

KONCEPT SENSITIVITY - NÁSTROJ PRO KONSTITUČNÍ MODELOVÁNÍ MATERIÁLU VÝSYPEK HNĚDOUHELNÝCH DOLŮ

Mgr. David Mašín

UK, Přírodovědecká Fakulta

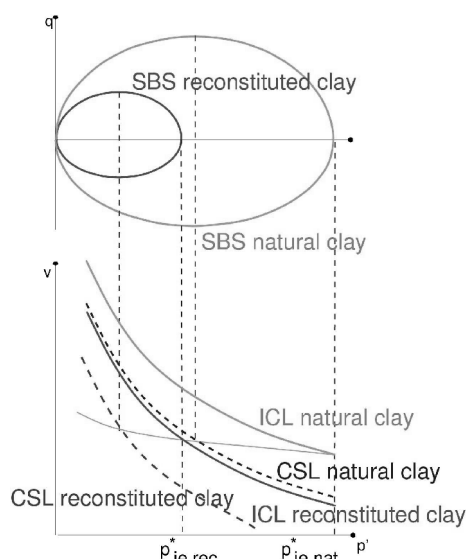
Sensitivity framework - a tool for the constitutive modelling of the material of clayey landfills.

An original approach to constitutive modelling of double-porosity materials is presented in the paper. The approach is based on the parallel in the mechanical behaviour of these materials and sensitive clays. After summary of the framework for the behaviour of natural clays (Cotecchia a Chandler, 2000) a new simple constitutive model based on the Modified Cam-Clay model, which allows for modelling of the degradation of the intergranular porosity, is proposed. Finally, its application to the double-porosity materials is discussed.

1. ÚVOD

Pochopení mechanických vlastností materiálů s dvojí pórovitostí, jejichž příkladem je materiál výsypek hnědouhelných dolů, se stává významným úkolem geotechnického výzkumu, vzhledem k velkým rozlohám, které výsypky pokrývají a nutnosti jejich využití ke stavebním činnostem. Rozsáhlý laboratorní a polní výzkum však prozatím nevedl k definování vhodných konstitučních vztahů na bázi mechaniky kontinua, které by byly schopné zohlednit nejdůležitější vlastnosti těchto materiálů. V příspěvku je navržen racionální přístup k numerickému modelování materiálů s dvojí pórovitostí a prezentovány první výsledky rozsáhlejšího výzkumného projektu, který se zabývá tímto tématem.

2. KONCEPT SENSITIVITY



Obr. 1 K demonstraci konceptu sensitivity

Koncept senzitivity byl publikovaný Cotecchiou a Chandlerem (2000) na základě obsáhlé experimentální studie jako ucelený koncept popisující chování přírodních strukturovaných jílu ve vztahu k ekvivalentnímu jílu rekonstituovanému.

Základním termínem konceptu sensitivity je mezní plocha (angl. *state boundary surface*, *SBS*), definovaná v prostoru p (efektivní střední hlavní napětí – v tomto článku jsou všechna napětí uvažována jako efektivní), q (deviátorové napětí) a $v = 1+e$ (v specifický objem, e číslo pórovitosti) jako obálka všech stavů, které může zemina dosáhnout.

Mezní plocha rekonstituované zeminy je schematicky znázorněna na Obr. 1. V zobrazení p - q a řezu odpovídajícím čáře odlehčení („*elastic wall*“) má mezní plocha přibližně eliptický tvar, průsečík s osou p definuje překonsolidační napětí, vrchol elipsy odpovídá

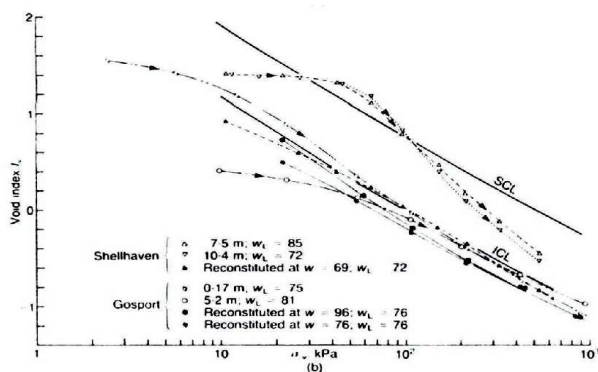
kritickému stavu zeminy. Řez rovinou $q=0$ v zobrazení $v-p$ definuje čaru isotroprního prvotního přitížení.

