



# VYSOKÉ UČENÍ TECHNICKÉ V BRNĚ

BRNO UNIVERSITY OF TECHNOLOGY

## FAKULTA STROJNÍHO INŽENÝRSTVÍ

FACULTY OF MECHANICAL ENGINEERING

## LETECKÝ ÚSTAV

INSTITUTE OF AEROSPACE ENGINEERING

# NÁVRH KOTVÍČÍHO PROSTŘEDKU PRO LETOUNY VŠEOBECNÉHO LETECTVÍ

DESIGN OF ANCHOR FOR GENERAL AVIATION AIRCRAFT

## BAKALÁŘSKÁ PRÁCE

BACHELOR'S THESIS

## AUTOR PRÁCE

AUTHOR

Adam Buchta

## VEDOUCÍ PRÁCE

SUPERVISOR

Ing. Filip Sklenář, Ph.D.

BRNO 2022

# Zadání bakalářské práce

Ústav: Letecký ústav  
Student: **Adam Buchta**  
Studijní program: Strojírenství  
Studijní obor: Základy strojírenství  
Vedoucí práce: **Ing. Filip Sklenář, Ph.D.**  
Akademický rok: 2021/22

Ředitel ústavu Vám v souladu se zákonem č.111/1998 o vysokých školách a se Studijním a zkušebním řádem VUT v Brně určuje následující téma bakalářské práce:

## Návrh kotvícího prostředku pro letouny všeobecného letectví

### Stručná charakteristika problematiky úkolu:

Na většině letišť je kapacita hangárů zcela obsazena. Z toho to důvodu musí letouny, které přiletí z jiných letišť zůstat stát na odbavovací ploše. V některých případech jsou odbavovací plochy nezpevněné s travnatým povrchem. V daném případě je nezbytné vhodně ukotvit letoun. Tato práce je zaměřena na zhodnocení dosavadních možností kotvení letounů na nezpevněných površích a dále má být v práci zpracován návrh nového kotvícího prostředku.

### Cíle bakalářské práce:

1. Proveďte rešerši běžně dostupných kotvících prostředků.
2. Vytvořte metodiku testování kotvících prostředků.
3. Proveďte testování běžně dostupných kotvících prostředků.
4. Navrhněte vlastní kotvící prostředek.
5. Vyroberte vlastní kotvící prostředek (dle návrhu z bodu 4.).
6. Proveďte testování vlastního kotvícího prostředku.

### Seznam doporučené literatury:

WEIGLOVÁ, K.: Mechanika zemin. Brno: AN CERM, s.r.o., 2007. ISBN: 80-7204-507-5.

ŠIMEK, J., JESENÁK, J., ECHLER, J., VANÍČEK, I.: Mechanika zemin. SNTL Praha, 1990.

JANÍČEK, P., ONDRÁČEK, E., VRBKA, J., BURŠA, J.: Pružnost a pevnost I, VUT-FSI, Brno, 2004

SVOBODA, P., BRANDEJS, J., Základy konstruování. Vyd. 8. Brno: Akademické nakladatelství CERM, 2020, 264 s. ISBN 978-80-7623-034-7.

Termín odevzdání bakalářské práce je stanoven časovým plánem akademického roku 2021/22

V Brně, dne

L. S.

---

doc. Ing. Jaroslav Juračka, Ph.D.  
ředitel ústavu

---

doc. Ing. Jaroslav Katolický, Ph.D.  
děkan fakulty

## Abstrakt

Cílem mé bakalářské práce je na základě existujících kotvících prostředků jak z oblasti letectví, tak z jiných oborů, navrhnout a vyrobit kotvící prostředek pro letouny všeobecného letectví, který by v nějakém ohledu překonával nebo vylepšoval vlastnosti již existujících kotev. Dalším souvisejícím cílem je pak porozumět způsobu fungování takovýchto kotev a rovněž vypracovat postup testování zemních kotev.

## Abstract

Aim of my bachelor's thesis is to, based on existing anchoring instruments from aviation industry and other fields, design an anchoring instrument, that would exceed or improve qualities of existing anchors in some way. Another related aim is to understand the working mechanism of such anchoring systems and also work out a procedure of testing of ground anchors.

## Klíčová slova

Zemní kotva, ukotvení, kotvení letadel, testování, návrh.

## Keywords

Ground anchor, anchoring, aircraft tie-down, testing, design.

## Bibliografická citace

BUCHTA, Adam. *Návrh kotvícího prostředku pro letouny všeobecného letectví* [online]. Brno, 2022, 42 s. Dostupné z: <https://www.vutbr.cz/studenti/zav-prace/detail/140346>. Bakalářská práce. Vysoké učení technické v Brně, Fakulta strojního inženýrství, Letecký ústav. Vedoucí práce Filip Sklenář.

## Čestné prohlášení

Prohlašuji, že svou bakalářskou práci na téma Návrh kotvícího prostředku pro letouny všeobecného letectví jsem vypracoval samostatně pod vedením vedoucího bakalářské práce, Ing. Filipa Sklenáře, a s použitím odborné literatury a dalších informačních zdrojů, které jsou všechny citovány v práci a uvedeny v seznamu literatury na konci práce.

Jako autor uvedené bakalářské práce dále prohlašuji, že v souvislosti s vytvořením této bakalářské práce jsem neporušil autorská práva třetích osob, zejména jsem nezasáhl nedovoleným způsobem do cizích autorských práv osobnostních a/nebo majetkových a jsem si plně vědom následků porušení ustanovení §11 a následujících zákona č.121/2000 Sb., o právu autorském, o právech souvisejících s právem autorským a o změně některých zákonů (autorský zákon), ve znění pozdějších předpisů, včetně možných trestněprávních důsledků vyplývajících z ustanovení části druhé, hlavy VI. díl 4 Trestního zákoníku č. 40/2009 Sb.

V Brně dne.....

.....

Adam Buchta

## Poděkování

Na tomto místě bych rád poděkoval svému vedoucímu panu Ing. Filipu Sklenářovi, Ph.D. za odborné vedení práce a za jeho rady a připomínky.

Poděkování za rady a pomoc při testování patří panu doc. Ing. Ivu Jebáčkovi, Ph.D.

V neposlední řadě děkuji panu Zdeňku Teplému za pomoc při výrobě vlastního prototypu.

## Obsah

1. Úvod.....	9
2. Mechanické vlastnosti zemin .....	10
3. Letecké incidenty a nehody spojené s ukotvením letadla .....	13
3.1. Incident GROB G520 T.....	13
3.2. Incident Cessna 150 G.....	15
4. Dostupné kotvící prostředky .....	16
5. Postup testování.....	20
6. Výsledky měření dostupných kotvících prostředků .....	22
7. Návrh vlastního kotvícího prostředku .....	25
7.1. Návrh č. 1 .....	27
7.2. Návrh č. 2 .....	28
8. Výroba vlastního kotvícího prostředku .....	29
9. Výsledky a vyhodnocení měření dostupných kotvících prostředků a vlastního prototypu .....	31
10. Závěr.....	40
Seznam použitých zdrojů .....	42

## 1. Úvod

Z důvodu obsazenosti hangárů letišť je poměrně často nutné letouny nechávat odstaveny na letištní ploše. V takovém případě vzniká nebezpečí nechtěného pohybu letounu po ploše vlivem například silných větrů. Je tedy nutné letouny při takovém odstavení nějakým způsobem zajistit proti pohybu, tedy ukotvit. Pokud jsou k dispozici možnosti jako trvalé kotvy, tedy betonové patky s okem zapuštěné do země, je výhodné je využít, ale v případě absence takovýchto prostředků je vhodné mít k dispozici přenosný kotvící prostředek, který je možné s sebou vozit a v případě potřeby jím letadlo na nezpevněné ploše ukotvit. A právě takovými kotvícími prostředky neboli kotvami se zabývá tato bakalářská práce.

V souladu se zadáním práce bych chtěl nejprve najít kotvící prostředky dostupné na trhu případně domácí výroby, sestavit postup nebo metodiku testování těchto kotev a prostředků podle tohoto postupu otestovat. Na základě výsledků tohoto testování a rovněž podle nastudované teorie z oblasti mechaniky zemin mám pak navrhnout a vyrobit prototyp vlastního kotvícího prostředku, který by vykazoval vylepšení nějakých vlastností zemních kotev a tento prototyp následně otestovat. Součástí práce je rovněž řešení leteckých incidentů spojených s kotvením letounů všeobecného letectví a souvisejících okolností.

