

# Alkalicko-křemičitá reakce – důsledky pro cementobetonové kryty

(Rolf Breitenbücher, *Strasse + Autobahn*, č. 4/2006, str. 205 – 209)

V různých oblastech Německa byly v posledních letech zjištěny na cementobetonových krytech trhliny, které jsou spojovány s alkalicko-křemičitou reakcí. Další možné důvody pro vznik těchto trhlin jako jsou např. vynucené napětí způsobené teplotními změnami nebo smršťováním nebo zatížení dopravou je třeba také brát v úvahu. Skutečný podíl, který má alkalicko-křemičitá reakce na tvorbě trhlin, bude v brzké době zkoumán v příslušných studiích. Aby již nyní byla učiněna opatření na zamezení budoucího poškození cementobetonových krytů alkalicko-křemičitou reakcí, stanovilo Spolkové ministerstvo dopravy, stavebnictví a bydlení (BMVBW – Bundesministerium für Verkehr, Bau- und Wohnungswesen) ve Všeobecném oběžníku pro silniční stavitelství (ARS – Allgemeine Rundschreiben Strassenbau) 15/2005 dodatečná opatření při volbě vstupních materiálů do betonu. To se v podstatě týká celkového vyloučení kameniva citlivého na alkálie, odbornými posudky kamenivo ohodnocené jako kritické a vymezení obsahu alkálií v cementu do betonu pro cementobetonové kryty.

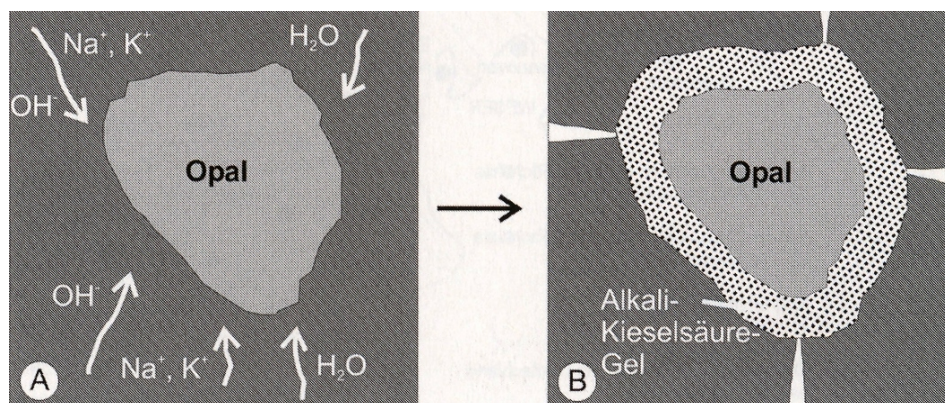
## 1. Úvod

V posledních letech se na různých úsecích vozovek z cementobetonových krytů po celém Německu vyskytují trhliny, které jsou dávány do souvislosti s alkalicko-křemičitou reakcí (AKR) jako jejich příčinou vzniku. Alkalicko-křemičité reakce jsou známy přibližně od roku 1940, kdy bylo v USA poprvé zjištěno poškození betonových stavebních dílů, které bylo zpětně označeno za reakci mezi alkáliemi cementu a určitého kameniva [1, 2]. Až do roku 1965 panoval v Německu názor, že na základě geologických útvarů zde v Německu není nutné počítat s významnější alkalicko-křemičitou reakcí. Poškozeními na mostě Lachwehrbrücke ve spolkové zemi Šlesvicko-Holštýnsko, které si během cca 3 let vyžádaly jeho kompletní demolici, se stala tato problematika aktuální i v Německu [3]. Od té doby byly k zabránění této poškozující reakce regulována nutná opatření ve směrnici DAfStb (Deutscher Ausschuss für Stahlbeton – Německého výboru pro železobeton) „Preventivní opatření proti škodlivé alkalické reakci v betonu (Alkalická směrnice)“ [4].

