

PŘEDNORMATIVNÍ VÝZKUM NENAMRZAVOSTI NESTMELENÝCH PODKLADNÍCH VRSTEV; MODIFIKOVANÉ MINERÁLNÍ KRITÉRIUM

Hannes Kugler, Franz Ottner, Bernd Schwaighofer, Walter Strasser
Straße und Autobahn 2004, č. 9, str. 484

Podstatná část posouzení nenamrzavosti nestmelených podkladních vrstev v Rakousku vychází z tzv. minerálního kritéria. Toto kritérium stanovuje na základě jemných částic (< 0,02 mm) mineralogické mezní hodnoty, které se však v praxi ukázaly příliš přísné. Cílem tohoto výzkumu proto bylo modifikovat minerální kritérium tak, aby umožňovalo realistické posouzení namrzavosti. V příspěvku je nejprve představena optimalizovaná mineralogická analýza na základě modifikovaného minerálního kritéria, vhodná pro praxi. Obsahy minerálních částic, zjištěné tímto způsobem na 15 reprezentativních vzorcích kameniva, těženého a používaného v Rakousku, jsou porovnány s výsledky zkoušek mrazových zdvihů a rychlých zkoušek. Přitom lze zásadně prokázat souvislost mineralogického složení s namrzavostí, zrychlení metody posuzování na základě zkoušených vzorků však není možné. Závěrem je navržena modifikovaná interpretace stávajících mezních hodnot minerálního kritéria. Tímto způsobem bude v budoucnosti umožněno posuzovat vliv mineralogického složení na nenamrzavost nestmelených podkladních vrstev realističtěji.

1. Definice problému

V Rakousku se při posuzování nenamrzavosti směsí kameniva pro nestmelené podkladní vrstvy (používané především v silničním stavitelství) postupuje podle normy ÖNORM B 4811 [1] (obrázek 1). Podstatnou částí této metody je tzv. minerální kritérium (Mineralkriterium – MK).

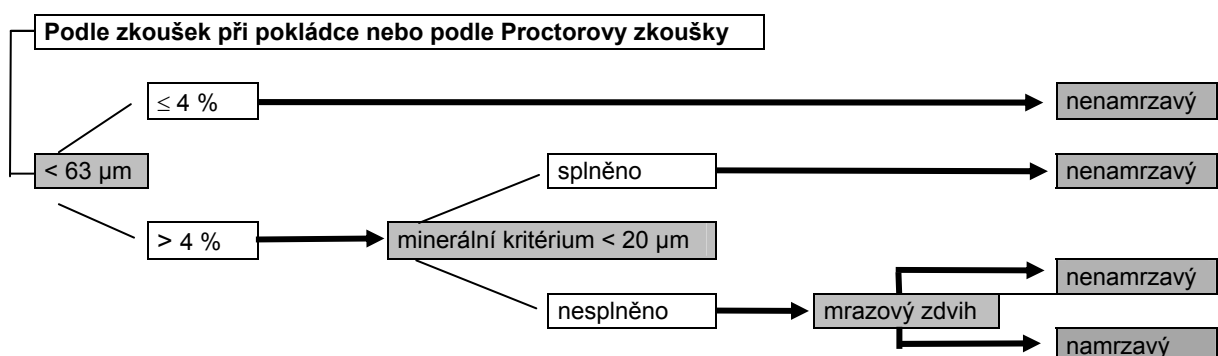
Pokud jsou u kameniva podíly < 0,063 mm vyšší než 4 % hmotnosti, jsou u přírodních směsí kameniva (nikoliv u vyrobených směsí kameniva) vytříděny ještě i podíly < 0,02 mm.

Pro tuto frakci se potom používá minerální kritérium, které stanovuje mezní hodnoty pro nejdůležitější skupiny jílových minerálů (označovaných jako „aktivní“ minerály) podle podílů < 0,02 mm v celkové zrnitosti (většinou frakce 0/32 mm) (tabulka 1).

Minerální kritérium má takto umožnit, aby případně i směsi kameniva s obsahem jemných částic < 0,02 mm větším než 3 % hmotnosti (podle původního kritéria stanoveného Casagrandem [2]), mohly být používány pro nenamrzavé vrstvy v silničním stavitelství.

Vyazuje-li tedy přírodní směs kameniva např. 7 % hmotnosti jemných částic < 0,063 mm, vytřídí se z těchto jemných částic frakce < 0,02 mm, zjistí se její mineralogické složení a posoudí se podle minerálního kritéria. Obsahuje-li frakce < 0,02 mm tohoto materiálu kromě skálových detritických minerálů, jako jsou křemen a živec, například výlučně slídu a chlorit jako „aktivní“ minerály, jsou přípustné tyto mezní hodnoty:

- ◆ při 3 % hmotnosti frakce < 0,02 mm: 100 % slídy a chloritu;
- ◆ při 5 % hmotnosti frakce < 0,02 mm: 60 % slídy a chloritu;
- ◆ při 8 % hmotnosti frakce < 0,02 mm: 0 % slídy a chloritu.



Obrázek 1: Třístupňový model metod pro posouzení nenamrzavosti zkoušeného materiálu (podle ÖNORM B 4811 [1])

Tabulka 1: Mezní hodnoty minerálního kritéria podle rakouské normy ÖNORM B 4811 [1]