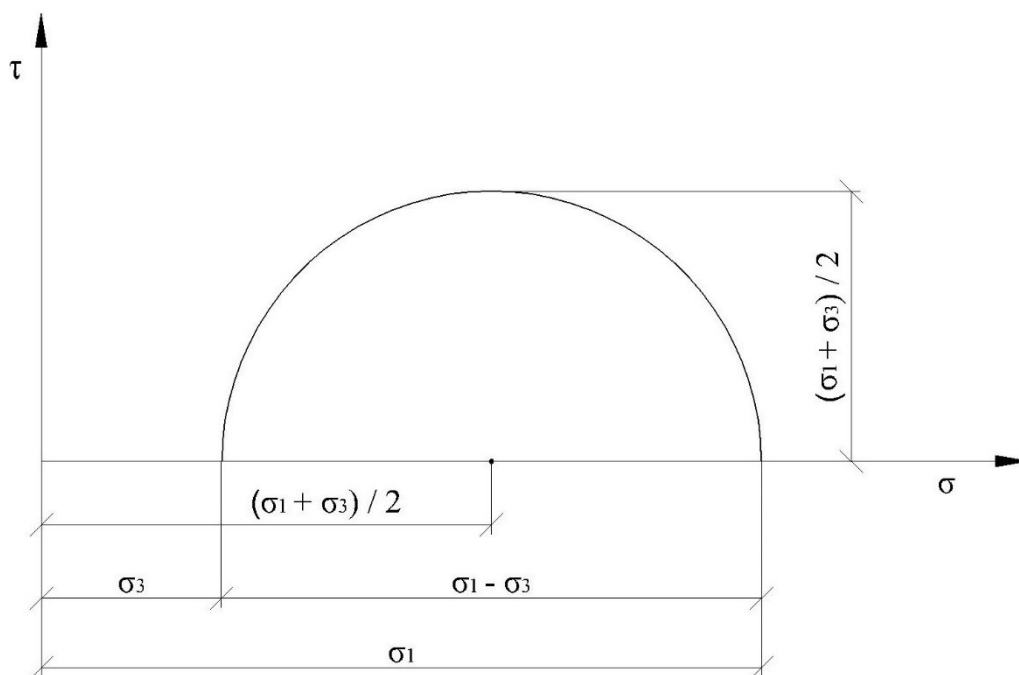
V rámci práce bych se chtěl rovněž zaměřit na mechanismus fungování kotvících prostředků v souvislosti se zmíněnou mechanikou zemin a pokusit se odhalit, jak je jejich únosnost závislá na jejich parametrech, případně na vnějších podmínkách.

Je vhodné zmínit, že přestože se práce zaměřuje na kotvy pro letouny, neomezuje se pouze na tuto oblast. Stejně jako v rešeršní části nevychází pouze z těchto prostředků, tak výsledky i vytvořený návrh jsou aplikovatelné i na jiné obory, než je letectví.

## 2. Mechanické vlastnosti zemin

Mechanika zemin řeší rovnováhu, napětí, přetvoření, případně porušení zemin, ke kterému dojde změnou napjatosti. Pomocí laboratorních zkoušek jsou stanovovány vlastnosti konkrétních zemin, které se poté používají při řešení daných problémů, a to zejména ve stavebnictví.

Pro kvantifikaci zatížení v jednom bodě zeminy se používají hlavní napětí  $\sigma_1$ ,  $\sigma_2$  a  $\sigma_3$ , kde ale obvykle  $\sigma_2$  neuvažujeme nebo ztotožňujeme  $\sigma_2 \equiv \sigma_3$ . Díky tomu můžeme napjatost v bodě znázornit pomocí Mohrovy kružnice (obr. 2.1).



Obr. 2.1: Mohrova kružnice [1], s. 59

Můžeme tedy vyjádřit maximální smykové napětí  $\tau_{max}$  jako [1], [2]

$$\tau_{max} = \frac{\sigma_1 - \sigma_3}{2}. \quad (1)$$

Toto zobrazení je velmi výhodné, neboť porušení zemin má obvykle smykový charakter (výjimečně může dojít k porušení v tahu). Podle Coulomba je pevnost ve smyku  $\tau$  (smykové napětí na mezi porušení) určeno jako [2]

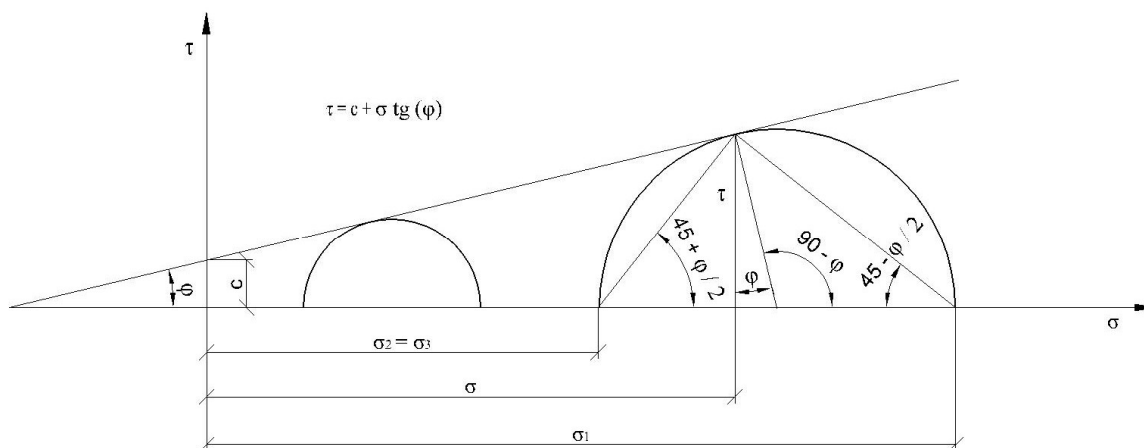
$$\tau = c + \sigma \cdot \operatorname{tg} \varphi, \quad (2)$$

kde  $c$  ... soudržnost zeminy

$\sigma$  ... normálové napětí působící kolmo na smykovou plochu porušení

$\varphi$  ... úhel vnitřního tření mezi částicemi zeminy.

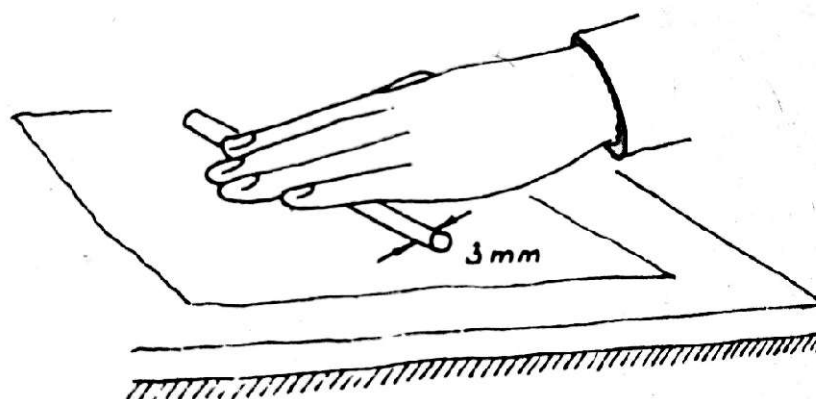
Toto mezní napětí můžeme rovněž zakreslit do Mohrovy roviny, čímž vzniká Mohr-Coulombovo zobrazení (obr. 2.2). Porušení smykem pak nastane v rovině, která svírá s napětím  $\sigma_1$  úhel  $45^\circ - \frac{\varphi}{2}$  a s napětím  $\sigma_2$  úhel  $45^\circ + \frac{\varphi}{2}$ , jak je v obrázku rovněž naznačeno. [2]



Obr. 2.2: Mohr-Coulombovo zobrazení [2], s. 181

Soudržnost  $c$  se vyskytuje pouze u soudržných zemin (hlíny a jíly), nenalezneme ji u písků a je způsobena vazbami jednotlivých částic s vodou. Pro vytvoření těchto vazeb je tedy zapotřebí jistého množství vody v zemině označované jako voda vázaná. Po překročení tohoto množství však pevnost zeminy klesá se zvyšujícím se obsahem vody. Podle obsahu vody může být zemina v jednom z těchto konzistenčních stavů (od největšího k nejmenšímu obsahu vody) [1]:

- Stav tekutý – v sevřené pěsti se zemina protlačuje mezi prsty.
- Stav plastický, který se dále dělí na:
  - stav měkký – zeminu lze lehce hníst
  - stav tuhý – lze zpracovávat válečky o průměru 3 mm (obr. 2.3)
- Stav pevný – zemina se při pokusu o vytvoření válečku o průměru 3 mm drolí
- Stav tvrdý – zemina má světlou barvu a lze ji rozbít na celistvé kusy



Obr. 2.3: Zkouška meze plasticity [2], s. 49

Při záporných teplotách se část vody v zemině mění v led, čímž se vlastnosti zeminy zásadně mění. Zvětšuje se například objem a tím v zeminách vzniká podtlak [1].