## 2. Alkalicko-křemičitá reakce

### 2.1 Mechanizmy a předpoklady

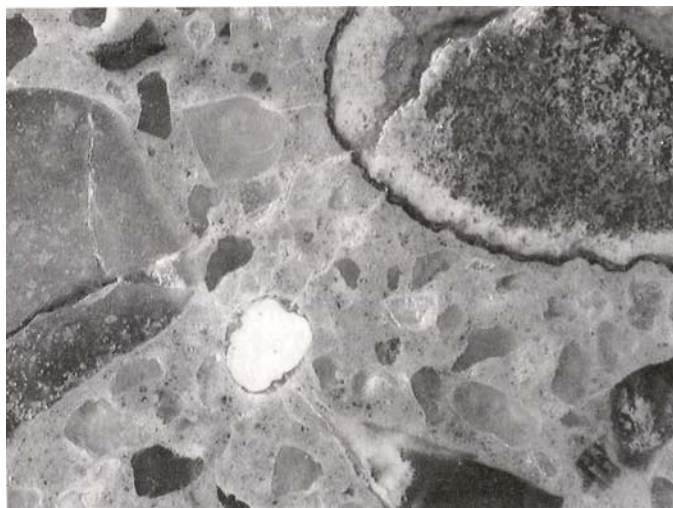
Při alkalicko-křemičité reakci reagují amorfni oxid siřičitý ( $\text{SiO}_2$ ) a hydroxid alkalického kovu ( $\text{NaOH}$ ,  $\text{KOH}$ ) – za přítomnosti vlhkosti – na více či méně hustý alkalicko-křemičitý gel (rovnice (1), obrázky 1 a 2):



### Legenda

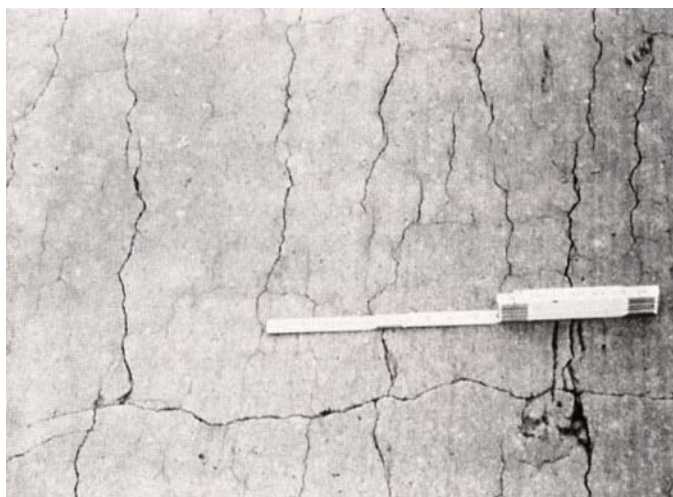
Alkali-Kieselsäure-Gel alkalicko-křemičitý gel

**Obrázek 1 – A: Reakce amorfniho oxidu siřičitého s NaOH, KOH a vodou, B: Zvětšování objemu při tvorbě alkalicko-křemičitého gelu**



**Obrázek 2 – Tenký výbrus betonu s alkalicko-křemičitou reakcí**

Po nasáknutí kameniva je tato reakce spojena s objemovou expanzí. Protože kamenivo je v matici malty pevně usazeno, není k dispozici odlehčující prostor pro expanzi. Objemový nárůst tak vede k vnitřnímu tlaku při bobtnání, který může v krajních případech činit až  $20 \text{ N/mm}^2$  [1]. Toto namáhání přesahuje pevnost v tahu přijatelnou pro beton, takže mohou velice snadno vznikat trhliny. Tyto trhliny jsou většinou jemně rozloženy a síťovité, nejsou omezeny pouze na viditelnou okrajovou oblast, nýbrž se mohou táhnout celou cementobetonovou strukturou (obrázek 3).



**Obrázek 3 –Typická trhlina zapříčiněná alkalicko-křemičitou reakcí**

Alkalicko-křemičité reakce probíhají během delšího časového období. Alkálie prosakují z uvolněných pórů postupně také již vytvořenou vrstvou gelu a dále reagují s amorfním oxidem křemičitým v jádru kameniva. Současně se mohou z gelu znovu uvolňovat alkalické hydroxidy, které jsou rovněž k dispozici pro pokračování reakce [1].

Každé kamenivo obsahující oxidy křemičité se v silně alkalickém roztoku rozpouští. Rychlost reakce se však liší v závislosti na stavu vytvořené struktury. Krystalický kvarcit reaguje například tak pomalu, že během stavebně technické doby životnosti může být označen jako inertní. Ve smyslu zde pojednávaných škodlivých alkalicko-křemičitých reakcí je významné pouze kamenivo s amorfními oxidy křemičitými. Ale i v této skupině kameniva existují významné rozdíly v reaktivnosti. V Německu patří mezi nejreaktivnější kamenivo opály a pazourky, které se téměř bez výjimky vyskytují na severu Německa. To se odrazilo také ve vývoji Směrnice „Preventivní opatření proti škodlivé alkalické reakci v betonu (tzv. Alkalická směrnice)“ Německého výboru pro železobeton. V jejím prvním vydání (1974) byla její platnost omezena výhradně na oblasti spolkové země Šlesvicko-Holštýnsko a na severoněmeckém pobřeží, kde se toto velmi reaktivní kamenivo vyskytuje. Mezitím byla zjištěna alkalicko-křemičitá reakce také v regionech, ve kterých byly použity droby. Podle toho byla oblast

platnosti směrnice rozšířena. Zároveň byla alkalicko-křemičitá reakce ojediněle zpozorována také v betonech s drceným kamenivem z oblasti horního Rýna. Tato první, časově velmi vzdálená, pozorování alkalicko-křemičité reakce odrážejí především zřetelné rozdíly v reaktivnosti kameniva.

