řadě fázi projektování, dimenzování a výroby a vytvářet odpovídající implikace pro jejich aktéry.

Integrace trvalé udržitelnosti v úrovni „stavba silnic“ je ze současného pohledu o to obtížnější, že se při tom berou v úvahu výhradně tři dimenze – sociální, ekonomická a ekologická. Vzhledem k multidimenzionálnosti a protichůdnosti aspektů je nutno předpokládat, že teoreticky není možné definovat obecně platné optimum trvalé udržitelnosti. Všechny tři dimenze je navíc třeba považovat co do jejich váhy za rovnocenné. Podobně jako je tomu u modelu tří pilířů, lze i tuto souvislost mj. názorně ilustrovat v podobě takzvaného „trojúhelníku trvalé udržitelnosti“. Ten je zpravidla zobrazen jako rovnostranný trojúhelník, aby se tím zdůraznilo, že všechny tři aspekty mají stejný význam. Na Obr. 5 je tento model prezentován v modifikované podobě. Obsahuje možné rozpory, respektive konflikty cílů, které provázejí integraci trvalé udržitelnosti mezi ekonomickými, ekologickými a sociálními aspekty. Toto znázornění se proto označuje jako „trojúhelník napětí“. V souvislosti s časovou dimenzí lze předpokládat, že – podle perspektivy a okrajových podmínek platných v okamžiku pozorování – lze dosáhnout více nebo méně příznivého stavu trvalé udržitelnosti.




*Obr. 5: Trojúhelník napětí trvalé udržitelnosti (rozšířené vyobrazení podle (Dyllick, Hockerts 2002))*

| | |
|---|---|
| Ökonomie | ekonomie |
| Effektivität | efektivnost |
| Zeit | čas |
| Ökologie | ekologie |
| Soziales | sociální aspekty |

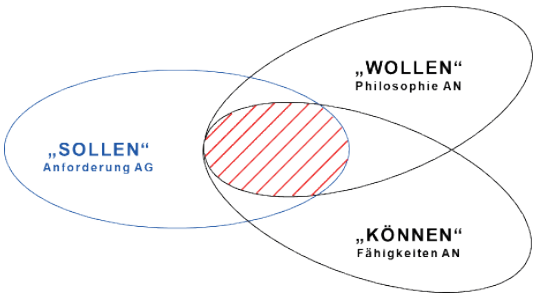
Z inženýrsko-technického hlediska se jeví jako vhodné obejít tento problém tím, že se nejprve budeme zabývat aspektem kvality, přičemž budeme vycházet z rozšířeného modelu tří pilířů trvalé udržitelnosti. Podle něj hraje kvalita klíčovou roli, respektive je základním předpokladem trvalé udržitelnosti produktu. Přitom je irrelevantní, jaká váha bude v tu dobu přisouzena určitému aspektu, který tvoří pilíři udržitelnosti.

Ale ani pro kvalitu neexistuje žádná obecně platná definice, úhel pohledu nebo všezahrnující pojetí. Podle Davida A. Garvina se například rozlišuje následujících pět různých způsobů nazírání:

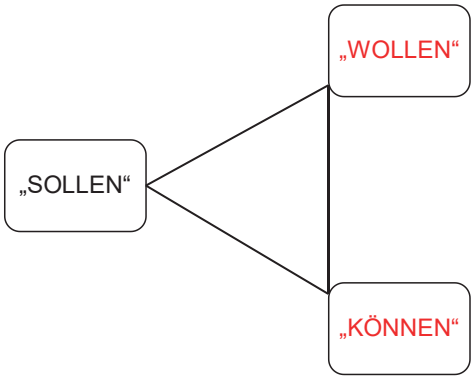
- transcendentní (nadsmyslové) chápání kvality
- chápání kvality vztažené k produktu
- chápání kvality vztažené na hodnotu
- chápání kvality vztažené k výrobě
- chápání kvality vztažené na zákazníka

V chápání kvality zaměřeném na zákazníka představuje kvalita úplnou realizaci všech požadavků, které klade zákazník/objednatel na produkt a v podstatných rysech odpovídá definici kvality podle ISO 9000, 2005. Kvalita produktu je v tomto pojetí horší, když nejsou splněny všechny parametry nebo požadavky, které zákazník/objednatel na produkt klade. To však také znamená, že kvalitu nemůže zlepšit ani rozšíření o další parametry, protože ty nezvyšují užitečnost produktu pro zákazníka/objednatele.

V této souvislosti je namístě doplnit Garvinovo rozlišení o chápání kvality z hlediska podnikatele. Za kvalitu nazíranou z hlediska podnikatele se obecně považuje průnik mezi požadavky objednatele („MÁ BÝT“), filozofií podnikatele („CHTÍT“) a kompetencí podniku („UMĚT“), tedy skutečně dosažená průniková plocha („SKUTEČNÝ STAV“). Na Obr.6 jsou tyto souvislosti ilustrovány na příkladu. Znázornění této souvislosti v podobě trojúhelníku napětí se jeví jako vhodné, protože tyto rozdíly mezi objednatelem a dodavatelem v praxi pravděpodobně není úplně možné odstranit (viz Obr. 7).




*Obr.6: Chápání kvality z hlediska podnikatele jako zobrazení rozhraní*




*Obr. 7: Trojúhelník napětí u kvality mezi objednatelem a dodavatelem*

| | |
|---|---|
| SOLLEN | MÁ BÝT |
| Anforderung AG | požadavek objednatele |
| WOLLEN | CHTÍT |
| Philosophie AN | filosofie dodavatele |
| KÖNNEN | UMĚT |
| Fähigkeiten AN | schopnosti, způsobilost dodavatele |

Pojem „kvalita“ často slouží jako měřítko hodnot, takže produkt, který se vyznačuje vysokou mírou splnění požadavků podle Obr. 6, se také označuje jako kvalitní produkt.

V oblasti techniky lze kvalitu produktu zpravidla objektivně charakterizovat pomocí měřitelných veličin nebo v podobě ukazatelů. Výhoda zde spočívá v tom, že kvalitu vyjádřenou jako soulad mezi požadovaným a skutečným stavem zde lze ověřit prostřednictvím splnění specifikací nebo požadavků.

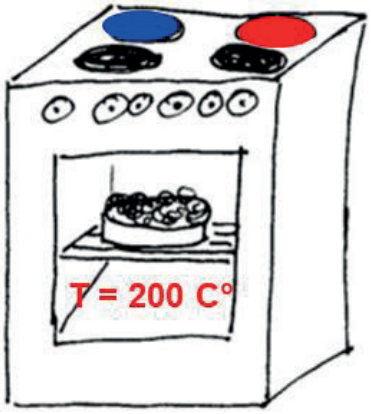
Pro celkové úvahy o kvalitě produktu „silnice“ je nezbytné uplatňovat úvahy překračující hranice dílčích oborů, resp. procesů. Kvalitní produkt vznikne pouze v případě, že všechny procesy vstupující do vzniku produktu budou mít dostatečnou kvalitu. Zde je nezbytný systémový přístup ve smyslu komplexního managementu kvality, který zahrnuje kontrolu, řízení nebo regulaci všech náležitých procesů.

V souvislosti s kvalitou produktu „silnice“ jsou vedle úvah o jednotlivých procesech nezbytné úvahy přesahující hranice procesu – zahrnující nejen celý životní cyklus, ale přesahují jeho rámec. Řízení nebo regulace jsou nezbytné také pro dosažení stanovených cílů ve smyslu národní strategie trvalé udržitelnosti, trvale udržitelného rozvoje stavby silnic.

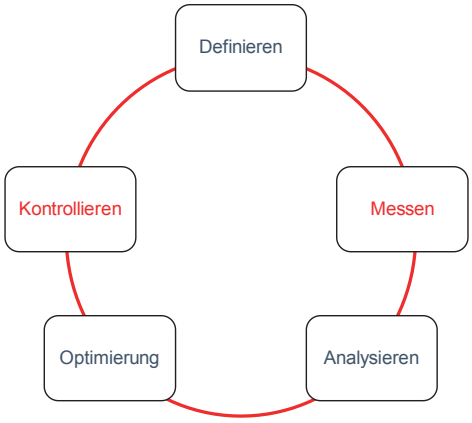
Pokud jde o správné vymezení pojmů „řízení“ a „regulace“, je třeba podotknout, že nejde o synonyma. Podle DIN IEC 60050-35, 2014 platí následující znaky:

- ***Znakem řízení je otevřený průběh působení*** *nebo uzavřený průběh působení, při kterém výstupní veličiny ovlivněné vstupními veličinami nejsou kontinuální a nepůsobí přes stejné vstupní veličiny na sebe samotné.*
- ***Znakem regulace je uzavřený průběh působení****, při kterém regulační veličina kontinuálně ovlivňuje sebe samotnou v průběhu působení regulačního obvodu.*

Rozdíly mezi „řízením“ a „regulací“ lze velmi dobře ukázat na příkladu pečicí trouby. Jak je vidět na Obr. 8, plotýnky lze jenom řídit, to znamená, že plotýnka je v závislosti na stavu sepnutí horká nebo studená. Teplotu v pečicí troubě lze naopak možné regulovat, to znamená, že cílového zadání, tj. teploty (např. 200°C) se dosahuje pomocí uzavřené lhůty působení.




*Obr. 8: Ilustrativní příklad pro objasnění pojmů „řízení“ a „regulace“ (Zdroj: www.4teachers.de, schéma bylo upraveno)*




*Obr. 9: schéma průběhu podle metody DMAIC*

| | |
|---|---|
| Definieren | definování |
| Kontrolieren | kontrolování |
| Optimierung | optimalizace |
| Messen | měření |
| Analysieren | analýza |

Pro výše popsané komplexní úkoly se proto jeví heuristická metoda (zkusmé řešení problému) pokusu a omylu (trial a error) jako nevhodný nástroj pro řešení problémů. V mnoha velkých podnicích se pro zdokonalování procesů a vývoj nových procesů používá takzvaná metoda Six Sigma nebo DMAIC. Posledně jmenovanou se budeme zabývat v souvislosti s principem trvalé udržitelnosti/kvality ve stavbě silnic. Anglická zkratka DMAIC znamená:

- **D**efine (definování): vymezení cílů v oblasti kvality a trvalé udržitelnosti
- **M**easure (měření): stanovení ukazatelů x a měření kvality y
- **A**nalyse (analýza): analýza souvislostí mezi x a y
- **I**mprove (zlepšování): implementace řešení ke zlepšení y pomocí správných x
- **C**ontrol (kontrola): kontrola x a výsledek y

→ Bylo ve výsledku dosaženo cíle?

Německé dálnice a silnice vyšších tříd patří k silniční infrastruktuře a podle zákona (§ 1 odst. 1 FStG) jsou určeny pro dálkovou dopravu. Účelem silnice je přitom uspokojovat neustále rostoucí potřebu mobility jejích uživatelů. V oblasti rychlostních komunikací sem patří přeprava osob a zboží motorovými vozidly.

Proto je více než legitimní zabývat se jednak požadavky uživatelů na silnici a definovat na tomto základě požadavky na kvalitu silnice. Na druhé straně je nutno mít na zřeteli požadavky provozovatele, tedy v prvé řadě německého státu jako subjektu, který financuje stavbu silnic.

V souladu s metodou DMAIC je k tomu nezbytné definovat relevantní parametry x a měřit vhodné známky kvality y. Aby bylo možné dospět k výslednému objektivnímu hodnocení silniční infrastruktury, zvláště pak vrchní stavby vozovky, je zapotřebí použít inherentní (rozumově spjaté) známky kvality.

## 5. Současný stav

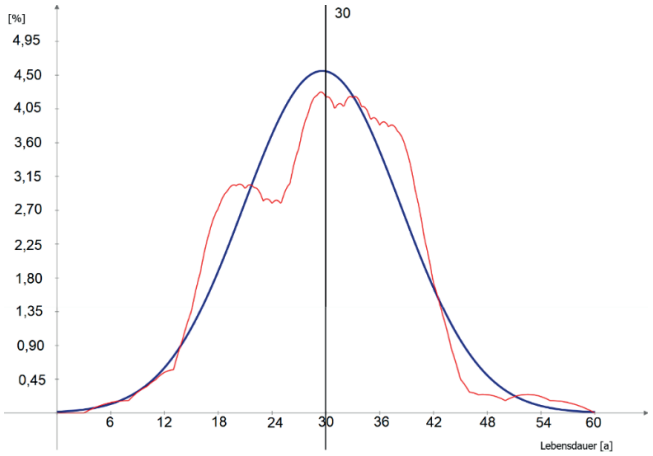
Zájem uživatele obecně spočívá v užitných vlastnostech silnice, k nimž vedle různých vlastností povrchu patří také disponibilita. Základní nutností jsou konstrukce vrchní stavby vozovky, které jsou trvanlivé a nenáročné na stavební údržbu, odolávající dopravnímu zatížení a povětrnostním podmínkám.

Takové konstrukce vrchní stavby vozovek se už mnoho desítek let zvolí podle RStO. Tyto směrnice především stanoví skladbu a tloušťku vrstev, které se v minulosti osvědčily. Tloušťky vrstev jsou přitom zhruba odstupňované podle zatížení těžkou dopravou. Jiné významné vlivy na dlouhověkost jsou podchyceny pouze nepatrně nebo vůbec ne.

Při vytváření podkladů pro výběrová a zadávací řízení se především uplatňuje předpis ZTV Beton-StB, jehož ustanovení o stavebních smlouvách vycházejí z RStO.

Dosavadní zkušenosti s betonovými stavebními technologiemi byly nashromážděny v průběhu několika desítek let. Rozsáhlá kvantifikace kvality vrchních staveb vozovek – například ohledně doby užívání – však nepředstavuje standard. Proto byla provedena analýza 91 dřívějších úseků realizovaných betonovou technologií (vybudovaných a převzatých podle RStO) a na Obr. 10 je zachyceno formální statistické vyhodnocení. Jako předpokládaný konec životnosti úseku je stanovena míra porušení 10 %, která buď nastane po určité době užívání, nebo je prognózována pomocí metod hodnocení substance.

Pokud činí míra porušení 10 % a více, pak se předpokládá, že bylo, resp. brzy bude dosaženo ekonomické hranice použitelnosti silniční komunikace. Od tohoto okamžiku je celková obnova oproti potřebným nákladům na dílčí údržbu hospodárnější




*Obr. 10: Statistické vyhodnocení životnosti betonových úseků realizovaných podle RStO*

Vyhodnocené úseky realizované betonovou technologií mají za předpokladu účelného využívání průměrnou životnost (očekávaná hodnota) cca 30 let. To odpovídá podle RStO předpokládané normativní době užívání. Ve srovnání s jinými technologiemi to je velmi dobrý výsledek. Statistika také na druhé straně ukazuje, že 50 % úseků nedosahuje plánované doby užívání, zatímco jiné naopak vydrží mnohem déle. Dosud aplikovaná metoda „standardizované vrchní stavby“ (RStO) se zjevně blíží svým limitům, pokud má každý úsek přesně dosáhnout definované životnosti. Pro úvahy o dlouhodobé udržitelnosti a systematickém řízení a regulaci procesů to je ale nezbytné

Modernější metody projektování jsou založeny na metodách výpočtového dimenzování. Zatížení způsobené dopravou a povětrnostními podmínkami je přitom zjištěno přesněji a dosazeno do výpočtu v každém jednotlivém případě. Výpočtové dimenzování také přesněji přihlíží ke geometrii desek a rovněž k typu podkladu, kotvám a kluzným trnům stejně jako ke kvalitě betonu, hodnocené pevností v příčném tahu. Metoda dimenzování je zakotvena v německých předpisech RDO Beton od roku 2009. Úseky, které byly dimenzovány podle RDO Beton, nejen posouvají distribuční křivku životnosti doprava, ale také ji „zužují“ ve smyslu menší šířky kolísání. To primárně odpovídá myšlence hospodárnosti jako dílčímu aspektu trvalé udržitelnosti, podle níž je nežádoucí jak naddimenzování, tak také především poddimenzování.

Tato metoda výpočtového dimenzování je ve fázi plánování a projektování osvědčený prostředek, který umožňuje mnohem přesněji životnost předpovědět. V této fázi je však nezbytná určitá jistota pro zohlednění kolísání během následující fáze výroby (fáze zhotovení).

Logickým navazujícím krokem je způsob hodnocení a prognózování strukturální substance. Přitom se po jednotlivých úsecích zjišťují veličiny charakterizující stav vozovky a vyhodnocují se jejich skutečné hodnoty a rozptyl. Metody výpočtu vycházejí ze stejného základu jako u výpočtového dimenzování, mají však větší vypovídající hodnotu. Lze tak nejen vypracovat kvalitní prognózu zbytkové doby použitelnosti, ale také zpětnou vazbu k výpočtovému dimenzování, což umožňuje další zdokonalení těchto metod. Pro tuto metodu se v současné době vytváří také vlastní předpis RSO Beton.

Pro uživatele stojí v popředí zájmu povrch vozovky, respektive jeho užitné vlastnosti (performance). Další faktory jsou měnící se okrajové podmínky (například kvůli ochraně klimatu, protihlukové ochraně atd.), které různým způsobem vedou k tomu, že se požadavky na vlastnosti, resp. performance povrchu vozovky neustále zvyšují. V této souvislosti je zřejmé, že doposud praktikovaný inženýrský přístup ke zlepšování stávajících a vývoji nových technologií je ve vztahu k těmto požadavkům nedostačující. Navíc také není

povrchu silnic věnována náležitá pozornost ani ve stavebně technických předpisech, resp. nepatří mezi priority. Ve vztahu ke stoupajícím požadavkům na povrch nebo jeho kvalitu je nutno konstatovat, že technické předpisy pro stavbu silnic vykazují v těchto bodech nedostatky. Například ve směrnici ZTV Beton-StB jsou v rámci stavební smlouvy přímo stanoveny a ověřovány pouze požadavky na odolnost proti smyku a rovnost. Možnost objektivního posouzení, respektive kvantifikace kvality je proto jen velmi omezená.

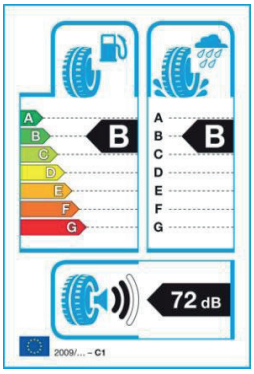
Při stavbě betonových vozovek se proto už několik let uplatňuje zásada, kdy se pro povrch určí klíčová funkce a tato se případně podrobí úvaze orientované na performanci. Protože pneumatika vozidla spojuje uživatele se silnicí, byly v prvním kroku zachyceny jako možné znaky uváděné na štítku pneumatiky tato tři kritéria:

- přilnavost za mokra (brzdná dráha na mokré silnici),
- externí valivý hluk (hlučnost) a
- valivý odpor (spotřeba paliva)

(viz Obr. 11). Ačkoliv se tyto charakteristiky berou v úvahu také při stavbě silnic, nejsou tyto parametry přímo srovnatelné. Určitá operacionalizace mezi pneumatikou a vozovkou je proto pouze podmíněně možná a měla by se budoucna zlepšit.

Platné předpisy pro stavbu silničních komunikací v současné době obsahují znaky pro odolnost proti smyku a rovnost, které zároveň představují požadavky na výkony stanovené ve stavební smlouvě.

Valivý hluk, respektive hladina hluku se aktuálně ve výše uvedeném smyslu nesleduje, ale hodnotí se paušálně prostřednictvím korekční hodnoty pro povrchy silnic (DSD). Ta je pevně přiřazena různým povrchům silnic. Podle směrnic o protihlukové ochraně silnic (RLS-19) vychází korekční hodnota vlivu povrchu na tzv. ekvivalentní hladinu hluku. Znak „valivý odpor“ se v současné době nesleduje, i když zde existuje přímá souvislost se spotřebou energie v silniční nákladní a osobní dopravě.



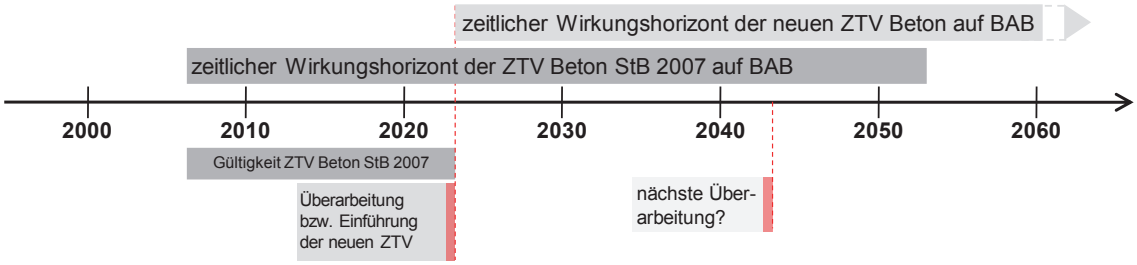

*Obr. 11: EU štítek pneumatiky*




*Obr. 12: Povrch vozovky „Textura Grinding typ S 2,4 / 2,2“ s vyznačenými třídami užitných vlastností (štítek povrchu)*

| | |
|---|---|
| Griffigkeit | odolnost proti smyku |
| Ebenheit | rovnost |
| Geräuschpegel | hladina hluku |
| Rollwiderstand | valivý odpor |

Závěrem je třeba poznamenat, že se stavba německých rychlostních silnic historicky vyvíjela v průběhu mnoha desítek let, a proto má konzervativní charakter. Vzhledem k tomu je reakce na nové podmínky celkově opožděná. Zavedení nové technologie do předpisů proto může trvat 10 až 20 let. Přepracování nejdůležitějšího předpisu pro obor stavby betonových vozovek směrnice ZTV Beton-StB, vycházející z nedávno shromážděných poznatků, například začalo před 7 lety. Po zavedení za dva až tři roky bude směrnice teoreticky platit přibližně 10 let. Pokud vyjdeme z dosavadních cyklů přepracování předpisů, pak v letech 2023 až 2033 budou budovány silnice, které budou vycházet z poznatků a výsledků výzkumu za posledních 5 až 10 let. Při předpokládané době užívání silnice 30 let pak maximální horizont účinnosti končí rokem 2063 (viz Obr. 13).




*Obr. 13: Celkové znázornění časového horizontu v kontextu vypracování a doby platnosti předpisů pro stavbu silnic, na příkladu směrnice ZTV Beton*

Časový horizont účinnosti nové směrnice ZTV Beton na německých dálnicích

Časový horizont účinnosti směrnice ZTV Beton StB 2007 na německých dálnicích

Platnost ZTV Beton StB 2007

Přepracování, resp. zavedení nové ZTV

Příští přepracování ?

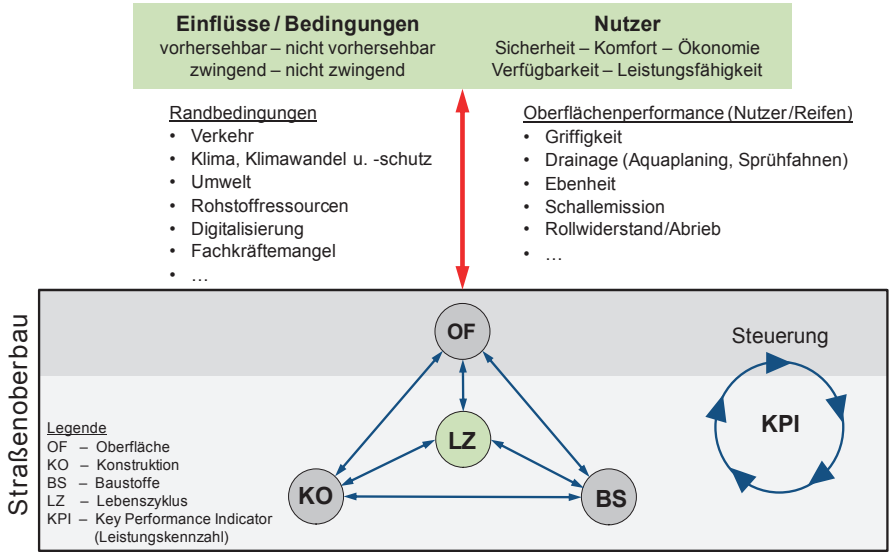
Souhrnně řečeno je obzvlášť v oblasti potřebných podkladů nutno usilovat o zlepšení, která umožní cílené jednání, respektive reakce v prvních obou fázích procesů životního cyklu. Současné předpisy navíc nepočítají se systematickým sledováním parametrů zjištěných v průběhu životního cyklu a neopírají se o ucelený přístup zaměřený na performance (soubor užitných vlastností). „Řízení“ nebo dokonce „regulace“ ve vztahu k optimalizaci/dalšímu vývoji kvality stávajících variant vrchní stavby tedy není možné. Vzhledem k tomu také není možné přímo reagovat na změny stanovených globálních cílů a na dosahování těchto cílů. Zůstává tak otázka: **Jakým způsobem lze konvenčně používané systémy upravit podle požadavků moderní stavby silnic tak, aby bylo možno silniční komunikace ve smyslu zásad trvalé udržitelnost dále rozvíjet?**

## 6. Zvolené kroky na cestě k trvalé udržitelnosti

V rámci výše uvedeného přepracování předpisů (ZTV Beton) a dalšího systematického rozvoje stavby betonovou technologií bude úsilí zaměřeno na postupné odstranění současných nedostatků a zlepšení stávajícího stavu. V rámci speciálních síťových zkoušek byly a budou přijaty pro posouzení kvality a výkonnosti vrchní stavby různé parametry povrchu, konstrukce a materiálů a testováno možné použití ve spojitosti s metodou DMAIC (Obr. 9).

To by mělo v budoucnosti umožnit flexibilní a cílené zaměření výkonnosti/kvality vrchní stavby prostřednictvím „modelu top-down s implementovanou komunikací mezi rozhraními“ (Wieland 2019), při němž stojí v popředí performance povrchu, viz Obr. 14 a Obr. 15.

Parametry použité k řízení přitom jsou v dalším textu označovány jako tzv. KPI (klíčové indikátory performance).



*Obr. 14: Obecný model KPI (Wieland 2019)*

**Vlivy / podmínky**

Předvídatelné – nepředvídatelné
závazné - nezávazné

Okrajové podmínky
- doprava
- klima, změna a ochrana klimatu
- zdroje surovin
- digitalizace
- nedostatek pracovních sil
- …

Vrchní stavba vozovky

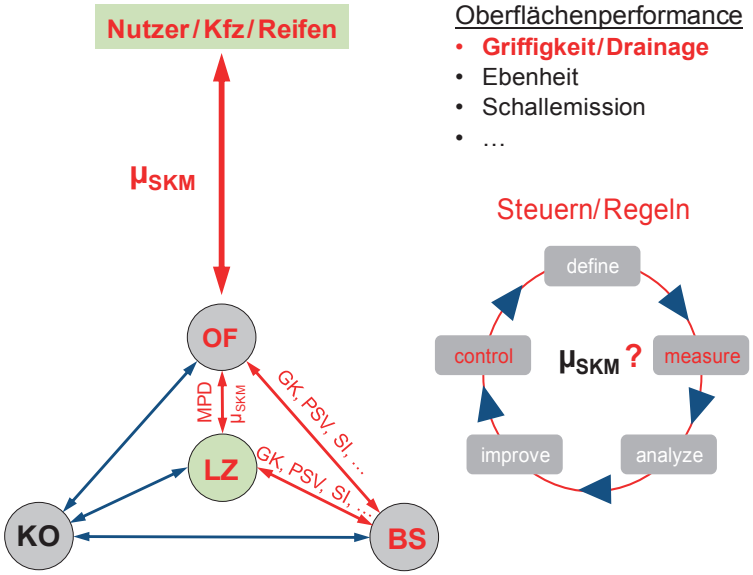
Legenda
OF – povrch
KO – konstrukce
BS – stavební materiály
LS – životní cyklus
KPI – klíčový ukazatel výkonnosti

**Uživatel**

Bezpečnost – komfort – hospodárnost
disponibilita – výkonnost

Performance povrchu (uživatel/pneumatiky)
- odolnost proti smyku
-.odvodnění (akvaplaning, vodní mlha za jedoucím vozidlem)
- rovnost
- hlukové emise
- valivý odpor, obrus
- …

Pro komunikaci v rámci i mimo rámec jednotlivých fází životního cyklu (LZP) v souvislosti s vrchní stavbou je nezbytná odpovídající operacionalizace jednotlivých ukazatelů výkonnosti. Na Obr. 15 je toto pro výše uvedený modelu KPI specifikováno pro vlastnost (performance) povrchu „odolnost proti smyku“ Na tomto místě je třeba poznamenat, že jsou zde uvedeny pouze ty parametry, které se v současné době aplikují v praxi, resp. odrážejí stav techniky.




*Obr. 15: Zobrazení operacionalizované performance povrchu „odolnost proti smyku“ se specifickým KPI $\mu_{SKM}$ pro povrchy vozovek z vymývaného betonu, (Wieland 2019)*

Uživatel / vozidlo / pneumatiky

Performance povrchu
- odolnost proti smyku/odvodnění
- rovnost
- emise hluku
- …

Řízení / regulace

Definování – měření – analýza – zlepšování – kontrola

Pro povrch z vymývaného betonu, který v současné době představuje standard pro betonovou technologii (na německých dálnicích), lze odvodit následující důležité souvislosti:

- odolnost proti smyku se ve vnitřních i vnějších stycích popisuje a uvádí výhradně prostřednictvím KPI $\mu_{SKM}$ (v = 80 km/h)
- jako operacionalizované ukazatele slouží v prvé řadě parametry vypovídající o výkonnosti kameniva (například maximální velikost zrna – GK, ohladitelnost – PSV, tvarový index – SI).
- průměrná hloubka profilu MPD (mean profile depth) se interně (fáze zhotovení, převzetí podle stavební smlouvy) používá k charakterizaci povrchu.
- konstrukce na odolnost proti smyku nemá vliv.

To znamená, že texturu povrchu lze ve fázi plánování ovlivnit pouze prostřednictvím použitého kameniva (například maximální velikost zrna, křivka zrnitosti, hodnota SI a PSV). Ve fázi zhotovení je struktura a homogenita textury dána provedením a průměrnou hloubkou profilu, která se dosáhne kartáčováním. Přímé řízení nebo regulace procesu kartáčování je vzhledem k performanci povrchu „odolnost proti smyku“ pomocí parametru MPD pouze omezené. Hlavním důvodem je, že geometrický jemný tvar (drsnost) povrchu, který představuje primární veličinu pro parametry performance - odolnost proti smyku, snížení hluku, vytváření vodní mlhy za jedoucím vozidlem a valivý odpor, nejsou v hodnotě MPD dostatečně vystiženy. Ve výsledku je cílené řízení textury povrchu, respektive performance povrchu, proto možné jen v omezené míře. Toto tvrzení lze v zásadě přenést také na jiné standardní textury používané v silničním stavitelství. Pro hodnocení kvality povrchů vozovek byl vypracován výchozí model, který za tímto účelem generuje tzv. index efektivnosti povrchů vozovek (EStrO) (Wieland 2019; Wieland, Jungen 2020). Je to míra celkové účinnosti, kterou vystihuje poměr mezi dosaženým a definovaným cílem v okamžiku hodnocení nebo po určité zvolené období.

Cíl se přitom skládá ze zvolených dílčích cílů, u nichž je stupeň účinnosti určen na základě poměrných hodnot inherentních (rozumově spjatých) znaků objektu. V tomto prvním kroku jsou vlastnosti performance povrchu vozovky třeba chápat jako soubor inherentních znaků objektu „povrch“, a to i ve smyslu metody DMAIC. Index efektivnosti tedy tvoří objektivní hodnotící kritérium, jehož prostřednictvím lze vizualizovat kvalitu. Obr. 17 zachycuje na volně zvoleném příkladu vypracovanou modelovou metodu pro hodnocení kvality povrchu vozovky. Zde byly v prvním kroku použity čtyři identifikované základní znaky (performance povrchu), přičemž jejich relativní váha byla stanovena pro daný příklad (viz Tabulka 1).

*Tabulka 1*: *Vstupní hodnoty zvolené pro ilustrační příklad na Obr. 17*

| performance povrchu (inherentní znaky) | Relativní váha [-] (podíl na celkovém cíli) | Stupeň výkonnosti [-] (LZ-začátek) | Stupeň výkonnosti [-] (LZ-časový okamžik$_i$) | Stupeň výkonnosti [-] (LZ-konec) |
|---|---|---|---|---|
| Odolnost proti smyku / odvodnění | 0,30 | 1,00 | 0,80 | 0,40 |
| Rovnost | 0,20 | 0,85 | 0,75 | 0,70 |
| Hladina hluku | 0,25 | 1,20 | 1,05 | 0,55 |
| Valivý odpor | 0,25 | 0,80 | 0,85 | 0,80 |

Kvalita povrchu vozovky závisí také na jiných kritériích, a proto je třeba ověřit, jestli je rozšíření modelu účelné, resp. vede k cíli. Každé hodnotě performance je přiřazen stupeň výkonnosti vztažený k určitému času, která může mít i hodnoty > 1. Jako okamžik hodnocení byl v tomto případě stanoven začátek a konec životního cyklu (LZ) a dále orientační bod uprostřed LZ.

Na Obr. 17 je graficky znázorněn výsledek. Nejpřednější plocha (součet všech barevných obdélníkových ploch) vyjadřuje docílenou efektivnost povrchu na začátku LZ (například ihned po zhotovení krytu vozovky).

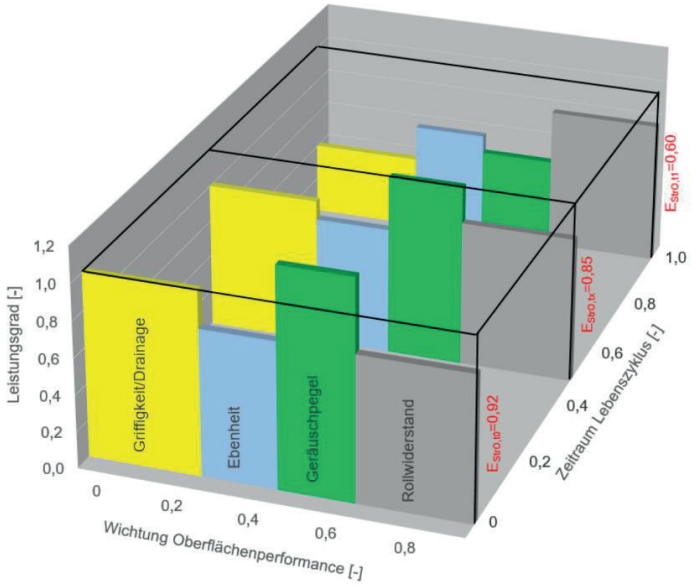
Velikost (obsah) této plochy je zobrazena ve srovnání s černě orámovanou plochou, která odpovídá plnému dosažení cíle (100 %). Podíly ploch, které vyplývají ze stupně výkonnosti > 1, jsou zanedbány a hodnotí se jako rezerva nebo nepotřebný přebytek kvality. Hodnocený povrch má v počátečním okamžiku index efektivnosti EStrO 0,92. Prostřední a zadní plocha v grafu reprezentují index efektivnosti zjištěný v okamžiku hodnocení (tx,i - v průběhu LZ a t1 - na konci LZ).

Protože je obecně známo, že se stupeň výkonnosti v průběhu užívání mění, prezentujeme zde scénáře úbytku a nárůstu hodnot. Z praxe je známo, že obzvlášť u charakteristik performance povrchu odolnost proti smyku, rovnost a hladina hluku je nutno počítat se změnou stupně výkonnosti, resp. hodnoty EStrO. Pro popis efektivnosti po celou délku životního cyklu se zjišťuje vzniklý obsah pláště v době mezi začátkem

a koncem životního cyklu (EStrO,ges). Při aproximaci geometrie pláště se přitom přihlíží k dalším opěrným bodům, a hodnota je tudíž dostatečně přesná, resp. objekt lze popsat jako mnohoúhelník. Celkový objem se nakonec vypočítá pomocí integrálů. Pro vzorový příklad zachycený na Obr. 17 činí $E_{StrO,ges}$ = 0,82.



*Obr. 16: Pneumatika se štítkem na povrchu vozovky s texturou vymývaného betonu*




*Obr. 17: Metoda komplexního hodnocení parametrů kvality povrchu vozovky pomocí indexu efektivnosti $E_{StrO}$ (Wieland, Jungen 2020)*

| | |
|---|---|
| Leistungsgrad | stupeň výkonnosti |
| Griffigkeit/drainage | odolnost proti smyku/odvodnění |
| Ebenheit | rovnost |
| Geräuschpegel | hladina hluku |
| Rollwiderstand | valivý odpor |
| Wichtung Oberflächenperformance | váha performance povrchu |
| Zeitraum Lebenszyklus | období životního cyklu |

Index efektivnosti nepodává zásadní informaci o trvanlivosti vrchní stavby silnic a není ve spojení s předpisem „Zjišťování a posuzování stavu povrchů vozovek“ (ZTV ZEB-StB).

Index efektivnosti pro povrchy vozovek slouží k tomu, aby v budoucnosti bylo možno konzistentně hodnotit, porovnávat a případně zlepšovat kvalitu produktu v časovém horizontu přesahujícím různé fáze jeho životního cyklu. Představuje důležité doplnění pro cílený další vývoj staveb betonových vozovek.

Index efektivnosti se má v budoucnosti používat pro systematický vývoj dalších a nových technologií úprav povrchu krytu vozovek na německých rychlostních komunikacích. To platí také v souvislosti s modelem top-down (Wieland 2019), který se už nějakou dobu používá při stavbě betonových vozovek jako nástroj pro praktickou realizaci myšlenky „povrchu vozovky orientovaného podle performance“. Z tohoto důvodu se provádí praktické testování a zkoušení různých metod/technologií cíleného zhotovování povrchů a/nebo textur povrchů. U stavby betonových vozovek lze jako jejich reprezentativní zástupce uvést tzv. texturu Grinding a horizontální broušení. Na obrázcích 18 a 19 jsou textury tohoto typu zachyceny ihned po zhotovení.

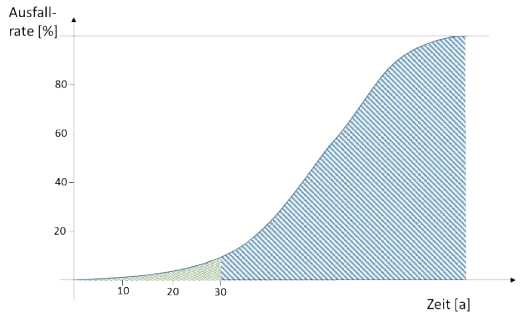


*Obr. 18: Povrch Grinding ihned po zhotovení, „textura Grinding, typ S“*

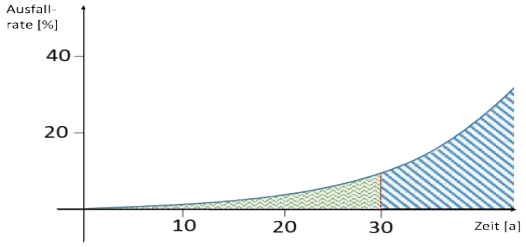


*Obr. 19: Povrch vymývaného betonu po horizontálním broušení (zdroj: OAT)*

Při analogickém postupu lze charakterizovat parametry kvality v oblasti konstrukce a stavebních materiálů. V prvním kroku se izolovaně uvažuje o cementobetonovém krytu. Kvalita betonové vozovky je standardně plně vyhovující, jestliže splňuje požadavky na povrch a jednotlivé desky nevykazují vady ani nejeví funkční selhání. Protože se kvalita povrchu posuzuje samostatně, provádí se hodnocení vrchní stavby s betonovým krytem (hodnocení substance) pouze na základě znaku „míry selhání“. Na Obr. 20 je znázorněn příklad kvalitativní míry selhání cementobetonového krytu (Wieland, Villaret et. al 2017). Tuto hodnotu lze také předpovědět na základě současného stavu poznání, takže očekávanou efektivnost je možno určit už po zhotovení a stejně jako po celou dobu užívání. Kvalita je přitom reciproká hodnota integrálu (obsah plochy pod křivkou) funkce míry selhání. Pokud má uvažovaný úsek silnice na konci projektované (normativní) doby užívání míru selhání 10 %, dosadí se u kvality, pokud jde o strukturální substanci hodnota1,0.




*Obr. 20: Metoda modelování pro celkové hodnocení materiálové performance betonu*




*Obr. 20: Vývoj míry selhání v průběhu doby užívání*

Ausfallrate – míra selhání; Zeit – čas

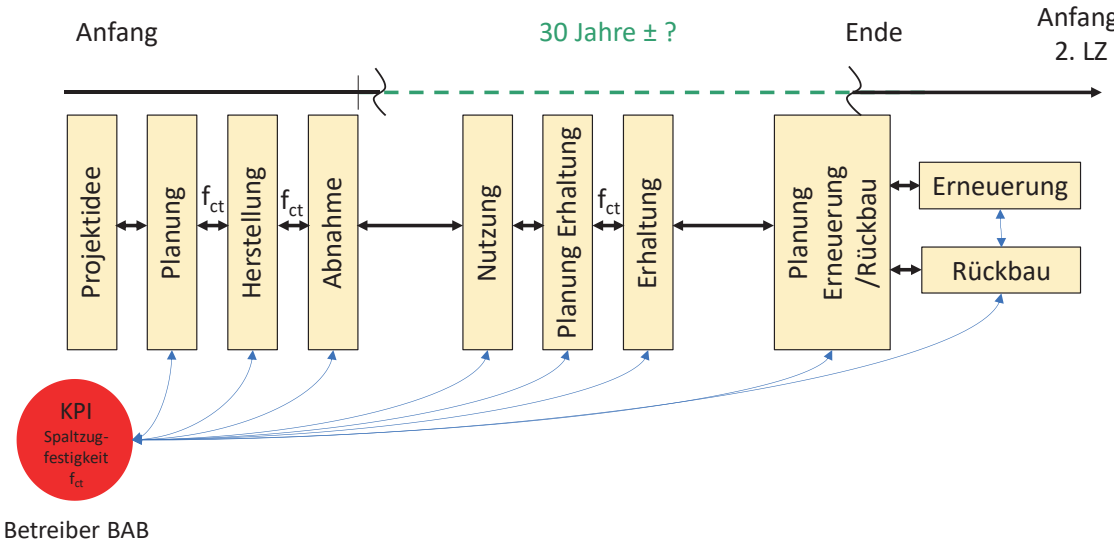
Jak bylo uvedeno v kapitole 4 (Obr. 4), lze trvalou udržitelnost a také kvalitu produktu ovlivnit hlavně ve fázi plánování (projektování), dimenzování a zhotovení. Už v této době jsou tudíž nezbytné příslušné parametry (KPI), které podle modelu top-down a metody DMAIC připouštějí řízení kvality, respektive jej také umožňují v praxi. Na základě současné úrovně poznání a podle platných předpisů (zde RDO Beton a ZTV RDO Beton-StB) připadají pro stavební materiál v úvahu jako primární parametr pevnost betonu v příčném tahu a pro konstrukci tloušťka krytu. Četné výzkumy a provedené studie parametrů FEM ukázaly, že například pro stavební materiál lze uvést ještě modul pružnosti a také teplotní součinitel délkové roztažnosti betonu. Vzhledem k neexistenci obecně platných metod zkoušení a také v zájmu lepšího ověření použitelnosti systému se však k těmto ukazatelům zatím nepřihlíží. Také při úvaze o celé konstrukci vrchní stavby by byly zapotřebí ještě další KPI, jako je například únosnost nebo podmínky uložení krytu vozovky na podklad/podkladní vrstvu.

Ve smyslu celkové úvahy je nakonec nutno stanovit, že vytvořené KPI jsou přes celý životní cyklus vhodné pro komunikaci procesů a rozhraní.

Pro jednotlivé procesy mohou být nutné dodatečné parametry (sekundární KPI), kvůli možnosti konečného ovlivnění primárních KPI, popřípadě kvality produktu. Díky zavedení výše uvedených primárních KPI „tloušťka krytu“ a „pevnost v příčném tahu“ už byly v praxi shromážděny bohaté zkušenosti s různými

fázemi životního cyklu. Jejich aplikace ve fázi výroby a přejímky celkově ukazuje, že kvalita krytů vozovek – které byly zhotoveny klasickou technologií – je velmi rozdílná (viz Obr. 10). Výzkumy, které byly provedeny v síti německých dálnic v pozdější fázi jejich životního cyklu a byly doprovázeny rozsáhlými zkouškami, potvrdily průkaznost těchto výsledků.

Zároveň však ukázaly, že je také možná bezproblémová aplikace bez výjimek ve smyslu systému „řízení kvality“. Kromě toho bylo provedeno perspektivní i retrospektivní hodnocení v průběhu životního cyklu. Zjištěné hodnoty pevnosti v příčném tahu tedy byly mj. použity k výpočtu zbytkové doby použitelnosti v kontextu plánování stavební údržby a také ke shromažďování zkušeností v kontextu odvození požadavku pro budoucí předpisy. Schéma na Obr. 22 zobrazuje příklad toku informací, respektive směry komunikace mezi fázemi životního cyklu a rovněž nad jeho rámec. Kromě toho je patrné, že komplexní přístup vyžaduje centrální shromažďování a analýzu těchto hodnot.




*Obr. 21: Schematické znázornění směrů komunikace u primárních KPI v rámci životního cyklu*

Začátek 30 let ± ? Konec Začátek 2. LZ

Idea projektu – Plánování, projektování – zhotovení – Přejímka // Užívání – Plánování údržby a oprav – Údržba a opravy // Plánování obnovy/bourání – obnova/ bourání

KPI pevnost v příčném tahu $f_{ct}$

Provozovatel německé dálnice

Pomocí RDO Beton lze tyto parametry v současné době zakotvit do fází projektování a vypisování veřejné soutěže a po dohodě o novém předpisu ZTV RDO Beton-StB je realizovat ve stavebních smlouvách. Tím je položen základ pro signifikantní zlepšení kvality v těchto fázích. Zlepšení kvality je v prvé řadě patrné na menším rozptylu parametrů, kdy se zamezí poddimenzování (plýtvání zdroji v důsledku předčasného selhání) a naddimenzování (případné plýtvání zdroji, pokud má například podkladní vrstva kratší životnost než cementobetonový kryt). Bylo by tedy žádoucí, pokud má cementobetonový kryt životnost 30 - 40 let, tak i podkladní vrstvu koncipovat na takovou dobu užívání, že vydrží buď stejně dlouho, nebo dvakrát déle než kryt.

Ve fázi provádění stavby by měla být idea kvality prioritou. Pokud se má průnik množin „MÁ BÝT“, „CHTÍT“ a „UMĚT“ zvýšit, budou k tomu muset dodavatelé vynaložit mimořádné úsilí (Obr.6). V zájmu cíleného dosažení KPI na žádoucí úrovni spolehlivosti by proto měly být vytvořeny finanční pobídky, protože to je ve všeobecném zájmu trvalé udržitelnosti.

Technický stav celé řady dřívějších stavebních úseků dálnic byl podroben hodnocení substance s cílem vybudovat potřebný fond zkušeností. Také u části nově vybudovaných úseků byly relevantní vstupní veličiny zjišťovány jako výchozí hodnoty. Pro strategické hodnocení silniční sítě je však k tomu, abychom mohli určit předpokládanou dobu celkové sanace, zapotřebí provést průzkum všech úseků sítě.

## 7. Shrnutí

Německo uplatňuje národní strategii, která usiluje v definovaných oblastech o trvale udržitelný rozvoj a ten definuje prostřednictvím klíčových indikátorů. Pro cíl systematické adaptace úrovně působení stavby silnic, respektive betonových vozovek, jsou přitom zvlášť zajímavé postuláty trvalé udržitelnosti zatížení ovzduší, šetrný přístup ke zdrojům a mobilita. V tomto příspěvku se zabýváme stavem vědeckého výzkumu v oblasti stavby betonových vozovek a popisujeme možné cesty a praktické nástroje.

Koncepce trvalé udržitelnosti v silničním stavitelství nutně vycházejí z technické kvality a kvality procesů, protože bez nich není možné řídit sociální, ekonomické a ekologické aspekty trvalé udržitelnosti.

Koncepce trvalé udržitelnosti lze ve stavbě silnic integrovat pouze se zřetelem k časovému rozměru, protože životní cyklus lze zobrazit podle principu „cradle to cradle“ včetně důležitých fází životního cyklu, resp. fází procesů.

Pouze ve fázích životního cyklu plánování, projektování/dimenzování a zhotovení je možné ovlivnit trvalou udržitelnost signifikantním způsobem. Z inženýrského hlediska je obzvlášť nutné sledovat aspekt trvalé udržitelnosti „kvalita“, protože pouze tak lze reagovat na změněnou váhu ekonomických, ekologických a sociálních aspektů trvalé udržitelnosti.

Objektivní popis a hodnocení kvality/kvality produktu, je nezbytně nutný, protože v pojetí kvality u objednatele („MÁ BÝT“) a dodavatele („CHTÍT“ a „UMĚT“) existují systémové rozpory. V technické oblasti je toto umožněno měřitelnými veličinami, respektive ve formě parametrů, takže kvalitu lze ověřit shodou u MÁ BÝT a JE splněním specifikací nebo požadavků. Do toho jsou zahrnuty všechny procesy zúčastněné při vzniku produktu.

Na základě metody DMAIC lze procesy řídit a regulovat tak, aby bylo dosaženo nadřazených a procesně orientovaných požadavků a cílů.

Ukazatele a parametry kvality, které jsou k tomu nezbytné, byly odvozeny z požadavků uživatele silnic a provozovatele. Ve vztahu k silniční infrastruktuře, respektive vrchní stavbě pak jsou středem pozornosti povrchové vlastnosti a použitelnost, disponibilita. Je nutno usilovat o metodu řešení, u které bude vedle kvality povrchu stát v popředí dlouhá životnost a nenáročnost konstrukcí vrchní stavby na stavební údržbu.

Z výsledků průzkumů provedených na německých dálnicích však vyplývá, že postupy ve stavbě silnic používané v několika posledních desetiletích mají nedostatky. 50 % všech krytů vozovek zhotovených podle aktuálně platných předpisů nedosahuje teoreticky stanovené životnosti/doby užívání, která činí 30 let, a kvalita produktu je tedy nedostatečná. Aby bylo možno zajistit nutnou dynamiku a adaptabilitu na současné a budoucí požadavky, je také ve vývoji technických předpisů nezbytná změna paradigmatu (modelu, vzorce myšlení).

Teorie a praxe sleduje už po několik let novou cestu, která vychází z toho, že povrch silnice zde hraje klíčovou roli. Filozofie modelu top-down vychází z toho, že je primárně nutno splnit požadavek na povrch a že stavební materiál a následně konstrukci je třeba odvodit z požadavků na povrch. Model přitom navazuje na existující dílčí řešení, která už jsou k dispozici v podobě technických předpisů pro stavbu silnic. Pro posuzování kvality a výkonnosti povrchu vozovek respektive vrchní stavby byly odvozeny odpovídající inherentní (rozumově spjaté) znaky. V rámci speciálních průzkumů sítě navíc byly stanoveny relevantní parametry, které v souvislosti s metodou DMAIC umožňují řízení výkonnosti/kvality vrchní stavby vozovky. Tyto KPI (klíčové ukazatele performance) kromě toho lze použít k transparentní komunikaci přesahující rámec celého životního cyklu nebo také pro rozhraní mezi sousedními fázemi životního cyklu nebo fázemi procesů.

Pro hodnocení kvality produktu z pohledu uživatele a provozovatele byl vypracován výchozí model, který umožňuje komplexní a objektivní hodnocení v kterémkoli okamžiku životního cyklu, ale také v časovém horizontu přesahujícím jeho rámec. V současné době lze tento model použít k popisu/hodnocení kvality povrchu vozovky a substance (stavební materiály – konstrukce). Výsledkem je vyjádření dosažené efektivnosti zhotoveného cementobetonového krytu v podobě číselné hodnoty, která se pohybuje od 0 do 1. Tím lze demonstrovat rezervy a přebytky ve vztahu ke kvalitě produktu.

Model lze kromě toho používat k objektivnímu hodnocení trvalé udržitelnosti na úrovni působení „silniční stavby“ (zde stavba betonových vozovek), ale také na nadřazených úrovních působení.

Výhled

Pomocí popsaných metod a nástrojů je nyní zřejmé, že budoucího rychlého vývoje tradičních betonových vozovek i stávajících technologií jakou je např. textura Grinding (zejména typ A dosaženo) bude dosaženo,

ale také budou vyvinuty nové systémy pro vrchní stavbu (například hybridní stavební technologie, zvláště pak vertikální hybrid). Přitom lze dosáhnout stanovených cílů, tedy vyhovět všem požadavkům na vrchní stavbu vozovky a především optimalizovat dobu užívání silničních konstrukcí. Nově nastoupená cesta by však hlavně měla být využita k podpoře realizace cílů, které budou v oblasti výstavby silnic stanoveny v rámci národní strategie trvalé udržitelnosti.

Je třeba usilovat o dosažení cílů v oblasti následujících indikátorů

- zatížení ovzduší (zachování zdravého životního prostředí),
- šetrný přístup ke zdrojům (šetrné a efektivní využívání zdrojů),
- mobilita (zajištění mobility – šetrný přístup k životnímu prostředí).

Protože k mobilitě jsou přiřazeny indikátory „konečná spotřeba energie“ v nákladní a osobní dopravě, zaujímají tyto indikátory v kontextu postupu prezentovaného v článku specifické postavení. Jako cílová hodnota je pro tyto indikátory stanoven koridor minus 15 až minus 20 procent do roku 2030.

Stavba silnic k tomu může na tomto místě přispět významnou měrou. Například je možné dosáhnout zvýšením kvality vyšší disponibilitu silnic a minimalizaci dopravních kongescí. Na druhé straně lze zlepšit parametr „valivý odpor“ povrchu silnic.

Další možností pro šetření zdrojů je obecné zvýšení kvality cementobetonových krytů; uplatnit při projektování a dimenzování jejich přesahující délku životního cyklu, případně toto zakotvit do příslušných předpisů. Vrchní stavba vozovky by se měla navrhovat s ohledem na způsobilost k bourání, recyklaci a opětnou použitelnost materiálů.

Alexander Graham Bell je autorem výroku: „Nechoďte vždycky jen prošlapanou cestou, která vede jenom tam, kde už dříve byli jiní.“ Jinými slovy, je nutno najít odvahu k prošlapávání nových cest.

## Zdroje

AGENDA 21 (1992): Konference OSN o životním prostředí a rozvoji. Rio de Janeiro. (AGENDA 21, 1992)
Bundesministerium des Innern, für Bau und Heimat (2019): Leitfaden Nachhaltiges Bauen, Zukünftiges Planen, Bauen und Betreiben von Gebäuden. Berlin, 01/2019 (BMI 2019)

DIN EN ISO 9000:2005-12: Systémy managementu kvality - základy a termíny. (DIN EN ISO 9000, 2005)
DIN IEC 60050-351:2014-09: Mezinárodní elektrotechnický slovník - Část 351: Řídicí technika. (DIN IEC 60050-351, 2014)

Dyllick, T.; Hockerts, K. (2002): Business Strategy and the Environment. Published online in Wiley InterScience (www.interscience.wiley.com). (Dyllick, Hockerts 2002)

Forschungsgesellschaft für Straßen- und Verkehrswesen (2006): Zusätzliche Technische Vertragsbedingungen und Richtlinien zur Zustandserfassung und -bewertung von Straßen, Ausgabe 2006, (ZTV ZEB-StB) FGSV Verlag, Köln

Forschungsgesellschaft für Straßen- und Verkehrswesen (2007): Zusätzliche Technische Vertragsbedingungen und Richtlinien für den Bau von Tragschichten mit hydraulischen Bindemitteln und Fahrbahndecken aus Beton, Ausgabe 2007 (ZTV Beton-StB), FGSV Verlag, Köln

Forschungsgesellschaft für Straßen- und Verkehrswesen (2009): Richtlinien für die rechnerische Dimensionierung von Betondecken im Oberbau von Verkehrsflächen, Ausgabe 2009 (RDO Beton 09), FGSV Verlag, Köln

Forschungsgesellschaft für Straßen- und Verkehrswesen (2012): Richtlinien für die Standardisierung des Oberbaus von Verkehrsflächen, Ausgabe 2012 (RStO 12), FGSV Verlag, Köln
Forschungsgesellschaft für Straßen- und Verkehrswesen (2019): Richtlinien für den Lärmschutz an Straßen, Ausgabe 2019 (RLS-19), FGSV Verlag, Köln

Forschungsgesellschaft für Straßen- und Verkehrswesen (2020): Zusätzliche Technische Vertragsbedingungen und Richtlinien für den Bau von Betondecken im Oberbau von Verkehrsflächen bei Anwendung der RDO-Beton, Ausgabe 2020 (ZTV RDO Beton-StB 20), FGSV Verlag, Köln

UNO (1987): Brundtland-Report „Our Common Future“, United Nations Organization (UNO), 08/1987

Villaret, S. (2012): Der Zusammenhang zwischen Betonfestigkeit und Deckendicke. Straße und Autobahn, 63, 06, Kirschbaum Verlag, Bonn, 379 - 1385. (Villaret 2012)

Villaret, S., Wieland, M. (2019): Informationssysteme zur permanenten Einschätzung des Straßenzustands. Straße und Autobahn, 70, 12, Kirschbaum Verlag, Bonn, 1084 - 1093. (Villaret, Wieland 2019)

Wieland, M., Villaret, S., Riwe, A. (2017): Bewertung der strukturellen Substanz für die systematische Erhaltungsplanung von Betonfahrbahndecken. Straße und Autobahn, 68, 2, Kirschbaum Verlag, Bonn, 79 - 90. (Wieland, Villaret et. al 2017)

Wieland, M. (2019): Performanceorientierte Fahrbahnoberflächen. Tagungsband 17. VDI-Fachtagung Reifen – Fahrwerk – Fahrbahn. (Wieland 2019)

Wieland, M., Jungen B. (2020): Performanceorientierte Fahrbahnoberfläche. Straße und Autobahn, 71, 1, Kirschbaum Verlag, Bonn, 33 - 41. (Wieland, Jungen 2020)

# Nachhaltiger Betonstraßenbau – Von der Wiege bis zur Wiege

*Dipl.-Ing. Stephan Villaret und Dr.-Ing. Marko Wieland*

*Tel.-Nr.: +49 3342 / 303180*
*E-Mail: svi@villaret.de / Marko.Wieland@oat.de*

Wir leben zunehmend in einer Welt der begrenzten Ressourcen. Baustoffreserven, Energieverbrauch, Erhaltung der lokalen und globalen Umwelt sowie demografisch bedingter Arbeitskräftemangel erfordern neue Denkweisen in allen Lebensbereichen.

Oftmals werden diese neuen Ansätze unter dem Dach der Nachhaltigkeit zusammengefasst. In diesem Beitrag werden die Grundlagen, die notwendige Systematik sowie konkrete Lösungsansätze und Lösungen für den Betonstraßenbau erörtert.

Ein wesentlicher Schwerpunkt liegt dabei in der ganzheitlichen Lebenszyklusbetrachtung des Straßenoberbaus, die neben den Phasen zu Beginn (zum Beispiel Planung, Dimensionierung, Herstellung und Erhaltung) auch jene am Ende eines Lebenszyklus (LZ) beinhaltet, um einen Übergang in den nachfolgenden Lebenszyklus zu schaffen.

## 1. Globaler Rahmen und politische Vorgaben

Die Europäische Union setzt sich seit langer Zeit auf internationaler und europäischer Ebene für Fortschritte bei der nachhaltigen Entwicklung ein und folgt somit den globalen Zielen der Weltkommission für Umwelt und Entwicklung (World Commission on Environment and Development, WCED). In diesem Zusammenhang ist der nach ihrer Vorsitzenden Brundtland bezeichnete Bericht anzuführen, in dem ein Leitbild zur nachhaltigen Entwicklung generiert wurde und der eine Strategie verlangt, die Entwicklung und Umwelt zusammenbringt. „Übergreifendes Ziel und Maßstab allen Handelns ist es, die natürlichen Lebensgrundlagen der Erde dauerhaft zu sichern und allen Menschen jetzt und in Zukunft ein Leben in Würde zu ermöglichen (Weltkommission für Umwelt und Entwicklung.“ (UNO 1987).

In Deutschland ist die nachhaltige Entwicklung (Nachhaltigkeit) ein Leitprinzip der Politik der Bundesregierung. So verfolgt Deutschland seit 2002 eine nationale Nachhaltigkeitsstrategie, die einen langfristigen Prozess der Politikentwicklung beschreibt beziehungsweise hierfür eine Orientierung bietet. Zudem wird die nachhaltige Entwicklung in 38 Bereichen anhand von Schlüsselindikatoren identifiziert. In der 2021 aktualisierten Strategie werden unter anderm nachfolgende Indikatorenbereiche beziehungsweise Nachhaltigkeitspostulate benannt.

- Luftbelastung (Gesunde Umwelt erhalten)
- Ressourcenschonung (Ressourcen sparsam und effizient nutzen)
- Mobilität (Mobilität sichern – Umwelt schonen)

Die Messbarkeit wird dabei über entsprechende Indikatoren realisiert, so dass auch eine Überprüfung der Zielerreichung sowie die Steuerung der Nachhaltigkeit möglich sind. Für die Mobilität sind beispielsweise die Indikatoren Endenergieverbrauch im Güter- und Personenverkehr verankert. Als Zielstellung für diese Indikatoren, wird ein Zielkorridor von jeweils minus 15 bis minus 20 Prozent bis zum Jahre 2030 festgelegt.

Anknüpfend an diese globale Strategie, sind Wissenschaft und Forschung gefordert, sich unter anderem den Zielen und den Herausforderungen einer nachhaltigen Entwicklung der Verkehrsinfrastruktur - Verkehrsträger Straße - zu stellen. Dabei sollten die Nachhaltigkeitsaspekte bei Innovationsprozessen konsequent berücksichtigt werden, um letztlich alle Möglichkeiten für eine nachhaltige Entwicklung auszuschöpfen.

Im Bereich des Straßenbaus - insbesondere im Betonstraßenbau - wird seit einigen Jahren ein Weg beschritten, der systemisch und adaptiv der oben angeführten Strategie der Nachhaltigkeit folgt. Im nachfolgenden Artikel sollen das Vorgehen, der aktuelle Stand sowie weiter mögliche Schritte aufgezeigt werden.

## 2. Zielstellung Betonstraßenbau

Das Hauptziel besteht in der systemischen Integration der Nachhaltigkeit beziehungsweise des Nachhaltigkeitsgedankens im Bereich des Straßenbaus. Das hierfür entwickelte Vorgehen sollte sich weitgehend in die Systematik übergeordneter Nachhaltigkeitsstrategien eingliedern beziehungsweise adaptierbar sein. Dies ist insofern von Bedeutung, als dass die mit der Zielerreichung verbundenen Ergebnisse als grundlegende Bausteine eines Ganzen – zum Beispiel der nationalen und europäischen Nachhaltigkeitsstrategie – zu sehen beziehungsweise für die Erreichung dieser Ziele erforderlich sind.

Weitere wesentliche abgeleitete Ziele sind:

- Schaffung der wissenschaftlichen Voraussetzungen sowie von Praxistools zur Umsetzung von Nachhaltigkeitsaspekten im Kontext mit dem Lebenszyklus (LZ) beziehungsweise den Lebenszyklusphasen (LZP)
- Schaffung von Voraussetzungen für die Messbarkeit und Steuerung der Nachhaltigkeitsentwicklung

Unabhängig von der konkreten Nachhaltigkeitsdefinition und den damit verbundenen Zielen, treffen folgende Aussagen stets zu:

- Das beste erreichbare Resultat im Sinne der Nachhaltigkeit ist immer ein Kompromiss zwischen verschiedenen Aspekten, Parametern oder Eigenschaften.
- Eine nachhaltige Entwicklung lässt sich nur durch gemeinsames Handeln der beteiligten Akteure erreichen.
- Für die Zielerreichung ist neben neuen Denkansätzen auch das Betreten neuer Wege notwendig.

## 3. Nachhaltigkeit

Der Begriff Nachhaltigkeit existiert schon seit dem frühen 18. Jahrhundert und findet spätestens mit der Agenda 21 der Vereinten Nationen in Rio de Janeiro 1992 (AGENDA 21, 1992) auch außerhalb wissenschaftlicher Diskussionen vermehrt Anwendung. Über die Jahre hat der Begriff eine starke semantische Aufladung erfahren und ist seit einigen Jahren im Mainstream mit variierenden Interpretationen angekommen.

Im Allgemeinen sollten die Begriffe „Nachhaltigkeit“ und „nachhaltige Entwicklung“ mit einer normativen Aussage oder einer Zielstellung in Verbindung stehen, für die ein konkretes Konzept beziehungsweise eine Handlungsstrategie vorliegt. Im Brundtland-Bericht heißt es hierzu: „Die Welt muß bald Strategien entwerfen, die den Ländern erlauben, aus ihren gegenwärtigen, oft destruktiven Wachstums- und Entwicklungsprozessen zu nachhaltigen Entwicklungswegen überzuwechseln.“ (UNO 1987). Für die entsprechenden Wirkungsebenen – zum Beispiel global, supranational und national - existieren gegenwärtig entsprechende Strategien. Für Deutschland wurde die Strategie für eine nachhaltige Entwicklung im April 2002 verabschiedet.

In der Nachhaltigkeitswissenschaft werden im Zusammenhang mit einer nachhaltigen Entwicklung häufig folgende Strategieansätze verfolgt und diskutiert:

- Effizienz (das Gleiche besser produzieren: zum Beispiel mit weniger Ressourcen)
- Suffizienz (anders produzieren: zum Beispiel Produkt mit geschlossenem Stoffkreislauf)
- Konsistenz (weniger produzieren und konsumieren: zum Beispiel mehr nutzen statt mehr besitzen)
- Resilienz (eigentlich ein Handlungsprinzip für eine zukunftsfähige Nutzung im Kontext mit einer kritischen Veränderung: zum Beispiel durch Klimawandel)

In diesem Zusammenhang ist stellvertretend das „magische Viereck“ der Nachhaltigkeit (siehe Abbildung 1) bekannt.

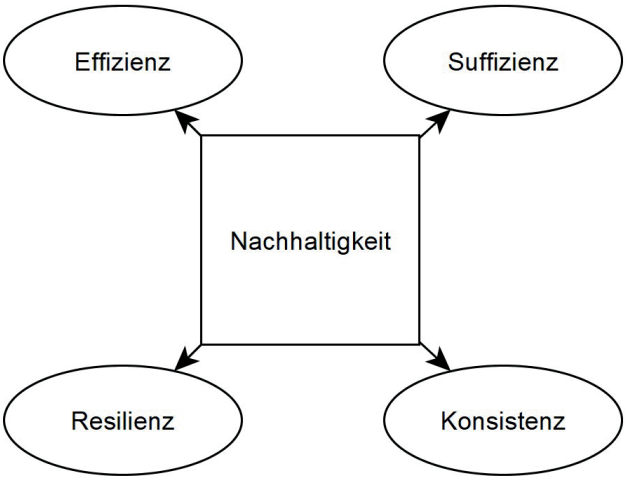



*Abbildung 1: Schematische Darstellung der Nachhaltigkeit „Magisches Viereck“*

Unabhängig von der Strategie sind im Zusammenhang mit der Nachhaltigkeit die drei Aspekte Soziales, Ökonomie und Ökologie von Bedeutung. In Deutschland ist in diesem Zusammenhang das 3-Säulen-Modell bekannt. Wie in Abbildung 2 schematisch dargestellt, sind die o. g. Aspekte als Grundsäulen der Nachhaltigkeit zu verstehen. Für technische Bauwerke, also auch für Straßenverkehrsflächen, wurde das Modell um die Aspekte „Technische Qualität“ und „Prozessqualität“, die in Summe als Fundament verstanden werden können, erweitert.

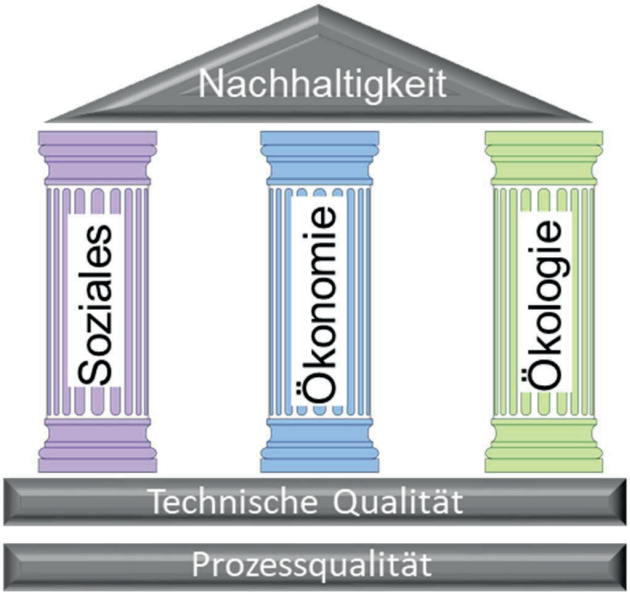



*Abbildung 2: Prinzip der Nachhaltigkeit (BMI 2019, Grafik wurde vom Verfasser modifiziert)*

## 4. Nachhaltigkeit im Straßenbau – wichtige Integrationsaspekte

Bezugnehmend auf das 3-Säulen-Modell (Abbildung 2) ist für Bauwerke neben der Einbeziehung der drei Dimensionen - Soziales, Ökonomie, Ökologie im Sinne einer holistischen Betrachtung, auch die Zeitdimension zu berücksichtigen. Dies ist insofern von Bedeutung, da das Bauwerk Straße in der Regel einen Nutzungszeitraum von mehreren Jahrzenten aufweist. Die Abbildung 3 zeigt vereinfacht den allgemeinen Lebenszyklus inklusive wichtiger Lebenszyklus- beziehungsweise Prozessphasen für eine Straße beziehungsweise den Straßenoberbau. Auf eine strikte Systemabgrenzung wurde in dieser Darstellung verzichtet. Vielmehr soll verdeutlicht werden, dass die Gesamtheit aller möglichen Zustände, die das Objekt Straße durchläuft, zu betrachten sind. Hierbei nimmt insbesondere die Schnittstelle bzw. die Übergangsphase zwischen dem ersten (Primärlebenszyklus) und dem daraufdolgenden zweiten (Sekundärlebenszyklus) Lebenszyklus eine Schlüsselfunktion ein.

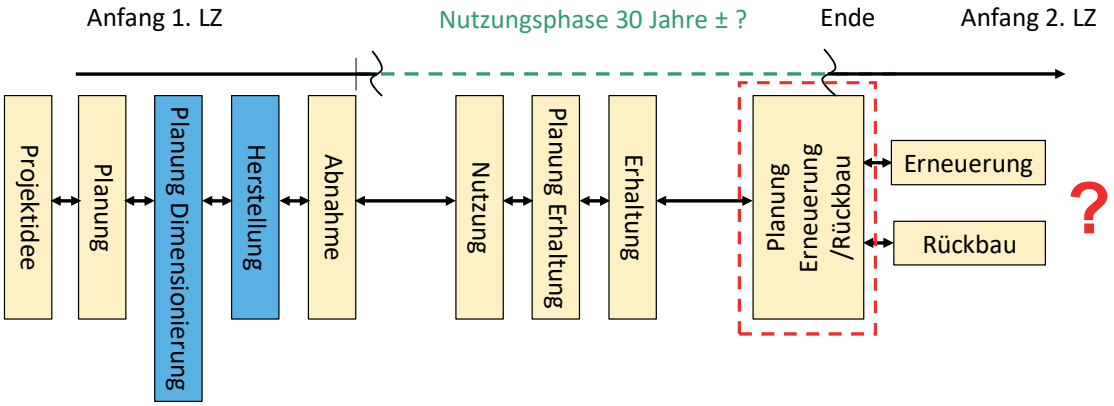



*Abbildung 3: Lebenszyklus einer Straße inklusive wichtiger Lebenszyklus- beziehungsweise Prozessphasen*

Aufgrund der zeitlichen Abfolge wird unverkennbar deutlich, dass sich gegenwärtige Handlungen auf zukünftige Handlungsoptionen und Rahmenbedingungen auswirken. Wie in der Grafik in Abbildung 4 zu sehen, nimmt die Möglichkeit – die Nachhaltigkeit des Betrachtungsobjektes „Straße“ zu beeinflussen – über den Lebesnszyklus hinweg ab. Wie allgemein bekannt, ergibt sich die größte Einflussnahme zwischen der Idee, Planungs- und Umsetzungsphase. Ferner ist bekannt, dass insbesondere mit der Idee und Planung, die Einflussnahme auf den nachfolgenden beziehungsweise an den ersten Lebenszyklus anschließenden Lebenszyklus beeinflusst wird. Die Grafik in Abbildung 4 zeigt exemplarisch ein fiktiv angesetzets Best- und Worst-Case-Szenariao. Demzufolge ist für das Bauwerk Straße eine Betrachtung von der Wiege bis zur Wiege für mindestens einen Lebenszyklus anzustreben.