Kvůli vlivu vlhkosti na pevnostní vlastnosti zemin rozlišujeme dva druhy parametrů pevnosti, a to:

- Parametry totální, kde zeminu zkoušíme v původním stavu, tedy neodvodněnou a nekonsolidovanou (nezhutněnou). Platí zde vztah [2]

$$\tau = c_u + \sigma \cdot \operatorname{tg} \varphi_u, \quad (3)$$

kde  $c_u$  ... totální soudržnost

$\varphi_u$  ... totální úhel vnitřního tření.

Celkové totální napětí je tvořeno dvěma částmi, a to efektivním napětím přenášeným zrny  $\sigma_{ef}$  a napětím neutrálním způsobeným tlakem vody v pórech zeminy  $u$  [1]

$$\sigma = \sigma_{ef} + u. \quad (4)$$

- Parametry efektivní, kde zeminu zkoušíme v odvodněném, konsolidovaném stavu. Tím odstraníme neutrální napětí v zemině a celková napjatost má poté tvar [2]

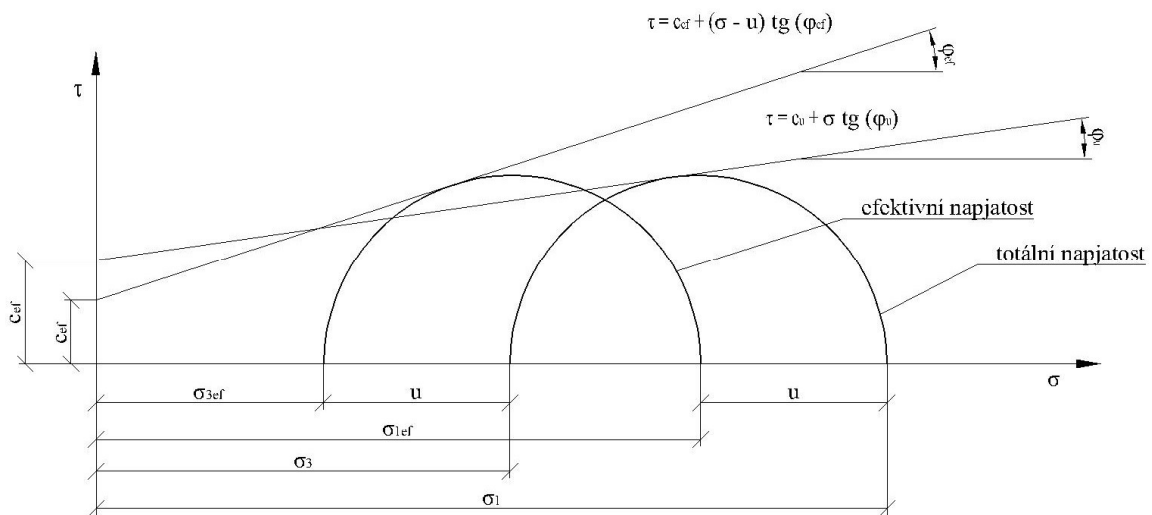
$$\tau = c_{ef} + \sigma' \cdot \operatorname{tg} \varphi_{ef} = c_{ef} + (\sigma - u) \cdot \operatorname{tg} \varphi_{ef}, \quad (5)$$

kde  $c_{ef}$  ... efektivní soudržnost

$\varphi_{ef}$  ... efektivní úhel vnitřního tření

$\sigma'$  ... efektivní napětí.

Rozdíl mezi těmito dvěma přístupy je znázorněn v obr. 2.4.



Obr. 2.4: Rozdíl mezi efektivní a totální napjatostí [1], s. 62

### 3. Letecké incidenty a nehody spojené s ukotvením letadla

Zejména při větrném počasí je ukotvení odstaveného letadla velmi důležité. Letadlo je ze své podstaty na vliv větru velmi citlivé a při nedostatečném, chybném nebo chybějícím ukotvení to může vést k nechtěným pohybům a následně případně i k poškození konstrukce letadla. V extrémních případech se může i samovolně vznést.

Následuje výčet několika případů, ve kterých hrálo roli ukotvení letadla.

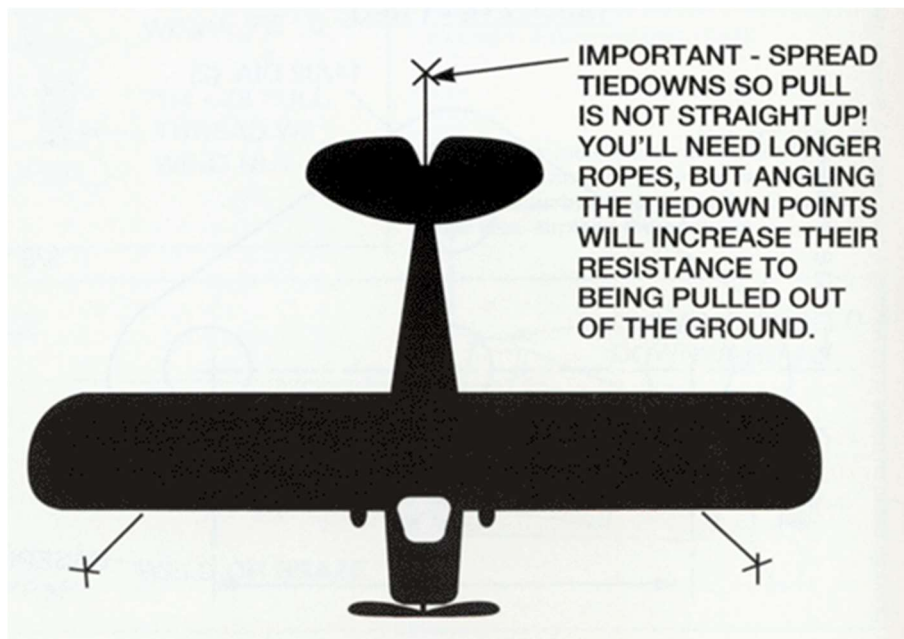
#### 3.1. Incident GROB G520 T

Zahraniční letoun byl 9. 2. 2020 zaparkován a ukotven na letišti Praha-Ruzyně (LKPR). Během noci se letadlo vlivem silného větru zhouplo a posadilo na ocasní část, načež bylo provedeno dodatečné zajištění. Letadlo bylo mírně poškozeno a po kontrole bylo uznáno způsobilé letu [3].

Na obr. 3.1 je vidět, že ukotvení nebylo provedeno zcela vhodně. Popruhy vedené přes křídla sice zabraňují klonění, klopení jimi však není omezeno. Na křídlech se přitom jistě nacházejí oka určená k uchycení provazu či řetězu. Zemní kotvy jsou přitom zatěžovány svisle vzhůru, přičemž v tomto směru je kapacita kotvy jednoznačně nejmenší. Na obr. 3.2 je ukázán způsob kotvení, který doporučuje americká EAA (Experimental aircraft association) [4].



*Obr. 3.1: Fotografie z incidentu GROB G520 T [3]*



*Obr. 3.2: Způsob kotvení doporučený EAA [4]*

### 3.2. Incident Cessna 150 G

22. 10. 2021 byl letoun v rámci plánované údržby přesunován v prostoru před hangárem. V té chvíli silný poryv větru letadlo zvedl do vzduchu a přetočil na záda, čímž byl výrazně poškozen. Při incidentu nebyl nikdo zraněn. Fotografie z incidentu jsou na obr. 3.3 a 3.4. [5]

Tomuto incidentu samozřejmě nebylo možno předejít vhodným kotvením letadla, neboť k němu došlo během manipulace s letounem. Je zde ale uveden pro ilustraci, jak vážné mohou být následky silného větru, který fouká na letadlo, a jak důležité je tedy letoun, pokud je to v dané situaci možné, důsledně a dostatečně ukotvit.



*Obr. 3.3: Fotografie z incidentu Cessna 150 G [5]*



*Obr. 3.4: Fotografie z incidentu Cessna 150 G [5]*

## 4. Dostupné kotvící prostředky

V této práci se zabývám kotvením výhradně na nezpevněné, zejména travnaté, ploše. Letadla lze samozřejmě kotvit i na zpevněných plochách, například k okům zavedeným v betonovém základu. V takovém případě však nelze očekávat porušení funkce samotné kotvy, ale spíše upínacího prostředku (lana) nebo konstrukce samotného letadla.