Jak je již patrné ze srovnání (1), musely být pro vznik škodlivé alkalicko-křemičité reakce stanoveny následující 3 podmínky:

- V betonu musí být obsaženo kamenivo příslušné zrnitosti citlivé na alkálie. U velmi jemných částic (menší než cca 1 mm) dochází k alkalicko-křemičité reakci stejně, jako u hrubších zrn, tlak při bobtnání zůstává ale vlivem menší velikosti zrn tak malý, že nevznikne žádné poškození ve formě trhlin.
- V kamenivu musí být obsaženo dostatečné množství alkálií. Podle dosavadních zkušeností [4,5] je možné počítat s alkalicko-křemičitou reakcí teprve, když obsah alkálií v betonu činí cca 3 kg/m<sup>3</sup>.
- K alkalicko-křemičité reakci dojde, pouze v případě, je-li beton dostatečně vlhký.

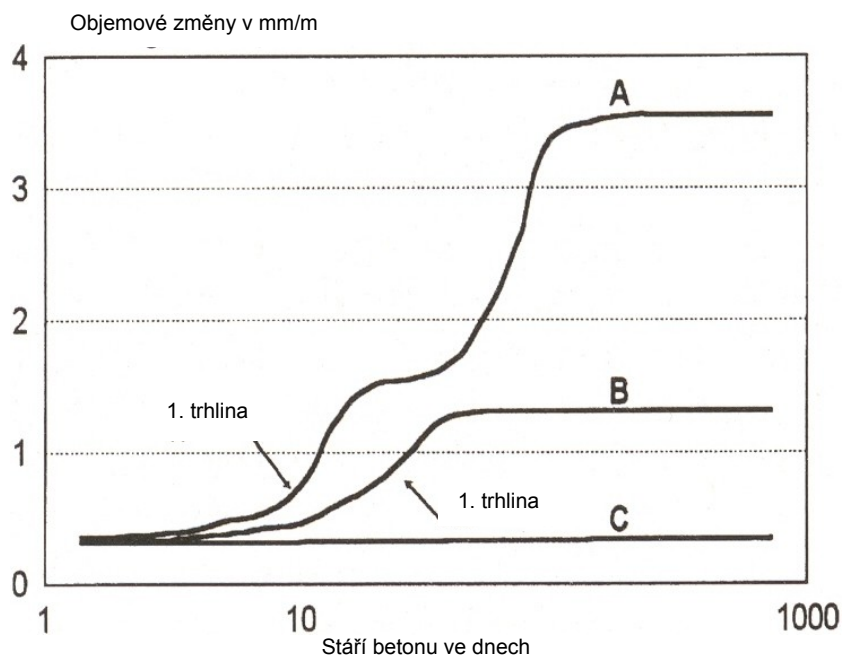
Při zjištění alkálií je třeba rozlišovat mezi interním a externím zdrojem. Již při výrobě betonu jsou alkálie uloženy v určitém množství ve vstupních materiálech (obzvláště v cementu). Alkálie mohou být také zaneseny z venku během používání vozovky, např. u stavebních dílů, které jsou v trvalém kontaktu s mořskou vodou, nebo u takových, které jsou ostřikovány alkalickými rozmrazovacími kapalinami.

## 2.2 Jak zabránit škodlivé alkalicko-křemičité reakci?

Pokud beton obsahuje kamenivo s SiO<sub>2</sub>, není v podstatě možné vzhledem k alkáliím obsaženým v cementu alkalicko-křemičité reakci zabránit. Je třeba ovšem vyloučit, aby alkalicko-křemičitá reakce – podmíněná odpovídajícím reaktivním kamenivem a pojivem- mohla proběhnout tak rychle, aby během předpokládané doby životnosti vozovky (většinou do 100 let a více) vedla k masivní tvorbě gelu a eventuálně i k poškození. Aby se této škodlivé alkalicko-křemičité reakci předešlo, musí být omezeny alespoň některé z uvedených předpokladů nutných pro její vznik.