Mezní plocha přirozené zeminy má podobný tvar, pouze odlišnou velikost, jako plocha rekonstituované zeminy (Obr. 1). Poměr jejich velikostí se nazývá *sensitivity* (s). Jak je patrné z Obr. 1, struktura přirozené zeminy je otevřenější než struktura rekonstituované zeminy. Přirozený jíl v normálně konsolidovaném stavu má vyšší číslo pórovitosti než ekvivalentní jíl rekonstituovaný.

Změna *sensitivity* s namáháním umožňuje vyčlenit dva základní typy zemin:

1. zeminy se stabilní strukturou - *sensitivity* zůstává konstantní, např. Boom Clay a laboratorně sedimentovaný Londýnský jíl (Mašín *et al.*, 2003).

2. zeminy s nestabilní strukturou - *sensitivity* klesá při namáhání, např. Leda Clay, Pisa Clay a Bothkennar Clay. Při poklesu *sensitivity* dochází ke konvergenci čar isotroprního prvotního stlačení přirozené a rekonstituované zeminy, jak je patrné z Obr. 2 (Burland, 1990).



Obr. 2. Degradace struktury přirozené zeminy; Burland, 1990

Význam konceptu *sensitivity* tkví v zjištění, že ne pouze tvar mezní plochy, ale také ostatní mechanické parametry jemnozrné zeminy přirozené a rekonstituované jsou obdobné, až na hodnotu *sensitivity* s . To umožňuje použití konstitučních modelů, kalibrovaných na základě laboratorních

experimentů na rekonstituované zemině, pro předpověď chování geotechnických konstrukcí v strukturovaných jílech (Ingram, 2000; Mašín, 2004a). Pro zjištění velikosti a rychlosti degradace *sensitivity* postačuje provedení jednoduché zkoušky edometrické či izotropní stlačitelnosti.

3. POUŽITÍ KONCEPTU SENSITIVITY PRO MODELOVÁNÍ MATERIÁLU VÝSYPEK HNĚDOUHELNÝCH DOLŮ

Materiál výsypek hnědouhelných dolů se vyznačuje komplikovaným mechanickým chováním, jež nelze vystihnout klasickými postupy geotechnické analýzy. Materiál se vyznačuje dvojí pórovitostí, tvořenou „makropóry“ mezi jednotlivými hroudami třetihorního jílovce (mezerovitost, intergranulární pórovitost) a pórovitostí samotných hrud (intergranulární pórovitost). Po nasypání je chování materiálu ovlivněné zejména mezerovitostí (Obr. 3). S působením nadložního tlaku a zvětrávacích procesů dochází k snižování mezerovitosti a chování začíná být kontrolováno mechanickými vlastnostmi jednotlivých hrud (Boháč a Škopek, 2000).



Obr. 3. Úlomky jílovce po nasypání (Dykast, 1993)

Problematičnost materiálu výsypek hnědouhelných dolů spočívá zejména v obtížnosti studia mechanických vlastností v laboratorních podmínkách. Vzhledem k rozměrům fragmentovaného jílovce musely být laboratorní zkoušky (Herštus *et al.*, 1991; Feda, 1995)

prováděné na modelovém materiálu s redukovanou granulometrií. Lze očekávat, že velikost úlomků má významný vliv na měřené mechanické vlastnosti, vzhledem k strukturálním změnám a disipaci pórových tlaků, ke kterým dochází snáze u drobných úlomků studovaných v laboratoři, než u hrud skutečné sypaniny, které dosahují velikosti až 0,5 m.

Z toho důvodu je velice obtížné definovat vhodný konstituční model na bázi kontinua¹ pro materiál výsypek a je nutné provádět detailně monitorované zkušební geotechnické konstrukce, které vypovídají o skutečném chování výsypkového materiálu (Kurka, 1999; Škopek, 2001). Numerické analýzy jsou pak založeny na řešení inverzní úlohy a kalibraci relativně jednoduchých konstitučních modelů na základě měřených dat. Takový postup však nutně selhává v případě, kdy je navrhovaná geotechnická konstrukce významně odlišná od zkušební konstrukce použité pro zpětnou analýzu.