V praxi je používáno mnoho různých typů kotvících prostředků, a to výroby jak komerční, tak samostatné. Obecně je možné je rozdělit do tří následujících skupin.

Nejjednodušším způsobem zajištění letadla je prostá tyč nebo trubka zatlučená do země pod určitým úhlem, a to proti předpokládanému směru působící síly. Únosnost této kotvy je tedy založena na odporu proti pohybu tělesa v zemině. Vzhledem ke zvolenému způsobu testování popsanému níže by však tento typ poskytoval daleko nižší výsledky než ve skutečnosti a informace by tedy nebyla relevantní. Tento princip lze navíc uplatnit i u řady ostatních kotev, čímž se zvýší jejich únosnost.

Druhou velkou skupinou jsou kotvy šroubového tvaru. Ty pracují na základě přenosu tažné osově síly tlakem do zeminy nad kotvou, což je do okolí přenášeno soudržností zeminy, jak je popsáno v kapitole 1. Tato skupina je při mém testování zastupována kotvami č. 1 až 4.

Poslední významný druh kotev je v podstatě úpravou toho prvního, a to v tom smyslu, že je použito více tyčí zavedenými v různých směrech a ty jsou pak nad zemí spojeny konstrukcí, která zajišťuje přenos síly z upínacího prvku (lana). Tyto prostředky jsou reprezentovány kotvou č. 5.

Nevýhodou kotev první a třetí skupiny je nutnost vozit s sebou kvůli instalaci kladivo nebo podobný prostředek. To vytváří zbytečnou zátěž letadla při letu. Na druhou stranu se dá očekávat, že jejich instalace bude v porovnání se šroubovými kotvami snazší, a to zejména při tvrdém podkladu (ať už je to způsobeno suchou půdou nebo konsolidací – pojížděním).

Po průzkumu dostupných prostředků jsem vybral těchto pět kotev, a to jak těch určených přímo pro kotvení letadel, tak i z jiných oblastí. Tyto jsou vyfotografovány na obr. 4.1 až 4.5. U každého vzorku, pokud není uvedeno jinak, je uvedena délka jeho závrtné části  $L$ , průměr závrtné části  $D$  a materiál, ze kterého je vyroben.

**1. Zavrtávací kolík do země pro kotvení zakrytí bazénu nebo uvázání psa**

$L = 250 \text{ mm}$

$D = 40 \text{ mm}$

materiál: korozi-vzdorná ocel



*Obr. 4.1: Kotva č. 1*

**2. Šrouby na ukotvení letadla Peggy Peg**

$L = 250 \text{ mm}$

$D = 30 \text{ mm}$

materiál: hliník, plast



*Obr. 4.2: Kotva č. 2*

**3. Kolík se samozávrtnou špičkou pro větroně**

$L = 240 \text{ mm}$

$D = 60 \text{ mm}$

materiál: ocel



*Obr. 4.3: Kotva č. 3*

**4. Zemní kotva se samozávrtnou špičkou stavební**

$L = 420 \text{ m m}$

$D = 100 \text{ m m}$

materiál: ocel



*Obr. 4.4: Kotva č. 4*

**5. Letecká kotva The Claw C-100**

délka hřebíků:  $L_1 = 270$  mm

délka ramen:  $L_2 = 230$  mm

materiál: hliník



*Obr. 4.5: Kotva č. 5*

## 5. Postup testování

Vzhledem k absenci metodiky testování zemních kotev nebo obdobných prvků bylo třeba vytvořit vlastní postup testování.

Zjišťovaným parametrem při testování je maximální síla  $F_{max}$ , kterou je na kotvu působeno v průběhu vytahování svisle vzhůru z travnaté plochy simulující odstavňovou plochu u letiště. Ve skutečnosti sice mohou být kotvy do země zaváděny pod úhlem (v tomto směru je únosnost vyšší), ale takové uspořádání by byla instalace kotev někdy náročná až nedosažitelná a výsledky by tak nebyly porovnatelné. V případě takto instalované kotvy bude při překročení únosnosti kotva v zemi přetočena a poté bude stejně vytahována v osovém směru. Vertikální směr je tedy volen pro snazší realizaci testu a lepší porovnatelnost.

Kotvicí prostředek je uchycen za určené místo a pomocí ručního dílenského jeřábu vytahován kolmo vzhůru v ose kotvy. Mezi ramenem jeřábu a testovaným prostředkem je umístěn siloměr zaznamenávající průběh síly v čase (obr. 5.1). Předpokládám, že jako první se poruší zemina, a nikoliv část testované kotvy.



Obr. 5.1: Zkoušecí mechanismus

Pro účely testování je používána zatravněná plocha, kde se nachází hlinitá půda. Je nutné poznamenat, že tato plocha není nijak mechanicky zatěžována, a bude tedy nekonsolidovaná. Naproti tomu trávník na letištích bývá pojížděn letadly, a je tedy alespoň částečně konsolidován a bude tedy vykazovat lepší mechanické vlastnosti. Výsledné síly tedy očekávám nižší, než by byly naměřeny na letišti, což ale nevádí, neboť výstupem bude pouze orientační porovnání konstrukcí jednotlivých kotev mezi sebou.

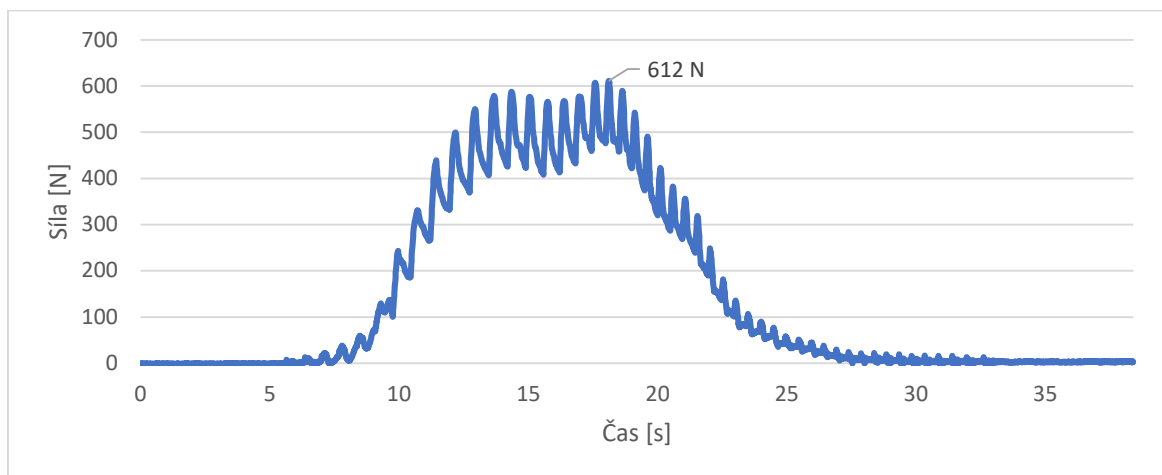
Naměřené hodnoty budou samozřejmě také záviset na druhu zeminy. Podle teorie o mechanice zemin je jejich únosnost závislá také na obsahu vody. Abych odstranil vliv těchto parametrů, měřím nejprve v jednom dni pět srovnávaných kotev (první měření), a po vytvoření vlastního prototypu tento změřím současně s původními prostředky pro validní srovnání (druhé měření). V obou případech kontroluji, že země není promrzlá.

Podobný postup měření, ačkoli daleko podrobnější, byl použit i při měření stavebních kotev jiného charakteru v následující práci [6] (str. 102).