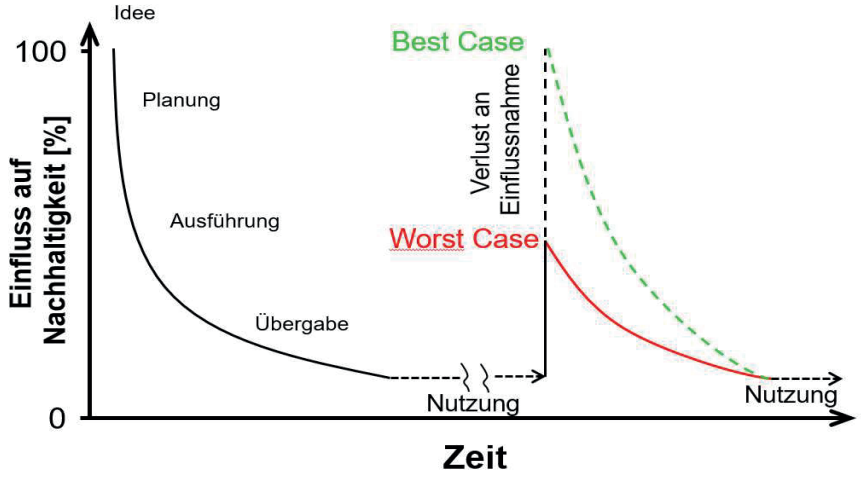



*Abbildung 4: Qualitativer Verlauf der Einflussnahme auf die Nachhaltigkeit im Zusammenhang mit einer lebenszyklusübergreifenden Betrachtung*

Abschließend ist anzumerken, dass der allgemeine Zusammenhang „Beeinflussbarkeit der Nachhaltigkeit“ aus der Grafik in *Abbildung 4* uneingeschränkt auch auf die „Beeinflussbarkeit der Kosten“ übertragbar ist. Demnach ist im Rahmen der Integration der Nachhaltigkeit in den Lebenszyklus einer Straße, ein Hauptaugenmerk auf die Planungs-, Dimensionierungs- und Herstellungsphase zu legen sowie entsprechende Implikationen für die Akteure zu schaffen.

Die Integration der Nachhaltigkeit in der Wirkungsebene „Straßenbau“ erscheint aus heutiger Sicht umso schwieriger, wenn hierbei ausschließlich die drei Dimensionen Soziales, Ökonomie und Ökologie Beachtung finden. So ist aufgrund der Mehrdimensionalität und der Gegensätzlichkeit der Aspekte davon auszugehen, dass theoretisch kein allgemeingültiges Optimum der Nachhaltigkeit definiert werden kann. Hinzu kommt, dass alle drei Dimensionen hinsichtlich ihrer Wichtung als gleichwertig anzusehen sind. Ähnlich dem theoretischen Drei-Säulen-Modell kann dieser Zusammenhang u. a. im sogenannten Nachhaltigkeitsdreieck verdeutlicht werden. Dies wird i. d. R. als gleichseitiges Dreieck konzipiert, um zu verdeutlichen, dass allen drei Aspekten die gleiche Bedeutung zukommt. In Abbildung 5 ist dieses Modell in modifizierter Form

dargestellt. Es beinhaltet mögliche Diskrepanzen beziehungsweise Zielkonflikte, die sich bei der Integration der Nachhaltigkeit zwischen Ökonomie – Ökologie – Soziologie für die verschiedenen Akteure ergeben. Diese Darstellung wird daher als Spannungsdreieck bezeichnet. Im Zusammenhang mit der Dimension Zeit ist davon auszugehen, dass – je nach Perspektive und den zum jeweiligen Betrachtungszeitpunkt vorliegenden Randbedingungen – ein mehr oder weniger guter Zustand der Nachhaltigkeit erreicht werden kann.

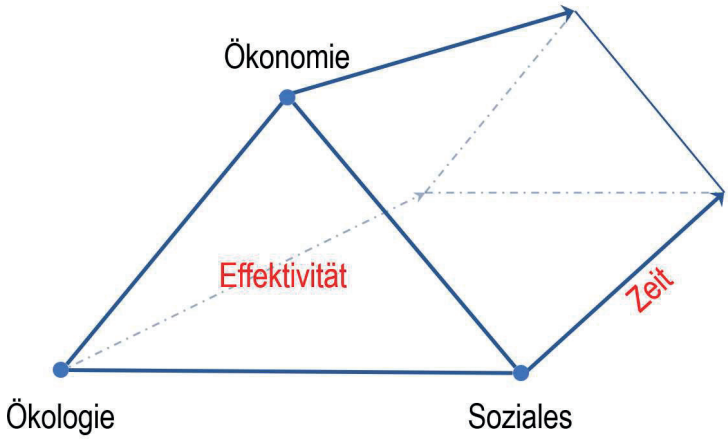



*Abbildung 5: Spannungsdreieck der Nachhaltigkeit (erweiterte Darstellung in Anlehnung an (Dyllick, Hockerts 2002))*

Aus ingenieurtechnischer Sicht erscheint es angebracht, sich in Anlehnung an das erweiterte Drei-Säulenmodel der Nachhaltigkeit vorerst auf den Aspekt der Qualität zu beziehen, um sich dieser Problematik zu entziehen. Die Qualität besitzt demgemäß eine Schlüsselrolle beziehungsweise stellt die Grundvoraussetzung für die Nachhaltigkeit eines Produktes dar. Dabei ist irrelevant, welche Wichtung dem jeweiligen Aspekt der Grundsäulen zugeschrieben wird.

Aber auch für die Qualität existiert keine allgemeingültige Definition, Sichtweise oder ein allumfassendes Verständnis. Gemäß David A. Garvin werden beispielsweise die nachfolgenden fünf verschiedenen Sichtweisen unterschieden:

- transzendentes Qualitätsverständnis
- produktbezogenes Qualitätsverständnis
- wertorientiertes Qualitätsverständnis
- fertigungsbezogenes Qualitätsverständnis
- kundenbezogenes Qualitätsverständnis

Das kundenbezogene Qualitätsverständnis betrachtet die Qualität als die vollständige Verwirklichung aller vom Kunden/Auftraggeber gestellten Anforderungen an ein Produkt und entspricht im Wesentlichen der Qualitätsdefinition gemäß (ISO 9000, 2005). Demnach verschlechtert sich die Qualität eines Produktes, wenn nicht alle vom Kunden/Auftraggeber geforderten Merkmale oder Anforderungen an ein Produkt erfüllt werden. Das bedeutet aber auch, dass durch die Bereitstellung zusätzlicher Merkmale die Qualität nicht verbessert werden kann, da diese für den Kunden/Auftraggeber nutzlos sind.

Im vorliegenden Zusammenhang erscheint es angebracht, die Unterscheidungen von Garvin, um das unternehmerische Qualitätsverständnis zu ergänzen. Unter der unternehmerischen Qualität wird im Allgemeinen der Deckungsgrad aus den Anforderungen des Auftraggebers („SOLL“) und der Qualitätsphilosophie des Unternehmers („WOLLEN“) sowie der Unternehmenskompetenz („KÖNNEN“), also der tatsächlich erreichten Schnittflächen („IST“) verstanden. In Abbildung 6 sind diese Zusammenhänge beispielhaft dargestellt. Diesen Zusammenhang in einem Spannungsdreieck aufzuzeigen erscheint opportun, da diese Differenzen zwischen Auftraggeber und Auftragnehmer in der Praxis vermutlich nicht vollständig beseitigt werden können (siehe Abbildung 7).

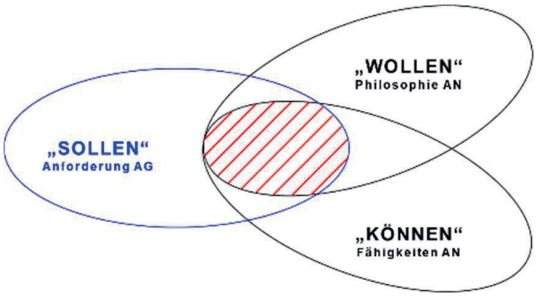



*Abbildung 6: Unternehmerisches Qualitätsverständnis als Schnittflächendarstellung*

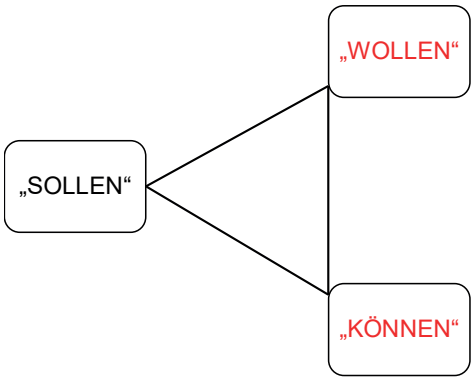



*Abbildung 7: Spannungsdreieck der Qualität zwischen Auftraggeber und Auftragnehmer*

Der Begriff Qualität dient häufig als Wertmaßstab, sodass ein Produkt mit hohem Deckungsgrad gemäß *Abbildung 6* auch als Qualitätsprodukt bezeichnet wird.

Im technischen Bereich lässt sich die Produktqualität in der Regel objektiv mit messbaren Größen beziehungsweise in Form von Kennzahlen beschreiben. Das hat den Vorteil, dass die Qualität durch Übereinstimmung von SOLL und IST mittels Erfüllung von Spezifikationen oder Vorgaben überprüft werden kann.

Eine bereichs- beziehungsweise prozessübergreifende Betrachtung ist notwendig, um in Summe ein Qualitätsprodukt Straße zu erhalten. Nur wenn alle an der Produktentstehung beteiligten Prozesse eine hinreichende Qualität aufweisen, entsteht ein Qualitätsprodukt. Hierfür ist ein systemisches Vorgehen im Sinne eines ganzheitlichen Qualitätsmanagements notwendig, das die Kontrolle, Steuerung oder Regelung aller hierzu erforderlichen Vorgänge beinhaltet.

Im Zusammenhang mit der Produktqualität einer Straße ist neben der Betrachtung der einzelnen Prozesse eine prozessübergreifende Betrachtung – über einen Lebenszyklus hinweg und darüber hinaus – notwendig. Auch für die Erreichung von Zielvorgaben im Sinne einer nationalen Nachhaltigkeitsstrategie, der nachhaltigen Entwicklung im Straßenbau ist eine Steuerung oder Regelung unumgänglich.

Hinsichtlich der richtigen Einordnung der Begriffe Steuerung und Regelung sei angemerkt, dass diese keine Synonymie aufweisen. Gemäß den (DIN IEC 60050-35, 2014) gelten folgende Kennzeichen.

- ***Kennzeichen für das Steuern ist der offene Wirkungsweg*** *oder ein geschlossener Wirkungsweg, bei dem die durch die Eingangsgrößen beeinflussten Ausganggrößen nicht fortlaufend und nicht wieder über dieselben Eingangsgrößen auf sich selbst wirken.*
- ***Kennzeichen für das Regeln ist der geschlossene Wirkungsablauf****, bei dem die Regelgröße im Wirkungsweg des Regelkreises fortlaufend sich selbst beeinflusst.*

Die Unterschiede zwischen „Steuern“ und „Regeln“ lassen sich sehr gut am Beispiel Backofen aufzeigen. Wie in *Abbildung 8* ersichtlich, lässt sich die Herdplatte lediglich steuern, das bedeutet, die Platte ist je nach Schaltzustand heiß oder kalt. Die Temperatur des Backofens lässt sich hingegen regeln, das bedeutet, die Zieleingabe beziehungsweise -temperatur (zum Beispiel 200 °C) wird mithilfe eines geschlossenen Wirkungsablaufs erreicht.

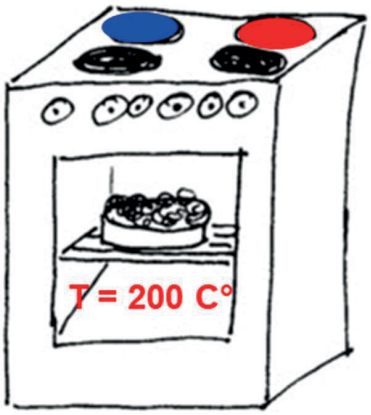



*Abbildung 8: Beispieldarstellung zur Begriffserläuterung „Steuer“ und „Regeln“ (Quelle: www.4teachers.de, Zeichnung wurde modifiziert)*

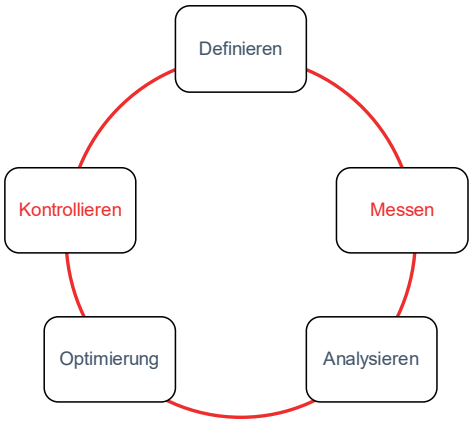



*Abbildung 9: schematischer Ablauf gemäß der DMAIC-Methode*

Für die oben beschriebenen komplexen Aufgaben/Herausforderungen erscheint demnach die heuristische Methode Versuch und Irrtum (Trial and Error) als Werkzeug zur Problemlösung ungeeignet. In vielen Großunternehmen wird für die Prozessentwicklung und -neuentwicklung die sogenannte Six Sigma oder die DMAIC-Methode verwendet. Letztere soll im Zusammenhang mit dem Nachhaltigkeits-/Qualitätsgedanken im Straßenbau betrachtet werden. So bedeutet DMAIC:

- **D**efine: Zielstellung hinsichtlich Qualität und Nachhaltigkeit
- **M**easure: Bestimmen von Kenngrößen x und messen der Qualität y
- **A**nalyse: Zusammenhänge zwischen x und y analysieren
- **I**mprove: Implementieren von Lösungen zur Verbesserung von y mit den richtigen x
- **C**ontrol: Kontrolle von x und das Ergebnis y

→ Wurde das Ziel im Ergebnis erreicht?

Die Autobahnen und Bundesstraßen zählen zur Straßeninfrastruktur und sind gemäß Gesetz (§1 Abs.1 FStrG) für den weiträumigen Verkehr bestimmt. Dabei erfüllt die Straße den Zweck, den stetig wachsenden Bedarf an Mobilität ihrer Nutzer zu stillen. Hierzu zählen im Bereich der Fernstraßen der motorisierte Verkehr zum Transport von Personen und Gütern.

Demnach ist es mehr als legitim, die Anforderungen zum einen aus Sicht des Nutzers an die Straße zu betrachten und hieraus die Qualitätsansprüche einer Straße zu definieren. Zum anderen sind die Anforderungen des Betreibers – in erster Linie der deutsche Staat als finanzieller Träger der Straßenbaulast – zu beachten.

In Anlehnung an die DMAIC-Methode sind hierfür das Definieren relevanter Kenngrößen x und das Messen geeigneter Qualitätsmerkmale y notwendig. Um im Ergebnis eine objektive Bewertung der Straßeninfrastruktur insbesondere des Straßenoberbaus zu ermöglichen, ist die Verwendung inhärenter Merkmale erforderlich.

## 5. Status quo

Das allgemeine Interesse des Nutzers liegt in den Gebrauchseigenschaften einer Straße, zu denen neben diversen Oberflächeneigenschaften auch die Verfügbarkeit zählt. Als Basis werden langlebige und erhaltungsarme Oberbaukonstruktionen, die den Belastungen aus Verkehr und Witterung widerstehen, benötigt.

Seit vielen Jahrzehnten werden solche Oberbauten nach den (RStO) ausgewählt. Insbesondere legen die (RStO) Schichtenfolgen und -dicken zugrunde, die sich in der Vergangenheit als praktikabel erwiesen haben. Die Schichtdicken sind dabei grob nach Schwerverkehrsbelastungen abgestuft. Andere bedeutende Einflüsse auf die Langlebigkeit sind nur schwach bis gar nicht erfasst.

Beim Aufstellen von Ausschreibungs- und Vergabeunterlagen stehen die (ZTV Beton-StB) im Mittelpunkt, deren bauvertragliche Regelungen auf den (RStO) basieren.

Der bisherige Erfahrungshintergrund mit der Betonbauweise erstreckt sich über mehrere Jahrzehnte. Eine umfassende Quantifizierung der Qualität von Straßenoberbauten – zum Beispiel hinsichtlich der Nutzungsdauer – stellt jedoch nicht den Standard dar. Aus diesem Grund wurde eine Analyse an 91 ehemaligen Baulosen in Betonbauweise (nach RStO gebaut und abgenommen) vorgenommen.

Abbildung 10 zeigt die formale statistische Auswertung. Das Ende der Lebensdauer eines Bauloses wird bei 10 % Ausfallrate angesetzt, die nach einer bestimmten Nutzungsdauer erreicht oder die mithilfe des Substanzbewertungsverfahrens prognostiziert wurde. Ab einer Ausfallrate von 10 % ist bei Autobahnen davon ausgehen, dass der wirtschaftliche Nutzungsausfallzeitpunkt erreicht ist beziehungsweise kurz bevorsteht. Nach diesem Zeitpunkt ist eine grundhafte Erneuerung gegenüber dem erforderlichen Einzelerhaltungsaufwand wirtschaftlicher.

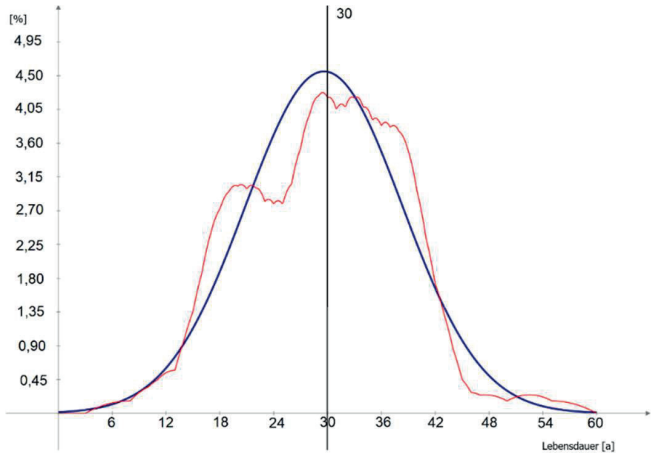



*Abbildung 10: gekaufte Lebensdauer von Betonbaulosen nach RStO*

Die ausgewerteten Baulose in Betonbauweise haben eine mittlere Lebensdauer (Erwartungswert) von ca. 30 Jahren bei funktionsgerechter Nutzbarkeit. Dies entspricht der nach RStO vorgesehenen normativen Nutzungsdauer. Das ist im Bauweisenvergleich ein sehr gutes Ergebnis. Andererseits zeigt die Statistik auch, dass 50% der Baulose die geplante Nutzungsdauer nicht erreichen, andere wiederum halten deutlich länger. Die bisher angewendete Methode des „Standardisierten Oberbaus“ (RStO) kommt offensichtlich an ihre Grenzen, wenn für jedes Baulos eine definierte Lebensdauer präzise erreicht werden soll. Dies ist jedoch für eine Nachhaltigkeitsbetrachtung und systematische Prozesssteuerung oder -regelung unabdingbar.

Modernere Planungsmethoden basieren auf den Verfahren der rechnerischen Dimensionierung. Dabei werden die Belastungen aus Verkehr und Witterung genauer ermittelt und den Berechnungen in jedem Einzelfall zugrunde gelegt. Die rechnerische Dimensionierung berücksichtigt auch die Plattengeometrien exakter, ebenso die Art der Unterlage, die Anker und Dübel sowie die Betonqualität in Form der Spaltzugfestigkeit. Das Dimensionierungsverfahren ist im deutschen Regelwerk als (RDO Beton) seit 2009 verankert. Baulose, die nach den (RDO Beton) dimensioniert wurden, werden die Verteilungskurve der Lebensdauer nicht nur nach rechts verschieben, sondern auch „enger“ im Sinne einer geringeren Schwankungsbreite machen. Damit wird primär der Wirtschaftlichkeitsgedanke als Teilaspekt der Nachhaltigkeit bedient, in dem Über- aber vor allem Unterdimensionierungen vermieden werden. Dass Verfahren der rechnerischen Dimensionierung ist in der Planungsphase ein probates Mittel, Lebensdauern deutlich präziser prognostizieren zu können. Allerdings sind in dieser Phase gewisse Sicherheiten erforderlich, um die Schwankungen in der darauffolgenden Produktionsphase (Bauphase) zu berücksichtigen.

Das Verfahren zur Bewertung und Prognose der strukturellen Substanz ist ein logischer Folgeschritt. Hierbei werden abschnittsweise Substanzzustandsgrößen ermittelt, um die tatsächlichen Werte und deren Streuung auszuwerten. Die Berechnungsmethoden basieren auf den gleichen Grundlagen wie bei der rechnerischen Dimensionierung, jedoch mit höherer Aussagekraft. Damit können nicht nur gute Prognosen zur Restnutzungsdauer aufgestellt werden, sondern auch eine Rückkopplung zur rechnerischen Dimensionierung, um diese Verfahren weiter zu verbessern. Für das Verfahren wird momentan ebenfalls ein Regelwerk (RSO Beton) erarbeitet.

Für den Nutzer stehen die Fahrbahnoberfläche beziehungsweise deren Gebrauchseigenschaften (Performance) im Vordergrund. Hinzu kommen die sich ändernden Randbedingungen (zum Beispiel infolge Klimaschutz, Lärmschutz, etc.), die auf unterschiedliche Weise bewirken, dass sich die Anforderungen an Eigenschaften beziehungsweise Performances von Straßenoberflächen stets erhöhen. In diesem

Zusammenhang wird deutlich, dass das bisher praktizierte ingenieurtechnische Vorgehen, hinsichtlich der Neu- und Weiterentwicklung von Bauweisen, dieser Tatsache nicht gerecht wird. Hinzu kommt, dass auch der Oberfläche in den straßenbautechnischen Regelwerken nicht die dementsprechend erforderliche Aufmerksamkeit/Priorität beigemessen wird. Mit Bezug auf die steigenden Anforderungen an die Oberfläche oder deren Qualität ist festzuhalten, dass die straßenbautechnischen Regelwerke in diesen Punkten Defizite aufweisen. So werden beispielsweise in den (ZTV Beton-StB) nur für die Griffigkeit und Ebenheit direkte Anforderungen im Rahmen der bauvertraglichen Abwicklung gestellt und überprüft. Eine objektive Beurteilung beziehungsweise Quantifizierung der Qualität ist somit nur stark eingeschränkt möglich.

Im Betonstraßenbau wird daher seit einigen Jahren der Ansatz verfolgt, die Oberfläche mit einer Schlüsselfunktion zu besetzen beziehungsweise diese einer performanceorientierten Betrachtung zu unterziehen. Da der Reifen das Fahrzeug und somit den Nutzer mit der Straße verbindet, wurden in einem ersten Schritt die drei Kriterien des Reifenlabels:

- Nasshaftung (Bremsweg auf nasser Straße),
- externes Rollgeräusch (Lautstärke) und
- Rollwiderstand (Kraftstoffverbrauch)

als mögliche Merkmale aufgegriffen (siehe Abbildung 11). Obwohl diese auch im Straßenbau betrachtet werden, sind die Kenngrößen nicht direkt miteinander vergleichbar. Eine abgestimmte Operationalisierung in Richtung Reifen und Straße ist daher nur bedingt möglich und sollte künftig verbessert werden.

Das aktuell gültige Regelwerk des Straßenbaus beachtet derzeit die Merkmale Griffigkeit und Ebenheit, die auch bauvertraglich geschuldete Leistungen darstellen.

Das Rollgeräusch beziehungsweise der Geräuschpegel wird aktuell nicht im oben angeführten Sinne betrachtet, sondern pauschal über einen Korrekturwert für Straßenoberflächen (DSD) bewertet. Dieser ist den verschiedenen Fahrbahnoberflächen fest zugeordnet. Gemäß den Richtlinien für Lärmschutz an Straßen (RLS-19) beachtet der Korrekturwert den Einfluss der Straßenoberfläche auf den sogenannten Mittelungspegel. Das Merkmal Rollwiderstand wird derzeit nicht verfolgt, gleichwohl hier eine direkte Verbindung zum Energieverbrauch im Güter- und Personenverkehr auf Straßen besteht.

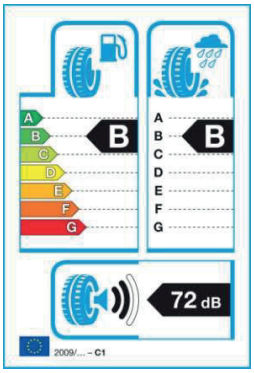



*Abbildung 11: EU-Reifenlabel*

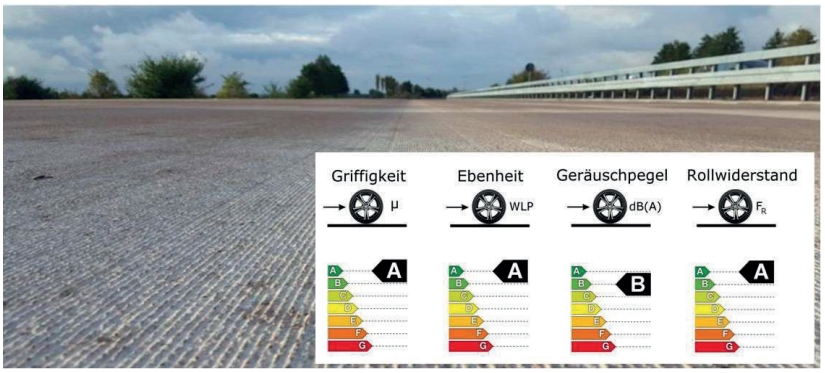



*Abbildung 12: Fahrbahnoberfläche „Texturgrinding Typ S 2,4 / 2,2“ mit Effizienzklassen der Performanceindizes (Oberflächenlabel)*

Abschließend ist anzumerken, dass der Straßenbau im Bereich von Bundesfernstraßen historisch über viele Jahrzehnte gewachsen und entsprechend konservativ geprägt ist. Systembedingt findet folglich im Allgemeinen ein verzögertes Reagieren auf neue Gegebenheiten statt. Die Einführung einer neuen Technologie im Regelwerk kann daher Zeiträume von 10 bis 20 Jahre einnehmen. So wird beispielsweise seit 7 Jahren, basierend auf den Erkenntnissen der letzten Jahre, das wichtigste Regelwerk (ZTV Beton-StB) für den Bereich Betonstraßenbau überarbeitet. Nach der Einführung in ein zwei bis zwei Jahren wird dieses theoretisch für ca. 10 Jahre Gültigkeit besitzen. In Anlehnung an die bisherigen Überarbeitungszyklen werden in den Jahren 2023 bis 2033 jene Straßen gebaut, die auf den Erkenntnissen und Forschungsergebnissen der letzten 5 bis 10 Jahre basieren. Setzt man eine Nutzungsdauer von 30 Jahren an, ergibt sich der maximale Wirkungshorizont bis 2063 (siehe Abbildung 13).

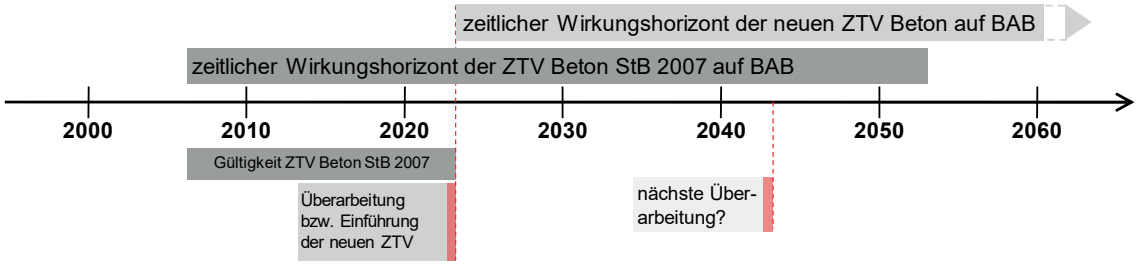



*Abbildung 13: Allgemeine Darstellung der Zeithorizonte im Kontext mit der Erstellung und Gültigkeitsdauer von Regelwerken im Straßenbau, Beispiel (ZTV Beton)*

Resümierend sind insbesondere im Bereich der Grundlagen Verbesserungen anzustreben, die im Ergebnis ein zielorientiertes Handeln beziehungsweise Reagieren in den ersten beiden Prozessphasen des Lebenszyklus ermöglichen. Hinzu kommt, dass das aktuelle Regelwerk keine systematische Rückmeldung der im Laufe eines Lebenszyklus ermittelten Kennwerte vorsieht und keinem ganzheitlichen performanceorientierten Ansatz folgt. Somit ist die „Steuerung" oder gar „Regelung" hinsichtlich einer Optimierung/Weiterentwicklung der Qualität vorhandener Oberbauvarianten nicht möglich. Dementsprechend kann auch nicht auf veränderte globale Zielvorgaben und deren Zielerreichung direkt reagiert werden. Es bleibt die Frage: **Wie lassen sich die konventionell verwendeten Systeme an die Herausforderungen des modernen Straßenbaus anpassen, um Straßen im Sinne eines nachhaltigen Handelns weiterentwickeln zu können?**

## 6. Ausgewählte Schritte auf dem Weg zur Nachhaltigkeit

Im Rahmen der oben angeführten Regelwerksüberarbeitung (ZTV Beton) und der systematischen Weiterentwicklung der Betonbauweise wird angestrebt, diesen Zustand sukzessive zu beseitigen beziehungsweise zu verbessern. So wurden und werden beispielsweise zur Beurteilung der Qualität und Leistungsfähigkeit des Straßenoberbaus – im Rahmen von speziellen Netzuntersuchungen – verschiedene Kenngrößen der Straßenoberfläche, der Konstruktion und der Baustoffe aufgenommen und auf eine mögliche Verwendung im Zusammenhang mit der DMAIC-Methode (Abbildung 9) getestet. Im Ergebnis soll künftig eine flexible und zielorientierte Ausrichtung der Leistungsfähigkeit/Qualität des Straßenoberbaus mittels eines „Top-down-Modells mit implementierter Schnittstellenkommunikation" (Wieland 2019) ermöglicht werden, bei dem die Oberflächenperformance im Vordergrund steht (siehe Abbildung 14 und Abbildung 15). Dabei werden die zur Steuerung herangezogenen Kenngrößen nachfolgend als sogenannte KPI (Key Performance Indicator) bezeichnet.

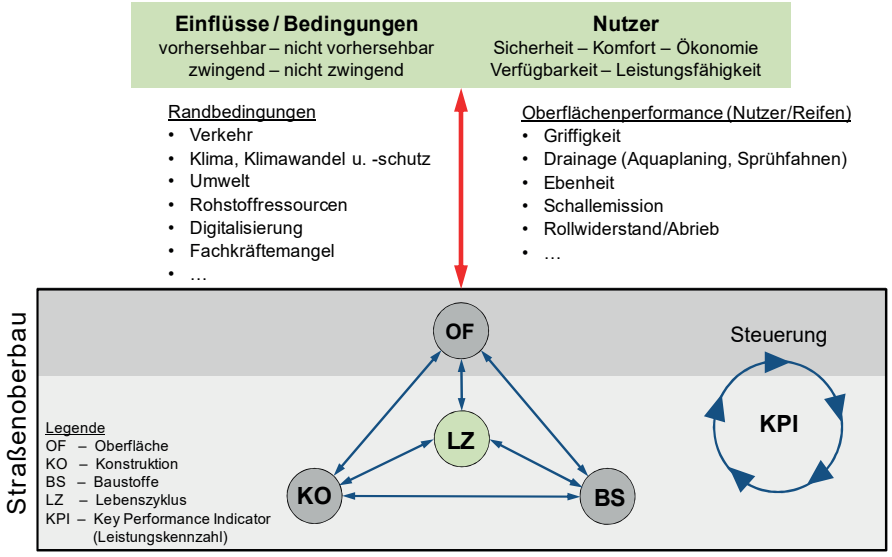



*Abbildung 14: Allgemeines KPI-Modell (Wieland 2019)*

Für die Kommunikation in und zwischen den einzelnen Lebenszyklusphasen (LZP) im Kontext mit dem Straßenoberbau ist eine entsprechende Operationalisierung der einzelnen Leistungskennzahlen notwendig. In Abbildung 15 wird das oben angeführte KPI-Modell für die Oberflächenperformance Griffigkeit

exemplarisch spezifiziert. An dieser Stelle ist anzumerken, dass hier nur jene Kenngrößen aufgeführt sind, die derzeit in der Praxis Anwendung finden beziehungsweise den Stand der Technik abbilden.

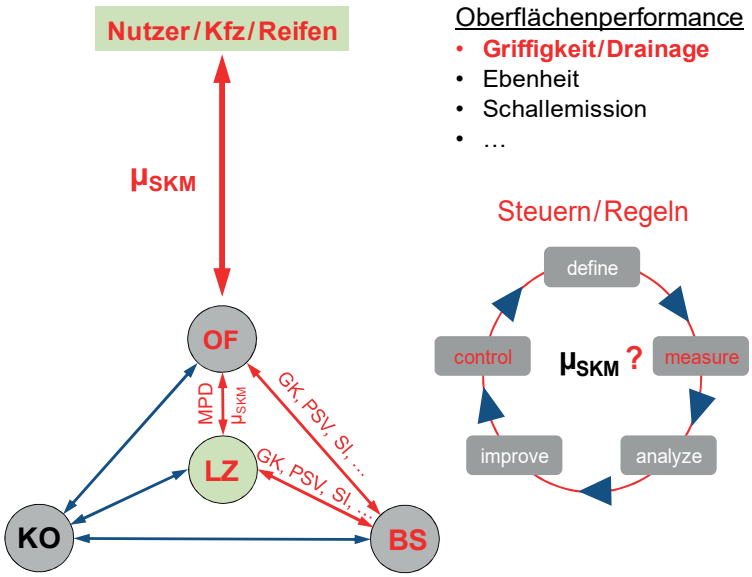



*Abbildung 15: Exemplarische Darstellung der operationalisierten Oberflächenperformance „Griffigkeit" mit dem straßenbauspezifischen KPI $\mu_{SKM}$ für Waschbetonoberflächen (Wieland 2019)*

Für die Waschbetonoberfläche, die derzeit den Standard in der Betonbauweise (Bereich Bundesautobahn) darstellt, lassen sich hieraus folgende wichtige Zusammenhänge ableiten.

- Die Performance Griffigkeit wird im Innen- und Außenverhältnis ausschließlich über den KPI $\mu_{SKM}$ (V = 80 km/h) beschrieben und kommuniziert.
- Als operationalisierte Kenngrößen dienen in erster Linie Kenngrößen, die Aussagen zur Leistungsfähigkeit der Gesteinskörnung (zum Beispiel GK – Größtkorn, PSV – Polierwert, SI – Kornformkennzahl) treffen.
- Die mittlere Profiltiefe MPD (Mean Profile Depth) wird im Innenverhältnis (Herstellungsphase, bauvertragliche Abnahme) zur Charakterisierung der Oberfläche verwendet.
- Die Konstruktion nimmt keinen Einfluss auf die Griffigkeit.

Das heißt, die Oberflächentextur kann in der Planungsphase nur über das verwendete Gestein (zum Beispiel Größtkorn, Korngrößenverteilung, SI- und PSV-Wert) beeinflusst werden. In der Herstellungsphase ergibt sich die Textur einbautechnologisch in ihrer Ausprägung und Homogenität durch die Fertigung und durch die beim Ausbürsten erzielte mittlere Profiltiefe. Eine direkte Steuerung oder Regelung des Ausbürstprozesses in Hinblick auf die Oberflächenperformance Griffigkeit mithilfe der Kenngröße MPD ist nur begrenzt möglich. Das liegt im Wesentlichen darin begründet, dass die geometrische Feingestalt (Rauheit) der Oberfläche, die als Primärgröße für die Performances Griffigkeit, Lärmminderung, Sprühfahnenbildung und dem Rollwiderstand gilt, mit dem MPD-Wert nicht hinreichend abgebildet wird. Im Ergebnis ist daher eine gezielte Steuerung der Oberflächentextur beziehungsweise der Oberflächenperformances nur in begrenztem Umfang möglich. Diese Aussage kann im Grundsatz auch auf andere Standardtexturen des Straßenbaus übertragen werden.

Für die Qualitätsbewertung von Straßenoberflächen wurde ein erster Modellansatz entwickelt, der hierfür einen sogenannten Effektivitätsindex für Straßenoberflächen (EStrO) generiert (Wieland 2019; Wieland, Jungen 2020). Er ist ein Maß für die Gesamtwirksamkeit, welches das Verhältnis von erreichtem Ziel zu definiertem Ziel zum jeweiligen Betrachtungszeitpunkt oder über einen gewählten Zeitraum beschreibt. Das Ziel setzt sich dabei aus den gewählten Einzelzielen zusammen, deren Leistungsgrad aus den Verhältniswerten der inhärenten Merkmale des Objektes bestimmt wird. In diesem ersten Ansatz sind die Performanceeigenschaften der Straßenoberfläche als ein Satz inhärenter Merkmale des Objekts "Oberfläche" auch im Sinne der DMAIC-Methode zu verstehen. Der Effektivitätsindex erschafft somit ein objektives Beurteilungskriterium, mit dem sich die Qualität visualisieren lässt. Die Abbildung 17 zeigt an einem frei gewählten Fallbeispiel den entwickelten Modellansatz für die Qualitätsbewertung einer Straßenoberfläche. Hierzu wurden in einem ersten Schritt vier identifizierte Hauptmerkmale

(Oberflächenperformances) – mit einem exemplarisch festgelegten Wichtungsanteil – zum Ansatz gebracht (siehe Tabelle 1).

*Tabelle 1: Exemplarisch gewählte Eingangswerte für die Beispieldarstellung in Abbildung 17*

| Performance der Oberfläche (inhärente Merkmale) | Wichtungsanteil [-] (Anteil am Gesamtziel) | Leistungsgrad [-] (LZ-Anfang) | Leistungsgrad [-] (LZ-Zeitpunkt $t_{x,i}$) | Leistungsgrad [-] (LZ-Ende) |
|---|---|---|---|---|
| Griffigkeit / Drainage | 0,30 | 1,00 | 0,80 | 0,40 |
| Ebenheit | 0,20 | 0,85 | 0,75 | 0,70 |
| Geräuschpegel | 0,25 | 1,20 | 1,05 | 0,55 |
| Rollwiderstand | 0,25 | 0,80 | 0,85 | 0,80 |

Die Qualität der Straßenoberfläche hängt auch von anderen Kriterien ab, demnach ist zu prüfen, ob eine Erweiterung des Modells zweckmäßig beziehungsweise zielführend ist. Jeder Performance ist ein zeitlich bezogener Leistungsgrad zugeteilt, der auch Werte > 1 annehmen kann. Als Bewertungszeitpunkte wurden beispielhaft der Anfang und das Ende im Lebenszyklus (LZ) sowie ein Orientierungspunkt in der Mitte festgelegt.

Die Abbildung 17 zeigt die grafische Ergebnisdarstellung. Die vorderste Fläche (Summe aller farbigen Rechteckflächen) der Grafik beschreibt die erzielte Effektivität der Oberfläche zu Beginn des LZ (zum Beispiel direkt nach Herstellung der Fahrbahndecke). Der Flächeninhalt dieser Fläche ist im Vergleich zu jenem der schwarz gerahmten Fläche zu sehen, die einer 100%-igen Zielerreichung entspricht. Flächenanteile – die aus einem Leistungsgrad > 1 resultieren – werden nicht beachtet und sind als Reserve oder unnötiger Überschuss an Qualität zu werten. Die zu evaluierende Oberfläche weist zum Anfangszeitpunkt einen Effektivitätsindex EStrO von 0,92 auf. Die mittlere und hintere Fläche in der Grafik zeigen die zum Betrachtungszeitpunkt (tx,i - im LZ und t1 - Ende des LZ) vorliegenden Effektivitätsindizes.

Gemäß dem allgemeinen Wissen, dass sich der jeweilige Leistungsgrad im Zuge der Nutzung ändert, sind hier Szenarien der Ab- und Zunahme dargestellt. Aus der Praxis ist bekannt, dass insbesondere für die Oberflächenperformances Griffigkeit, Ebenheit und Geräuschpegel mit einer Veränderung des Leistungsgrades beziehungsweise des EStrO -Wertes zu rechnen ist. Für die Beschreibung der Effektivität über den gesamten Lebenszyklus wird das entstandene Hüllvolumen zwischen Anfang und Ende des Lebenszyklus (EStrO,ges) ermittelt. Die Approximation der Hüllgeometrie erfolgt dabei unter Berücksichtigung weiterer Stützpunkte und ist somit hinreichend genau beziehungsweise kann als polygonales Objekt beschrieben werden. Das Gesamtvolumen wird letztlich mit Integralen berechnet. Für den in Abbildung 17 dargestellten Musterfall beträgt $E_{StrO,ges}$ = 0,82.



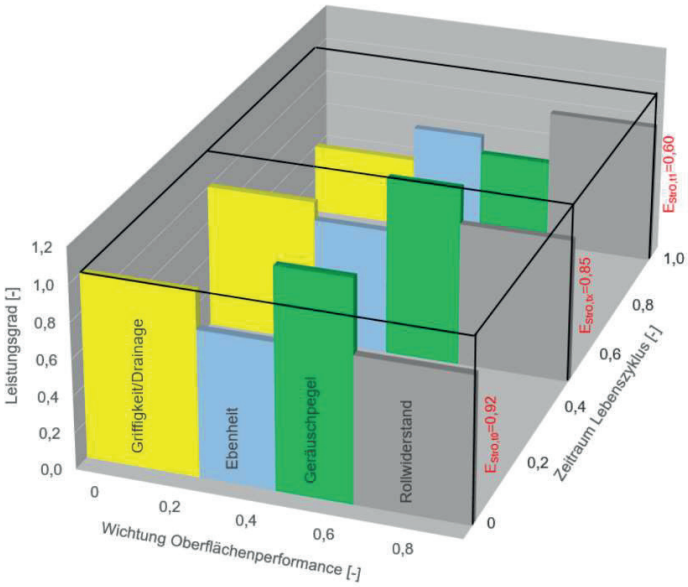


*Abbildung 16: Gelabelter Reifen auf einer Fahrbahnoberfläche mit Waschbetontextur*

*Abbildung 17: Ansatz für die gesamtheitliche Bewertung der Qualitätsmerkmale von Straßenoberflächen mittels Effektivitätsindex $E_{StrO}$ (Wieland, Jungen 2020)*

Der Effektivitätsindex gibt keine grundsätzliche Aussage über die Nachhaltigkeit des Straßenoberbaus und ist nicht in Verbindung mit der „Zustandserfassung und -bewertung der Fahrbahnoberflächen von Straßen“ (ZTV ZEB-StB) zu sehen.

Der Effektivitätsindex für Straßenoberflächen dient dazu, künftig die Produktqualität über die verschiedenen Lebenszyklusphasen hinweg, konsistent bewerten, vergleichen beziehungsweise steigern zu können. Er stellt für die zielgerichtete Weiterentwicklung des Betonstraßenbaus eine wichtige Ergänzung dar.

Der Effektivitätsindex soll künftig für die systemische Weiter- und Neuentwicklung von Technologien zur Oberflächengestaltung von Fahrbahndecken für Bundesfernstraßen genutzt werden. Dies gilt auch im Zusammenhang mit dem Top-Down-Modell (Wieland 2019), welches seit einiger Zeit im Betonstraßenbau genutzt wird, um den Gedanken der „performanceorientierte Fahrbahnoberflächen“ in die Praxis umsetzen zu können. Aus diesem Grund werden mehrere Verfahren/Technologien zur gezielten Herstellung von Oberflächen und/oder Oberflächentexturen in der Praxis getestet und erprobt. Für den Betonstraßenbau sind hier stellvertretend das sogenannte „Texturgrinding“ und das „Horizontalschleifen“ zu nennen. Die Abbildungen 17 und 18 zeigen deratige Texturen direkt nach der Herstellung.



*Abbildung 18: Grindingoberfläche direkt nach der Herstellung „Texturgrinding Typ S“*



*Abbildung 19: Waschbetonoberfläche nach dem Horizontalschleifen (Quelle OAT)*

In einer analogen Vorgehensweise kann die Darstellung der Qualitätsmerkmale aus Konstruktion und Baustoff erfolgen. In einem ersten Schritt wird hierzu die Betonfahrbahndecke isoliert betrachtet. Grundsätzlich ist die Qualität einer Betonfahrbahn voll gegeben, wenn sie die Anforderungen an die Oberfläche erfüllt und die einzelnen Fahrbahnplatten keine Schäden beziehungsweise Versagenszustände aufweist. Da die Qualität der Oberfläche gesondert betrachtet wird, erfolgt die Bewertung des Oberbaus mit Betondecke (Substanzbewertung) allein über das Merkmal „Ausfallrate“. In Abbildung 20 ist der qualitative Verlauf der Ausfallrate von Betonfahrbahndecken beispielhaft dargestellt (Wieland, Villaret et. al 2017). Diese kann basierend auf dem aktuellen Wissenstand auch prognostiziert werden, so dass die erwartete Effektivität schon nach der Herstellung sowie über den Nutzungszeitraum hinweg dargestellt werden kann. Dabei ist die Qualität der Reziprokwert des Integrals (Flächeninhalt unter der Kurve) der Funktion der Ausfallrate. Wenn am Ende der geplanten (normativen) Nutzungsdauer der betrachtete Streckenabschnitt eine Ausfallrate von 10 % besitzt, wird die Qualität hinsichtlich der strukturellen Substanz 1,0 gesetzt.

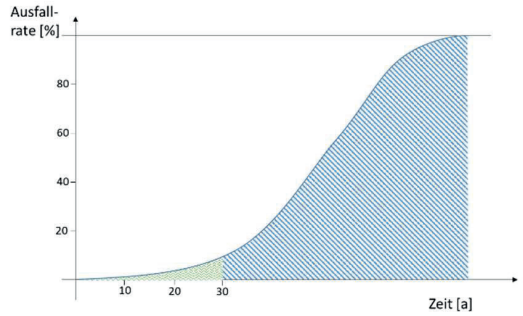



*Abbildung 20: Modellansatz für die ganzheitliche Bewertung der Materialperformance Beton*

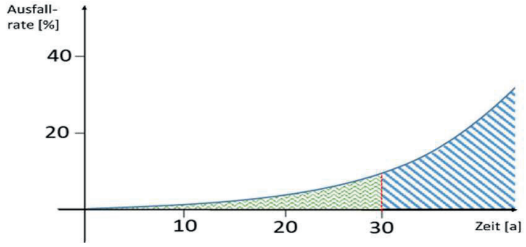



*Abbildung 21: Entwicklung der Ausfallrate über die Nutzungszeit*

Wie in Kapitel 4 (Abbildung 4) angeführt, kann die Nachhaltigkeit und auch die Produktqualität insbesondere in der Planungs-, Dimensionierungs- und Herstellungsphase beeinflusst werden. Demnach sind schon zu diesem Zeitpunkt entsprechende Kenngrößen (KPI) erforderlich, die gemäß dem Top-Down-Modell und der DMAIC-Methode eine Steuerung der Qualität zulassen beziehungsweise praktisch auch ermöglichen. Aufgrund des Wissenstandes und gemäß dem gültigen Regelwerk (hier RDO Beton und ZTV RDO Beton-StB), kommen als primäre Kenngrößen für den Baustoff die Spaltzugfestigkeit und für die Konstruktion die Deckendicke in Frage. Basierend auf zahlreichen Untersuchungen sowie durchgeführter Parameterstudien mittels FEM hat sich gezeigt, dass beispielsweise für den Baustoff ergänzend noch der E-Modul als auch die Wärmedehnzahl des Betons als derartige Kenngrößen anzuführen sind. Aufgrund fehlender allgemeingültiger Prüfverfahren aber auch, um die Handhabbarkeit des Systems besser überprüfen zu können, bleiben diese vorerst unbeachtet. Auch bei einer Betrachtung der gesamten Oberbaukonstruktion wären noch weitere KPI erforderlich, um beispielsweise die Tragfähigkeit oder die Auflagerungsbedingungen der Fahrbahndecke auf der Unterlage/Tragschicht beschreiben zu können.

Im Sinne einer ganzheitlichen Betrachtung ist letztlich sicher zu stellen, dass die aufgestellten KPI über den gesamten Lebenszyklus hinweg für die Prozess- und Schnittstellenkommunikation geeignet sind. Für einzelne Prozesse können ggf. zusätzliche Kenngrößen (sekundäre KPI) von Nöten sein, um letztlich Einfluss auf die primären KPI beziehungsweise die Produktqualität nehmen zu können. Mit den oben angeführten primären KPI Deckendicke und Spaltzugfestigkeit wurden in der Praxis schon zahlreiche Erfahrungen in den verschiedenen Lebenszyklusphasen gesammelt. So zeigt die Anwendung in der Herstellungs- und Abnahmephase im Ergebnis, dass die Qualität von Fahrbahndecken – die in konventioneller Vorgehensweise hergestellt worden – stark divergiert (siehe Abbildung 10). Untersuchungen, die zu einem späteren Zeitpunkt im Lebenszyklus im Bundesautobahnnetz erfolgten und mit einer umfangreichen Beprobung einhergingen, bestätigten diese Ergebnisse in ihrer Aussage. Sie haben aber gezeigt, dass eine durchgängige und widerspruchsfreie Anwendung auch im Sinne des Systems „Steuerung der Qualität“ möglich ist. Zudem erfolgte eine vor- als auch rückwärts gerichtete Verwertung im Lebenszyklus. Demnach dienten die ermittelten Werte der Spaltzugfestigkeit u. a. zur Berechnung der Restnutzungsdauer im Kontext mit der Erhaltungsplanung als auch zur Erfahrungssammlung im Kontext mit der Ableitung einer Anforderung für das künftige Regelwerk. Die Darstellung im Abbildung 22 zeigt exemplarisch den Informationsfluss beziehungsweise die Kommunikationsrichtungen zwischen den Phasen als auch über den Lebenszyklus hinweg. Zudem wird aufgezeigt, dass für den ganzheitlichen Ansatz eine zentrale Sammlung und Analyse dieser Werte erfolgen muss.

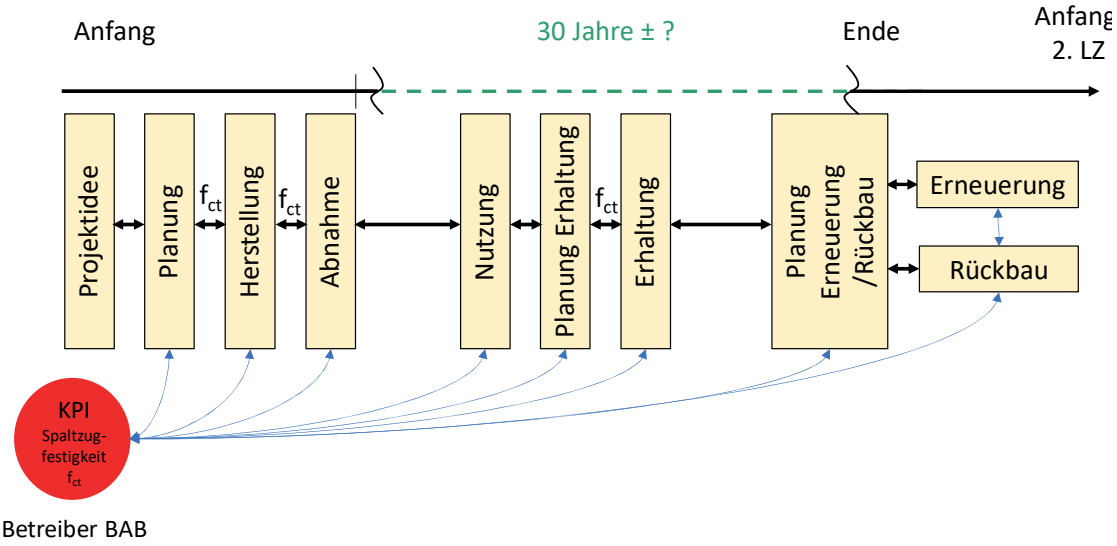



*Abbildung 22: Schematische Darstellung der Kommunikationsrichtungen primärer KPI innerhalb des Lebenszyklus*

Mit Hilfe der RDO Beton lassen sich diese Kenngrößen gegenwärtig in der Planungs- und Ausschreibungsphase verankern und durch die Vereinbarung der neuen ZTV RDO Beton-StB bauvertraglich umsetzen. Damit sind die Grundlagen für eine signifikante Verbesserung der Qualität in diesen Phasen gelegt. Die Qualitätsverbesserung ist in erster Linie in einer geringeren Streuung der Kenngrößen zu sehen, wodurch Unterdimensionierungen (Ressourcenverschwendung durch vorzeitiges Versagen) und Überdimensionierungen (ggf. Ressourcenverschwendung, wenn zum Beispiel die Tragschicht eine kürzere Lebensdauer hat als die Betondecke) vermieden werden. Also wäre es wünschenswert, die Betondecke beispielsweise für 30 - 40 Jahre zu konzipieren und die Tragschicht in ihrer Nutzungsdauer so abzustimmen, dass diese entweder genauso lang oder doppelt so lang hält.

In der Bauausführungsphase sollte der Qualitätsgedanke im Vordergrund stehen. Dazu sind besondere Anstrengungen der Auftragnehmer erforderlich, um die Schnittmenge zwischen „sollen“, „wollen“ und „können“ zu erhöhen (Abbildung 6). Für die gezielte Erreichung der KPI in einem gewünschten Konfidenzbereich sollten daher monetäre Anreize geschaffen werden, da dies dem allgemeinen Interesse hinsichtlich der Nachhaltigkeit dient.

Eine ganze Reihe von ehemaligen Autobahnbaulosen wurde bereits einer Substanzbewertung unterzogen, um den benötigten Erfahrungshintergrund aufzubauen. Auch bei einem Teil neu gebauter Abschnitte wurden die relevanten Eingangsgrößen als Startwerte ermittelt. Für eine strategische Netzbewertung ist jedoch die Untersuchung aller Abschnitte im Netz erforderlich, die Aussagen über den Zeitpunkt der zu erwartenden grundhaften Erneuerungen geben können.

## 7. Zusammenfassung

Deutschland verfolgt eine nationale Nachhaltigkeitsstrategie, die eine nachhaltige Entwicklung in definierten Bereichen anstrebt und über Schlüsselindikatoren identifiziert. Für das Ziel einer systematischen Adaption der Wirkungsebene Straßen- beziehungsweise Betonstraßenbaus, sind dabei die Nachhaltigkeitspostulate Luftbelastung, Ressourcenschonung und Mobilität von besonderem Interesse. In diesem Beitrag wird über den wissenschaftlichen Stand im Bereich des Betonstraßenbaus berichtet und mögliche Wege und Praxistools beschrieben.

Nachhaltigkeitskonzepte im Straßenbau gründen zwangsläufig auf der „Technischen Qualität“ und der „Prozessqualität“, da ohne sie eine Steuerung der Nachhaltigkeitsaspekte Soziales, Ökonomie und Ökologie nicht möglich ist.

Die Nachhaltigkeitskonzepte können im Straßenbau nur unter Berücksichtigung der Zeitdimension integriert werden, da eine Abbildung der Lebenszyklen gemäß dem „Cradle to Cradle Prinzip“ inklusive wichtiger Lebenszyklus- bzw. Prozessphasen erfolgen muss.

Nur in den Lebenszyklusphasen Planung/Dimensionierung und Herstellung kann eine signifikante Beeinflussung der Nachhaltigkeit erfolgen. Aus ingenieurtechnischer Sicht muss insbesondere der Nachhaltigkeitsaspekt „Qualität“ verfolgt werden, da nur so auf veränderte Wichtungen der Nachhaltigkeitsaspekte Ökonomie – Ökologie – Soziologie reagiert werden kann.

Eine objektive Beschreibung und Bewertung der Qualität/Produktqualität ist zwingend erforderlich, da das Qualitätsverständnis zwischen Auftraggeber („SOLL“) und Auftragnehmer („WOLLEN“ und „KÖNNEN“) systembedingte Diskrepanzen aufweist. Im technischen Bereich wird dies mit messbaren Größen beziehungsweise in Form von Kennzahlen ermöglicht, so dass die Qualität durch Übereinstimmung von SOLL und IST mittels Erfüllung von Spezifikationen oder Vorgaben überprüft werden kann. Dabei sind alle an der Produktentstehung beteiligten Prozesse einzubeziehen.

In Anlehnung an die DMAIC-Methode können Steuerung und Regelung der Prozesse so erfolgen, dass die übergeordneten und prozessbezogenen Anforderungen sowie Ziele erreicht werden.

Die dafür erforderlichen Kenngrößen und Qualitätsmerkmale wurden aus den Anforderungen des Straßennutzers und des Betreibers abgeleitet. Bezogen auf die Straßeninfrastruktur beziehungsweise den Straßenoberbau stehen demnach die Oberflächeneigenschaften und die Verfügbarkeit im Fokus. Es muss ein Lösungsansatz verfolgt werden, bei dem neben der Oberflächenqualität, die Langlebigkeit und die Erhaltungsarmut von Oberbaukonstruktionen im Vordergrund stehen.

Die Ergebnisse durchgeführter Untersuchungen an BAB zeigen jedoch, dass die in den letzten Jahrzehnten verwendete Vorgehensweise des Straßenbaus Defizite aufweist. 50 Prozent aller gemäß dem aktuellen Regelwerk hergestellten Fahrbahndecken erreichen die theoretisch angesetzte Lebens-/Nutzungsdauer von 30 Jahren nicht und weisen somit eine unzureichende Produktqualität auf. Auch in der Entwicklung der technischen Regelwerke ist ein Paradigmenwechsel notwendig, um die notwendige Dynamik und Anpassungsfähigkeit an gegenwärtige sowie künftige Herausforderungen zu gewährleisten.

Seit einigen Jahren wird in Theorie und Praxis daher ein neuer Weg verfolgt, der davon ausgeht, dass die Straßenoberfläche eine Schlüsselrolle einnimmt. Der Ansatz des Top-Down-Modells geht davon aus, dass primär die Anforderung an die Oberfläche zu erfüllen ist und der Baustoff und später die Konstruktion, aus den Anforderungen (Lastenheft) der Oberfläche abzuleiten sind. Dabei baut er auf bestehende Teillösungen auf, die bereits als technische Regelwerke für den Straßenbau vorliegen. Zur Beurteilung der Qualität und Leistungsfähigkeit der Straßenoberfläche beziehungsweise des -oberbaus wurden entsprechende inhärente Merkmale abgeleitet. Zudem konnten im Rahmen von speziellen Netzuntersuchungen relevante Kenngrößen ermittelt werden, die im Zusammenhang mit der DMAIC-Methode eine Steuerung der Leistungsfähigkeit/Qualität des Straßenoberbaus ermöglichen. Außerdem können diese KPI (Key Performance Indicator) zur transparenten Kommunikation über den gesamten Lebenszyklus hinweg oder auch für die Schnittstellen zwischen benachbarten Lebenszyklusphasen oder Prozessen verwendet werden.

Für die Bewertung der Produktqualität im Sinne des Nutzers und des Betreibers wurde ein Grundmodell entwickelt, dass eine ganzheitliche und objektive Bewertung zu einem beliebigen Zeitpunkt im Lebenszyklus aber auch über den gesamten Lebenszyklus hinweg ermöglicht. Aktuell kann damit die Qualität der Fahrbahnoberfläche und der Substanz (Baustoff – Konstruktion) dargestellt/bewertet werden. Im Ergebnis wird die erreichte Effektivität der hergestellten Betonfahrbahndecke als Zahlenwert zwischen 0 und 1 abgebildet. Somit lassen sich Defizite und Überschüsse in Bezug auf die Produktqualität aufzeigen. Ferner ist eine weiterführende Verwendung im Sinne einer objektiven Nachhaltigkeitsbewertung in der Wirkungsebene Straßenbau (hier Betonstraßenbau) als auch in übergeordneten Wirkungsebenen möglich.

Ausblick

Mit den beschriebenen Ansätzen und Werkzeugtools gilt es nunmehr, künftig eine schnelle Weiterentwicklung des traditionellen Betonstraßenbaus sowie bestehender Technologien wie beispielsweise das „Texturgrinding“ (insbesondere Texturtyp A) sicher zu erzielen aber auch neue Oberbausysteme (zum Beispiel Hybridbauweise, insbesondere Vertikalhybrid) zu entwickeln. Dabei können die Ziele – allen Anforderungen an den Straßenoberbau gerecht zu werden und insbesondere die Nutzungsdauer von Straßenkonstruktionen zu optimieren – erreicht werden. Vielmehr sollte der neu eingeschlagene Weg jedoch dafür genutzt werden, die Umsetzung der im Rahmen der nationalen Nachhaltigkeitsstrategie fixierten Ziele im Wirkungsbereich Straßenbau zu unterstützen.

Es gilt entsprechend das Ziel, die Indikatorenbereiche

- Luftbelastung (Gesunde Umwelt erhalten),
- Ressourcenschonung (Ressourcen sparsam und effizient nutzen),
- Mobilität (Mobilität sichern – Umwelt schonen)

zu bedienen.

Da der Mobilität die Indikatoren „Endenergieverbrauch“ im Güter- und Personenverkehr zugeschrieben sind, erlangen diese im Kontext mit der im Artikel vorgestellten Vorgehensweise eine Sonderstellung. Als Zielstellung für diese Indikatoren wurde ein Zielkorridor von jeweils minus 15 bis minus 20 Prozent bis zum Jahre 2030 fixiert.

An dieser Stelle kann der Straßenbau einen signifikanten Betrag leisten. So kann zum einen durch die Erhöhung der Produktqualität die Verfügbarkeit gesteigert und das Stauaufkommen minimiert werden. Zum anderen kann die Oberflächenperformance „Rollwiderstand“ von Straßen gezielt verbessert werden.

Weitere Möglichkeiten bestehen darin, durch die allgemeine Erhöhung der Produktqualität von Betonfahrbahndecken Ressourcen zu schonen. Oder den lebenszyklusübergreifenden Gedanken in die Planung und Dimensionierung beziehungsweise dieser in den zugehörigen Regelwerken zu verankern. So sollte schon bei der Konzipierung des Oberbaus auf die Rückbaufähigkeit, Recyclingfähigkeit oder Wiederverwendbarkeit geachtet werden.

Gemäß dem Ausspruch von Alexander Graham Bell: „Geh nicht immer auf dem vorgezeichneten Weg, der nur dahin führt, wo andere bereits gegangen sind.“ gilt es den Mut aufzubringen, neue Wege zu beschreiten.

## Quellen

AGENDA 21 (1992): Konferenz der Vereinten Nationen für Umwelt und Entwicklung. Rio de Janeiro. (AGENDA 21, 1992)
Bundesministerium des Innern, für Bau und Heimat (2019): Leitfaden Nachhaltiges Bauen, Zukünftiges Planen, Bauen und Betreiben von Gebäuden. Berlin, 01/2019 (BMI 2019)

DIN EN ISO 9000:2005-12: Qualitätsmanagementsysteme - Grundlagen und Begriffe. (DIN EN ISO 9000, 2005)
DIN IEC 60050-351:2014-09: Internationales Elektrotechnisches Wörterbuch - Teil 351: Leittechnik. (DIN IEC 60050-351, 2014)

Dyllick, T.; Hockerts, K. (2002): Business Strategy and the Environment. Published online in Wiley InterScience (www.interscience.wiley.com). (Dyllick, Hockerts 2002)

Forschungsgesellschaft für Straßen- und Verkehrswesen (2006): Zusätzliche Technische Vertragsbedingungen und Richtlinien zur Zustandserfassung und -bewertung von Straßen, Ausgabe 2006 ), (ZTV ZEB-StB) FGSV Verlag, Köln

Forschungsgesellschaft für Straßen- und Verkehrswesen (2007): Zusätzliche Technische Vertragsbedingungen und Richtlinien für den Bau von Tragschichten mit hydraulischen Bindemitteln und Fahrbahndecken aus Beton, Ausgabe 2007 (ZTV Beton-StB), FGSV Verlag, Köln

Forschungsgesellschaft für Straßen- und Verkehrswesen (2009): Richtlinien für die rechnerische Dimensionierung von Betondecken im Oberbau von Verkehrsflächen, Ausgabe 2009 (RDO Beton 09), FGSV Verlag, Köln

Forschungsgesellschaft für Straßen- und Verkehrswesen (2012): Richtlinien für die Standardisierung des Oberbaus von Verkehrsflächen, Ausgabe 2012 (RStO 12), FGSV Verlag, Köln
Forschungsgesellschaft für Straßen- und Verkehrswesen (2019): Richtlinien für den Lärmschutz an Straßen, Ausgabe 2019 (RLS-19), FGSV Verlag, Köln

Forschungsgesellschaft für Straßen- und Verkehrswesen (2020): Zusätzliche Technische Vertragsbedingungen und Richtlinien für den Bau von Betondecken im Oberbau von Verkehrsflächen bei Anwendung der RDO-Beton, Ausgabe 2020 (ZTV RDO Beton-StB 20), FGSV Verlag, Köln

UNO (1987): Brundtland-Report „Our Common Future“, United Nations Organization (UNO), 08/1987

Villaret, S. (2012): Der Zusammenhang zwischen Betonfestigkeit und Deckendicke. Straße und Autobahn, 63, 06, Kirschbaum Verlag, Bonn, 379 - 1385. (Villaret 2012)

Villaret, S., Wieland, M. (2019): Informationssysteme zur permanenten Einschätzung des Straßenzustands. Straße und Autobahn, 70, 12, Kirschbaum Verlag, Bonn, 1084 - 1093. (Villaret, Wieland 2019)

Wieland, M., Villaret, S., Riwe, A. (2017): Bewertung der strukturellen Substanz für die systematische Erhaltungsplanung von Betonfahrbahndecken. Straße und Autobahn, 68, 2, Kirschbaum Verlag, Bonn, 79 - 90. (Wieland, Villaret et. al 2017)

Wieland, M. (2019): Performanceorientierte Fahrbahnoberflächen. Tagungsband 17. VDI-Fachtagung Reifen – Fahrwerk – Fahrbahn. (Wieland 2019)

Wieland, M., Jungen B. (2020): Performanceorientierte Fahrbahnoberfläche. Straße und Autobahn, 71, 1, Kirschbaum Verlag, Bonn, 33 - 41. (Wieland, Jungen 2020)

# Specifika diagnostiky vozovek s CB krytem se zaměřením na pohybové plochy letišť

*Autor/Autoři : Ing. Luděk Mališ, Ing. Robert Kaděrka, PhD., Ing. Jiří Jareš, CSc.*

*Tel .: +420 777 970 301, +420 777 970 304*
*Mail: LMa@pavex.cz, RKa@pavex.cz*

## Obecné cíle diagnostiky letišť

Diagnostický průzkum vozovek je významnou součástí realizace staveb i následné správy pozemních komunikací a letištních ploch. Slouží pro správce komunikací při procesu sledování stavu vozovek a plánování jejich údržby a oprav, pro projektanty jako podklad pro zodpovědný, technicky správný a ekonomicky optimální návrh opravy nebo rekonstrukce vozovky, pro dodavatele pro sledování kvality prováděných prací a pro investora pro kontrolu díla po jeho předání, resp. před uplynutím záruční doby.
Diagnostické metody jsou detailně popsány v dílčích českých i evropských normách, souhrnně jsou pak diagnostické postupy a požadavky na jejich provádění popsány Technickými podmínkami (TP), Technickými a kvalitativními podmínkami (TKP), případně speciálními předpisy (ASTM, ICAO, …).

Cílem diagnostického průzkumu je zpravidla:
- Stanovení parametrů provozní způsobilosti letiště určené hodnotami PCI (Pavement Clasification Index)
- Stanovení parametrů únosnosti letištních ploch PCN (Pavement Clasification Number)
- Celkové ohodnocení stavu letiště a návrh strategie přístupu k údržbě a opravám pohybových ploch
- Posouzení a návrh opravy nebo rekonstrukce vybrané části dráhového systému letiště

## Diagnostické metody

Diagnostické metody jsou určovány aktuálním stavem vozovky a požadovaným využitím výsledků diagnostického průzkumu. Podle účinku na stavební konstrukce lze diagnostické zkoušky rozdělit na nedestruktivní a destruktivní. Zatímco nedestruktivní zkoušky (měření únosnosti, …) většinou simulují účinky dopravního zatížení na vozovku, destruktivní zkoušky (jádrové vývrty, zkoušky pevnosti materiálu) testují konstrukce i materiály až do porušení jejich celistvosti, resp. tvaru.

Základními metodami diagnostiky vozovek jsou:
- inventarizace poruch - vizuální prohlídka,
- měření únosnosti vozovky.
- jádrové vývrty a sondy,
- zjištění materiálových charakteristik vrstev vozovky - laboratorní zkoušky,
- georadarové měření,

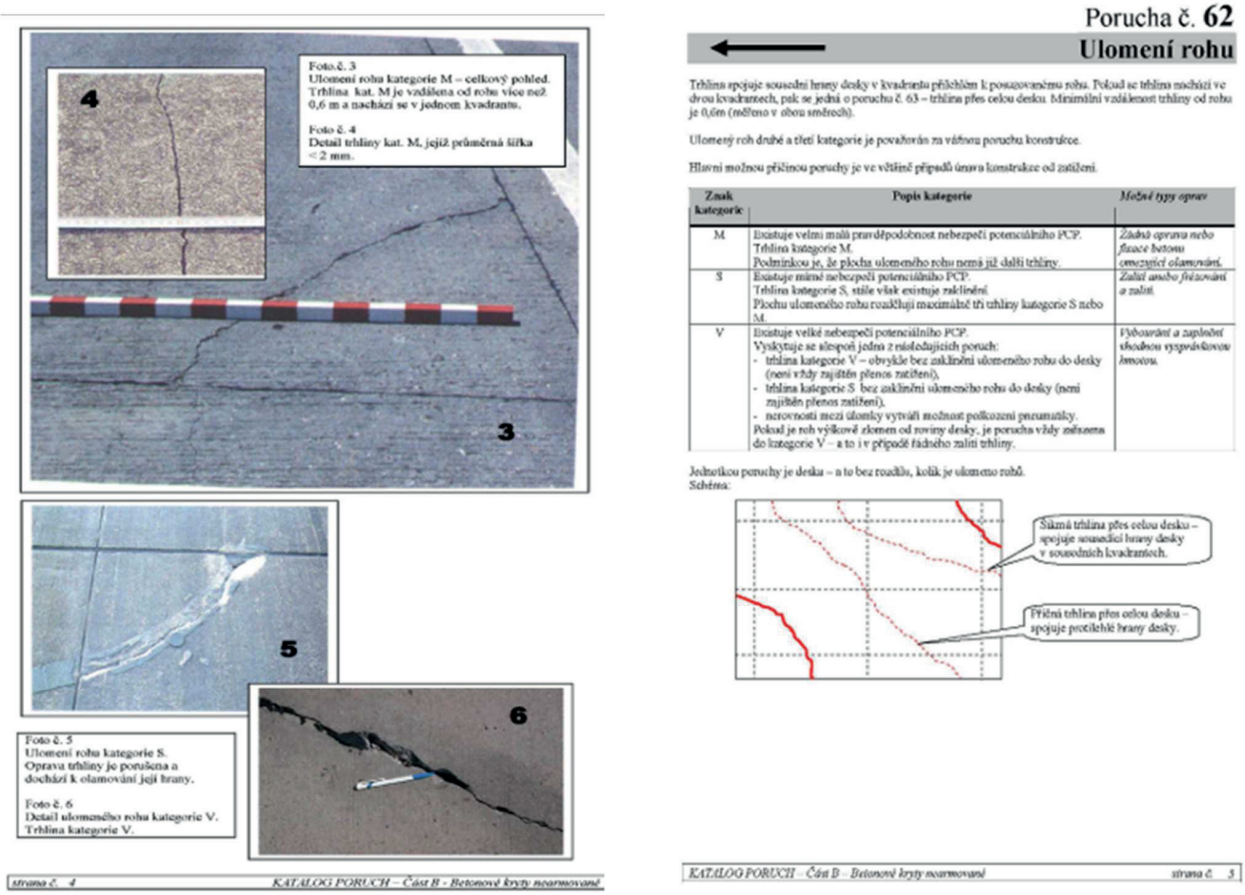
Důležitým úkolem před zahájením diagnostických prací je příprava, která při prvotní diagnostice zahrnuje studium historických podkladů a předchozích zpráv o realizovaných průzkumech za účelem stanovení optimálního postupu diagnostiky se zaměřením na problémové lokality. Dalším krokem je pak příprava podkladů o lokalizaci dílčích letištních ploch, jejich pojmenování, značení pasů a orientace staničení, resp. číslování desek.