V suchých vnitřních prostorech je zpravidla vlhkost vzduchu tak malá, že se zde vzhledem k chybějící vlhkosti alkalicko-křemičitá reakce prakticky nevyskytuje. Naproti tomu ve venkovních prostorech je prakticky nemožné této reakci zabránit cíleným zadržováním vlhkosti.

Při výrobě betonu zaujímá cement malý hmotnostní podíl. První možnost, jak zabránit alkalicko-křemičité reakci cementu je ohraničena tím, že obsah alkálií cementu je omezen. Podle příslušných předpisů – pokud je v betonu obsaženo kamenivo citlivé na alkálie – je třeba použít cement s nízkým obsahem účinných alkálií (NA-cement). Tento cement může, například jako portlandský cement, vykazovat ekvivalent Na<sub>2</sub>O maximálně 0,6 % hmotnosti (ekvivalent Na<sub>2</sub>O = Na<sub>2</sub>O + 0,658 x K<sub>2</sub>O). Účinnost tohoto omezení mohla být prokázána v četných zkouškách (obrázek 4). Tak nebylo ve výzkumu Starka a Wichta [1] naměřeno i u velmi reaktivního opálu žádné objemové změny při bobtnání v důsledku alkalicko-křemičité reakce, když ekvivalent Na<sub>2</sub>O cementu činil 0,70 % hmotnosti, zatímco při obsahu alkálií při 1,06 % hmotnosti příp. ještě více při 1,4 % hmotnosti byla pozorována deformace betonu přes 1 ‰.



#### Legenda

- A:** Ekvivalent  $\text{Na}_2\text{O}$  = 1,40 %  
Žula a opál
- B:** Ekvivalent  $\text{Na}_2\text{O}$  = 1,06 %  
Žula a opál
- C:** Ekvivalent  $\text{Na}_2\text{O}$  = 0,70 %  
Žula, rula a opál

**Obrázek 4 – Časový vývoj změn při bobtnání s rozdílným obsahem alkálií v cementu [1]**

Analogicky byly definovány odpovídající omezení týkající se obsahu alkálií a množství přísady také pro přísady do betonu. Například při použití kameniva citlivého na alkálie, nemá ekvivalent  $\text{Na}_2\text{O}$  přísady do betonu přesáhnout 8,5 % hmotnosti a množství přísady nesmí činit více než 2,5 % hmotnosti z množství cementu.

V případech, ve kterých také během používání dojde k zanesení alkálií z venku, není minimálně u citlivého kameniva (třída citlivosti EIII) samo omezení obsahu alkálií v cementu dostačující. V takových případech může být alkalicko-křemičitá reakci cíleně zabráněno výměnou kameniva.

### 3. Tvorba trhlin v cementobetonových krytech

#### 3.1 Příčiny vzniku trhlin

Jak již bylo uvedeno v kapitole 1, v posledních letech se na různých úsecích vozovek vyskytují trhliny v cementobetonových krytech, které jsou spojovány s alkalicko-křemičitou reakcí. Jedná se většinou o nápadné podélné trhliny, které jsou navzájem protkány jemnými příčnými trhlínami (obrázek 5). Tyto trhliny se často rozprostírají přes celou vozovku (odstavné pruhy a jízdní pruhy). V hlavním jízdním pruhu jsou trhliny přirozeně vyznačeny silněji. Primární příčinou může být nejsilnější zatížení těchto ploch pojezdem nákladních vozidel po vytvoření trhlin.

Na základě jádrových vývrtů mohl být na postižených úsecích bezpochyby prokázán alkalicko-křemičitý gel a tedy předtím proběhnutá alkalicko-křemičitá reakce. Co se týče příčiny vzniku trhlin je ale pouze možné s jistotou konstatovat, že v CB kytu vozovky byla překročena pevnost v příčném tahu betonu. Pro namáhání, která toto překročení způsobilo, přichází u cementobetonového krytu v úvahu kromě alkalicko-křemičité reakce i jiné příčiny.

Především je téměř bezprostředně po pokládce betonu třeba počítat s tím, že se ve vozovce vytvoří vynucená napětí, vyvolaná omezením deformace v důsledku hydratačního tepla, insolace (při vystavení slunečnímu záření) a následného nočního ochlazení [6].