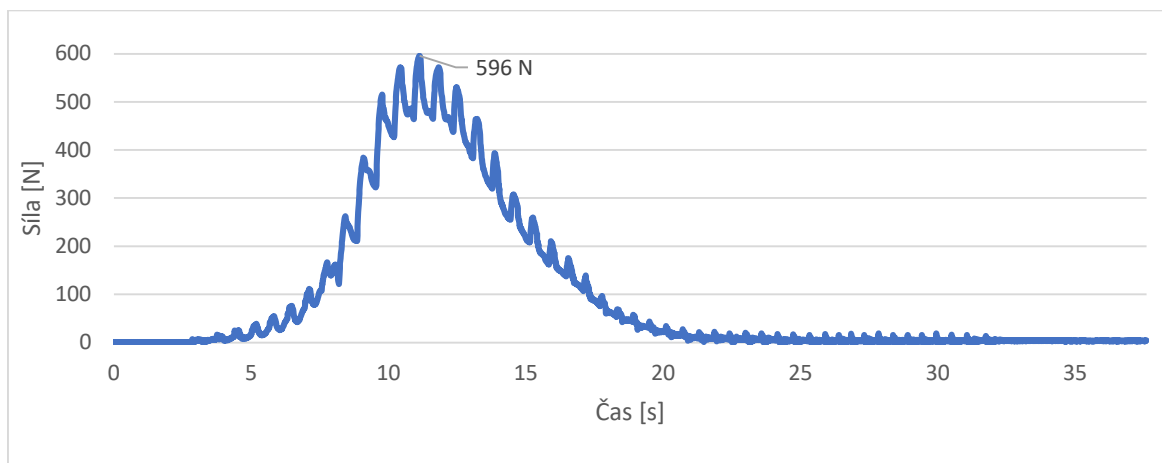
## 6. Výsledky měření dostupných kotvicích prostředků

Toto testování bylo uskutečněno 1. 2. 2022 na trávníku v areálu školy. Na ploše se nenacházely žádné keře ani stromy a nelze tam předpokládat žádné významné zatěžování. Přes nízké teploty vzduchu zem nebyla promrzlá. Podle zkoušky zeminy provedené na místě byla hlína vše stavu plastickém tuhém (váleček o průměru 3 mm se podařilo vytvořit).

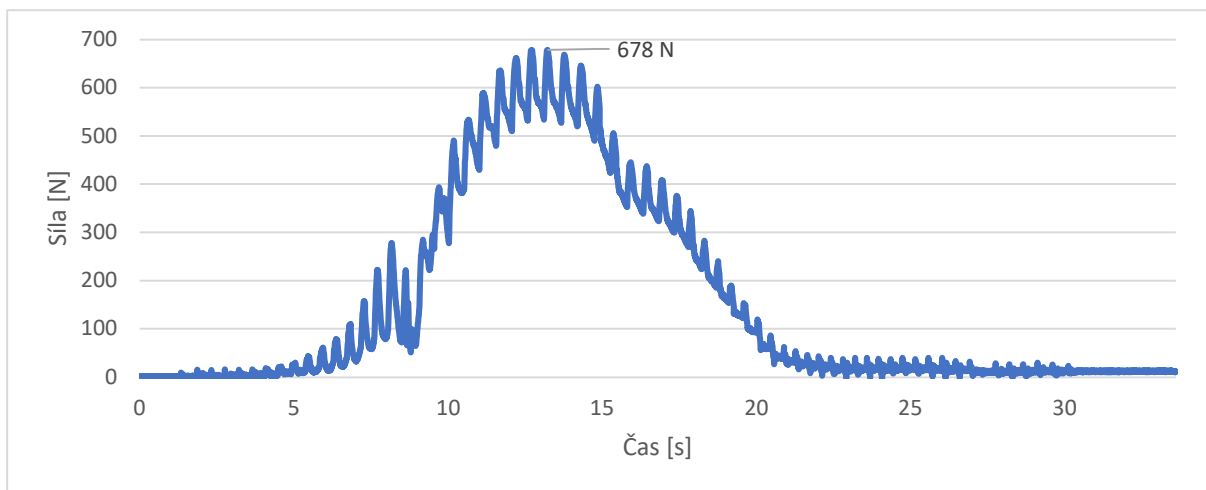
Z dat naměřených siloměrem jsem pro každou kotvu sestrojil graf průběhu působící síly v čase. Ty jsou vyznačeny v obrázcích 6.1 až 6.5 postupně pro kotvy 1 až 5. V tabulce 6.1 jsou pak zapsány maximální síly dosažené u jednotlivých prostředků a tyto jsou rovněž vyznačeny ve zmíněných grafech.