### Inventarizace poruch

Prvotní informace o stavu vozovky jsou získávány vizuální prohlídkou – inventarizací poruch povrchu vozovek. Jednoznačná identifikace a klasifikace jednotlivých poruch včetně různých metod jejich záznamu jsou popsány v Katalogu poruch tuhých vozovek, případně TP Navrhování údržby a oprav tuhých vozovek nebo speciálními předpisy pro letiště (ICAO, ASTM, …)

Při inventarizaci poruch, prováděné pochůzkou, jsou poruchy dle předem definovaného spárořezu nebo dle staničení zaznamenávány do formulářů nebo prostředků výpočetní techniky (např. tablet). Další možností, zejména u ploch s převládajícím liniovým průběhem (runwaye, pojížděcí dráhy), je možnost pořízení videozáznamu s vysokým rozlišením případně laserového skenování, kdy zpracování dat o poruchách do datových struktur probíhá v kanceláři.

*Obrázek 1: Příklad katalogového listu poruch letištních vozovek s popisem způsobu evidence a hodnocení*




Při inventarizaci poruch je nutné stanovit úroveň inventarizace podle účelu, kterému má sloužit, a to:

- pro účely stanovení parametru PCI se sledují:
  - typ poruchy,
  - závažnost (M, S, V).

  Závažnost poruchy je odvozena zejména od stupně potenciálního nebezpečí poškození letadla cizím předmětem a je výchozím parametrem pro porušení klasifikaci vozovky

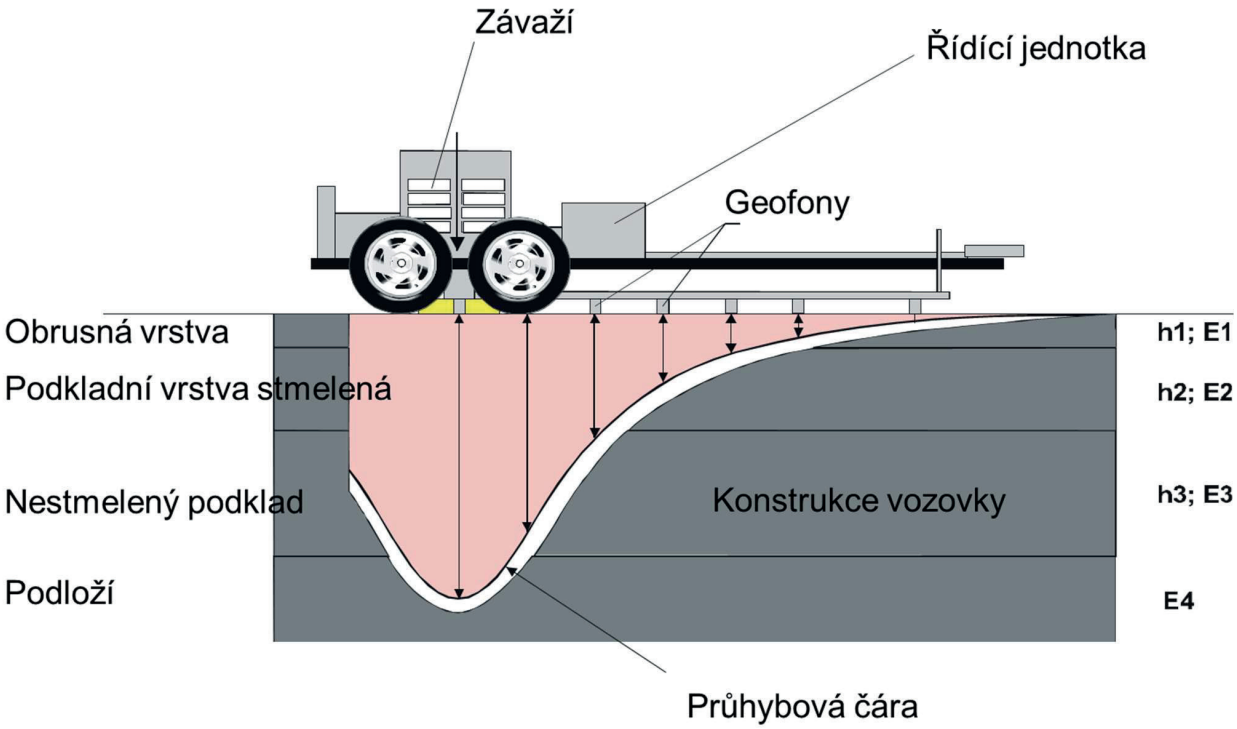
- pro návrh opravy poruch/desek
  - typ poruchy,
  - četnost poruch,
  - rozměr poruchy (délka, šířka, hloubka, plocha).

  Výsledkem je ohodnocení rozsahu a nákladů na údržbu/opravu plochy

## Měření únosnosti CB vozovek rázovým zařízením HWD (Heavy Weight Deflectometer)

Únosnost konstrukčních vrstev lze měřit pomocí statických nebo dynamických zařízení. V současné době jsou standardně používána zařízení pro měření únosnosti dynamickým rázem - deflektometry.
Princip měření spočívá v pádu závaží o dané hmotnosti z dané výšky na zatěžovací desku tak, aby dynamický ráz vyvolaný pádem závaží odpovídal účinku přejezdu kola nebo nápravy podvozku. Tento dynamický ráz, resp. jeho šíření, je zaznamenáno sadou snímačů umístěných na povrchu vozovky za účelem popsání charakteristik dvou až třívrstvého systému konstrukce vozovky.
Na základě měření průhybové čáry jsou na každém měřeném bodě výpočtovým programem stanoveny moduly pružnosti konstrukčních vrstev.

*Obrázek 2: Schéma rázového zařízení – deflektometru*




Technické specifikace HWD PRIMAX 3000:

- Plné ovládání z pozice operátora-řidiče
- Hydraulické ovládání nosníku a zatížení
- Čtyřsegmentová zatěžovací deska
- Vyvozené zatížení 150 - 350 kN
- Tři snímače teploty
- 2500 mm dlouhý nosník s T nosníkem
- až 17 snímačů průhybu
- Záznam časové historie zatížení i průhybů
- DGPS pro určení polohy
- Kamera pro snímání polohy snímačů

*Obrázek 3: Zařízení HWD PRIMAX 3000 při měření*



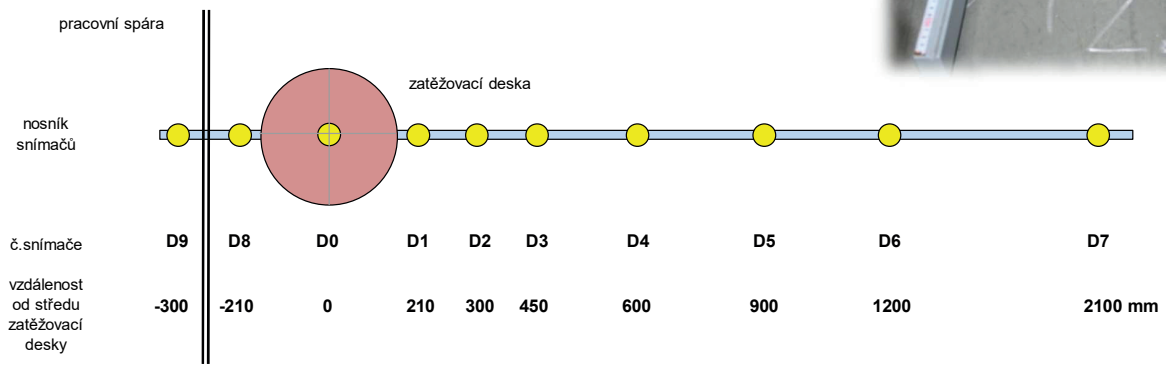
Specifika při měření únosnosti vozovek s cementobetonovým krytem
Na rozdíl od měření únosnosti na vozovkách s asfaltobetonovým krytem je nutné změnit uspořádání snímačů na nosníku měřícího zařízení dle níže uvedeného schématu. Měření únosnosti na CB deskách se pak provádí ve dvou režimech:

- Pro určení charakteristik jednotlivých konstrukčních vrstev vozovky - modulů pružnosti, resp. modulu tuhosti - se provádí měření se zatěžovací deskou umístěnou v geometrickém středu CB desky. Pro vyhodnocení slouží hodnoty průhybů ze snímačů D1-D7.
- Pro určení spolupůsobení desek na spárách se provádí měření se zatěžovací deskou co nejblíže k příčné hraně vozovky uprostřed jejího příčného rozměru tak, aby snímače D8 a D9 byly umístěny z každé strany příčné spáry sousedících desek. Výsledkem pak je hodnota LTE (Load Transfer Efficiency) = efekt přenosu zatížení, definovaný jako poměr průhybu hrany nezatížené a zatížené desky.

Pro výpočet charakteristik konstrukce vozovky jsou využívány speciální programy zpracované výrobci měřících zařízení, jako např. RoSy®DESIGN, ELMOD, PCASE-LEEP, PAVERS, DarWIN, atd.

*Obrázek 4: Příklad schématu rozmístění snímačů pro měření na CB deskách a reálné umístění snímačů*






Na základě vyhodnocení charakteristik únosnosti konstrukčních vrstev (moduly pružnosti vozovky a podloží) je stanoveno pomocí speciálních algoritmů číslo PCN – Pavement Classification Number, které charakterizuje schopnost letištní plochy provozovat provoz (pohyby) letadel s odpovídající klasifikací ACN po stanovené časové období.
V současné době je připravována Mezinárodní organizací pro civilní letectví ICAO změna předpisu týkající se přechodu klasifikace na nové číslo PCR – Pavement Clasification Ratio.

## Únosnost nestmelených vrstev a podloží

Pokud potřebujeme zjistit přesnější parametry nestmelených vrstev a podloží v rámci diagnostiky stávajících ploch pod existující konstrukcí, lze využít pro měření dynamický kuželový penetrometr (DCP – Dynamic Cone Penetrometer) umístěný do provedeného jádrového vývrtu. Charakteristiky únosnosti nestmelených materiálů - hodnoty CBR – jsou pak odvozeny z počtu rázů potřebných k penetraci na každých 50 mm a z porovnání hodnot CBR zjištěných v kopané sondě.

## Jádrové vývrty

Za účelem zjištění skutečné tloušťky konstrukčních vrstev vozovky a jejich stavu se provádějí jádrové vývrty, nejčastěji o průměru 150 mm, a to zejména z důvodu následného využití, kdy se na odebraných vzorcích budou provádět laboratorní zkoušky (krychelné pevnosti, pevnost na trámečcích, pevnost v tahu za ohybu/příčném tahu, …)

Otvor po jádrovém vývrtu před jeho vyplněním může sloužit ke zjištění únosnosti nestmelených podkladních vrstev a podloží pomocí dynamického penetrometru.

*Obrázek 5: Příklady jádrových vývrtů konstrukcí letištních vozovek*



## Georadarová měření

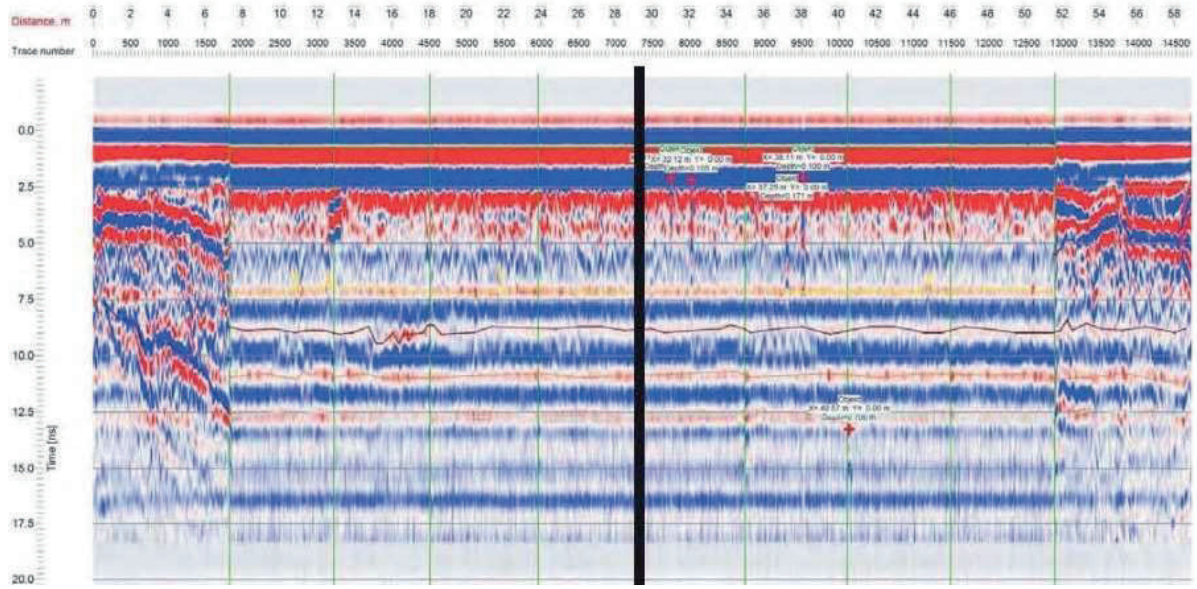
Pro upřesnění stanovení tlouštěk konstrukčních vrstev a jejich změn v podélném, případně příčném směru plochy, ale rovněž pro zjištění případných anomálií v konstrukcích letištních ploch, lze využít georadarového měření založeného na změně odezvy rozhraní jednotlivých materiálů konstrukčních vrstev.
Podle typu konstrukce a hloubky požadovaného profilu je nutné zvolit frekvenci antény georadarové měřicí soustavy.

*Tabulka 1: Frekvence antén a jejich použitelnost co do dosažené hloubky a rozlišovací schopnosti [1]*

| | Water, velocity 33 m/µs | Sand, velocity 100 m/µs | Ice, velocity 160 m/µs | Velocity 100 m/µs |
|---|---|---|---|---|
| | Approx. Depth range (m)* | Approx. Depth range (m)* | Approx. Depth range (m)* | Suitable target size (cm) (vertical resolution) |
| Low frequency antennas < 100 MHz<br><br>Mainly used for deeper targets, e.g, geological and glacier investigations | 5-25 | 20-60 | 30-500 | 100 MHz: 25<br>30 MHz: 80 |
| Mid frequency antennas 100><1000<br><br>Important application areas include utility detection and archeological investigations | 0.5-6 | 2-20 | 3-150 | 1000 MHz: 2<br>100 MHz: 25 |
| High frequency antennas >1000<br><br>Typical usage: pavement, constructions, rebar etc. | 0.25-0.55 | 0.85-1.65 | 1.5-15 | 1000 MHz: 2<br>2300 MHz: 1 |

Výsledkem měření a vyhodnocení specializovaným programem (např. ReflexW) je tzv. radargram, ze kterého je možné stanovit tloušťku vrstev, případně anomálie v konstrukci (propad vrstvy, zvýšenou vlhkost, kavernu, atd.). Vzhledem k liniovému charakteru měření není tento způsob vhodný k vyhledávání kaveren v celém rozsahu letištních ploch. K tomuto účelu je vhodné vytipovat na základě jiných ukazatelů problémová místa a na těch provést měření ve 3D režimu pojezdem jednoduché antény v pravidelné mřížce nebo využití speciálních soustav antén přímo určené pro 3D modelování.

*Obrázek 6: Příklad „radargramu“ letiště s viditelným rozhraním mezi konstrukcí pojížděcí plochy a krajnic*




## Využití diagnostického průzkumu

Forma výsledků a závěrů diagnostického průzkumu se může lišit jednak podle typu objednatele (správce PK, investor, projektant, dodavatel) a účelu využití výsledků (sledování stavu a plán údržby a oprav, návrh opravy-rekonstrukce)

- stanovení charakteristik jednotlivých konstrukčních vrstev, případně celé konstrukce vozovky a odvodit tak příčiny porušování,
- stanovení provozní způsobilosti vozovky klasifikačními indexy PCI a PCN/PCR,
- návrh technologického opatření – údržby, opravy či rekonstrukce části nebo celé konstrukce vozovky k zachování nebo zvýšení provozní způsobilosti, resp. výkonnosti vozovky.

## Závěr

Je evidentní, že kvalitně provedený diagnostický průzkum vozovek letištních ploch i silniční sítě může objednateli přinést vysoký efekt, který se však může projevit až s odstupem času zvýšením doby užívání správně udržované komunikace nebo optimálně navržené a provedené opravy vozovky. V současné době však správci komunikací a letištních ploch nástrojů pravidelné diagnostiky nedostatečně využívají z důvodu potřeby využít financí k samotné údržbě, projekční a dodavatelské firmy navrhují opravy z pochopitelných důvodů „na stranu bezpečnou“, i když někdy dražší, než je nezbytné a investoři nechtějí riskovat možné problémy do budoucnosti.

Pokud se do procesu přípravy staveb (oprav, rekonstrukcí i novostaveb) standardně začlení vedle investora, projektanta a dodavatele také konzultační a diagnostické firmy, bude možné lépe optimalizovat financování rozvoje a zlepšování stavu i životnosti silniční sítě a letišť.

**Zdroje [Zdroj]**

[1] https://wwwguidelinegeoc.cdn.triggerfish.cloud/uploads/2022/01/Table-1-Antenna-Frequency-4.jpg

**Literatura :**


- TP 92 Navrhování údržby a oprav vozovek s cementobetonovým krytem, 2011
- TP 233 Georadarová metoda konstrukcí pozemních komunikací, 2011
- ČSN 73 6192 – Rázové zatěžovací zkoušky vozovek a podloží
- Letištní předpis - L14 (směrnice L36 z r. 1985)
- ASTM D 5340-20 - Standard Test Method for Airport Pavement Condition Index
- ASTM D 4694-09 - Standard Test Method for Deflection with a F-W-Type Impulse Load Device
- ASTM D 4695 - Standard Guide for General Pavement Deflection Measurements
- ICAO Doc 9157-AN/901 Manual for Airport Design, Part 3 Pavementsmmmm

# Hlučnost cementobetonových krytů vozovek a jejich změna v čase

*Ing. Vítězslav Křivánek, Ph.D.*
*Centrum dopravního výzkumu v.v.i.*

*Tel .: +420 601 321 681*
*Mail: vitezslav.krivanek@cdv.cz*

Předmětem příspěvku je monitoring hlučnosti povrchů vozovek s cementobetonovým krytem, který v rámci pravidelného dlouhodobého sledování je zaměřen na hodnocení změn akustického chování vlastního krytu vozovky, jež je nezávislý na intenzitě provozu na dané pozemní komunikaci. Měření jsou prováděna metodou malé vzdálenosti (CPX) dle normy ISO 11819-2. V článku jsou uvedeny dílčí aktuální výsledky měření hlučnosti úpravy pomocí juty D1 (Brno – Ostrava) a dále jsou prezentovány výsledky srovnávající hlučnost v rámci modernizace D1 (Praha – Brno) vůči dalším úsekům dálniční sítě ČR, kde je uplatňován povrch s obnaženým kamenivem (vymývaný beton). Uvedené analýzy vychází z dat pořízených in-situ mezi roky 2012 – 2021.

## Úvod

Hlučnost ze silniční dopravy je především závislá na intenzitě dopravního proudu, jeho složení a rychlosti a do značné míry je ovlivňována také stavem komunikace, a to zejména stavem její obrusné vrstvy. Automobily mají několik hlavních zdrojů hlučnosti, převládajícím zdrojem je však hluk generovaný kontaktem pneumatiky s vozovkou. U současných osobních vozidel vybavených spalovacím motorem převládá tento hluk již od rychlosti cca 40 km/h [11], u vozidel s elektromotorem od rychlosti cca 20 km/h [9]. Vlastní povrch z hlediska hlučnosti lze považovat za aktivní opatření směřující ke snížení nadměrné hlukové imise a tím i zátěže životního prostředí. Proto bude hrát stav obrusné vrstvy vozovky pozemní komunikace s rozvojem elektromobility stále významnější roli v celkové hlukové zátěži. Hlučnost jednotlivých typů povrchů pozemních komunikací se v čase mění, a to jak u asfaltových, tak i u betonových povrchů, totéž platí i pro nízkohlučné povrchy. Tyto změny jsou pomocí metody CPX měřitelné [13].

## Měření hlučnosti metodou CPX

K měření hlučnosti povrchů komunikací v EU je především využívána doporučená dynamická metoda Close-ProXimity method (CPX) [1]. Nevýhodou CPX metody jsou především náročnější požadavky na vlastní měřicí vybavení a konstrukci, včetně potřebné přesnosti veškerého vybavení, s možností synchronního měření akustických i neakustických parametrů [14].Centrum dopravního výzkumu, v.v.i. (dále CDV) využívá komplexní platformu od Brüel & Kjær, která umožňuje synchronní záznam a vyhodnocení všech potřebných parametrů v požadované vysoké kvalitě s ohledem na podmínky pro hygienická měření hluku. CDV se v rámci svých výzkumných činností od roku 2011 aktivně zabývá měřením hlučnosti jednotlivých typů povrchů vozovek pozemních komunikací na území ČR. Základy metody měření jsou obsaženy v normě ISO 11819-2:2017 Acoustics – Measurement of the influence of road surfaces on traffic noise – Part 2 [3], která je doplněna specifikací ISO/TS 11819-3:2021 Acoustics – Measurement of the influence of road surfaces on traffic noise – Part 3: Reference tyres [4], jenž popisuje použití předepsané referenční pneumatiky při měření metodou CPX. Je nezbytné brát v potaz i technickou specifikaci ISO/TS 13471-1:2017 Acoustics – Temperature influence on tyre/road noise measurement – Part 1: Correction for temperature when testing with the CPX method [5], která stanovuje postupy pro určení vlivu teploty na emise hluku styku pneumatika/vozovka. CDV využívá zavedený systém měření, který je popsán v certifikované metodice s názvem „*Metodika pro měření a hodnocení komunikací z hlediska hlukové zátěže*“, ve které je zavedena také korekce na vlastní teplotu měřeného povrchu [8]. CDV dlouhodobě využívá vlastní ověřený specializovaný přívěs vytvořený na základě doporučení CEN/TC 227/WG 5 při přípravě uvedených předmětných ISO norem (chráněn UV č. 20507), viz obrázek 1.



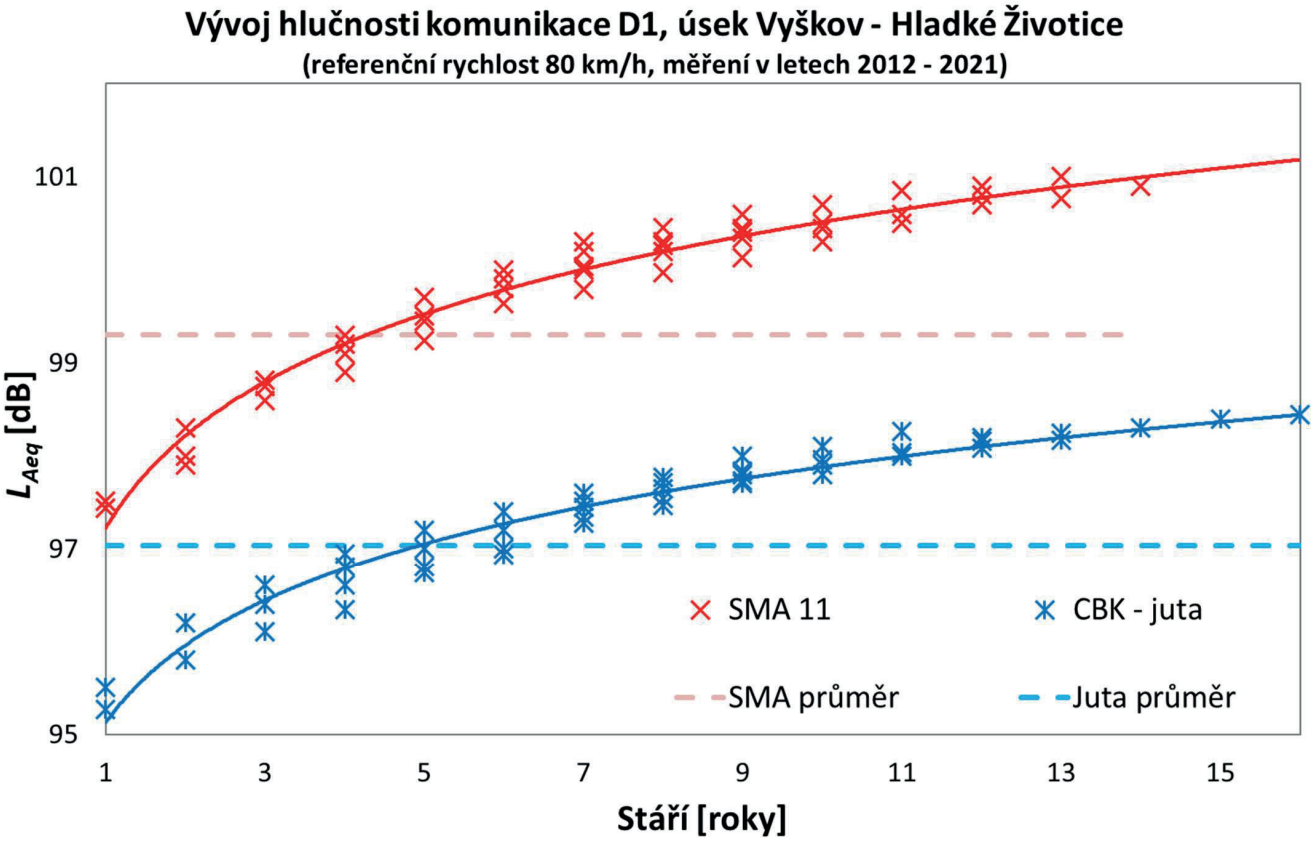

*Obrázek 1: Ukázka aktuálního systému měření metodou CPX využívaného CDV.*

CDV v rámci svých výzkumných aktivit prováděl implementaci měření dle připravované a následně schválené normy ISO 11819-2 do praxe a na mezinárodní úrovni poskytoval a poskytuje poznatky za ČR. Návrh vlastního měřicího zařízení dle chystané normy vznikl v rámci projektu MD ČR reg. č. CG712-102-120 „*Optimalizace technických opatření pro snížení hlukové zátěže v okolí pozemních komunikací*“, kde byla ověřena jeho funkčnost a možnost použití. Se systémem na měření hlučnosti povrchů vozovek metodou CPX pracuje tak CDV od roku 2009. Systematické využití poznatků a další vývoj i inovace přišly v rámci výzkumného projektu TAČR TA01030459 „*Změna hluku povrchů vozovek v průběhu několika let používání*“, sběr dat tak probíhá od roku 2012. Následoval projekt TAČR TA04021486 „*Nástroje pro analýzu a hodnocení environmentálních dopadů hluku vozovek*“, kde byla metodou CPX provedena měření na všech typech povrchů včetně nízkohlučných úprav, kterých není mnoho vzhledem k jejich relativně malému stáří i rozsahu. V rámci projektu TA04021486 bylo též provedeno srovnání metod SPB a CPX, kdy dílčí výsledky byly prezentovány v rámci CEN/TC 227/WG 5. Získaných poznatků bylo využito pracovníky CDV i při řešení projektu Centra kompetence TE01020168 „*Centrum pro efektivní a udržitelnou dopravní infrastrukturu*“, kde byla prováděna porovnávací měření metodou CPX se zaměřením na srovnání systémů EUROVIA (zařízení z Francie) a CDV, kdy se tak prokázalo, že měřicí systém CDV (viz obrázek 1) je akceptovatelný (kompatibilní) v celosvětovém měřítku. Získané výsledky potvrzují správnost naměřených výsledků metodou CPX organizací CDV, lze jej považovat za podpůrný argument, že měřící systém CPX organizace CDV je dostatečně ověřován i prověřen a dává validní data, která lze navíc konfrontovat i se zahraničními výsledky, což se na jednáních CEN/TC 227/WG 5 uskutečňuje. Reálná data z projektů TA04021486 a TE01020168 se uplatnila i při návrhu TP 259 *„Asfaltové směsi pro obrusné vrstvy se sníženou hlučností“* [12]. Tyto technické podmínky obsahují dílčí informace o změnách hlučnosti vozovek analyzované ze silniční sítě na území ČR mezi lety 2012–2017. Nově poznatky z těchto technických podmínek byly převzaty při zpracování ČSN 73 6120 (v účinnosti od 09/2021) a TKP 7 (čeká na schválení). V rámci CB krytů v současnosti obdobný předpis neexistuje, metoda CPX je ovšem univerzální a CDV měří i hodnotí v rámci svých výzkumných aktivit jak AB, tak CB kryty vozovek. Ke konci roku 2022 datová základna všech vyhodnocených měření narostla přibližně na 7 000 km. Některá dílčí data by tak bylo možné využít i k případnému nastavení hodnocení CB krytů, respektive k nastavení jednotného přístupu pro všechny AB i CB vozovky z hlediska jejich hlučnosti na styku pneumatika/vozovka.

## Dílčí výsledky změn hlučnosti pro CBK metodou CPX z dat získaných v ČR

Dílčí výsledky navazují a rozšiřují předcházející příspěvek [6] v rámci konference Betonové vozovky. Obrázek 2 demonstruje a prokazuje skutečnosti diskutované na mezinárodní úrovni v rámci CEN/TC 227/WG 5, kdy i na základě zahraničních skutečností zazněl jednoznačný názor, že změna

akustických charakteristik vozovek není v čase lineární – konstantní. Tedy, že hluk v čase nenarůstá neustále stejně. Uváděný obrázek 2 vznikl složením množství nesourodých měření z mnoha míst po celé délce dálnice mezi Vyškovem a Hladkými Životicemi, kde byla postupně realizována výstavba. Vlastní dílčí úseky dálnice jsou různého počátečního stáří a jsou pro ně do grafu vynášené naměřené hodnoty. V případě úseků, kde byly naměřeny významné výkyvy, nebyla tato data použita. Uvedený graf je tak založen na propojení většího množství nesourodých dat z různých měření, což může dát prvotní odhad vývoje, nemusí však zcela korespondovat s reálnou situací. Měření hlučnosti povrchů vozovek, sběr a hodnocení těchto dat neprobíhá tak dlouho jako např. u nerovností a protismykových vlastností, jež jsou významné a zásadní z hlediska bezpečnosti provozu na pozemních komunikacích. Vývoj hlučnosti povrchů vozovek se odvíjí nejenom od typu obrusné vrstvy a použité frakce kameniva, ale také od kvality provedení, míry zhutnění apod. Proto je potřeba tento parametr sledovat v čase, aby mohly být stanoveny základní rozdíly mezi jednotlivými vrstvami. Dlouhé souvislé řady dat pro konkrétní povrch z konkrétních lokalit zatím neexistují, proto musíme stále pracovat s těmito dílčími omezenými průběžnými výsledky. V rámci grafu (obrázek 2) je vidět změna hlučnosti v čase pro konkrétní typ povrchu, kdy u jiných typů tato závislost může být významně odlišná, např. pro dlažební kostky nebo povrchy se sníženou hlučností. Je zřejmé, že daný průběh není lineární (spíše odpovídá logaritmickému charakteru), kdy největší chyby se v případě linearizace dopustíme na začátku, respektive ke konci životnosti daného krytu vozovky. Tato chyba je však výrazně nižší než uvažovaný nejjednodušší možný přístup pro hodnocení v rámci celé životnosti, tj. použití průměrně stanovené hodnoty za celou dobu životnosti (½ hlučnosti po pokládce + ½ hlučnosti na konci životnosti) – naznačeno čárkovanou čarou. Metodika CNOSSOS-EU (Common NOise aSSessment methOdS, směrnice 2015/966/EC [2]) avšak zatím stále používá k výpočtům pouze celoživotní hodnotu hluku povrchu daného typu vozovky, tj. využití odhadnuté střední hodnoty (cca povrch stáří 5–7 let) právě proto, že není dostatečně znám vývoj a změny jednotlivých povrchů v čase, neboť dlouhodobé změny hlučnosti obrusných vrstev nejsou známy. Z obrázku 2 je zřejmé, jakých chyb se v rámci stáří povrchu můžeme dopustit.




*Obrázek 2: Dlouhodobé srovnání hlučnosti s využitím aproximace a složení různých vstupních dat z měření z let 2012–2021 pro běžnou obrusnou směs (SMA) a nízkohlučnou úpravu cementobetonového krytu (juta) na dálnici D1.*

V rámci modernizace D1 proběhl pravidelný monitoring hlučnosti jednotlivých postupně realizovaných úseků. Data jsou opět z dálniční sítě, ale pro modernizovaný úsek Praha – Brno, kde je použita povrchová úprava betonu vymýváním a asfaltový koberec mastixový. Tento modernizovaný úsek byl realizován v posledních letech, a z tohoto důvodu je k dispozici ještě menší časová řada, než v rámci obrázku 2. První

zrekonstruované úseky byly uvedeny do provozu v roce 2014. Očekávaná životnost asfaltových obrusných vrstev je cca 15 let, u betonového krytu se předpokládá dvojnásobek, proto v současné době nelze mít úplnou představu o změně hlučnosti po celou dobu předpokládané životnosti těchto vozovek. Z dílčích výsledů měření, viz tabulka 1, je možné rámcově říci, že při modernizaci dálnice D1 je průměrná hodnota hlučnosti pro asfaltový koberec mastixový (SMA) a cementobetonový kryt s obnaženým kamenivem (CBK) obdobná. Ovšem lze si také všimnout, že rozdíly naměřených minimálních a maximálních hodnot se pohybuje do 2 dB, což může být zapříčiněno nejen nejistotou měření, ale i dalšími vlivy, jako jsou meteorologické podmínky či stavem vozovky pozemní komunikace – homogenitou povrchu.

*Tabulka 1: Dílčí souhrnný přehled naměřených dat z jednotlivých úseků na dálnici D1 (úsek Praha – Brno), v letech 2014–2020 pro obrusnou směs SMA a cementobetonový kryt s povrchem s obnaženým kamenivem (vymývaným betonem).*

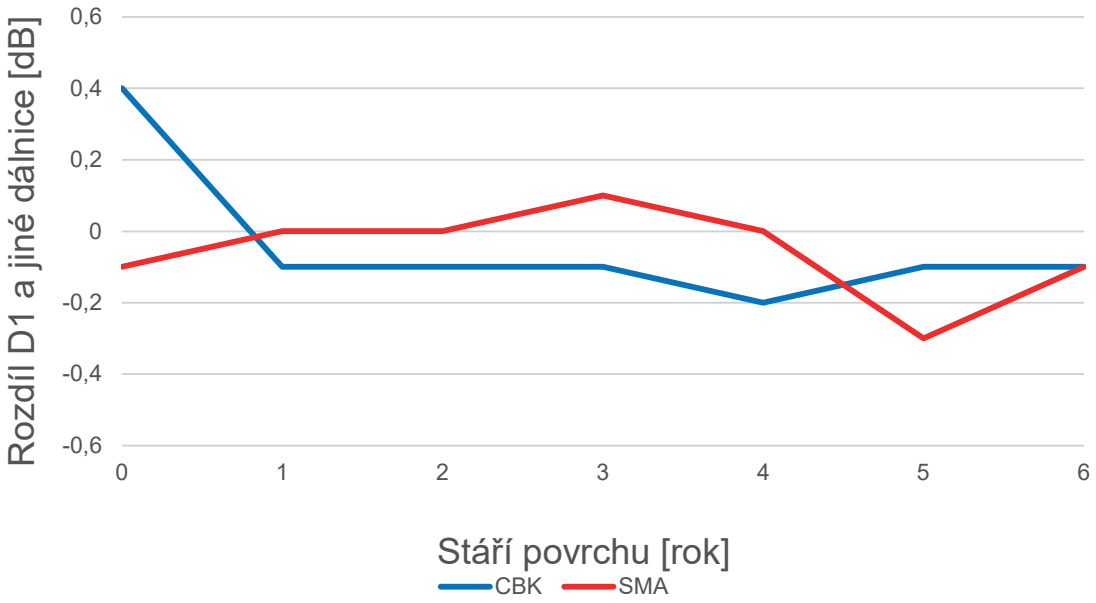
| Povrch | Stáří v letech a odpovídající hlučnost v decibelech, modernizace D1 | | | | | | |
|---|---|---|---|---|---|---|---|
| | 0 | 1 | 2 | 3 | 4 | 5 | 6 |
| **CBK - vymývaný (průměr)** | **97,6** | **98,0** | **98,4** | **98,8** | **99,0** | **99,2** | **99,5** |
| CBK - vymývaný (minimum) | 96,7 | 97,1 | 97,7 | 97,8 | 98,0 | 98,2 | 99,3 |
| CBK - vymývaný (maximum) | 98,7 | 99,1 | 99,3 | 99,5 | 99,6 | 99,7 | 99,8 |
| CBK - vymývaný (rozdíl) | 2,0 | 2,0 | 1,6 | 1,7 | 1,6 | 1,5 | 0,5 |
| **SMA 11S (průměr)** | **97,7** | **98,2** | **98,5** | **98,8** | **99,1** | **99,2** | **99,5** |
| SMA 11S (minimum) | 97,4 | 97,7 | 98,1 | 98,4 | 98,6 | 98,8 | 99,2 |
| SMA 11S (maximum) | 98,2 | 98,8 | 99,1 | 99,2 | 99,5 | 99,5 | 99,7 |
| SMA 11S (rozdíl) | 0,8 | 1,1 | 1,0 | 0,8 | 0,9 | 0,7 | 0,5 |
| Počet měřených úseků | 12 | 28 | 26 | 18 | 12 | 8 | 6 |

Rozšíření měření a následných analýz pro nejpoužívanější povrchy na dálnicích v ČR bylo shledáno jako užitečné pro dosažení komplexního dlouhodobého posouzení za celou ČR. Do měření a následně i porovnání tak v rámci aktivit pro MD [7] byly zahrnuty i další realizované rekonstruované úseky, tj. D1 mezi Brnem a Lipníkem nad Bečvou, D2 mezi Brnem a Břeclaví, opravy D5 u Plzně, D35 mezi Olomoucí a Lipníkem nad Bečvou a také nově otevřený úsek D48 mezi Novým Jičínem a Frýdkem-Místkem. Analyzovaná data z těchto úseků jsou obsažena v tabulce 2.

*Tabulka 2: Souhrnný přehled naměřených dat z jednotlivých úseků na ostatních dálnicích v ČR, v letech 2017–2021 pro obrusnou směs SMA a cementobetonový kryt s povrchem s obnaženým kamenivem (vymývaným betonem).*

| Povrch | Stáří v letech a odpovídající hlučnost v decibelech, jiné dálnice | | | | | | |
|---|---|---|---|---|---|---|---|
| | 0 | 1 | 2 | 3 | 4 | 5 | 6 |
| **CBK - vymývaný (průměr)** | **97,2** | **98,1** | **98,5** | **98,9** | **99,2** | **99,3** | **99,6** |
| CBK - vymývaný (minimum) | 97,0 | 97,6 | 98,0 | 98,7 | 99,0 | 99,1 | 99,5 |
| CBK - vymývaný (maximum) | 97,3 | 98,6 | 98,8 | 99,0 | 99,3 | 99,4 | 99,7 |
| CBK - vymývaný (rozdíl) | 0,3 | 1,0 | 0,8 | 0,3 | 0,3 | 0,3 | 0,2 |
| Počet měřených úseků | 2 | 12 | 7 | 5 | 4 | 5 | 2 |
| **SMA 11S (průměr)** | **97,8** | **98,2** | **98,5** | **98,7** | **99,1** | **99,5** | **99,6** |
| SMA 11S (minimum) | 97,6 | 97,8 | 98,2 | 98,5 | 98,9 | 99,4 | 99,6 |
| SMA 11S (maximum) | 97,9 | 98,5 | 98,6 | 98,8 | 99,4 | 99,5 | 99,6 |
| SMA 11S (rozdíl) | 0,3 | 0,7 | 0,4 | 0,3 | 0,5 | 0,1 | 0,0 |
| Počet měřených úseků | 3 | 10 | 5 | 2 | 4 | 2 | 1 |

Rozšíření lze považovat za vhodné i z důvodu, že každý výsledek je vázán na dané konkrétní místo, tj. lokálně naměřené hodnoty mohou vykazovat významnější rozdíly, které ovšem odpovídají nejistotám měření. Navíc zvětšení vlastního záběru je užitečné i z pohledu celkového hodnocení i ze statistického hlediska daných typů vozovek v rámci celé ČR. Ze získaných měření a provedených analýz je zřejmé, že výsledky v rámci modernizace D1 mezi Prahou a Brnem se příliš neodlišují od výsledků v rámci celé ČR tak, jak demonstruje obrázek 3, ze kterého jsou patrné jen minimální rozdíly v rámci srovnání průměrných hodnot hlučnosti v jednotlivých letech od pokládky.




*Obrázek 3: Srovnání průměrných hodnot hlučnosti pro definované stáří povrchu pro obrusnou směs SMA a CBK na D1 vůči ostatním dálnicím v ČR s CBK.*

## Závěr

V rámci vývoje monitoringu silniční sítě byla akustická změna povrchu pozemní komunikace uznána jako proměnný parametr vozovky [10] a lze očekávat i případné využití v rámci plánovaného systému hospodaření vozovek jak pro tuhé, tak pro netuhé vozovky. Proto pořizování dat o změně hlučnosti povrchu vozovky a rozšíření stávající databáze ŘSD může v budoucnosti přispět k dalším analýzám a poznatkům díky hodnocení různých parametrů v rámci daného úseku pozemní komunikace i komplexnějším závěrům v oblasti hodnocení vozovek. V rámci netuhých vozovek a současné revize TP 87 Navrhování údržby a oprav netuhých vozovek je akcentována nově i problematika hlučnosti povrchu vozovky s využitím metody CPX. Pro tuhé vozovky zatím žádné doporučení vzhledem k hlučnosti není vypracováno, ovšem metodu CPX lze využít i pro tuto skupinu povrchů, jak ukazují naměřené výsledky.
Dosahované průběžné výsledky potvrzují, že z hlediska hlučnosti na styku pneumatika/vozovka, jenž tvoří dominantní složku hluku z automobilového provozu na dálnici (v souvislosti s rychlostí dopravního proudu), kde se CB vozovky díky vyšší životnosti/únosnosti primárně vyžívají, jsou hodnoty hlučnosti pro úseky bez poruch pro asfaltový koberec mastixový a cementobetonový kryt s obnaženým kamenivem de facto stejné. Tj. není nezbytně nutné realizovat běžné asfaltové povrchy na dálniční síti z důvodu (významně) nižší hlučnosti. Změřené údaje v rámci dálniční sítě v ČR tento argument podporují. Navíc i u cementobetonových krytů vozovek lze dosáhnout snížení hlučnosti – nejnověji využití technologie grindingu, která dokáže oproti vymývanému betonu snížit hlučnost cca o 2 dB (platí pro srovnání nových povrchů po pokládce). Dlouhodobé poznatky nejen ve vztahu k hlučnosti, ale např. i k protismykovým vlastnostem bude vhodné pravidelně monitorovat.

### Zdroje

[1] Collaborative project FP7-SST-2013-RTD-1 Rolling resistance, skid resistance, and noise emission measurement standards for road surfaces (ROSANNE). Deliverable D2.6 Report on the development of the procedure for characterisation of noise properties of road surfaces including the updated draft standard. AIT, 2016.

[2] Commission directive (EU) 2015/996 of 19 May 2015 establishing common noise assessment methods according to Directive 2002/49/EC of the European Parliament and the Council (Směrnice Komice EU 2015/996 ze dne 19. května 2015 o stanovení společných metod hodnocení hluku podle směrnice Evropského parlamentu a Rady 2002/49/ES). Off J Eur Communities. 2015 Jul 1;(L 168):1-823.

[3] ISO/CD 11819-2:2017 Acoustics – Measurement of the influence of road surfaces on traffic noise - Part 2: The close-proximity method.

[4] ISO/TS 11819-3:2021, Acoustics – Method for measuring the influence of road surfaces on traffic noise – Part 3: Reference Tyres.

[5] ISO/TS 13471-1:2017 Acoustics – Temperature influence on tyre/road noise measurement - Part 1: Correction for temperature when testing with the CPX method.

[6] KŘIVÁNEK, V., Měření hlučnosti povrchů cementobetonových krytů vozovek metodou malé vzdálenosti (CPX). In Betonové vozovky 2020, Praha, 5. 11. 2020, s. 63 – 70. ISBN 978-80-906541-5-0.

[7] KŘIVÁNEK, V., a kol., Analýza a monitoring změn hlučnosti povrchů pozemních komunikací. Závěrečná zpráva, Brno, Centrum dopravního výzkumu, v.v.i., 2021. 69 s. Zadavatel: Ministerstvo dopravy ČR.

[8] KŘIVÁNEK, V., et al. Metodika pro měření a hodnocení komunikací z hlediska hlukové zátěže, 55 s. Centrum dopravního výzkumu, v.v.i., Brno, prosinec 2014, ISBN 978-80-86502-82-3.

[9] Misdariis, N., Pardo, L-F.: The sound of silence of electric vehicles – Issues and answers. InterNoise, China, 2017.

[10] PRATICO, F., F. ANFOSSO-LÉDÉE. Trends and Issues in Mitigating Traffic Noise through Quiet Pavements. Procedia – Social and Behavioral Sciences. 2012, 53, 203-212. ISSN 18770428.

[11] Sandberg, U., Ejsmont, J.A.: Tyre/road Noise Reference Book. Kisa, Sweden: INFORMEX, ISBN 91-631-2610-9, 2002.

[12] VALENTIN, J., MONDSCHEIN, P., BUREŠ, P., KŘIVÁNEK, V., Technické podmínky 259 Asfaltové směsi pro obrusné vrstvy se sníženou hlučností“, schváleno Ministerstvem dopravy čj. 121/2017-120-TN ze dne 21. listopadu 2017 s účinností od 1. prosince 2017, 26 s.

[13] Vieira, T., & Sandberg, U. (2019). Close proximity (CPX) round robin test: Comparison of results from four different CPX trailers measuring noise properties of 10 Swedish road surfaces. Internoise (pp. 7176–7187), Madrid, Spain. Red Hook, NY: Curran Associates, Inc.

[14] WEHR R., FUCHS A., A combined approach for CPX tyre hardness and temperature correction. In: Proceedings of the INTER-NOISE 2016 - 45th International Congress and Exposition on Noise Control Engineering: Towards a Quieter Future, 2016, pp. 2986 – 2991.

**Poděkování**

*Tento příspěvek čerpá z dat měření, které byly získány na základě řešení projektu Technologické agentury ČR č. TL02000258 „Rozvoj území s využitím nízkohlučných vozovek“, č. TA04021486 „Nástroje pro analýzu a hodnocení environmentálních dopadů hluku vozovek“, č. TE01020168 „Centrum pro efektivní a udržitelnou dopravní infrastrukturu“, č. TA01030459 „Změna hluku povrchů vozovek v průběhu několika let používání“ a projektu „Analýza a monitoring změn hlučnosti povrchů pozemních komunikací“ financovaného Ministerstvem dopravy účelovou neinvestiční dotací na podporu rozvoje činnosti veřejné výzkumné instituce v resortu dopravy – Centra dopravního výzkumu, v. v. i. na základě Rozhodnuti č. j. 56/2020-710-VV/3.*

*Tento příspěvek byl vytvořen za finanční podpory Ministerstva dopravy v rámci programu dlouhodobého koncepčního rozvoje výzkumných organizací.*



3. blok:

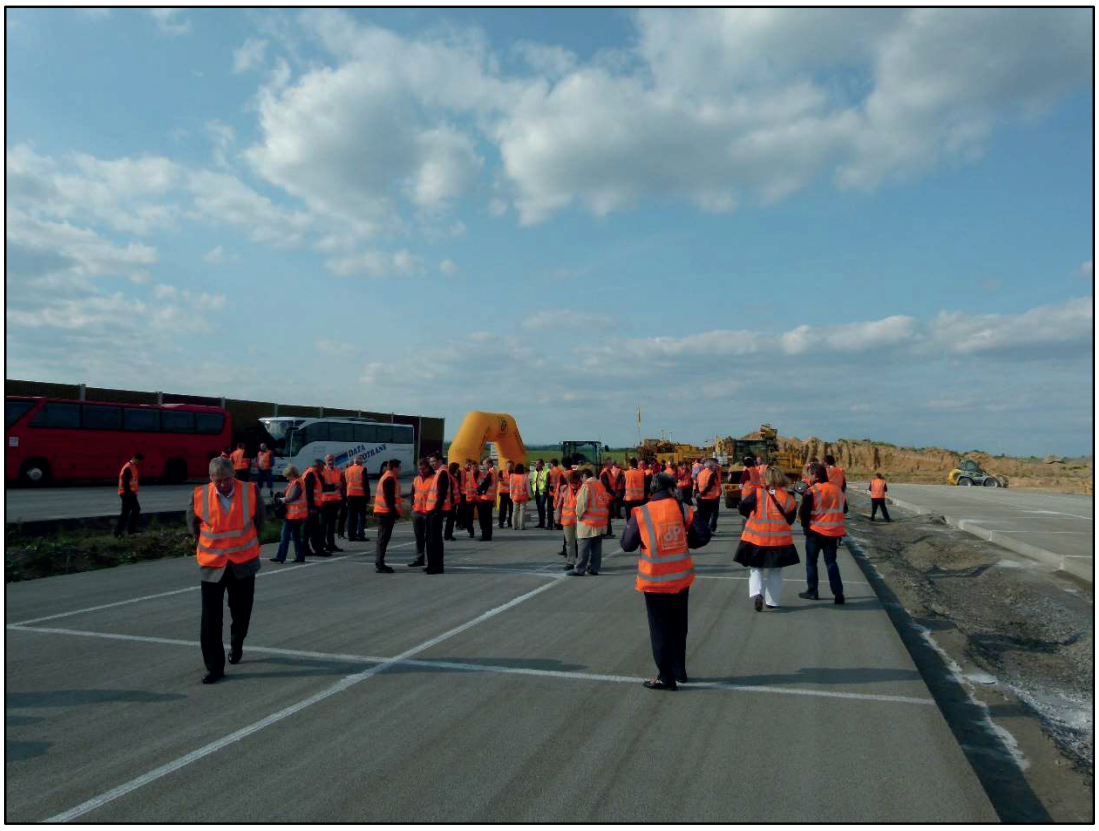
# Opravy, údržba a diagnostika – nové technologie a materiály

# Vývoj protismykových vlastností cementobetonových krytů s obnaženým kamenivem a technologie obnovy protismykových vlastností cementobetonových krytů

*Leoš Nekula*
*ZL č. 193 Měření PVV – Leoš Nekula*

*Tel.: +420 603 473 054*
*Mail: L.Nekula@seznam.cz*

Od položení prvního uceleného pokusného úseku s cementobetonovým krytem (dále CBK) s obnaženým kamenivem na nepojížděné části Pražského okruhu, dálnice D0, v místě křížení s dálnicí D1 – MÚK Modletice v květnu 2012 již uplynulo více jak 10 let. Došlo k tomu po letitém přesvědčování tehdejšího zadavatele staveb, že technologie CBK s obnaženým kamenivem splňuje, na rozdíl od do té doby používané technologie úpravy povrchu CBK taženou jutou, požadavky na hodnocení protismykových vlastností povrchu vozovky jak nového povrchu, tak na konci záruční doby. Zatím, co se v Rakousku a v Německu technologie CBK s obnaženým kamenivem úspěšně používala již delší dobu, což jsme také prokázali měřením protismykových vlastností na rakouských a německých dálnicích, tak v České republice převládal názor, že technologie tzv. vymývaného betonu je ekonomicky nevýhodná a nezaručí dobré protismykové vlastnosti povrchu vozovky. Díky tlaku především zhotovitelských firem, které se potýkaly s velmi krátkou dobou životnosti protismykových vlastností povrchů CBK s povrchovou úpravou taženou jutou, a díky novým pracovníkům zadavatele staveb, se v roce 2008 podařilo prosadit první krátký pokusný úsek CBK s obnaženým kamenivem na budované odpočívce Stříbrnice, která ale nebyla v dalších letech v provozu. Trvalo však ještě další 4 roky, než byl CBK s obnaženým kamenivem položen v celé šířce komunikace na výše popsaném úseku dálnice D0, na které bylo možno provést řádné měření, které prokázalo velmi dobré hodnocení protismykových vlastností, vysoko v klasifikačním stupni 1. Protože ale tento úsek není do dnešních dní pojížděn, tak nemohla být zjišťována životnost protismykových vlastností. Shodou okolností byla na tomto úseku exkurze v rámci konference Betonové vozovky v roce 2012 (viz obrázek 1).



*Obrázek 1: Exkurze na úseku dálnice D0 s CBK s obnaženým kamenivem*

## První pojížděný úsek

V říjnu 2012 byl položen první pokusný úsek s CBK s obnaženým kamenivem na pojížděné dálnici D1, v pravém jízdním pásu, rychlém i pomalém pruhu, v blízkosti Exitu 216 Rousínov, km 214,403 – 214,624. Detail povrchu je na obrázku 2.



*Obrázek 2: Detail povrchu CBK s obnaženým kamenivem na pokusném úseku dálnice D1*

Jak tento pokusný úsek na pojížděné dálnici D1, tak i úsek na nepojížděné dálnici D0, prokázaly dokonalé zvládnutí náročné technologie CBK s obnaženým kamenivem. Měření součinitele tření $F_p$ prokázalo velmi dobré protismykové vlastnosti povrchu vozovky s předpokladem dlouholeté životnosti, protože použité hrubé kamenivo má dobrou odolnost proti ohlazení. Na prvním pojížděném pokusném úseku je pravidelně prováděno měření protismykových vlastností. Diagramy závislosti součinitele podélného tření $F_p$ na čase jsou uvedeny v diagramu 1 pro rychlý pruh a v diagramu 2 pro pomalý pruh. Z obou diagramů je patrné, že i po 10 letech velmi intenzivního provozu, zejména těžkých vozidel v pomalém pruhu, jsou protismykové vlastnosti hodnoceny v rychlém pruhu klasifikačním stupněm 2 – dobré a v pomalém pruhu klasifikačním stupněm 3 – vyhovující, takže splňují požadavek na hodnocení protismykových vlastností na konci záruční doby. Po počátečním rychlejším poklesu hodnot $F_p$ v prvních 2 letech je v následujících 8 letech pokles hodnot $F_p$ jen pozvolný.

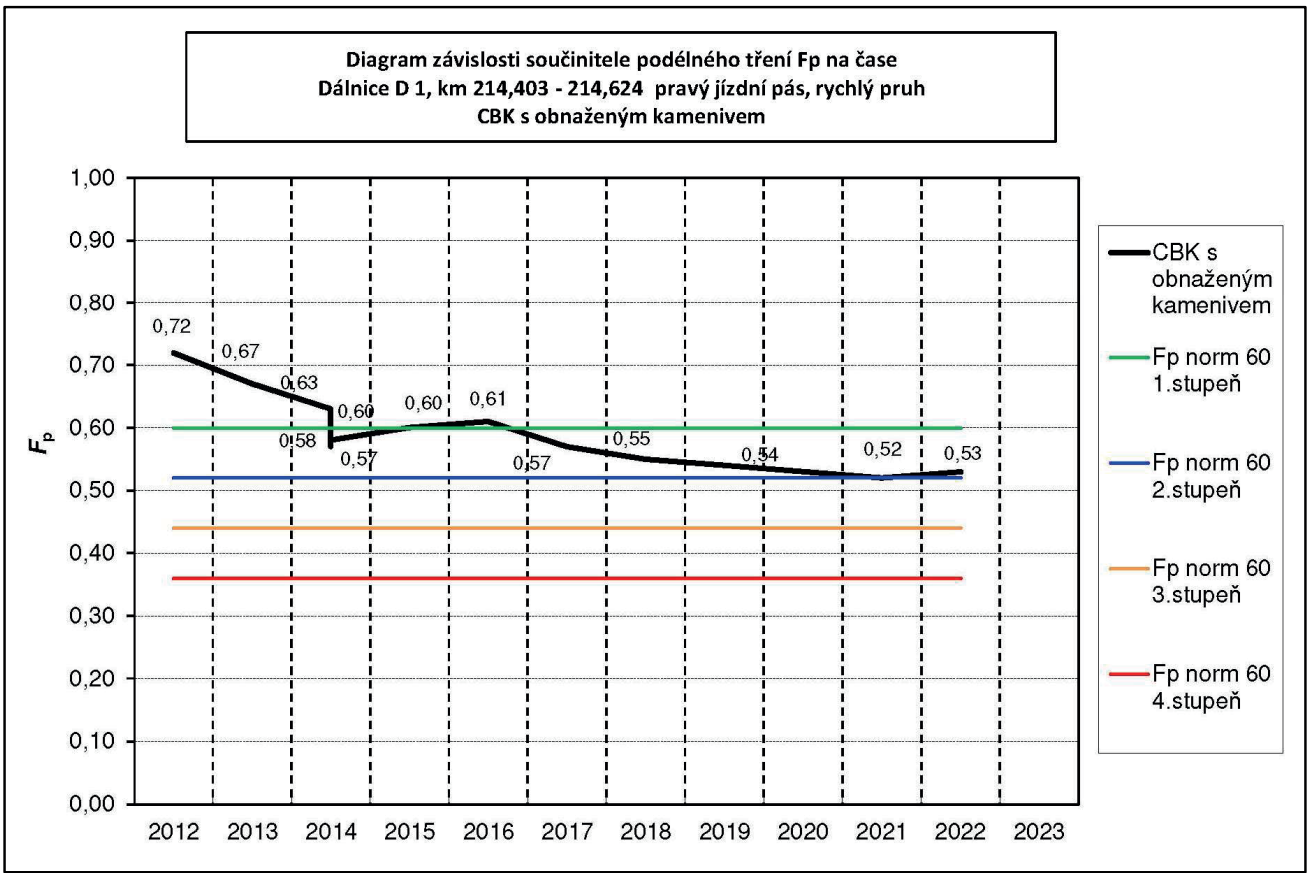



*Diagram 1: Závislost $F_p$ na čase povrchu CBK s obnaženým kamenivem v rychlém pruhu*

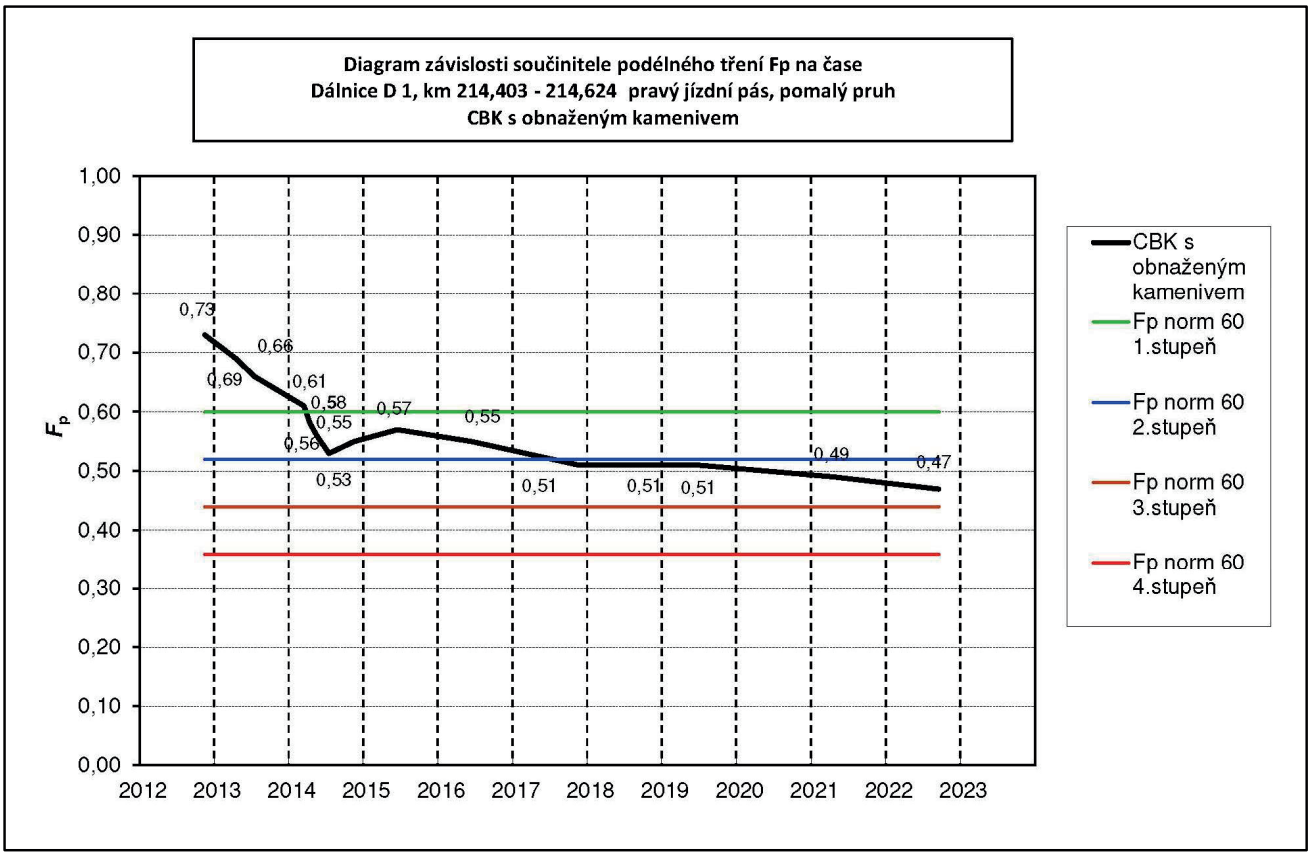



*Diagram 2: Závislost $F_p$ na čase povrchu CBK s obnaženým kamenivem v pomalém pruhu*

## CBK s obnaženým kamenivem v následujícím období

Úspěšné zvládnutí technologie CBK s obnaženým kamenivem na pokusných úsecích přesvědčily zadavatele stavebních prací na dálnicích, že tato technologie vyřeší vleklý problém s havarijním stavem protismykových vlastností na dosud používaných površích CBK s povrchovou úpravou taženou jutou. U posledních pokládek CBK s povrchovou úpravou touto technologií se životnost z hlediska protismykových vlastností povrchu vozovky už počítala jen na měsíce. Zároveň na těchto površích byla, zvláště za mokra, zvýšená nehodovost. Navíc obnova protismykových vlastností na vyhlazených površích CBK je nákladná, s krátkou životností, takže by se měla opakovat maximálně ve dvou až tříletém cyklu.
V posledních letech se technologie CBK s obnaženým kamenivem používá výlučně jak při výstavbě nových a rekonstrukcích starších dálničních úseků s CBK, tak použita byla také na všech úsecích modernizace D1. Měření protismykových vlastností na těchto nových úsecích stabilně prokazuje vysoké hodnoty součinitele podélného tření $F_p$, s hodnocením vysoko pro přejímku prací požadovaném v klasifikačním stupni 1.
Zde si nemohu odpustit poznámku k nesmyslnému požadavku na měření protismykových vlastností povrchů vozovek před uvedením do provozu. Při současném trendu zkracování lhůt výstavby a oprav dálnic není možné zajistit takové podmínky, které vyžaduje norma pro měření protismykových vlastností povrchu vozovky. Měří se tedy na površích znečištěných blátem, prachem, drtí, pískem, při probíhajících dokončovacích pracích, za provozu stavebních strojů, nákladních aut a pohybu desítek pracovníků. Je nasnadě, že takové měření protismykových vlastností nesplňuje normové požadavky na přejímku nových povrchů. Naměřené hodnoty součinitele tření $F_p$ jsou velmi nehomogenní, hodnocení většinou v celé škále klasifikačních stupňů 1 až 5. Podle ČSN 73 6177 musí být měření označeno jako orientační, takže vlastně nemá žádnou vypovídací hodnotu a je naprosto zbytečné. Maximálně výsledky měření vnášejí nesoulad mezi investora a zhotovitele.
Příklad běžně dosahovaného hodnocení protismykových vlastností povrchů CBK s obnaženým kamenivem na dlouhodobě sledovaném úseku ve staničení km 225,0 – 224,0, kde byla provedena rekonstrukce vozovky v roce 2013 je uveden v diagramu č. 3 (rychlý pruh) a diagramu č. 4 (pomalý pruh).

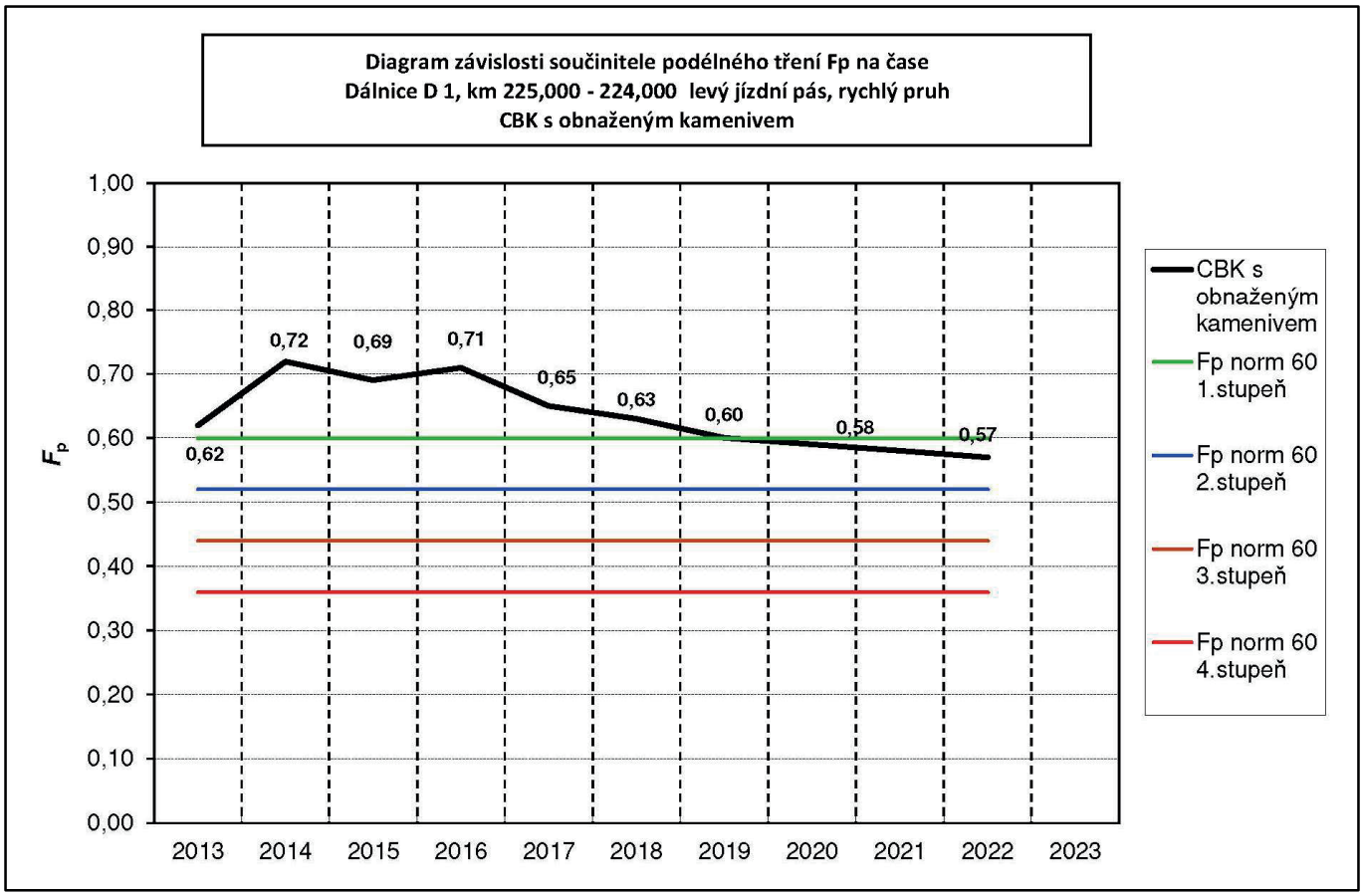



*Diagram 3: Závislost $F_p$ na čase CBK s obnaženým kamenivem v rychlém pruhu*

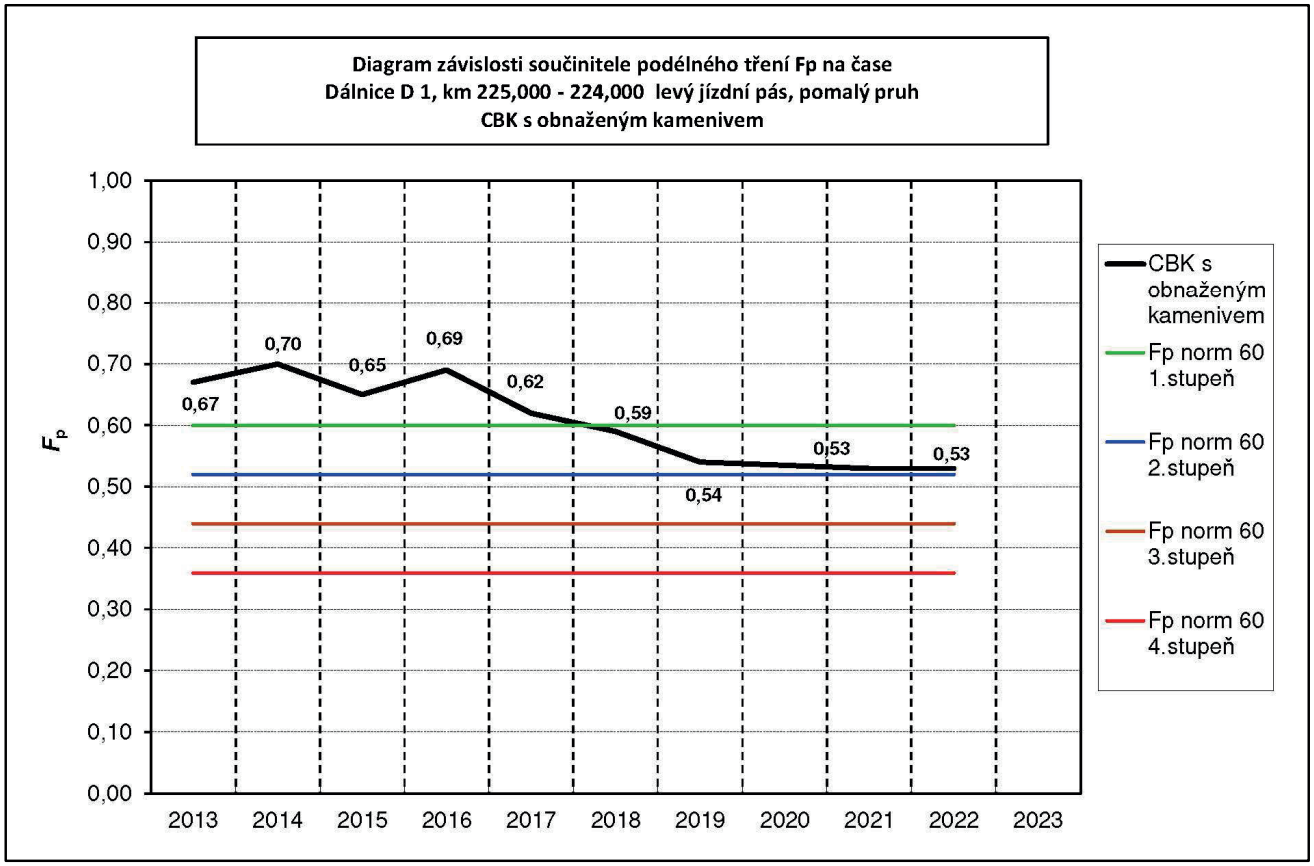



*Diagram 4: Závislost $F_p$ na čase CBK s obnaženým kamenivem v pomalém pruhu*

Prozatím všechny měřené úseky dálnic, kde byla použita technologie CBK s obnaženým kamenivem, po uplynutí záruční doby splnily požadavek tabulky A.5 přílohy A, ČSN 73 6177 [1] na hodnocení na konci záruční doby. Z diagramu 3 je patrné, že po 8 letech provozu na velmi zatíženém úseku dálnice D1 je hodnocení protismykových vlastností povrchu vozovky těsně pod hranicí klasifikačního stupně 1, v pomalém pruhu je hodnocení na hranici klasifikačního stupně 2 a 3 s tím, že hodnoty součinitele tření $F_p$ za poslední 2 roky téměř neklesají.

## Technologie obnovy protismykových vlastností CBK

Technologie obnovy protismykových vlastností povrchů CBK s povrchovou úpravou taženou jutou byly podrobně popsány ve sborníku konference Betonové vozovky 2018. Pro připomenutí uvádím používané technologie obnovy protismykových vlastností, které byly odzkoušeny jak na pokusných úsecích, tak i při opravách kluzkých povrchů CBK. Technologie se pracovně nazývají nedestruktivní a destruktivní. Rozdíl je především v tom, že nedestruktivní technologie obnovují protismykové vlastnosti v horní cementopískové vrstvičce CBK, kdežto destruktivní technologie zasahují do hrubého kameniva pod cementopískovou vrstvičkou.

nedestruktivní technologie obnovy protismykových vlastností povrchů CBK:

- tryskání paprskem tlakové vody
- tryskání ocelovými kuličkami

destruktivní technologie obnovy protismykových vlastností povrchů CBK:

- broušení diamantovými kotouči
- jemné frézování

Pokusně se také obnova protismykových vlastností povrchů CBK prováděla například umýváním horkou vodou s detergentem, nebo s použitím běžných ručních tlakových myček. Tyto technologie ale protismykové vlastnosti povrchu CBK neobnoví, vhodné jsou tak maximálně na znečištěné povrchy CBK v tunelech.