Podíl < 0,02 mm	Mineralogické složení frakce < 0,02 mm
do 3 % hmotnosti	Stanovení jednotlivých minerálů není nutné, je přípustné použití 100 % aktivních minerálů
> 3 % – 5 % hmotnosti	<p>U ověřených směsí kameniva stanovení jednotlivých minerálů není nutné</p> <p>U neověřených směsí kameniva se postupuje takto:</p> <ol style="list-style-type: none"> 1. neaktivní minerály: 100 % 2. heterogenní směsi neaktivních a aktivních minerálů, přičemž dále uvedené mezní hodnoty [a] až [e]) a dodatečně i mezní hodnoty [f] až [i]) kombinací aktivních minerálů nesmějí být překročeny (množství: 5 % hmotnosti frakce < 0,02 mm): <ol style="list-style-type: none"> a) 10 % skupina kaolinitů b) 30 % skupina chloritů c) 30 % skupina vermikulitů d) 40 % skupina smektitů e) 50 % skupina slíd f) 60 % skupina slíd + skupina chloritů g) 50 % skupina slíd + skupina chloritů + skupina kaolinitů h) 50 % skupina slíd + skupina kaolinitů i) 40 % skupina slíd + skupina chloritů + skupina kaolinitů + skupina smektitů <p>Směsi křemičitanů s vrstevnatou strukturou, které zde dále nejsou uvedeny, jsou přípustné do celkového objemu max. 40 % (množství: 5 % hmotnosti frakce < 0,02 mm), jinak je nezbytné provedení zkoušek mrazových zdvihů.</p> <p>Mezi 3 % hmotnosti (je přípustné 100 % aktivních minerálů) a 5 % hmotnosti [mezní hodnoty a) až i)] je nutno přípustné mezní hodnoty lineárně interpolovat.</p> <ol style="list-style-type: none"> 3. Pokud výrazné červenohnědé zbarvení poukazuje na možnost přítomnosti hydroxidů železa, je rovněž nezbytné provedení zkoušek mrazových zdvihů.
>5 % – 8 % hmotnosti	Při podílu 8 % hmotnosti lze používat výhradně neaktivní minerály. Mezi 5 % – 8 % hmotnosti je nutno přípustné mezní hodnoty lineárně interpolovat.

Mezi tyto mezní hodnoty je nutno lineárně interpolovat další hodnoty v závislosti na obsahu frakce < 0,02 mm, aby se zjistilo maximálně přípustné množství příslušných jílových minerálů v každém jednotlivém případě. V extrémních případech (ve zkoušeném materiálu nejsou obsaženy žádné namrzavé jílové minerály), se směs kameniva do 8 % hmotnosti frakce < 0,02 mm považuje za nenamrzavou.

V zásadě se minerální kritérium dosud osvědčovalo, protože směsi kameniva, které byly podle něho hodnoceny jako nenamrzavé, prokázaly nenamrzavost i v praxi. Mezní hodnoty minerálního kritéria se však v mnoha případech ukázaly jako příliš přísné a mineralogická metoda vyhodnocování jako nepřesná a příliš nákladná. Některé příklady v minulosti často používaných směsí kameniva se v praxi ukázaly jako nenamrzavé, přitom však mezní hodnoty minerálního kritéria nespĺňovaly.

Proto bylo nezbytné optimalizovat metodu vyhodnocování na základě minerálního kritéria a na základě přesnější mineralogické analýzy přezkoumat příliš přísné mezní hodnoty minerálního kritéria a případně je modifikovat. Realističtější mezní hodnoty by umožnily, že směsi kameniva, které se v praxi osvědčily jako nenamrzavé, by byly posouzeny jako opravdu nenamrzavé i podle minerálního kritéria a současně by se zabránilo provádění nákladných zkoušek mrazových zdvihů nebo dokonce vyřazení těchto směsí z používání.

2. Zkoušené materiály

Pro výzkum bylo vybráno 15 nenamrzavých druhů kameniva pro nestmelené podkladní vrstvy (frakce 0/32 až 0/45) z Rakouska. Tyto materiály vhodně reprezentují široké spektrum kameniva, používaného v Rakousku; dosud neobsahují nebo obsahují jen v malé míře minerály zohledněné v minerálním kritériu (tabulka 2), které měly být předmětem výzkumu.

Odběr vzorků (6 × 30 kg přirozeně vlhkého kameniva) byl proveden v kamenolomech nebo šterkovnách, přímo z příslušných skládek (obrázek 2), které byly předtím homogenizovány kolovým nakladačem s vhodným přidavným zařízením.

Tabulka 2: Druh, původ a stručné označení použitého kameniva

Kamenivo	Původ	Označení
brekcie amfibolitu	mladší paleozoikum (prvohory) Centrální Alpy krystalické	A
diabas	zóna a droby	D1
diabas	zóna droby	D2
těžený štěrk	fluvioglaciální štěrk	K1
těžený štěrk	periglaciální terasový štěrk	K2
serpentinit	Centrální Alpy krystalické	S1
serpentinit	zóna penninu *)	S2
serpentinit	zóna penninu *)	S3
čedič	Štýrská třetihorní pánev	B1
čedič	Centrální Alpy krystalické	B2
čedič	Štýrská třetihorní pánev	B3
diabas	zóna penninu *)	GS
žula	Moravikum (český masiv)	Gra
uhličitanové kamenivo	paleozoikum (prvohory) (Graz)	Ka
kersantit	Moldanubikum (český masiv)	Ker

*) pennin – modrozelený jednoklonný nerost, zásaditý alumosilikát hořčíku a alumina; hlavní oblast výskytu: Penninské Alpy (*poznámka překladatele*)

Obrázek 2: Odběr vzorků různých frakcí pro zkoušení nenamrzavosti (převážně frakce 0/32 mm nebo 0/45 mm)

3. Metody

3.1 Přehled

V laboratoři byly vytříděny podíly > 32 mm; na získané frakci 0/32 mm byla provedena modifikovaná Proctorova zkouška (simulace hutnění a rozdrčení zrn při pokládce na stavbě podle ÖNORM B 4810 [3]). Tento postup představuje výchozí bod dalšího výzkumu:

- Po modifikované Proctorově zkoušce byly na směsi kameniva provedeny zkoušky mrazových zdvihů, které v rámci systému posuzování nenamrzavosti představují relevantní základní hodnotu a umožňují definitivní závěry, zda je materiál nenamrzavý či nikoliv.
- Po modifikované Proctorově zkoušce byly ze směsi kameniva následně vytříděny jemné částice < 0,02 mm a podrobeny mineralogické analýze podle minerálního kritéria.
- Současně byly přezkoumány vybrané rychlé zkoušky, při nichž byly používány zejména frakce < 0,02 mm. Rychlé zkoušky mají na jedné straně napomáhat urychlené mineralogické analýze, a tím i posuzování podle minerálního kritéria. Na druhé straně bylo zkoumáno, zda rychlé zkoušky umožňují i rychlejší posouzení nenamrzavosti směsí kameniva bez mineralogické analýzy jemných částic.