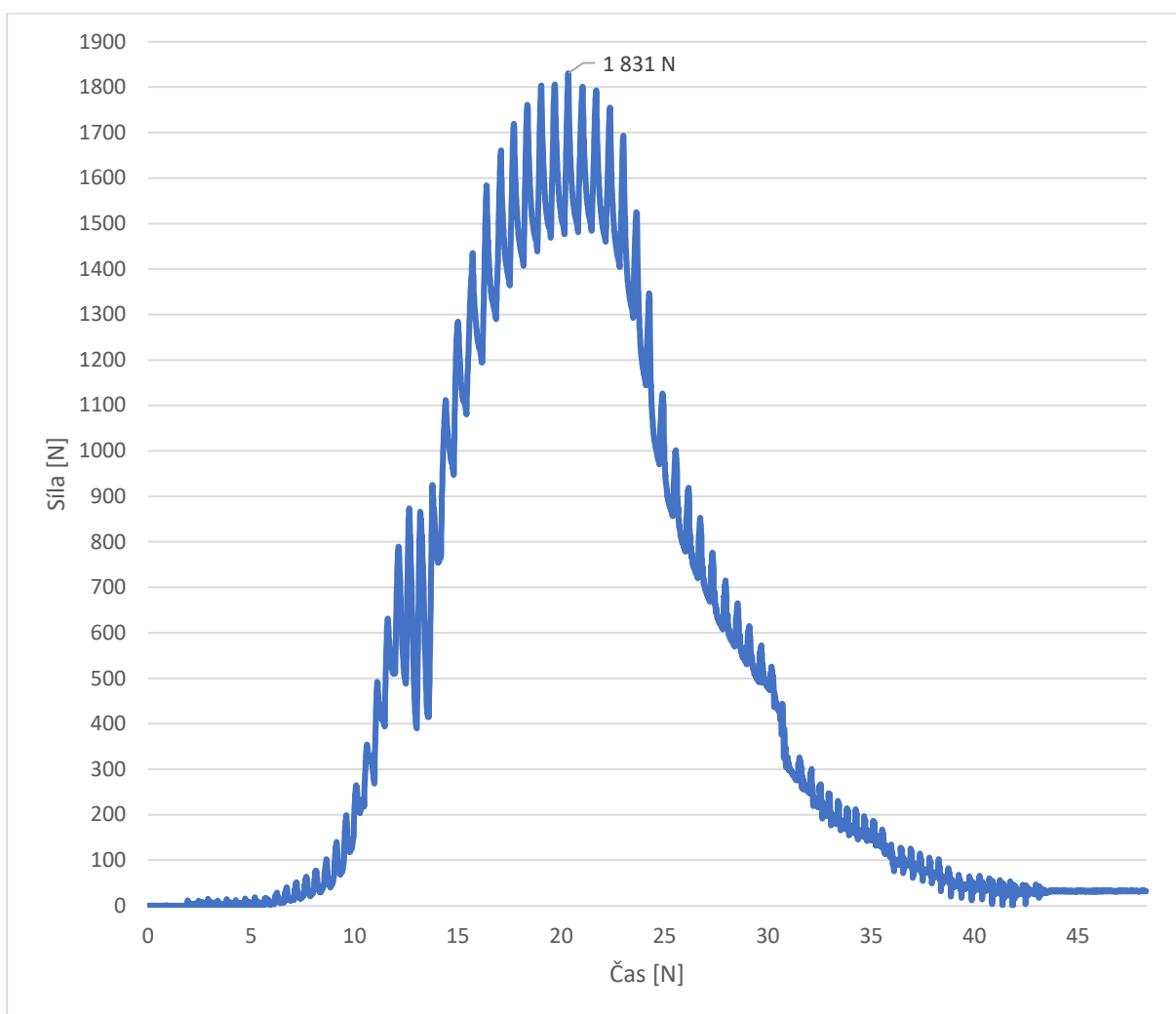
Obr. 6.1: Kotva č. 1



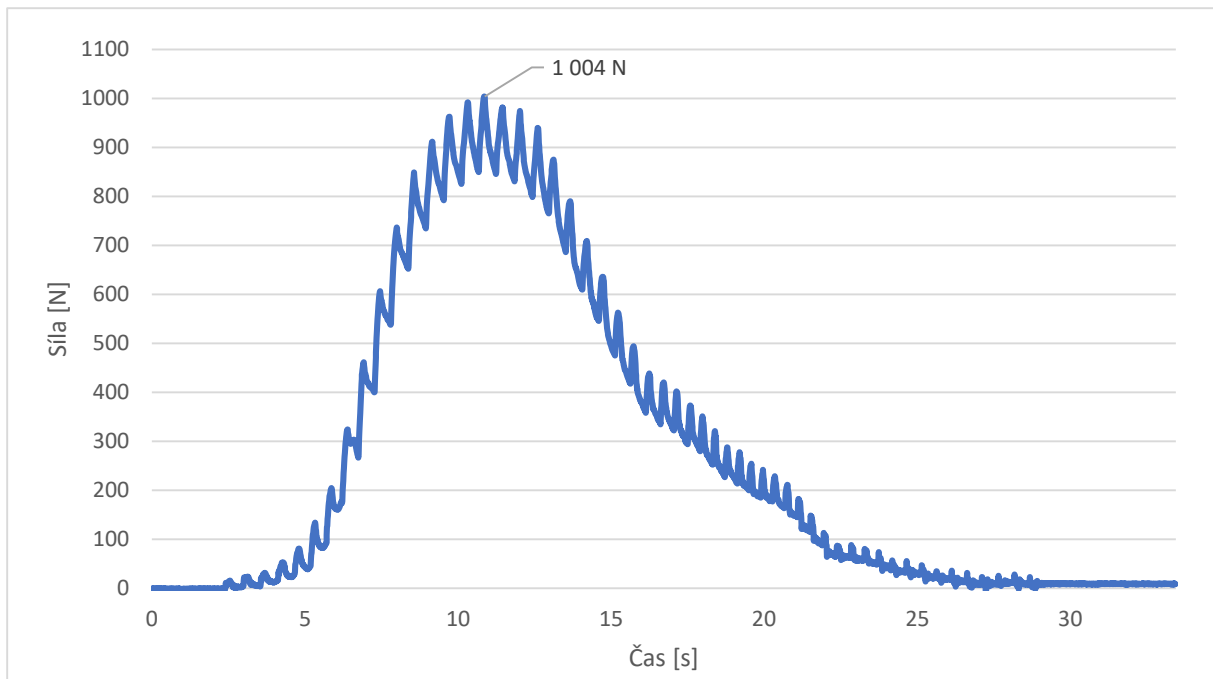
Obr. 6.2: Kotva č. 2



*Obr.6.3: Kotva č. 3*



*Obr. 6.4: Kotva č. 4*



Obr. 6.5: Kotva č. 5

Tab. 6.1: Maximální síly naměřené u jednotlivých kotev

Kotva č.	1	2	3	4	5
$F_{\max}$ [N]	612	596	678	1831	1004

Z hlediska uživatele musím poznamenat, že kotva č. 4 (stavební) byla několikanásobně náročnější na instalaci, a to jak časově, tak fyzicky.

## 7. Návrh vlastního kotvícího prostředku

Při návrhu vycházím z teorie mechaniky zemin a výsledků měření dostupných kotev. Hlavní úvaha se týká způsobu porušení zeminy. Podle teorie dochází při dosažení mezního stavu k ustřížení podél roviny blízké rovině s největším smykovým napětím, což pro kotvy šroubovitě konstrukce znamená plášť válce mezi nejšířší částí kotvy umístěné nejhlouběji v zemi a povrchem. Tato úvaha se potvrdila i při experimentu a hmota hlíny vytažené ze země měla přibližně válcovitý tvar, jak je vidět na obr. 7.1.

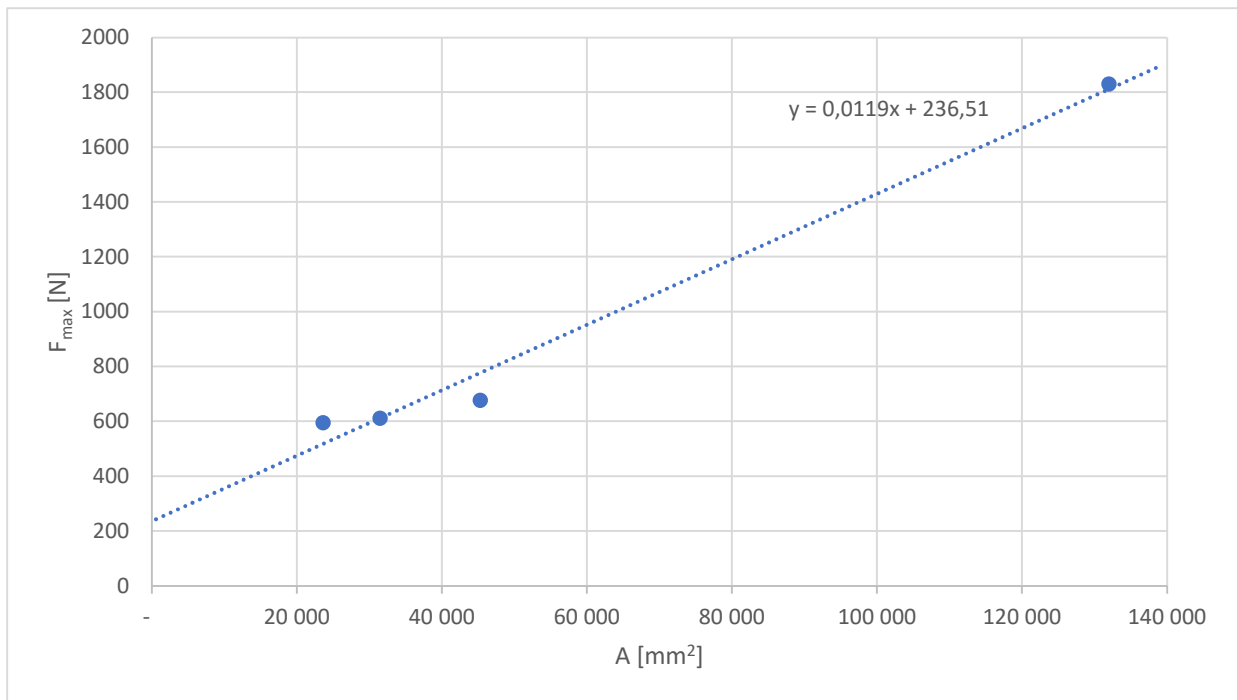


Obr. 7.1: Kotva č. 1 po vytažení ze země

Velikost síly nutné pro vytažení by tedy měla být teoreticky závislá na pevnosti zeminy ve smyku  $\tau$  a povrchu pláště válce  $A$  určeného přibližně průměrem  $D$  a délkou  $L$  závrtné části kotvy, jak je naznačeno v následující rovnici.

$$F_{max} = \tau \cdot A = \tau \cdot \pi \cdot D \cdot L \quad (6)$$

Tato závislost lze přibližně vypočítat i ze mnou naměřených dat, jak je vidět z grafu na obr. 7.2, kde je zobrazena závislost velikosti síly potřebné pro vytažení kotvy na výše zmíněné zatěžované ploše válce (hodnoty uvedeny v tabulce 7.1). Vzorek čtyř kotev je nicméně dosti malý, a tedy zatížen významnou statistickou chybou, stejně jako nepřesným měřením rozměrů, které se však příliš zpřesnit nedá. Přesněji se této otázce chci věnovat při druhém měření (viz níže).



Obr. 7.2: Závislost maximální síly na zatěžované ploše s proloženou přímkou

Tab. 7.1: Hodnoty max. síly a zatěžované plochy z prvního měření

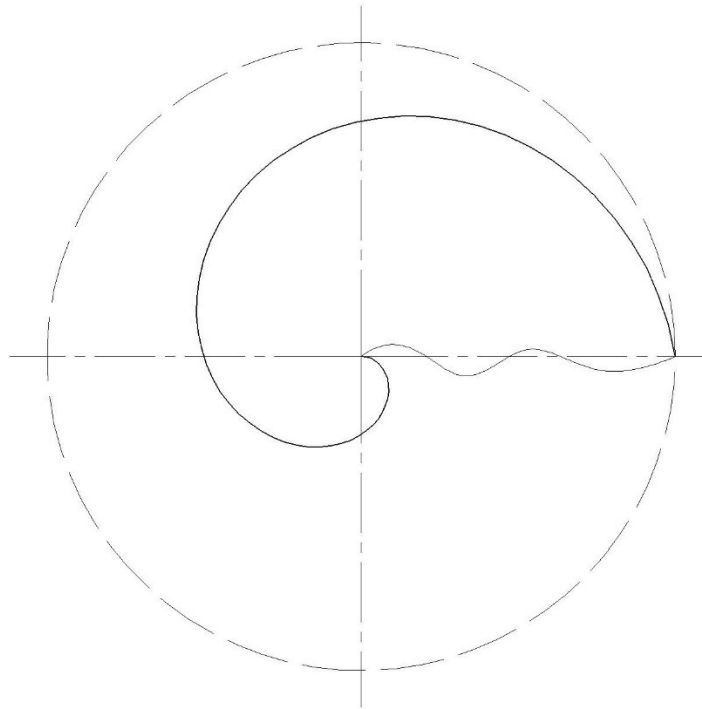
Kotva č.	1	2	3	4	5
F <sub>max</sub> [N]	612	596	678	1831	1004
D [mm]	40	30	60	100	–
L [mm]	250	250	240	420	–
A [mm <sup>2</sup> ]	31 416	23 562	45 239	131 947	–

Z mého měření vyšly nejlépe dvě kotvy, a to č. 4 (stavební) a 5 (Claw). Rozhodl jsem se tedy zpracovat dva návrhy, které budou využívat principy těchto dvou konstrukcí.