Nově navržený přístup k numerickému modelování výsypkových zemin je následující:

- 1) Využití paralely mezi mechanickým chováním přírodních jílu s nestabilní strukturou a zemin s dvojitou pórovitostí. Nestabilita struktury je v případě výsypkových zemin způsobena degradující mezerovitostí, referenčním materiálem je materiál jednotlivých hrud.
- 2) Zvolení vhodného konstitučního modelu pro zeminy se stabilní strukturou a jeho kalibrace na základě laboratorních zkoušek na materiálu hrud, které jsou snadněji proveditelné, než zkoušky na výsypkovém materiálu s dvojitou pórovitostí. Tato část výzkumného úkolu probíhá (Herbstová *et al.*, 2004; Herbstová a Boháč, 2004).
- 3) Kalibrace funkce pro degradaci sensitivity na základě velkorozměrových laboratorních zkoušek nebo polních měření.
- 4) Implementace konstitučního modelu do programu metody konečných prvků a analýza detailně monitorovaných zkušebních konstrukcí.

Poznámka k bodu 1): Je nutné zdůraznit že paralela mezi mechanickým chováním zemin s dvojitou pórovitostí a jílu s nestabilní strukturou nemůže být z citovaných důvodů prokázána přímo na základě porovnání predikcí konstitučního modelu s laboratorním experimentem. Její opodstatnění je však možno prokázat nepřímo pomocí bodu 4).

Poznámka k bodu 3): Kalibrace funkce pro degradaci mezerovitosti (podrobnější popis v sekcích 4. a 5.) může být provedena např. na základě velkorozměrové edometrické zkoušky, kde velikost jednotlivých fragmentů odpovídá velikosti hrud skutečného výsypkového materiálu. Limitní meze je ovšem možno určit i z polních měření - Herštus *et al.*, (2003) udávají, že při rozebírání jádra je možno zjistit určitou mezerovitost do hloubky 10 až 20 m. Měření průvzdušnosti speciální jehlou penetrovanou do výsypky (Herštus a Mühlendorf, 1993) ukázala průvzdušnost uložené sypaniny, tj. spojitou mezerovitost do hloubky 20m.

4. MATEMATICKÁ FORMULACE KONSTITUČNÍHO MODELU

Základním konstitučním modelem, který byl v této práci obohacen konceptem senzitivity, je Modifikovaný Cam-Clay model (Roscoe and Burland, 1968). Z důvodu omezeného rozsahu příspěvku není jeho celková matematická formulace prezentována, zájemce je odkázán např. na souhrnnou práci Muir Wood (1990). Pouze rovnice, které odlišují nový konstituční model od původního a jsou tedy nutné pro jeho numerickou implementaci, jsou shrnuty.

Základní konstituční model byl modifikován na základě práce Butterfielda (1979) tak, že sklon čáry prvotního přitížení a odlehčení je lineární v prostoru $\ln(p) : \ln(1+e)$, kde e je číslo pórovitosti a p je střední hlavní napětí. Jejich směrnice v tomto zobrazení je dána parametry λ^* a κ^* . Čára prvotního isotropního přitížení, jejíž pozice je kontrolována parametrem N , má tedy rovnici

$$\ln(1+e) = N - \lambda^* \ln(p)$$

¹ Je nutné zmínit pokusy o modelování výsypkového materiálu pomocí modelů pro diskontinuum (Doležalová a Kořán, 2001), které mají však prozatím pouze výzkumný charakter.

Konstituční model obohacený o koncept sensitivity je charakterizován plochou plasticity, jejíž velikost je počítána jako součin velikosti této plochy pro materiál bez intergranulární pórovitosti (definovaná parametrem p_c) a aktuální sensitivity s . Základní charakteristikou modelu je evoluční rovnice popisující změnu sensitivity (s) s plastickým přetvořením. Pro tento účel byla převzata formulace vyvinutá Baudet a Stallebrass (2004) pro přírodní strukturované jíly:

$$\dot{s} = -\frac{k}{\lambda^* - \kappa^*}(s - s_f)\dot{\varepsilon}^d$$

Zde k je parametr kontrolující rychlost změny sensitivity, s_f je konečná sensitivity a tečka nad symbolem vyjadřuje časovou derivaci a tedy přírůstek u časově nezávislého modelu. ε^d je akumulované plastické přetvoření s evoluční rovnicí:

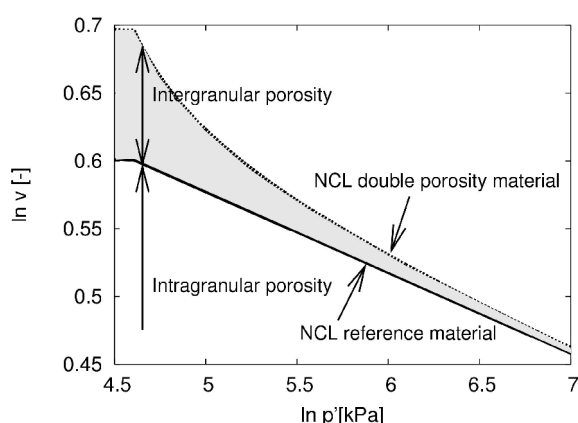
$$\varepsilon^d = \sqrt{\varepsilon_v^p + \varepsilon_s^p}$$

ε_v^p je plastické objemové přetvoření a ε_s^p je plastické smykové přetvoření.

Přestože popsané rovnice, spolu s rovnicemi Modifikovaného Cam-Clay modelu, plně definují nový constituční model, jistou komplikaci představuje sestavení podmínky konzistence. Ta zaručuje, že stav napětí zůstává po přírůstku plastického přetvoření na ploše plasticity. Vzhledem k rozsahu příspěvku však podmínka konzistence nemůže být podrobně diskutována.

Nový constituční model je charakterem obdobný „strukturovanému Cam-Clay modelu“ vyvinutému Liu a Carter (2002) a jedná se o speciální případ kinematického modelu podle Baudet a Stallebrass (2004), pro případ kdy velikost kinematických povrchů je shodná s velikostí mezní plochy. Na podobném principu je založena řada dalších elastoplastických modelů pro strukturované jíly, jako Rouiana a Muir Wood (2000) a také modely pro cementované písky a zvětralé horniny, jako např. model podle Lagioia a Nova (1995).

5. IMPLEMENTACE A VLASTNOSTI MODELU



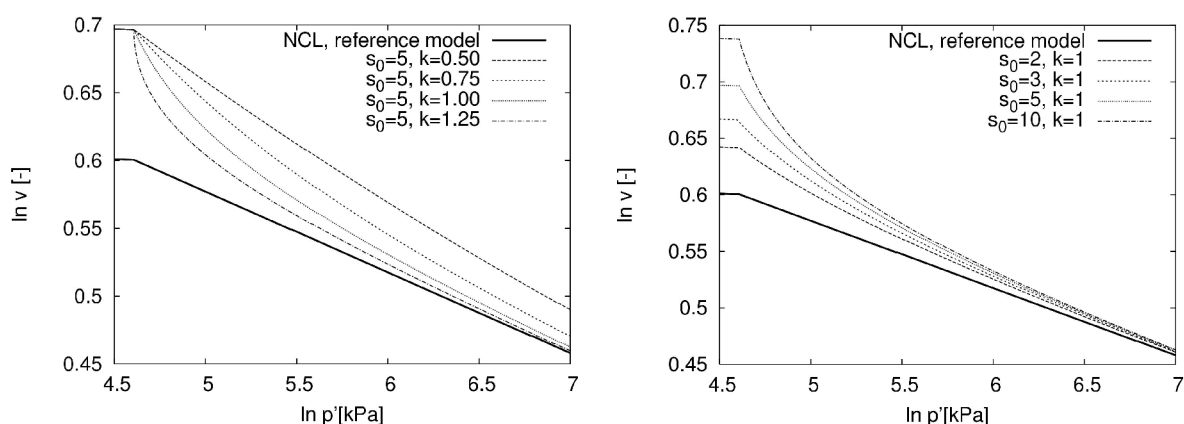
Obr. 4 Demonstrace použití konceptu sensitivity pro materiál s dvojitou pórovitostí

Konstituční model popsaný v sekci 4. byl implementován do „open source“ C++ programu *Triax* (Mašín, 2004b), jenž je určený pro simulaci laboratorních zkoušek, studium a vývoj constitučních modelů („single element program“). Jeho struktura je obdobná programu pro metodu konečných prvků *Tochnog* a implementace constitučního modelu do programu *Triax* tedy umožňuje jeho přímé včlenění do programu MKP.

