

---

**Znalecký posudek  
o příčinách poruch ledové plochy na**

**[REDACTED]**

**[REDACTED]**

**6 stran**

**5. 6, 1985**

---

5. června 1985

Čj. Z 118/240/PJ

**Z n a l e c k ý p o s u d e k**  
o příčinách poruch ledové plochy na vedlejších [REDACTED]

Tento znalecký posudek podávám na základě žádosti n.p. Arma-  
beton, pod.řed., odboru technického rozvoje a vývoje, zn. OTRV/-,  
158/Ing.Fá/Tů ze dne 19.4.1985.

**N á l e z**

Na ploše II. stadionu PKO Praha došlo při první výrobě ledu  
k vyboulení a popraskání ledové vrstvy. Ledová vrstva byly naná-  
šena ve dvou etapách, nejdříve do tloušťky 20 mm, po 1 - 2 týd-  
nech provozu do tloušťky 30 - 40 mm. Po zvýšení tloušťky ledu  
byly zjištěny závady.

Leď byl ukládán na betonovou plochu, která byla pro povr-  
chové zpevnění opatřena impregnací a několikanásobným nátěrem  
epoxidovou pryskyřicí; poslední nátěr byl proveden cca 1 týden  
před počátkem zhotovení ledové vrstvy.

Po zjištění závad byl leď odstraněn a betonová plocha pře-  
broušena k odstranění povrchové úpravy. Pak byl leď znovu zho-  
toven; k dalším poruchám nedošlo.

### P o s u d e k

Adheze mezi dvěma fázemi je úměrná mezimolekulární přitažlivosti. Teoretická hodnota síly, způsobující oddělení dvou fází, které jsou perfektně v kontaktu, je za předpokladu elasticity

$$F_{\max} = 2,06 \gamma_{12}/r_{12} ,$$

kde  $\gamma_{12}$  je stykové napětí obou fází a  $r_{12}$  je rovnovážná vzdálenost obou fází, při které přitažlivé síly jsou nulové.

Vezmeme-li reálné hodnoty, které mohou být dosaženy v případě styku vody s cementovým kamenem a epoxidovou pryskyřicí

$$\gamma_{12} = 20 \text{ mJ m}^{-2} \div 40 \text{ mJm}^{-2}$$

$$r_{12} = 3 \cdot 10^{-10} \text{ nm} \div 6 \cdot 10^{-10} \text{ nm} ,$$

vyjde

$$F_{\max} \approx 135 \div 270 \text{ MPa} .$$

Uvedené hodnoty se ovšem snižují v závislosti na množství defektů na hranici, vedoucí k snižování ideální paralelnosti obou stýkajících se fází a ke koncentracím napětí, a jsou dále vyčerpávány napjatostí styku vlivem objemových změn při solidifikaci původně tekuté fáze. Zbytková hodnota stykové pevnosti pak musí přenést napětí vznikající od teplotních změn, příp. od mechanického namáhání soustavy.

Svrchu uvedený výpočet je postaven na hodnotě stykové energie, vznikající výhradně jako interakční důsledek disperzních sil. I když tedy neexistují další adhezní interakce, lze konstatovat, že každá kapalina, která je schopna smáčet tuhou fází podkladu a solidifikovat takovým způsobem, že napětí od objemových změn neporuší styk, je dobrým adhezivem. Zaslouží v této souvislosti poznamenat, že voda je extrémně dobré adhezivum při teplotách pod  $0^{\circ}\text{C}$ ; to vede např. k vysokým nákladům na odmrzovací zařízení na křídlech letadel. Zbývá ještě posoudit kritické povrchové napětí podkladu, které by mělo být větší než povrchové napětí vody. Povrchové napětí vody je při  $0^{\circ}\text{C}$   $75,6 \text{ MJm}^2$ , kritické povrchové napětí vytvrzené epoxidové pryskyřice  $\approx 45 \text{ mJm}^{-2}$ , kritické povrchové napětí mokrého cementového kamene  $\approx 68 \text{ MJm}^{-2}$ .