**Obrázek 5 – Podélné trhliny cementobetonového krytu vozovky jsou protkány příčnými trhlinami**

Kromě toho mohou i změny smršťováním vyvolat vynucené napětí vlivem teplotní změny podmíněné povětrnostními vlivy v průběhu času a roční doby [7]. V minulých letech byly často kryty vozovek vyráběny dvouvrstvé s recyklovanou betonovou drtí ve spodní betonové vrstvě a s obzvláště tvrdým kamenivem ve svrchní betonové vrstvě. Podmíněny rozdílnými teplotními součiniteli pružnosti docházelo v obou vrstvách – především při větších změnách teplot – ke zvýšení napětí v krytu vozovky [8].

Kromě toho se v posledních letech zvýšily nároky na vozovky ohledně dopravního zatížení. Pokud nebude zvýšeno také povolené zatížení nápravy, bude zaznamenáno zřetelné zvyšování podílu nákladních vozidel na celkové dopravě. V každém případě je v současnosti třeba vycházet z vyšší rychlosti, obzvláště u nákladní dopravy. Obojí vede na rozdíl od dřívějších dopravních poměrů k zvýšenému dynamickému zatížení cementobetonových krytů vozovek, následkem čehož v průběhu mnoha milionů změn zatížení není také možné vyloučit vnitřní porušení struktury.

Ale také ohledně alkalicko-křemičité reakce je možné brát v úvahu jisté změny. Dříve byly posypové soli zpravidla jako více méně suchý granulát aplikovány na již zmrzlé nebo zasněžené vozovky. Pomocí větru vzniklého jízdou vozidel byly opět částečně z vozovky odnášeny. Dnes naopak jsou často ještě na suchý povrch vozovky preventivně sypány zvlhčované granuláty, které z větší části zůstávají ležet na vozovce. Následně projíždějící vozidla zanesou posypové materiály s obsahem alkálií na rozdíl od minulosti mnohem intenzivněji do cementobetonového krytu a tím se zvýší externí zanášení alkáliemi.

S ohledem na četnost možností, jak vyvolat napětí ve vozovkách s cementobetonovým krytem, není možné v běžném případě vztahovat tvorbu trhlin na jednu jedinou příčinu. Spíše je třeba vycházet z kombinace více vlivů, které se vyskytují zároveň nebo také s časovým posunem. Právě proto již zpravidla není zpětně možná diferenciací, minimálně ta kvantitativní, ohledně jednotlivých účinků. Jako jediná příčina vzniku trhlin je zpětně identifikovatelná alkalicko-křemičítá reakce na základě trvale se tvořícího alkalicko-křemičitého gelu. Ta se zjišťuje pomocí tenkých výbrusů (viz obrázek 2). Ale i to je možné pouze kvantitativně. Jaké vnitřní napětí se přitom zvýšilo a také otázka, jak velké přispění alkalicko-křemičité reakce v konkrétním případě vedlo k tvorbě trhlin, zůstává stále nezodpovězeno. K tomu bude v blízké době proveden odpovídající výzkum ve Sdruženém výzkumném projektu podporovaném Spolkovým ministerstvem dopravy, stavebnictví a bydlení (BMVWB – Bundesministerium für Verkehr, Bau- und Wohnungswesen).

### 3.2 Opatření na zamezení vzniku alkalicko-křemičité reakce ve vozovkách s cementobetonovým krytem

Až do nedávné doby nebyly v technických předpisech zavedeny žádné zvláštní podmínky pro zamezení alkalicko-křemičité reakce ve vozovkách s cementobetonovým krytem. V dosavadním znění Doplňujících technických smluvních podmínek a směrnic pro stavbu cementobetonových vozovek (ZTV Beton-StB – **Z**usätzliche **T**echnische **V**ertragsbedingungen und Richtlinien für den Bau von Fahrbahndecken aus Beton) byl odkaz na opatření směrnice DAfStb (**D**eutscher **A**usschuss für **S**tahlbeton – Německého výboru pro železobeton) „Preventivní opatření proti škodlivé alkalické reakci v betonu (Alkalická směrnice)“. V doplňujících smluvních podmínkách ZTV Beton-StB bylo v roce 2001 zavedeno všeobecné omezení obsahu alkálií v cementu na ekvivalent  $\text{Na}_2\text{O}$  1,0 % hmotnosti, což vyplývalo spíše s ohledem na udržení minimálního hydrického přetvoření silničního betonu, než s ohledem na alkalicko-křemičitou reakci.

Na základě trhlin, které se mezitím vyskytly na několika cementobetonových vozovkách, a u kterých nemohla být alkalicko-křemičitá reakce alespoň vyloučena, byla nyní ze strany Spolkového ministerstva vydána se Všeobecným oběžníkem pro silniční stavitelství (ARS – Allgemeine Rundschreiben Strassenbau) číslo 15/2005 z 2. července 2005 Doplňující opatření na zamezení poškození vozovek s cementobetonovým krytem v důsledku alkalicko-křemičité reakce (AKR).