### 7.1. Návrh č. 1

První návrh je úpravou a zdokonalením kotvy č. 4, která měla nejlepší výsledky, ale její instalace byla, jak jsem zmínil výše, velmi náročná. Zde tedy zachovám poměrně velké rozměry kotvy, ale budu se snažit usnadnit vnikání do země, a to zejména podle kotvy č. 3 (červená). Všiml jsem si, že tato menší kotva má na rozdíl od té stavební daleko prudší stoupání šroubovice a také pozvolný náběh závitu u hrotu (viz obr. 7.3). Tyto principy se tedy budu snažit uplatnit i u mé konstrukce.

Z důvodu nedostatku času a omezené přínosnosti této konstrukce však bylo rozhodnuto, že se tento návrh realizovat nebude.

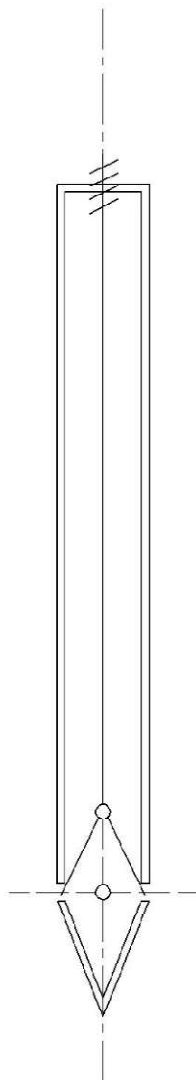


*Obr. 7.3: Náběh závitu u kotvy č. 3*

## 7.2. Návrh č. 2

Ve druhém návrhu využívám poznatku získaného ze zkoušky kotvy č. 5 (Claw), že i dlouhý štíhlý prvek (dále označovány jako trn), jako byl v tomto případě hřebík, je schopen zatížení do zeminy poměrně dobře přenášet a zeminu dokáže udržet v celku. V mém návrhu však tyto trny nebudou do země zavádět z povrchu, ale již v nějaké hloubce. To by mělo zvýšit únosnost tohoto návrhu.

Aby bylo možno trny zavést do země v určité hloubce, je potřeba vytvořit rozevírací mechanismus, který umožní vysunutí trnů z tělesa kotvy, když už bude zavedeno v zemi. V mém návrhu jsem využil kloubovou vazbu pro uchycení trnů k centrální ose a tuto osu jsem v horní části upevnil pomocí šroubové vazby k tělu kotvy. Tato vazba umožní řízený axiální posuv osy, čímž budou trny vytlačeny z těla. Kinematické schéma popsaného mechanismu je nakresleno v obr. 7.4.



Obr. 7.4: Kinematické schéma mechanismu pro vysunování trnů u návrhu č. 2

## 8. Výroba vlastního kotvícího prostředku

Prototyp kotvícího prostředku určený pro testování byl vytvořen podle návrhu číslo 2.

Pro výrobu prvního hrubého prototypu byla na tělo použita ocelová trubka o průměru přibližně 5 cm a délce asi 45 cm. U jejího spodního okraje byly vyvrtány čtyři díry o průměru 5 mm určené pro průchod trnů. Spodní okraj pak byl nařezán do tvaru zubů, a to až ke zmíněným děrám. Sevřením těchto zubů a jejich svařením tak byl vytvořen hrot, který má sloužit ke snazšímu zavedení kotvy do země. Jako osa byla použita závitová tyč M8. Do jejího spodního konce byl zašroubován samozávrtný šroub, kterým je připevněn s volnou rotací malý kruhový plechový díl. Do ostatních čtyř děr po obvodu tohoto dílu pak byly zastrčeny závlačky délky 40 mm, které slouží jako trny a vysouvají se otvory ve spodní části těla kotvy.

Přes horní otvor trubky je přeložen, a k ní je i přivařen, obdélníkový plechový díl s průchozím otvorem pro závitovou tyč (nepřekrývá celou trubku). Nad otvorem je k obdélníku přivařena příslušná matice, která vede osu v axiálním směru. Na horním konci závitové tyče jsou našroubovány a proti sobě utáhnuty dvě matice, které mají sloužit pro umožnění otáčení tyče uživatelem, čímž se budou vysouvat samotné trny. U horního okraje je vyvrtána ještě jedna díra, za kterou lze uchytit karabinu, za kterou je možné instalovanou kotvu uchytit k testovacímu zařízení (obr. 8.1).



*Obrázek 8.1: Horní část kotvy; patrná závitová tyč, vodící matice s podložkou a karabina pro uchycení*

Po svaření konstrukce se bohužel uvolnil zmíněný samozávrtný šroub a konstrukce se tak rozpadla. Bylo tedy nutné kotvu alespoň částečně přepracovat. Přitom bylo rozhodnuto nahradit poměrně krátké a slabé závlačky pevnějšími hřebíky o délce 100 mm. Speciálně vyrobený plechový díl byl vyměněn za běžně dostupnou podložkou na závit M8, která je na závitové tyči uchycena mezi dvěma dvojicemi matic (ty se tedy nemohou uvolnit, ale podložka má zároveň umožněné otáčení kolem osy tyče). Hřebíky jsou zbaveny hlavičky a k podložce připojeny pomocí závlaček podobně jako u prvního sestavení; hřebíky jsou k závlačkám připojeny drátem a přivařeny (obr. 8.2). Díry pro průchod trnů byly rozšířeny na šířku 10 mm a byla zvětšena jejich délka, aby se v nich trny nepříčily (obr. 8.3).

Protože u první verze se trny často v otvorech vzpříčily natočením v radiální rovině, bylo přidáno ještě vedení podložky v axiálním směru. To je zajištěno dvěma obdélníkovými vodícími lištami přivařenými ve vyříznuté podélné drážce (obr. 8.3) naproti sobě, v poloze „nastojato“ (obr. 8.4). Proti nim jsou pak v podložce vyřezány a vypilovány drážky, do kterých lišty zasedají (obr. 8.2). Hrot byl také přepracován a místo sevřeného plechu zde byl přivařen vysoustružený hrot z plného materiálu (obr. 8.5).



*Obr. 8.2: Trny spojené s vodící podložkou*

*Obr. 8.3: Otvory pro průchod trnů (v levé části) a drážky pro vodící lištu*



*Obr. 8.4: Vnitřek kotvy s vodícími lištami*

*Obrázek 8.5: Hrot kompletní kotvy; patrné trny, otvory pro trny, vysoustružený hrot a výztuhy*

Po sestavení se konstrukce zdála poněkud nestabilní (zvláště v místech oslabených otvory pro trny), a tak byly přidány na dvě plochy, kde se nenachází lišty, výztužné pásky a to z vnější strany trubky. Ty byly také zbroušeny, aby umožňovali snazší zavedení do země. Tato výztuha by měla zvýšit tuhost v ohybu v oblasti mezi otvory pro kolíky a bránit tak borcení konstrukce (obr. 8.5).

## 9. Výsledky a vyhodnocení měření dostupných kotvicích prostředků a vlastního prototypu

Postup testování při druhém měření byl identický jako při měření prvním (viz kapitolu 6), pouze vybrané typy kotev se spirálním tvarem (č. 1 až 4) měly být měřeny vícekrát pro zajištění více dat pro zkoumanou závislost síly na zatěžované ploše.

Měření bylo provedeno 4. 5. 2022 a muselo být z technických důvodů provedeno na jiném místě v areálu. Okolí místa testování bylo evidentně pojížděno vozidly a v blízkosti se nacházeli stromy. Vzhledem k vysokým teplotám nehrozilo promrznutí zeminy. Zemina byla tentokrát již ve stavu tvrdém.

Při instalaci vlastního prototypu muselo být pro zavedení těla kotvy do země použito kladivo, což mělo za následek prasknutí svarů těla s deskou v horní části kotvy (obr. 9.1). Nebylo tedy možné použít plánovaný postup vysunutí trnů a opět bylo třeba užít kladiva. Ani pomocí těchto prostředků však nešlo kotvu zatlouci více než cca 7 cm (obr. 9.3). Po měření se navíc ukázalo, že vysouvací mechanismus se pravděpodobně při zatloukání trnů také poškodil a praskla zde vodící podložka, na které byly trny umístěny (obr. 9.2). Kotva tedy při zkoušce nefungovala tak, jak bylo plánováno.