Porovnání korelačních závislostí co nejpřesněji rozříděných minerálů, výsledků mrazových zdvihů a rychlých zkoušek měla umožnit modifikaci mezních hodnot minerálního kritéria a rychlejší posuzování nenamrzavosti.

3.2 Zkoušky mrazových zdvihů

Citlivé zkoušky mrazových zdvihů byly prováděny přesně podle rakouské normy ÖNORM B 4810 se zvláštním zřetelem na konstantní a srovnatelný průchod izotermie při 0 °C během zmrazování.

3.3 Mineralogické analýzy

Obtíže reprodukovatelné, především však spolehlivé analýzy jílových minerálů, která v rámci kruhových zkoušek poskytuje srovnatelné výsledky, jsou dostatečně známy (např. [4]).

Protože však pro minerální kritérium má význam relativně hrubozrná frakce < 0,02 mm, musí se ve většině případů počítat s významnými podíly detritických sedimentárních hornin, případně skálotvorných minerálů (křemen, živec a další zástupci živců, amfiboly, pyroxeny, nebo serpentiny). Rovněž kvantitativně přesné zachycení těchto minerálů je z hlediska technického zařízení pro vyhodnocování velmi důležité (zvyšují se náklady na analýzu).

Z důvodů všeobecně známých nejistot v metodice zkoušek a jejich důsledků, které bezprostředně souvisí s možností použití materiálů podle minerálního kritéria, má velký význam pečlivé přezkoumání běžných metod mineralogické analýzy. Proto byla metoda vyhodnocování předepsaná v rámci výzkumu minerálního kritéria porovnávána s jinými metodami, aby tak bylo možno dospět k jasným závěrům o vypovídací schopnosti, případně spolehlivosti kvantitativně přesného zachycení těchto minerálů.

Základem všech metod mineralogické analýzy byla rentgenová difrakce (XRD). Příprava preparátů se provádí podle [5], vlastní zkouška podle [6].

Kvalitativní vyhodnocení všech skálotvorných minerálů v práškovém preparátu se provádí pomocí programu FPS (**F**ast **P**attern **S**earch) nejasné údaje se srovnávají se záznamy souboru dat JCPDS (**J**oint **C**ommittee on **P**owder **D**iffraction **S**tandards) (referenční databanky) a hodnotí [7].

Identifikace jílových minerálů se všeobecně provádí podle [8] až [11].

Přesné postupy a detaily dále uvedených metod vyhodnocování jsou popsány v [12].

3.3.1 Dosud platná standardní metoda vyhodnocování (MA-RVS)

Podle RVS 11.062 [13] se touto metodou zjišťují pouze křemen, živec draselný, plagioklas, kalcit, dolomit a všechny křemičitan s vrstevnatou strukturou pomocí hustoty piků a vhodně korigované hustoty faktorů.

V rámci analýzy jílových minerálů byly dále pomocí ploch piků a podle součinitele korekce uvedeného v RVS 11.062 podle [14] vyhodnoceny všechny křemičitan s vrstevnatou strukturou, rozříděné do skupin kaolinitů, chloritů, slíd, smektitů a vermikulitů ve vzájemném poměru semikvantitativní metodou.

3.3.2 Rozšířená mineralogická analýza (EMA)

Na rozdíl od metody MA-RVS je v rámci rozšířené mineralogické analýzy (EMA) kvantifikován největší podíl skálotvorných minerálů a křemičitanů s vrstevnatou strukturou (chlorit, serpentín a mastek) podle zahraničních předpisů. Přitom jsou pomocí vhodných, regresí zjištěných kalibračních křivek na základě rentgenové difrakce zjišťovány absolutní procentuální obsahy (přibližně). Kromě toho se stanoví doplňkovými metodami obsah uhličitanu [15], současně se však kvantitativně zohlední i obsah oxidů železa [16] a organického uhlíku. Všechny křemičitan s vrstevnatou strukturou jsou podle požadavků stanovených v RVS 11.062 zásadně rozříděny za použití identifikace rentgenovou difrakcí do jednotlivých skupin jílových minerálů.

3.3.3 Komplexní mineralogická analýza (KMA)

Komplexní mineralogická analýza obsahuje jako doplněk metody rozšířené mineralogické analýzy (EMA) kromě rentgenové difrakce i simultánní termoanalýzu (STA) a geochemickou analýzu. Základní princip vychází z pečlivého rozboru všech piků, případně fází minerálů prostřednictvím rentgenové difrakce, z první kvantifikace skálotvorných minerálů pomocí kalibračních minerálů a z kvantifikace křemičitanů s vrstevnatou strukturou (zejména jejich bobtnavých fází) metodou simultánní termoanalýzy (STA). Závěrem jsou zjištěné obsahy ověřeny a upraveny porovnáním s výsledky chemických zkoušek a výpočty.

Simultánní termoanalýza (STA) zahrnuje diferenciální termoanalýzu (DTA), termogravimetrickou analýzu (TG) a diferenční snímací kalorimetrii (DSC). Zjišťování složení základních a stopových prvků v rámci geochemické analýzy vzorků (frakce < 0,02 mm) bylo provedeno metodou RFA.

3.4 Rychlé zkoušky

3.4.1 Zkoušky nasákavosti

Za použití různých zkoušek podle Enslina byla stanovena nasákavost frakcí < 0,02 mm (sušení v sušárně při teplotě 60 °C, přirozená zrnitost bez rozemletí). Na nasákavosti se podílí adhezivní voda, krystalová voda a vnitřní krystalová voda; zkouška umožňuje přímé závěry o všeobecném procesu nasákavosti a tím i možnosti namrzavosti zkoušených materiálů a nepřímé závěry o složení minerálů (přítomnost bobtnavé fáze).