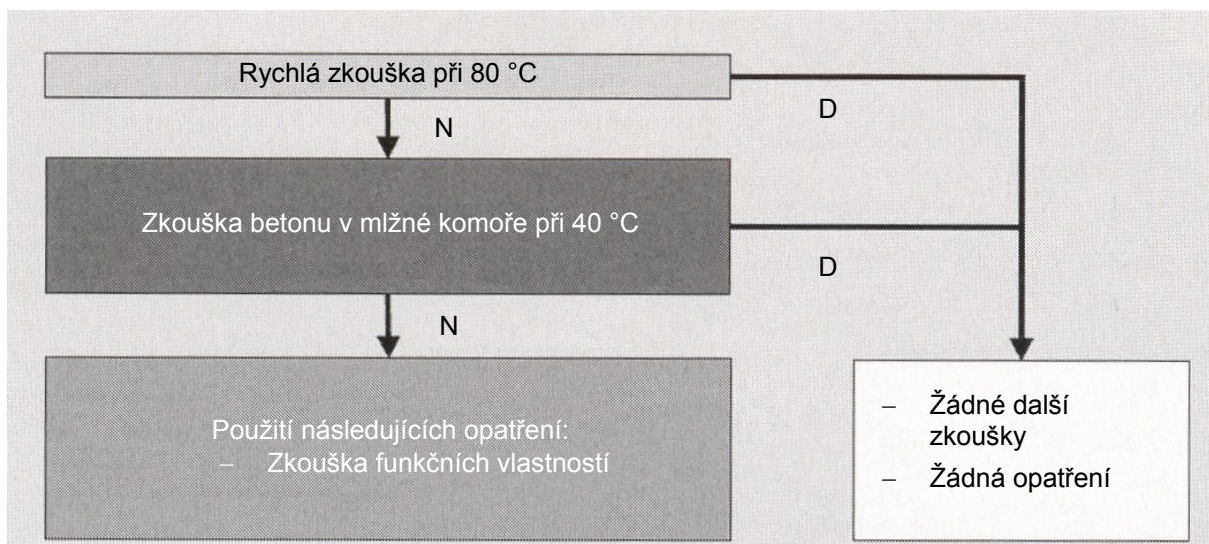
Týkají se především následujících omezení v používání kameniva do silničního betonu:

- a) Kamenivo, ve směrnici DAfStb „Preventivní opatření proti škodlivé alkalické reakci v betonu (Alkalická směrnice)“ označené jako reaktivní s alkáliemi, nesmí být obecně při stavbě vozovek s cementobetonovým krytem použito. To se týká převážně opálu, křemičité křídly a pazourku.
- b) Droba, křemenný porfyr, granulovaná drť ze štěrku z Horního Porýní, recyklované kamenivo a veškerá v Německu zavedená kameniva mohou být při stavbě vozovky z betonu použita pouze v případě, že je prokázána jejich vhodnost pro daný účel odborným posudkem od příslušného orgánu.

V dosavadních výzkumech na jádrových vývrtech z vozovek s trhlinami byla zjištěna alkalicko-křemičitá reakce v betonu s drobou, křemenným porfyrem a granulované drťí ze štěrku z Porýní, když je toto kamenivo použito v drcené formě (drť). Na základě čerstvých ploch zlomů není zvýšená reaktivita tohoto kameniva vůči alkáliím nijak zvláštní. Podle toho se výše uvedená omezení pro kameniva vztahují především jen na dodávky drceného kameniva. V odpovídajících výzkumech se mezitím ukázalo, že – obzvláště v oblasti severního Saska, Durýnska a Saska-Anhaltska – i přírodní štěrky, droby a křemenné porfyry mohou mít sklon k zesílené alkalicko-křemičité reakci. Proto v určitých případech mohou být aplikována doplňující národní opatření vycházející z Všeobecného oběžníku ARS.

Prokázání vhodnosti kameniva výše uvedeného bodu b) vyžaduje podle okolností delší časový interval. U konkrétních projektů je nutné zajistit znalecké posudky během kratší doby. Aby to bylo možné, je zpravidla nezbytný dvouúrovňový postup.