V posledních letech se obnova protismykových vlastností prováděla nedestruktivními technologiemi. Bylo ale zjištěno, že tyto technologie, zvláště tryskání paprskem tlakové vody mají příliš krátkou životnost obnovy protismykových vlastností, a musely by se opakovat většinou ve dvou až tříletém cyklu. Na nejvíce zatížených úsecích dálnic se cyklus může zkrátit i na méně jak 2 roky (viz diagram 5)

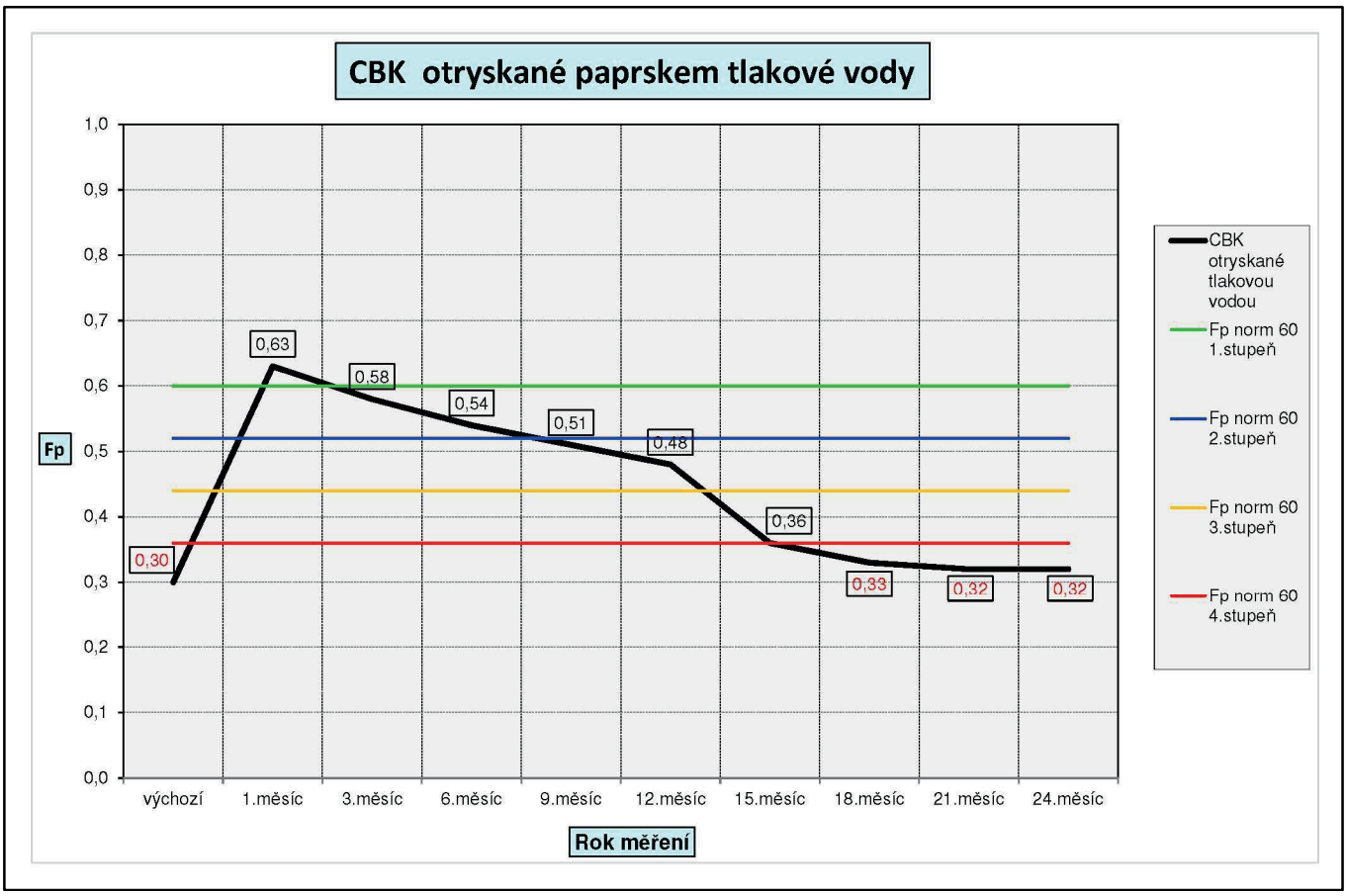



*Diagram 5: Závislost $F_p$ na čase CBK s obnaženým kamenivem v pomalém pruhu*

Proto se v poslední době uvažuje o destruktivních metodách, které zaručují podstatně delší životnost obnovy protismykových vlastností povrchů CBK. Na několika úsecích dálnic již byla použita technologie broušení diamantovými kotouči (grinding). Tato technologie se s úspěchem používá i v jiných státech EU, velmi rozšířená je v USA.
Této technologii se podrobně věnuje příspěvek „Zkušenosti a vývoj protismykových vlastností u cementobetonových krytů s povrchem upraveným broušením“ autorů Ing. Stanislava Bedřicha a Leoše Nekuly uveřejněný v tomto Sborníku.

*Tento článek byl vytvořen se státní podporou Technologické agentury ČR v rámci Programu DOPRAVA 2020+, v rámci řešení projektu č. CK1000110 Životnost protismykových vlastností povrchů vozovek, její predikce a skutečný vývoj v čase.*

**Zdroje**

[1] ČSN 73 6177 Měření a hodnocení protismykových vlastností povrchu vozovky

# Rychletuhnoucí beton pro obnovu provozní způsobilosti vozovek

*Autoři [Dogaç Özsar, Felicia Nägele]*

*Tel .: +41 44 445 13 46*
*Mail: dogac.ozsar@concretum.com, felicia.naegele@concretum.com*

## Nová generace rychletuhnoucích betonů a Concretum Q-FLASH 2/20

Vady vyskytující se na povrchu letištních přistávacích a vzletových drah, pojezdových drahách a odstavných plochách jsou následkem časově závislých jevů a/nebo následkem překračování projektované výkonnosti. V důsledku neustále se zvyšujícího počtu cestujících a hustoty leteckého provozu je nutno provádět potřebné opravy poruch na letištní infrastruktuře bez přerušení provozního zatížení, což je spojeno s vysokou náročností. Jakýkoli nepříznivý dopad na letecký provoz během provádění oprav uvedených deformací může příslušnému letišti způsobit značné ekonomické ztráty. V souvislosti s těmito opravami, při nichž jsou již tradiční metody nedostačující, tedy vyvstala nezbytnost zavedení pokrokových metod, které jsou rychlé a které umožňují získávání dlouhodobě udržitelných výsledků. Opravy by měly být prováděny v krátkých časových intervalech, aby byla zajištěna bezpečnost leteckého provozu a aby nedocházelo k vzniku ekonomických ztrát. V těchto časově citlivých situacích zůstávají trvalými prioritami opravy s dlouhodobou trvanlivostí.

Podle dosavadních zkušeností lze tyto obtíže překonávat použitím rychletuhnoucího betonu nové generace. Rychletuhnoucí beton nové generace s vysokou trvanlivostí získává svoji pevnost oproti starší generaci rychletuhnoucích betonů pomocí rozdílných mechanismů tuhnutí. Téměř ve všech případech, souvisejících s letišti je konvenční, rychletuhnoucí beton, pokud jde o splnění příslušných standardů a zejména požadavků na trvanlivost nedostačující. Vhodnost rychletuhnoucího betonu nové generace je doložena jeho aktivním používáním a zkušenostmi z různých letišť ve všech částech světa a to po dobu více než 15 roků.

Q-FLASH 2/20 rychletuhnoucí beton, výrobek fy Concretum, byl vyvinut speciálně pro opravy letištní infrastruktury prováděnými v krátkých časových intervalech. Jeho dlouhodobá trvanlivost je zajištěna tím, že mechanismus vytvrzování je výsledkem hydratace kalciumsulfoaluminátu (CSA) a fázových složek portlandského cementu. Doba tuhnutí, kterou je možno upravovat pro použití v rozdílných časových intervalech, je dalším a jedinečným aspektem produktu Q-FLASH 2/20. Díky svému nízkému hydratačnímu teplu a vysoké počáteční pevnosti mladého betonu je produkt Q-FLASH 2/20 připraven k používání do jedné hodiny od položení.

Q-FLASH 2/20 je přitom možno zpracovávat za použití tradičních betonářských metod, bez potřeby dodatečných investic. Jeho přípravu a pokládku tedy zvládne i pracovní tým se zkušenostmi s tradičními metodami betonáží. Díky svým různým metodám přípravy a pokládky poskytuje tento beton takovou míru flexibility, která umožňuje jeho použití v různých oblastech v závislosti na konkrétních požadavcích. Naše inovativní technologie se používá nepřetržitě již od roku 2004 a pomáhá zajišťovat bezpečnost letištního provozu na různých letištích v celém světě.

Vzhledem k flexibilitě dosahovaných rozdílných vlastností betonu (konzistence, doba zpracovatelnosti, pevnosti, stupně vlivu prostředí) je Q-FLASH 2/20 vhodný pro všechny druhy výrobních postupů. Velikost plochy, která má být opravována, fyzická skladba infrastruktury a plánovaný denní objem oprav jsou důležitými parametry při určování výrobního postupu. Dosahování dalšího zvýšení míry flexibility podle konkrétních požadavků pak umožňují alternativy, jakými jsou například příprava v konvenční betonárce nebo příprava v mobilní betonárce. Míchání složek na staveništi pro menší vysprávky domíchávačem či přenosnou míchačkou jsou ideálními záložními plány pro pečlivou projektovou přípravu.

## Opravy s Concretum Q-Flash 2/20 na mezinárodním letišti v Curychu

Náš rychletuhnoucí beton byl poprvé použit v roce 2004 při opravě pojezdové dráhy Bravo mezinárodního letiště v Curychu. Po téměř 18 letech je opravená plocha stále používaná a udržovaná ve své původní formě i počáteční kvalitě. Od roku 2004 se poptávka mezinárodního letiště v Curychu po Q-FLASH 2/20 postupně každoročně zvyšuje. Během tohoto období tak již bylo pomocí Q-FLASH 2/20 opraveno přibližně 30 000 $m^2$. Pokládka se přitom prováděla různými způsoby, ručně i finišerem. Třebaže zvládnutí všech prací během tohoto dlouhého časového období vyžadovalo rozdílné podpůrné i výrobní metody, hlavním způsobem výroby zůstávala příprava směsí prováděná za použití betonárek. Všechny betonárky, které byly umístěny v blízkosti letiště, byly pro tento způsob výroby vhodné, přičemž tři z nich již byly po řadu předchozích roků používány jinými stavebními podniky, které zde realizovaly své projekty. Přeprava byla prováděna pomocí sklápěcích nákladních vozidel a automobilových domíchávačů. Většina prací byla prováděna v době mezi 23. hodinou a 6. hodinou, aby byl minimalizován nepříznivý dopad na letecký provoz. Význam těchto oprav se postupně zvyšoval v důsledku narůstajícího počtu odbavovaných letů a omezeného prostoru na letišti. Během nočních prací byli naši technici přítomni jak na vlastním staveništi, tak i u betonárky, aby zde zajišťovali bezprostřední podporu každého kroku výrobního postupu.




*Obrázek 1: Fotografie desky opravené v roce 2004 po 11 letech (2015)*

Letiště Curych klade vysoké nároky na vlastnosti čerstvého betonu, na rychlé zvyšování pevnosti během tuhnutí i na vysokou trvanlivost rychletuhnoucího betonu. Zadané specifikace přitom vyžadují minimální pevnost v tlaku 16 N/$mm^2$ (fc,cube) před opětovným povolením používání přistávací a vzletové dráhy pro letecký provoz. Concretum Q-FLASH 2/20 poskytuje hodnotu 20 N/$mm^2$ (fc, cube) během maximálně dvou hodin následujících po uplynutí doby tuhnutí. Podle požadavků projektu a podle metody pokládky je možno produktu Concretum Q-FLASH 2/20 upravovat konzistenci. Vysoká míra flexibility, týkající se doby tuhnutí Q-FLASH 2/20, umožňuje přesně přizpůsobit počátek zpracování betonu od nejkratší hodnoty 45 minut po nejdelší časový interval zpracovatelnosti 120 minut. Tato jedinečná vlastnost nám umožňuje vypočítávat dobu potřebnou pro noční výrobu a pokládku betonu. Opravy menších ploch, prováděné malými objemy tekutého betonu, mohou být rychlé a přitom mohou vyžadovat kratší doby pro zpracování betonu. Pro velkoplošnou pokládku betonu, která vyžaduje delší dobu zpracování, se připravují mnohem větší množství materiálu. Jelikož podle získaných zkušeností je zajištěna dostatečná dlouhodobá trvanlivost, je Concretum Q-FLASH 2/20 ideální řešení pro poškozené vozovky opravované během krátkých uzavírek.

| | |
|---|---|
| produkt | Q-FLASH 2/20 |
| stupeň vlivu prostředí | XC4, XD3, XF4 |
| třída pevnosti | C50/60 |

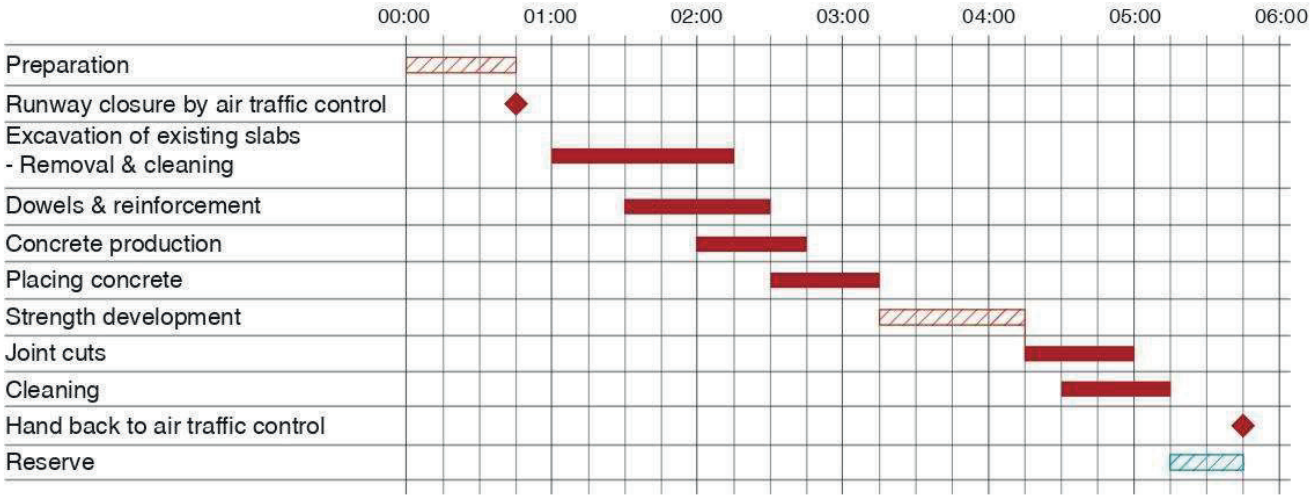
| | |
|---|---|
| třída konzistence | S1/S2 (C1/C2) |
| max. velikost zrna kameniva | 32 mm (kulaté pozn. překl.: vhodný tvarový index) |
| odolnost proti alkalicko-křemičité reakci (ASR) | odolný |

*Tabulka 1: Vlastnosti betonu pro noční práce na mezinárodním letišti v Curychu*

## Projekt obnovy vzletové a přistávací dráhy na istanbulském mezinárodním letišti Sabiha Gökçen

Mezinárodní letiště Sabiha Gökçen, které v Istanbulu slouží jako vedlejší letiště, bylo postaveno v roce 2001. Původní projektovaná kapacita tohoto letiště činila 3,5 milionu cestujících, avšak již krátce po jeho slavnostním otevření se počty odbavených cestujících začaly rychle zvyšovat. V roce 2008 byla kapacita terminálu zvýšena na 25 milionů, s čímž však nebyly spojeny žádné práce, které by souvisely s infrastrukturou jediné vzletové a přistávací dráhy tohoto letiště. Kapacita činící 25 milionu cestujících byla překročena v roce 2015, a letiště tak začalo fungovat nad rámec své projektované kapacity. V současnosti již letiště odbavuje 41 milionů cestujících ročně. Tento rychlý nárůst měl samozřejmě určitý nepříznivý dopad na uvedenou jedinou vzletovou a přistávací dráhu letiště Sabiha Gökçen, zejména na její středovou oblast, která je letadly nejvíce využívána. Sabiha Gökçen je dnes i přesto nejrušnějším letištěm s pouze jednou vzletovou a přistávací dráhou a pouze jedním odbavovacím terminálem na světě. Skutečnost, že letiště zůstává i při tomto hustém leteckém provozu bez možnosti používání alternativní vzletové a přistávací dráhy, samozřejmě znamená, že vedení tohoto letiště má svázané ruce, pokud jde o údržbu uvedené jediné dostupné dráhy.

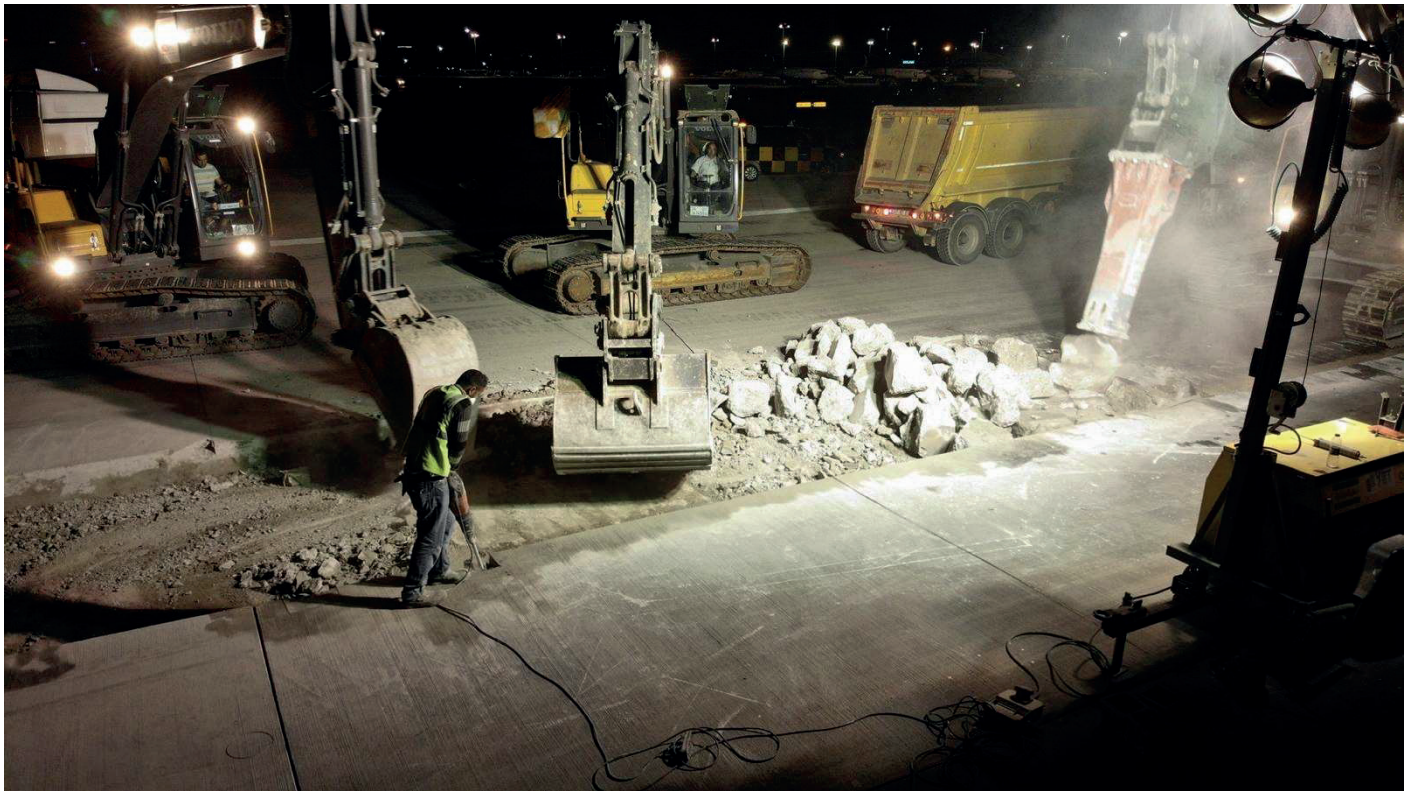
Vzhledem k chybějící možnosti dlouhodobého přerušení provozu bylo v roce 2018 rozhodnuto, že práce související s opravami vzletové a přistávací dráhy budou prováděny během nočních uzavírek během doby od 00.50 hod. do 05,50, a to vždy pět dnů v týdnu. Proto byl pro zvládnutí těchto prací požadován produkt představovaný rychle tuhnoucím betonem s vysokou trvanlivostí. Vzhledem k množstvím plánovaným pro rok 2018 se tento projekt stal dosud nejrozsáhlejším projektem, při kterém byl používán rychletuhnoucí beton „na jeden zátah“.




*Obrázek 2: Harmonogram nočních stavebních prací pro mezinárodní letiště Sabiha Gökçen*

| | |
|---|---|
| *Preparation* | *příprava* |
| *Runway closure by air traffic control* | *uzavření dráhy Řízením letového provozu* |
| *Excavation of existing slabs - Removal & cleaning* | *vyjmutí stávajících desek- demontáž a čištění* |
| *Dowels & reinforcement* | *kluzné trny a vyztužení* |
| *Placing concrete* | *pokládka betonu* |
| *Strength development* | *vývoj pevnosti* |

| | |
|---|---|
| *Joint cuts* | *řezání spár* |
| *Cleaning* | *čištění* |
| *Hand back to air traffic control* | *předání Řízení letového provozu* |



*Obrázek 3: Rozbíjení a odstraňování starých betonových desek*



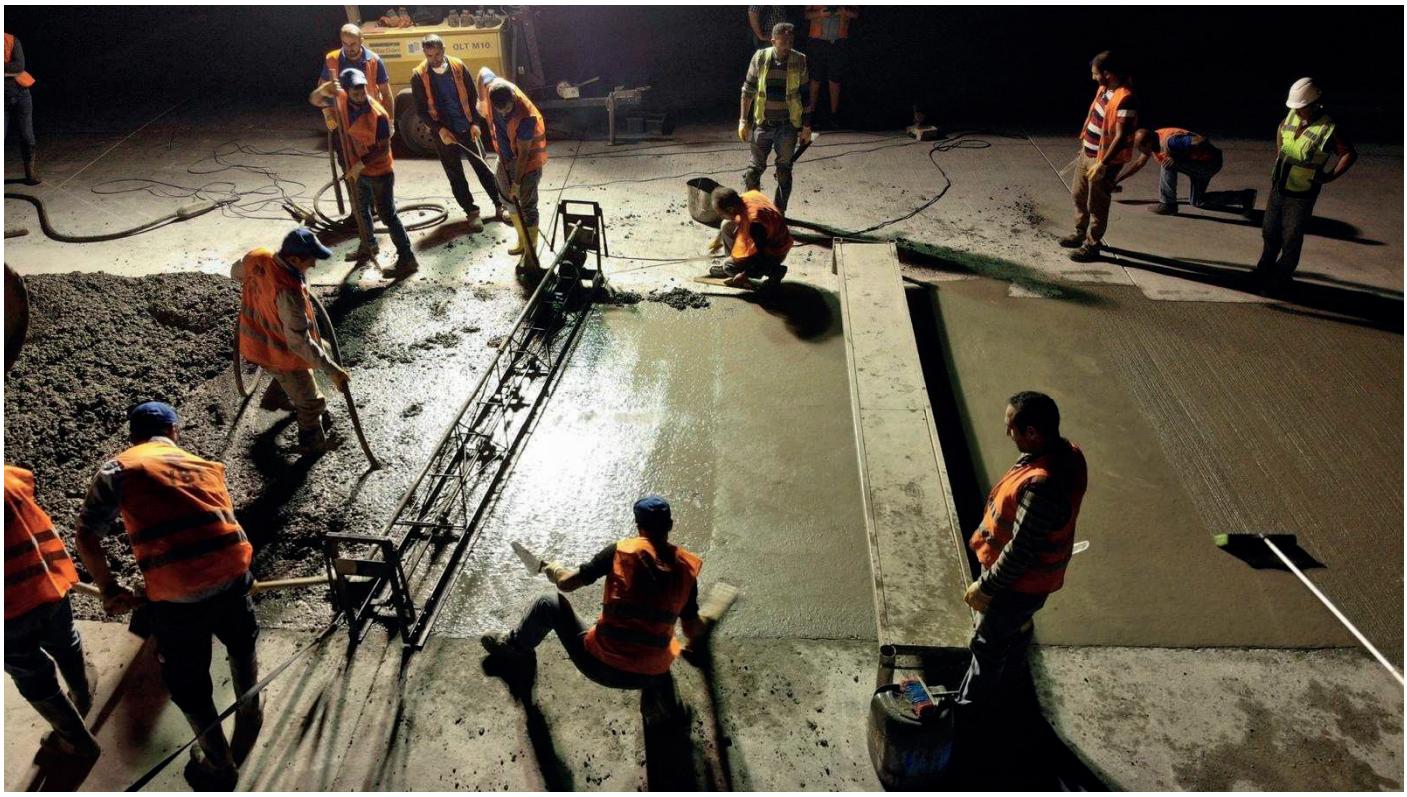

*Obrázek 4: Umísťování výztuže, zatímco je odstraňována zbylá část desky*



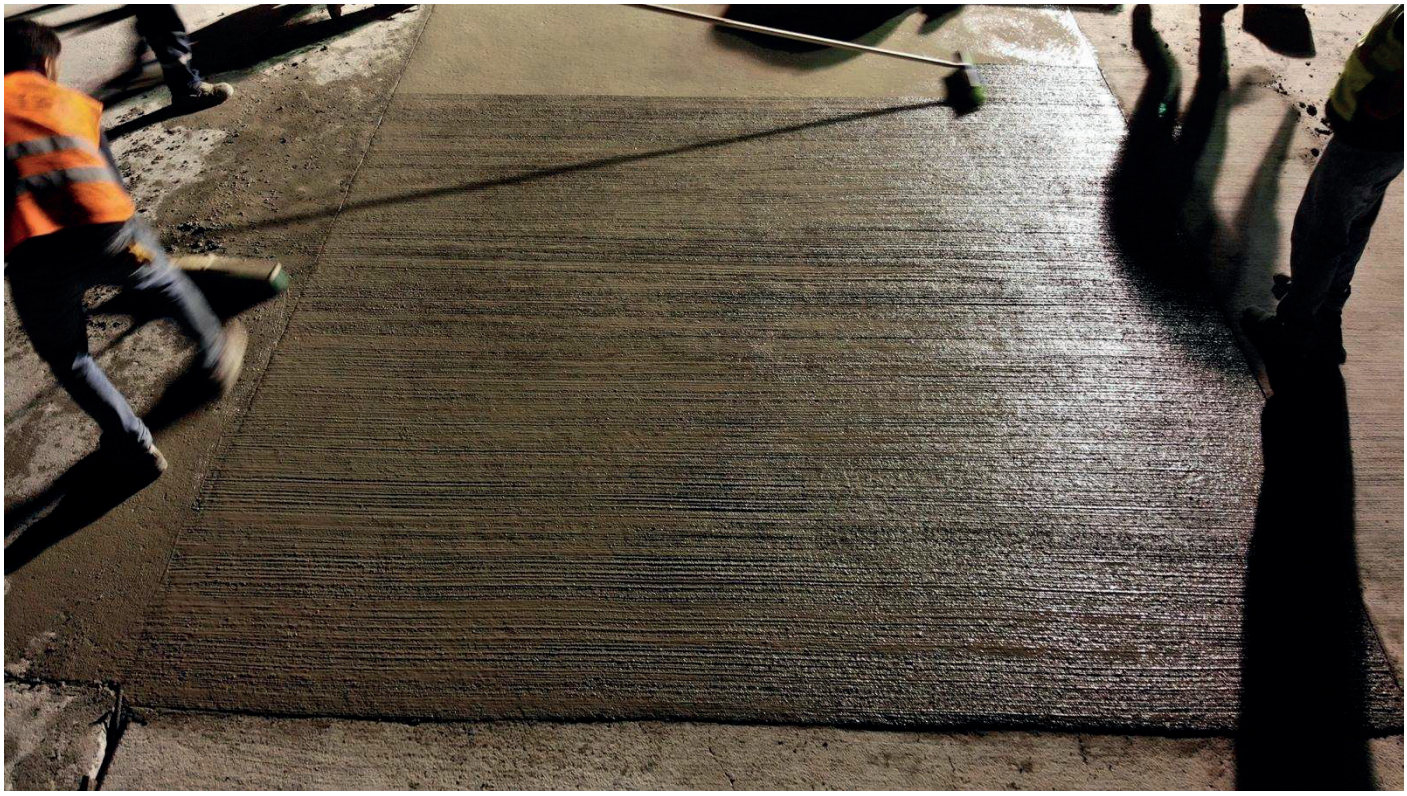
*Obrázek 5: Výroba betonu v betonárně*



*Obrázek 6: Pokládka betonu do oblasti desky pomocí bagru*



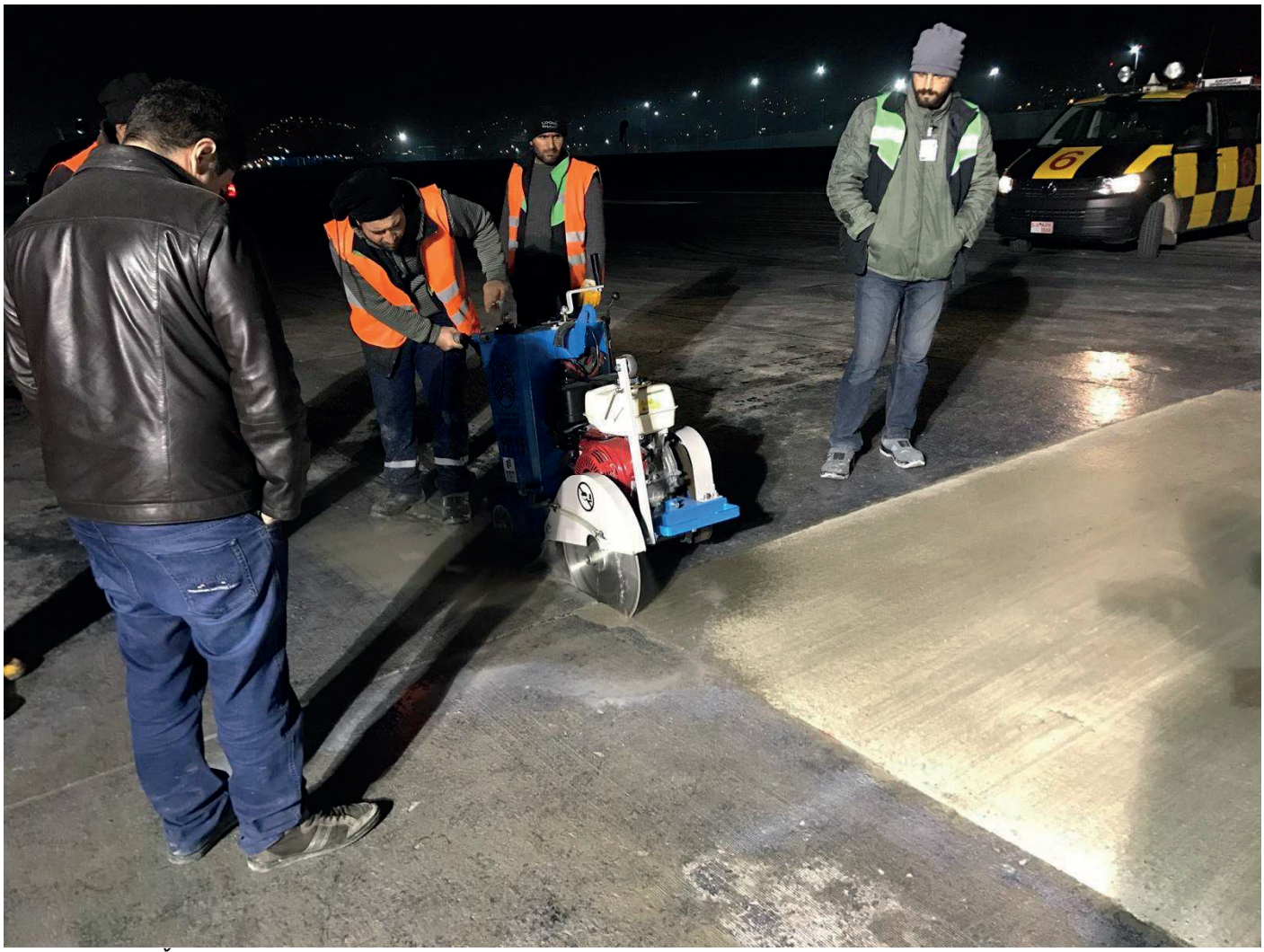
*Obrázek 7: Zhutňování betonu vibrací a konečná úprava povrchu*



*Obrázek 8: Zdrsňování povrchu kartáčem*

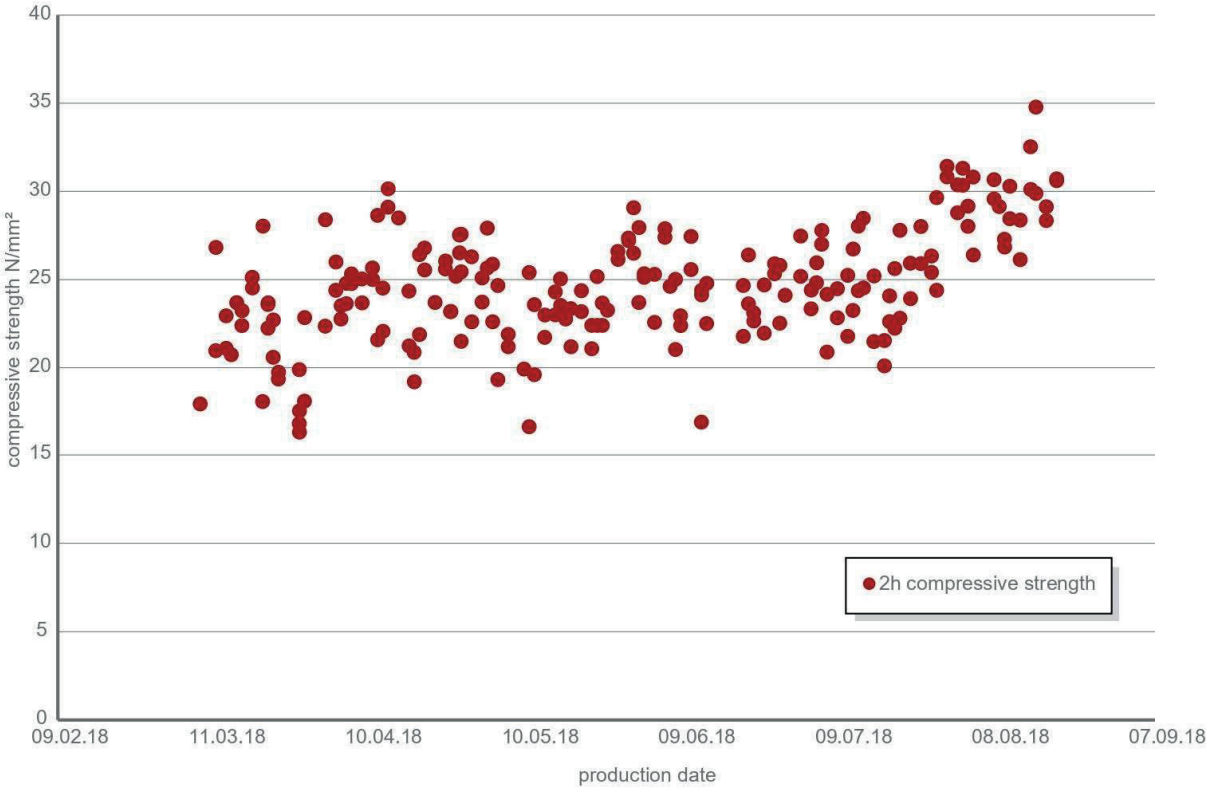


*Obrázek 9: Ošetřování betonu a přikrytí povrchu pro zajištění vývoje pevnosti*



*Obrázek 10: Řezání spár*

Požadavkem mezinárodního letiště Sabiha Gökçen pro uvedení vzletové a přistávací dráhy do provozu bylo dosažení minimální pevnosti v tlaku 16 N/mm$^2$ (fc,cube). Očekávaná konzistence betonu byla podobná konzistenci běžného vozovkového betonu, aby bylo umožněno provádění přípravy betonové směsi i následné manipulace s touto směsí za použití stejného vybavení obsluhovaného personálem se stávající kvalifikací. Beton byl připravován v betonárně, zřízené pouze pro realizaci tohoto projektu, ve vzdálenosti 15 minut jízdy od letiště. K přepravě byla používána sklápěcí nákladní vozidla, aby byla umožněna rychlá nakládka betonu u betonárky i vykládka na staveništi. Dalšími výhodami použití sklápěcích nákladních vozidel jsou možnosti vizuální kontroly konzistence betonu a snadného měření teploty čerstvého betonu v průběhu výroby. Dodatečná výhoda je, že sklápěcí nákladní vozidla je možno využívat pro přepravu odstraněných původních betonových desek. Naši techničtí pracovníci, kteří poskytovali potřebnou podporu, byli přítomni přímo u betonárny, aby byla zajištěna možnost okamžitého reagování na jakoukoli změnu stanovených parametrů. Doby zpracování betonu byly udržovány v rozmezí 45 až 120 minut, podle požadavků nočních prací.




*Obrázek 11: Hodnoty pevnosti v tlaku pouze po dvou hodinách tuhnutí (fc,cube)*

| | |
|---|---|
| Compressive strength | pevnost v tlaku |
| Production date | datum výroby |

Concretum Q-FLASH 2/20 beton je složený z Concretum Q-FLASH cem 100 (P), plně cementového pojiva, Concretum Q-FLASH sp (L), superplastifikátoru a Concretum Q-FLASH ret (L), zpomalovače tuhnutí, který řídí dobu zpracovatelnosti. Plnivem, které bylo používáno pro přípravu betonové směsi obsahující výše uvedený materiál, přitom bylo kamenivo pocházející z místních zdrojů v okolí Istanbulu. Jeho maximální zrnitost odpovídala průměru 38 mm. Vodní součinitel v/c byl při přípravě směsi udržován v rozmezí 0,31 až 0,35. Podrobné složení směsi je uvedeno v Tabulce 2.

| | |
|---|---|
| Concretum Q-FLASH cem 100 (P) rychletuhnoucí cement | 390 kg/m$^3$ |
| kamenivo (0/5, 5/12, 12/22 a 22/38 mm) | 1950 kg/m$^3$ |

| | |
|---|---|
| Vodní součinitel v/c | 0,31 - 0,35 |
| Concretum Q-FLASH sp (L) superplastifikátor | 2,2 - 6,8 kg/m$^3$ |
| Concretum Q-FLASH ret (L) zpomalovač tuhnutí | 0,8 - 5,3 kg/m$^3$ |

*Tabulka 2: Složení betonové směsi pro mezinárodní letiště Sabiha Gökçen*

Projekt byl zahájen v roce 2018 a do dnešního dne byla za použití rychletuhnoucího betonu Concretum Q-FLASH 2/20 opravena vzletová a přistávací dráha, pojezdové dráhy a odstavné plochy o celkové výměře 20 000 m$^2$. Během projektu proběhly všechny noční činnosti bez jakýchkoli mimořádných událostí, které by měly nepříznivý dopad na letový provoz. Na konci každé noční pracovní směny probíhalo bezpečné předání provozních ploch pracovníkům řízení letového provozu. Opravy ploch mezinárodního letiště Sabiha Gökçen pokračují i v roce 2022, stále za použití Concretum Q-FLASH 2/20. V době zahájení realizace projektu v roce 2018, byla každou noc opravena plocha o velikosti 75 m$^2$ (4 desky) a toto množství bylo zvýšeno až na 130 m$^2$ (7 desek) za noc. Veškeré množství vyrobeného betonu bylo během realizace projektu pokládáno ručně. Tento projekt dokládá skutečnost, že použití nové generace rychletuhnoucího betonu Concretum Q-FLASH 2/20 umožňuje provádění rekonstrukce ploch formou výměny betonu v takto rozsáhlém měřítku během krátkodobých nočních uzavírek, a to za použití stejného vybavení i metod jako při práci s konvenčním betonem. Jelikož se očekává, že zatížení leteckým provozem bude v průběhu následujících roků nepřetržitě narůstat, je význam takových projektů a postupů nasnadě. Díky snadnému použití nové technologie spočívající v pokládání rychletuhnoucího betonu a ověřené trvanlivosti ploch, které byly pomocí této technologie zrekonstruovány, lze prohlásit, že se jedná o příznivé řešení pro odvětví letecké dopravy. Flexibilita a udržitelnost jsou dva rozhodující faktory při realizaci projektů za použití produktu Concretum Q-FLASH 2/20.

## Oprava odstavných ploch na pařížském letišti Charles De Gaulle

Největší pařížské letiště Charles de Gaulle odbaví v průběhu každého roku 65 milionů cestujících. Tento rušný letecký provoz téměř znemožňuje nalezení jakéhokoli časového termínu pro opravu, kterou by bylo nutno provádět při úplném uzavření. Použití produktu Concretum Q-FLASH 2/20 umožňuje provádění oprav jednotlivých betonových desek bez poškození přilehlých desek. Práce, které jsou s těmito opravami spojeny, lze provádět pomocí mobilní míchačky, která poskytuje flexibilitu potřebnou při opravách relativně malých ploch. Podle harmonogramu, který neposkytuje žádné rezervy, opravené betonové desky mohou být opět zatěžovány již po 30 minutách po pokládce. Po 4 hodinách namíchání betonu dosahuje pevnost v příčném tahu požadované hodnoty 3,3 N/mm$^2$.

Plně naložená mobilní míchačka má výrobní kapacitu 9 m$^3$ betonu. Zatímco míchačka míchá, lze zvýšit v případě potřeby množství vyrobené betonové směsi zavážením mobilní míchačky materiálem. Tímto způsobem lze dosáhnout kratší doby pro začátek zpracování betonu (30 minut), protože se získá čas vyplývající z nerealizované dlouhé přepravy čerstvého betonu na staveniště.




*Obrázek 12: Mobilní míchačka*

Za použití tohoto postupu byl Concretum Q-FLASH 2/20 nahrazen původní povrch o ploše přes 5 000 $m^2$. Ve všech fázích realizace projektu je dosahováno vysoké trvanlivosti a dalších požadovaných standardů. Flexibilita a spolehlivost tohoto konkrétního systému poskytuje možnost pohotově reagovat v případě naléhavé potřeby na provedení oprav, při zajištění velmi vysoké kvality.

## Shrnutí

Jedinečné vlastnosti rychletuhnoucích betonů nové generace poskytují možnost používání těchto materiálů k provádění rychlých a trvanlivých oprav na letištích. Flexibilita a spolehlivost těchto produktů sehrává klíčovou roli pro úspěšnou výměnu desek. Concretum Q-FLASH 2/20 je produkt, který byl použit při opravách prováděných na mnoha letištích a představuje spolehlivé záložní řešení pro případ nezbytné naléhavé opravy. Jeho vynikajících vlastností, mezi které patří zejména dlouhodobá trvanlivost, je dosahováno díky obsahu pojiva na čistě cementové bázi. Vysoké počáteční pevnosti splňují a překračují hodnoty požadované na letištích pro fungování stavební činnosti bez mimořádných časových prodlev. Ovlivnitelná doba zpracování znamená, že produkt je vhodný pro různé druhy oprav a množství vyměňovaného materiálu. Výjimečné kvality je dosahováno již na začátku výrobního procesu a tato kvalita přetrvává po celou ekonomické životnosti ploch, Concretum Q-FLASH 2/20 je produkt, jehož složení a vlastnosti jsou navrženy zejména pro opravy letištní infrastruktury prováděné s časovým omezením. Jedná se tedy o nejvhodnější výrobek pro projekty výměn poškozených desek. Způsobilost tohoto produktu pro použití v nejkritičtějších provozních oblastech byla prokázaná aplikacemi realizovanými na různých letištích. Řešení rychletuhnoucím betonem zn. Concretum je spolehlivě použitelné na nejrušnějších letištích s pouze jednou vzletovou a přistávací dráhou v rámci jejich dlouholetých programů údržby a to bez přerušení letecké dopravy. Projekt dlouhodobé podpory týmu Concretum týkající se navrhování složení směsí, laboratorních zkoušek, technické podpory na stavbě, pečlivě připravených programů výměny desek a záložních plánů, je zárukou vysoce kvalitní práce. Dlouholetými zkušenostmi a ekonomickými kalkulacemi byly výhody řešení oprav rychletuhnoucím betonem prokázány. Od leteckých dopravních společností, pilotů i členů letištního technického personálu byla získána rozsáhlá zpětná odezva týkající se kvality práce a jejího příznivého vlivu na dlouhodobě udržitelný provoz rozsáhlých, úspěšně opravených ploch. Tato příznivá odezva dokládá, že náročný úkol byl bez výjimky dokonale zvládnutý.

UNO (1987): Brundtland-Report „Our Common Future“, United Nations Organization (UNO), 08/1987

Villaret, S. (2012): Der Zusammenhang zwischen Betonfestigkeit und Deckendicke. Straße und Autobahn, 63, 06, Kirschbaum Verlag, Bonn, 379 - 1385. (Villaret 2012)

Villaret, S., Wieland, M. (2019): Informationssysteme zur permanenten Einschätzung des Straßenzustands. Straße und Autobahn, 70, 12, Kirschbaum Verlag, Bonn, 1084 - 1093. (Villaret, Wieland 2019)

Wieland, M., Villaret, S., Riwe, A. (2017): Bewertung der strukturellen Substanz für die systematische Erhaltungsplanung von Betonfahrbahndecken. Straße und Autobahn, 68, 2, Kirschbaum Verlag, Bonn, 79 - 90. (Wieland, Villaret et. al 2017)

Wieland, M. (2019): Performanceorientierte Fahrbahnoberflächen. Tagungsband 17. VDI-Fachtagung Reifen – Fahrwerk – Fahrbahn. (Wieland 2019)

Wieland, M., Jungen B. (2020): Performanceorientierte Fahrbahnoberfläche. Straße und Autobahn, 71, 1, Kirschbaum Verlag, Bonn, 33 - 41. (Wieland, Jungen 2020)

# Rapid-hardening concrete for pavement rehabilitation

*Dogaç Özsar, Felicia Nägele*

*Tel .: +41 44 445 13 46*
*Mail: dogac.ozsar@concretum.com, felicia.naegele@concretum.com*

## New Generation Rapid Hardening Concrete and Concretum Q-FLASH 2/20

Airports operate 24/7 with or without active air traffic. Deformations occur on the surfaces of airport runways, taxiways and parking position pavements as a result of time-dependent effects and/or exceeding its design capacity. Due to increased number of passengers and air traffic, repairs needed for the damages to airport infrastructures have to be done without interrupting this high demand of traffic load. Any negative impact on air traffic during the repair of these deformations may cause great economic losses to the airport. In these repairs, where traditional methods are insufficient, the necessity of fast and durable innovative methods has emerged. Air traffic safety should be ensured without causing economic losses by repairs to be made in short time intervals. In these time sensitive situations the effects of repairs on long-term durability still remain among priorities.

It has been experienced that these difficulties can be overcome by using new generation rapid hardening concrete. New generation rapid hardening concrete with high durability gains its strength as a result of different mechanisms with respect to older generation fast setting concrete. Almost in all cases for the airports, conventional fast-setting concrete is insufficient to meet the standards and durability requirements. Suitability of the use of new generation rapid hardening concrete is proven by its active use with more than 15 years of experience in various airports around the world.

Q-FLASH 2/20, the rapid hardening concrete product of Concretum, was specifically engineered for the repairs of airport infrastructure in short time intervals. Its long-term durability is ensured as the strength gaining mechanism takes place as a result of hydration reaction of its mineral based content, calcium sulfoaluminate (CSA) and Portland cement phases. The setting time, which can be adjusted for the operation at different time intervals, is another innovative and unique aspect of the Q-FLASH 2/20. With its low heat of hydration and high early strength Q-FLASH 2/20 is ready to use within an hour after placing.

Q-FLASH 2/20 can be produced using traditional concrete production methods without the need of extra investment. It can be easily applied by a team experienced in traditional concrete casting methods. It has the flexibility to offer various solutions depending on the requirements thanks to its multiple application methods. Our innovative technology is in use continually since 2004 all around the world for various airports and helps to ensure safety of airport operations.

In addition to the flexibility of achieving different concrete properties (consistency, open time, strength, exposure classes), Q-FLASH 2/20 is suitable for all kinds of production methods. The size of the repair to be made, physical infrastructure and the amount of daily repairs aimed for are important parameters to determine the production method. Alternatives such as conventional concrete batching plant production, mobile batching plant production allow flexibility according to desired requirements. On-site mixing with the help of a transmixer and using a portable mixer for patching applications are ideal back-up plans for attentively designed projects.

## Repair Work with Concretum Q-Flash 2/20 at Zurich International Airport

Our rapid-hardening concrete was first applied at the Zurich International Airport on taxiway Bravo in 2004. The almost 18 years old area where the application was made, is still in use and maintains its original form and first day quality. Ever since 2004, Zurich International Airport's demand on Q-FLASH 2/20 has risen yearly. In this period of time, approximately 30'000 square meter have been repaired with the help of Q-FLASH 2/20. Different methods of concrete placing, both manual and with a paver, took place. As this long period of time required different assistance and production methods in order to get the work done, the main way of production remained using concrete batch plants. All batch plants located near the airport were suitable for such production and three were already in use for the projects over the years by different

contractors. Transportation was done by tipper trucks and transit mixers. Most of the work was done between 23.00 hrs and 06.00 hrs in order to minimize the impact on the air traffic. Importance of these repairs are raised as a consequence of increased number of aircraft movement and limited space at the airport. During the work night, our engineers were present both on site and at the batch plant to support production closely with every step.




*Figure 1: Photo of the slab repaired in 2004 after 11 years (2015)*

Zurich Airport requires high demands on fresh properties, fast strength development as well as high durability on the rapid hardening concrete. The specification requires a minimum compressive strength of 16 N/mm2(fc,cube) (2'500 psi) before the runway is opened back to air traffic. Concretum Q-FLASH 2/20 provides 20 N/mm2(fc,cube) (3'000 psi) in a maximum of two hours following its setting time. Depending on the project requirements and paving method, Concretum Q-FLASH 2/20 rapid hardening concrete allows us to customize the consistency of the concrete. The flexibility concerning setting time of Q-FLASH 2/20 allows us to adjust the open time as short as 45 minutes to a long workability window of 120 minutes precisely. This unique property allows us to calculate the amount of time needed for overnight production to produce and lay the concrete. Small concrete pours are done swiftly with shorter open times as well as large concrete laying with longer open time with much bigger amounts. As long term durability is assured by the experience, Concretum's Q-FLASH 2/20 is an ideal solution for damaged pavement repairs during short closures.

| | |
|---|---|
| product | Q-FLASH 2/20 |
| exposure class | XC4, XD3, XF4 |
| strength class | C50/60 |
| consistency class | S1/S2 (C1/C2) |
| max. aggregate size | 32 mm / 13″ (round) |
| ASR resistance | resistant |

*Table 1: Concrete properties for nightly work at Zurich International Airport*

## Runway Renewal Project of Istanbul Sabiha Gökçen International Airport

Sabiha Gökçen International Airport was built in 2001 as a secondary airport in Istanbul. It was originally designed for a capacity of 3.5 million passengers but short after the grand opening, passenger numbers started to ascend rapidly. The terminal capacity was increased to 25 million in 2008 yet no work was done on its only runway infrastructure. The 25 million passenger capacity was exceeded in 2015 and the airport started to operate over its design capacity. Today the airport serves 41 million passengers yearly. This fast growth brought some negative impacts on Sabiha Gökçen's only runway, especially on the center line region where planes are using it the most. Still today, Sabiha Gökçen is the busiest airport with one runway and one terminal in the world. Having this busy air traffic and staying without alternative runway options ties the hands of the airport management in regards to runway maintenance.

Without having the option of shutting the operation down for a long time, it was decided to carry out the repair works on the runway during nightly closures between 00.50 hrs until 05.50 hrs for five days a week in 2018. Therefore a rapid-hardening concrete product with high durability was required to get the work done. With the amounts planned for the year 2018, the project has become the largest project ever where rapid-hardening concrete was being used in one go.

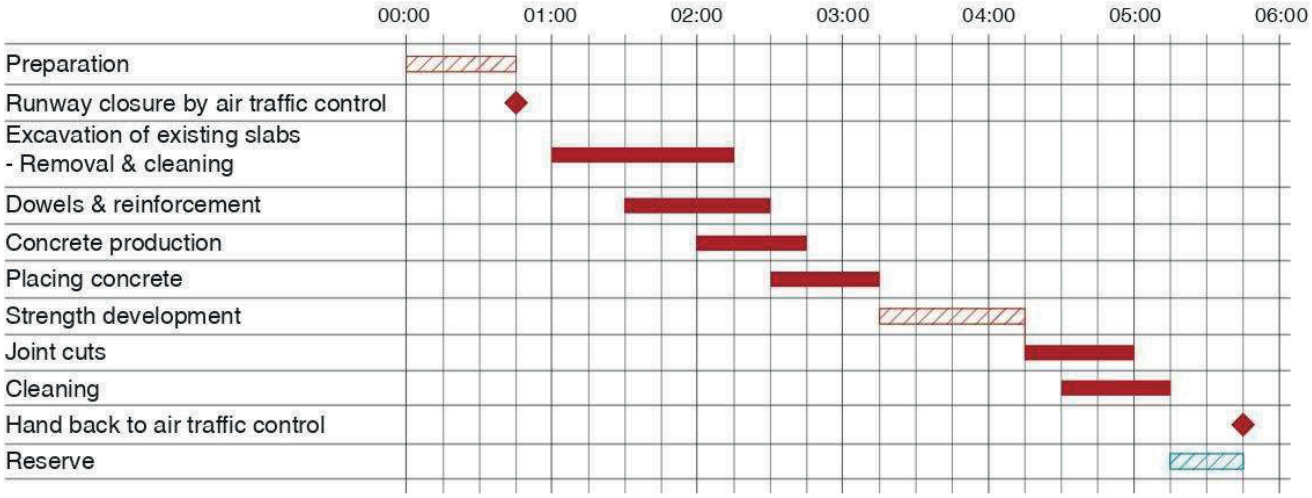



*Figure 2: Nightly construction schedule for Sabiha Gökçen International Airport*

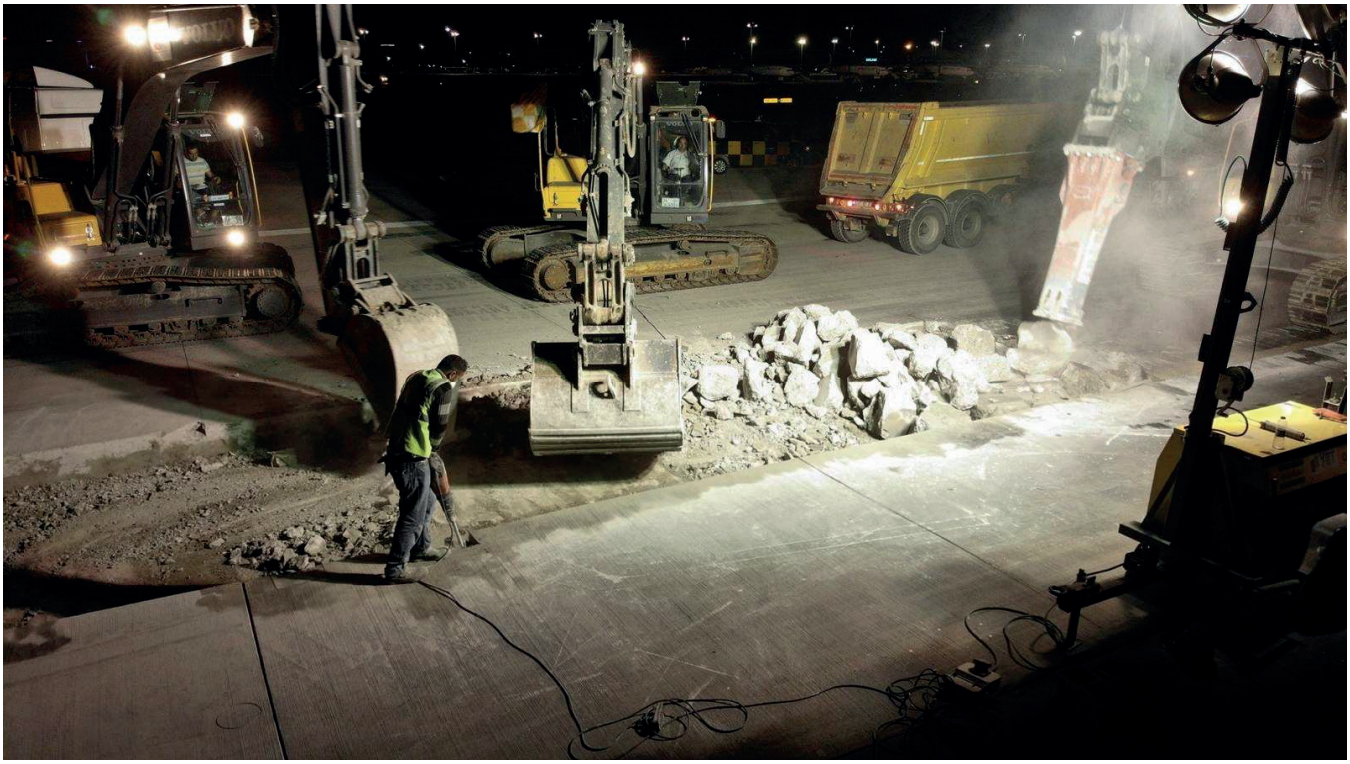


*Figure 3: Breaking and removing old slabs*




*Figure 4: Reinforcement placement while rest of the slab is being removed*



*Figure 5: Concrete production at batch plant*



*Figure 6: Concrete placement into the slab by help of the excavator*



*Figure 7: Concrete compacting, vibrating and surface finishing*

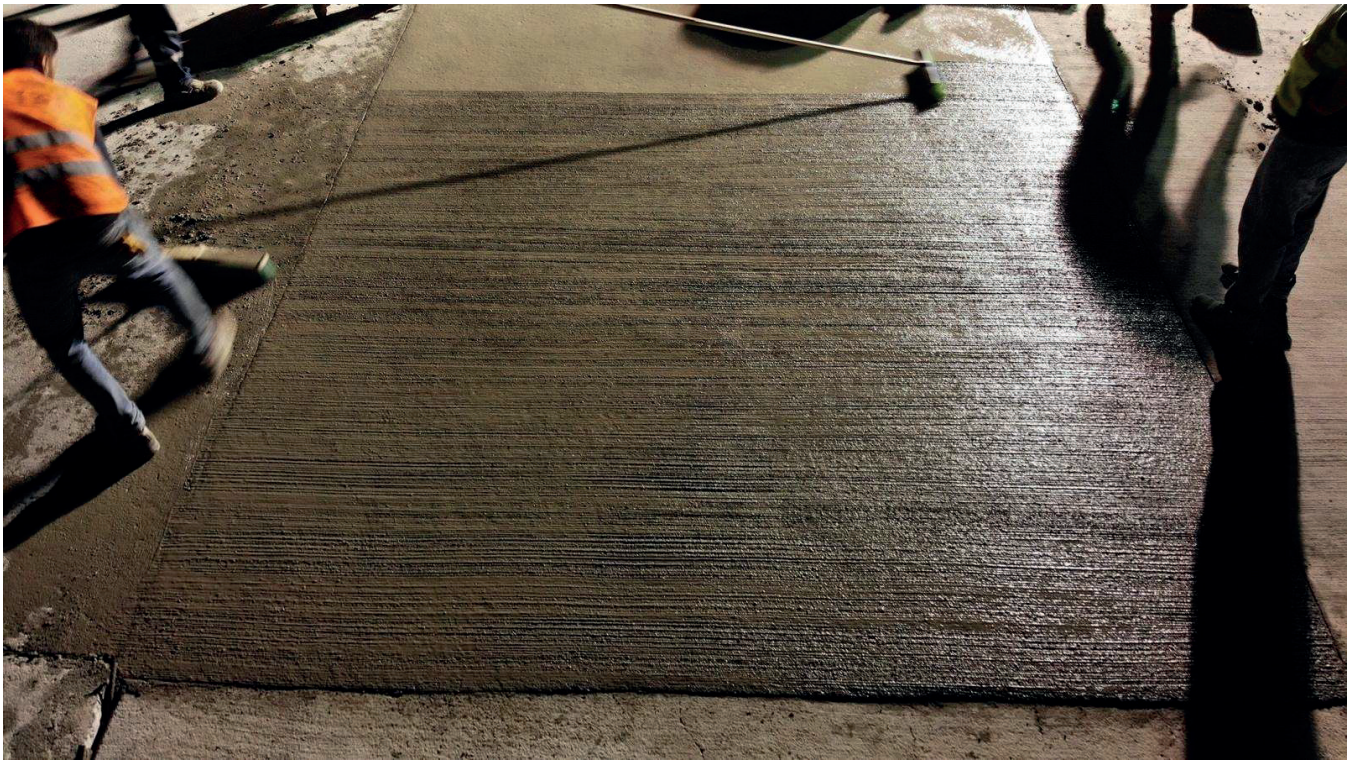


*Figure 8: Broom finish application*



*Figure 9: Concrete curing and surface cover application for strength development*

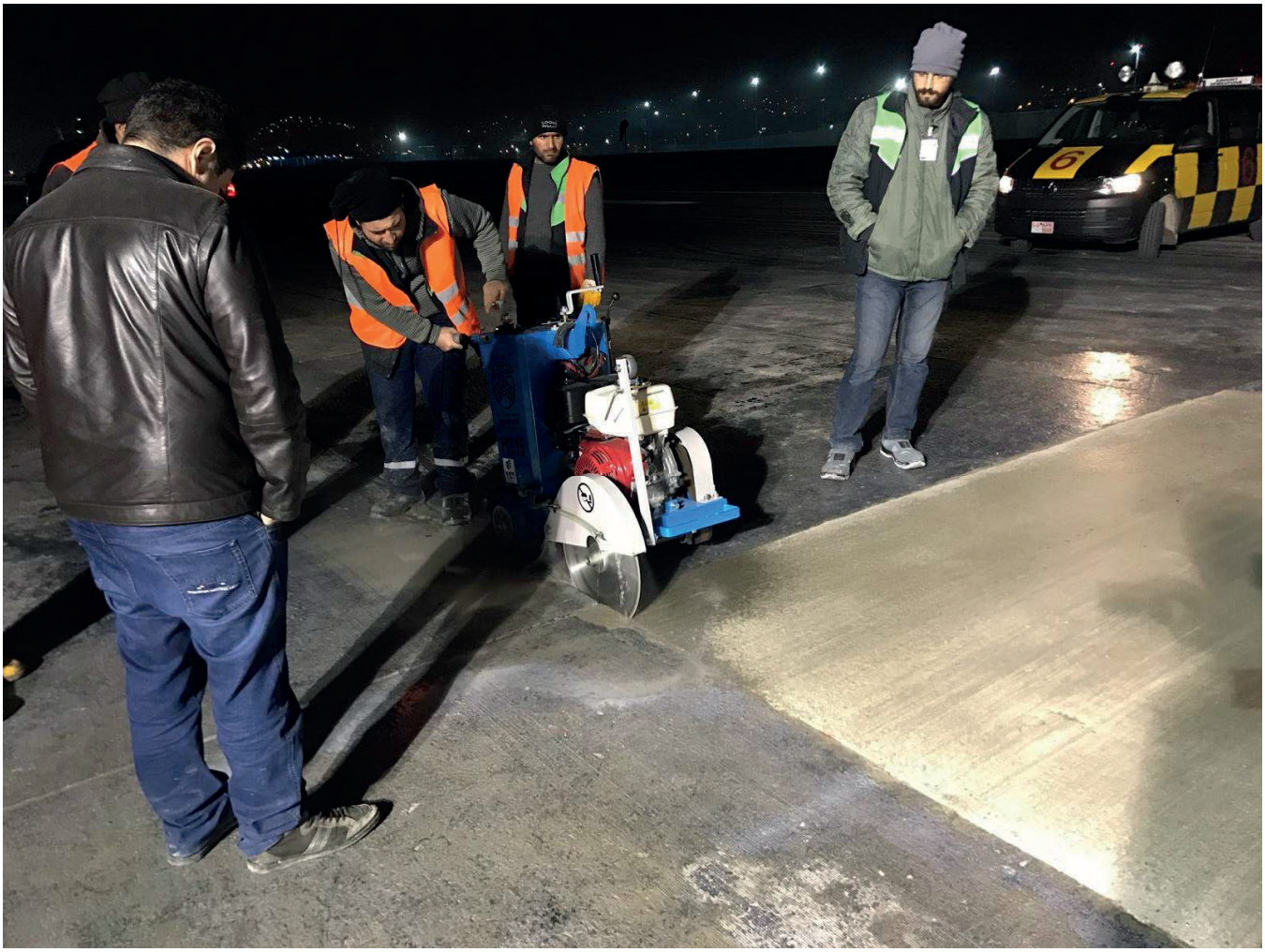


*Figure 10: Joint cutting*

Sabiha Gökçen International Airport's demand on the runway to be operational again was having a minimum of 16 N/mm2(fc,cube) compressive strength. The concrete consistency expectancy was similar to that of regular pavement concrete to allow the concrete to be mixed and handled with the same equipment and training. The concrete was produced in a batch plant, which was set up right next to the airport within a 15 minutes driving distance just for the execution of this project. For transportation, tipper trucks were used in order to allow for fast loading and discharging of the concrete at the batch plant and on site. Further benefits of the tipper trucks are the ability to visually check the concrete consistency and easily measured fresh concrete temperature at any time during production. An additional advantage is that the tipper trucks can also be used for the transport of the excavated slabs. Our support engineers are at the batch plant with an immediate possibility to react with any change on those parameters. Open times of the concrete are kept between 45 minutes to 120 minutes under the demands of the site for the night.

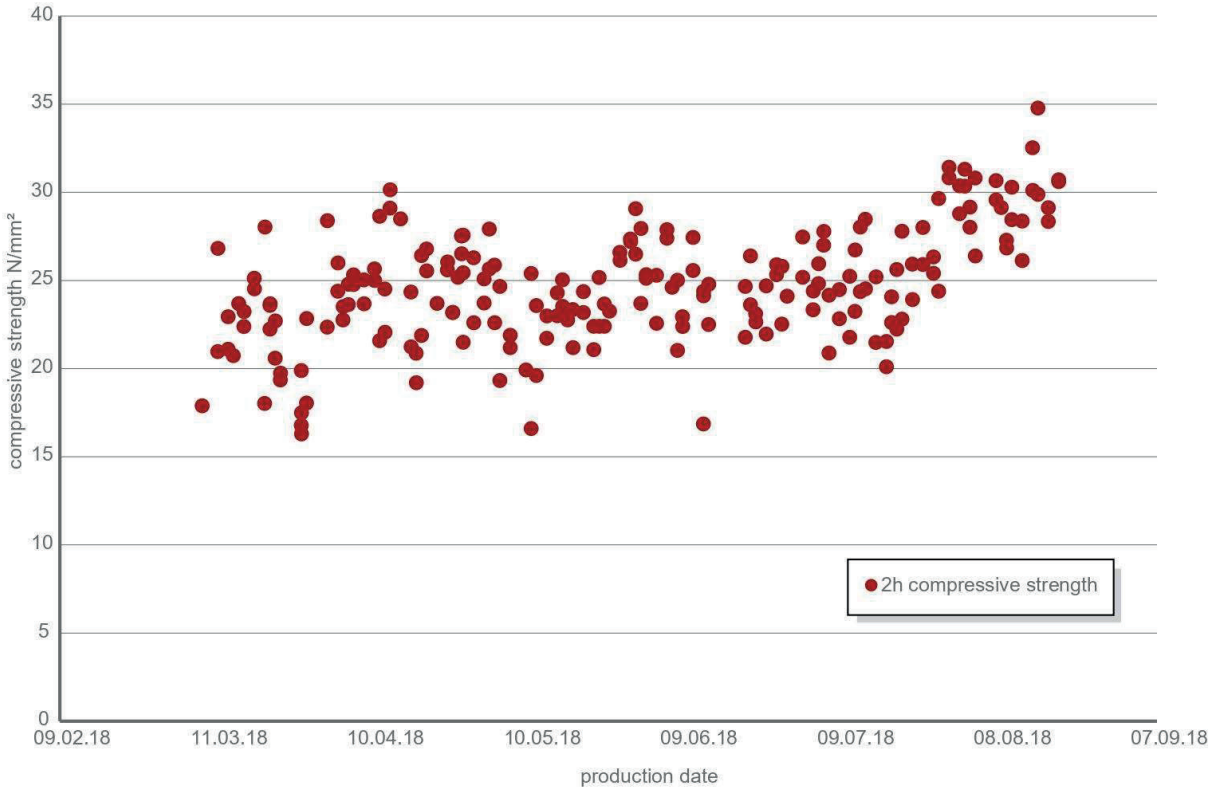



*Figure 11: Compressive strength values only two hours after the setting (fc,cube)*

Concretum Q-FLASH 2/20 concrete is a composite made by using Concretum's Q-FLASH cem 100 (P) fully cementitious binder, Concretum Q-FLASH sp (L) superplasticizer and Concretum Q-FLASH ret (L) which keeps open time under control. Aggregates used for the concrete are local aggregates from Istanbul with a maximum grain size of 38 mm diameter and water-cement ratio kept in between 0.31 - 0.35. A detailed mix design can be seen in Table 2.

| | |
|---|---|
| Concretum Q-FLASH cem 100 (P) rapid hardening cement | 390 kg/m3 |
| Aggregates (0/5, 5/12, 12/22 and 22/38 mm) | 1950 kg/m3 |
| water/cement ratio | 0.31 - 0.35 |
| Concretum Q-FLASH sp (L) superplasticizer | 2.2 - 6.8 kg/m3 |
| Concretum Q-FLASH ret (L) retarder | 0.8 - 5.3 kg/m3 |

*Table 2: Concrete mix design at Sabiha Gökçen International Airport*

The project has started in 2018 and until today around 20'000 m2 area of runway, taxiway and parking positions have been renewed with Concretum's Q-FLASH 2/20 rapid hardening concrete. During the project, all nights were handled without any incident impacts on air traffic and at the end of each night operation handed back to air traffic control safely. Repairs in Sabiha Gökçen International Airport are still ongoing in 2022 with the help of Concretum Q-FLASH 2/20. At the start of the project in 2018, an area of 75 m2 (4 slabs) were repaired each night and as the work continued, this amount was increased to 130 m2 (7 slabs) nightly. All amounts produced were placed manually during the project. This project shows that using new generation rapid hardening concrete Concretum Q-FLASH 2/20 allows such large scale concrete replacements during short night closure periods using the same equipment and method of conventional concrete production. As the air traffic loads are expected to grow continuously over the following years, it becomes easier to see the importance of such projects and methods. Easy application of the new rapid hardening concrete technology and proven durability are making this technology a favorable solution for the aviation industry. Flexibility and sustainability are two key factors of this product and projects where Concretum Q-FLASH 2/20 is in use.

## Stand Repair At Paris Charles De Gaulle

Paris' largest airport Charles de Gaulle carries 65 million passengers throughout the year. This busy air traffic makes it almost impossible to find any repair time under full closure. By the help of Concretum Q-FLASH 2/20, repair works can be done on slabs without damaging adjacent slabs. Repair works are carried out with the help of a mobile concrete batching plant which gives flexibility on repairing relatively small areas. Under a tight schedule, the repaired slabs are ready to be loaded only after 30 minutes following its placing. After 4 hours of mixing the concrete, splitting tensile strength reaches the required value of 3.3 N/mm2.

The fully loaded mobile batching plant has a capacity to produce 9 m3 of concrete. In case of need, this amount can be increased by loading the mobile batching plant with material whilst using it for mixing. In this way, it is possible to achieve short open times (30 minutes) due to the gained time which results from not having to transport the freshly produced concrete to site.




*Figure 12: Mobile batching plant*

With this method over 5'000 m2 have been replaced with Concretum Q-FLASH 2/20. High durability and required standards are achieved as in all projects. The flexibility of this concrete system gives the possibility to act swiftly in urgent repair works while assuring very high quality.