Základní charakteristika modelu, tedy změna velikosti SBS v závislosti na velikosti sensitivity, je demonstrována na Obr. 4. pro zkoušku izotropní stlačitelnosti. K pórovitosti materiálu hrud se přičítá mezerovitost materiálu. Velikost mezerovitosti závisí na plastickém přetvoření, při větších přetvořeních (a tedy i napětích) dochází k jejímu postupnému snižování a chování materiálu začíná být kontrolováno chováním materiálu hrud. Přestože současná verze modelu prezentovaná v příspěvku uvažuje pouze změnu sensitivity s plastickým přetvořením, do budoucna se uvažuje i zohlednění časového faktoru, tedy snižování sensitivity (uzavírání intergranulární pórovitosti) v důsledku zvětrávacích procesů.

Konstituční model vyžaduje dva nové parametry s_f a k a počáteční hodnotu stavové proměnné s_0 . Parametr s_f určuje míru „stability struktury“ a pro materiál s dvojitou pórovitostí je jeho hodnota rovna jedné. Vliv parametru k a počáteční sensitivity s_0 je znázorněn na Obr. 5. S rostoucí hodnotou parametru k dochází k rychlejšímu uzavírání mezerovitosti v závislosti na plastickém přetvoření. Počáteční hodnota s_0 určuje počáteční velikost mezerovitosti.

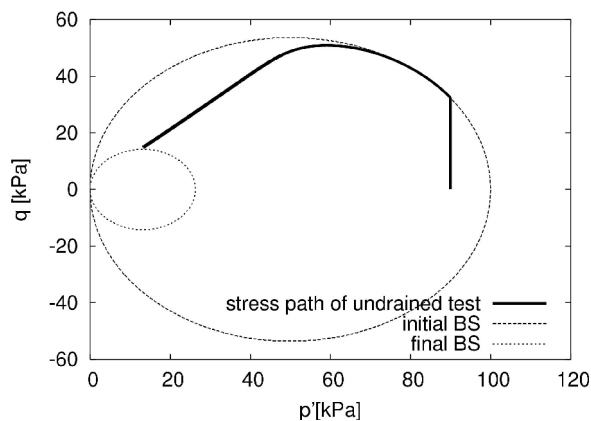
Jak je zřejmé z evoluční rovnice sensitivity s , její změna nezávisí (s použitím rovnice podle Baudet a Stallebrass, 2004) pouze na plastickém objemovém přetvoření, ale také na plastickém smykovém přetvoření. K uzavírání pórů mezi hroudami výsypkové zeminy tedy dochází i při namáhání smykem. Dráha napětí nedrénované smykové zkoušky pro mezerovitou zeminu predikovaná konstitučním modelem je zobrazena na Obr. 6. Díky poklesu sensitivity s plastickým smykovým přetvořením a tedy zmenšování velikosti SBS model umožňuje simulovat kolapsibilní chování výsypkového materiálu při smykovém namáhání. Jak ovšem bylo poznamenáno výše, správnost předpovědi lze kvůli nedostatku laboratorních experimentů posoudit pouze pomocí MKP analýzy zkušební geotechnické konstrukce.



Obr. 5. Vliv parametru k a počáteční sensitivity s_0 na zkoušku isotropní stlačitelnosti

6. ZÁVĚR

V článku je prezentován originální přístup ke konstitučnímu modelování materiálu výsypek hnědouhelných dolů. Přístup vychází z paralely mezi chováním jílu s nestabilní strukturou a materiálu s dvojitou pórovitostí. Byl vyvinut nový jednoduchý konstituční model na základě Modifikovaného Cam-Clay modelu, umožňující modelovat degradaci intergranulární pórovitosti. Studie vlivu jednotlivých parametrů ukázala, že model umožňuje vystihnout různou rychlost degradace sensitivity, je také možno předepsat počáteční sensitivity. Kalibrace modelu na základě skutečných dat na výsypkovém materiálu je náplní pokračujícího výzkumu. Připravuje se také včlenění vlivu časového faktoru na velikost sensitivity.



Obr. 6. Simulace nedrénované triaxiální zkoušky pro materiál s dvojitou pórovitostí

7. PODĚKOVÁNÍ

Autor děkuje za finanční podporu projektu grantu GAUK 331/B-GEO/PřF.