Základní vhodnost kameniva by měla být přezkoušena pro určité naleziště příp. dodavatelský závod již velmi předběžně před počátkem stavebních prací nebo také bez existence konkrétního projektu. Toto základní zkoušení může být rovněž prováděno ve dvou případně třech úrovních (obrázek 6). Pokud kamenivo obstojí již v rychlé zkoušce, ve které je kámen vystaven vysoce alkalickému prostředí při 80 °C, pak je toto kamenivo možné neomezeně použít při stavbě vozovek s cementobetonovými kryty. Ale ani negativní výsledek této rychlé zkoušky – velmi intenzivní nárazová zkouška (crash test) – nevede k celkovému vyloučení. V tomto případě je hodnocené kamenivo následně podrobena reálné zkoušce betonu (definovaný beton s cementem bohatým na alkálie (ekvivalent  $\text{Na}_2\text{O}$  cca 1,3 % hmotnosti)) po dobu 9 měsíců ve Wilsonově mlžné komoře při 40 °C. Je-li nyní prokázáno pozitivní chování, je toto kamenivo také považováno za vhodné pro stavbu vozovek.



### Legenda

D    dostačující výsledek  
N    nedostačující výsledek

**Obrázek 6 – Schéma zkoušení kameniva**

Při negativním výsledku zkoušky v mlžné komoře existuje ještě možnost podrobit kamenivo zkoušce funkčních vlastností pro konkrétní předpokládaný beton. Je možné, že se kamenivo chová ve spojení s příslušným cementem, který případně obsahuje méně alkálií, jako výše uvedený zkušební cement, nebo ve spojení s jiným složením betonu v mlžné komoře dostatečně vhodně tak, že není třeba se alkalicko-křemičité reakce obávat. Tato možnost, prokázat nezávadnost kameniva ohledně alkalicko-křemičité reakce ve třetí úrovni, je ale spíše teoretická. Ve většině případů není před počátkem stavebních prací k dispozici zkušební doba činící 9 měsíců pro přezkoušení konkrétního betonu – vstupní materiály a složení specifické pro projekt musí být známo.

Výzkumy k základní vhodnosti kameniva jsou z pravidla prováděny mnohem dříve před započítáním stavebních prací. Až po dodávku pro konkrétní projekt není možné vyloučit mimo jiné změny v ložisku suroviny. Pro získání dostatečné jistoty, že použité kamenivo nevyvolá poškození způsobené AKR, je třeba je ještě jednou, bezprostředně před počátkem betonářských prací, nyní se zohledněním konkrétního betonu (cement, přísady, složení atd.), znalecky posoudit.

Při tomto jednání není zásadně možné kamenivo, u kterého nelze s jistotou vyloučit škodlivou alkalicko-křemičitou reakci, ve vozovce s cementobetonovým krytem již použít.

Mimo to je podle Všeobecného oběžníku pro silniční stavitelství ARS 15/2005 obsah alkálií v cementu dodatečně omezen (tabulka 1).

**Tabulka 1 – Přípustný obsah alkálií v cementu pro beton do cementobetonových krytů vozovek**

Cement	Obsah struskového písku [% hmotnosti]	Obsah alkálií v cementu Ekvivalent Na <sub>2</sub> O [% hmotnosti]	Obsah alkálií v cementu bez struskového písku příp. živice Ekvivalent Na <sub>2</sub> O [% hmotnosti]
CEM I + CEM III/A		≤ 0,80	–
CEM II/B-T	21 až 29	–	≤ 0,90
CEM II/B-S	21 až 29	–	≤ 0,90
CEM II/B-S	30 až 35	–	≤ 1,00
CEM III/A	36 až 50	–	≤ 1,05

Na rozdíl od dosavadních opatření byl například snížen ekvivalent Na<sub>2</sub>O pro portlandský cement (cement CEM I) z 1,0 % hmotnosti na 0,8 % hmotnosti. Toto omezení platí zásadně nezávisle na použitém kamenivu pro všechny betony do vozovek.

S oběma těmito technologickými omezeními jsou splněna opatření, jak podle dnešního stavu znalostí zabránit budoucímu poškození vozovek s cementobetonovými kryty alkalicko-křemičitou reakcí. Aby bylo možné v případě přesto se vyskytujících ojedinělých trhlin přezkoušet případný podíl alkalicko-křemičité reakce, je podle ARS 15/2005 před každou stavební prací v rámci kontrolního zkoušení třeba provést zkoušky vstupních látek do betonu, které uložil Spolkový ústav pro silniční stavitelství a dopravu.