Nasákavost byla na základě různých postupů uvedených v současných normách, případně dalších technických předpisů, zkoušena třemi postupy:

- ◆ Zkoušky podle Enslina (RVS 11.062) [13];
- ◆ Modifikované zkoušky podle Enslina-Neffa (Enslin-Neff_{mod}) [12];
- ◆ Modifikované zkoušky podle Enslina-Neffa (Enslin-Neff_{mod}) za použití moždíře [17].

3.4.2 Adsorpce vodní páry

Množství adsorbované vody na vzorcích kameniva je v rovnováze s vlhkostí okolního vzduchu. Při zachování konstantní definované vlhkosti vzduchu je výška adsorpce vody mírou pro povrch zkoušeného materiálu a poskytuje tak nepřímou informaci o podílu bobtnavých fází, které se vyznačují mimořádně velkými měrnými povrchy. Pro stanovení adsorpce vodní páry frakcí < 0,02 mm (po sušení v sušárně při teplotě 60 °C) za různé úrovně vlhkosti v průběhu zkoušky desorpce se postupovalo podle normy DIN EN ISO 12571 [18] a byla použita metoda s exsikátory.

Pro porovnání s výsledky jiných zkoušek byly zvoleny adsorpce vodní páry zkoušených materiálů při úrovni vlhkosti přibližně 75 %. Tato relativní vlhkost byla dosažena pomocí NaCl (75,47 ± 0,14) % v exsikátoru při teplotě 20 °C.

3.4.3 Adsorpce metylenové modři

Z důvodů známých problémů ohledně reprodukovatelnosti výsledů v kruhových testech různých laboratoří, avšak i z důvodů rozdílů v jednotlivých předpisech byla předem provedena analýza citlivosti u zkoušky metylenovou modří na vápenném bentonitu (calconitu).

Jako rozhodující faktory byly zjištěny uložení ve vodě, dispergační činidlo, teplota a použití ultrazvuku. Použitý postup zkoušky je uveden v [12] a je porovnán s běžně prováděnými zkouškami podle RVS 11.062 a ÖNORM EN 933-9 [19].

3.4.4 Adsorpce komplexních sloučenin mědi

Pro porovnání s metodou podobné vypovídací schopnosti, jako je zkouška metylenovou modří, byla stanovena výměnná iontová kapacita jílových minerálů pomocí komplexů mědi. Při této zkoušce byla vyrobena suspenze z 200 mg frakce < 0,02 mm a 35 ml destilované vody, dispergována ultrazvukem, zředěna na 50 ml a smísena s 10 ml roztoku 0,01 dvojmocné mědi s trietylentetraaminem a tetraetylenpentaaminem. Výměnná iontová kapacita byla stanovena fotometrickými analýzami [20].

3.4.5 Ekvivalent písku

Zkouška ekvivalentu písku byla provedena podle ÖNORM EN 933-8 [21]. Zkušební navážka písku a malé množství koloidního roztoku se v odměrném válci automaticky protřepe, aby se z povrchu zrn písku zkušební navážky uvolnily jemné jílovité částice. Písek je rozplaven přidáním dalšího koloidního roztoku. Jemné částice stoupají vzhůru, zatímco písek se usazuje v dolní části válce. Po usazování rozplaveného vzorku po dobu 20 minut se změří výška usazeniny písku ve spodní části odměrného válce a stanoví se její poměr k celkové výšce vzorku. Z tohoto poměru nepřímo vyplývá míra obsahu namrzavých jemných částic.

4. Výsledky

4.1 Porovnání rutinních metod mineralogické analýzy

Podstatným cílem tohoto výzkumného záměru bylo ověření a případná modifikace příliš přísných mezních hodnot minerálního kritéria, známých z praxe. Nezbytnou podmínkou přitom bylo, aby byla k dispozici spolehlivá mineralogická analýza jako účinný nástroj pro posouzení problému. Proto byly porovnány obvyklé, současně však mnoha chybami zatížené metody vyhodnocování podle

minerálního kritéria (MA-RVS, článek 3.3.1), rozšířené mineralogické analýzy (EMA, článek 3.3.2) a konečně komplexní mineralogické analýzy (KMA, článek 3.3.3).

Porovnání obsahů minerálů zjištěná podle konkrétní metody vykazují zčásti enormní rozdíly, i s ohledem na skupinu „aktivních“, tj. jílových minerálů, která měla v rámci výzkumu minerálního kritéria zásadní význam (obrázek 3, porovnání různých metod vyhodnocování). Z těchto výsledků je vzhledem k velkým diferencím zřejmé, že již samotná volba metody mineralogické analýzy může rozhodnout o tom, zda je nutno určitý materiál podle současného minerálního kritéria posuzovat jako nenamrzavý či nikoliv.

Legenda

Regression Chemie	chemická regresní závislost
Vergleich unterschiedlicher Auswerteverfahren	porovnání různých metod vyhodnocování
Mineralgehalte A nach KMA	obsahy minerálů A podle metody KMA
Sonstige Gemegeteile	jiné heterogenní příměsi
Fe-Hydroxide	hydroxidy železa
FE, Ti-Oxide	oxidy železa, titanu
Sonstige Silikate	jiné křemičitany
Karbonate	uhličitany
Summe Q, FSP	celkové množství křemene a živce
„aktive“ Mineralgruppen	skupiny „aktivních“ minerálů

Obrázek 3: Brekcie amfibolitu A: Porovnání tří metod vyhodnocování s chemickou analýzou, porovnání konkrétně zjištěných obsahů minerálů a definitivní rozřídění minerálů podle metody KMA; Chl = chlorit, Gli = slída, SM = smektit, Q = křemen, KFS = živec draselný, Plag = plagioklas, Kalz = kalcit, Amph = amfibol, IL = ilmenit

Při podrobném srovnání jednotlivých metod je nutno konstatovat, že dosud obvyklý postup vyhodnocování (MA-RVS) v porovnání s postupy rozšířené mineralogické analýzy (EMA) a komplexní mineralogické analýzy (KMA) v závislosti na minerálech, které nejsou v minerálním kritériu zohledněny, mohou vzniknout velké pozitivní nebo negativní odchylky celkového obsahu jílových minerálů. Rovněž při srovnání postupů podle metod EMA a KMA se ukazují zčásti závažné rozdíly – jak v celkovém obsahu jílových minerálů, tak v jejich rozdělení. Tato zjištění lze vysvětlit chybnými postupy uvedenými v příslušných technických předpisech, avšak i volbou metody mineralogické analýzy (rentgenová difrakce samotná v porovnání s rentgenovou difrakcí v kombinaci s metodou simultánní termoanalýzy (STA) a geochemickými analytickými metodami).