## Summary

The unique nature of new generation rapid hardening concrete solutions are providing fast and durable repair work possibilities for the airports. Flexibility and reliability of the products are playing a key role in these successful replacements. Concretum's Q-FLASH 2/20 is a product which numerous airports have done their repair work with and kept as an urgent repair solution in reserve. Pure cementitious content is giving its superior durability properties in the long term. High early strength values are meeting and exceeding the required values for airports to continue their operations without extra waiting periods. Alterable open time duration makes the product suitable for various types of repair work and amount of replacement. Exceptional quality of both fresh and hardened states of the concrete appears right at the start of the production process and lasts its economical life long. Concretum's Q-FLASH 2/20 is a product specially designed for airport infrastructure repair work under limited time periods, thus it becomes the most suitable replacement product for such projects. Applications done at different airports are showing the capability of the product even on the most critical areas of the operation. Concretum's rapid hardening solution is reliable to use at busiest airports with one runway without interrupting their planned air traffic as part of their years-long maintenance programs. Project long lasting support by the team of Concretum concerning mix designs, laboratory trials and on site

support, carefully prepared replacement programs and backup plans provide guarantee of high quality work. Years of experience and economical calculations are revealing the benefits of the repair work done by rapid hardening concrete solutions. Feedback from airlines, pilots and engineers regarding quality of work and its positive effects on their operations and keeping the air traffic alive by successfully completing the repair work of great amounts of surfaces for the airport without interrupting the air traffic shows that this delicate job is being handled properly without exception.

# Trvanlivost cementobetonových krytů - vznik trhlin jako důsledek hydratace a vysychání

*Vít Šmilauer[1)], Jakub Veselý[1)], Bohuslav Slánský[2)], Ladislav Vysloužil[2)], Radek Ševčík[3)]*

*[1)] ČVUT v Praze, Fakulta stavební, Thákurova 7, 166 29 Praha 6*
*[2)] Skanska, a.s., Křižíkova 682/34a, Karlín, 186 00 Praha 8*
*[3)] Ústav teoretické a aplikované mechaniky AV ČR, v. v. i., Prosecká 809/76, 190 00 Praha 9*

*Tel .: +420 224 354 483*
*E-mail: vit.smilauer@fsv.cvut.cz*

Trvanlivost cementobetonových krytů (CBK) vozovek je z velké míry ovlivňována trhlinami, které jako neviditelné vznikají již v počátečních stádiích tuhnutí a tvrdnutí betonu a které se mohou postupem času dále rozvíjet vlivem dopravy a působením vnějších podmínek až do vzniku viditelných poruch.
Článek shrnuje dva mechanismy vzniku okem neviditelných a viditelných trhlin na cementobetonových krytech. První skupinu tvoří trhliny, které vznikají jako důsledek objemové kontrakce při hydrataci v heterogenní mikrostruktuře betonu. Článek ukazuje 3D obrázek trhlin, které byly experimentálně zachyceny pomocí mikrotomografu. Druhou skupinu tvoří trhliny od vnějšího vysychání, které jsou zapříčiněny gradientem vlhkosti. Účinek vlivu hydratace a vysychání je demonstrován na smršťujících prstencích pro 25 cementů, kde 10 cementů je komerčních a 15 je vyrobeno na zakázku. Výsledky konzistentně ukazují, že zpomalení reaktivity cementů prodlužuje dobu porušení prstence a cementy se stávají více odolnými proti vzniku trhlin od vysychání. S ohledem na revizi normy ČSN 73 6123-1 a změnách ve výrobě cementů je snížení reaktivity cementů vítanou změnou, která má zajistit delší životnost cementobetonových krytů.

## Úvod

Vznik trhlin na cementobetonových krytech je jednou z hlavních příčin degradace, který vede ke snížené životnosti [1], viz Obrázek 1.

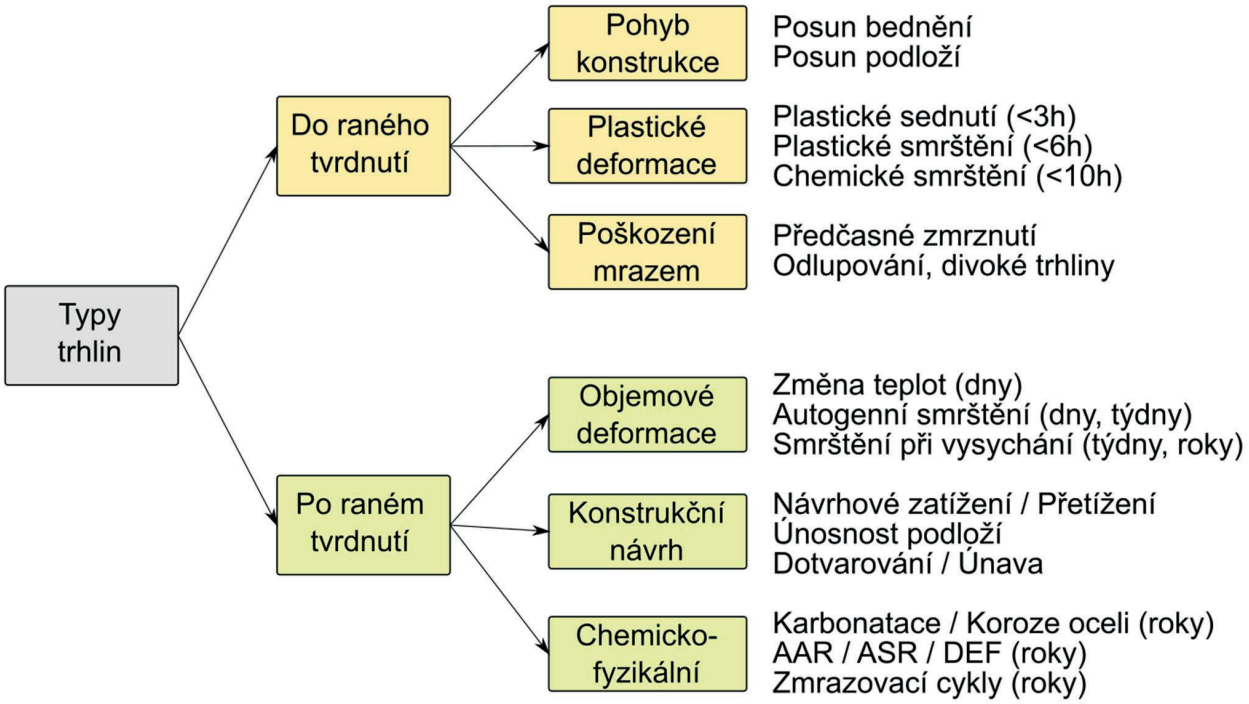


*Obrázek 1: Příklad vzniku trhlin na dálnici D1, km 237,4, stáří krytu 17 let.*

Vznik trhlin může mít mnoho příčin, kde Obrázek 2 shrnuje hlavní mechanismy [2]. Z hlediska životnosti krytu jsou nejhorší trhliny, které se projeví až po raném tvrdnutí betonu, neboť k jejich viditelným projevům dochází

týdny až roky po betonáži. Tento příspěvek se zaměřuje na skupinu objemové deformace, kde dominantními mechanismy jsou autogenní smrštění a smrštění od vysychání, viz Obrázek 2.

Alkalicko-křemičité reakci bylo věnováno v Česku mnoho pozornosti [3] včetně způsobu její eliminace [4] a její vliv na vznik trhlin byl přeceňován. V roce 2017-2018 byla provedena série testů na alkalicko-křemičitou reakci dle německé metodiky zkoušení TP B-StB „AKR-Potenzial and Dauerhaftigkeit von Beton“, kdy dochází k měření expanze betonových jader v cyklech -30°C ÷ +60°C při postupné saturaci a vysychání. Na 5 úsecích českých dálnic podezřelých z alkalicko-křemičité reakce byly provedeny vývrty a testovány v TU Weimar. Výsledky ukázaly, že alkalicko-křemičitá reakce se nalezla pouze v lehké formě na D5 a ve velmi malém až žádném rozsahu na ostatních úsecích [5]. Tím byl experimentálně prokázán prakticky nulový příspěvek ke vzniku povrchových trhlin na cementobetonových krytech v Česku vlivem alkalicko-křemičité reakce, byť v historii existovaly zasažené úseky například na dálnici D11.



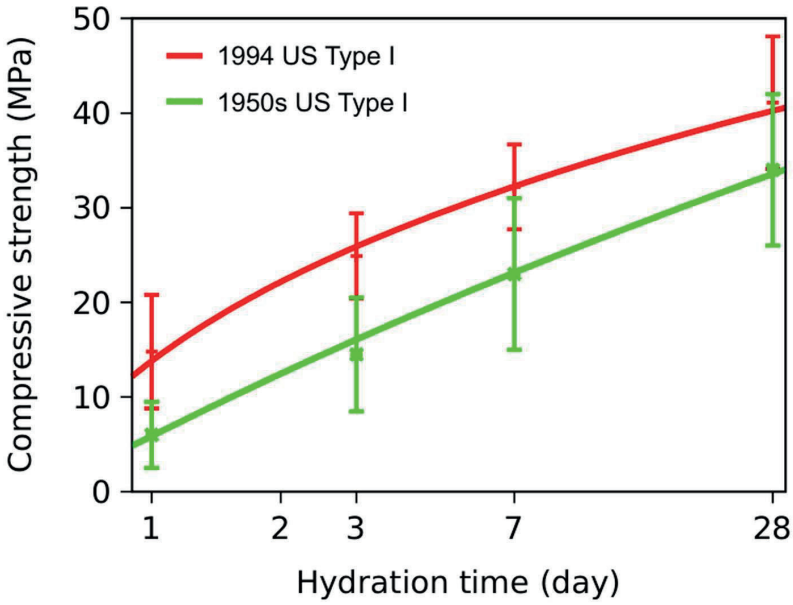

*Obrázek 2: Příčiny vzniku trhlin a charakteristická doba jejich výskytu na cementobetonových krytech [2].*

Analýza dat z diagnostiky trhlin ukázala, že 75% povrchů cementobetonových krytů má viditelné trhliny v 15 letech stáří [1]. Povrchové trhliny zvětšují permeabilitu betonu, a tak dochází k předčasné degradaci vlivem mrazu či infiltrace posypových solí. Falešně pozitivní nálezy gelu z alkalicko-křemičité reakce jsou dle našeho názoru způsobeny do značné míry reakcí posypových solí a zavlečených alkálií s kamenivem. Pro zvýšení trvanlivosti krytů je proto nutné eliminovat povrchové trhliny správnou volbou cementů, složením betonu, technologií pokládky, ošetřováním a údržbou [1][6].

Tlak na rychlost výstavby v posledních desetiletích způsobil, že reaktivita cementů a jemnost mletí vzrostla v celém stavebnictví, jak ukazuje Obrázek 3 na příkladu cementů z USA a Kanady [7]. Tento trend se promítl i do českých cementobetonových vozovek, jak je ukázáno dále na testech prstenců. Žádný z běžných testů cementů a betonů nepostihuje vliv vysychání, vzorek by musel vysychat několik měsíců, aby se mohl projevit vliv povrchových trhlin. Místo chování reálných konstrukcí procházející vysycháním se optimalizují laboratorní testy. Důsledkem jsou všudypřítomné povrchové trhliny, které jsou zapříčiněny zvýšením reaktivity cementů a zvýšením pevnosti betonů [9].

Vliv objemových deformací dobře postihují nenormové testy na smršťujících prstencích. Výsledky ukazují, že pouze 2 z 10 komerčně vyráběných a testovaných cementů vyhovují požadavku odolnosti cementů proti vzniku trhlin [8]. Pokud si zvolíme cementy na zakázku se standardními alitickými slínky, pak vyhovuje 10 z 15 cementů s použitím standardních současných technologií výroby [8]. Je tedy otázkou preferencí, zda mírně zpomalit tempo výstavby či cíleně zkracovat životnost.

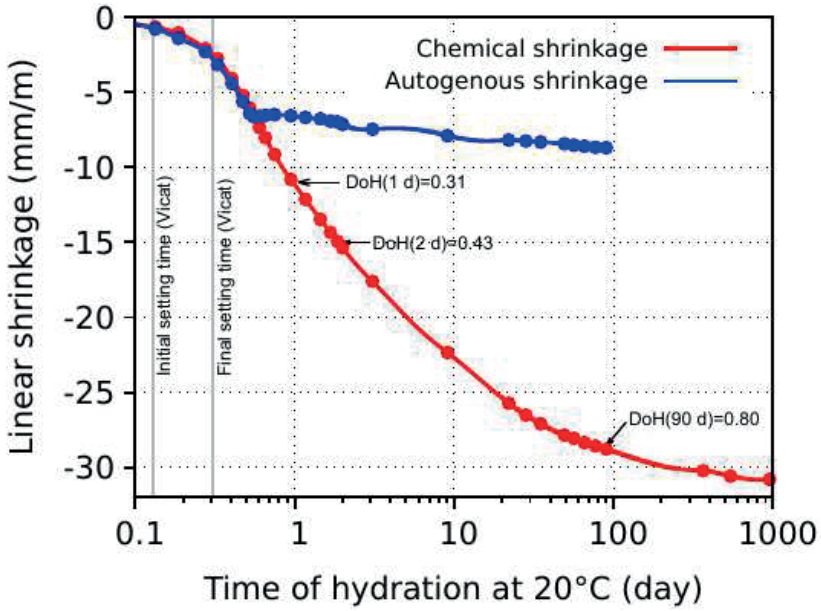
Tlak na snižování $CO_2$ emisí z výroby cementu poskytuje další možnosti výroby cementů a otázkou zůstává, které cementy jsou vhodné pro cementobetonové kryty. Předběžné výsledky ukazují, že to budou směsné cementy s pomalým nárůstem pevností spadající do tříd 32,5 R a 42,5 N, které jsou odolné ke vzniku trhlin [8].




*Obrázek 3: Tlakové pevnosti cementů v průběhu 40 let, USA a Kanada [7].*

## Autogenní smrštění

Autogenní smrštění je makroskopické smrštění v zapečetěných podmínkách, tj. bez transportu vody mimo měřený vzorek. Vlivem hydratace dochází k vyprazdňování kapilárních pórů a vzniku menisků. Například pro vodní součinitel 0,50 je po 90 dnech relativní vlhkost cca 0,96, póry nad poloměr 100 nm jsou prázdné a ve vodě vzniká kapilární napětí 1,4 MPa [10]. Při dalším snižování vodního součinitele kapilární napětí podstatně roste a s tím i autogenní smrštění. Charakteristický průběh chemického smrštění a autogenního smrštění ukazuje Obrázek 4 pro cementovou pastu, kde deformace je pro ilustraci vyjádřená jako délková. Krátce po konci tuhnutí dojde vlivem tuhé mikrostruktury k oddělení obou částí deformace a autogenní smrštění je podstatně menší než chemické. Maximální hodnota chemického smrštění je okolo 9% obj. pro hydrataci $C_3S$, přepočet na lineární smrštění tak vychází okolo 30 mm/m.

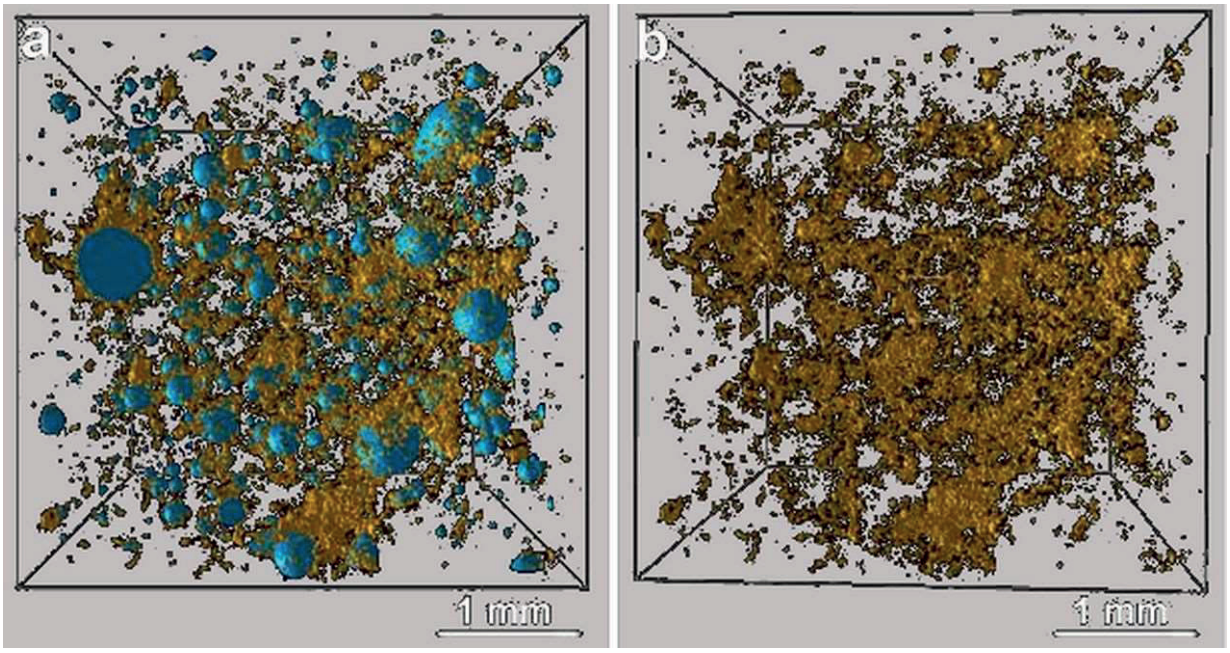



*Obrázek 4: Charakteristický průběh chemického a autogenního smrštění na cementové pastě, vodní součinitel 0,40-0,45 [11][12].*

Rozdíl obou křivek je deformace, která je přenášena mikrostrukturou. Zjednodušeně lze uvažovat dekompozici deformace na

$$\varepsilon - \varepsilon_{aut.s.} = \varepsilon_{ve} + \varepsilon_{crack} \quad (1)$$

kde jednotlivé členy představují deformaci celkovou, od autogenního smrštění, viskoelastickou a rozetřenou od vzniku trhlin. Pravá strana rovnice (1) ukazuje, že pomalé chemické smrštění aktivuje větší viskózní deformaci a tím snižuje deformaci od trhlin. Pomalá reaktivita cementů tak snižuje množství trhlin při autogenním smrštění, jak bylo dříve experimentálně prokázáno na mikrotomografu [13]. Podobné výsledky byly získány na cementové maltě, viz Obrázek 5 na pracovišti Akademie věd České republiky.




*Obrázek 5: Rentgenová 3D mikrotomografie malt v zapečetěném prostředí. Modrá – vzduchové póry, oranžová – trhliny z chemického smrštění.*

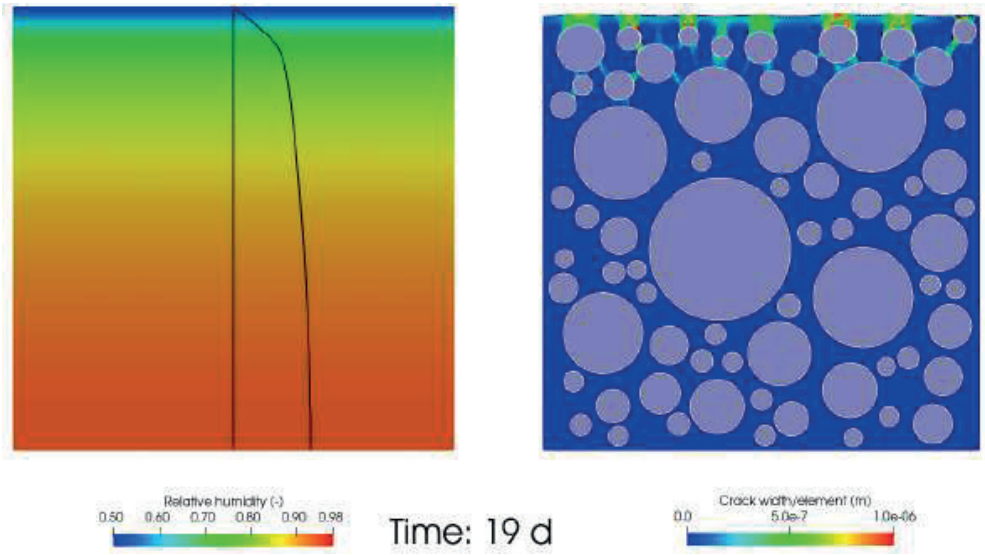
Maximální délka těchto trhlin je v řádu 0,1-1 mm a snižují pevnost 3-8× oproti vzorku bez trhlin [14]. Vyhnout se těmto trhlinám nelze, lze však zmenšit jejich hustotu a jejich délku zpomalením rychlosti hydratace cementu [13].

## Smrštění od vysychání

Při vysychání dochází k přestupu vodní páry ze vzorku. Smrštění na úrovni materiálového bodu lze přibližně popsat jako

$$\mathrm{d}\varepsilon_{ds} / \mathrm{d}t = k_{sh} \cdot \mathrm{d}h / \mathrm{d}t \qquad (1)$$

kde $\varepsilon_{ds}$ je smrštění od vysychání, $k_{sh}$ je součinitel smrštění a $h$ je relativní vlhkost. Růst trhlin může být zobrazen na mezoskopickém modelu betonu, kdy je buňka 50×50 mm vystavena vysychání 50% od vrchní části a čas vysychání dosáhl 19 hodin, viz Obrázek 6. Trhliny mají v modelu šířku do 1 μm přes konečný prvek, při jejich spojení vznikají trhliny šíře až desítky μm. Nejvíce trhlin vzniká na povrchu, kde je největší gradient vlhkosti. Hloubka trhlin je do cca 1 cm od povrchu, další růst do hloubky je velmi malý díky zpomalení rychlosti vysychání a zvětšení viskózní části deformace.




*Obrázek 6: Mesoskopický model betonu a vznik trhlin při vysychání, vlevo profil relativní vlhkosti od povrchového vysychání, vpravo vznik trhlin.*

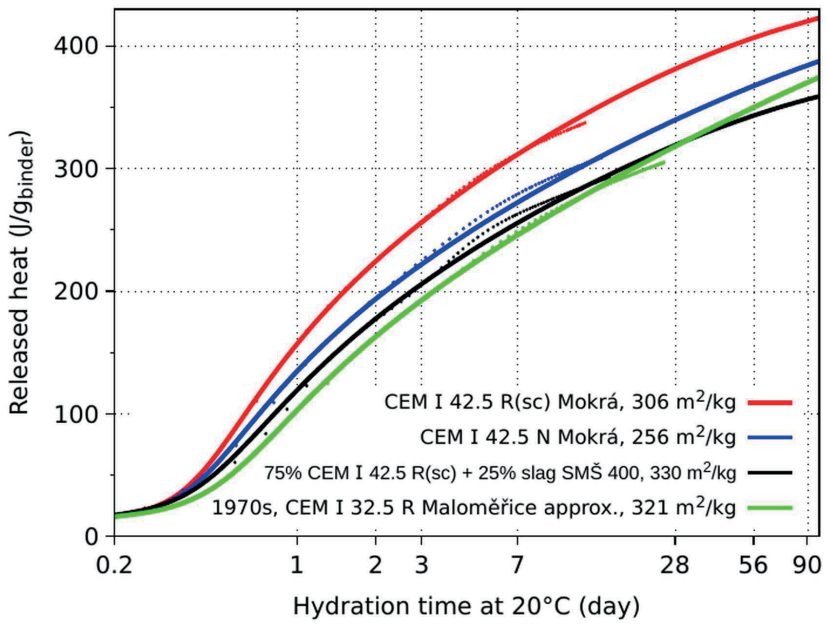
V roce 1979 dokázal prof. Bažant, že růst paralelních trhlin je stabilní pouze do jejich určité délky [15]. Poté podmínka stability vyžaduje, že každá *n*-tá trhlina se uzavře a šířka rostoucí trhliny se naopak zvětší. Tímto mechanismem se neviditelné úzké trhliny stávají viditelnými. Podmínkou růstu je hnací síla, která může být představena cyklickou změnou teploty či změnou relativní vlhkosti. K podobným závěrům dospěl K. Mehta v roce 1994, který popsal přechod nespojitých trhlin do spojitých s rozpadem betonu [16]. Trhliny vzniklé díky chemickému smrštění či vysychání tak představují zárodky budoucích viditelných trhlin, které jsou ve finále odpovědny za rozpad betonu.

## Chování vybraných cementů

Cementy pro výstavbu cementobetonových krytů mají ve většině zemí omezenou reaktivitu, často se používá maximální jemnost mletí dle Blaina či třída cementu [6]. Pro ilustraci je nejprve zanalyzováno chování čtyř vybraných silničních cementů:

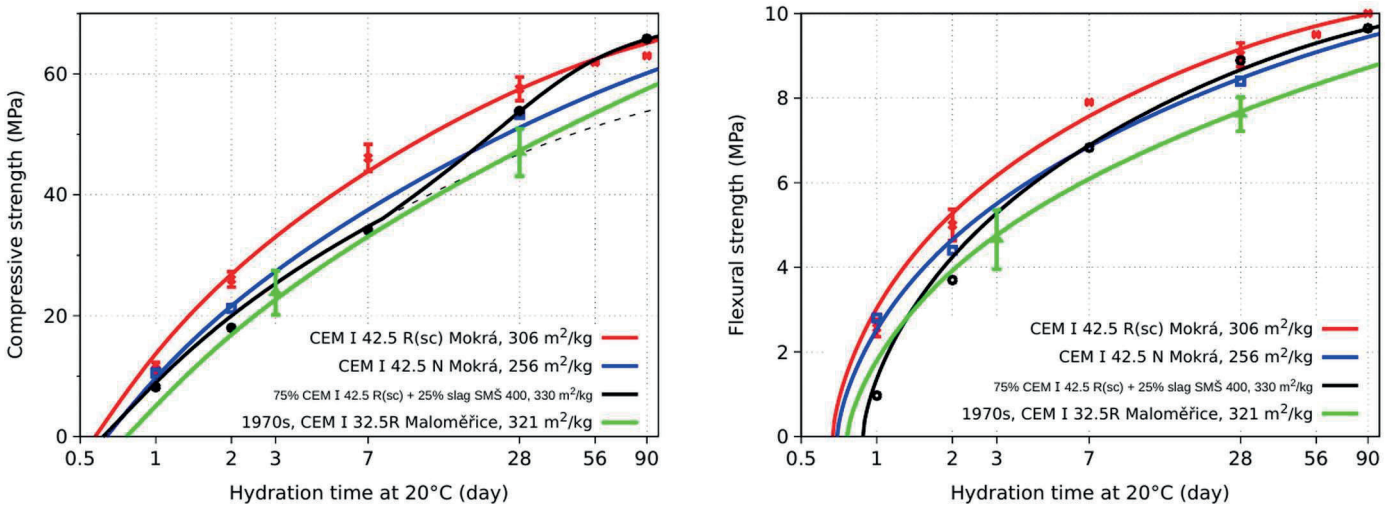
- CEM I 42,5 R(sc) Mokrá jako standardní silniční cement používaný poslední desetiletí v Česku, jemnost mletí 306 $m^2$/kg.
- CEM I 42,5 N Mokrá se sníženou jemností na 256 $m^2$/kg. Tento cement byl vyroben v závodě Mokrá s kratší dobou mletí.
- Směsný cement 75% CEM I 42,5 R(sc) + 25% mleté granulované vysokopecní strusky SMŠ 400. Jemnost mletí směsného cementu je 330 $m^2$/kg. Toto směsné pojivo bylo experimentálně použito na stavbu téměř 9 km úseku dálnice D1 Přerov – Lipník nad Bečvou [6][17].
- CEM I 32,5 R Maloměřice (označen SC70), který byl používán pro výstavbu krytů v létech 1970-1996. Původní cementobetonový kryt dálnice D1 Praha-Brno byl zhotoven z tohoto cementu. Udávaná jemnost mletí byla 321 $m^2$/kg, používal se mokrý proces výroby a neselektivní mletí v kulových mlýnech, který dává jinou křivku rozdělení velikosti částic a odlišnou reaktivitu od dnešních cementů.

První standardní charakteristika cementů je uvolňované teplo z izotermální kalorimetrie, viz Obrázek 7 dle metody prEN196-11 se zvýšeným vodním součinitelem na 0,45. Cement z Maloměřic již neexistuje, proto byl použit portlandský cement s jemností mletí 250 $m^2$/kg z Ladců, který má velmi podobný nárůst pevností. Mineralogické složení cementů CEM I je podobné, proto lze uvolněné teplo korelovat s nárůstem pevností. Za povšimnutí stojí fakt, že maloměřický cement měl ve 28 dnech stejné uvolněné teplo jako dnešní silniční cement CEM I 42,5 R(sc) Mokrá v 7 dnech.



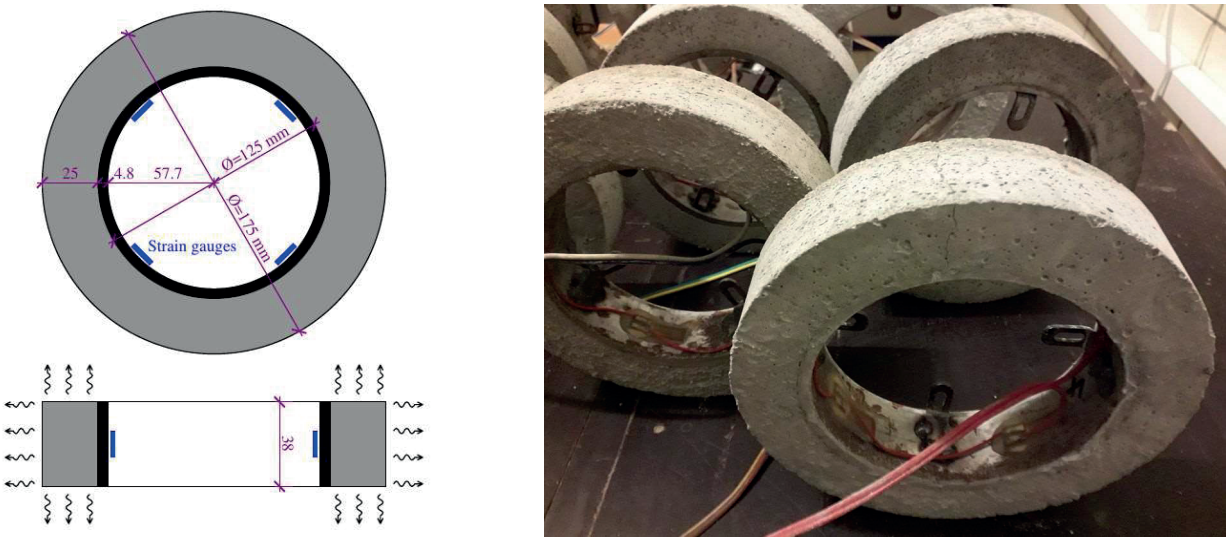

*Obrázek 7: Hydratační teplo z izotermální kalorimetrie vybraných silničních cementů. Tečky jsou změřená data, plné křivky jsou extrapolace dle hydratačních modelů.*

Nárůsty pevností dle ČSN EN 196-1 ukazuje Obrázek 7. Zde se opět ukazuje, že dřívější maloměřický cement měl ve 28 dnech stejné pevnosti jako dnešní silniční cement CEM I 42,5R(sc) Mokrá v 7 dnech. Měření povrchových trhlin systémem CleveRA ukazuje, že kryt na D1 km 93,74-95,03 z maloměřického cementu měl v roce 2017 (stáří 38 let) prakticky stejný výskyt povrchových trhlin jako dnešní kryty po 15 letech. Hlavní důvod spatřujeme v rozdílné rychlosti reakce cementu.



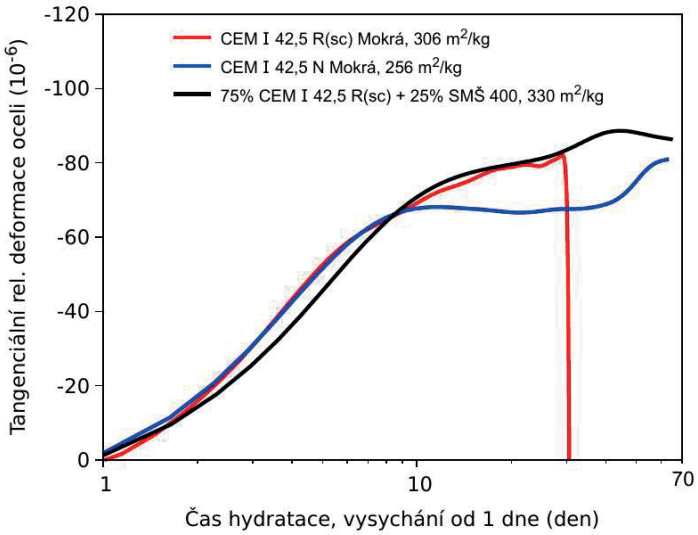

*Obrázek 8: Nárůsty pevností vybraných silničních cementů.*

Chování cementů, malt a betonů v prostředí s vysycháním dobře postihuje test na smršťujících prstencích, který byl publikován poprvé v roce 1942 R. W. Carlsonem a dodnes existuje řada modifikací včetně standardizovaných testů pro beton ASTM C1581 a AASHTO T334 [18]. Test vhodně kombinuje autogenní smrštění, smrštění od vysychání, stárnoucí dotvarování, vývoj tahové pevnosti a nárůst lomové energie. Test připomíná chování povrchové vrstvy reálné konstrukce, kde je bráněno deformaci od vysychání její vnitřní části, tuto funkci plní nejčastěji ocelový kroužek uvnitř prstence.
Návrh našeho prstence vychází z geometrie R. W. Carlsona s tenčím ocelovým kroužkem, geometrii uvádí Obrázek 9 [20]. Na většinu testů se použila normová malta 1:3 s vodním součinitelem 0,45, pokud není uvedeno jinak. Prvních 24 hodin je maltový prstenec zapečetěný, poté je vystaven relativní vlhkosti vzduchu 45-55 %. Čtyři odporové tenzometry měří deformaci ocelového kroužku s automatickým logováním, viz Obrázek 9.




*Obrázek 9: Test smršťujícího prstence pro malty a porušený prstenec trhlinou.*

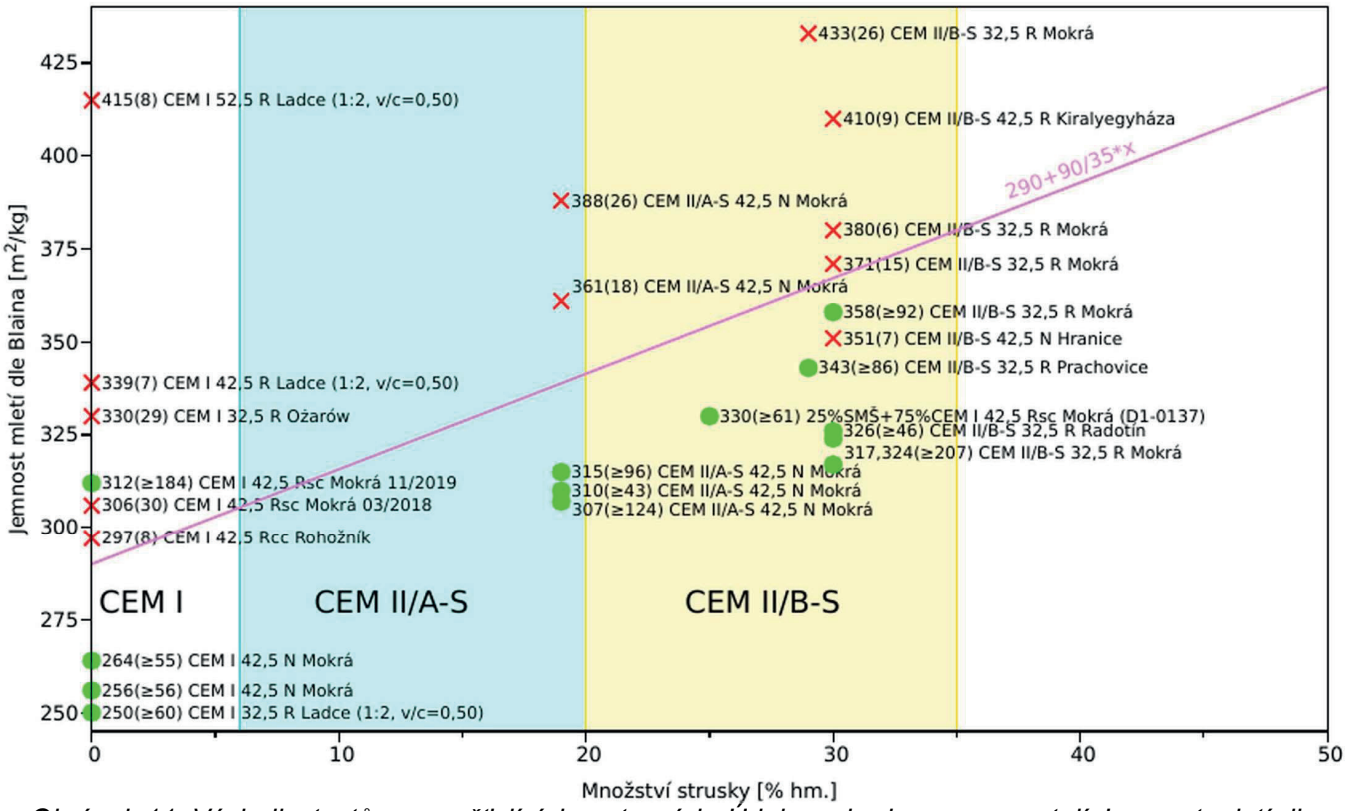
Charakteristický průběh deformací ze třech vybraných cementů ukazuje Obrázek 10. Ve 30 dnech dochází k prasknutí prstence s referenčním silničním cementem CEM I 42,5 R(sc) Mokrá. Prstence z cementu CEM I 42,5 N zůstaly po dobu 65 dní nepoškozeny. Jeden prstenec směsného cementu se porušil nejdříve po 61 dnech, druhý prstenec zůstal bez porušení do konce experimentu v 65 dnech. Tyto předběžné výsledky ukázaly, že zpomalení reaktivity cementu zvyšuje dobu porušení prstence. Testy na 27 cementech a 104 panelech ukázaly, že stav povrchových trhlin po 53 letech koreluje s dobou porušení prstence [9]. Prstence tak poskytují krátkodobé zkoušky pro dlouhodobý vznik povrchových trhlin. Testy na prstencích se používaly jako kontrolní zkoušky cementů například na stavbě Čestlice-Mirošovice v roce 1970 [19].




*Obrázek 10: Charakteristický průběh relativní deformace oceli na třech vybraných cementech.*

Pro zmapování současného trhu s cementy a stanovení odolnosti ke vzniku trhlin bylo otestováno celkem 25 různých cementů. Všechny cementy byly semlety ze standardního alitického slínku s obsahem $C_3S$ 60-70 % hm., většina cementů byla zhotovena na zakázku. Dále byly zkoumány portlandské struskové cementy CEM II/A-S a CEM II/B-S jako dobře definované prototypy směsných cementů. Z každého cementu byly zhotoveny 2-4 prstence a doba porušení byla zprůměrována.

Souhrnné výsledky měření uvádí Obrázek 11. U každého cementu je v závorce uvedena doba, kdy došlo k průměrnému prasknutí prstenců ve dnech. Znaménko ≥ značí, že test byl ukončen s alespoň jedním neporušeným prstencem a mohl by pokračovat dále. Zeleně jsou vyznačeny cementy, kde doba porušení prstence přesáhne 40 dní. Tato hodnota byla stanovena s ohledem na referenční silniční cement CEM I 42,5 R(sc), Mokrá z 03/2018, který se dominantně používá pro výstavbu cementobetonových krytů v ČR a kde jsou statistiky z dlouhodobého monitoringu. Červeně jsou označeny cementy, kde doba porušení nedosahuje 40 dní. Nejdelší doba měření prstenců dosáhla 207 dní.




*Obrázek 11: Výsledky testů na smršťujících prstencích. Údaje za bodem reprezentují Jemnost mletí dle Blaina (Průměrnou dobu porušení prstenců ve dnech) a Popis cementu.*

Pouze dva komerčně vyráběné a testované cementy z 10 zkoumaných splnily práh 40 dní; CEM II/B-S 32,5 R Radotín a CEM II/B-S 32,5 R Prachovice. Jedna šarže CEM I 42,5 R(sc) Mokrá z 11/2019 toto kritérium také splnila, v kontextu testů dalších šarží z Mokré se jednalo o ojedinělý výsledek bez známé příčiny. 10 z 15 cementů připravených na zakázku splnilo práh 40 dní, jednalo se o třídy cementů 32,5 R a 42,5 N. Fialová úsečka určuje přibližnou hranici, která odděluje cementy odolné a neodolné ke vzniku trhlin dle kritéria 40 dní porušení malty v prstenci.

Obecně platí, že čím nižší je jemnost mletí, tím je vyšší odolnost cementů/malt/betonů ke vzniku trhlin při vysychání. Vysvětlení je takové, že cementy s nízkou reaktivitou vytvářejí méně trhlin během chemického smrštění a vykazují vyšší dotvarování, které pomáhá relaxaci napětí při následném vysychání. Zpomalování reaktivity cementů má však svoje omezení zdola; například cement CEM III/B 32,5N LH/SR Mokrá vykazuje již příliš nízkou počáteční pevnost a doba porušení prstence je pouze 5 dní.

## Závěr

Tlak na rychlost výstavby v uplynulých desetiletích způsobil, že dnešní cementy používané pro výstavbu cementobetonových krytů mají příliš vysokou reaktivitu oproti cementům dřívějším. Výsledkem je více neviditelných trhlinek v celém objemu betonu vlivem rychlého chemického smrštění. Dalším vlivem vysychání a cyklických změn vlhka a teploty se neviditelné trhliny spojují do trhlin viditelných. Tyto povrchové trhliny pak zkracují životnost cementobetonových krytů i po desítkách let.

Testy na smršťujících prstencích dobře postihují vliv chemického smrštění a vysychání, jedná se o cenné informace z nenormové zkoušky. Výsledky ukazují, že pouze třídy cementů 32,5 R a 42,5 N splňují dobu porušení prstence přes 40 dnů, která je brána jako kritérium odolnosti proti vzniku trhlin. 10 z 15 cementů připravených na zakázku běžnými postupy splnilo toto kritérium. Tím se otevírá mnoho dalších možností pro nové typy cementů použitelných pro výstavbu cementobetonových krytů s dlouhou životností.

Tlak na snižování uhlíkové stopy při výrobě cementů přináší na trh nové, výrazně jiné typy cementů, než byly dosud standardně vyráběny a používány. Jedná se o cementy s velkým obsahem příměsí, případně i jejich kombinacemi. Z pohledu rizika vzniku trhlin v počátečních stádiích hydratace betonu je to dobrý trend, ovšem příliš velký obsah příměsí může mít negativní vliv na jiné důležité vlastnosti betonu (např. odolnost proti CHRL). Nové typy cementů je tedy potřeba důsledně ověřit pro použití do betonů pro CBK, čímž se zabývá navazující projekt podporovaný přímo ŘSD ČR.

*Tento příspěvek vznikl za podpory grantu GAČR 21-03118S „Termo-hygro-mechanický model betonových vozovek“.*

## Zdroje

[1] J. Hlavatý, V. Šmilauer, B. Slánský, R. Dvořák: Opatření k prodloužení životnosti cementobetonových krytů vozovek - část I. Silniční obzor. 2019, 80(6), 164-168.
[2] A. Khan et al. Control of Cracking in Concrete. State of the Art. Technical report, Transportation Research Board, Washington, DC, 2006.
[3] J. Hromádko: Příčiny střechovitého zdvihu betonových desek krytu vozovky dálnic v ČR od roku 2010, Beton TKS, 02/2014.
[4] Z. Pertold et al.: Alkalicko-křemičitá reakce v České republice a možnosti její eliminace, Beton TKS, 02/2014.
[5] K. Seyfarth, M. Patzelt: Stanovení ASR na vybraných úsecích českých dálnic, nepublikovaná přednáška, ŘSD Praha, 9.10.2018.
[6] J. Hlavatý, V. Šmilauer, B. Slánský, R. Dvořák: Opatření k prodloužení životnosti cementobetonových krytů vozovek - část II. Silniční obzor. 2019, 80(7-8), 193-197.
[7] J. Bhatty and P. Tennis. U.S. and Canadian Cement Characteristics: 2004. Technical report, Portland Cement Association, Skokie, Illinois, 2008.
[8] V. Šmilauer, P. Reiterman, R. Šulc, P. Schořík: Crack-Resistant Cements under Drying: Results from Ring Shrinkage Tests and Multi-Physical Modeling. Materials. 2022, 15(12).
[9] R. W. Burrows: The visible and invisible cracking of concrete. ACI International, 1998.
[10] Z. Jiang, Z. Sun, and P. Wang. Autogenous relative humidity change and autogenous shrinkage of high-performance cement pastes. Cement and Concrete Research, 35(8):1539 – 1545, 2005.
[11] M. Bouasker, P. Mounanga, P. Turcry, A. Loukili, and A. Khelidj. Chemical shrinkage of cement pastes and mortars at very early age: Effect of limestone filler and granular inclusions. Cement and Concrete Composites, 30(1):13–22, 2008.
[12] J. Khatib, R. Ramadan, H. Ghanem, and A. Elkordi. Volume stability of cement paste containing limestone fines. Buildings, 11(8), 2021.
[13] M. Mac, M. Yio, H. Wong, and N. Buenfeld. Analysis of autogenous shrinkage-induced microcracks in concrete from 3D images. Cement and Concrete Research, 144:106416, 2021.
[14] V. Šmilauer, F. Kolařík, J. Němeček, and J. Maňák. Strength scaling from C-S-H globules to cement paste using multiscale hierarchical modeling. In Proceedings of the Workshop on Concrete Modelling and Materials Behaviour in honor of Professor Klaas van Breugel. Rilem Publications S.A.R.L., 2018.
[15] Z. Bažant, H. Ohtsubo, and K. Aoh. Stability and post-critical growth of a system of cooling or shrinkage cracks. Construction and Building Materials, 15(5):443–456, 1979.
[16] P. K. Mehta. Concrete technology at the crossroads–problems and opportunities. In Concrete Technology Past, Present and Future, SP-144, pages 1–31. ACI Detroit, 1994.
[17] B. Slánský, L. Vysloužil, V. Šmilauer, J. Veselý: Opatření pro vyšší životnost CBK – výsledky pilotního projektu, Sborník konference Betonové vozovky 2020, 32-47, 2020.
[18] F. Kanavaris, M. Azenha, M. N. Soutsos, K. Kovler: Assessment of behaviour and cracking susceptibility of cementitious systems under restrained conditions through ring tests: A critical review, Cement and Concrete Composites, 2019.
[19] B. Kačena: Závěrečná zpráva laboratoře Stráncice o kontrolních zkouškách betonu dálnice Čestlice-Mirošovice km 10,2 – 23,2, stavba 003, Stavby silnic a železnic n.p., 1971.
[20] V. Šmilauer, P. Reiterman, P. Schořík: Odolnost cementů vůči tvorbě trhlinek během vysychání. BETON-technologie, konstrukce, sanace. 2022, 22(1), 64-67.

# Zkušenosti a vývoj protismykových vlastností u cementobetonových krytů s povrchem upraveným broušením (grindingem)

*Ing. Stanislav Bedřich*
*Tel.: +420 606 685 216*
*E-mail: stanislav.bedrich@strabag.com*

*Leoš Nekula*
*Tel.: +420 603 473 054*
*E-mail: L.Nekula@seznam.cz*

Technologie výstavby cementobetonových krytů (CBK) se v České republice v posledních letech stále vyvíjí. Mění se postupy navrhování vozovek, návrhy cementobetonových směsí i požadavky na ně, a také postupy při realizaci a údržbě CBK. Dlouhodobě nicméně stejné zůstávají požadavky na provozní způsobilost povrchů CBK, tedy na klasifikaci aktuálních parametrů protismykových vlastností, textury, podélné a příčné nerovnosti povrchu vozovky. Do popředí se dostávají rovněž požadavky na snižování dopravního hluku.
Nejsledovanějším parametrem jsou protismykové vlastnosti povrchu vozovky, protože v minulosti byly s udržením tohoto parametru v požadované klasifikaci největší problémy. Úseky s povrchovou úpravou CBK taženou jutou totiž na zatížených úsecích dálnic ztrácely v krátkém čase požadovanou klasifikaci. Nebylo výjimkou, že již po roce provozu bylo hodnocení protismykových vlastností klasifikováno stupněm 5 – havarijní stav. Problém nevyhovujících povrchů CBK byl vyřešen až zavedením technologie CBK s obnaženým kamenivem. První pokusný úsek byl proveden na dosud neprovozované části dálnice D0 (MÚK Modletice), následoval úsek na dálnici D1, který byl položen v roce 2012, a který definitivně prokázal zvládnutí této náročné technologie. Od této doby se CBK s obnaženým kamenivem používá na většině nově položených úseků dálnic, nejen při modernizaci D1, ale i při rekonstrukcích starších vozovek s CBK. V poslední době je testována také technologie úpravy nových nebo stávajících povrchů CBK broušením diamantovými kotouči, kterému se říká v zahraničí grinding, o které převážně pojednává tento článek. Je to technologie běžně používaná od počátku 60. let 20. století na dálnicích v USA, v poslední době se broušení povrchů CBK používá také v Rakousku nebo Německu. Broušení nových povrchů CBK zajišťuje požadované protismykové vlastnosti a eliminuje nerovnost povrchů vozovek. Další významnou výhodou broušení CBK je snížení dopravního hluku. V posledních letech byly kombinovány technologie broušení (grinding) a drážkování (grooving), označené zkratkou NGCS, což znamená „Next Generation Concrete Surface“. Podle prováděných výzkumů metoda NGCS a zkušenosti z provozu na testovacích úsecích přináší nejlepší kombinaci povrchových vlastností povrchů CBK, hlavně protismykových vlastností a eliminaci valivého hluku [1].
Mnoho stávajících úseků dálnic v ČR má dosud povrchovou úpravu CBK taženou jutou, které mají nevyhovující protismykové vlastnosti. Na obnovu protismykových vlastností povrchů vozovky těchto úseků bylo vyzkoušeno více technologií (tryskání paprskem tlakové vody nebo ocelovými kuličkami, broušení diamantovými kotouči, jemné frézování). Tento článek popisuje zkušenosti s technologií broušení diamantovými kotouči (grinding).

## Broušení – Grinding

Broušení neboli grinding je jedna z metod na úpravu povrchu CBK. Broušení lze využít jak u nově budovaných CBK, tak při úpravách povrchových vlastností stávajících cementobetonových vozovek. Hodí se pro sjednocení vlastností povrchů krytu vozovky, například u částečně prováděných výměn desek CBK při rekonstrukci vozovky. Praktické zkušenosti a výhody této technologie, které jsou uváděny v zahraničních publikacích a přednáškách, stojí za pozornost, a i data získaná ze zkušebních úseků v České republice.
Broušení je možná alternativa u nově realizovaných CBK v případech, kdy stavební firmy/investoři stojí před problémem, že lomy, produkující vhodné kamenivo do horní vrstvy CBK s obnaženým kamenivem, již nejsou schopny plnit požadavky na poptávané množství na soutěžené stavby, nebo je cena velmi vysoká anebo je kamenivo nutné dovážet z velkých vzdáleností. Zde je možné zohlednit i požadavky na např. environmentálně odpovědné zadávání veřejných zakázek dle zákona 134/2006 Sb., o zadávání veřejných zakázek.

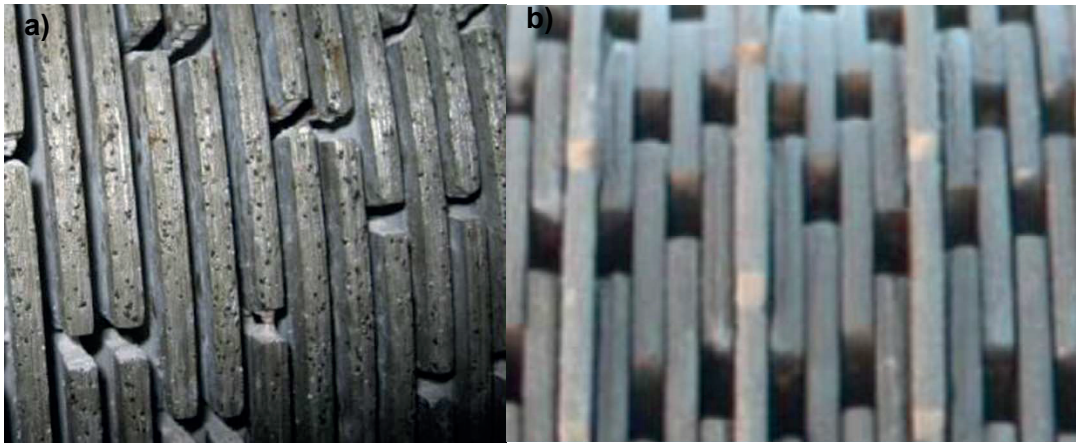
Hlavní výhody broušení jsou:

- dobré protismykové vlastnosti povrchu vozovky,
- redukce hlukové zátěže (výsledky obdobné jako u dobře provedené úpravy s obnaženým kamenivem),
- zlepšení hodnot mezinárodního indexu nerovnosti (IRI),
- eliminace rizika povrchových poruch vlivem počasí u nových vozovek (déšť u kartáčování povrchu),
- technologické výhody u nových vozovek (jedna směs pro horní i spodní vrstvu),
- odpadá závislost na lomech produkujících vhodné kamenivo pro CBK s obnaženým kamenivem.

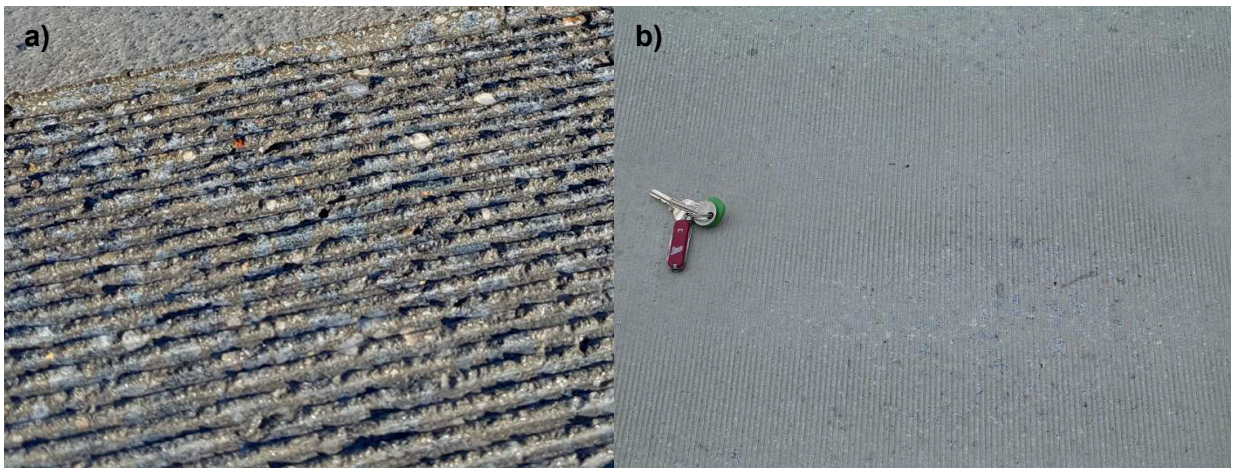
Nevýhody broušení jsou:

- omezený počet společností vlastnící strojní zařízení,
- likvidace kalu,
- navýšení ceny o broušení u nových krytů,
- u stávajících krytů při broušení nepoškodit odvodňovací prvky, ale zajistit odtok vody (např. štěrbinové žlaby),
- budoucí rekonstrukce; pro opakovanou obnovu protismykových vlastností povrchu vozovky je vhodné počítat s nadvýšením tloušťky CBK.

Nejprve považujeme za vhodné uvést rozdíl mezi broušením (grinding) a broušením nerovností vozovky. Pokud pomineme velmi důležitý rozdíl, a to je samotný stroj, je zásadní rozdíl v osazení řezných kotoučů (segmentů) a distančních vložek (viz obrázek 1). U broušení nerovností se jedná zpravidla o kratší úseky a bruska zbrousí extrémy nerovností dle technických možností. Není zde možné nastavení hloubky broušení. Po broušení vzniká charakteristická struktura podobná struktuře grindingu, ale zásadní rozdíl je v použití užších distančních vložek mezi kotouči. Výsledný rozdíl je porovnán na obrázku 2.



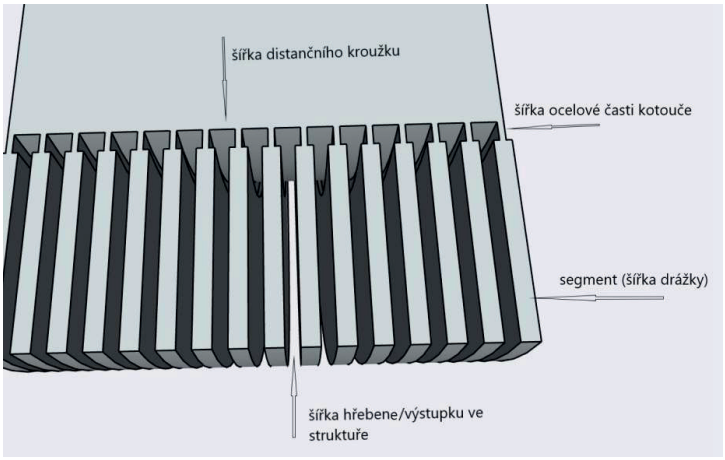

*Obrázek 1: Rozdíl osazení hřídele řeznými kotouči pro grinding a) a broušení nerovnosti b)*




*Obrázek 2: Rozdíl úprav grinding a) a broušení nerovnosti b)*

Zakladní parametry pro zadání broušení jsou:

- šířka drážky – je dána šířkou segmentů na řezném kotouči neboli šířkou segmentů;
- šířka hřebene - je dána roztečí segmentů/řezných kotoučů, která je upravena distančními vložkami mezi řeznými kotouči. Použití přesné šířky hřebene uvedené do zadání nebo do projektové dokumentace může být pro zhotovitele problematické, protože výrobci mají při stejné šířce segmentu rozdílnou šířku nosné ocelové časti kotouče, na který jsou řezné diamantové časti (segmenty) přidělány. Obecně platí, že tvrdší kamenivo v cementobetonovém krytu vyžaduje užší rozteč mezi segmenty, aby se řezné kotouče prořízly tvrdší horninou a zajistilo se, že se výběžky za provozu odlomí, zatímco cementobetonové kryty s nižší tvrdostí kameniva (tyto druhy hornin nemusí splnit požadavky příslušných ČSN na kamenivo do CBK) mohou mít o něco větší šířku hřebene;
- hloubka řezu – je nastavena k povrchu vozovky, dle použité technologie broušení. Hloubka řezu není rovna hloubce výsledné struktury neboli výšce hřebene. Výška hřebene je menší.




*Obrázek 3: Osazení hřídele řeznými kotouči*

## Zásady pro provádění broušení na nových cementobetonových krytech

U nových cementobetonových vozovek, u nichž bude použita úprava povrchu broušením, musí být v projektu uvažováno s nadvýšením cementobetonových desek tak, aby výsledná tloušťka desky odpovídala návrhu konstrukce vozovky po provedení broušení.
Obecně je vhodné počítat u všech cementobetonových krytů s určitým nadvýšením tloušťky desky pro opakované broušení v průběhu užívání vozovky. V projektu je vhodné upravit detaily, které by v budoucnu omezovaly provedení optimální hloubky řezu drážky. Jedná se například o odvodňovací prvky, které by se broušením poškodily, např. štěrbinové žlaby, nebo různé litinové prvky a poklopy.
Pro provádění je důležitý návrh cementobetonové směsi včetně správných postupů při betonáži, aby bylo dosaženo velmi tenké vrstvy cementopískové malty na povrchu krytu a rovnoměrného rozmístění hrubého kameniva v broušené struktuře betonu.
Technologie provádění nového CBK musí zabezpečit dostatečně rovný povrch před broušením, bez nerovností ≥ 4 mm, aby bylo možné zabezpečit trvale homogenní texturu pro zajištění požadovaných protismykových vlastností povrchu vozovky a zmírnění hluku viz obrázek 3.



*Obrázek 3: lokální nerovnost větší než 4 mm po broušení*

V průběhu příprav a plánování průběhu stavby by měla být vždy uvažována pevnost betonu v době broušení dle TP B-StB [2]. Aby nedošlo k poškození mladé betonové matrice vrchního betonu, musí být splněny minimální požadavky na pevnost betonu. Dle závěrů výzkumů uvedených v reportu [1], prováděných společně německými a rakouskými výzkumnými organizacemi, může broušení začít na základě potvrzení závěru na zkušebních úsecích, pokud:

- Jednotlivá hodnota pevnosti v tahu v příčném tahu $f_{ct,i,core}$ by měla být nejméně 3,0 MPa.
- Beton, který se má brousit, by měl mít pevnost v tlaku $f_{c,i,cube}$ 35 MPa.
- Pro přípustné mechanické zatížení a působení rozmrazovacích prostředků se obvykle uvádí minimální pevnost betonu v tlaku 26 MPa.

V závislosti na pevnosti betonu musí rovněž zhotovitel zvolit vhodné řezné kotouče, otáčky kotoučů a rychlost posuvu tak, aby se vytvořila rovnoměrná struktura.

Broušení by mělo být prováděno delší hřídelí, na které jsou osazeny řezné kotouče. Krátké brusné hřídele jsou obecně méně vhodné, protože se zvyšuje počet překrývajících se ploch, což vede k nehomogenní struktuře povrchu (viz obrázek 4). Kromě toho se výrazně prodlužuje doba broušení, takže se mohou zvýšit náklady na dopravní opatření, v případě, že se brousí za provozu.



*Obrázek 4: Překryv jednotlivých kroků broušení způsobuje defekt ve struktuře grindingu (dva překryvy)*

Hloubku řezu je třeba nastavit tak, aby byla zcela odstraněna struktura vytvořená povrchovou úpravou CBK při pokládce a aby bylo ve struktuře hrubé kamenivo. Z důvodů oslabení únosnosti desek by celková hloubka broušení neměla přesáhnout 1 cm.
Pokud jsou u položené betonové desky splněny požadavky na nerovnost ≤ 4 mm pod 4 m latí, je možné broušení provést v jednom pracovním kroku. Pokud jsou nerovnosti větší, je třeba před broušením provést broušení pro zmenšení nerovností, zejména pokud chceme dosáhnout broušením i snížení hluku.



*Obrázek 8: Nerovnosti povrchu cementobetonového krytu ovlivňuje výslednou kvalitu broušení*

## Požadavky na broušení v rámci údržby stávajících cementobetonových krytů

V případě stávajících cementobetonových vozovek, u nichž je třeba v rámci údržby obnovit protismykové vlastnosti povrchu vozovky a/nebo snížit hlučnost povrchu, je třeba před zadáním provést dostatečnou

diagnostiku vozovky, která ověří, zda kondice vrchního betonu je dostačující pro použití technologie broušení. Správně zadaná a provedená diagnostika vozovky je vždy jedním ze základních pilířů pro kvalitní zadání a provedení stavebního díla (rekonstrukce).

Nejprve je třeba zkontrolovat stav vozovky a zejména stav horního betonu:

- pevnost a odolnost horního betonu proti chemickým a rozmrazovacím látkám,
- tloušťka maltové vrstvy vrchního betonu, aby bylo ve struktuře hrubé kamenivo,
- odolnost hrubého a jemného kameniva proti ohlazení,
- nerovnosti před broušením,
- stav betonu (rozpad) v místě příčných spár.

Výše uvedené základní kontrolované parametry CBK je nutné doplnit o činnosti spojené s opravou a případným broušením spár. Tak jako u nových vozovek i zde platí pravidlo maximální nerovnosti do 4 mm.

V projektu a následně během provádění by měla být uvažována taková hloubka broušení včetně broušení nerovnosti, aby nedošlo k nadměrnému oslabení betonových desek do té míry, že by byly desky následně poškozeny zatížením těžkými nákladními vozidly. Pokud je pravděpodobné, že bude překročena hloubka broušení o více jak 10 mm, je vhodné předem provést přepočet únosnosti vozovky, aby nebyla zkrácena její životnost.

Vzhledem ke zvýšené pevnosti nebo rozdílné pevnosti betonu v závislosti na jeho stáří, je třeba při broušení dbát na výběr vhodných řezných kotoučů. Zejména je nutné kontrolovat místa lokálních oprav desek, zda nedochází k vytrhávání správkových hmot nebo nového betonu.

V přechodových oblastech, např. v připojovacích pruzích nebo v místech změny druhu vozovky s asfaltovou hutněnou vrstvou, musí být hloubka řezu nastavena tak, aby nedocházelo ke schodům nebo deformacím.

Ostatní požadavky jsou obdobné jako u broušení nových CBK.

## Úseky dálnic s provedeným broušením v ČR

V rámci České republiky bylo provedeno několik úseků s broušením, které byly dlouhodobě sledovány zejména z pohledu vývoje protismykových vlastností povrchu vozovky v čase.

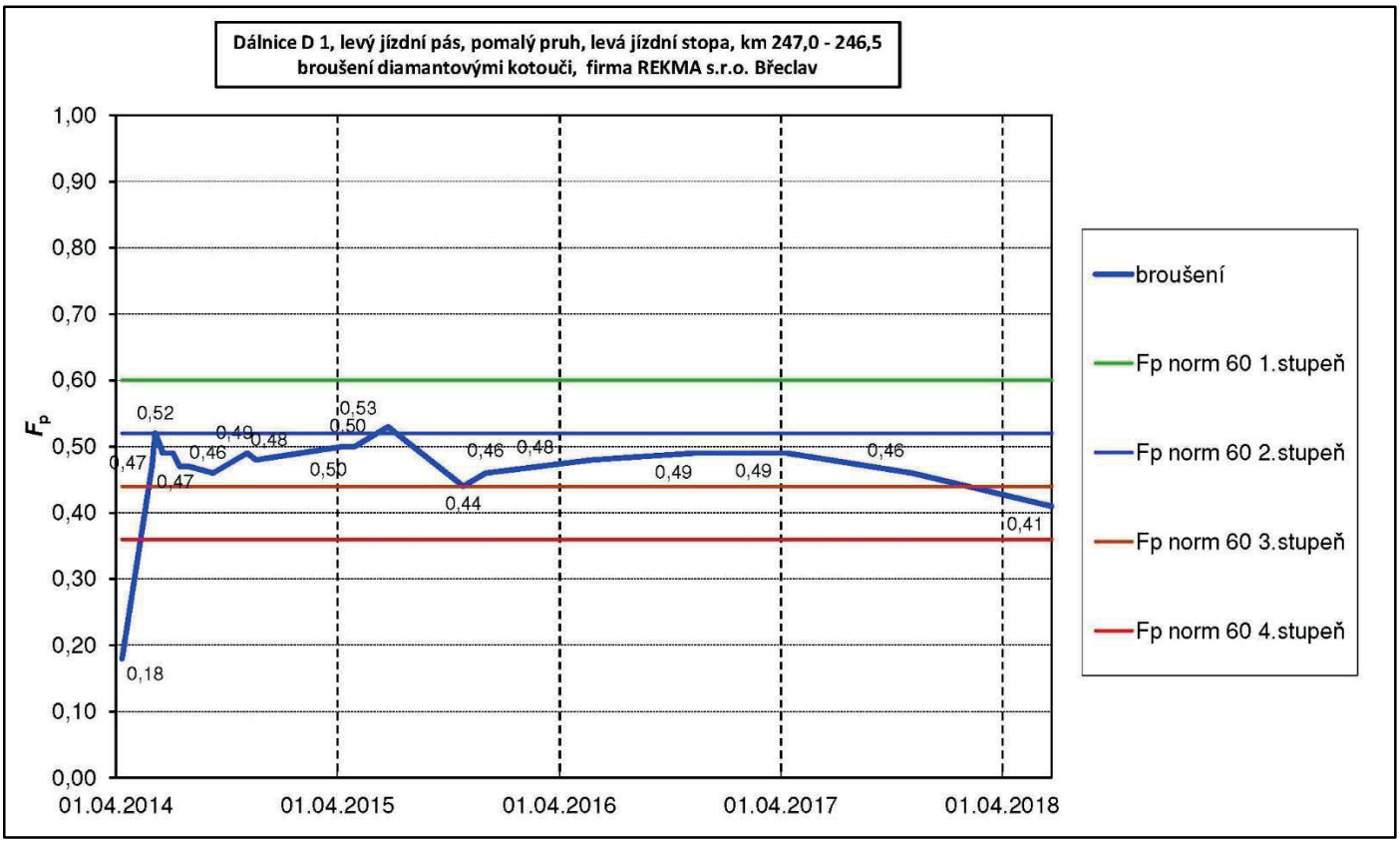
Zkušební úseky na dálnici D1

Nejdéle sledovanými úseky s provedeným broušením uvedeným v tomto článku jsou zkušební úseky provedené na dálnici D1 v roce 2014, a to v levém jízdní pásu ve staničení km 247,000 – 246,500, a ve staničení km 240,500-240,250 a km 240,250 – 240,000. Oba úseky byly provedeny na cementobetonovém krytu položeném v roce 2005 s povrchovou úpravou taženou jutou. Dopravní zatížení s denním počtem přejezdů $TNV_0$=1 455 (z celostátního sčítání 2016).
V následujících tabulkách jsou uvedeny hodnoty součinitele tření $F_p$ před obnovou a po obnově protismykových vlastností povrchu vozovky. V závorkách je uvedeno hodnocení klasifikačním stupněm podle tabulek v Příloze A ČSN 73 6177.

Levý jízdní pás, pomalý pruh, levá jízdní stopa, km 247,000 – 246,500, měřicí rychlost 60 km.h$^{-1}$, rozteč segmentů 1,7 mm, opotřebené diamantové hroty na řezných kotoučích (viz tabulka 1 a graf 1)

| Datum | Součinitel tření $F_p$ | IRI (m.km$^{-1}$) | Střední hloubka textury MTD (mm) |
|---|---|---|---|
| 11.4.2014 před broušením | 0,18 (5) | 1,4 (1) | 0,11 (5) |
| 30.5.2014 po broušení | 0,47 (3) | 0,7 (1) | 0,72 (2) |

*Tabulka 1: Výsledky měření povrchových vlastností*



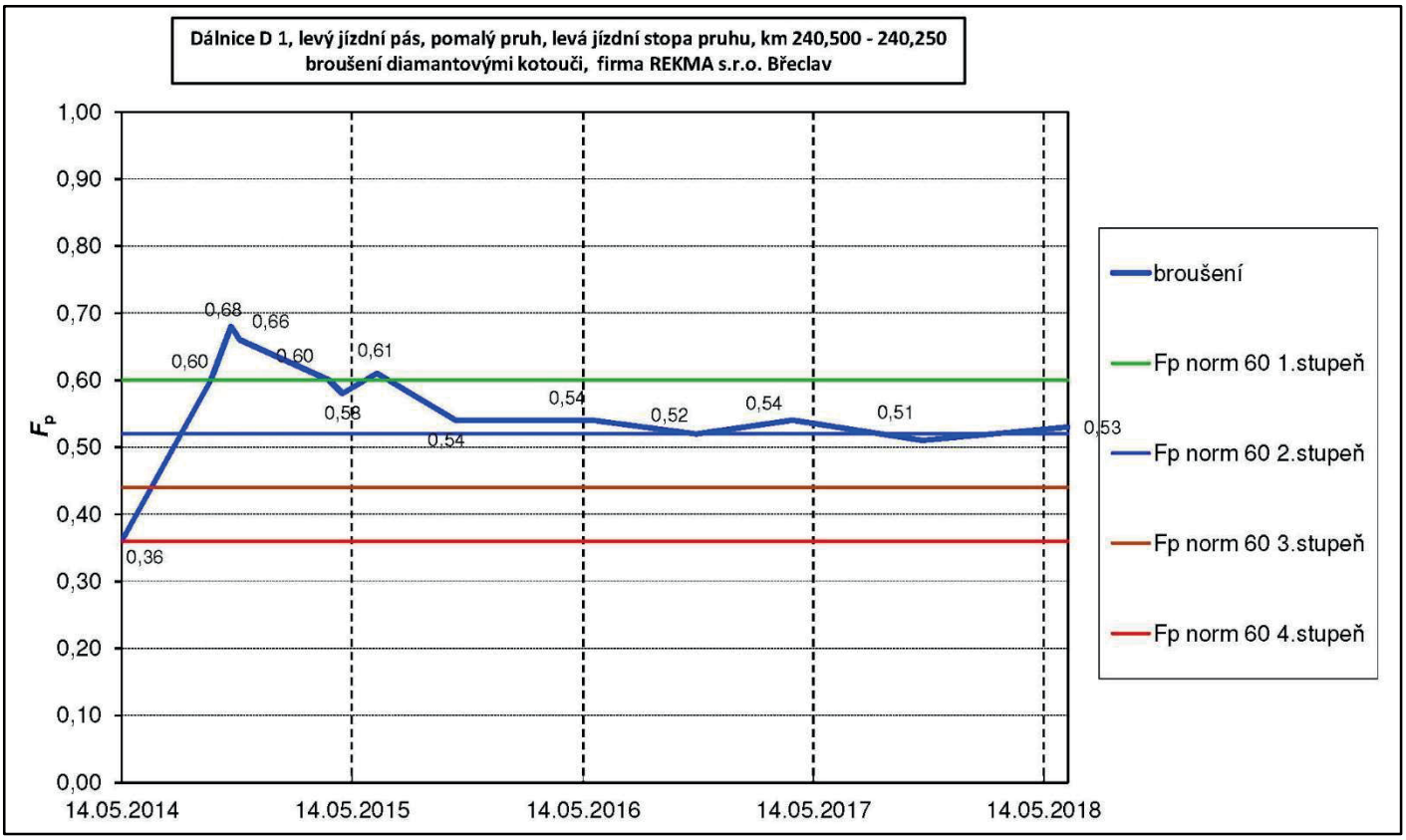

*Graf 1: Diagram změny součinitele tření $F_p$ v čase*

První pokusný úsek s broušením diamantovými kotouči na dálnici D1 v km 247,000 – 246,500 nepřinesl očekávanou obnovu protismykových vlastností povrchu vozovky CBK. I přes velmi nízkou výchozí hodnotu součinitele podélného tření $F_p$ = 0,18, která je hluboko pod klasifikačním stupněm 5 – havarijní stav, byl předpoklad zvýšení hodnocení protismykových vlastností alespoň na klasifikační stupeň 2. Po prohlídce pokusného úseku bylo zjištěno, že po broušení nevznikly na povrchu CBK očekávané ostré trojúhelníkové profily, ale oblé profily, na kterých se nemohla vytvořit odlamováním horní hrany požadovaná mikrotextura. Příčinou byly značně opotřebované diamantové hroty osazené na brousících kotoučích.
Proto byl vytyčen další zkušební úsek, kde bylo broušení provedeno po výměně diamantových řezných kotoučů za nové, ještě nepoužité. Úsek byl rozdělen na dvě poloviny, v každé bylo broušení provedeno s jinou roztečí segmentů.