#### 4. Souhrn

Na vozovkách s cementobetonovými kryty se v různých částech Německa v poslední době vyskytují trhliny, při kterých není možné vyloučit minimálně jako jednu z příčin alkalicko-křemičitou reakci. Při této alkalicko-křemičité reakci reagují především amorfní kyseliny křemičité, které jsou obsaženy v určitém kamenivu, s alkáliemi obsaženými ve vodě v pórech cementového kameniva. Tato reakce, při které se tvoří alkalicko-křemičitý gel, je spojena s objemovou expanzí. Vznikající tlak při bobtnání překračuje relativně rychle pevnost v tahu betonu, následkem čehož se tvoří trhliny.

Kromě alkalicko-křemičité reakce je třeba si všimnout jiných potenciálních příčin vzniku trhlin, jako je vynucené napětí v důsledku teplotních změn, smršťování a také dopravní zatížení. Podíl, kterým alkalicko-křemičitá reakce přispívá ke vzniku trhlin, bude v blízké době zkoumán odpovídající studií.

Aby bylo možné již nyní splnit opatření k zabránění vzniku poškození alkalicko-křemičitou reakcí ve vozovkách s cementobetonovým krytem, vydalo Spolkové ministerstvo dopravy, stavebnictví a bydlení (BMVWB – Bundesministerium für Verkehr, Bau- und Wohnungswesen) ve Všeobecném oběžníku pro silniční stavitelství ARS 15/2005 doplňující opatření pro volbu vstupních materiálů do betonu. To se v podstatě týká celkového vyloučení kameniva citlivého na alkálie, expertní posouzení kameniva označeného jako kritické a omezení cementu s obsahem alkálií pro cementobetonové kryty vozovek.

#### Literatura

- [1] Star, J.; Wicht, B.: Dauerhaftigkeit von Beton, Schriften der Hochschule für Architektur und Bauwesen Weimar, F.A. Finger-Institut, Heft 100, Weimar 1995  
(*Trvanlivost betonu, Spisy Vysoké školy stavební a architektury Výmar, Institut F. A. Fingera, Svazek 100, Výmar 1995*)
- [2] Stanton, T. E.: Expansion of Concrete through Reaction between Cement and Aggregate, Proceedings American Society of Civil Engineers, December 1940, pp. 1781 – 1811  
(*Expanze betonu vznikající reakcí mezi cementem a kamenivem, Sborník Americké společnosti stavebních inženýrů, prosinec 1940, str. 1781 – 1811*)
- [3] Bonzel, J.; Dahms, J.: Alkalireaktion im Beton, Betontechnische Berichte 1973, Beton-Verlag Düsseldorf, S. 153 – 189  
(*Alkalická reakce v betonu, Betonářské zprávy 1973, Nakladatelství Beton-Verlag, Düsseldorf, str. 153 – 189*)
- [4] Deutscher Ausschuss für Stahlbeton: DAfStb–Richtlinie Vorbeugende Massnahmen gegen schädigende Alkalireaktion im Beton (Alkali-Richtlinie), Berlin 2001  
(*Německý výbor pro železobeton: Směrnice DAfStb Preventivní opatření proti škodlivé alkalické reakci v betonu (Alkalická směrnice), Berlin 2001*)
- [5] Lochem, F. W.; Sprung, S.: Ursache und Wirkungsweise der Alkalireaktion, Betontechnische Berichte 1973, Beton-Verlag Düsseldorf, 1974, S. 101- 123  
(*Příčina a působení alkalické reakce, Betonářské zprávy 1973, Nakladatelství Beton-Verlag, Düsseldorf, str. 101 – 123*)
- [6] Springenschmid, R.; Fleischer, W.: Oberflächenrisse in älteren Betonfahrbahndecken, Tiefbau-Ingenieurbau-Strassenbau, 1993, Heft 10, S. 724 – 732  
(*Povrchové trhliny ve starších vozovkách s cementobetonovými kryty, Inženýrské a silniční stavitelství, 1993, svazek 10, str. 724-732*)

- [7] Fleischer, W.: Einfluss des Zements auf Schwinden und Quellen von Beton, Dissertation an der Technischen Universität München, 1992  
*(Vliv cementu na smršťování a bobtnání betonu, Disertační práce na Technické univerzitě Mnichov, 1992)*
- [8] Sodeikat, C.: Beanspruchung von Betonfahrbahnen mit sehr unterschiedlichen Eigenschaften von Ober- und Unterbeton unter besonderer Berücksichtigung von Feuchte und Temperaturänderungen, Dissertation an der Technischen Univesität Münche, 2000  
*(Zatížení vozovek s cementobetonovými kryty s velmi rozdílnými vlastnostmi horní a spodní vrstvy betonu se zohledněním vlhkosti a teplotních změn, Disertační práce na Technické univerzitě Mnichov, 1992)*