Protože obsah a rozdělení jílových minerálů mají podstatný vliv na výsledky posouzení nenamrzavosti zkoušeného materiálu, má volba vhodné metody mineralogické analýzy zásadní význam.

Pro posouzení vypovídací schopnosti jednotlivých metod byly obsahy minerálů, zjištěné jednotlivými zkouškami, na základě geochemické výpočtové tabulky přepočítány na oxidy prvků a porovnány se skutečně změřenými obsahy oxidů prvků, zjištěnými geochemickou analýzou (referenční hodnoty). U všech zkoumaných vzorků se přitom analogicky ukázalo, že shoda s chemickými údaji byla u metody MA-RVS nejhorší, u metody KMA naproti tomu jednoznačně nejlepší (obrázek 3, Grafy korelace).

Na základě výše uvedených výsledků byla komplexní mineralogická analýza (KMA) hodnocena jako nejspolehlivější metoda a zařazena jako relevantní postup pro posouzení nenamrzavosti na základě minerálního kritéria, případně k modifikaci tohoto kritéria.

4.2 Posouzení podle minerálního kritéria

Nejdříve byl u všech zkoušených materiálů vyhodnocen obsah jílových minerálů podle metody KMA (viz příklad na obrázku 4 dole); následně byla posouzena jejich nenamrzavost podle současně platného minerálního kritéria (viz příklad na obrázku 4 dole).

Podstatným aspektem tohoto mineralogického posouzení je skutečnost, že směs kameniva se považuje za nenamrzavou, pokud jsou pro obsažené minerály a směsi minerálů splněny všechny příslušné mezní hodnoty, uvedené v minerálním kritériu. Jakmile je pouze jediná mezní hodnota nepatrně překročena, není již zkoušený materiál z mineralogického hlediska hodnocen jako nenamrzavý. To se týká např. vzorku K1 (obrázek 4 dole).

4.3 Porovnání minerálního kritéria a mrazových zdvihů

Pro posouzení mezních hodnot minerálního kritéria jsou porovnány výsledky zkoušek mrazových zdvihů, prováděných na vzorcích podle zásad uvedených výše (obrázek 5). Na tomto grafu je velmi dobře znázorněna diskrepance mezi mrazovým zdvihem jako simulací chování směsi kameniva pro nestmelené podkladní vrstvy v konstrukci vozovky za mrazu a mezi posouzením namrzavosti podle současného minerálního kritéria.

Ačkoli byly všechny zkoušené směsi podle zkoušek mrazových zdvihů hodnoceny jako nenamrzavé (mezní hodnota 100 % maximálně přípustného mrazového zdvihu nebyla u žádné směsi dosažena), některé z těchto vzorků by nespĺnily požadavky současného minerálního kritéria. Mineralogické mezní hodnoty se jeví skutečně jako příliš přísné. Tento závěr platí zejména pro vzorek K1, který vykazuje pouhých 55 % hodnoty maximálně přípustného mrazového zdvihu, podle minerálního kritéria však je jeho hodnocení negativní (obrázek 4).

Aby bylo možno skutečně identifikovat minerály, které mají zásadní význam pro nenamrzavost a modifikovat současné mezní hodnoty, byly zjištěny korelace mezi všemi vyskytujícími se minerály, případně směsmi minerálů a byly provedeny zkoušky mrazových zdvihů. Z petrologického hlediska, případně z důvodů překvapivého chování některých vzorků během jiných zkoušek, se ukázalo účelné diferencovat skupiny minerálů (např. čediče a serpentinity). Tento postup vedl v mnoha případech k lepším korelacím (viz pravá polovina obrázků 6 a 7).

V zásadě vykazuje jen málo minerálů, případně směsi minerálů frakce < 0,02 mm zřetelné korelační závislosti s mrazovými zdvihy, které se týkají celé směsi kameniva. Nejlepší korelace (souhrn skupiny kaolinitů a chloritů obsahující statisticky zjištěné celkové hodnoty jemných částic < 0,02 mm) jsou znázorněny na obrázku 6.

Z velkého rozsahu mineralogických korelací s mrazovými zdvihy vyplývají tyto závěry:

1. U některých směsích minerálů se ukazuje i přes mimořádně nízký obsah jílových minerálů (např. v obrázku 6: < 3 % směsi kameniva!) pozoruhodný jev skutečně malých až významných korelací s mrazovými zdvihy. Existuje zásadní mineralogická korelační závislost.

2. Většina korelačních závislostí, i nejlepší korelace, nejsou ovšem zase tak výrazné, aby mineralogie samotná (v kombinaci s vlivy jemných částic) dokázala vysvětlit výšku mrazových zdvihů. V tomto procesu musí být zohledněny i další faktory.

Legenda

Tonmineral-Gehalte K1 [abs.%]
Relative Grenzwert (GW)-Abweichungen K1 [% GW]

unter GW
über GW

obsahy jílových minerálů vzorku K1 [abs. %]
relativní odchylky od mezních hodnot vzorku K 1
[% mezní hodnoty]
nižší než mezní hodnota
vyšší než mezní hodnota

Obrázek 4: Roztřídění jílových minerálů ve vzorku K1 na základě skupin minerálů uvedených v minerálním kritériu (nahore) a odpovídající relativní odchylky od mezních hodnot (dole); Kao = kaolinit, Chl = chlorit, Vm = vermikulit, SM = smektit, Gli = slída, Sonst. Mix. = jiné směsi jílových minerálů

Legenda

Frosthebung [% GW]

mrazový zdvih [% mezní hodnoty]

Obrázek 5: Porovnání výsledků zkoušek mrazových zdvihů [% přípustného mrazového zdvihu, případně mezní hodnoty (GW = **G**renzwert)] s těmi zkoušenými materiály, které nespĺnily požadavky současného minerálního kritéria (zakroužkované hodnoty mrazových zdvihů)