Levý jízdní pás, pomalý pruh, levá jízdní stopa, km 240,500 – 240,250, měřicí rychlost 60 km.h$^{-1}$, rozteč diamantových kotoučů 2,5 mm, nové řezné kotouče (viz tabulka 2 a graf 2).

| Datum | Součinitel tření $F_p$ | IRI (m.km$^{-1}$) | Střední hloubka textury MTD (mm) |
|---|---|---|---|
| 14.5.2014 před broušením | 0,36 (4) | 2,0 (2) | 0,32 (5) |
| 7.10.2014 po broušení | 0,60 (1) | 0,8 (1) | 1,08 (1) |

*Tabulka 2: Výsledky měření povrchových vlastností*

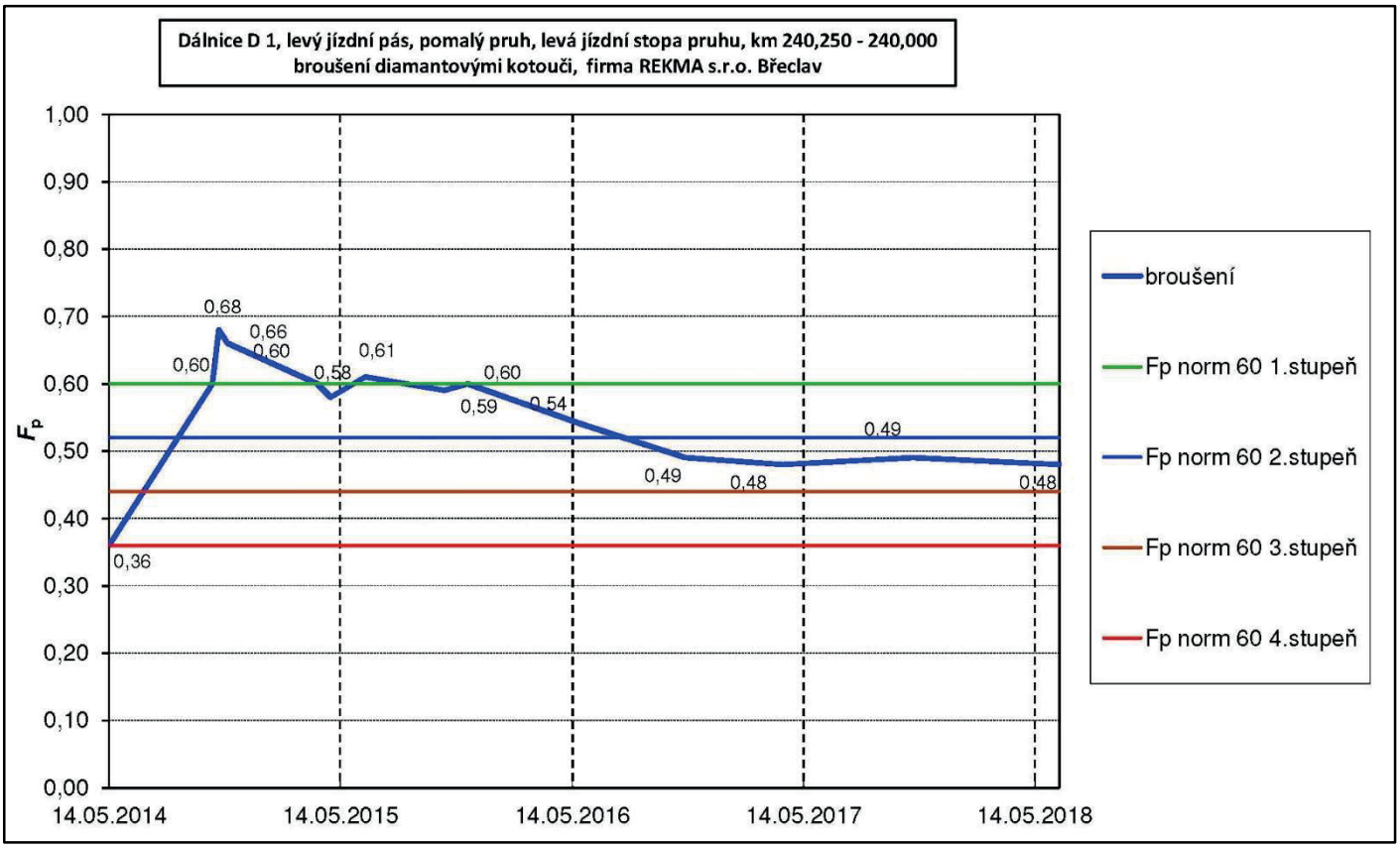



*Graf 2: Diagram změny součinitele tření $F_p$ v čase*

Levý jízdní pás, pomalý pruh, levá jízdní stopa, km 240,250 – 240,000, měřicí rychlost 60 km.h$^{-1}$, rozteč diamantových kotoučů 3,2 mm, nové diamantové kotouče (viz tabulka 3 a graf 3).

| Datum | Součinitel tření $F_p$ | IRI (m.km$^{-1}$) | Střední hloubka textury MTD (mm) |
|---|---|---|---|
| 14.5.2014 před broušením | 0,36 (4) | 2,0 (2) | 0,32 (5) |
| 23.10.2014 po broušení | 0,60 (1) | 0,8 (1) | 0,95 (1) |

*Tabulka 3: Výsledky měření povrchových vlastností*




*Graf 3: Diagram změny součinitele tření $F_p$ v čase zkušební úsek D1*

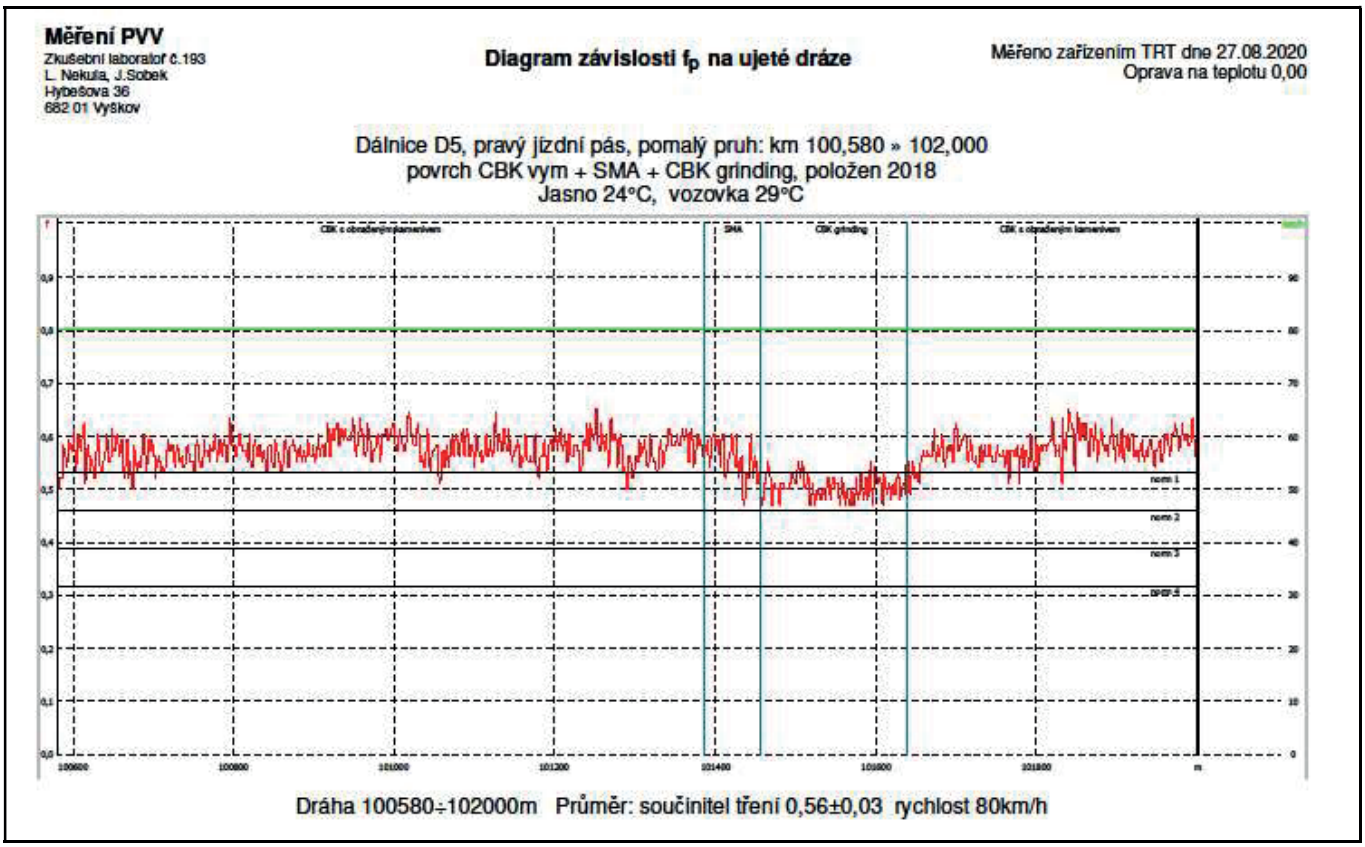
Druhý zkušební úsek s broušením diamantovými kotouči na dálnici D1 v km 240,500 – 240,000 byl nakonec zadavatelem rozdělen na dva úseky, aby mohla být vyzkoušena různá rozteč řezných kotoučů. První ve staničení km 240,500 – 240,250 měl rozteč 2,5 mm, druhý měl rozteč 3,2 mm. Nové diamanty na řezných kotoučích na obou úsecích vyřezaly strukturu ostrých trojúhelníkových profilů. Výchozí hodnoty součinitele podélného tření $F_p$, měřené po broušení, jsou na obou úsecích hodnoceny klasifikačním stupněm 1. Po několika týdnech se hodnota $F_p$ vlivem odlamováním ostré hrany vrcholu trojúhelníkového profilu zvýšila (viz grafy 2 a 3). V následujících dvou letech docházelo k pozvolnému poklesu součinitele tření $F_p$, který se po cca 2,5 letech zastavil a do konce sledování se držel na přibližně stejné hodnotě. Pokles byl mírně větší na úseku ve staničení 240,250 – 240,000 s roztečí brusných kotoučů 3,2 mm, kde se udržuje hodnocení klasifikačním stupněm 3, na úseku ve staničení km 240,500 – 240,250 je hodnocení klasifikačním stupněm 2 (viz grafy 2 a 3).

Zkušební úsek dálnice D5

První zkušební úsek nově pokládaného CBK s úpravou povrchu broušením byl proveden v roce 2018 během opravy vozovky dálnice D5 v pravém jízdním pásu, staničení km 101,457 – 101,639. Pro porovnání hodnocení protismykových vlastností povrchu vozovky byl měřen úsek ve staničení km 100,580 – 102,000 (viz graf 4), kde jsou také úseky CBK s obnaženým kamenivem a úsek s asfaltovou úpravou SMA 11 S. Pro broušený úsek byla použita stejná receptura betonu jako u celého rekonstruovaného úseku. Použitá receptura $D_{max}$ 8 mm (receptura č. 003/2018).
Broušení bylo provedeno do hloubky 4 mm (hloubka drážek se pohybovala v rozmezí 2-4 mm) a hřídel byla osazena řezným kotoučem tloušťky 2,8 mm s roztečí 2,2 mm.

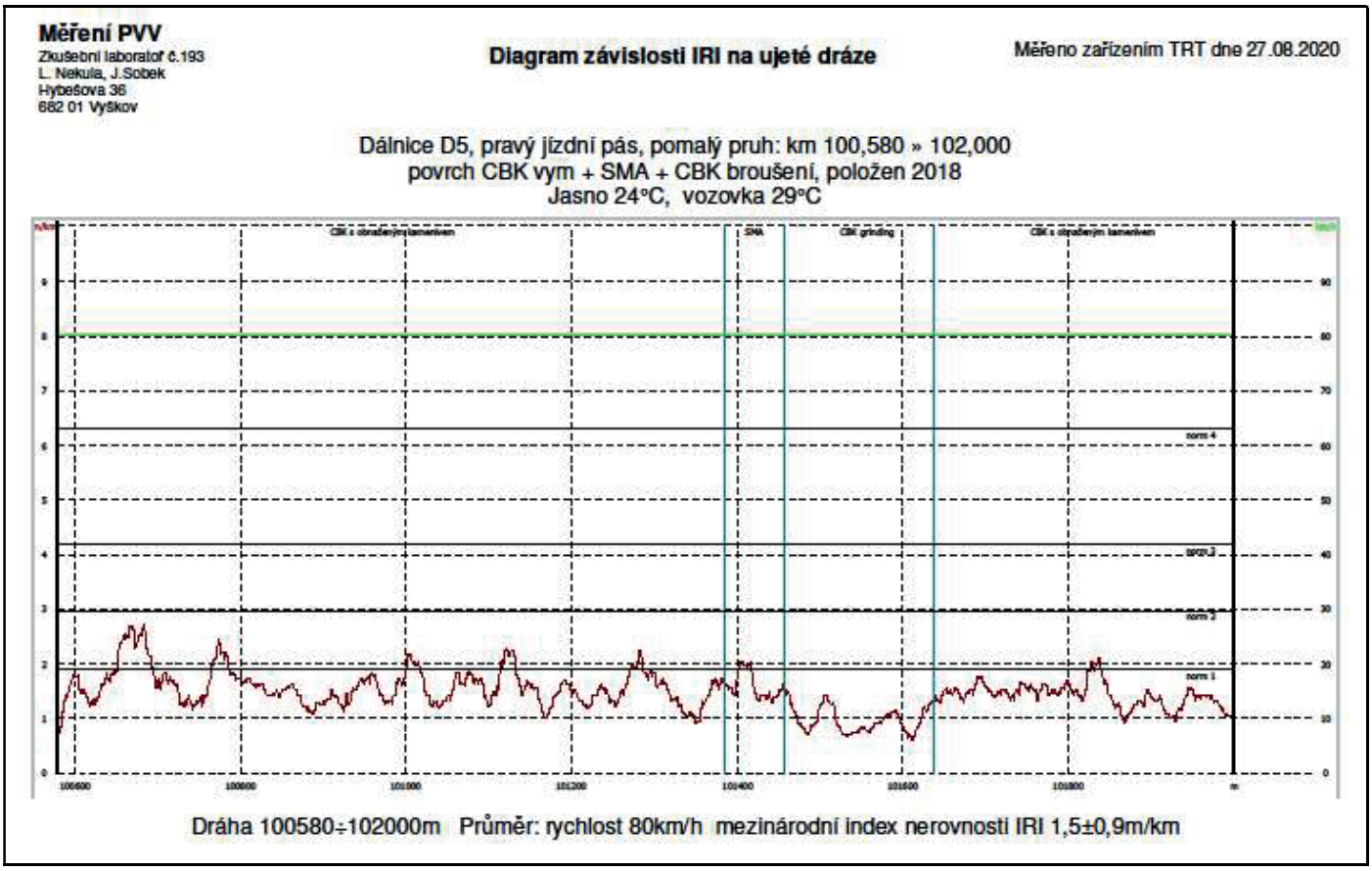


*Obrázek 5: Část povrchu cementobetonového krytu před zbroušením a po zbroušení povrch na D5*




*Graf 4: Diagram součinitele tření $F_p$ v čase zkušební úsek D5*

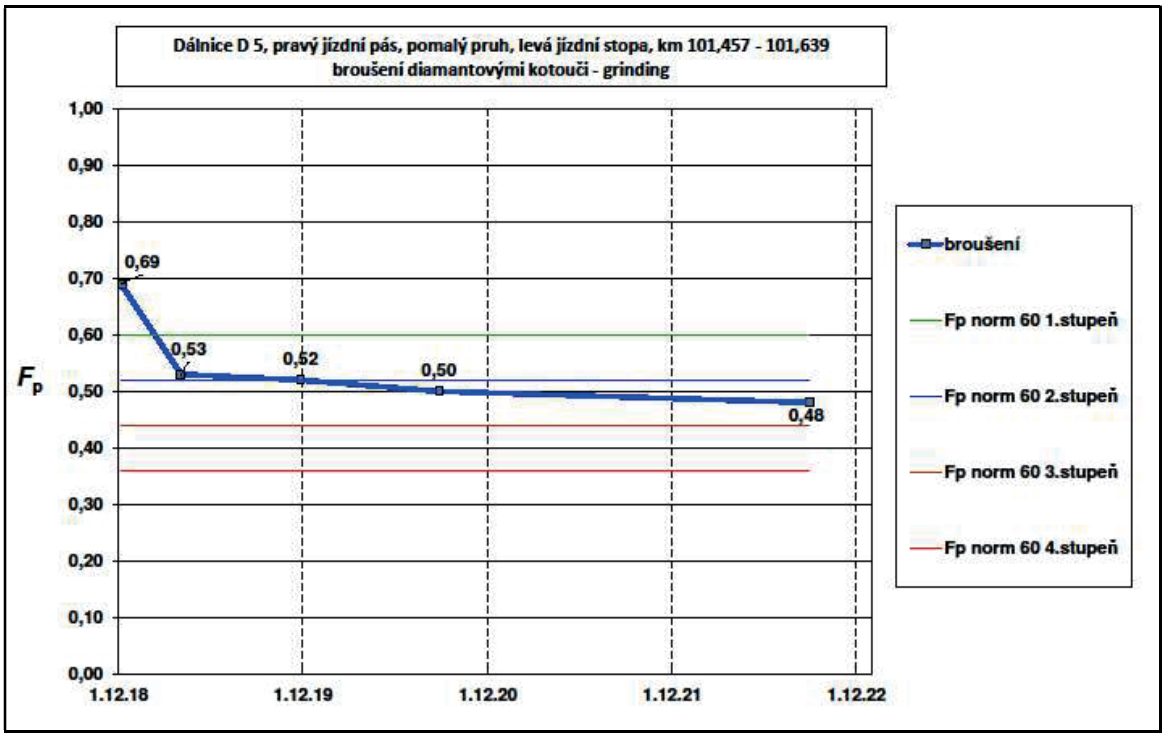
Z diagramu závislosti součinitele podélného tření $F_p$ na ujeté dráze při měřicí rychlosti 80 km.h$^{-1}$ je patrný minimální rozdíl mezi hodnotami naměřenými na úpravách CBK s obnaženým kamenivem a SMA 11 S oproti úpravě CBK broušením. Tento rozdíl se v čase spíše zmenšuje.




*Graf 5: Diagram závislosti IRI na ujeté dráze, zkušební úsek D5*

Z diagramu závislosti mezinárodního indexu nerovnosti IRI na ujeté dráze při měřicí rychlosti 80 km.h$^{-1}$ (viz graf 5) je vidět, že úsek s úpravou CBK broušením má výrazně nižší hodnoty IRI, což znamená, že je podstatně rovnější, než úpravy CBK s obnaženým kamenivem a SMA 11 S. Tento rozdíl se v čase spíše zvětšuje.

V následujícím grafu 6 a tabulce 4 je zachycen vývoj povrchových vlastností vozovky v čase na úseku dálnice D5 s úpravou CBK broušením. Je zde vidět počáteční vysoká hodnota součinitele podélného tření $F_p$ (0,69), která během 4 měsíců poměrně rychle klesá (0,53), ale stále zůstává na hodnocení klasifikačním stupněm 1. Následující pokles je velmi pozvolný (0,48) a po 4 letech je hodnocení klasifikačním stupněm 2.



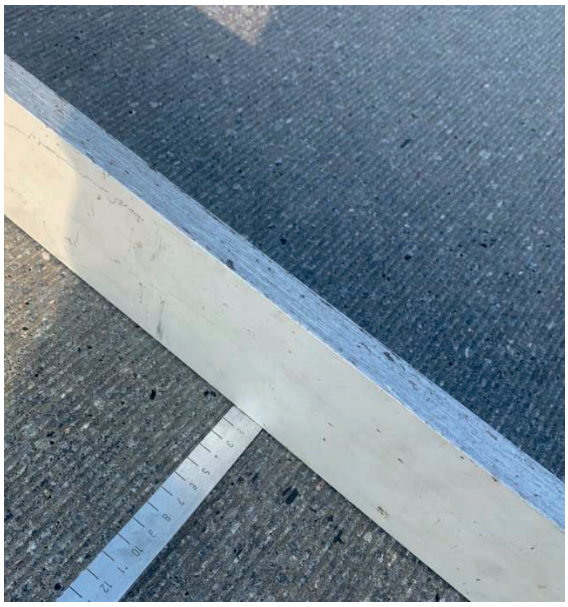

*Graf 6: Diagram změny součinitele tření $F_p$ v čase zkušební úsek D5*

| rok | MTD (mm) | | stanovení odolnosti proti působení CHRL, (g/m$^2$) | IRI (m.km$^{-1}$) | Fp |
|---|---|---|---|---|---|
| | pomalý | odstavný | | | |
| 2018 | 0,845 | | max. 553 | 1,0 (1) | 0,69 (1) |
| 2019 | - | - | - | 0,9 (1) | 053 (1)/052 (2) |
| 2020 | 0,448 | 0,780 | - | 1,0 (1) | 0,5 (2) |
| 2021 | - | - | - | - | - |
| 2022 | 0,398 | 0,754 | - | 1,1 (1) | 0,48 (2) |

*Tabulka 4: Porovnání kontrolních měření v průběhu užívání dálnice D5*

Na zkušebním úseku bylo v uplynulých 4 letech prováděno kontrolní měření protismykových vlastností povrchu vozovky ($F_p$), střední hloubky textury (MTD) a podélných nerovností (IRI). Měřen byl zejména pomalý jízdní pruh, který je nejvíce namáhán/ohlazován od zatížení těžkými nákladními vozidly. Vzhledem k možnostem uzávěry dálnice, byla střední hloubka textury (MTD) povrchu vozovky porovnávána se stavem v odstaveném pruhu. V pomalém jízdním pruhu se také měřila podélná a příčná nerovnost povrchu vozovky 2 m latí, s důrazem zjistit případnou hloubku vyjeté koleje. Na měřených místech nebyla zjištěna nerovnost větší než 1 mm, tyto hodnoty se v čase nemění. Dopravní zatížení s denním počtem přejezdů $TNV_0$=15 338 (z celostátního sčítání 2020).

Zkušební úsek nového CBK s povrchovou úpravou broušením je možné hodnotit pozitivně, pokud uvážíme, že cementobetonová směs nebyla navržena pro povrch upravený broušením, ale pro povrch upravený kartáčováním.



*Obrázek 6: Měření podélné nerovnosti pod 4 m latí na dálnici D5 v roce 2022*



*Obrázek 7: Porovnání stavu broušené struktury odstavný x pomalý jízdní pruh D5 v roce 2022 po čtyřech letech v provozu*

Zkušební úsek dálnice D0

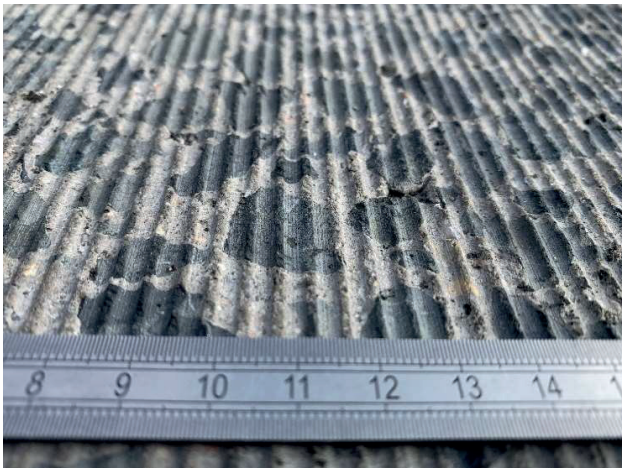
Poslední úsek s provedeným broušením stávajícího CBK, původně s povrchem upraveným taženou jutou uvedeným do provozu v srpnu 2000, je na dálnici D0 v pravém jízdním pásu, rychlém i pomalém pruhu, ve staničení km 23,876 – 26,017. Potřeba obnovy povrchu vozovky byla nutná z důvodu dlouhodobě nevyhovujícího hodnocení protismykových vlastností a také nevyhovujícího stavebního stavu některých betonových desek, které byly v rámci opravy vyměněny. Broušení bylo tedy provedeno jak na stávajícím povrchu CBK, tak na novém betonu vyměněných desek, čímž se sjednotily povrchové vlastnosti vozovky. Dopravní zatížení s denním počtem přejezdů $TNV_0$=16 859 (z celostátního sčítání 2016). V roce 2010 byla intenzita $TNV_0$=6956

Broušení bylo provedeno v hloubce 4 mm (hloubka drážek se pohybovala v rozmezí 2-3 mm). Během úprav bylo provedeno broušení dvěma různými osazeními hřídele:

- řezným kotoučem tloušťky 2,8 mm a roztečí 2,2 mm,
- řezným kotoučem tloušťky 3,2 mm a roztečí 1,6 mm.



*Obrázek 8: Porovnání struktury broušení 2,8/2,2 původní CBK (beton z 2000) x nová CBK D0 rok 2022*



*Obrázek 9: Struktura broušení 3,2/1,6 nové CBK, D0 rok 2022*

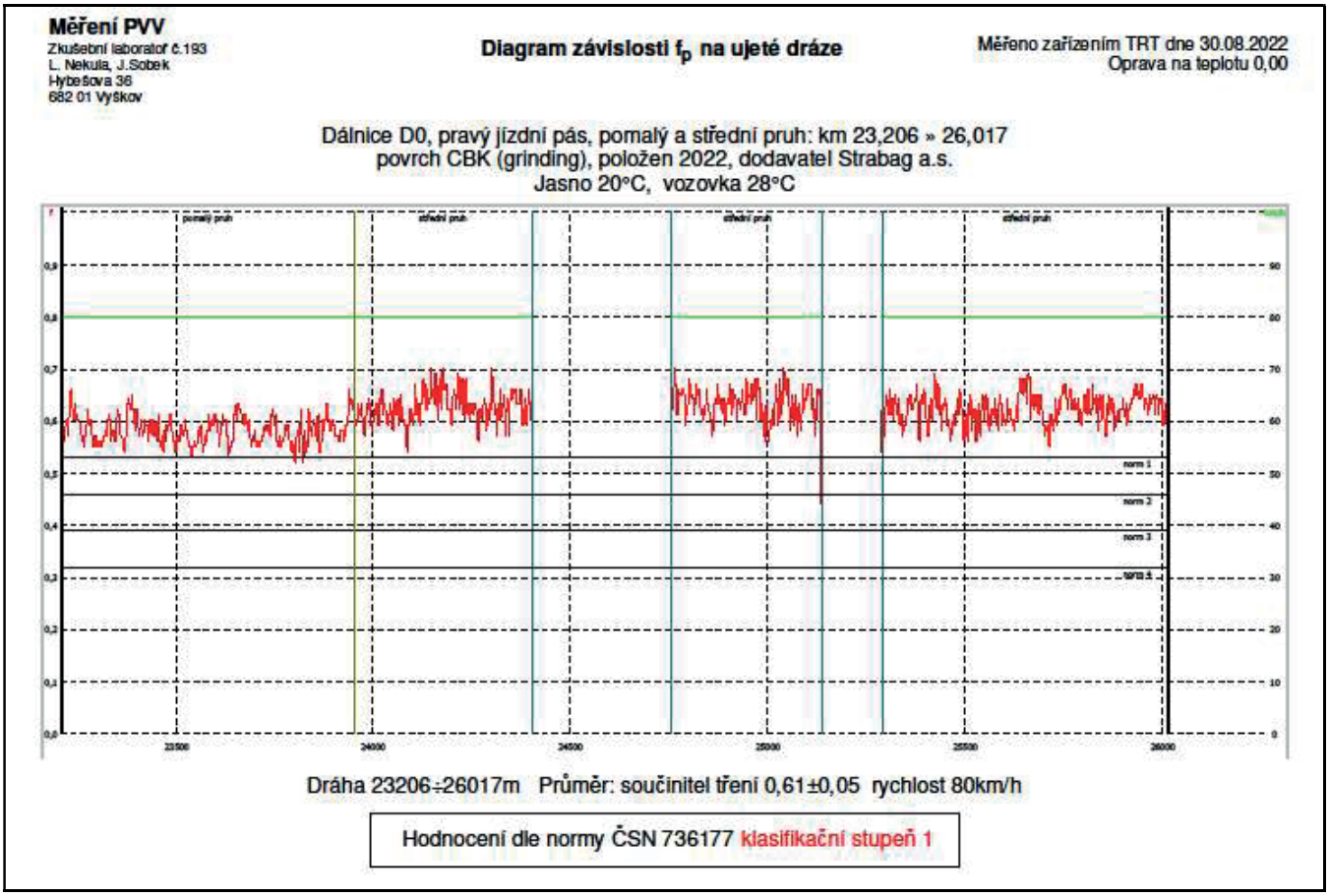


*Obrázek 10: CBK, původní povrchová úprava tažená juta po 22 letech provozu, D0 rok 2022*

Z následující tabulky 5 a diagramu 7 je patrné, že tloušťka a rozteč řezného kotouče má v krátkém čase po broušení minimální vliv na úroveň protismykových vlastností a podélných nerovností povrchu vozovky. Na diagramu závislosti součinitele tření $F_p$ na ujeté dráze je však vidět vliv dopravního zatížení na úroveň protismykových vlastností povrchu vozovky. Začátek měření je v pomalém pruhu, který od prvního kurzoru přechází na střední pruh. V pomalém pruhu vlivem vyššího dopravního zatížení TNV jsou hodnoty $F_p$ po několika týdnech provozu mírně nižší než ve středním pruhu. Nižší hodnoty zároveň mohou být z důvodu rozdílné struktury. V úseku s mírně nižší hodnotou byla struktura 3,2/1,6. Jak ale bylo prokázáno, např. na zkušebním úseku na dálnici D5, hodnoty $F_p$ po uvedení brouseného povrchu do provozu zpočátku rychle klesají, ale po několika měsících se pokles zastaví a dále jsou hodnoty $F_p$ vyrovnané, s mírným poklesem, který je obdobný například u povrchů CBK s obnaženým kamenivem. Důležité je, že hodnocení protismykových vlastností povrchu vozovky se i po počátečním poklesu drží na hranici hodnocení klasifikačními stupni 1–2 (viz předešlé tabulky a diagramy).

| Rok měření (tloušťka a rozteč) | MTD (mm) | stanovení odolnosti proti působení CHRL, (g/m$^2$) | IRI (m.km$^{-1}$) | Fp |
|---|---|---|---|---|
| 2022 před zbroušením původní povrch CBK | 0,301 | 35 [8] | | |
| 2022 (2,8/2,2) | 1,525 | max. 570 (nové úseky) | 1,1 (1) | 0,61 (1) |
| 2022 (3,2/1,6) | 1,107 | | | |

*Tabulka 5: Porovnání kontrolních měření z rekonstruovaného úseku dálnice D0*




*Graf 7: Diagram součinitele tření $F_p$ v čase zkušební úsek D0*

## Výsledky z měření na zkušebních úsecích v Německu a Rakousku

Níže jsou uvedeny závěry z projektů výsledky projektu *FE 08.0210/2010/ORB,* včetně závěrů z jednotlivých měření na úsecích dálnic viz tabulka č. 6.

| **Označení dálnice** | rok broušení | stáří CBK | CPXP (80 km/h) | Hodnota snížení hladiny h. | MPD prům. hodnota (mm) | ETD prům. hodnota (mm) | fct,sp střední hodnota (MPa) | µ-SKM 80 km/h stř. hodnota | µ-SKM 60 km/h stř. hodnota |
|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|
| 1 | 2010 | 1 | 98,0 | - | 0,65 | 0,72 | 3,80 | 0,84 | - |
| 2 | 2006 | 5 | 100,3 | +0,4 | 0,46 | 0,57 | 4,31 | 0,57 | 0,64 |
| 3 | 2009 | 2 | 97,7 | - | 0,63 | 0,71 | 5,49 | 0,71 | 0,76 |
| 4 | 2009 | 2 | 98,5 | - | 0,40 | 0,52 | 5,19 | 0,57 | 0,62 |
| 7 | 2005 | 6 | 99,7 | - | 0,62 | 0,70 | 5,88 | 0,63 | 0,67 |
| 24 | 2001 | 10 | 98,0 | -2,2 | 0,39 | 0,51 | 5,56 | 0,66 | 0,72 |
| 115 | 2004 | 7 | 98,7 | -1,2 | 0,29 | 0,43 | 4,63 | 0,55 | 0,62 |

*Tabulka 6: Výsledky z výzkumného projektu FE 08.0210/2010/ORB [4]*

Výše uvedené vozovky byly broušeny z důvodu zlepšení rovnosti nebo protismykových vlastností povrchu vozovky stejně jako zkušební úseky v České republice. Jako dodatečný efekt došlo ke snížení hlukové zátěže. Hodnoty snížení hladiny hluku bylo možné určit pouze částečně měřením podle norem, přičemž tyto hodnoty podléhají zřetelnému rozptylu. Hodnoty snížení hladiny hluku se pohybují v rozmezí -2,2 dB(A) až +0,4 dB(A). Hladiny akustického tlaku všech měřených úseků z měření CPX osobních automobilů se pohybovaly v rozmezí 97,7 dB(A) až 99,7 dB(A), a tedy přibližně 1 až 3 dB(A) pod referenční hodnotou 101 dB(A) používanou pro měření CPX pro povrchy vozovek s korekcí povrchu vozovky DStrO podle RLS-90 [5] ve výši 0 dB(A).

- Broušené povrchy vykazovaly dobré hodnoty součinitele tření i po delší době užívání vozovky od broušení. Lze předpokládat, že hlavní roli hraje pevnost vrchního betonu (zejména odolnost proti ohlazení).
- Přímá korelace mezi zjištěnými parametry textury (šířka pásu, šířka drážky, hloubka drážky) a hodnotami snížení úrovně nebyla ověřitelná.
- Výsledky měření povrchů dvou zkoumaných úseků silnic, které byly broušeny ve stáří vozovky 10 a 7 let, naznačují, že povrchy si trvale zachovaly původní vlastnosti, jako je pevnost atd.

Dálnice A5 Rakousko

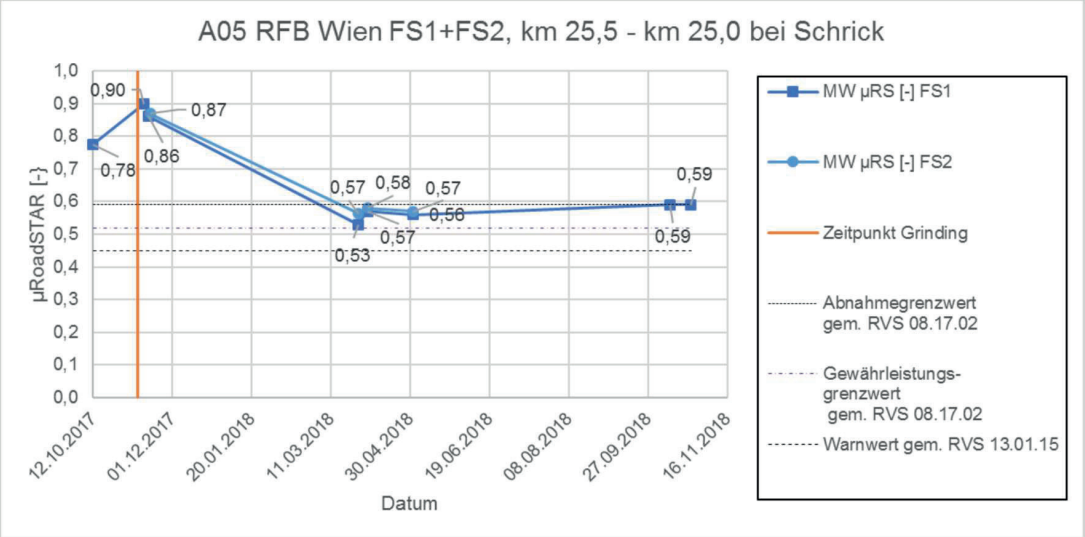
Než bylo rozhodnuto o vhodnosti vozovky pro "broušení v nové konstrukci", byly zkušebně broušeny jednotlivé desky již hotové vozovky. Následně byly odebrány vývrty a převezeny do laboratoře k dalšímu zkoumání. Zde byly provedeny zkoušky pevnosti v tlaku, odolnosti proti mrazu a tání (zkouška CDF) a součinitel tření pomocí kyvadla SRT. Vzhledem k uspokojivým výsledkům mohl být úsek použit jako zkušební. Od 9. 11. 2017 byly na každém ze dvou jízdních pruhů a na bezprostředně sousedící zpevněné krajnici v délce 250 m použity dvě různé textury broušení. Geometrie použitých textur byla definována jako 2,8/2,2 mm a 2,4/1,8 mm (šířka řezných kotoučů/rozteč řezných kotoučů).

| **Datum** | **Měření 1** | **Měření 2** | **MW µRS [-] FS1** |
|---|---|---|---|
| 12.10.2017 | 0,77 | 0,78 | 0,78 |
| 13.11.2017 | 0,9 | 0,9 | 0,90 |
| 16.11.2017 | 0,87 | 0,85 | 0,86 |
| 28.03.2018 | 0,52 | 0,54 | 0,53 |
| 03.04.2018 | 0,57 | - | 0,57 |
| 02.05.2018 | 0,56 | 0,56 | 0,56 |
| 11.10.2018 | 0,59 | - | 0,59 |
| 24.10.2018 | 0,59 | 0,59 | 0,59 |

*Tabulka 7: Měření protismykových vlastností na A05 RFB Vídeň, FS1, km 25,5-25,0*

| **Datum** | **Měření 1** | **Měření 2** | **MW µRS [-] FS2** |
|---|---|---|---|
| 17.11.2017 | 0,88 | 0,86 | 0,87 |
| 28.03.2018 | 0,56 | 0,57 | 0,57 |
| 03.04.2018 | 0,58 | | 0,58 |
| 02.05.2018 | 0,57 | 0,57 | 0,57 |

*Tabulka* 8: *Měření protismykových vlastností na A05 RFB Vídeň, FS2, km 25,5-25,0*




*Graf 8: Časový průběh protismykových vlastností povrchu vozovky na zkušebním úseku A05 RFB Vídeň, FS1 a FS2, km 25,5 až km 25,0*

Na novém úseku dálnice A05 u Schricku vykazoval již původní povrch CBK s obnaženým kamenivem, po kterém se ještě nejezdilo, velmi vysokou úroveň protismykových vlastností povrchu vozovky µRS ~ 0,78. Broušení na zkušebních úsecích vedlo k dalšímu zvýšení protismykových vlastností na µRS ~ 0,9 [-]. Po zimě došlo k výraznému poklesu na µRS ~ 0,56 v obou pruzích, což odpovídá poklesu ΔµRS ~ 0,35. V dalším průběhu projektu zůstala hladina po celé léto konstantní s mírně vzestupnou tendencí. Místně bezprostředně předcházející úsek s CBK s obnaženým kamenivem od km 25,750 do km 25,550 v pravém jízdním pruhu vykazuje v průběhu projektu podobnou počáteční úroveň µRS ~ 0,81 [-], ale pokles je pouze přibližně ΔµRS ~ 0,1 [-], přestože dopravní zatížení je stejné.

Dálnice A02 Wernberg Rakousko

Zkušební úsek se nachází na dálnici A02 Südautobahn RFB Wien v km 384,4 – 384,0 mezi křižovatkami Wernberg a Velden West. Úsek byl proveden CBK s obnaženým kamenivem. V databázi nástavby ASFINAG je jako rok výstavby uveden rok 2001. Broušení bylo provedeno dne 08.11.2017 na délce 400 m v každém pravém jízdním pruhu. Geometrie použité textury byla definována jako 2,8/2,2 mm (šířka řezného kotouče/rozteč).

| Datum | Měření 1 | Měření 2 | MW µRS [-] |
|---|---|---|---|
| 21.03.2017 před | 0,45 | 0,47 | 0,46 |
| 09.11.2017 Po zbroušení | 0,72 | 0,72 | 0,72 |
| 29.05.2018 | 0,57 | 0,58 | 0,58 |
| 13.09.2018 | 0,57 | - | 0,57 |
| 13.11.2018 | 0,57 | 0,57 | 0,57 |

*Tabulka 9: Měření protismykových vlastností na A02 RFB Vídeň, FS1, km 348,4 – km 348,0*

## Závěr

Ze zahraničních i našich dosavadních zkušeností již víme, že broušení povrchů CBK je technologie, která má při kvalitním provedení, včetně použití vhodného kameniva pro horní vrstvu CBK, velmi dobrou životnost protismykových vlastností povrchu vozovky. Kromě použitých surovin a složení betonu ovlivňuje trvanlivost brouseného povrchu především pevnost betonu v době broušení. Příliš brzké broušení může způsobit trvalé poškození struktury betonu a vést k tomu, že broušení nevede k požadovaným výsledkům.
Na základě zkušebních úseku je obecně doporučeno [6], [7]:

Pro zlepšení protismykových vlastností povrchu vozovky se doporučuje následující uspořádání řezných kotoučů:

- brusné kotouče o tloušťce 3,2 mm s roztečí 2,2 mm nebo

- brusné kotouče o tloušťce 2,8 mm s roztečí 2,2 mm.

Pro snížení valivého hluku se doporučuje následující uspořádání brusných kotoučů:

- brusné kotouče o tloušťce 2,5 mm s roztečí 2,2 mm
- brusné kotouče o tloušťce 2,2 mm s roztečí 1,8 mm

Z hlediska dosažení optimálního snížení hluku je důležitá u broušených povrchů jejich homogennost. Toto je ovlivněno zejména překryvnými broušenými plochami, jak při návrhu broušení, tak i při jeho provádění.

Na všech broušených úsecích, které byly vyhodnocovány, došlo ke zlepšení podélné nerovnosti, zejména mezinárodního indexu nerovnosti IRI. Míra zlepšení je ovlivněna hlavně hloubkou broušení, která je na daném povrchu CBK možná.

Při bližším zkoumání příčin bylo zjištěno, že broušené povrchy vykazují silně anizotropní proudění vody. Zatímco proudění vody v podélném směru je silně zvýhodněno a dochází k němu již při nejmenších tloušťkách vodního filmu, proudění vody v příčném směru vyžaduje překonání hřebene. K významnému transportu vody v příčném směru tedy dochází pouze tehdy, když lokální tloušťka vrstvy vody přesáhne hloubku textury. Pokud průměrná tloušťka vodního filmu klesne pod hloubku textury v důsledku rozšíření odtokové plochy, dochází k transportu vody opět téměř pouze v podélném směru.

## Zdroje

[1] Innovative Grinding/ und Grooving- Oberflächen INGGO, Ein Projekt finanzirt im Rahmen der DE-AT Kooperation Verkehrsinfrastrukturschung 2016, DE-AT 2016, Februar 2019
[2] TP B-StB Teil 3.1.05: Technische Prüfvorschriften für Verkehrsflächenbefestigungen – Betonbauweisen, Teil 3.1.05, Spaltzugfestigkeit von Beton an Zylinderscheiben, Ausgabe 2016, FGSV, Köln
[3] FE 08.0211/2011/OGB: „Akustische Optimierung von Betonoberflächen durch Textu-rierung des Festbetons mit verbesserten Grinding-Verfahren“, Villaret Ingenieurgesell-schaft et. al.
[4] FE 08.0210/2010/ORB
[5] ARS 05/2006: „Allgemeines Rundschreiben Straßenbau Nr. 5/2006 vom 17. Februar 2006 (S 13/7244.4/01, Bundesministerium für Verkehr, Bau- und Stadtentwicklung) zu Richtlinien für den Lärmschutz an Straßen – RLS-90 – Fahrbahnoberflächen-Kor-rekturwerte DStrO für Betone mit Waschbetonoberflächen mit Anlage: Statuspapier Deckschichten aus Waschbeton der Bundesanstalt für Straßenwesen (BASt) vom 03.11.2003.
[6] RVS 13.01.51, „Betondeckenerhaltung“, Österreichischen Forschungsgesellschaft Straße – Schiene – Verkehr, Wien, 2016.
[7] ZTV Beton-StB 07, „Zusätzliche Technische Vertragsbedingungen und Richtlinien für den Bau von Tragschichten mit hydraulischen Bindemitteln und Fahrbahndecken aus Beton“, Köln, 2007
[8] Diagnostický průzkum vozovky, D0 – Revitalizace CBK na SOKP 516 v km 23,2-26,0 P a L – DP+PD, sdružení SQZ, s.r.o., PavEx Cosulting, s.r.o., D7/2020, 15.5.2020



4. blok:

# Další možnosti využití cementobetonových krytů

# Vozovky z válcovaného betonu (RCC) – zkušenosti získané při realizaci pilotních projektů ve vybraných úsecích a výsledky analýzy životního cyklu (LCA)

DI Dr. Martin Peyerl
+43 664 / 88 500 390
Mail: peyerl@smartminerals.at

ass. Prof. DI. Dr. sc. ETHZ Florian Gschösser
+43 664 / 13 51 523
Mail: florian.gschoesser@uibk.ac.at

*DI Sebastian Spaun*
*+43 1 /714 66 81 -0*
*Mail: spaun@zement.at*

## Anotace

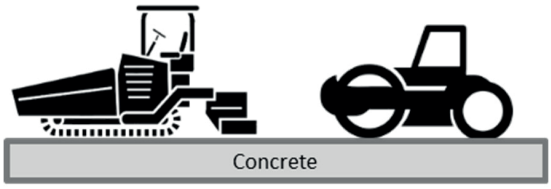
Cílem rakouského stavebnictví je plnit neustále se zvyšující nároky na moderní dopravní komunikace prostřednictvím nových, udržitelných koncepcí. Alternativu ke konvenční technologii výstavby cementobetonových krytů představuje použití válcovaného betonu (RCC). Při provádění této technologie je pokládán speciální zavlhlý beton, který je následně hutněn silničními válci – podobně jako při pokládce asfaltových krytů.

Aby bylo možné tuto technologii vyzkoušet a získat důležitá empirická data, bylo v období let 2019 a 2020 vybudováno několik zkušebních úseků s krytem z válcovaného betonu s různými šířkami, profily a stavebními podmínkami, jako například zatáčkami a sklony. Aby bylo možno prověřit co největší množství aspektů souvisejících s pokládkou betonu a prověřit výsledné vlastnosti krytu, byly použity různé receptury betonu, způsoby zhutňování a druhy konečné úpravy povrchu (hladký povrch, zdrsňování kartáči, úprava povrchu obnažením kameniva).

Tato studie analyzuje výsledky pilotních projektů, při jejichž realizaci byl ve zkušebních úsecích pokládán válcovaný beton, a to s ohledem na příslušný ekonomický a ekologický potenciál s využitím analýzy nákladů po dobu životního cyklu (LCCA) a posouzením životního cyklu (LCA). Výsledky analýzy LCCA / posouzení LCA ukazují pozitivní vliv sníženého obsahu cementu v krytech z válcovaného betonu, který spočívá kromě snížených nákladů po dobu životního cyklu také v nižších dopadech na životní prostředí (potenciál globálního oteplování, potenciál okyselování, souhrnná spotřeba energie z neobnovitelných zdrojů).

## Postup výstavby

Při použití standardních stavebních postupů jsou cementobetonové kryty pokládány pomocí dvou různých finišerů, z nichž jeden slouží k pokládce spodní vrstvy a druhý k pokládce horní vrstvy. Používají se těžké finišery s pevně nastavenou šířkou pokládky. Alternativu ke konvenčnímu cementobetonovému krytu představuje kryt, jehož pokládka se provádí za použití válcovaného betonu. Pro tuto technologii se používá speciální složení zavlhlého betonu, tedy betonu s velmi nízkým obsahem vody. Tento čerstvý beton je možno pokládat pomocí upraveného finišeru, který byl původně určen k pokládce asfaltových vozovek, načež se tato směs hutní pomocí silničního válce – obdobně, jako je tomu při pokládce asfaltových krytů (viz obrázek 1). Tento stavební postup se používá již v několika zemích, kde umožňuje provádění rychlých a nenákladných oprav dopravních komunikací a provozních ploch v průmyslových oblastech, například v Severní Americe, v Polsku a ve Španělsku [1, 2]. Cílem výzkumné práce bylo dosažení optimalizace této technologie, která umožní pokládku krytu z betonu i při výstavbě a opravách sítě silnic nižších tříd, tedy výstavbu odolných betonových vozovek, při níž bude možno využívat místně dostupné suroviny i místně dostupnou strojní technologii.




*Obrázek 1: Pokládka válcovaného betonu*

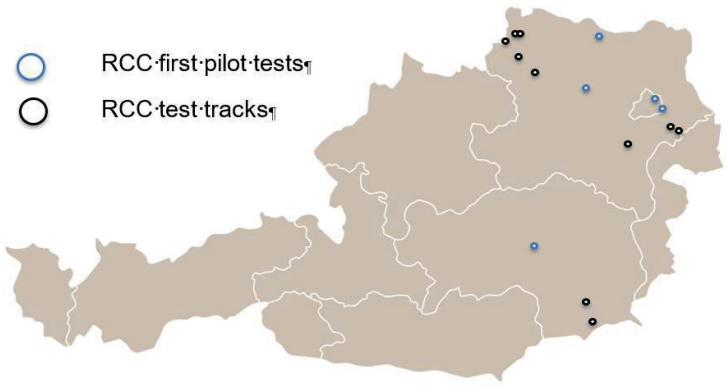
Při výrobě betonu, který je určen pro pokládku RCC, se obvykle používají stejné složky jako při výrobě běžného betonu. Aby bylo možno dosáhnout co nejvyššího stupně zhutnění, musí být výběr jednotlivých složek (kameniva, pojiva a obsahu vody) podobný jako u běžných vrstev stabilizovaných cementem [3]. Dalším důležitým kritériem je stabilita čerstvého betonu. To znamená, že čerstvý beton musí být dostatečně stabilní, aby následně zpracovávaný válcovaný beton neměnil svůj geometrický tvar po položení finišerem s posuvnými bočnicemi. Pokládaný válcovaný beton musí být dostatečně stabilní, aby mohl být dále zhutňován pomocí těžkých silničních válců. Aby bylo možné zajistit tyto vlastnosti, má pokládaný válcovaný beton velmi nízký obsah vody, má tedy nízký vodní součinitel - poměr voda/pojivo. Tabulka 1 uvádí přehled možného složení betonu pro technologii válcovaného betonu.

*Tabulka 1: Typické složení betonu pro technologii válcovaného betonu*

| | |
|---|---|
| Cement | 280 – 300 kg/m³ |
| Písek 0/4 | 880 – 940 kg/m³ |
| Kamenivo 4/8 | 360 – 390 kg/m³ |
| Kamenivo 8/16 | 580 – 630 kg/m³ |
| Obsah vody | 120 – 125 kg/m³ |

## Zkušební úseky

Pro vyzkoušení nové technologie válcovaného betonu a získání důležitých empirických hodnot byly vybudovány různé zkušební úseky v rámci výzkumného projektu. Trasy byly vybrány tak, aby představovaly různé stavební podmínky, jaké se vyskytují v praxi. V důsledku toho bylo možné přesně zmapovat zatáčky, stoupající a klesající úseky i rozdílné šířky pokládky. Obrázek 2 znázorňuje přehled zkušebních úseků, které byly v posledních letech vybudovány v rámci pilotních projektů, týkajících se výstavby vozovek z válcovaného betonu.




*Obrázek 2: Zkušební úseky s krytem z válcovaného betonu, které byly v posledních letech vybudovány v Rakousku v souvislosti s realizací pilotních projektů*

V období od března 2019 do října 2020 bylo ve spolkových zemích Dolní Rakousko a Štýrsko vybudováno několik různých úseků za použití válcovaného betonu, aby bylo možno vyzkoušet novou technologii a shromáždit důležité empirické hodnoty. S cílem ověřit co nejvíce hledisek souvisejících s pokládkou betonu a s výslednými vlastnostmi betonu, byly při výstavbě uvedených úseků použity různé skladby betonu, různé

postupy zhutňování a způsoby konečné povrchové úpravy (hladký povrch, zdrsňování kartáčem a úprava povrchu metodou obnaženého kameniva). Prostřednictvím rozsáhlého monitorování pokládky betonu bylo možné odvodit souvislosti mezi způsobem pokládky betonu a získanými vlastnostmi cementobetonového krytu, včetně výsledných vlastností zajišťujících odolnost. Prostřednictvím realizace zkušebních úseků se podařilo prokázat, že kromě již známé využitelnosti pro průmyslové nebo skladovací plochy je za použití válcovaného betonu levně a snadno proveditelná také výstavba lineárních dopravních ploch. V souvislosti s výstavbou prováděnou za použití válcového betonu je třeba poukázat zejména na skutečnost, že této nové technologii musí být přizpůsobeny jak výroba a přeprava čerstvého betonu, tak i samotné technologické postupy při pokládce betonu, jeho zhutňování a koncepce následné úpravy povrchu, protože jen tak lze vyrobit vysoce kvalitní kryt z válcovaného betonu. Obrázky 3 až 6 znázorňují pokládku válcovaného betonu jako krytu vozovek v různých zkušebních úsecích.



*Obrázek 3: Válcovaný beton v úseku venkovské silnice*



*Obrázek 4: Válcovaný beton v průmyslové oblasti*

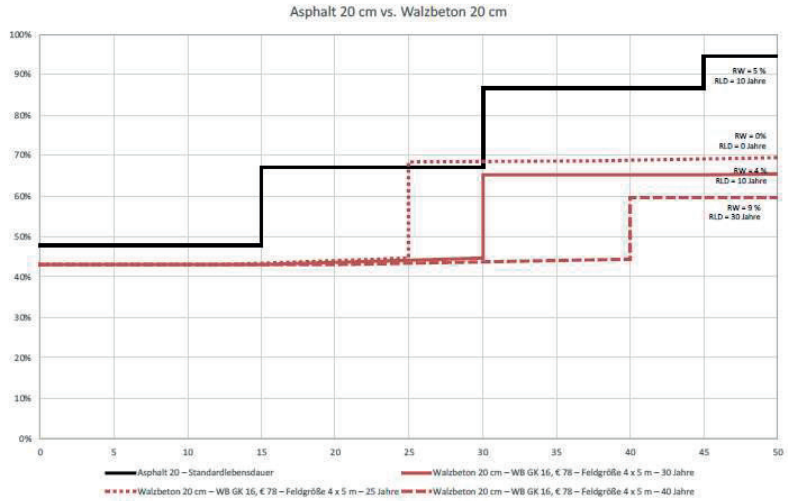


*Obrázek 5: Válcovaný beton na příjezdové cestě ke kamenolomu*

## Výsledky analýzy životního cyklu (LCA)

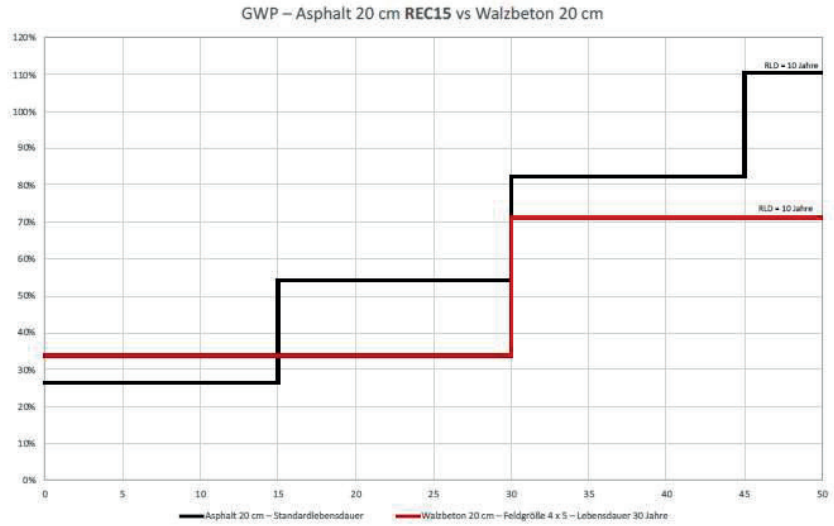
Analýza nákladů po dobu životního cyklu (LCCA), která byla při realizaci projektu použita, je založena na metodě současné hodnoty. Metoda současné hodnoty je dynamická metoda výpočtu výnosnosti investice, která vytváří součet současných (diskontovaných) hodnot všech peněžních toků (vkladů a vyplacených částek) vzniklých během životního cyklu (analyzovaného období) a vztažených k jednotnému bodu v čase

(obvykle k datu vynaložení investice). Jako základ pro tuto analýzu nákladů po dobu životního cyklu byly použity náklady na novou výstavbu získané od prováděcích podniků (včetně odstranění původních konstrukcí) a na opatření spojená s následnou údržbou. Jelikož ještě neexistují spolehlivé empirické hodnoty ceny betonu určeného k pokládce s následným hutněním válcováním, byla odhadnuta cena ve výši 78 € za $m^3$, která byla stanovena s ohledem na významně nižší obsah cementu vůči běžnému betonu používanému při výstavbě silničních komunikací. Obrázek 6 znázorňuje výsledky analýzy nákladů válcovaného betonu po dobu životního cyklu ve srovnání s asfaltovou vozovkou, přičemž celkové časové rozpětí životnosti je zde uvažováno 50 let.




*Obrázek 6: Analýza nákladů po dobu životního cyklu válcovaného betonu, při velikosti pole 4 x 5 m a při různých časových intervalech životnosti, ve srovnání s asfaltovou vozovkou (tloušťka vrstvy činí v obou případech 20 cm).*

Obrázek 7 znázorňuje vliv válcovaného betonu o tloušťce 20 cm na globální potenciál oteplování během standardní doby životnosti, která dosahuje 30 roků, ve srovnání s asfaltovou vozovkou s tloušťkou krytu 20 cm a se standardním časovým rozpětím životnosti 15 roků. Pokud jde o vliv na globální potenciál oteplování, je již z výše uvedeného základního srovnání patrné zřetelné snížení tohoto vlivu u válcovaného betonu vůči asfaltové vozovce (přibližně o 40 % během 50 roků), což je možno přisuzovat sníženému obsahu cementu ve válcovaném betonu.




*Obrázek 7: Vliv válcovaného betonu na globální potenciál oteplování, při velikosti pole 4 x 5 m, ve srovnání s asfaltovou konstrukcí (tloušťka vrstvy činí v obou případech 20 cm).*

Výsledky analýzy životního cyklu (LCA) a analýzy nákladů po dobu životního cyklu (LCCA) názorně dokládají příznivý vliv sníženého obsahu cementu ve válcovaném betonu. Tento příznivý vliv se kromě snížených nákladů projevuje především nižším znečištěním životního prostředí. Kromě možnosti použití na velkých stavbách, má na ekonomické a ekologické výsledky hodnocení této technologie pozitivní vliv i předpokládaná

dlouhá životnost. Právě z těchto důvodů by tato technologie měla být v budoucnu schválena k používání i na státem spravovaných silničních komunikacích.

## Závěr

Jedním z cílů rakouského stavebnictví je pokrýt rostoucí požadavky na moderní dopravní komunikace novými udržitelnými koncepcemi. Konkrétním záměrem je vytváření efektivních silničních komunikací s dlouhou životností při maximálním zachování nákladů a zdrojů. Neustálé zvyšování hustoty silničního provozu, zejména provozu těžkých dopravních prostředků, klade enormní nároky na zatížení našich dopravních tras. Budoucí silniční komunikace musí ještě účinněji plnit hlavní nároky, jakými jsou například dostupnost (zajišťování plynulosti provozu), bezpečnost silničního provozu a úspora paliva a současně přispívat k ochraně životního prostředí a klimatu. Cementobetonové kryty vozovek již v tomto ohledu prokázaly svou přidanou hodnotu na síti silnic vyšších tříd a v oblastech, které jsou vystaveny silnému provoznímu zatížení. Proto sdružení „Nachhaltige Betonstrassen“ („Udržitelné betonové silnice“) v současnosti vyvíjí metody, které umožní efektivní rekonstrukci a modernizaci dopravních ploch, které jsou součástí silniční sítě nižších tříd. Tato činnost se uskutečňuje za účasti partnerů z oblastí výzkumu a průmyslové výroby. Cílem provedeného výzkumu byla další optimalizace stavební technologie válcovaného betonu pro rekonstrukci nebo výstavbu silničních komunikací nižších tříd tak, aby bylo možné stavět odolné betonové vozovky s využitím regionálně dostupných surovin a strojní technologie.

### Zdroje

[1] EUPave Guidline: Roller compacted concrete: making concrete pavements available to the whole pavement building industry, Carlos Jofré 2019

[2] Guide for roller compacted concrete pavements, National Concrete Pavement Technology Center Iowa State University 2010

[3] RVS 08.17.01: Technische Vertragsbedingungen, Betondecken, mit Bindemittel stabilisierte Tragschichten, Österreichische Forschungsgesellschaft Straße Schiene Verkehr, Vídeň 2019

# Roller compacted concrete (RCC) pavements – Experiences made at several pilot tracks and LCA-results

DI Dr. Martin Peyerl
+43 664 / 88 500 390
peyerl@smartminerals.at

assoz. Prof. DI. Dr. sc. ETHZ Florian Gschösser
+43 664 / 13 51 523
florian.gschoesser@uibk.ac.at

*DI Sebastian Spaun*
*+43 1 /714 66 81 -0*
*spaun@zement.at*

## Abstract

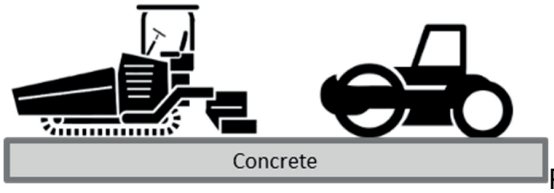
A goal of the Austrian construction industry is to meet the increasing demands on modern transport routes with new, sustainable concepts. An alternative to the conventional concrete pavement construction method is the use of roller compacted concrete (RCC). Hereby, a special earth dry concrete is paved and additionally compacted by rollers - similar to asphalt paving.

In order to test this method and to collect important empirical data, several test tracks with varying widths and different installation situations, such as curves and inclines in RCC construction, were built in 2019 and 2020. To be able to examine as many aspects of concrete paving as well as the resulting concrete properties, the concrete composition, the compaction and the final surface treatment (smoothing, application of broom stroke, exposed aggregate surface) were varied.

This study analyses the performed RCC pavement pilot tracks regarding their economic and environmental potentials, utilizing the Life Cycle Cost Analysis (LCCA) and Life Cycle Assessment (LCA) methodologies. The results of the LCCA/ LCA reflect the positive influence of the reduced cement content in the RCC pavements, which, in addition to reduced life cycle costs, causes lower environmental impacts (Global Warming Potential, Acidification Potential, Non-Renewable Cumulative Energy Demand) compared to match able asphalt pavements.

## Construction Method

With the standard construction method, concrete pavements were built with two different pavers, one for the lower course, the other for the upper course. Hereby, heavy pavers with a fixed paving width for the construction phase are used. An alternative to the conventional concrete pavement is the use of roller compacted concrete. For this method a special earth-moist concrete formulation with very low water content is used. This concrete can be paved with a modified asphalt paver and is compacted afterwards with a roller – similar to the asphalt paving (see picture 1). This construction method has already been used in several countries for the fast and cost-effective fixing of industrial areas, for example in North America, Poland and Spain [1, 2]. The aim of the research work was to optimize this construction method for the making of concrete roads for the low-level road network, so that durable concrete roads can be produced with locally available raw materials and locally available machine technology.



Picture 1: Paving of RCC

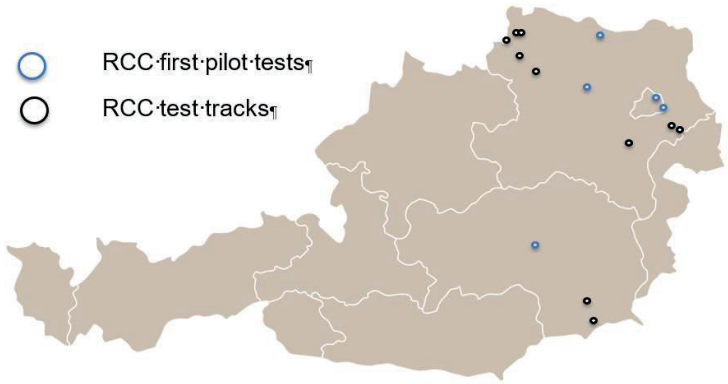
For the production of RCC usually the same concrete constituents as for the production of conventional concrete are used. In order to achieve the highest possible degree of compaction, the selection of the individual components (aggregates and water content) has to be similar to the one of the cement stabilized base layers [3]. Another important criterion is the stability of the fresh concrete. This means that the fresh concrete has to be stable enough that the RCC does not change its geometric shape after moving the slipform paver. RCC has to be stable enough that it could be further compacted with heavy rollers. To achieve this feature, RCC has a very low water content, resulting in a low w/b value. Table 1 shows an overview of a possible concrete composition of RCC.

Table 1: Typical concrete composition of RCC

| | |
|---|---|
| Cement | 280 – 300 kg/m³ |
| Sand 0/4 | 880 – 940 kg/m³ |
| Gravel 4/8 | 360 – 390 kg/m³ |
| Gravel 8/16 | 580 – 630 kg/m³ |
| Water content | 120 – 125 kg/m³ |

## Test Tracks

For testing the new construction of RCC and also for collection of important empirical values within the framework of the research project, different test tracks were built. The routes were selected in order to represent different installation situations occurring in practice. Consequently, curves, gradients and different paving widths could be mapped very well. Picture 2 shows an overview of the RCC pilot tracks built in the recent years.




Picture 2: Realized RCC pilot tracks in Austria in the recent years

From March 2019 to October 2020, different pilot sections were built with roller compacted concrete in Lower Austria and Styria to test the new construction method and collect important empirical values. In order to be able to illuminate as many aspects as possible of concrete placement and the resulting concrete properties, the concrete composition, compaction and final surface treatment (smoothing, application of a broom finish and creation of an exposed aggregate surface) were varied. Through the extensive monitoring of the concrete placement, it was possible to derive connections between the concrete placement and the concrete properties achieved, as well as the resulting resistance properties. The implementation of the test sections has shown that, in addition to the already known applications on industrial or storage areas, linear traffic areas can also be practicably, cheaply and easily produced with RCC. Especially when producing RCC, it should be noted that concrete production and transport, as well as concrete placement, compaction and after-treatment concepts must be adapted to this new construction method, as this is the only way to produce high-quality roller compacted concrete surfaces. Pictures 3 to 6 show the paving of RCC on different test tracks.



Picture 3: RCC on a rural road section



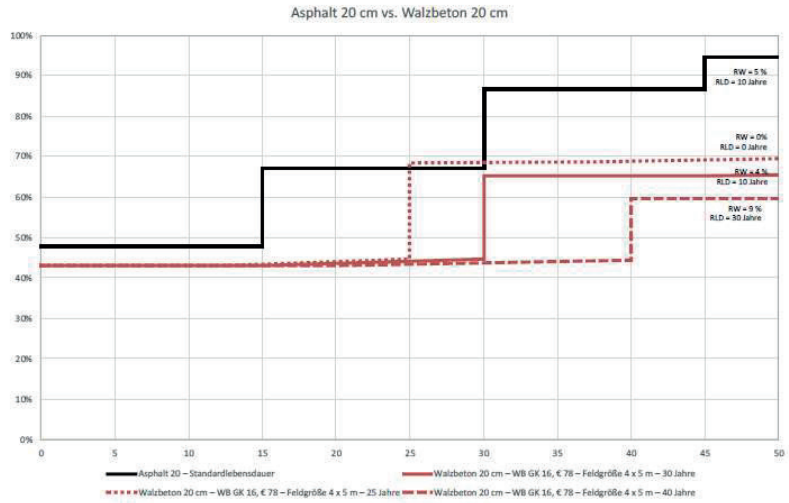
Picture 4: RCC on an industrial area



Picture 5: RCC on an access road to a quarry

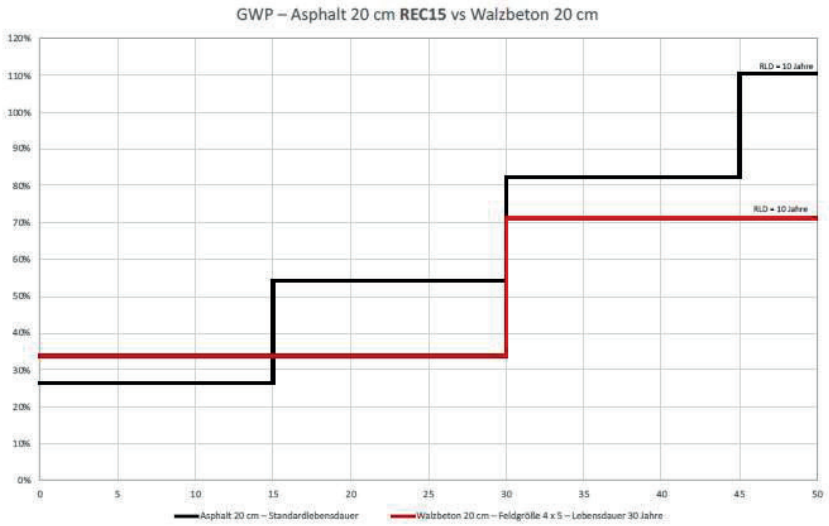
## LCA results

The Life Cycle Cost Analysis (LCCA) which was used in the project is using the present value method. The present value method is a dynamic method of investment calculation, which discounts (present values) all payments (deposits and disbursements) occurring over the life cycle (analysis period) to a uniform point in time (usually the time of investment). As a basis for the LCCA, cost values for the new construction and maintenance measures (deconstruction and new construction) were obtained from the executing companies. Since there are still no reliable empirical values for the concrete price of RCC, the estimated price was € 78 per m³ due to the significantly low cement content compared to conventional concrete used for roads. Picture 6 shows the LCCA of RCC in comparison to an asphalt construction over a live span of 50 years.




Picture 6: LCCA of RCC, with a field side of 4 x 5 m with a varying life span in comparison to asphalt (both 20 cm thick)

Figure 7 shows the global warming potential of a 20 cm thick RCC with a standard life span of 30 years compared to the asphalt pavement with 20 cm thickness and standard life span of 15 years. With regard to the global warming potential, clear reduction potentials for the RCC compared to the asphalt construction can already be seen (approx. 40 % over 50 years), which can be attributed to the reduced cement content in the RCC.




Picture 7: Global warming potential of RCC, with a field side of 4 x 5 m in comparison to asphalt (both 20 cm thick)

The results of the LCCA and LCA demonstrate the positive influence of the reduced cement content in the roller-compacted concrete, which, in addition to reduced costs, above all causes lower environmental pollution. In addition to the large field dimensions, the expected long service life also has a positive influence on the economic and ecological results, which is why this construction method should be authorized for use on state roads in the future.