V obou případech je povrchové napětí vody vyšší než kritické povrchové napětí podkladu a k dosažení dobrého smočení podkladu je nezbytná další energie pro zajištění rozlivu např. tlakem, roztíráním nebo zajištěním dokonalého rozptýlu vody mikropapkami /vodní mlhou/. Betonový podklad je však pórezní a smáčení pórů vyžaduje další velké množství energie. Podklad opatřený epoxidovým nátěrem je bez pórů /póry jsou vyplněny epoxidem/.

Z uvedeného vyplývá, že teoretická hodnota adheze ledu na oba podklady bude dobrá a řádově shodná, pokud nanášení vody na podklad je prováděno za podpory další energie podporující smáčení.

Hustota betonu je cca  $2,2 \text{ gcm}^{-3}$ , hustota ledu  $0,88$  až  $0,92 \text{ gcm}^{-3}$ . Délkové roztažnost betonu  $9 - 12 \cdot 10^{-6} \text{ m/m}$ , délková roztažnost ledu v rozmezí  $-1$  až  $-20^{\circ}\text{C}$   $51.15^{-6} \text{ m/m}$ , tedy přibližně pětkrát vyšší než betonu. Specifický objem vody při  $0^{\circ}\text{C}$  a  $1 \text{ atm}$  je  $1,0001 \text{ cm}^3/\text{g}$ , při  $-10^{\circ}\text{C}$  a  $1 \text{ atm}$   $1,0019 \text{ cm}^3/\text{g}$ .

Změnou teploty /v záporné oblasti/ o  $1^{\circ}\text{C}$  dojde ke změně délky  $1 \text{ m}$

$$\begin{array}{l} \text{podkladu } \sigma \approx 10,5 \cdot 10^{-6} \text{ m} \\ \text{ledu } \sigma \approx 51 \cdot 10^{-6} \text{ m} \end{array}$$

Délkový rozdíl  $40,5 \cdot 10^{-6} \text{ m}$  vyvolá na styku poměrné přetvoření

$$\varepsilon = 40,5 \cdot 15^{-6}/^{\circ}\text{C} ,$$

které /za předpokladu, že v obou vrstvách není přestoupeno mezní namáhání, tj. v betonu v tlaku a v ledu v tahu/ způsobí při průměrném smykovém modulu styku  $1/20$  teoretické hodnoty

$G_{b1} \quad 3000 \div 6500 \text{ MPa}$  napětí

$$\sigma = \varepsilon \cdot G_{b1} = 40,5 \cdot 10^{-6} \cdot 3000 = 0,12 \text{ MPa}$$

resp.  $\sigma = 40,5 \cdot 10^{-6} \cdot 6500 = 0,262 \text{ MPa}$ .

Uvažuje-li se prakticky dosažitelná hodnota pevnosti styku v praxi 1% teoretické hodnoty, tj.  $1,35 - 2,7 \text{ MPa}$ , je pevnosti styku dosaženo již při náhlé změně teploty obou částí o

$$\frac{1,35}{0,12} \approx 11^{\circ}\text{C}$$

Pevnost ledu v tahu je 1,3 MPa; její hodnota může být dosažena při modulu pružnosti 2600 MPa a při zabránění volnému pohybu, např. nad místně nepřilnutou oblastí/ při rychlém poklesu teploty soustavy o cca 10°C.

Jakmile dojde k vytvoření trhlinky v ledu v důsledku překročení jeho tahové pevnosti /např. v důsledku rychlého podchlazení/, zvýší se okamžitě hodnota horizontálního smykové namáhání na okraji trhliny na dvojnásobek až pětinašobek normální hodnoty. To znamená, že další porušování od místy trhliny může nastat již při změně teploty 5 - 6°C. Ke smykovému porušování může dojít jak při náhlém poklesu, tak při vzrůstu teploty.

Postupný pokles nebo vzrůst teploty vzhledem k příznivým reologickým charakteristikám ledu /vč. kontaktní vrstvy/ obvykle poruchy nezpůsobí.