Legenda

Alle Materialien

všechny zkoušené materiály

Alle Materialien außer B + S

všechny zkoušené materiály kromě čedičů a serpentinitů

Anteil

podíl

Frosthebung [% GW]

mrazový zdvih [% mezní hodnoty]

Obrázek 6: Porovnání výsledků zkoušek směsí minerálů z kaolinitu a chloritu, obsahující statisticky zjištěný podíl jemných částic < 0,02 m s výsledky zkoušek mrazových zdvihů. Diferenciace skupin minerálů: vlevo všechny minerály; vpravo všechny minerály s výjimkou čedičů a serpentinitů (B + S)

Legenda

Alle Materialien	všechny zkoušené materiály
Alle Materialien außer B + S	všechny zkoušené materiály kromě čedičů a serpentinitů
Mittlere GW-Abweichungen [% GW]	střední odchylky od mezní hodnoty
Frosthebung [% GW]	mrazový zdvih [% mezní hodnoty]

Obrázek 7: Porovnání středních odchylek mezních hodnot od mineralogických mezních hodnot minerálního kritéria s výsledky zkoušek mrazových zdvihů. Diferenciace skupin minerálů: vlevo všechny minerály; vpravo všechny minerály s výjimkou čedičů a serpentinitů (B + S)

4.4 Modifikace minerálního kritéria

Všeobecný význam mineralogického složení pro namrzavost byl v rámci výzkumného záměru potvrzen.

Na základě výzkumu vlivu mineralogického složení jednotlivých minerálů nebo směsí minerálů (který je ovšem většinou malý) je nutno proto konstatovat, že překročení jediné mineralogické hodnoty zkoušeného vzorku by nemělo nutně vést k tomu, aby byl zkoušený materiál hodnocen jako namrzavý. Spíše je účelné zohlednit veškeré relativní odchylky mezních hodnot zkoušeného materiálu. Tento postup byl navržen v podobě nového souhrnného parametru, který představuje jednoduchý aritmetický průměr všech relativních odchylek mineralogických mezních hodnot, vyskytujících se ve zkoušeném materiálu a takto reprodukuje průměrnou odchylku všech mezních hodnot minerálního kritéria.

Výpočet této jednoduché střední hodnoty jednotlivých relativních odchylek mezních hodnot [%] zkoušeného materiálu je demonstrován na příkladu vzorku K1 (viz obrázek 4, dole):

Střední hodnota odchylky mezní hodnoty K1 [%] =

$$\frac{\sum_{j=1}^n \text{GW} - \text{odchylka } j}{n} = \frac{(-90) + (-94) + (-70) + (-61) + 5}{5} = -62$$

kde n je počet skupin aktivních minerálů, případně směsí aktivních minerálů, zjištěných ve zkoušených vzorcích, pro které jsou v minerálním kritériu definovány mezní hodnoty

Vzorek K1 musí být, jak bylo již zdůrazněno, z důvodů nepatrného překročení jediné mezní hodnoty podle současného minerálního kritéria, hodnocen jako namrzavý.

Při zohlednění všech relativních odchylek mezních hodnot se naproti tomu ukazuje zjevně průměrné nedosažení střední hodnoty (-62 %), takže zkoušené kamenivo podle tohoto posouzení může být považováno za jednoznačně nenamrzavé.

Tímto postupem musí být nakonec místo původně čtyř materiálů hodnocených podle dosavadní metody z důvodu mineralogického složení jako namrzavé, posuzován takto již jen vzorek K2. Vzorek K2 vykazuje současně rovněž i druhý největší mrazový zdvih (případně největší mrazový zdvih ze zkoušených materiálů, hodnocených podle předcházející metody jako namrzavé, viz obrázek 5), což lze hodnotit jako první náznak realističtějšího přístupu. Všechny ostatní zkoušené materiály, hodnocené podle dosavadního minerálního kritéria jako nevhodné, mohou být pomocí modifikovaného hodnocení mezních hodnot zařazeny mezi materiály nenamrzavé.

K dalšímu zkoumání, zda skutečně existuje korelační závislost mezi průměrnými odchylkami mezních hodnot jako nová interpretace mezní hodnoty minerálního kritéria na jedné straně a mrazovým zdvihem na straně druhé, byly zjišťovány další korelace (obrázek 7). Tyto korelace vykazují v poměru k většině korelací jednotlivých minerálů nebo směsí minerálů i skutečně srovnatelně dobré korelační závislosti. Tato okolnost může být považována jednak za potvrzení větší spolehlivosti modifikované interpretace minerálního kritéria na základě průměrné odchylky mezních hodnot, jednak za potvrzení minerálního kritéria samotného jako vhodného nástroje pro posouzení namrzavosti.

4.5 Výsledky rychlých zkoušek

Z důvodů spíše nevýznamných korelačních závislostí mineralogického složení frakce < 0,02 mm s mrazovými zdvihy ztratil podstatný cíl rychlých zkoušek, totiž rychlejší mineralogická analýza, svou důležitost. Ostatně se v současné době ukazují na základě zkoušek velmi heterogenních materiálů pouze velmi špatné mineralogické korelační závislosti s provedenými rychlými zkouškami (pouze hodnoty ekvivalentu písku vykazují u určitých skupin směsí kameniva a minerálů relativně příznivé korelační závislosti) [12].

Dalším cílem rychlých zkoušek bylo možné urychlení všech metod pro posuzování namrzavosti. Rychlé zkoušky měly umožnit pohotovému závěru o namrzavosti veškerých zkoušených materiálů bez mineralogické analýzy jemných částic. Proto byly výsledky rychlých zkoušek porovnávány s výsledky zkoušek mrazových zdvihů. I zde se při zkoumání nejrůznějších materiálů neukazují žádné důležité korelační závislosti. Pouze u určitých skupin minerálů, případně při vyloučení těchto skupin (např. čediče, serpentinity nebo diabasy), byly zjištěny malé korelační závislosti. Z důvodů malé velikosti souboru těchto skupin minerálů (≤ 10) a velké heterogenity zkoušených materiálů není paušální hodnocení všech zkoušených materiálů, ani specifické závěry pro přesně vymezené skupiny materiálů na základě realizované výzkumné práce v současné době ještě možné. Předpokládá se však další výzkum této problematiky na obsáhlejších souborech vzorků.