## Conclusion

One goal of the Austrian construction industry is to cover the increasing demands on modern traffic routes with new, sustainable concepts. The aim is to create efficient and long-lasting traffic routes while preserving costs and resources as much as possible. The increase in road traffic, in particular the constant increase in heavy traffic, places enormous demands on the performance of our traffic routes. Future roads must fulfill central tasks such as availability (reduction of traffic jams), traffic safety and fuel savings even more effectively

and make contributions to environmental and climate protection. Concrete pavements already have proven their added value in this respect in the high-ranking road network and for heavily used traffic areas. Therefore, the research association "Nachhaltige Betonstraßen" ("Sustainable Concrete Roads") is developing methods for the efficient renovation of traffic areas in the low-ranking road network with the participation of research and industrial partners. The aim of the investigation was the further optimization of the RCC construction method for the rehabilitation or construction of roads in the low-level road network in order to be able to produce durable concrete roads with regionally available raw materials and machine technology.

## Source

[1] EUPave Guidline: Roller compacted concrete: making concrete pavements available to the whole pavement building industry, Carlos Jofré 2019

[2] Guide for roller compacted concrete pavements, National Concrete Pavement Technology Center Iowa State University 2010

[3] RVS 08.17.01: Technische Vertragsbedingungen, Betondecken, mit Bindemittel stabilisierte Tragschichten, Österreichische Forschungsgesellschaft Straße Schiene Verkehr, Vienna 2019

# Využití cementobetonového krytu pro stavby nižšího dopravního významu

*Ladislav Vysloužil, David Šindelek, Miroslav Vašina*

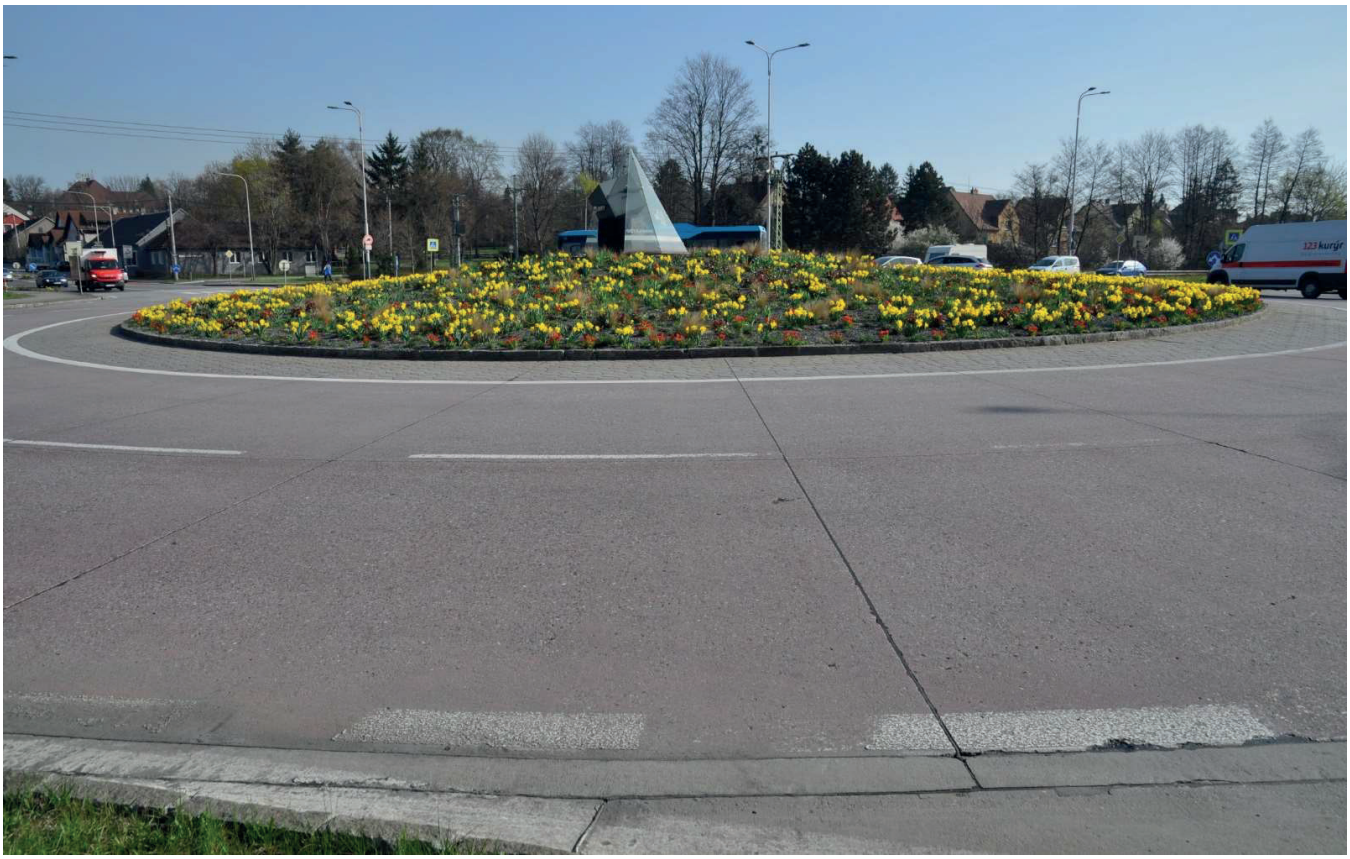
*Skanska, a.s., Křižíkova 682/34a, Karlín, 186 00 Praha 8*

*Tel .: +420 737 257 521*
*E-mail: ladislav.vyslouzil@skanska.cz*

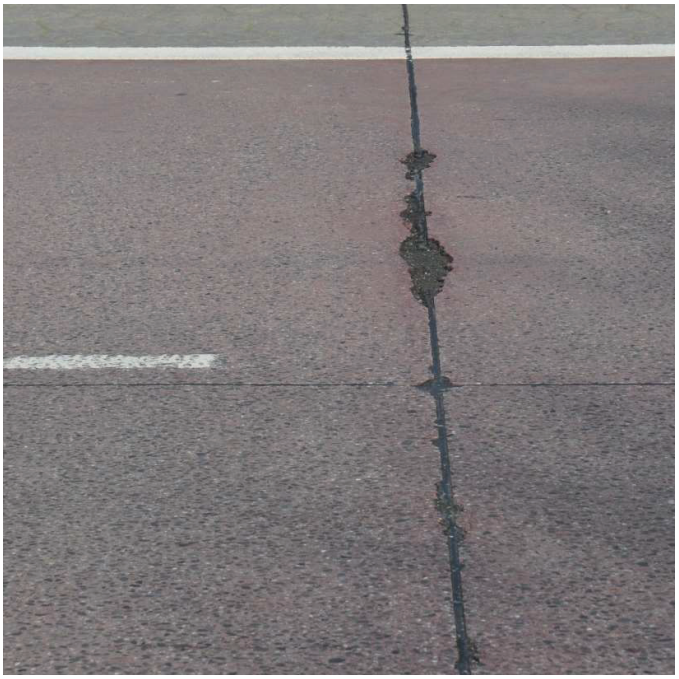
Stěžejní využití cementobetonových krytů je pro dálniční stavby a letiště. Existují ale i jiné aplikace v silničním stavitelství, kde je výhodné ve středoevropských klimatických podmínkách použít CB kryt. Hlavní výhodou je vysoká odolnost proti trvalým deformacím, světlost povrchu, odolnost proti prorůstání vegetace, a především delší životnost. V minulém desetiletí byly úspěšně realizovány skladovací plochy, okružní křižovatky, parkoviště, cyklostezky, zastávky městské hromadné dopravy a jiné dopravní plochy. Tento příspěvek popisuje realizaci vybraných staveb firmy Skanska a.s., až do zhodnocení současného stavu z pozice trvanlivosti.

## Okružní křižovatky

Zhruba před čtvrt stoletím byla zrealizována jedna z prvních okružních křižovatek v ČR. V tomto ohledu jsme předstihli i vyspělejší Německo, kde byla první okružní křižovatka realizována v roce 2007 [2]. Tehdejší živičný stereotyp narušila probarvená okružní křižovatka v Ostravě-Radvanicích, vybudovaná v roce 1998. Současný stav povrchu vykazuje mírně narušenou povrchovou maltu vlivem zatěžování zmrazovacími cykly s chemickými rozmrazovacími látkami. Desky jsou celistvé, jsou zde pouze lokálně poškozené spáry (obrázek 2). Okružní křižovatky jsou vystaveny vysokému smykovému namáhání jízdou v obloucích a brzdným silám na příjezdu k okružní křižovatce [2].



*Obrázek 1: Okružní křižovatka v Ostravě-Radvanicích po 24 letech provozu*



*Obrázek 2: Okružní křižovatka v Ostravě-Radvanicích-nejhorší spára*

## Skladovací plochy

Vzhledem k vyššímu statickému bodovému zatížení skladovacích ploch v posledních letech narůstá počet projektantů a investorů, kteří preferují využití CBK pro tyto plochy (obrázek 3).
Výlučně se jedná o novostavby, kde je předepsána třída CB krytu CB I nebo CB II v tloušťce 200-220 mm. Podkladní vrstvou je nejčastěji směs stmelená cementem pevnostní třídy $C_{8/10}$ v tloušťce 120 mm. V případě vrstvy SC je často využíváno i recyklované kamenivo.




*Obrázek 3: Skladovací plochy firmy DEK a.s.*

## Cyklostezky

Naprosto ideální aplikací pro cementobetonový kryt jsou cyklostezky. Při dodržení technologických postupů během pokládky může povrch cementobetonové cyklostezky dosáhnout životnosti přes 30 let, a to bez výrazných nákladů na údržbu a případnou rekonstrukci. Povrch cyklostezky z cementobetonového krytu lze provádět i v náročnějších podmínkách na členitost a reliéf terénu. Výhodou takto realizovaných cyklostezek je její vysoká životnost, šetrnost k životnímu prostředí a zejména při letních měsících nedochází k přehřívání povrchu vozovky, kterou určitě ocení uživatelé cyklostezky.
V roce 2007 byla realizována cyklostezka v úseku Staré Město-Nedakonice v délce 1600 m. Jednalo se o první betonovou cyklostezku v ČR, která měla stejný povrch jako dálnice. Komunikace je šířky 3 m, vzdálenost řezaných spár je 4 m a jednotlivé desky tl.160 mm jsou kotveny kluznými trny průměru 16 mm, délky 500 mm. V roce 2022 po detailní prohlídce stavu povrchu zde nebyla nalezena jediná porucha! Cyklostezka je rovněž pojížděna zemědělskou technikou a vozidly Povodí Moravy s.p.



*Obrázek 4: První cyklostezka s dálničním povrchem po 15 letech provozu*



*Obrázek 5: Nejčastější poruchy asfaltových cyklostezek*

## Městské komunikace pro pěší

V poslední době se při zadání na realizaci CB krytů setkáváme s požadavkem projektantů na provedení funkčního krytu, ale jsou definovány požadavky na pohledovou kvalitou povrchu. Finální vzhled povrchu betonu je proveden pomocí speciálních kartáčů, jehož výsledná struktura, kterou zanechá v povrchu betonu požadovaný otisk, musí být předem vyzkoušena na zkušebním poli. Jedním z takových projektů byl realizován na Moravském náměstí v Brně (obrázek 6), kde bylo zadání provést cementobetonový kryt pro pěší s povrchovou úpravou z česaného betonu s parametry betonu CB III. Projektovaná tloušťka pochozí komunikace krytu byla 160 mm s plošným vyztužením kari sítí 6/150/150, uložena v horní třetině tloušťky desky. Podkladní vrstvu pod česaný beton tvořil betonový recyklát s minimální únosností $E_{def,2} \geq 50$ MPa.



*Obrázek 6: Finální vzhled kartáčovaného povrchu CBK*

## Tramvajové pásy

Poměrně neobvyklou aplikací s využitím CB krytu byla stavba Modernizace tramvajové trati v Katovicích, kde byly tramvajové pásy betonovány pomocí finišeru s upravenou protlačovací vanou. Nejprve byl finišerem položen podkladní beton a v druhém kroku byla zhotovena vrchní deska se žlábkem pro kolejnici. Při spodním okraji desky byla vložena ocelová svařovaná síť 8/100/100. Beton třídy C30/37 XF4 obsahoval polyetylénová vlákna. Po vytvrdnutí betonu a zatěsnění spár byla provedena rektifikace a podinjektování kolejnic pomocí vícesložkového polyuretanového systému (obrázek 8).



*Obrázek 7: Modernizace tramvajové trati v Katovicích*



*Obrázek 8: Podlévání kolejnic vícesložkovým systémem*

## Zastávky městské hromadné dopravy

Další vhodnou aplikací pro tuhé vozovky jsou autobusové a trolejbusové zastávky. V případě stávajících asfaltových vozovek, lze v mnoha případech pozorovat zvlnění v místě účinku brzdných sil. Betonáž se provádí nejčastěji pomocí vibrační lišty s následným ručním uhlazení povrchu. Betonové desky zastávek bývají vyztuženy ocelovými svařovanými sítěmi vložených k hornímu i dolnímu okraji na distanční podložky tak, aby byla zabezpečena tloušťka krytí. Desky jsou kotveny kluznými trny pro eliminaci schodovitosti. Finální úpravou povrchu je příčná striáž provedena měkkým koštětem.



*Obrázek 9: Výstavba tramvajové zastávky v Brně ulice Královopolská*

## Závěr

Narůstající dopravní zatížení a požadavky na celkovou životnost konstrukce bývají nejčastějším argumentem pro použití tuhého cementobetonového krytu. Pokud se povzneseme nad několika stavbami, kde beton nedosáhl očekávané životnosti, lze tvrdit, že budoucnost především cyklostezek a dalších dopravních ploch zmíněných v tomto článku patří betonu.
Zatím můžeme s povzdechem sledovat nedělní velkou cenu formule 1 a snít o okruhu, který bude mít betonový povrch. Zdá se to jako fikce? Možná čtenáři, který v roce 2040 nalezne v archívu tento příspěvek, vykouzlíme úsměv na rtech 😊.

**Zdroje**

[1] Jan Zajíček a kolektiv: Technologie stavby vozovek 2014 ISBN 978-80-87438-59-6
[2] Martin Langer: Oblasti využití betonových dopravních ploch, konference Betonové vozovky 2020 ISBN 978-80-906541-5-0
[3] Fotodokumentace firmy Skanska a.s.

# Whitetopping a ultra-thin whitetopping v ČR

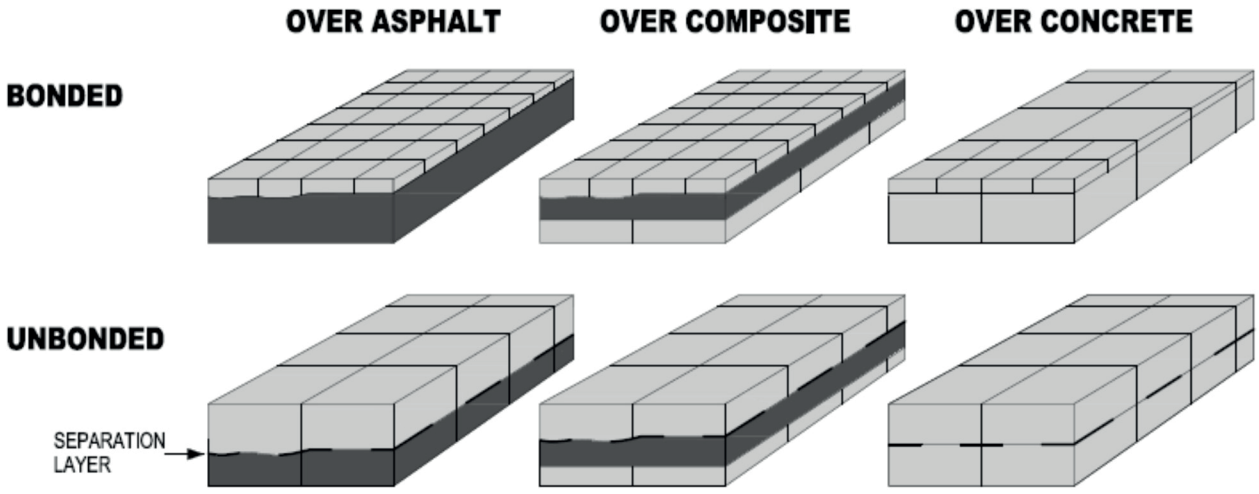
*Ing. Bohuslav Slánský, Ph.D., Ing. Ladislav Vysloužil*
*Skanska a.s.*

*Tel .: +420 737 257 261, +420 737 257 521*
*Mail: bohuslav.slansky@skanska.cz, ladislav.vyslouzil@skanska.cz*

Technologie whitetopping (WT) pro opravy vozovek byla vyvinuta v USA před cca 30 lety a používá se i v západní Evropě již řadu let. Od roku 2018 je vyvíjena SFDI a ŘSD intenzivní aktivita ve směru k realizaci pilotních projektů oprav vozovek touto technologií.
Oprava spočívá v překrytí původní vozovky novou tenkou vrstvou cementobetonového (CB) krytu, která je buďto spojena s pokladem, nebo je spojení záměrně zabráněno. Hlavním cílem je využít z velké části původní konstrukci vozovky, tedy její reziduální únosnost. V případě spojení původní a nové vrstvy vozovky se navíc do určité míry využívá kompozitního chování obou vrstev. Oprava technologií WT má zajistit opravu krytu vozovky zlepšením jeho vlastností, tj. únosnosti, odolnosti proti trvalým deformacím a protismykových vlastností. Tím dochází k úspoře nákladů a času na realizaci a prodloužení životnosti stávající konstrukce vozovky. Technologie opravy WT může být ve většině případů časově i ekonomicky vhodnější než kompletní rekonstrukce vozovky a může zajistit další fungování vozovky bez opakování vzniku trvalých deformací, než např. oprava AB vozovky obnovou krytových vrstev nebo kompletní rekonstrukcí na CB vozovku. V neposlední řadě má tak tato technologie pozitivní vliv na redukci uhlíkové stopy a úsporu nákladů.

## První pilotní realizace whitetoppingu v ČR

Opravy vozovek metodou WT se dělí na dvě základní skupiny, spojené a nespojené s podkladem a mohou být realizovány jak u asfaltových vozovek, tak i betonových a kompozitních - viz Obr. 1. Jako pilotní realizace v České republice byly vybrány dvě dálniční odpočívky a sice plocha pro parkování těžkých nákladních vozidel, kde se využijí výhody tuhé cementobetonové vrstvy na povrchu pro zabránění trvalých deformací od stojících těžkých nákladních vozidel. Pro oba projekty byla zvolena varianta whitetopping spojeného na stávající asfaltovou vozovku. Spojení s podkladní vrstvou bylo navrženo z důvodu eliminace rizika pohybu betonových desek díky brzdným a odstředivým silám od parkujících vozidel.



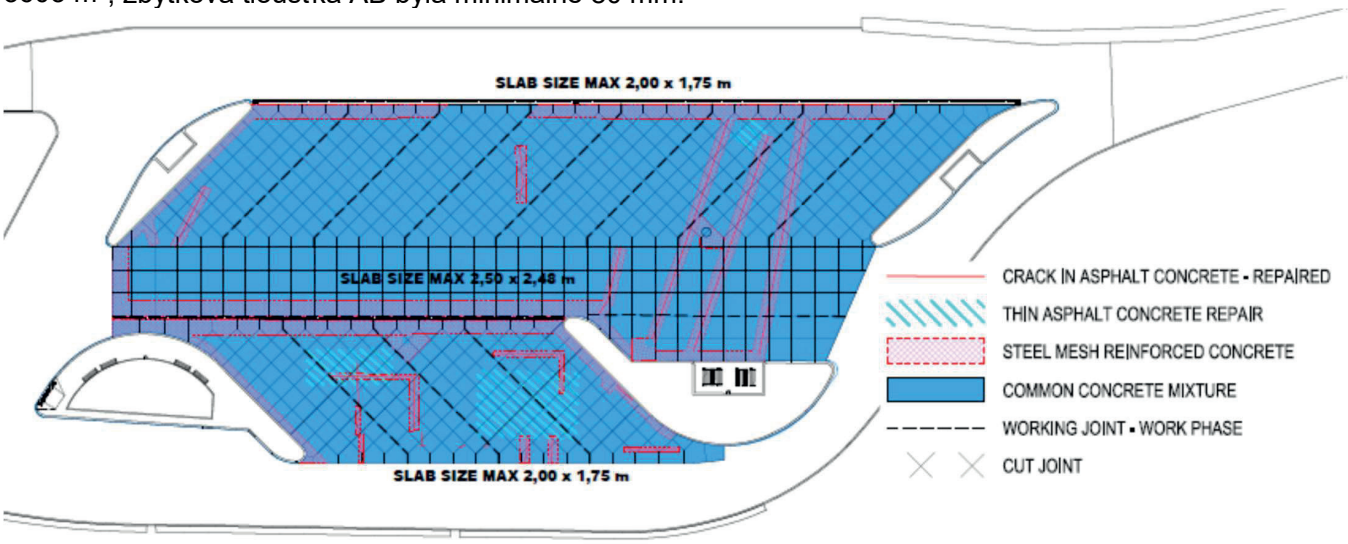

*Obrázek 1: Přehled možných typů a aplikací WT*

Obě odpočívky mají typická šikmá stání pro kamiony a mezi tím pojezdové komunikace. Obě tyto plochy byly navrženy v technologii WT, příjezdové komunikace k odpočívce byly provedeny z asfaltu.

Únosnost vozovky ověřená metodou rázových zatěžovacích zkoušek vykazovala u obou odpočívek vyhovující parametry. Stav povrchu vozovky byl ovšem hodnocen v místech odstavných stání pro kamiony jako havarijní. Poruchy se vyskytovaly zejména v krytové vrstvě a představovaly zejména výtluky, deformace a trhliny, vysprávky, nepravidelné hrboly.

**Dálniční odpočívka Rajhrad na dálnici D52**

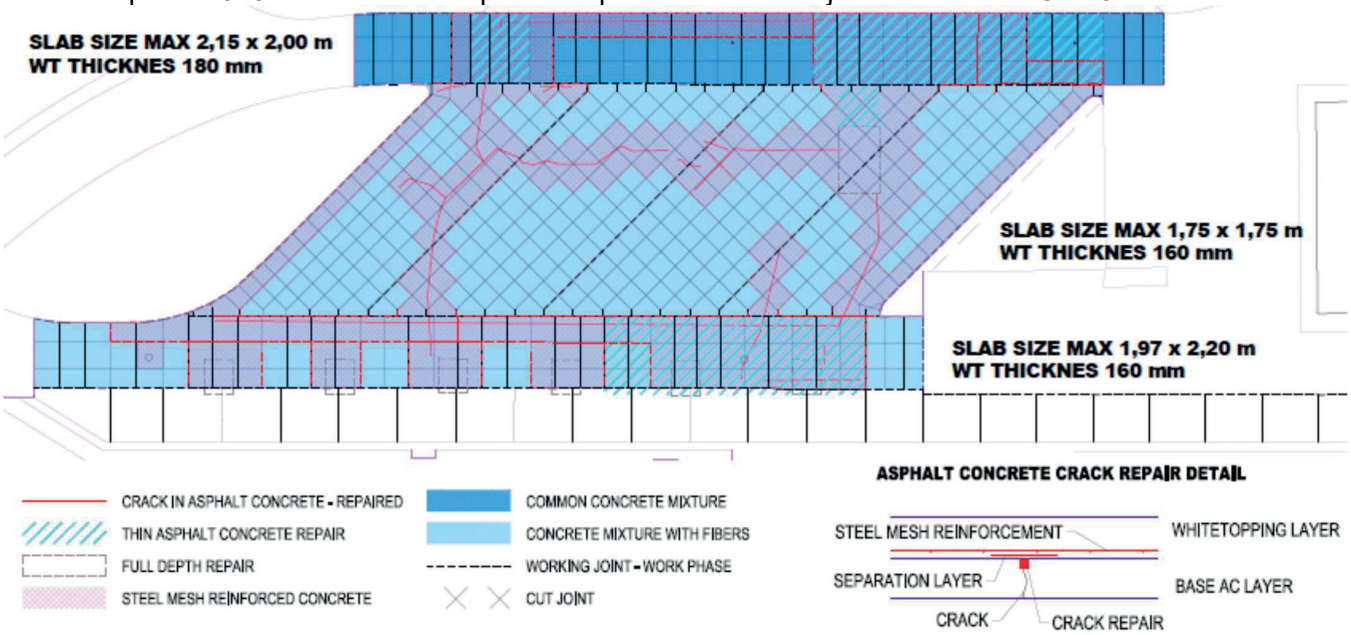
První pilotní stavba byla realizována v roce 2020 technologií spojeného WT na asfaltový podklad (AB) a rozsah a uspořádání parkovacích stání je znázorněn na Obr. 2. Oprava spočívala v odfrézování stávající asfaltové vozovky (AB) v tloušťce 140 mm a její nahrazení vrstvou WT tloušťky 140-150 mm v celkové ploše 3603 m$^2$, zbytková tloušťka AB byla minimálně 80 mm.




*Obrázek 2: Rozsah aplikace WT na odpočívce Rajhrad*

**Dálniční odpočívka Ladná na dálnici D2**

Druhý pilotní projekt byl realizován v roce 2021 obdobně, opět technologií spojeného WT na AB podklad. Odfrézováno bylo 140 mm asfaltové vozovky, na kterou byl proveden WT tloušťky 160 resp. 180 mm v celkové ploše 2010 m$^2$. Rozsah a uspořádání parkovacích stání je znázorněn na Obr. 3.




*Obrázek 3: Rozsah aplikace WT na odpočívce Ladná*

**Posouzení, výpočetní model**

Posouzení návrhu whitetoppingu dle národního předpisu TP170 nebylo možné použít, jelikož výpočet nepočítá se spojením vrstev CB a AB. Posouzení návrhu tloušťky WT bylo provedeno dle metodiky MEYERHOF, tedy výpočtem modulu reakce podloží. Výsledkem posouzení je výpočet maximálního ohybového momentu od kombinace maximálního návrhového zatížení nápravou vozidla, smrštění a vlivu teploty pro daný rozměr desky.

## Výstavba

**Zkušební úsek**
K ověření navržené receptury betonu pro WT byl nejprve proveden zkušební úsek ve vlastní provozovně SKANSKA na staré AB vozovce, která byla odfrézována silniční frézou. Primárně šlo o ověření základních parametrů betonové směsi (pevnost, smrštění, odolnost proti CHRL), která byla navržena ze směsného cementu za účelem zpomalení hydratace a omezení rizika vzniku trhlin v raném stádiu hydratace. Dále bylo na jádrových vývrtech zkoušeno spojení mezi vrstvou CB a původní AB vozovky. Realizovány byly čtyři varianty pro stanovení optimálního ošetření povrchu asfaltové vrstvy pro zajištění dobrého spojení s CB krytem:

A. podklad navlhčený vodou,
B. podklad ošetřený polymerním disperzním spojovacím nátěrem 5 min před betonáží,
C. podklad suchý bez ošetření,
D. podklad ošetřený spojovacím nátěrem 60 min před betonáží.

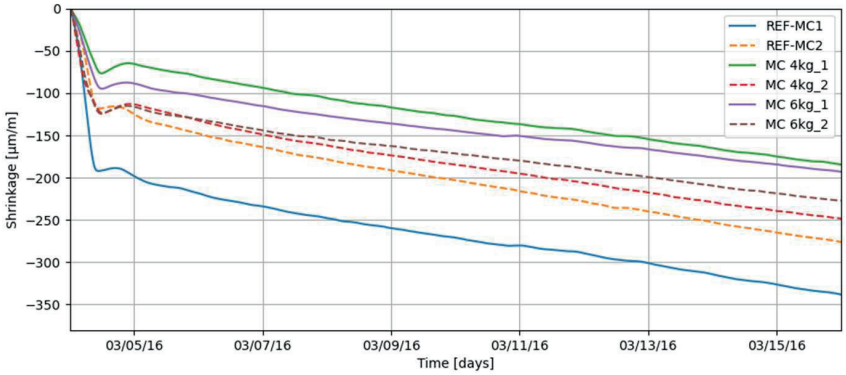
Na vývrtech průměru 100 a 150 mm byly provedeny zkoušky podle ČSN 736160 s výslednými hodnotami 16-35 kN ve smyku u průměru 150 mm, tedy poměrně velkým rozptylem. Nicméně i tak bylo zjištěno, že vliv aplikovaného spojovacího můstku nebyl podstatný. Nejhorších hodnot bylo ale dosaženo u povrchu navlhčeného vodou, což bylo následně promítnuto do postupu realizace vlastního pilotního projektu. Na výsledcích zkoušek provedených na vzorcích ze stavby se však ukázalo, že tento způsob zkoušení spojení podle ČSN 736160 není úplně vhodný, protože k plnému spojení mezi betonovou asfaltovou vrstvou nedochází, jedná se pouze o mechanické „zaklínění“ díky makrotextuře vytvořené při frézování asfaltové vrstvy. Povrch asfaltu je navíc hydrofobní, takže k chemickému spojení betonu s asfaltem prostřednictvím hydratace cementu ani dojít nemůže. Zkoušku spojení vrstvy WT a AB bude nutné v budoucnu lépe definovat, aby postihla princip skutečného chování souvrství u technologie WT.

**Frézování a příprava podkladu**
Frézování má zajistit dostatečnou makrotexturu povrchu AB, aby mohlo dojít k maximálnímu mechanickému spojení s CB, proto byly provedeny dva pojezdy silniční frézou.
Po odfrézování AB vrstev na odpočívce Rajhrad byl povrch kompaktní, měřením byla potvrzena vyhovující únosnost konstrukce. Veškeré trhliny byly uzavřené a pasivní, nebylo je tedy nutné sanovat. Pro omezení jejích kopírování do povrchu WT byly přemostěny ocelovou výztužnou sítí KARI 100/100/10 mm osazenou při spodním povrchu vrstvy WT.
U odpočívky Ladná byla situace zcela odlišná. Povrch byl sice kompaktní, avšak zjištěné poruchy zejména ve formě aktivních příčných i podélných trhlin a síťových trhlin indikovaly problémy s podložím vozovky, což bylo potvrzeno i měřením únosnosti. Bylo tedy nutné přistoupit k návrhu sanací těchto poruch. Naštěstí však byly naměřeny větší tloušťky zbytkových asfaltových vrstev v rozsahu 120-260 mm. Po přepočtu podle výše uvedeného modelu bylo rozhodnuto o zesílení navržených tlouštěk WT o 20 mm, použití betonu s rozptýlenou výztuží a zmenšení vzdáleností spár WT. V místech nad aktivními trhlinami a pracovními spárami byly desky WT vyztuženy výztužnou ocelovou sítí 100/100/8 mm. Přičemž aktivní trhliny byly prořízнuty a zality pružnou zálivkou a pro zabránění kopírování reflexních trhlin byla vložena separace pruhem asfaltového pásu šířky 200 mm.

**Beton pro whitetopping**
Složení bet. směsi bylo provedeno pro CB kryt třídy CB I se zahrnutím specifických požadavků pro WT:

- minimalizace smrštění betonu max. 0,5 mm/m ve 28 dnech, ideálně nižší (viz. Obr. 4)
- směsný cement CEM II/A-S nebo CEM II/B-S, příp. mletá granulovaná struska jako příměs při výrobě betonu v kombinaci s cementem CEM I
- doporučený vodní součinitel $w/c \leq 0,4$
- třída pevnosti v tahu ohybem (ČSN EN 12390-5) F 4,5

Pro odpočívku Ladná byla navíc použita rozptýlená výztuž. Na základě testování různých typů vláken byla finálně použita skelná vlákna délky 36 mm s modulem pružnosti 72 GPa.
Na odpočívce Ladná byl v té době dostupný pouze cement s jemnějším mletím (větší měrný povrch podle Blaina), tedy cement s rychlejším nárůstem pevnosti, což se negativně projevilo při realizaci vznikem smršťovacích trhlin na povrchu na několika deskách WT. To potvrzuje, že v rámci specifikace betonové směsi pro WT je potřeba omezit jemnost mletí cementu na hodnoty kolem 300 $m^2/kg$.




*Obrázek 4: Vliv protismršťovací přísady*

**Pokládka vrstvy whitetoppingu**

Spojovací můstek byl použit jen v omezené ploše, a to pouze pro sledování rozdílů v chování. V okolí kanalizačních šachet a vpustí byly desky vyztuženy šikmými ocelovými výztužnými pruty v rozích. Na důkladně očištěný povrch byla položena betonová vrstva (WT) v šikmých pruzích podle uspořádání stání vozidel menším typem finišeru Bidwell 5000 (viz Obr. 5 – odpočívka Rajhrad a Obr. 6 – odpočívka Ladná). Pokládka byla prováděna nejprve v lichých pruzích šířky cca 10 m do podélného ocelového bednění a poté v sudých pruzích mezi již hotové konstrukce. Povrch betonu byl ošetřen kartáčováním pro vytvoření dobrých protismykových vlastností a na závěr opatřen nástřikem proti odparu.




*Obrázek 5: Pokládka vrstvy Whitetoppingu finišerem – Rajhrad*



*Obrázek 6: Pokládka vrstvy Whitetoppingu finišerem – Ladná*

K řezání spár bylo přistoupeno přibližně po 20 hodinách od pokládky do hloubky 1/2 tloušťky desky. Spáry nebyly vyztužovány kluznými trny. Následně byly spáry v horní části rozšířeny do tvaru komůrky a vyplněny pružnou zálivkou za studena. Hotová vrstva WT s prořezanými spárami je na Obr. 7 - odpočívka Rajhrad a Obr. 8 - odpočívka Ladná.



*Obrázek 7: Úsek zhotovený technologií Whitetoppingu – Rajhrad*



*Obrázek 8: Úsek zhotovený technologií Whitetoppingu – Ladná*

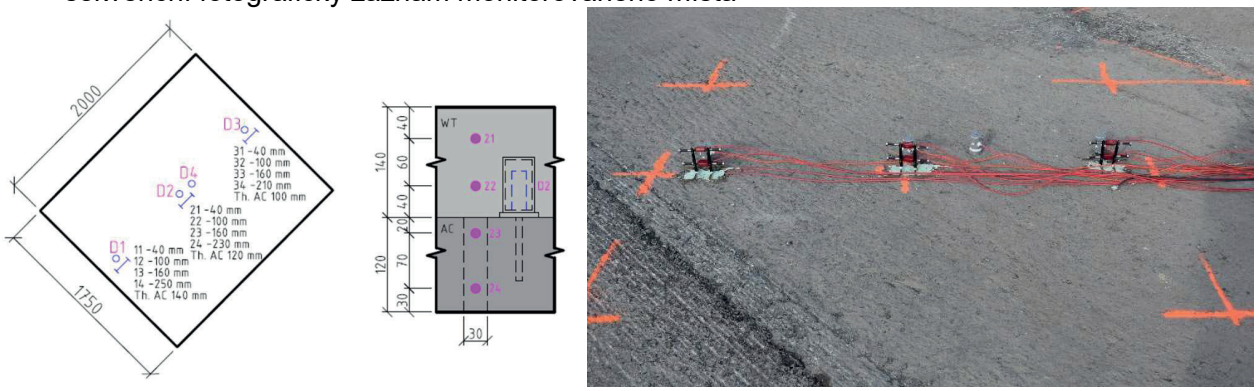
Uspořádání spár u šikmých stání znamená vytvoření atypických tvarů desek, tzv. biskupských čepic, na styku s kolmo uspořádanými pojezdovými komunikacemi, aby nevznikaly ostré rohy – viz Obr. 2 a 3. U některých koncových detailů se však nebylo možné nestandardním tvarům desek vyhnout, ty byly však vyztuženy ocelovou sítí.

## Monitoring

Součástí obou staveb bylo zřízení měřícího a sledovacího zařízení pro monitoring během realizace stavby a 3 roky po realizaci. Zařízení je osazeno ve vybrané desce WT ve třech místech (2x na okraji, 1x uprostřed) a vždy ve čtyřech úrovních (2x ve WT, 2x v asfaltové vrstvě) – viz Obr. 9 a 10.
Sledovány jsou parametry, které slouží k ověření chování konstrukce v průběhu výstavby a za provozu, hodnoty jsou odečítány v intervalu 10 min:

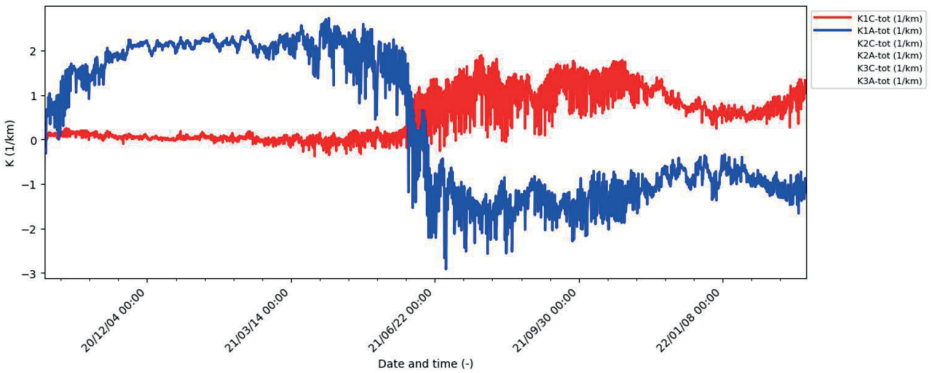
- deformace v hotové konstrukci pomocí strunových tenzometrů
- separace mezi betonovou a asfaltovou vrstvou s použitím indukčních snímačů
- průběhu teplot v hotové konstrukci v místě každého strunového tenzometru

- průběhu teploty vzduchu ve standardní výšce 2 m
- průběhu intenzity slunečního osvitu
- sekvenční fotografický záznam monitorovaného místa

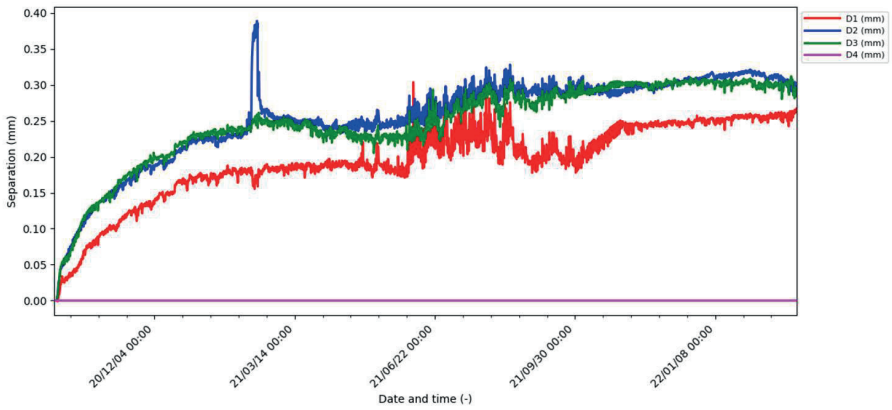



*Obrázek 9 a 10: Schématické znázornění monitoringu a osazení snímačů před betonáží*

Do současné doby ukázal monitoring dobré chování vrstvy s tím, že naměřené deformace a z nich vypočtená napětí nepřekračují dovolené namáhání. Měření křivostí na Obr. 11 potvrzuje, že k plnému spřažení vrstvy WT s asfaltovou vrstvou nikdy nedošlo. Měření separace na Obr. 12 potvrdilo, že dochází k postupnému rozevírání vodorovné spáry a po 16 měsících se hodnota ustálila na cca 0,25-0,30 mm. Makrotextura vytvořená frézou na asfaltové vrstvě zajišťuje mechanické „zaklínění“ obou vrstev a brání tak vzájemnému posunu, obě vrstvy však nefungují jako spřažený heterogenní průřez pro ohyb.
Kromě uvedených měření se ještě jednou ročně provádí celoplošná kontrola spojení vrstvy WT s podkladem metodou impact echo.




*Obrázek 11: Celková křivost na betonové a asfaltové vrstvě*




*Obrázek 12: Průběh separace betonové a asfaltové vrstvy na 3 místech během 16 měsíců*

Na základě výsledků monitoringu, který stále probíhá, pak budou zhodnoceny a případně upraveny projektové předpoklady a kalibrovány výpočtové modely. Závěry mohou také posloužit jako podklad pro vypracování samostatného předpisu pro opravy vozovek technologií whitetopping.

## Ultra thin-whitetopping

Skanska a.s. realizovala v srpnu 2022 na projektu „Oprava nádvoří Ústavu hematologie a krevní transfúze v Praze“ (ÚHKT) ultratenký whitetopping (UTW). Podle rešerší se jedná o první UTW v České republice. Podkladem byl 22 let starý beton s povrchem, který byl degradován vlivem zmrazovacích cyklů. Nová deska měla mít tloušťku 60 mm s řezanými spárami ve vzdálenostech 800-900 mm jako spojená s podkladem.



*Obrázek 13: Plocha nádvoří ÚHKT před realizací*

Ve fázi přípravy byla navržena a ověřena receptura betonu s důrazem na dobrou odolnost vůči CHRL a pevnosti v tahu. Výsledný beton byl třídy C 50/60 XF4, $D_{max}$8mm, který obsahoval CEM II/A-M (S-LL) 42,5R, dvě frakce kameniva, nanofiler, superplastifikační přísadu, provzdušňovací přísadu a rozptýlenou výztuž. Z důvodu nemožnosti vjetí autodomíchávače do areálu bylo nutné zřídit překladové místo betonu a receptura betonu byla navržena na prodlouženou dobu zpracovatelnosti na 180 min.
Vzhledem k charakteru projektu, který byl realizován jako sponzorský dar, byly minimalizovány náklady na diagnostiku podkladních vrstev a vzhledem k absenci poruch se předpokládalo, že podkladní vrstvy byly dohutněny provozem. Povrch stávajícího betonu byl nejprve očištěn od volných nečistot. Těsně před pokládkou byla vysokotlakým čističem navlhčena plocha (bez louží), kde byl rozprostřen beton. Záměrem bylo provedení spojeného whitetoppingu s podkladním betonem, avšak na základě poznatků z předchozích pilotních projektů a jejich monitoringu nebylo bazírováno na dokonalém spojení s podkladem. Bylo v zásadě využito hrubé makrostruktury podkladního betonu, který zajišťoval budoucí horizontální stabilitu finální vrstvy (viz Obr. 14).



*Obrázek 14: Tenká betonová deska těsně po betonáži a makrotextura stávajícího betonu*

Beton byl ukládán do bednění, které tvořily ocelové úhelníky, popř. stávající obrubníky. Po zhutnění betonu vibračním hladítkem byl povrch urovnán plastovým hladítkem a byla vytvořena striáž pomocí měkkého koštěte. Pro zajištění správné hydratace byl povrch opatřen parotěsným nástřikem ve zvýšeném dávkování. Další technologickou komplikací byla nemožnost řezání spár v době nočního klidu mezi 22-06 hod. Z toho důvodu bylo složení betonu nastaveno tak, aby za dané teploty bylo možné spáry nařezat hned po betonáži ten samý den, přičemž poslední pokládka musela proběhnout před 13.hodinou. Příčné spáry byly řezány ruční řezačkou, dlouhé podélné spáry byly řezány pro lepší dosažení pohledové linky řezačkou s pojezdem. Tenké spáry byly zatěsněny jednosložkovým polyuretanovým tmelem pro dosažení delší životnosti. Pohled na hotovou plochu zhotovenou technologií ultra-thin whitetopping je na Obr. 15.



*Obrázek 15: Tenká betonová deska těsně po betonáži*

## Závěr

Realizace pilotních projektů opravy parkovacích stání dálničních odpočívek metodou WT na AB podklad jsou prvními opravami realizovanými touto metodou na území ČR. Jako klíčová se ukázala důkladná diagnostika stávající vozovky před vlastním návrhem a následná kontrola a odstranění poruch zjištěných po odfrézování vozovky. Díky monitoringu bylo ověřeno chování celého souvrství a změřena separace vrstev, které ohybově prakticky nespolupůsobí.

Technologie WT na AB podkladě může být efektivní metodou opravy stávajících zatížených vozovek, které jsou v dobrém stavu z hlediska únosnosti vozovkového souvrství a je u nich žádoucí odstranit dlouhodobě opakovaný vznik povrchových poruch způsobených pomalu se pohybující dopravou, tj. trvalé deformace, případně rozpad povrchu krytu vozovky. Technologie whitetopping je také příznivější k životnímu prostředí a je i ekonomičtějším řešením díky tomu, že se ponechává maximum materiálů z původní vozovky a využívá se jejich reziduální únosnosti. Tím se omezuje spotřeba nových materiálů a jejich doprava. U uvedených projektů činí předpokládané snížení stopy $CO_2$ oproti kompletní výměně vozovkového souvrství za CB kryt cca 40 %. Nákladová úspora se pohybuje ve stejné úrovni, tedy opět 40 %.

Technologie ultra-thin whitetopping může být velmi efektivní technologií oprav betonových ploch a vozovek. Realizace proběhla v srpnu 2022 a plocha bude v dalším období sledována a finální vyhodnocení úspěšnosti této technologie bude provedeno cca po 1 roce provozu.

### Zdroje

[1] Hela, R. a kol. - Technologické podklady pro opravy asfaltových nebo betonových vozovek technologií WHITETOPPING, Závěrečná zpráva, VUT Brno, 09/2018

[2] Guide to Concrete Overlays, Sustainable Solutions for Resurfacing and Rehabilitating Existing Pavements, TB 021–03P, ACPA 2014, USA, third edition

[3] Šmilauer, V., Slánský, B. – Projekt monitoringu – Osazení monitoringu pro Whitetopping na odpočívce D52 km 10,5 Rajhrad L, 2020

[4] Slánský, B., Bijok, P., Vysloužil, L. - Whitetopping v ČR, Betonové vozovky Praha 2020

[5] Slánský, B., Vysloužil, L., Bijok, P., Šmilauer, V., Hela, R. – The first whitetopping in the Czech Republic – National report of The Czech Republic, Structural concrete in the Czech Republic, 6th FIB Congress, Oslo, 2022

# White Topping – nová rakouská směrnice pro dimenzování a pokládku vrstvy White Topping

*DI Dr. Martin Peyerl*
*+43 664 / 885 00 390*
Mail: *peyerl@smartminerals.at*

*Ass. Prof. DI Dr. Lukas Eberhardsteiner*
*+43 650 / 877 96 96*
*Mail: lukas.eberhardsteiner@tuwien.ac.at*

*DI Sebastian Spaun*
*+43 1 /714 66 81 -0*
*Mail: spaun@zement.at*

## Anotace

Zejména v případě silnic nižších tříd jsou některé úseky vozovek vystaveny účinkům vysokého zatížení těžkými dopravními prostředky, které se v hustém provozu pohybují velmi pomalu. Technologie White Topping představuje pro úseky vozovek se stávajícím asfaltovým krytem snadno realizovatelné a dlouhodobě účinné řešení jejich oprav, rekonstrukce a modernizace. Při použití této technologie se na asfaltovou vozovku, která byla předem upravena frézováním, pokládá betonová vrstva, která má menší tloušťku než běžně používaný cementobetonový kryt. Touto technologií jsou také trvale opraveny vyjeté koleje a jiné deformace.

Aby byly získány podrobnější informace týkající se použití technologie White Topping v Rakousku, byl v rámci silniční sítě spolkové země Dolní Rakousko vybudován zkušební úsek pro ověření nových technologií a získání základních údajů, nutných pro dimenzování.

Díky realizaci tohoto zkušebního úseku se prokázalo, že při modernizaci a opravách asfaltových komunikací, které jsou vystaveny silnému provoznímu zatížení, může být technologie White Topping snadno aplikována i v případě větších ploch, na nichž se pokládka betonu provádí pomocí finišerů. Provedené zkoušky kromě toho prokázaly, že pokládání čerstvého betonu speciálního složení, které je přizpůsobeno pro silnice nižších tříd a pro větší tloušťky cementobetonového krytu, může být z hlediska nákladů hospodárné, což je dáno tím, že již není nezbytné vytvářet podélnou spáru ve středu jízdního pruhu. V současnosti je již k dispozici katalog dimenzování, který umožňuje snadné a rychlé stanovení potřebných tlouštěk vrstev.

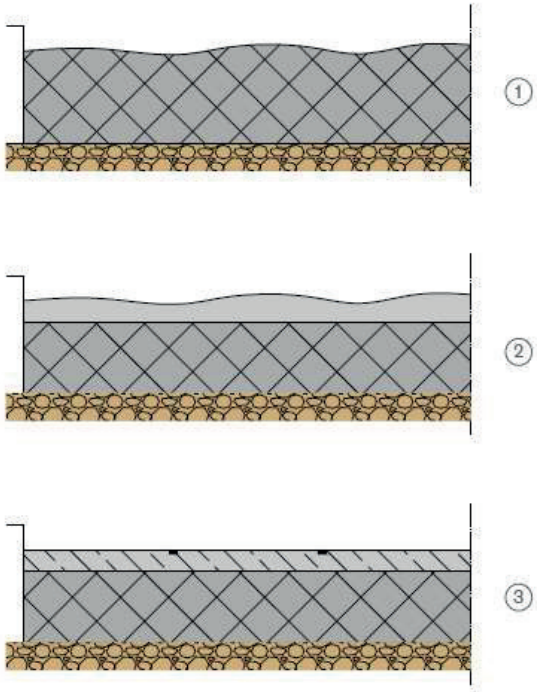
## Konstrukční metoda White Topping

Moderní dopravní trasy by měly být budovány s co nejšetrnějším využíváním dostupných zdrojů materiálů a zároveň takovým způsobem, aby byly dlouhodobě dobře využitelné. Zejména v případě silnic nižších tříd jsou některé úseky vozovek vystaveny účinkům vysokého zatížení způsobeného těžkými dopravními prostředky, které se v hustém provozu pohybují velmi pomalu. Technologie White Topping představuje snadno realizovatelné a dlouhodobě účinné řešení oprav, rekonstrukce a modernizace takových úseků. Při použití tohoto postupu se na asfaltovou vozovku pokládá betonová vrstva, která má výrazně menší tloušťku ve srovnání s běžně používaným cementobetonovým krytem. Asfaltová vozovka je předem upravena frézováním, to znamená, že jsou takto také trvale opraveny vyjeté koleje a deformace.

Výhodou technologie White Topping je to, že může být nadále využita velká část stávající konstrukce vozovky, protože se nahrazuje pouze její krytová vrstva. Místo původní vrstvy krytu se přitom pokládá tuhý, odolný a trvanlivý cemenbetonový kryt. Díky tomu lze tuto technologii používat k rekonstrukci a modernizaci silničních úseků při mnohem nižších nákladech a s nižšími nároky na množství potřebného materiálu než při nové výstavbě.

Technologie White Topping tedy umožňuje, aby stávající konstrukce vozovky byla použita jako poklad pro nový, tenký cementobetonový kryt. V závislosti na tloušťce tohoto cementobetonového krytu se pak rozlišuje běžná technologie White Topping s tloušťkou vrstvy vetší než 20 cm, tenkovrstvá technologie White Topping s tloušťkou vrstvy v rozsahu od 10 do 20 cm a ultra tenkovrstvá technologie White Topping s tloušťkou vrstvy menší než 10 cm [1]. Pro tenkovrstvou a ultra tenkovrstvou technologii White Topping je přitom nezbytné dobré spojení mezi novým krytem a stávajícím asfaltovým podkladem.

*Obrázek 1 znázorňuje základní kroky pracovního postupu při opravě asfaltové vozovky za použití technologie White Topping. Ze stávajícího asfaltového jízdního pruhu (1) se frézováním (2) odstraňuje část staré asfaltové vrstvy a v následném kroku (3) se pokládá vrstva White Topping, která se spojí s původní asfaltovou vrstvou.*




*Obrázek 1: Použití technologie White Topping*

Po počátečních zkušebních aplikacích, které probíhaly v USA, byla technologie White Topping vyzkoušena také v Rakousku. Poprvé se tak stalo v roce 1997 a to na stavebním dvoře společnosti Pittel & Brausewetter [2]. Třebaže byly realizovány i další zkušební úseky, k rozsáhlejšímu využití této technologie dosud nedošlo.

Může tomu tak být také v důsledku skutečnosti, že využití technologie White Topping je obtížné, protože v Rakousku jsou v současné době k dispozici pouze nedostatečné specifikace týkající se požadavků na tuto konstrukci, např. požadavků na tloušťky vrstev ve vztahu k dopravnímu zatížení. Předpis RVS 08.17.04 „Joints in concrete road surfaces“ [3] obsahuje v souvislosti s technologií White Topping pouze přibližná pravidla pro maximální vzdálenosti spár ve vztahu k tloušťce cementobetonového krytu vozovky. Z tohoto předpisu tedy nelze získat žádné informace týkající se přípustného dopravního zatížení nebo požadované zbytkové únosnosti stávajícího asfaltového podkladu.

## Zkušební úsek

V rámci silniční sítě spolkové země Dolní Rakousko byl vybudován zkušební úsek s cílem získat podrobné informace pro budoucí využití technologie White Topping v Rakousku, zejména získat informace pro projektanty, konstruktéry ve stavebnictví a stavební podniky. Ve spolupráci s odborem ST4 „State road construction and administration of the Lower Austrian provincial government“ („Výstavba a správa státních silnic dolnorakouské zemské vlády“) byl pro tento účel využit silniční úsek o délce přibližně 150 metrů nedaleko města Kremže. Protože se tento úsek nachází v blízkosti štěrkovny, je zde splněna podmínka pro jeho trvalé vysoké dopravní zatížení.

Při realizaci tohoto zkušebního úseku bylo možno změnit některé parametry a nainstalovat snímače do betonového povrchu, jejichž prostřednictvím je možno shromažďovat cenné empirické hodnoty a naměřené údaje, které jsou potřebné pro provádění analýz konstrukční metody White Topping.

V uvedeném zkušebním úseku byly pozměněny následující parametry:

- Velikost desky (poloviční šířka jízdního pruhu: 1,5 m × 1,5 m nebo plná šířka jízdního pruhu: 3,0 m × 3,0 m)
- Spojení s asfaltovým podkladem (se spojovací vrstvou tvořenou geosyntetickým materiálem vloženým mezi nový cementobetonový kryt a stávající podkladní asfaltovou vrstvu)
- Pokládka čerstvého betonu různého složení

Aby bylo možno posoudit únosnost nové konstrukce White Topping, bylo provedeno posouzení stavu stávající asfaltové konstrukce. Kromě vizuálního posouzení byly odebrány jádrové vývrty pro zjištění celkové tloušťky asfaltové vozovky a provedení laboratorních zkoušek tuhosti asfaltové vozovky. Další měření únosnosti bylo provedeno za použití rázového zatěžovacího zařízení (deflektometru typu FWD).

Z hlediska vizuálního hodnocení byly hlavními poruchami vyjeté koleje v obou směrech. Průměrná hloubka těchto vyjetých kolejí činila 16 mm ve směru k obci Stratzdorf a 9 mm ve směru k obci Rohrendorf. Zjištěny byly také občas se vyskytující jednotlivé trhliny. Únosnost byla měřena zkouškami rázovým zatěžovacím zařízením (deflektometrem typu FWD), přičemž měření bylo provedeno nejméně v osmi měřicích bodech v každém směru. Ve zkoušeném úseku bylo zjištěno rovnoměrné rozložení únosnosti.

## Konstrukce zkušebního úseku

Prvním krokem realizovaného postupu bylo navržení složení betonu a jeho vyzkoušení. V rámci laboratorních zkoušek byly navrženy tři rozdílné receptury betonu, které byly určeny k použití na zkušebním úseku a jejichž vhodnost byla předem odzkoušena. Tyto zkoušky prokázaly, že navržený beton i přes odchylky splňuje základní požadavky na životnost, které jsou definovány ve směrnici RVS 08.17.02 [4].

Souhrnné údaje o třech recepturách, které byly použity k výrobě betonu pro pokládku krytu vozovky technologií White Topping, jsou uvedeny v následující Tabulce 1. Receptura 1 je běžná receptura s maximálním zrnem kameniva 8 mm určená pro betonové vozovky, vhodná pro povrchovou úpravu technologií obnaženého kameniva. Receptury 2 a 3 jsou receptury s maximálním zrnem kameniva 22 mm určené pro běžné cementobetonové kryty. Také při použití těchto dvou variant receptur betonu byla pro úpravu povrchu použita technologie obnaženého kameniva. Do receptury 3 byla přidána polypropylenová vlákna pro snížení rizika vzniku trhlin.

*Tabulka 1: Složení různých variant receptur betonu*

| **Receptura** | **1** | **2** | **3** |
|---|---|---|---|
| Typ betonu podle RVS 08.17.02 | OB GK8 | OB GK22 | OB GK22 s obsahem vláken |
| CEM II/B-S 42,5N DZ | 430 | 400 | 399 |
| voda | 162 | 151 | 147 |
| Písek 0/2 | 560 | | |
| Písek 0/4 | | 700 | 700 |
| Kamenivo 4/8 | 1198 | | |
| Kamenivo 8/22 | | 1125 | 1125 |
| Vlákna | | | 3 |
| Obsah vzduchu | 4,0-6,0 | | |
| Vodní součinitel (voda/cement) | 0,38 | 0,38 | 0,37 |
| Objemová hmotnost | 2350 | 2380 | 2380 |

Prvním krokem bylo zfrézování a očištění asfaltového povrchu (Obrázek 2). Beton byl pokládán pomocí běžného finišeru na vyfrézovaný a očištěný asfaltový povrch, a to ve vrstvě o tloušťce 12 cm (Obrázek 3).



*Obrázek 2: Frézování asfaltové vrstvy*



*Obrázek 3: Pokládka betonu*

Během pokládky byly průběžně odebírány vzorky za účelem zjišťování vlastností ztvrdlého betonu. Tím bylo zajištěno, že beton splňuje předepsané požadavky na pevnost a odolnost, zejména pak odolnost proti mrazu a působení rozmrazovacích prostředků. Tabulka 2 uvádí přehled zjištěných hodnot pevnosti.

*Tabulka 2: Zjištěné hodnoty pevnosti*

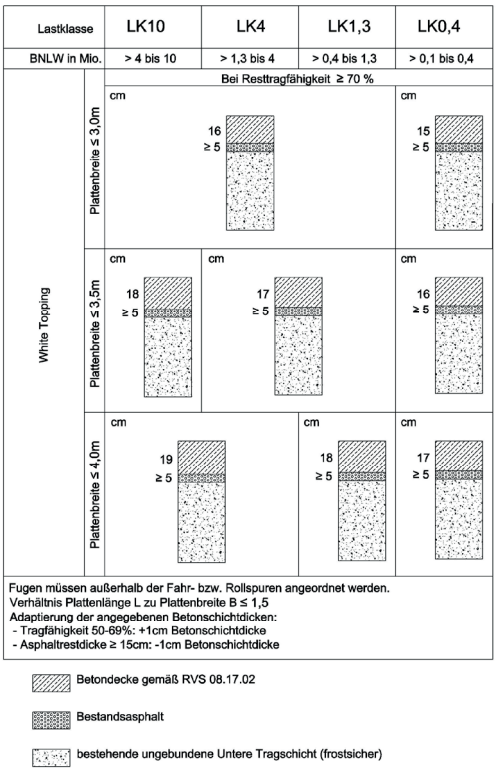
| | Pevnost v příčném tahu zjištěná laboratorními zkouškami (N/mm²) | Hodnota předepsaná pro průkazní zkoušky (N/mm²) | Pevnost v příčném tahu, zjištěná na jádrových vývrtech ze zkušebního úseku (N/mm²) | Požadovaná hodnota při kontrolní zkoušce (N/mm²) |
|---|---|---|---|---|
| OB GK 8 | 4,8 | ≥ 4,4 | 5 | ≥ 3,2 |
| OB GK 22 | 4,2 | | 4,5 | |
| OB GK 22 s obsahem vláken | 4,2 | | 4,9 | |

Z výsledků zkoušek, které byly provedeny jak v laboratorních, tak i v terénních podmínkách, je patrné, že beton „OB GK 8“ má mírně vyšší pevnost v příčném tahu než beton s největším maximálním zrnem, tedy než beton „OB GK 22“. Tuto skutečnost lze vysvětlit vyšším obsahem cementu v betonu „OB GK 8“. Při zkouškách prováděných v laboratorních podmínkách nevykazují vlákna žádný vliv na pevnost v příčném tahu.

Kromě zkoušek mechanických vlastností byly provedeny také zkoušky odolnosti proti mrazovým cyklům a působení rozmrazovací soli (XF4), které probíhalo formou ověřování požadovaných hodnot obsahu vzduchových pórů podle stupně vlivu okolního prostředí XF4 a za použití deskové zkušební metody pro zkoušení porušování povrchu betonu urychlovaným účinkem rozmrazovací soli [5]. Všechny receptury splňovaly stanovené požadavky. Pouze u směsi „OB GK 22 s obsahem vláken“ bylo zjištěno zjevné zvýšení obsahu vzduchových pórů.

## Dimenzování

Na základě výsledků laboratorních zkoušek byl vypracován návrhový katalog pro dimenzování konstrukcí White Topping vycházející z předpisu RVS 03.08.63 [6]. Údaje v katalogu vycházejí z určení dopravního zatížení, které je vyjádřeno počtem změn standardního konstrukčního zatížení (BNLW) očekávaných během projektované provozní životnosti. V závislosti na změnách standardního zatížení a na projektované šířce desky je pak z katalogu možno vybírat standardní konstrukční skladbu. Tloušťku betonové vrstvy je možno snižovat nebo zvyšovat v závislosti na zbytkové únosnosti nebo na zbytkové tloušťce stávající asfaltové vrstvy. Obrázek 4 znázorňuje konstrukční katalog pro výstavbu vozovek s vrstvami krytu pokládanými za použití technologie White Topping.




*Obrázek 4: Rakouský návrhový katalog pro výstavbu vozovek s vrstvou krytu pokládanou technologií White Topping (třída zatížení LK, změny standardního zatížení BLNW)*

*Legenda k obrázku 4:*
*Spáry musí být umístěny mimo jízdní a stoupací pruhy.*
*Poměr délky desky L k šířce desky B ≤ 1,5*
*Úprava uvedené tloušťky desky:*
- *Únosnost 50 – 69 %: +1 cm tloušťky cementobetonového krytu*
- *Tloušťka zbývající stávající asfaltové vrstvy ≥15 cm: -1 cm tloušťky cementobetonového krytu*

*Cementobetonový kryt podle RVS 08.17.02*
*Stávající asfaltová vrstva*
*Stávající nestmelená spodní podkladní vrstva (mrazuvzdorná)*

## Závěr

Realizace zkušebního úseku prokázala, že při modernizaci a opravách asfaltových komunikací, které jsou vystaveny silnému dopravnímu zatížení, může být technologie White Topping snadno aplikována i v případě větších ploch, na nichž se pokládka provádí pomocí finišerů.
Provedené zkoušky kromě toho prokázaly, že pokládání čerstvého betonu speciálního složení, které je přizpůsobeno pro silnice nižších tříd a pro větší tloušťky cementobetonového krytu, může být z hlediska nákladů hospodárné, což je dáno tím, že již není nezbytné vytvářet podélnou spáru ve středu jízdního pruhu. Navíc je v současnosti dostupný návrhový katalog, který umožňuje na základě koncepce dimenzování převzaté z předpisu RVS 03.08.63, snadné a rychlé určování potřebných tlouštěk vrstev. Znalosti, které byly získány v rámci výzkumného projektu a při realizaci zkušebního úseku, slouží jako základ pro vypracování nové rakouské směrnice pro opravy asfaltových vozovek za použití technologie White Topping (RVS 08.17.05).

**Zdroje**

[1] Rassmussen, R. O.; Rozycki, D. K. (2004). Thin and ultra-thin whitetopping, A synthesis of highwaypractice. Transportation Research Board, Washington D.C.
[2] Blab, R. a kol. (2006). Betonstraßen – Das Handbuch. Zement + Beton, Vídeň
[3] RVS 08.17.04 (2013). Fugen in Betonfahrbahndecken, FSV Vídeň
[4] RVS 08.17.02 (2012). Betondeckenherstellung, FSV Vídeň

[5] ONR 23303 (2010). Prüfverfahren Beton (PVB) – Nationale Anwendung der Prüfnormen für Beton und seiner Ausgangsstoffe, ASI, Vídeň

[6] RVS 03.08.63 (2021). Oberbaubemessung, FSV Vídeň

# White Topping – a new Austrian Guideline for dimensioning and application of White Topping

*DI Dr. Martin Peyerl*
*+43 664 / 885 00 390*
*peyerl@smartminerals.at*

*Ass. Prof. DI Dr. Lukas Eberhardsteiner*
*+43 650 / 877 96 96*
*lukas.eberhardsteiner@tuwien.ac.at*

*DI Sebastian Spaun*
*+43 1 /714 66 81 -0*
*spaun@zement.at*

## Abstract

Especially in the low-level road network, various sections of the road are subject to heavy loads from slow-moving heavy traffic. For road sections with existing asphalt pavements, the White Topping construction method is an easy-to-implement and long-lasting solution to upgrade such areas. Here, a concrete layer with a lower thickness compared to conventional concrete pavement constructions is applied to the previously milled asphalt roadway. This means that ruts and other deformations can also be permanently repaired.

In order to gain detailed information regarding the installation of White Topping in Austria, a test track was implemented in the road network of the federal state of Lower Austria to test new technologies and to determine the basis for dimensioning.

The implementation of the test track showed that for upgrading and repairing heavily used asphalt traffic areas, the White Topping construction method can also easily be applied on larger areas by paver installation. In addition, the tests showed that using special concrete formulations tailored to the low-level road network, larger layer thicknesses can also be produced cost-effectively, meaning that making the longitudinal joint in the middle of the lane is not necessary any more. Also, a dimensioning catalogue is now available enabling a quick and easy determination of the necessary layer thicknesses.

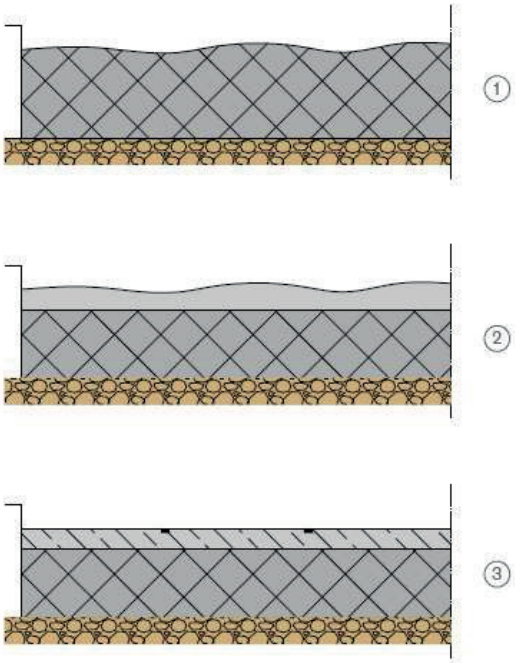
## Construction Method White Topping

Modern traffic routes should be built as resource-saving as possible and have a long lifetime of good usability. Especially in the low-level road network, sections of the road are subject to heavy loads from slow-moving heavy traffic. The White Topping construction method is an easy-to-implement and long-lasting solution for upgrading such areas. Here, a concrete layer with a significantly lower layer thickness compared to conventional concrete pavement construction is applied to the previously milled asphalt roadway. This means that ruts and deformations can also be permanently repaired.

The advantage of the White Topping construction method is that a large part of the existing road structure can continue to be used and only the top layer is replaced with a stable and durable concrete surface. As a result, this type of construction can be used to upgrade road sections at far lower costs and with less resources than a new construction.

With the White Topping construction method, the existing structure becomes the base for the new thin concrete slab. Depending on the thickness of the concrete cover, a distinction is made between conventional White Topping with a layer thickness of more than 20 cm, thin White Topping with a layer thickness of 10 to 20 cm and ultra-thin White Topping with a layer thickness of less than 10 cm [1]. A good bond to the existing asphalt is essential for thin and ultra-thin White Topping.

Picture 1 shows the basic work steps involved in repairing an asphalt roadway with the White Topping construction method with an existing asphalt lane (1), milling off the old asphalt (2) and application of the White Topping layer in bond with the existing asphalt (3).




*Picture 1: Construction of White Topping*

After initial trials in the USA, the White Topping construction method was first tested in Austria in 1997 at a building yard owned by Pittel & Brausewetter [2]. Although further individual test sections were built, a large-scale application has not yet been implemented.

This may also be due to the fact that the application of White Topping is difficult, because only insufficient specifications regarding the requirements for this construction type are currently available in Austria, e.g. layer thicknesses in relation to the traffic load. RVS 08.17.04 „Joints in concrete road surfaces“ [3] only contains rough guidelines for the maximum joint distances in relation to concrete pavement thickness for White Topping. No information concerning the allowable traffic load or the required residual load-bearing capacity of the existing asphalt are derived from this regulation yet.

## Test Track

To get detailed information for future installations of White Topping in Austria for planners, constructors and construction companies, a test track was built in the federal state's road network of Lower Austria. In cooperation with the department ST4 „State road construction and administration of the Lower Austrian provincial government“ a road section of approx. 150 meters next to the city of Krems was used for this purpose. Since the track is close to a gravel pit, heavy traffic load was given.

When implementing the test track, it was possible to vary certain execution parameters and to install sensors in the concrete surface in order to collect valuable empirical values and measurement data for the analysis of the White Topping construction method.

On the test track the following parameters were varied:

- Slab size (half lane width: 1.5 m × 1.5 m or full lane width: 3.0 m × 3.0 m)
- Bond to the asphalt (with and without bond by inserting geosynthetics between new concrete cover and existing asphalt layer)
- Application of different concrete recipes

In order to be able to assess the load bearing behavior of the new White Topping construction, a condition assessment of the existing bituminous structure was executed. In addition to a visual assessment of the condition, drill cores were taken to determine the thickness of the asphalt layer and for the laboratory determination of the asphalt stiffness. Further load-bearing capacity measurements were carried out using the falling weight deflectometer (FWD).

In the visual assessment of the condition, ruts were the main damage pattern in both directions. An average rut depth of 16 mm in the direction of Stratzdorf and 9 mm in the direction of Rohrendorf was determined. There were also occasional individual cracks. The load-bearing capacity was determined using falling weight deflectometer tests, with measurements being taken at least eight measuring points in each direction. An even distribution of load-bearing capacity was found on the section examined.

## Construction of the track

The first step of the implementation was the definition and testing of the concrete composition. As part of laboratory tests, three different concrete recipes were determined to be used on the test track and their suitability was examined in advance. These tests ensured that, despite the variation, the essential requirements for durability defined in RVS 08.17.02 [4] were met.

A summary of the three recipes used to produce the White Topping can be found in the adjacent Table 1. Recipe 1 is a conventional recipe for concrete roads, suitable for the production of exposed aggregate surface with a maximum grain size of 8 mm. Recipes 2 and 3 represent mixtures for conventional concrete for roads with a maximum grain size of 22 mm. With these different concrete compositions, also an exposed aggregates surface was created. In recipe 3, polypropylene fibres were also added to reduce the risk of tearing.

*Table 1: Composition of the different concrete recipes*

| **Recipe** | **1** | **2** | **3** |
|---|---|---|---|
| Type of concrete acc. to RVS 08.17.02 | OB GK8 | OB GK22 | OB GK22 fibres |
| CEM II/B-S 42,5N DZ | 430 | 400 | 399 |
| Water | 162 | 151 | 147 |
| Sand 0/2 | 560 | | |
| Sand 0/4 | | 700 | 700 |
| Gravel 4/8 ( | 1198 | | |
| Gravel KK 8/22 | | 1125 | 1125 |
| Fibres | | | 3 |
| Air content | 4.0-6.0 | | |
| W-C ratio | 0.38 | 0.38 | 0.37 |
| Density | 2350 | 2380 | 2380 |

First step was grinding and cleaning of the asphalt surface (Picture 2). The concrete was paved with a conventional concrete paver on the milled and cleaned asphalt surface with a thickness of 12 cm (Picture 3).



*Picture 2: Grinding of the asphalt layer*



*Picture 3: Paving of the concrete*

During the construction process, samples were taken continuously to determine the hardened concrete properties. This ensured that the concrete met the defined requirements for strength and resistance - in particular the resistance to frost under de-icing salt conditions. Table 2 gives an overview of the determined strength values.