8. LITERATURA

- Baudet a Stallebrass (2004) A constitutive model for structured clays. *Geotechnique* 54, No. 4, 269-278
- Boháč, J. a Škopek, J. (2000) A motorway over clayey fills of open pit coal mines. In proc. *Geoeng 2000*, Melbourne.
- Burland, J. B. (1990) On the compressibility and shear strength of natural clays. *Geotechnique* 40, No.3, 329-378
- Butterfield (1979) A natural compression law for soils (an advance on $e-\ln p'$). *Geotechnique* 29, No. 4, 469-480
- Cotecchia, F. a Chandler, J. (2000) A general framework for the mechanical behaviour of clays. *Geotechnique* 50, No. 4, 523-544
- Doležalová, M. a Kořán, P (2002) Micromechanical modelling of a dump material. *The international Journal of Geomechanics* 2, No. 1, 47-74
- Feda, J. (1995) Compression of unsaturated double porosity clay. *Proc 1st Int. Conf. on Unsaturated Soils*, September, Alonso a Delage eds., 711-718, Paris
- Herbstová, V. a Boháč, J. (2004) *Mechanické vlastnosti výsypkového materiálu*. 32. konf. *Zakl. Stav.*, Brno
- Herbstová, V., Mašín, D. a Boháč, J. (2004) Konstituční modely pro zeminy s dvojitou pórovitostí. *9th Int. Konf. Geotechnika*, Štrbské pleso, SK
- Herštus, J. a kolektiv (1991) Výzkum geot. podmínek zhospodárnění návrhu a provozu odkališť, Závěrečná zpráva d.ú 03, státního úkolu P 01-347-822, SG - Geotech. a.s.
- Herštus, J. a kolektiv (2003) Sanace a revitalizace oblastí a staveb s negativními relikty energetické činnosti, etapa I-1/03: Výzkum deformačních parametrů odvalů, odkališť a výsypek, zak. č. 103391, AGE Praha
- Herštus, J. a Mühlendorf, J. (1993) Určování hydraulických parametrů jílovcové sypaniny výsypek povrchových dolů v SHR polními zkouškami, *Polní geot. met.* 93, Ústí n. L.
- Ingram, P. (2000) The application of numerical models to natural stiff clays. PhD thesis, City University, London
- Kurka (1999) Motorway D8 - measurement of trial embankment. Interim Report, AZ Consult, Ústí n. L.
- Lagioia, R. a Nova, R. (1995) An experimental and theoretical study of a behaviour of calcarenite in triaxial compression. *Geotechnique* 40, No. 4, 633-648
- Liu a Carter (2002) A structured Cam Clay model. *Can. Geotech. J.* 39, 1313-1332
- Mašín, D., Stallebrass, S. E. and Atkinson, J. H. (2003). Laboratory modelling of natural structured clays, In *Proc. Int. Workshop on Geot. of Soft Soils - Theory and Practice*. Vermeer, Schweiger, Karstunen & Cudny (eds.), Noordwijkerhout, NL.
- Mašín, D. (2004a) Laboratory and numerical modelling of natural clays. MPhil Thesis, City University, London (připravuje se)
- Mašín, D. (2004b) Triax - single element program for soil mechanics, User manual. <http://www.natur.cuni.cz/~masin/triax/triax.html>
- Muir Wood, D. (1990) *Soil behaviour and critical state soil mechanics*, Cambridge Univ. Pr.
- Roscoe, K. H. a Burland, J. (1968) On the generalised stress-strain behaviour of wet clay. J. Heyman a F. A. Leckie (eds.), *Engineering plasticity*, pp 535-609. Cambridge, CUP
- Rouiana, M. a Muir Wood, D. (2000) A kinematic hardening constitutive model for clays with loss of structure. *Geotechnique* 50, No. 2, 153-164
- Škopek, J. (2001) Evaluation of fill compressibility by means of a trial embankment. *Proc. the COnf. on In Situ Measur. of Soil Prop.*, Bali, 215-218

David Mašín, Ústav hydrogeologie, Inženýrské geologie a Užité geofyziky, Karlova Universita, Albertov 6, 128 43 Praha 2, Česká republika. Tel: +420-2-2195 1552, Fax: +420-2-2195 1556, email: masin@natur.cuni.cz