5. Shrnutí a závěry

Jílové minerály, rozhodující pro mineralogické posouzení podle minerálního kritéria vykazují ve zkoumaných vzorcích kameniva vždy podle použité metody mineralogické analýzy zčásti výrazně odlišné obsahy. Tato okolnost zdůrazňuje význam spolehlivé mineralogické analýzy pro stanovení minerálního kritéria.

Ze všech uvedených metod vykazuje nejlepší výsledky metoda Komplexní mineralogické analýzy (KMA) a měla by být v budoucnosti používána v kombinaci s rentgenovou diffrakcí XRD jako základní metodou a doplňkovými metodami STA a chemické analýzy jako metoda rutinní. Jednotný postup a vysoká úroveň normalizace jsou přitom předpokladem pro reprodukovatelné posouzení v rámci minerálního kritéria.

Modifikace, případně optimalizace minerálního kritéria z důvodů příliš přísných mezních hodnot, byla provedena zavedením nového souhrnného parametru, který zohledňuje veškeré relativní odchylky od mezních hodnot. Tímto způsobem může být namrzavost směsí kameniva pro nestmelené podkladní vrstvy s velkou pravděpodobností posuzována mnohem realističtěji než dříve, ačkoli nedošlo ke změně žádné jednotlivé mezní hodnoty. To by bylo s ohledem na různorodost zkoušených materiálů, relativně malý soubor zkoušených vzorků a dosud přesně nezjištěné faktory ještě předčasné.

Pomocí nové interpretace existujících mezních hodnot mohou se nyní v silničním stavitelství uplatnit podle okolností i materiály, které dosavadní minerální kritérium nespĺňovaly, i když byla u nich prokázána dostatečná odolnost proti mrazu.

Pro budoucnost by byl účelný výzkum dalších podstatných faktorů a současně i pracovní postup, zaměřený ve zvýšené míře na vlastnosti specifických materiálů. Je pravděpodobné, že doplňkovými výzkumy na úrovni určitých skupin materiálů, jako např. čedičů, mohou být zjištěny realističtější mezní hodnoty pro tyto specifické materiály.

Literatura

- [1] ÖNORM B 4811: Gesteinskörnungen für ungebundene Tragschichten im Straßen- und Flugplatzbau; Beurteilung der Frostsicherheit, 2001
(*ÖNORM B 4811: Kamenivo pro nestmelené vrstvy pozemních komunikací a letištních ploch; Posouzení nenamrzavosti, 2001*)
- [2] Casagrande, A.: Discussion on frost heaving, Proceedings, Highway Research Board, Vol. 11, Pt. 1, S. 168 – 172, 1931
(*Casagrande, A.: Rozbor problematiky namrzavosti, postupy, Komise pro výzkum dálnic, svazek 11, část 1, str. 168 – 172, 1931*)
- [3] ÖNORM B 4810: Prüfverfahren für mechanische und physikalische Eigenschaften von Gesteinskörnungen; Frostsicherheit von Gemischen für ungebundene Tragschichten im Straßen- und Flugplatzbau, 2001
(*ÖNORM B 4810: Zkušební metody pro mechanické a fyzikální vlastnosti kameniva; Nenamrzavost směsí pro nestmelené podkladní vrstvy pro pozemní komunikace a letištní plochy, 2001*)
- [4] Ottner, F.; Schwaighofer, B.; Müller, H. W.: Quantitative Tonmineralanalyse – Phantasie, Philosophie oder Realität, Zbl. Geol. Paläont. Teil I, 1996
(*Ottner, F.; Schwaighofer, B.; Müller, H. W.: Kvantitativní analýza jílových minerálů – Fantazie, filozofie nebo realita, Odborný časopis Geologie a paleontologie, Část I, 1996*)
- [5] Whittig, L. D.: X-ray diffraction techniques for mineral identification and mineralogical composition; in: Black, C. [editor]: Methods of Soil Analysis, 671 – 698, 1. Amer. Soc. Agron., Madison/Wisconsin 1965
(*Whittig, L. D.: Rentgenová difrakce pro identifikaci minerálů a stanovení mineralogického složení; in: Black, C., [vydavatel]: Metody pedologické analýzy 671 – 698, 1. Amer. Soc. Agron., Madison/Wisconsin 1965*)
- [6] Kinter, E. B.; Diamond, S. A.: A new Method for preparation and treatment of orientated – Aggregate specimens of soil clays for X-Ray Diffraction analysis, Soil Sci. 81, 111 – 120, Baltimore 1956
(*Kinter, E. B.; Diamond, S. A.: Nová metoda pro přípravu a zpracování vzorků kameniva z jílových hornin pro rentgenovou difrakci, Soil Sci. 81, str. 111 – 120, Baltimore 1956*)
- [7] Mineral Powder Diffraction File: Data Book, bzw. Search Manual, Published by the JCPDS Int. Centre for Diffraction Data, Pennsylvania/USA 1980
(*Kartotéka difrakce minerálních jemných částic: Soubor dat, případně odborný manuál, vydaný Centrem JCPDS pro data o rentgenové difrakci, Pennsylvania/USA 1980*)
- [8] Brindley, G. W.; Brown, G.: Crystal Structures of Clay Minerals and their X-Ray Identification, Mineralogical Society, 495 S., London 1980
(*Brindley, G. W.; Brown, G.: Krystalická struktura jílových minerálů a jejich identifikace rentgenovou difrakcí, Mineralogická společnost, 495 str., Londýn 1980*)
- [9] Thorez, J.: Phyllosilicates and clay minerals – a laboratory handbook for their x-Ray diffraction analysis, Edition G. Lelotte, 579 S., Liège 1975
(*Thorez, J.: Křemičitany s vrstevnatou strukturou a jílové minerály – Laboratorní příručka pro jejich analýzu rentgenovou difrakcí, Edice G. Lelotte, 579 str., Liège 1975*)
- [10] Moore, D. M.; Reynolds, R. C. jr.: X-Ray Diffraction and the Identification and Analysis of Clay Minerals, Oxford Univ. Press, 378 S., New York 1997
(*Moore, D. M.; Reynolds, R. C. jr.: Rentgenová difrakce a identifikace a analýza jílových minerálů, tisk Oxfordské univerzity, 379 str., New York 1997*)
- [11] Wilson, M. J.: A handbook of determinative methods in clay mineralogy, Verlag Blackie, 308 S., Glasgow and London 1987
(*Wilson, M. J.: Příručka metod pro stanovení jílových minerálů, nakladatelství Blackie, 308 str., Glasgow a Londýn 1987*)
- [12] Kugler, H.: Frostsicherheit im Straßenbau – Ein verbessertes Mineralkriterium, Disseration am Institut für Angewandte Geologie, Universität für Bodenkultur Wien 2002
(*Kugler, H.: Nenamrzavost v silničním stavitelství – Optimalizované minerální kritérium, Dizertační práce na Institutu pro užitou geologii, Zemědělské univerzita Vídeň, 2002*)