*Table 2: Determined strength properties*

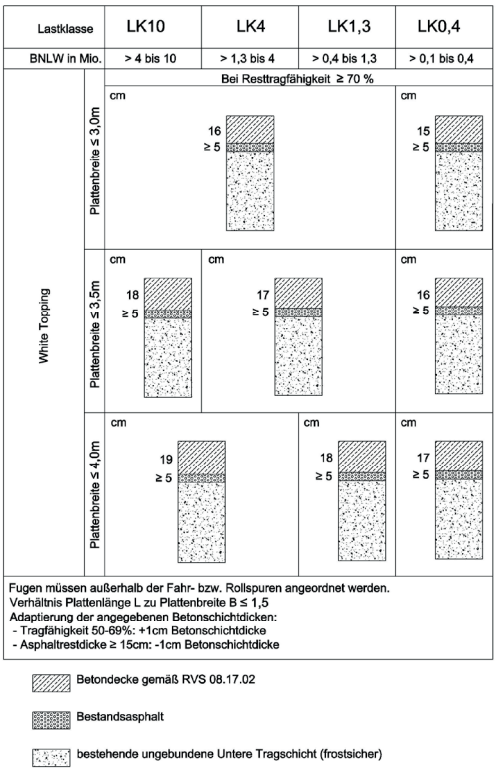
| | Splitting tensile strength laboratory (N/mm²) | Requirement initial test (N/mm²) | Splitting tensile strength cores from test track (N/mm²) | Requirement control test N/mm²) |
|---|---|---|---|---|
| OB GK 8 | 4,8 | ≥ 4,4 | 5 | ≥ 3,2 |
| OB GK 22 | 4,2 | | 4,5 | |
| OB GK 22 fibres | 4,2 | | 4,9 | |

The results show that both in the laboratory and in the field tests, the mixture “OB GK 8” has a slightly higher splitting strength than the one with the largest grain size “OB GK 22”. This can be explained by the higher cement content of “OB GK 8”. In the laboratory test, the fibres show no influence on the tensile strength behavior.

In addition to determining the mechanical properties, the resistance to freeze-thaw with de-icing salt (XF4) was also tested by verifying the required air void parameters according to exposure class XF4 and by using the slab test method with weathering of the concrete surface with de-icing salt [5]. All requirements were met by all formulations. Only the mixture “OB GK 22 fibres” had a noticeable increase in the air void content.

## Dimensioning

On the basis of the laboratory test results a design catalogue based on RVS 03.08.63 [6] was developed for the dimensioning of White Topping structures. This is based on the determination of the traffic load expressed by a number of design standard load changes (BNLW), which is expected during the planned service life. Depending on the standard load changes and the planned panel width, a standard structure can be selected from a catalogue. The thickness of the concrete layer can be reduced or increased depending on the residual load-bearing capacity or the residual thickness of the existing asphalt layer. Picutre 4 shows the design catalogue for White Topping structures.




*Picture 4 Austrian design catalogue for White Topping (LK load class, BLNW standart load changes)*

## Conclusion

The implementation of the test track showed that the White Topping construction method is also easily possible for larger areas by paver installation for the upgrading and repair of heavily used asphalt traffic areas. In addition, the tests showed that using special concrete formulations tailored to the low-level road network and greater paving thicknesses can be cost-effectively because a longitudinal joint in the middle of the lane is not necessary. In addition, a dimensioning catalogue is now available, which, based on the well-known dimensioning concept from RVS 03.08.63, enables the necessary layer thicknesses to be determined quickly and easily. The knowledge gained as part of the research project and from the implementation of the test track serve as the basis for the creation of a new Austrian guideline for the repair of asphalt roads in the White Topping construction method (RVS 08.17.05).

## Source

[1] Rassmussen, R. O.; Rozycki, D. K. (2004). Thin and ultra-thin whitetopping, A synthesis of highwaypractice. Transportation Research Board, Washington D.C.

[2] Blab, R. et. al (2006). Betonstraßen – Das Handbuch. Zement + Beton, Vienna

[3] RVS 08.17.04 (2013). Fugen in Betonfahrbahndecken, FSV Vienna

[4] RVS 08.17.02 (2012). Betondeckenherstellung, FSV Vienna

[5] ONR 23303 (2010). Prüfverfahren Beton (PVB) – Nationale Anwendung der Prüfnormen für Beton und seiner Ausgangsstoffe, ASI, Vienna

[6] RVS 03.08.63 (2021). Oberbaubemessung, FSV Vienna

# Příspěvky zařazené pouze do sborníku



# Sledování agresivních látek v blízkosti CB krytů vozovek

*Jiří Grošek, Božena Dohnálková, Josef Stryk, Bohuslav Slánský*
*Centrum dopravního výzkumu, v.v.i.*
*Skanska a.s.*

*Tel .: +420 541 641 338*
*Mail: jiri.grosek@cdv.cz*

V poslední době se v dopravní infrastruktuře nejen v ČR objevují případy nižší životnosti vozovek s cementobetonovým krytem (CBK). Jednou z možných příčin může být zvýšené množství alkálií v betonu, které nemusí pocházet jen z jednotlivých složek betonu nebo z chemických rozmrazovacích látek používaných při zimní údržbě. Tento článek popisuje výzkumnou činnost, která se zabývá zkoumáním možností a důsledků napadení betonu agresivními látkami z okolního prostředí. Pilotní testování poskytuje cenné informace o koncentracích agresivních látek v reálných podmínkách. Na dálničních úsecích byly odebrány vzorky zemin a podzemní vody z okolí CBK a byly porovnány výsledky laboratorních zkoušek podle nově navržených postupů. Autoři tohoto článku se snaží najít a popsat vztah mezi rychlostí vzniku a šíření degradačních procesů v betonu a působením vnějšího prostředí. Z dosavadních výsledků je patrná vysoká koncentrace sodíku a draslíku v okolní zemině, podkladních vrstvách i podzemní vodě. Pokud se tato skutečnost potvrdí ve větším měřítku, mělo by to být zohledněno při návrhu CBK a měla by být přijata opatření pro praxi.

## Úvod

Více než sedmdesát let po prvním zdokumentování alkalicko-agregátové reakce (AAR) je nyní známo mnoho informací o chemických reakcích v betonu, faktorech, které přispívají k reakci a expanzi, metodách testování kameniva a betonu a doporučení pro zabránění jejich vzniku. Správné použití těchto znalostí, které jsou dnes k dispozici, by mělo vést při výstavbě nových betonových konstrukcí ke snížení rizika poruch v důsledku AAR, ke kterému dochází v průběhu jejich životního cyklu. V posledních letech byla vyvinuta řada závazných postupů a doporučení, které pomáhají při výběru materiálů a preventivních opatření. Je prokázáno, že alkalicko-křemičitá reakce (ASR) je výsledkem reakce mezi alkalickými hydroxidy poskytovanými (hlavně) portlandským cementem a určitými typy reaktivních minerálů přítomných v některých typech kameniva, a že omezení dostupnosti jednoho nebo obou z nich je účinným prostředkem k zabránění či výraznému zpomalení škodlivého rozpínání. Proto se výběrem „nereaktivních“ kameniv nebo použitím „cementu s nízkým obsahem alkálií“ (zejména sodíku a draslíku) stalo běžným postupem pro prevenci AAR [1]. Má se za to, že kontrola obsahu alkálií v betonové směsi, je při analýze složek betonu vhodnější než pouhé omezení obsahu alkálií v cementu. Mnoho zemí umožňuje použití potenciálně reaktivního kameniva za předpokladu, že obsah alkálií v cementu nepřesahuje 0,6 % $Na_2O_e$ [2]. Zároveň se však uznává, že omezení obsahu alkálií v portlandském cementu není samo o sobě účinným způsobem prevence poškození způsobeného AAR, protože tento přístup nekontroluje celkový obsah alkálií v betonové směsi.

Z tohoto stručného popisu je zřejmé, že existují tři předpoklady vzniku a rozvoje rozpínavých reakcí:
- dostatečné množství reaktivních minerálů (v kamenivu),
- dostatečná koncentrace alkálií (především z portlandského cementu),
- dostatečná vlhkost (vedlejším produktem je roztok nebo gel v závislosti na obsahu vlhkosti).

Odstranění kteréhokoli z těchto předpokladů zabrání výskytu anebo zpomalí proces rozpínavých reakcí. Tyto faktory by měly být brány v úvahu při stanovování limitů pro alkálie v betonu obsahující potenciálně reaktivní i potenciálně nereaktivní kamenivo. Obsah alkálií v betonu se totiž může během času zvýšit nebo měnit v důsledku:
- migrace alkálií resp. agresivních látek způsobené pohyby vlhkosti (nebo elektrických proudů),
- pronikání alkálií resp. agresivních látek z vnějších zdrojů (např. rozmrazovacích solí, okolního prostředí aj.),
- dlouhodobým uvolňováním alkálií z kameniva.

I když může být přítomnost reaktivních minerálů detekována zkušeným petrografem makroskopicky, doporučuje se pro potvrzení reaktivity vhodné testování zdrojů kameniva za použití mikropetrografických metod např. kombinace polarizačního petrografického mikroskopu a SEM/EDX [3, 4].

V současné době jsou alkálie v cementu pro potřeby výstavby CB krytu regulovány při jeho výrobě zejména výběrem vhodné horniny, stejně tak je sledován potenciál pro vznik ASR kameniva dle platných norem a technických předpisů. Posouzení navržené betonové směsi a jejich složek z hlediska vyloučení rizika ASR v betonu se u novostaveb v ČR provádí podle TP 137, které je založeno na tzv. dilatometrických zkouškách a na základním petrografickém posouzení kameniva [5, 6, 7].

I když jsou požadavky norem a předpisů splněny, setkáváme se občas s problematickými úseky, vykazujícími tento typ poruch. Ve struktuře cementového kamene, a také na styku s kamenivem, dochází k rozvoji rozpínavých reakcí, které se projevují nejčastěji typickými síťovými trhlinami na povrchu betonu. Trhliny jsou často soustředěny v částech konstrukce se zvýšenou vlhkostí, např. v podélné a příčné spáře CB krytu vozovek, šíří se v ploše a v některých případech zasahují přes celou tloušťku betonové vrstvy.

Přenos alkálií z okolního prostředí byl odbornou veřejností dosud vnímán jako minimální, nemající znatelné dopady. Jejich pohyb ovlivňuje řada faktorů, kde má zásadní význam vodní režim v podloží, hladina podzemní vody, systém odvodnění a jeho funkčnost, kontaminace okolí prostřednictvím zemědělské činnosti aj. Toto možné riziko by mělo být zohledněno zejména při projektování novostaveb pozemních komunikací (PK) vozovek s CB krytem.

## Sledování agresivních látek v okolí vozovek

Popis jednoho sledovaného úseku

Pro zjištění možného vlivu vnějšího prostředí byl proveden odběr vzorků zeminy a podzemní vody co nejblíže betonové vozovce. Konkrétní lokalita byla vybrána na km 234 - 241 dálnice D1 ve směru na Ostravu (Obrázek 1). Jedná se o přímý úsek silnice, který je veden pod úrovní okolního terénu bez lesního porostu. Komunikace je vedena rovinatým územím s minimálním podélným sklonem. Tato lokalita je známá svou rozsáhlou zemědělskou činností a používáním hnojiv. V tomto úseku byly pozorovány typické mapové trhliny a „odlupování“ betonového povrchu (Obrázek 2). Poškození je soustředěno nejvíce kolem příčných a podélných spár, ale zasahuje i střed CB desek. Očekává se, že poškození se může dále rozvíjet působením rozmrazovacích solí, neustálým nasycením agresivními látkami přítomnými v jeho okolí, vysokou vlhkostí podloží a okolní zeminy a střídavými cykly vlhčení a vysychání CB desek.




*Obrázek 1: Sledovaný úsek dálnice D1 v km 234 – 241, směr Ostrava: lokalizace (vlevo) a pohled na betonovou vozovku a okolní terén (vpravo)*



*Obrázek 2: Poruchy na povrchu CB krytu: širší pohled na desku (vlevo) a detail příčné spáry (vpravo)*

Odběry vzorků zemin a podzemních vod

Vzorky zemin a podzemních vod byly odebírány v říjnu 2020 při uzavírce tohoto úseku. Odběry zemin byly prováděny pravidelně každých 500-700 m ve středním dělícím pásu za pomoci ručního zemního vrtáku a odběry podzemních vod v přiléhajících šachtách pomocí norné lahve (Obrázek 3 a Tabulka 1). Byly odebrány vzorky pro stanovení koncentrace běžných anorganických prvků. Při odběru vzorků byl z každé sledované vzdálenosti odebírán směsný vzorek zeminy (Z), upravený metodou kvartování, o hmotnosti cca 1 kg, do plastových uzavíratelných vzorkovacích sáčků ve dvou hloubkách („T1“: 0-300 mm a "T2": 300-1000 mm). Vzorkování podzemní vody (V) bylo prováděno z jedné hloubky přibližně 1000 mm, vždy jako bodové vzorky odebrané do 1litrových plastových vzorkovnic. Vzorky zeminy a podzemní vody byly ihned po odběru umístěny do chladicího boxu a bez dalšího prodlení převezeny do laboratoře.

*Tabulka 1: Staničení odebraných vzorků zeminy*

| Zemina (-) | Staničení (km) | Podzemní voda (-) | Staničení (km) |
|---|---|---|---|
| Z1 | 235.3 | V1 | 235.400 |
| Z2 | 235.9 | | |
| Z3 | 236.4 | V2 | 237.000 |
| Z4 | 237.1 | | |
| Z5 | 237.8 | V3 | 238.300 |
| Z6 | 238.4 | | |
| Z7 | 238.9 | V4 | 239.600 |
| Z8 | 239.6 | | |
| Z9 | 240.3 | V5 | 240.200 |



*Obrázek 3: Odběry vzorků zemin a podzemní vody*

Laboratorní analýza zemin a podzemní vody

Ze vzorků zeminy byly odstraněny větší kameny a části rostlin. Vzorky byly vysušeny při teplotě místnosti, následně prosety přes nylonové síto (velikost ok 2 mm) a rozemlety na jemnou frakci v oscilačním mlýnu pro extrakci v lučavce královské. Tento postup je vhodný pro stanovení elementárního složení zeminy. Vzorky zeminy byly připraveny do teflonových nádob v množství 1,00 g ± 0,05 g. Byla přidána kyselina chlorovodíková v množství 7,5 ml a 2,5 ml kyseliny dusičné. Nádoby byly umístěny do vysokoteplotního mikrovlnného rozkladného systému SW-4 (Beghof, Německo). Rozklad probíhal za postupného zvyšování teplot až na 200°C a tlaku do 30 barů po dobu cca čtyřicet minut. Po ukončení procesu rozkladu byly nádoby ponechány, aby vychladly na laboratorní teplotu. Vzorky byly umístěny do odměrných baněk o objemu 100 ml a zředěny ultračistou vodou na konečný objem 100 ml. Vzorky vody byly konzervovány přidáním malého množství koncentrované kyseliny dusičné a byly uchovávány v chladu. Zjištěný obsah prvků v lučavkovém výluhu nelze považovat za celkový obsah, ale ani za biologicky dostupný obsah, protože lučavkový výluh je silnější než biologické procesy, vypovídá však o složení zeminy a o potenciálu kontaminace.

Pro prvkovou analýzu vzorků byl využit hmotnostní spektrometr s indukčně vázaným plazmatem ICP – MS/MS (8800 ICPQQQ, Agilent Technologies). Zdroj ICP převede proudem argonu atomy prvků ve vzorku na ionty, které jsou následně separovány a detekovány pomocí hmotnostního spektrometru. Vzorky byly analyzovány přímo, popřípadě byly před analýzou zředěny ultračistou vodou. Výsledky neznámých obsahů prvků ve vzorku se měřily a vyhodnocovaly metodou kalibrační přímky s vnitřním porovnávacím prvkem.

Vzorky vod se přepravovaly a uchovávaly při teplotě 1 – 5°C. Stanovení prvků na ICP – MS/MS nemusí probíhat ihned po odběru vzorku (do 24 hodin), vzorky se zakonzervovaly přídavkem malého množství koncentrované kyseliny dusičné a uchovaly v chladničce.

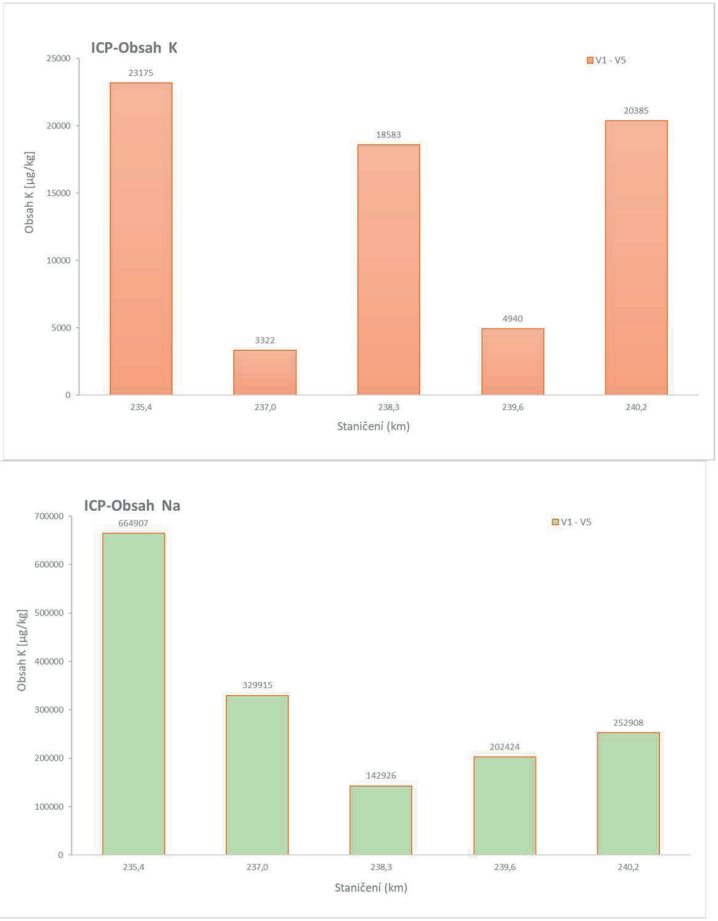
Dále byl proveden laboratorní rozbor zeminy a zatřídění dle národní normy ČSN 73 6133. Očekává se, že potenciálními zdroji rezervoáru draslíku jsou všechny typy zemin. Agresivním médiem ovlivňujícím koncentraci alkálií v betonu by měly být zejména jílové minerály v podloží komunikací a/nebo vnější zeminy v blízkosti vozovky.

Výsledky analýzy zemin a podzemní vody

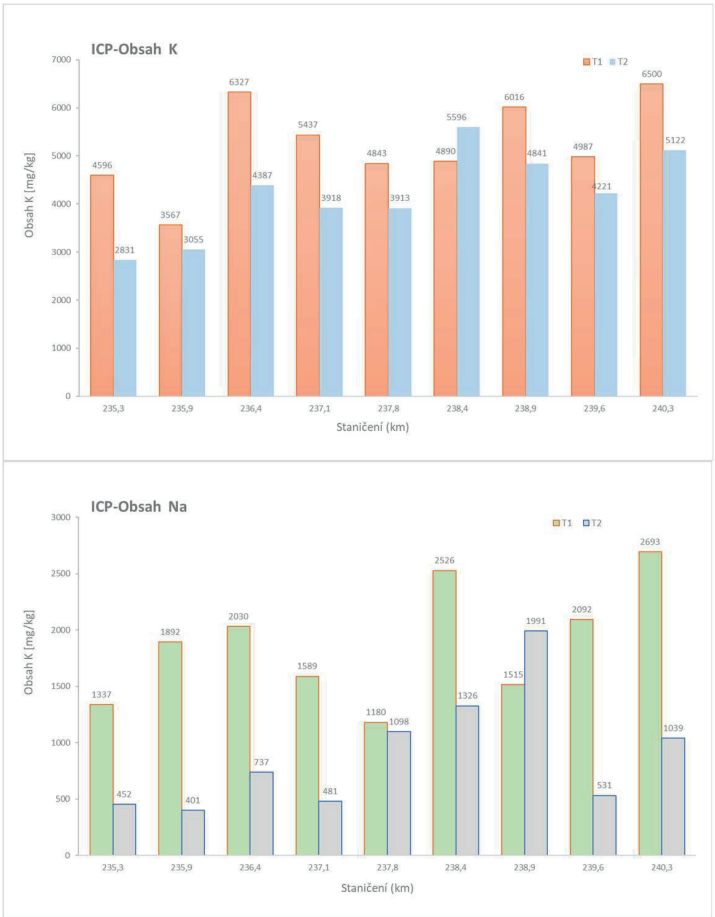
Laboratorní rozbor zeminy ve středním pásu ukázal, že ve sledovaném dálničním úseku se v hloubce vyskytují:
• „T1“: písčité jíly nebo jíly s nízkou plasticitou,
• „T2“: různé typy zemin a konstrukčních vrstev (písčité jíly a štěrky nebo štěrkopísky).

Koncentrace agresivních látek v zemině a podzemní vodě vykazovaly na měřených vzorcích vysoké hodnoty (Obrázek 4 a 5). Vysoké koncentrace sodíku v zemině a podzemních vodách jsou obvykle způsobeny solemi zimní údržby (NaCl), vysoké koncentrace draslíku mohou pocházet z typického složení zeminy (např. jíly) nebo z jiných vnějších zdrojů. Výraznější změny v koncentracích sodíku a draslíku byly patrné ve všech vzorcích zeminy v hloubce vyšší než hladina podzemní vody. Hodnoty koncentrace sodíku v zemině ve vzdálenostech S1-S9 kolísaly jen mírně v obou hloubkách „T1“ a „T2“. Hodnoty koncentrací draslíku v zemině ve vzdálenostech S1-S9 v hloubce „T1“ kolísaly jen mírně. V hloubce „T1“ se vyskytovaly písčité jíly nebo jíly s nízkou plasticitou, které jako namrzavé nebo vysoce namrzavé. V hloubce „T2“ jsou koncentrace K jen nepatrně nižší, byť se v nich ojediněle vyskytují písčité jíly (většinou jde o štěrky nebo štěrkopísky bez jílovitých složek). To může být způsobeno promícháním zeminy, ale také pohybem agresivních látek.

Je dobře známo, že v půdním systému existují v rovnováze tři formy K - nedostupné, pomalu dostupné nebo fixované a snadno dostupné nebo vyměnitelné. Obecně se uvádí, že zemina obsahuje cca 90 % nedostupného draslíku. Zbývající max. 10 % může pomalu nebo v případě zvýšeného pohybu podzemní vody i rychle migrovat, a to i do betonu. Očekává se, že koncentrace volného K může být v tomto úseku dálnice ještě vyšší. Důvodem je, že se jedná o zemědělskou oblast a vyšší koncentrace K se očekávají díky použití obvyklých draselných hnojiv, např. chlorid nebo uhličitan draselný. Koncentrace agresivních látek se mohou v různých ročních obdobích lišit, výrazně nižší hodnoty se však neočekávají.




*Obrázek 4: Laboratorní analýza koncentrace K a Na podzemní vody odebraných vzorků V1 – V5*




*Obrázek 5: Laboratorní analýza koncentrace K a Na zemin odebraných vzorků S1 – S9*

## Laboratorní zkoušky průniku agresivních látek do betonu

Průnik agresivních látek různými materiály není v ČR řešen žádnou normou ani technickým předpisem. V zahraničí je nyní dáván mnohem větší prostor nenormovým zkouškám a jejich vývoji. Mezi agresivní látky řadíme především jednomocné kationty běžně se vyskytující v přírodě, tj. zejména $K^+$, ale i $Na^+$. Pro důkaz existence možného průniku agresivních látek do betonu byl navržen systém nenormových zkoušek, které simulují možnost difúze vodních par s agresivními látkami prostřednictvím vzlínání vodního roztoku. Bylo sestaveno několik možností skladby konstrukčních vrstev (včetně vrstev podkladních – SC, AB, PM, ŠD aj.) s cílem analyzovat změnu chemického složení ve struktuře betonu, a to na vzorcích vyrobených dle schválené receptury pro CB kryty. Vzorky byly umístěny do uzavíratelných sklenic s/bez utěsnění kolem vzorku. Pomocí distančního profilu byla vytvořena vzduchová mezera mezi betonem/konstrukční vrstvou a jako infiltrační činidlo byl použit roztok 5% KCl. Tento roztok byl nalit do stanovené výšky pro všechny zkušební kádinky stejně. Dále byla do skleněné kádinky vložena nenasákavá distanční objímka, která současně vymezila vzduchovou mezeru a na kterou byl umístěn „váleček“ reprezentující jednu z vybraných běžně používaných konstrukčních podkladních vrstev. Následně byl na tuto podkladní vrstvu umístěn betonový „váleček“ buď z receptury typické pro spodní beton (SB) nebo horní beton (HB). Polovina zkušebních vzorků pak byla utěsněna tak, že mezi vzorkem podkladního materiálu a sklem kádinky byla vytvořena těsnící silikonová vrstva. Všechny skleněné nádoby byly následně uzavřeny skleněným uzávěrem s pryžovým těsněním, aby se umožnila případná kondenzace par v kádince. Uspořádání jednotlivých zkušebních kádinek je zřejmé na Obrázku 6.

Chemický rozbor betonu byl proveden před začátkem zkoušek a v daných časových intervalech byla stanovována koncentrace prvků pomocí výluhů cementového kamene. Cílem bylo postihnout rychlost průniku a změnu v koncentracích chemických prvků. Následně byly skleněné nádoby s různým konstrukčním uspořádáním vrstev a betony ponechány v laboratornímu prostředí. V intervalu 6ti měsíců pak byly provedeny další odseky vzorků betonů z horní i spodní plochy a následně po uplynutí dalších 6ti měsíců, tedy v intervalu 12ti měsíců od začátku zkoušek. Obsah draslíku byl stanovován pomocí hmotnostního spektrometru s indukčně vázaným plazmatem (ICP – MS/MS).

Vzorek betonu se pro stanovení na tomto přístroji musel upravit. Vzorek betonu (vysušený, upravený drcením a sítováním na zrnitost menší než 1 mm, pomletý v kulovém oscilačním mlýně nejlépe analytická jemnost tj. ≤ 0,63 μm) byl navážen v množství 0,5000 g ± 0,0500 g do teflonových rozkladných nádob. Přidalo se 12 ml zředěné kyseliny chlorovodíkové ultračisté v poměru 1:3. Nádobky se uzavřely a vložily do mikrovlnného rozkladného zařízení (SW-4 Berghof). Rozklad pobíhal 15 minut při teplotě 200°C. Dalších 15 minut byly nádobky udržovány při teplotě 50°C. Poté se nechaly vychladnout a vzorky se kvantitativně převedly do nádobek o objemu 25 ml a doplnily se po rysku. Takto připravené vzorky se dále použily pro stanovení vybraných prvků v ICP-MS/MS.

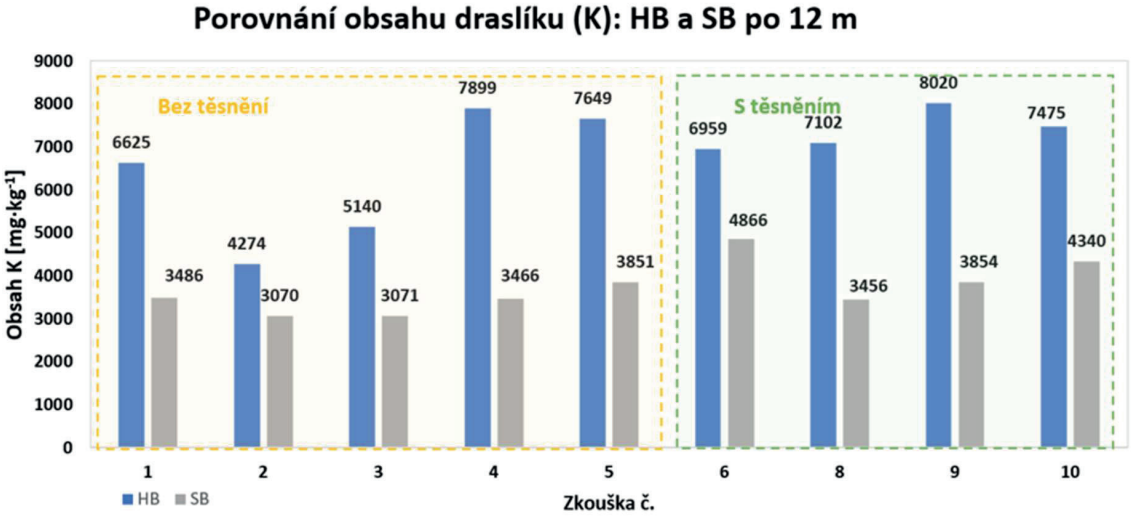
Zdroj ICP převedl proudem argonu atomy prvků ve vzorku na ionty, které byly následně separovány a detekovány pomocí hmotnostního spektrometru. Vzorky byly analyzovány přímo, popřípadě byly před analýzou zředěny ultračistou vodou. Výsledek obsahu draslíku ve vzorku se měřil a vyhodnocoval metodou kalibrační přímky s vnitřním porovnávacím prvkem.




*Obrázek 6: Uspořádání kádinky s podkladem z asfaltového betonu (vlevo) a betonem SB/HB (vpravo) - bez a s utěsněním*

Při vyhodnocení nejvýhodnějšího konstrukčního uspořádání vrstev z hlediska co nejnižšího průniku draslíku (bez použití dalších bariér) se jako nejlepší jevilo uspořádání dvouvrství HB na SB, resp. SB na SB, které prokázalo nejnižší průnik K do horní sledované vrstvy.

Při porovnání výsledků SB a HB mezi sebou z hlediska nižší zjištěné koncentrace K je z níže uvedeného Obrázku 7 zřejmé, že při stejných uspořádání zkoušek byly nižší koncentrace K zjištěny až na jednu výjimku vždy u SB než u HB. Při vzájemném porovnání složení použitých receptur pak zjišťujeme, že pro výrobu SB byla použita nižší dávka cementu, a to o 55 kg.m$^{-3}$ než u receptury HB. U receptury SB také výrazně dominuje hrubá frakce kameniva a zároveň zde byla použita nižší dávka vody i plastifikační přísady. Z výsledků doposud provedených zkoušek lze usoudit, že z hlediska minimalizace koncentrace K v betonu má tedy zásadní význam určit a ověřit optimální recepturu, kdy při vhodném složení, resp. při použití vhodné receptury, můžeme infiltraci K významně redukovat.




*Obrázek 7: Výsledky průměrných hodnot obsahu draslíku v HB a SB po 12 měsících v různých uspořádáních konstrukčních vrstev*

## Závěr a doporučení

Hlavním cílem popisované dílčí části VaV projektu bylo porovnat výsledky koncentrace agresivních látek v zemině a podzemních vodách na vybraných úsecích betonové vozovky. Dosavadní výsledky tohoto pilotního testování prokázaly, že ve vnějším prostředí mohou být přítomny agresivní látky, zejména vysoká koncentrace sodíku a draslíku v zeminách, ale i v odebraných vzorcích podzemních vod. Může existovat několik zdrojů, např. jílovitá zemina, zemědělská činnost nebo dokonce minerální složení v podzemní vodě. Zdá se, že koncentrace agresivních látek má nezanedbatelné hodnoty, které mohou přispět ke zvýšenému namáhání CB krytu. Laboratorní testování zemin ukazuje celkové (maximální) koncentrace alkálií v okolním prostředí a bude ještě doplněno stanovením koncentrací agresivních látek, které se za působení vlhkosti reálně uvolňují ze zeminy. V každém případě je nežádoucí používat jílovitou zeminu k vytvoření přilehlého násypu nebo středního dělicího pásu kolem betonové vozovky, protože se tím zadržuje a kumuluje nadměrná vlhkost, Na i Cl ze zimní údržby a tyto zeminy jsou i rezervoárem draslíku. Je žádoucí minimalizovat objem zadržované vody v okolí vozovek, tak i počet cyklů zavodnění/vysušování CB krytu, a to zajištěním a udržováním funkčního odvodnění betonových vozovek. Zejména se jedná o úseky, kde je vozovka pod úrovní okolního terénu a u rovinatých ploch (např. v případě letištních vozovek, kde bývá často problém s vysokou hladinou podzemní vody). Pokud se prokáže přímý negativní dopad agresivních látek na životnost betonu, bude nutné v nových konstrukcích vozovek použít vhodné technologické nebo chemické bariéry. Takové řešení pomůže redukovat koncentraci a infiltraci agresivních látek z okolí a zlepšit odvod vody/vlhkosti z konstrukcí vozovek.

Z popsaných výsledků v rámci provedeného laboratorního testování lze vyvodit, že instalované těsnění mezi pokladní vrstvou a sklem kádinky mělo jen krátkodobý efekt po dobu cca 6 měsíců, potom naopak způsobilo zrychlení průniku draslíku do betonu. Navrženou sadou zkoušek byl prokázán možný přenos draslíku jako agresivního prvku tenzí vodních par z prostředí do betonu. Jako zásadní byl také prokázán vliv receptury CBK na množství zjištěného draslíku. Toto souvisí s vnitřní pórovou strukturou CBK, její provázaností, velikostí pórů a jejich spojitostí, která umožňuje pohyb vlhkosti napříč vzorkem betonu a umožňuje tak zároveň pohyb iontů $K^+$, které jsou vlhkostí neseny a v rámci vlhkostního režimu přesouvány. Z dříve publikovaných prací a na základě výsledků popsaných v tomto článku lze říci, že rozpínavost způsobená reaktivností kameniva (až na výjimky) není v České republice u CB krytů zásadním problémem. Mnohem

důležitější je sledovat vývoj cementů pro silniční stavitelství (portlandské cementy a jejich náhrady) a možný vliv okolního prostředí na rozvoj materiálových poruch betonu.
Z výsledků těchto probíhajících dlouhodobých testů budou vyvozeny patřičné závěry. V současné době pracujeme na vývoji různých konstrukčních, chemických a dalších bariér a laboratorně se analyzuje jejich vliv na omezení infiltrace prvků z okolního prostředí pomocí zavedených i nově vyvinutých laboratorních zkoušek. Stanovuje se množství infiltrovaného média skrz tyto bariéry z prostředí do betonu a sleduje se do jaké míry se přes jednotlivé typy bariér projeví účinky průniku draslíku. Zjištěné výsledky budou dále publikovány a budou navržena konkrétní opatření v konstrukci vozovek.

## Poděkování

Tento příspěvek je financován se státní podporou Technologické agentury ČR a Ministerstva dopravy v rámci Programu DOPRAVA 2020+, v rámci řešení projektu CK01000040 Opatření zvyšující životnost vozovek s cementobetonovým krytem v souvislosti s omezením přísunu alkálií z externích zdrojů.

### Zdroje

[1] Thomas, M.D.A., Fournier, B., Folliard, K.J., Alkali-Aggregate Reactivity (AAR) Facts Book, Report No. FH WA-HIF-13-019, USA, pp 9-33, 2013.

[2] ČSN 736123, Stavba vozovek - Cementobetonové kryty - Část 1: Provádění a kontrola shody, 2014.

[3] FRÝBORT, Aleš, Jana ŠTULÍŘOVÁ, Miroslava GREGOROVÁ et al. *Analýza mikrostruktury materiálů skenovacím elektronovým mikroskopem a EDX analyzátorem - uplatnění na cementovém betonu: Certifikovaná metodika*. Brno : Centrum dopravního výzkumu, v. v. i., 2020. 46 s. ISBN 978-80-88074-32-8.

[4] Frybort, A., Vsiansky, D., Stulirova, J., Stryk J., Gregerova M., Variations in the composition and relations between alkali-silica gels and calcium silicate hydrates in highway concrete, Materials Characterization, Czech Republic, vol. 137, pp 91-108, 2018.

[5] ČSN 72 1153, Petrografický rozbor přírodního stavebního kamene, 1984.

[6] TP 137, Vyloučení alkalické reakce kameniva v betonu na stavbách pozemních komunikací, 2015.

[7] ČSN 72 1179, Stanovení reaktivnosti kameniva s alkáliemi, 1967.

[8] https://www.cdv.cz/sluzby-laboratore-elektronove-a-opticke-mikroskopie/

[9] https://www.cdv.cz/laborator-dopravni-infrastruktury/

# Reaktivita jednotlivých alkálií a jejich uvolňování v procesu vzniku alkalicko-křemičité reakce a možnosti využití v praxi

*Ing. Tomáš Táborský, Ing. Kateřina Jiroušková*

*Tel .: +420 607 820 347*
*Mail: taborsky@vumo.cz*

ANOTACE

*Současné hodnocení ochrany před alkalicko-křemičitou reakcí se zaměřuje na reaktivnost kameniva a alkalický ekvivalent v cementu. Při stanovení obsahu jednotlivých alkálií se nicméně prokazuje, že podstatně větší vliv mají ionty $Na^+$ než ionty $K^+$, tedy že při výpočtu alkalického ekvivalentu (ekv. $Na_2O$) ionty $K^+$ zkreslují výsledek. Využití navrhované metody se předpokládá možnost na základě modelového grafu určit rizikovost určitého cementu pro vznik ASR na základě individuálního vlivu jednotlivých alkalických iontů.*

Výzkumný ústav maltovin Praha a Vysoké učení technické v Brně zahájili v roce 2019 řešení projektu č. TH04010207 „Zvýšení trvanlivosti cementobetonových krytů (CBK) pozemních komunikací omezením vlivu alkalicko-křemičité reakce (ASR)“ - zabývající se problematikou alkalicko-křemičité reakce z pohledu vyráběných cementů.

V současnosti se ochrana před alkalicko-křemičitou reakcí zaměřuje na reaktivnost kameniva a alkalický ekvivalent v cementu. Ovšem otázka reaktivnosti kameniva není vždy jednoznačná. Jsou známy případy, kdy se příznaky alkalické rozpínavosti objevily i přesto, že bylo kamenivo hodnoceno jako nereaktivní. Stejně tak požadavek na alkalický ekvivalent v použitém cementu není dostatečnou zárukou, že ke vzniku ASR nedojde.

Ve všech slínících vyráběných v ČR a tím i v cementech je několikanásobně vyšší obsah iontů $K^+$ (0,6 - 0,9 hm. %) oproti obsahu iontů $Na^+$ (0,1 - 0,2 hm. %). Je to dáno obsahem alkálií v surovinové základně (spalování alternativních paliv významně obsah alkálií ve slínku neovlivňuje).

Při stanovení obsahu jednotlivých alkálií se prokazuje, že podstatně větší vliv mají ionty $Na^+$ než ionty $K^+$, to znamená, že při výpočtu alkalického ekvivalentu (ekv. $Na_2O$) ionty $K^+$ zkreslují výsledek. Je potřeba se zaměřit na obsah iontů $Na^+$, který hraje dominantní roli při vzniku ASR. Alkalický ekvivalent zavádí limitovaný obsah alkálií bez zohlednění rozdílného chování sodíku a draslíku a jejich původu. Toto rozdílné chování je vhodné hodnotit odděleně.

V případě dodávání alkálií ve velkém měřítku zvenčí je pro vznik alkalicko-křemičité reakce v betonu význam obsahu alkálií v cementu méně důležitý. Zde je však velmi důležitá schopnost některých složek cementu zvyšovat chemickou odolnost betonu a omezovat vznik alkalicko-křemičité reakce snižováním celkové alkality betonu. Proto je nezbytné nejen sledovat a snižovat obsah alkálií v cementu, ale zároveň pomocí vhodných složek nebo přísad do

cementu omezit možnost aktivace chemické reakce mezi alkáliemi (ze všech možných zdrojů) a aktivním $SiO_2$ v kamenivu.

Je zjevné, že účinky jednotlivých alkálií se liší a že je potřeba se zabývat jejich rozdílným chováním při této reakci. V rámci řešení projektu jsme se zaměřili na:

- zjištění rozdílné aktivity jednotlivých alkálií

  a) které vstupují spolu s cementem,

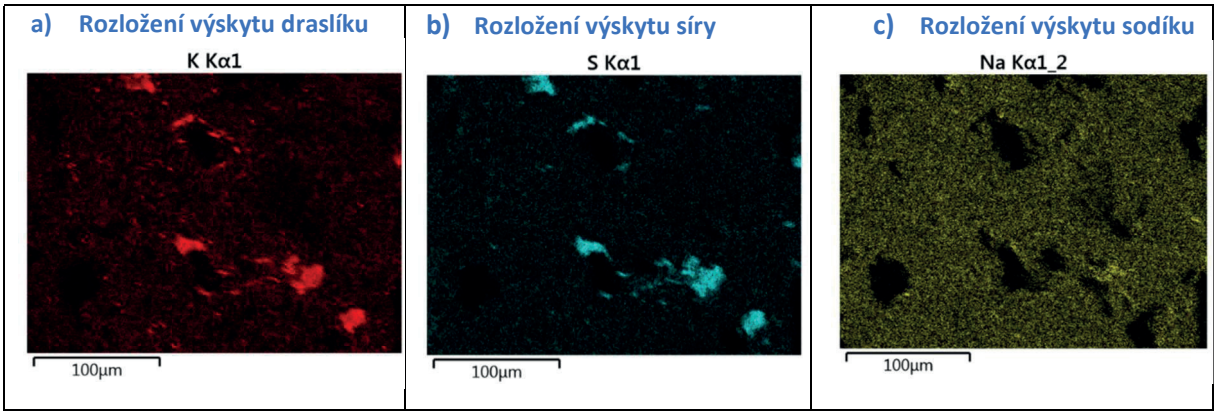
  b) které působí zvenčí (prostředky zimní údržby);
- nalezení vhodných způsobů odhadu chování daného cementu s daným typem kameniva;
- určení možností eliminace rizik vzniku ASR úpravou složení slínku a použitím vhodných složek cementu, bránících nastartování ASR.

## 1. Zjištění rozdílů v aktivitě alkálií podle druhu ($Na^+$, $K^+$) a podle jejich způsobu vazby v portlandském slínku

Pro vznik ASR je důležitý faktor, jak rychle přechází jednotlivé alkálie do pórových roztoků a jsou tak k dispozici pro reakci s reaktivními křemičitany na povrchu kameniva. Způsob vazby alkálií ve slínku ovlivňuje rychlost přecházení iontů $Na^+$ a $K^+$ do roztoku v průběhu hydratace cementu a z toho plyne, že každý může do reakcí vstupovat v jiné fázi tvrdnutí betonu.

Pomocí mappingu na elektronovém mikroskopu byl potvrzen výskyt draslíku ve slínku převážně jako minerálu arkanit (síran draselný). Draslík a síra se vyskytují společně na stejném místě, většinou v okolí uzavřených pórů, Obr.1 a), 1 b). Oproti tomu sodík je rovnoměrně rozptýlen po celé hmotě slínku, Obr.1 c). Z toho plyne, že sodík vstupuje do krystalové mřížky slínkových minerálů, většinou trikalciumaluminátu. Trikalciumaluminát pak krystaluje v ortorhombické soustavě namísto v soustavě kubické.

*Obrázek 1 Rozložení výskytu sodíku, draslíku a síry*




Kromě přítomnosti arkanitu není ale zřejmé, na jaké slínkové minerály jsou alkálie ještě vázány. Proto byly laboratorně připraveny surovinové směsi z čistých chemikálií a do nich byly přidávány alkálie ve formě uhličitanů sodných a draselných a síranů sodných a draselných. Jejich množství bylo spočítáno tak, aby ve slínku jejich podíl odpovídal obsahu 1,2 % ekvivalentu $Na_2O$ (tato hodnota vychází z normy ČSN 72 117 Stanovení reaktivnosti kameniva s alkáliemi). Z takto připravených surovinových směsí byly v laboratorní peci vypáleny slínky. Všechny surovinové směsi měly stejné moduly a stupeň sycení. Slínky byly

kvantitativně a kvalitativně analyzovány na elektronovém mikroskopu a bylo potvrzeno, že alkálie přednostně vstupují do slínkových fází dle následujícího pořadí $C_3A>C_4AF>C_2S>C_3S$.

Přítomnost alkálií ve slínkových fázích byla zjišťována na laboratorně připravených slíncích pomocí rastrovacího elektronového mikroskopu s elektrodynamickou sondou. V tabulce 1 jsou uvedené koncentrace zjištěných alkálií v jednotlivých slínkových minerálech.

*Tabulka 1 Koncentrace alkálií v jednotlivých slínkových minerálech, slínek připravený s dotovanými alkáliemi do surovinové směsi*

| | + $Na_2CO_3$ hm % $Na_2O$ | + $K_2CO_3$ hm % $K_2O$ | + $Na_2SO_4$ hm % $Na_2O$ | + $K_2SO_4$ hm % $K_2O$ |
|---|---|---|---|---|
| Alit | 0,25 | 0,03 | 0,19 | 0,01 |
| Belit | 1,43 | 1,16 | 1,30 | 0,48 |
| C3A | 5,96 | 3,08 | 0,89 | 0,39 |
| C4AF (mezerní hmota) | 0,51 | 1,37 | 0,24 | 0,03 |

Pro ověření rychlosti přecházení alkálií do roztoku byl pomocí výluhové zkoušky simulován hydratační proces během tvrdnutí betonu. Byly připraveny cementové suspenze a v nich byl v daných intervalech stanoven podíl rozpuštěných alkálií přešlých do roztoku.

V Grafu 1 je zaznamenána kinetika vyluhování alkálií ze slínků připravených s dotovanými alkáliemi ve formě uhličitanů tj. $Na_2CO_3$ a $K_2CO_3$. Předpoklad je, že uhličitany během výpalu odtěkají a alkálie se zabudují do mřížky slínkových minerálů. Na těchto grafech lze pozorovat, že:

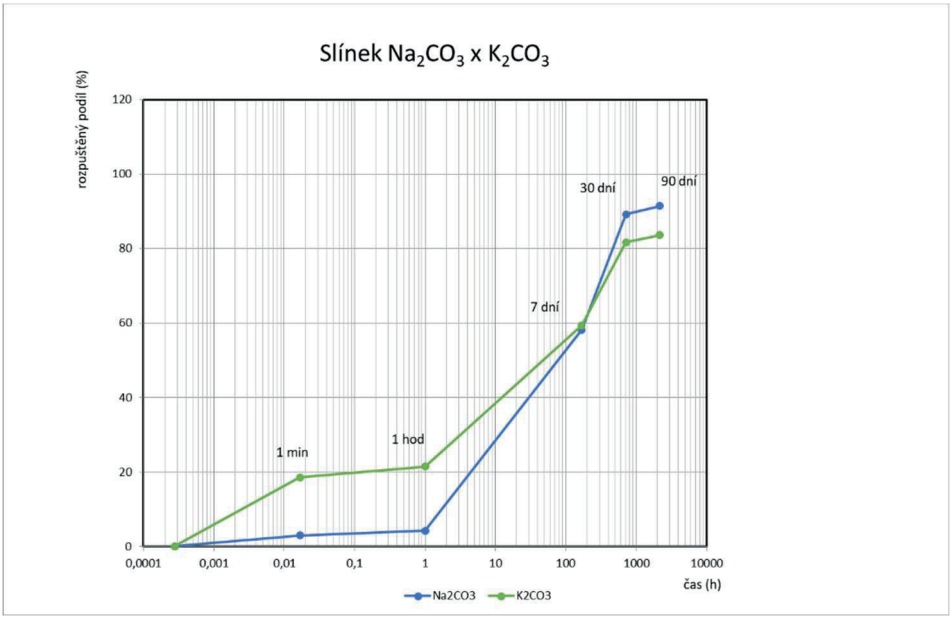
- sodík (modrá křivka) se začne rozpouštět až po jedné hodině, ve stejnou dobu se začíná rozpadat primární ettringit a začíná hydratace trikalciumaluminátu C3A, z tabulky 1 lze vyčíst, že nejvíce sodíku je přítomno v C3A (5,96 % Na) z toho plyne, že je sodík přítomen hlavně v mřížce C3A;
- v případě draslíku (zelená křivka) se objevil ve slínku arkanit a draslík, který se oproti sodíku rozpouští okamžitě ve formě arkanitu, se do mřížky C3A zabudoval jen v polovičním množství (3,08 % K, viz tabulka 1), více draslíku bylo také nalezeno v mezerní hmotě, která je vůči rozpouštění inertní.

V Grafu 2 je zaznamenána kinetika vyluhování alkálií, ze slínků připravených s dotovanými alkáliemi ve formě síranů tj. $Na_2SO_4$ a $K_2SO_4$. Předpoklad je, že alkálie se ve slínku budou vyskytovat jako sírany. Na těchto grafech lze pozorovat, že:

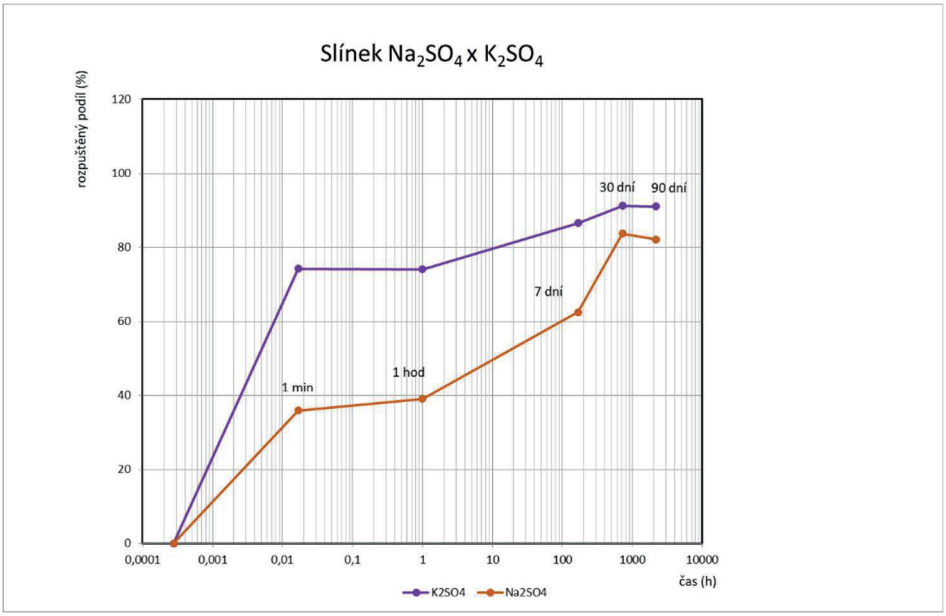
- draselné ionty (fialová křivka) v přítomnosti síry zůstávají převážně ve formě arkanitu, do roztoku přechází okamžitě z 80 %
- sodík se se sírou vyvázal ze 40 % (oranžová křivka), následně přechází do roztoku sodíkové ionty vázané v C3A, oproti draslíku přešlo do belitu 1,3 % Na (K pouze 0,48 %), alkalibelit se rozpouští nejpomaleji, bude tedy mít podíl na dlouhodobém rozpouštění

***Ukazuje se, že je draslík v cementech přítomen především ve své rozpustné formě jako síran, takže během procesu tuhnutí dojde ihned k jeho rozpuštění a následnému zreagování. Kdežto sodík je zabudovaný do krystalové mřížky a uvolňuje se postupně ve fázi, kdy už je proces tuhnutí ukončen. Tím může docházet k porušování struktury ztvrdlého betonu. Z uvedeného plyne, že sodík je v procesu vzniku ASR mnohem více nebezpečný. Přítomnost síranových iontů v procesu výpalu slínku má velký význam, bez přítomnosti síranů všechny alkálie, pokud nevytěkají při výpalu, se nenalézají jako dobře rozpustné alkalické sírany, ale jsou vázány ve slínkových minerálech.***

*Graf 1: Porovnání kinetiky vyluhování slínků připravených s dotovanými alkáliemi ve formě $Na_2CO_3$ a $K_2CO_3$*



*Graf 2: Porovnání kinetiky vyluhování slínků připravených s dotovanými alkáliemi ve formě $Na_2SO_4$ a $K_2SO_4$*




## 2. Stanovení vlivu alkálií působící na CBK zvnějšku a zjištění rozdílu reakce $Na^+$ a $K^+$ iontů

Klíčové informace o vnějším vlivu alkálií a zjištění rozdílu reakce $Na^+$ a $K^+$ iontů byly získány pomocí modifikované dilatometrické zkoušky ASTM C-1260-14.

Tato metoda umožňuje zjistit během 16 dní alkalicko-křemičitou reakci kameniva s alkáliemi ve zkušebních maltových trámečcích o rozměru 25 x 25 x 28,5 cm. Trámečky se umístí do 1 N roztoku NaOH na dobu 14 dní a po celou dobu se udržuje teplota 80 °C.

Za účelem zjištění rozdílného chování alkálií dodaných zvenčí tzn., že chování není ovlivněno způsobem jejich vazby, byla metoda modifikována a trámečky byly ukládány jak do 1 N roztoku NaOH, tak roztoku KOH.

Trend rozdílného chování je patrný na výsledcích uvedených v Tabulce 3. Zatímco alkalická rozpínavost vzorků uložených v roztoku KOH (vnější vliv draselných iontů) nepřekročila hodnotu 0,1 % délky, vzorky uložené v roztoku NaOH (vnější vliv sodných iontů) vykazovaly alkalickou rozpínavost v závislosti na obsahu strusky.

*Tabulka 2 Klasifikace kameniva do betonu z hlediska rizika reakce s alkáliemi (zkouška podle TP 137)*

| | | |
|---|---|---|
| nízká | ≤ | 0,1 % délky |
| střední | > | (0,1 - 0,2) % délky |
| vysoká | > | 0,2 % délky |

*Tabulka 3 Porovnání alkalické rozpínavosti v roztoku NaOH a KOH*

| Označení cementu | Obsah strusky (% hm.) | $Na_2O$ | $K_2O$ | ekv. $Na_2O$ | Alkalická rozpínavost v NaOH (%) | Alkalická rozpínavost v KOH (%) | % Rozpínavost v KOH/NaOH |
|---|---|---|---|---|---|---|---|
| CEM I | 0 | 0,18 | 0,83 | 0,73 | 0,210 | 0,075 | 280 |
| CEM II/A-S | 10 | 0,22 | 0,79 | 0,74 | 0,174 | 0,063 | 276 |
| CEM II/A-S | 20 | 0,25 | 0,75 | 0,74 | 0,140 | 0,069 | 203 |
| CEM II/B-S | 30 | 0,28 | 0,7 | 0,74 | 0,097 | 0,048 | 202 |

Současně byly na stejných směsích prováděny dlouhodobé dilatometrické zkoušky podle ČSN 72 1179, kdy byly jednotlivé alkálie přidávány do záměsové vody tak, aby jejich obsah odpovídal 1,2 % ekv. $Na_2O$ v cementu (za účelem zjištění rozdílného chování alkálií, které jsou vnášeny cementy). Zde byly rozdíly mezi účinkem $Na_2O$ a $K_2O$ mnohem menší.

*Tabulka 4 Výsledky dlouhodobých dilatometrických zkoušek podle ČSN 72 1179*

| Označení cementu | Obsah strusky (% hm.) | $Na_2O$ | $K_2O$ | ekv. $Na_2O$ | Alkalická rozpínavost (%) Cement dotovaný Na | Alkalická rozpínavost (%) Cement dotovaný K |
|---|---|---|---|---|---|---|
| CEM I | 0 | 0,18 | 0,83 | 0,73 | 0,036 | 0,030 |
| CEM II/B-S | 30 | 0,28 | 0,7 | 0,74 | 0,011 | 0,011 |

*Tabulka 5 Klasifikace kameniva do betonu z hlediska rizika reakce s alkáliemi po 6 měsících (zkouška podle ČSN 721179)*

| | | |
|---|---|---|
| nízká | ≤ | 0,070 % délky |
| střední | > | (0,070-0,100) % délky |
| vysoká | > | 0,100 % délky |

***Z dosažených výsledků dilatometrických zkoušek je evidentní rozdíl mezi účinky sodíku a draslíku a rozdíl mezi tím, kdy jsou alkálie obsaženy v betonové směsi od počátku, nebo když vstupují zvenčí až do ztvrdlého betonu i při vysoké koncentraci.***

***Lze tedy vyvodit, že průběh ASR nezávisí pouze na obsahu ekv. $Na_2O$ ale také na mobilitě a rychlosti difuze alkálií v pórovém roztoku (sodík má menší iontový poloměr a vyšší hustotu náboje).***

***Dále se potvrdilo, že směsné cementy mají na průběh ASR značný vliv. Složky cementu, díky pucolánové reakci, snižují celkovou alkalitu vody v pórech ztvrdlého betonu a obsah alkálií schopných vstupovat do reakce (alkálie jsou např. ve strusce***

***přítomny ve sklovité fázi, takže se snižuje jejich dostupnost). Dále snižují propustnost a možnost difuze v betonu. Složky mají vysoký obsah reaktivního $SiO_2$ velice jemně rozptýlený, a reakce ASR tedy proběhne ještě dříve, než stihne směs zatvrdnout.***

## 3. Nová metodika zkoušení – obsah alkálií v roztoku nad hydratujícím cementem

Při stanovení obsahu jednotlivých alkálií se prokazuje, že podstatně větší vliv mají ionty $Na^+$ než ionty $K^+$, to znamená, že při výpočtu alkalického ekvivalentu (ekv. $Na_2O$) ionty $K^+$ zkreslují výsledek. Je potřeba se zaměřit na obsah iontů $Na^+$, který hraje dominantní roli při vzniku ASR.

Průběh ASR rovněž závisí na mobilitě a rychlosti difuze alkálií v pórovém roztoku (sodík má menší iontový poloměr a vyšší hustotu náboje), proto metodika zahrnuje stanovení výluhu jednotlivých sodných a draselných alkálií a rozšiřuje tak stanovení obsahu ekv. $Na_2O$.

Na omezení vzniku alkalicko-křemičité reakce mají vliv především složky cementu s pucolánovými nebo latentně hydraulickými vlastnostmi. Tyto složky snižují celkovou alkalitu vody v pórech ztvrdlého betonu a obsah alkálií schopných vstupovat do reakce (alkálie jsou například ve strusce přítomny ve sklovité fázi, takže se snižuje jejich dostupnost). Dále snižují propustnost a možnost difuze v betonu. Složky mají vysoký obsah reaktivního $SiO_2$ velice jemně rozptýleného, a reakce ASR tedy proběhne ještě dříve, než stihne směs zatvrdnout a nedochází tak k expanzi a vzniku trhlin.

Dosažené výsledky byly použity k vývoji nové metodiky, která vhodně doplňuje hodnocení pomocí alkalického ekvivalentu. Cílem vytvoření nového zkušebního postupu je rychlá laboratorní kontrola cementu k vyhodnocení rizika vzniku alkalicko-křemičité reakce.

Zvolený poměr hlavních složek směsného cementu je úměrný obsahu a lokaci jednotlivých alkálií $Na^+$ a $K^+$. Vhodný poměr hlavních složek cementu pro jeho bezpečné použití v CBK s ohledem na vznik ASR se tak určí z modelového grafu pro daný cement.

Na základě výsledků dilatometrických a výluhových zkoušek je sestrojen modelový graf pro každý vyráběný cement. V grafu jsou znázorněny vztahy mezi alkalickou rozpínavostí daného cementu s vybraným kamenivem, obsahem hlavní složky a obsahem alkálií v roztoku nad hydratujícím cementem v čase 1 hodina.

Pro zjednodušení se v následujících příkladech použití předpokládá jako hlavní složka struska.

**Příklady použití**

Použitím této metodiky se sestrojí modelový graf pro určení rizikovosti daného cementu ke vzniku ASR. Takový graf popisuje chování daného cementu během zrychlené dilatometrické zkoušky rozpínání podle TP 137 příloha č. 1. (V metodice se uvažuje použití kameniva droba, jako středně reaktivního kamenivo nejčastěji používaného na stavbách cementobetonových pozemních komunikací v ČR.) Podle modelového grafu lze doplnit charakteristiku cementu o informaci úrovně rizika vzniku ASR.

Díky těmto výsledkům bude pro výrobce možné určovat chování daného cementu s kamenivem droba při dilatometrické zkoušce a obsah strusky potřebný k tomu, aby se alkalická rozpínavost pohybovala v rozmezí do 0,1 %, hodnocení jako nízká rizikovost nebo do 0,2 %, hodnocení jako střední rizikovost (hodnocení podle TP 137 Tabulka č. 2 – Klasifikace

kameniva do betonu z hlediska rizika reakce s alkáliemi). Chování je specifické pro každý cement a nesporná výhoda spočívá v tom, že v grafech jsou znázorněny vztahy, ve kterých je zohledněno jak složení cementu, tak přítomnost kameniva, které má vliv na vznik a průběh alkalicko-křemičité reakce. Uvedená metodika výluhové zkoušky jednotlivých alkálií určuje míru rizikovosti použitého směsného cementu pro vznik alkalicko-křemičité reakce v cementobetonových krytech (CBK).

Příklad 1:

Pro daný směsný cement se vytvoří modelový graf. Na tomto grafu bude možné odečítat vztah mezi alkalickou rozpínavostí a obsahem strusky, kterou znázorňuje modrá křivka. Výrobce tak bude moci optimalizovat obsah strusky v cementech typu CEM II/A-S (obsah strusky (6-20) %) a CEM II/B-S (obsah strusky (21-35) %).

Na grafu je šipkami purpurové barvy naznačený postup při odečítání. Alkalická rozpínavost je pro tento cement s obsahem strusky 20 % přibližně 0,135 %, tzn. že směs daného cementu a kameniva droba bude při dilatometrické zkoušce vykazovat střední rizikovost.

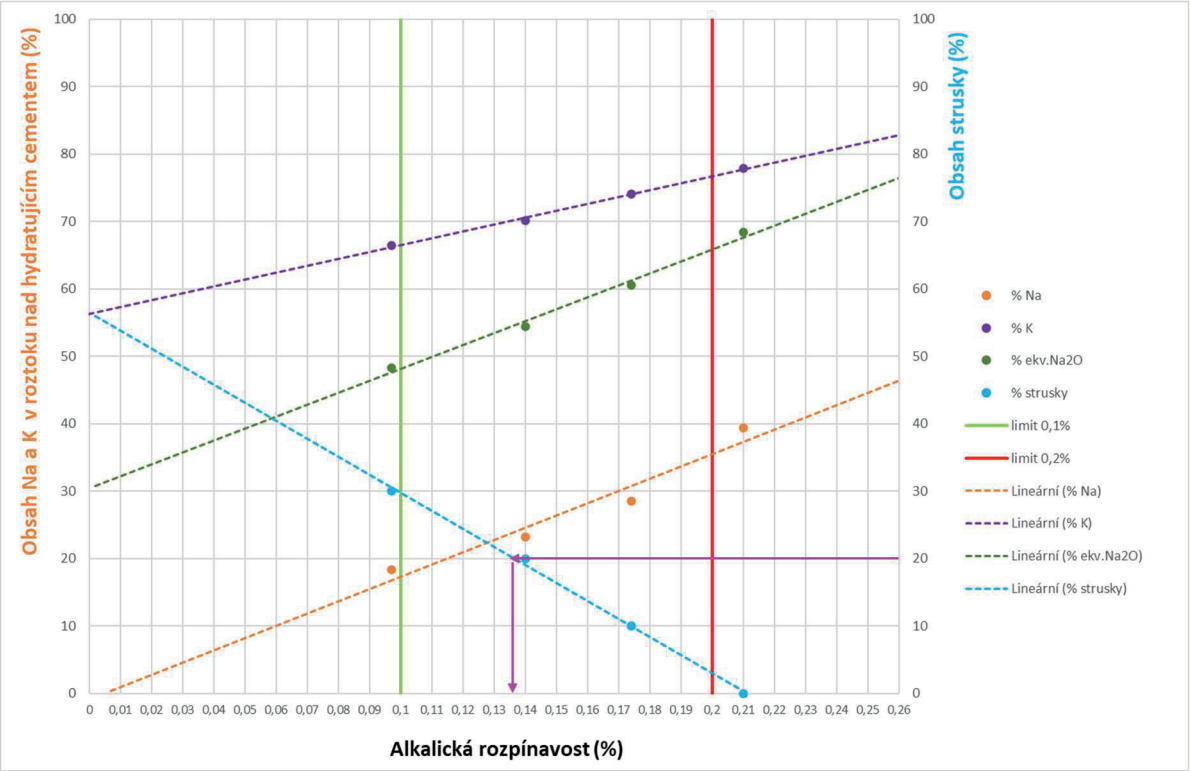
Výrobce cementu bude moci průběžně pomocí rychlé laboratorní zkoušky stanovovat obsah vyluhovaných alkálií a jednoduše tak ověřovat vlastnosti cementu ve vztahu k riziku vzniku ASR.

Příklad 2:

Zpracovatel nebo odběratel cementu nebude znát informaci o obsahu strusky v cementu (v rámci označení struskových cementů se obsah strusky pohybuje od 6 do 20 % pro CEM II/A-S a od 21 do 35 % pro CEM II/B-S). Pomocí modelového grafu bude moci určit vztah mezi podílem vyluhovaného sodíku a alkalickou rozpínavostí. Provedení výluhové zkoušky a stanovení alkálií ve výluhu je rychlá laboratorní kontrola. Ověří se tak, zda cement odpovídá svému účelu použití a že je riziko vzniku ASR odpovídající očekávanému.

Provede se výluhová zkouška a stanoví se poměr vyluhovaného sodíku (případně alkálií) např. 20 %. Na oranžové křivce se pro daný cement odečte alkalická rozpínavost 0,115 %, tzn., že směs daného cementu a kameniva droba bude při dilatometrické zkoušce vykazovat střední rizikovost (hodnocení podle TP 137 Tabulka č. 2 – Klasifikace kameniva do betonu z hlediska rizika reakce s alkáliemi).

*Graf 3: Modelový vztah mezi alkalickou rozpínavostí, obsahem strusky a obsahem alkálií dostupných během procesu tvrdnutí*




## 4. Závěr

Na základě výsledků dilatometrických zkoušek (zrychlené a dlouhodobé, kdy první zohledňuje především vliv alkálií působící zvenčí a ta druhá hodnotí především vliv alkálií obsažené v systému) lze říci, že výrazně větší vliv mají alkálie vstupující zvenčí, zejména $Na^+$, (rozmrazovací sole) oproti $K^+$.

Používání rozmrazovacích solí se při zimní údržbě nelze vyhnout, také používání kameniva s minimálním či nulovým obsahem reaktivních forem $SiO_2$ není vždy možné, vzhledem k dostupnosti lokalit, kde se takové kamenivo těží, a i takové kamenivo může v rámci jedné lokality mít proměnlivé vlastnosti, což je dáno existencí mnoha forem reaktivního $SiO_2$. Takže nejefektivnější cestou kontroly vzniku ASR je návrh betonové směsi, který počítá s možností výskytu reaktivního kameniva ve směsi.

V rámci tohoto projektu bylo prokázáno, že na omezení vzniku alkalicko-křemičité reakce mají vliv především složky cementu s pucolánovými vlastnostmi, jako je struska, popílek, mikrosilika nebo přírodní pucolány. Takto se totiž eliminuje nebezpečí vzniku reakce vlivem zvýšené alkalické reakce přísunem z vnějšku (posypová sůl).

- Podstatně snižují riziko vzniku ASR tím, že reagují s hydroxidem vápenatým (portlanditem) za vzniku převážně kalcium silikát hydrátů CSH. Důsledkem této interakce je snížení pH.

- Velmi jemně semletá struska v cementu vnáší rovnoměrně rozložený reaktivní $SiO_2$, který může reagovat s alkáliemi z cementu ještě během procesu tuhnutí, kdy tvorba alkalicko-křemičitého gelu není škodlivá, protože je cementová pasta ještě plastická.
- Alkálie jsou ve strusce (ve složkách cementu) vázány ve sklovité fázi, tím se snižuje jejich dostupnost a reaktivita. Proto se použitím náhrad cementu relativně snižuje obsah alkálií přítomný v cementu.
- Granulometrická návaznost mletého slínku a mleté strusky vede k hutnější struktuře a tím se snižuje možnost vlivu alkálií působících zvenčí (rozmrazovací sole), které by se mohly dostat k reaktivním zrnům kameniva.
- Po ztuhnutí je struktura cementového kamene více uzavřená a hutná a brání tak prostupu alkálií působících zvenku. Sníží se také průnik vody do zatvrdlého betonu.

***Pro zvýšení trvanlivosti cementobetonových krytů pozemních komunikací omezením vlivu alkalicko-křemičité reakce je vhodné ve srovnání s portlandským cementem CEM I použití směsných cementů s obsahem (20–50) % další hlavní složky s pucolánovými vlastnostmi nebo latentně hydraulickými vlastnostmi. Vhodný poměr hlavních složek cementu závisí na obsahu jednotlivých alkálií $Na^+$ a $K^+$ a lze jej stanovit s využitím nové zkušební metodiky a vyhodnocení dle příslušného modelového grafu pro daný cement. Nová zkušební metoda doplňuje hodnocení za pomocí alkalického ekvivalentu a přináší možnost kvantifikovat citlivost celého systému pro vznik ASR a zjišťovat úroveň rizika.***

## Zdroje:

[1] Reakce kameniva s alkáliemi v betonu (Ing. Sylva Modrý)

[2] Závěrečné zprávy z let 2019-2022 k projektu „Zvýšení trvanlivosti cementobetonových krytů (CBK) pozemních komunikací omezením vlivu alkalicko-křemičité reakce (ASR)“.



# Work On Progress.
# Jsme motorem stavebnictví budoucnosti.



**STRABAG a.s.**
Kačírkova 982/4
158 00 Praha 5 – Jinonice






Společnost STRABAG a.s. patří k předním stavebním společnostem na českém trhu. Svou činností pokrýváme všechny obory stavebnictví a máme pobočky na celém území České republiky. Sázíme na nejnovější technologie a digitalizaci, která je pro nás synonymem transparentnosti.

Věříme, že klíčovým faktorem úspěchu je vysoká profesionalita našich pracovníků, jejich nadšení pro společný cíl a schopnost spolupráce.

Pokládka cementobetonových vozovek je jednou z našich specializací v oboru dopravního stavitelství. Naši odborníci mají bohaté zkušenosti s výstavbou vozovek i letištních ploch. V tomto oboru patříme ke světové špičce, náš tým realizuje pokládky betonových vozovek nejen na stavbách v České republice, ale i v zahraničí. Podle druhu stavby a potřeb zákazníka provádíme nejrůznější druhy povrchové úpravy betonu. Spektrum našich služeb zahrnuje také zhotovení monolitických svodidel a různé profily betonových odvodňovacích prvků.

**www.strabag.cz**

**STRABAG**
WORK ON PROGRESS

SKANSKA



# Stavíme svět, ve kterém sami chceme žít.

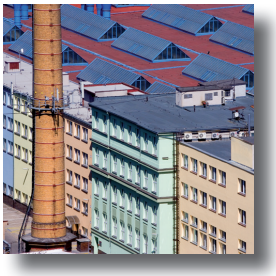
## Cementobetonové kryty

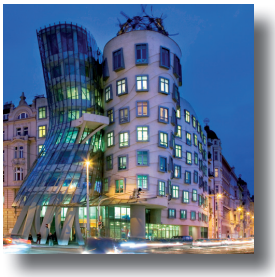
- Dálnice
- letištní plochy
- odpočívky
- kruhové objezdy
- cyklostezky
- betonové plochy
- a mnoho dalšího...

www.skanska.cz
www.jobs.skanska.com
job@skanska.cz

Všechny stavby spojuje jedno.

**Cement.**

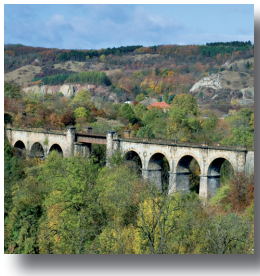











SVAZ VÝROBCŮ CEMENTU ČR

*Českomoravský cement, a. s.*

*Lafarge Cement, a. s.*

*CEMEX Czech Republic, s. r. o.*

*Cement Hranice, a. s.*

**www.svcement.cz**

EUROVIA






# NA SPOLEČNÉ CESTĚ









www.eurovia.cz



Součást skupiny | VINCI CONSTRUCTION

www.vinci-construction.cz

# metrostav infrastructure

## spolu najdeme cestu




**Metrostav Infrastructure** do svých řad přijme studenty i absolventy na placenou krátkodobou i dlouhodobou praxi jak v kanceláři, tak na stavbě.

Nabízíme **flexibilní pracovní úvazek** s mnoha **benefity**. Našich zaměstnanců si vážíme a podporujeme je v kariérním i osobním rozvoji.

Můžete u nás vypracovat svoji diplomovou práci nebo se rovnou podílet na strategických projektech. Také se v praxi seznámíte s unikátními technologiemi a stroji.

Máte chuť spolupracovat? Pošlete nám životopis a stručnou představu o působení u nás. Více informací najdete na **https://www.m-infra.cz/**.

---

e-mail: kariera@m-infra.cz
www.m-infra.cz/kariera

FB: metrostavinfrastructure
IG: @metrostavinfrastructure

# Mediální partneři

BETON

časopis stavebnictví

materiály pro stavbu

silnice +mosty

STAVITEL

silniční obzor

100 let trvání časopisu



**STRABAG a. s.**
Kačírkova 982/4, 158 00 Praha 5-Jinonice

**Skanska a. s.**
Křižíkova 682/34a, 186 00 Praha 8-Karlín

**Svaz výrobců cementu ČR**
K Cementárně 1261, 153 00 Praha 5-Radotín

**EUROVIA CS, a. s.**
U Michelského lesa 1581/2, 140 00 Praha 4

**Metrostav Infrastructure a.s.**
Koželužská 2246/5, 180 00 Praha 8-Palmovka

Vydal: Výzkumný ústav maltovin Praha, s.r.o.;
Na Cikánce 614/2, 153 00 Praha 5-Radotín; www.vumo.cz
ISBN 978-80-906541-5-0