Na teplotní chování soustavy má tenký nátěr epoxidové pryskyřice zanedbatelný vliv. Přetvoření vyvolaná změnami teploty betonu bez povrchové úpravy a betonu s povrchovou úpravou budou prakticky stejná.

V praxi spíše než <sup>2)</sup> náhlé ochlazení, které je dáno kapacitou chladičného zařízení, může dojít k relativně rychlému ohřevu ledové plochy shora <sup>ve větším</sup> prakticky pouze prostřednictvím vody nanesené ve větším množství /a tedy s velkou tepelnou kapacitou/ na stávající led, jehož kapacita je vždy podstatně menší než podkladního betonu a který navíc vytváří izolační vrstvu betonu od vnějšího prostředí /a tedy i vody/.

Jestliže např. na plochu ochlazenou na -15°C se nanese silná vrstva vody o teplotě 5°C, dochází k teplotnímu gradientu 20°C. Teplota ledu se rychle zvýší nejméně o 10°C a dochází náhle ke vzniku vysokých napětí na styku s podkladem. Nově vznikající led je po výšce nehomogenní, s různou hustotou a spolu s gradientem teploty je odpovědný za vznik tzv. kompozitního působení, vyvolaného větším roztažením horních vrstev a provázeného vznikem tahových napětí v kontaktní spáře. Jakmile dojde k překročení pevnosti kontaktu na některém třeba místně oslabeném místě kombinací tahového a smykového namáhání, projeví se navenek tento mechanismus vydouváním ledové vrstvy, příp. až praskáním.

Úprava betonového podkladu epoxidovou impregnací a epoxidovým nátěrem má za následek, že přestup tepla na kontaktní spáře je zpomalen, teplotní gradient zůstane vyšší a citlivost k náhlým změnám teploty povrchu ledu se zvětší.

Z uvedeného rozboru je zřejmé, že daleko větší vliv na napjatost a tím správnou funkci systému podklad-leď má genese jeho teplotních změn. Náhlé změny teploty povrchové vrstvy ledu a rychlý přísun velkého množství tepla do systému shora mohou způsobit odtržení ledu od podkladu, jeho vydouvání, příp. popraskání.

Jak z hlediska stykové pevnosti ledu s podkladem, tak z hlediska namáhání stykové spáry a konec konců i stejnorodosti ledu samého je proto nezbytné důsledně zachovávat přesná /dnes běžně známá/ pravidla při výrobě ledu. V praxi to obvykle znamená, že leď musí být vytvářen pomalu, po malých vrstvách, nejlépe postřikem plochy jemně rozptýlenou vodou /mlhou/, případně roztíráním vody na povrchu ledu vhodnou stěrkou. Při výrobě ledu nesmí docházet k výkyvům teploty podkladu a změny teploty podkladu po dohotovení ledu mají být postupné. Leď tenčí než 15 až 20 mm nesmí být intenzivně mechanicky namáhán /např. krasobruslením, hokejem apod./. Pro extrémní namáhání /např. závodní sporty/ má být tloušťka ledu alespoň 40 mm a nikde nemá poklesnout pod 30 mm.

#### Z á v ě r

Oddělení a vyboulení ledu, ke kterému došlo na II. ledové ploše ZS PKO v Praze při prvním zhotovení ledové vrstvy v dubnu 1985, nemohlo být podle názoru znalce na základě výše provedených rozborů způsobeno tím, že beton byl opatřen povrchovou úpravou epoxidovým nátěrem, pokud nátěr byl řádně vytvrzen. Příčinou poruch tohoto druhu může být prakticky pouze nevhodná technologie výroby ledu.



**Znalecká doložka:**

Znalecký posudek jsem podal jako znalec jmenovaný rozhodnutím  
ministra spravedlnosti ze dne 11. 10. 1967 č. j. ZT 108/67 pro  
základní obor stavebnictví, pro odvětví staveb obytných,  
průmyslových a zemědělských a stavebního materiálu.

Znalecký úkon je zapsán pod poř. čís. 112/85 znaleckého  
deníku.

Znalečné a náhradu nákladů (náhradu mzdy) účtuji podle přílohy  
likvidace na základě dokladů čís. ....