- [13] RVS 11.062: Grundlagen, Prüfverfahren, Steinmaterial, Forschungsgesellschaft für das Verkehrs- und Straßenwesen, Bundesministerium für wirtschaftliche Angelegenheiten 1997 (*RVS 11.062: Základní ustanovení, zkušební metody, minerální suroviny, V7zkumná společnost pro dopravu a silniční stavitelství (FVS), Spolkové ministerstvo hospodářství 1997*)
- [14] Schultz, L. G.: Quantitative Interpretation of Mineralogical Composition from X-Ray and Chemical data of the Pierre Shales, Geol. Surv. Prof. Paper, 391 C, 1 – 31, Washington 1964 (*Schultz, L. G.: Kvantitativní interpretace mineralogického složení na základě rentgenové difrakce a chemické analýzy; Pierre Shales, Geol. Surv. Prof. Paper, 391 C, 1 – 31, Washington 1964*)
- [15] Schlichting, E.; Blume, H. P.; Stahr, K.: Bodenkundiges Praktikum – Eine Einführung in pedologisches Arbeiten für Ökologen, insbesondere Land- und Forstwirte und für Geowissenschaftler, 2. neu bearbeitete Auflage, Blackwell Wissenschafts-Verlag, Berlin und Wien 1995 (*Schlichting, E.; Blume, H. P.; Stahr, K.: Pedologické praktikum – Úvod do pedologických prací pro ekology, zejména v oblasti zemědělství, lesního hospodářství a pro vědecké pracovníky v oboru geologie, 2. přepracované vydání, Blackwell Wissenschafts-Verlag, Brln a Vídeň 1995*)
- [16] Mehra, O. P.; Jackson, M. L.: Iron oxide removal from soils and clays by a dithionitecitrate system buffered with sodium bicarbonate, Clays and Clay Miner, 7, 317 – 327, 1960 (*Mehra, O. P.; Jackson, M. L.: Oxidy železa získané ze zemin a jílových minerálů komplexem dithioničitan – citran v tlumivém roztoku kyselého uhličitanu sodného, Jíly a jílové minerály 7, str. 317 – 327, 1960*)
- [17] Kugler, H.; Schwaighofer, B.; Gruber, S.: Die Modifizierung des Wasseraufnahmeversuches nach Enslin-Neff; in: Tagungsbeiträge 4 ÖGT (Österreichische Geotechnik Tagung) am 24. – 25. Februar 2003, Österreichischer Ingenieur- und Architektenverein, Palais Eschenbach, Wien 2003 (*Kugler, H.; Schwaighofer, B.; Gruber, S.: Modifikace zkoušek nasákavosti podle Enslina-Neffa; in: Sborník 4. zasedání Rakouské geotechnické společnosti 24. a 25. února 2003, Rakouský spolek inženýrů a architektů, Palác Eschenbach, Vídeň 2003*)
- [18] DIN EN ISO 12571 Wärme- und feuchtetechnisches Verhalten von Baustoffen und Bauprodukten; Bestimmung der hygroskopischen Sorptionseigenschaften, Europäisches Komitee für Normung (CEN), Brüssel 2000 (*DIN EN ISO 12571 Tepelné vlhkostní vlastnosti stavebních materiálů a výrobků – Stanovení hygroskopických sorpčních vlastností, Evropský výbor pro normalizaci (CEN), Brusel 2000*)
- [19] ÖNORM EN 933-9 Prüfverfahren für geometrische Eigenschaften von Gesteinskörnungen; Teil 9: Beurteilung von Feineinteilen, Methylenblau-Verfahren, 1999 (*ÖNORM EN 933-9 Zkoušení geometrických vlastností kameniva – Část 9: Posouzení jemných částic – Zkouška metylenovou modří, 1999*)
- [20] Meier, L. P.; Kahr, G.: Determination of the cation exchange capacity (CEC) of clay mineral using the complexes of copper (II) ion with triethyltetramine and tetraethylenepentamine, Clays and Clay Minerals, Vol. 47, No. 3, 386 – 388, 1999 (*Stanovení výměnné iontové kapacity jílových minerálů pomocí komplexů dvojmocné mědi s triethyltetraaminem a tetraethylenpentaaminem. Jíly a jílové minerály, Svazek 47, č. 3, str. 386 – 388, 1999*)
- [21] ÖNORM EN 933-8 Prüfverfahren für geometrische Eigenschaften von Gesteinskörnungen; Teil 8: Beurteilung von Feineinteilen – Sandäquivalent-Verfahren (*ÖNORM EN 933-8 Zkoušení geometrických vlastností kameniva – Část 9: Posouzení jemných částic – Zkouška ekvivalentu písku, 1999*)
(poznámka překladatele: V odkazu originálu je uvedeno chybné označení EN 933-8 (originál: prEN 933-11); při zpracování studie bylo použito znění návrhu prEN 933-11 z r. 1995)