Obr. 9.1: Prasklé svary v horní části kotvy



Obr. 9.2: Poškozená vodící podložka

Obr. 9.3: Prototyp po instalaci do země

Kotvu č. 4 se kvůli příliš tvrdé zemi vůbec nepodařilo instalovat a nebylo tady možné dělat smysluplné měření (obr. 9.4).



*Obr. 9.4: Nezdařilá instalace kotvy č. 4*

Při druhém měření kotvy č. 1 došlo k ohnutí oka, za které byl uchycen měřicí mechanismus ještě před vytažením prostředku ze země. Po převázání na větší oko bylo ohnuto i toto, ale i s tímto defektem se podařilo zkoušku dokončit a kotvu vytáhnout ze země (obr. 9.5). Třetí měření tohoto prostředku však bylo kvůli výše zmíněným poškozením vypuštěno.

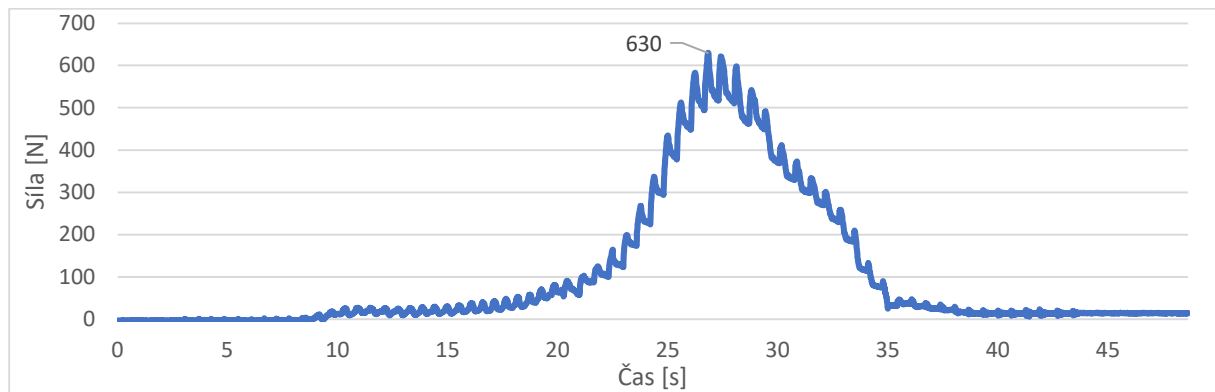


*Obrázek 9.5: Deformovaná kotva č. 1*

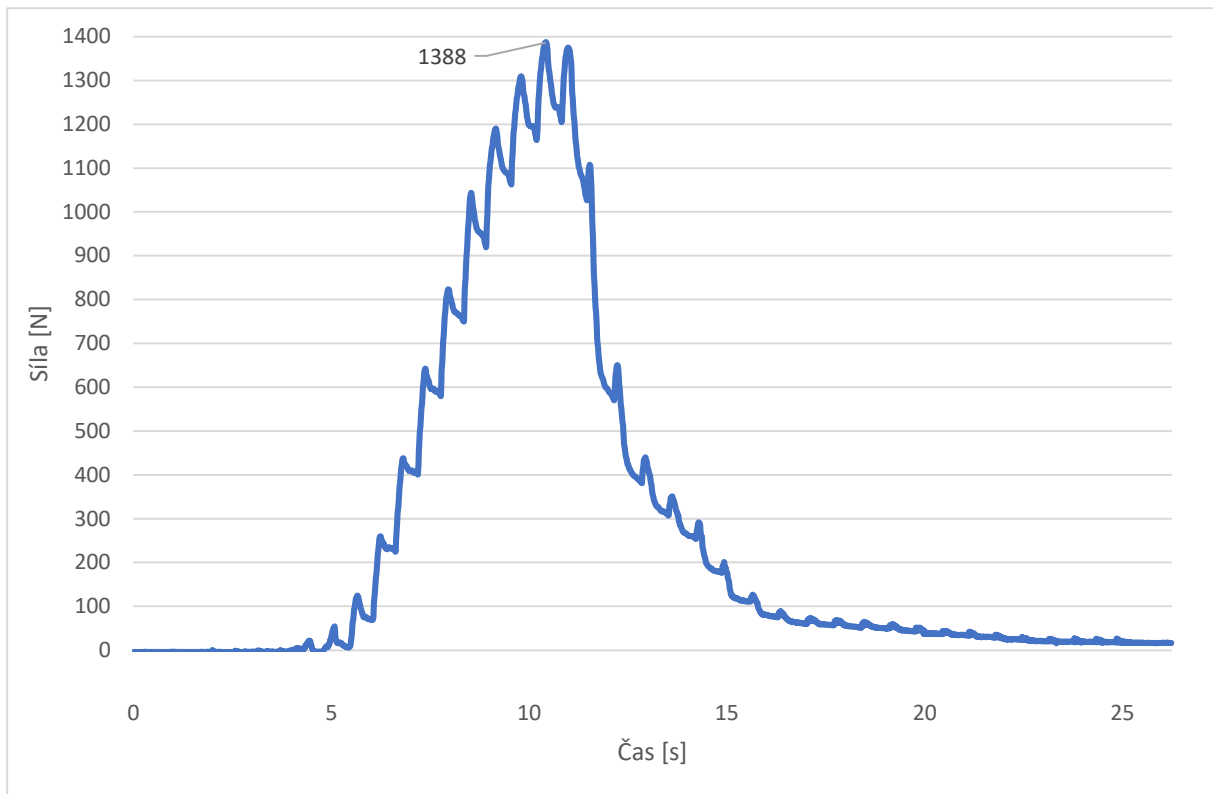
Výsledky měření jsou podobně jako v případě prvního měření zaznamenány v grafech závislosti působící síly na čase (obr. 9.6 až 9.15); maximální síly jsou shrnuty v tabulce 9.1.

Tab. 9.1: Maximální síly naměřené u jednotlivých kotev

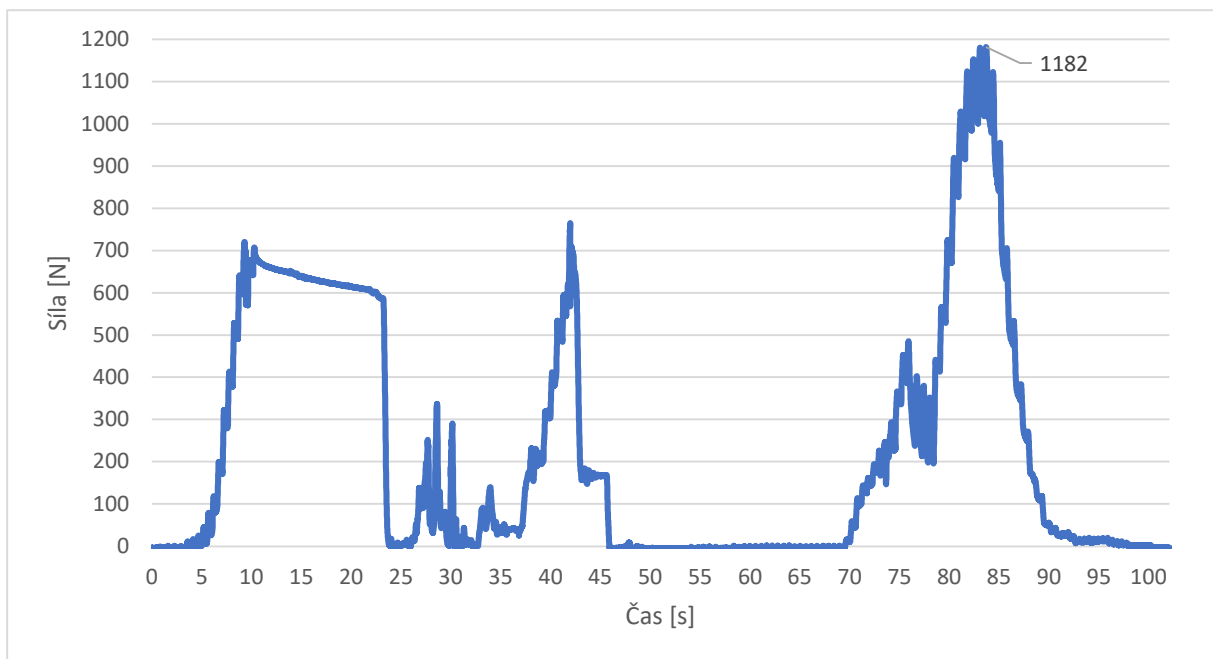
Kotva	vlastní	1		2			3			5
Měření č.	–	1	2	1	2	3	1	2	3	–
$F_{\max}$ [N]	630	1388	1182	614	482	805	1722	962	1505	2189



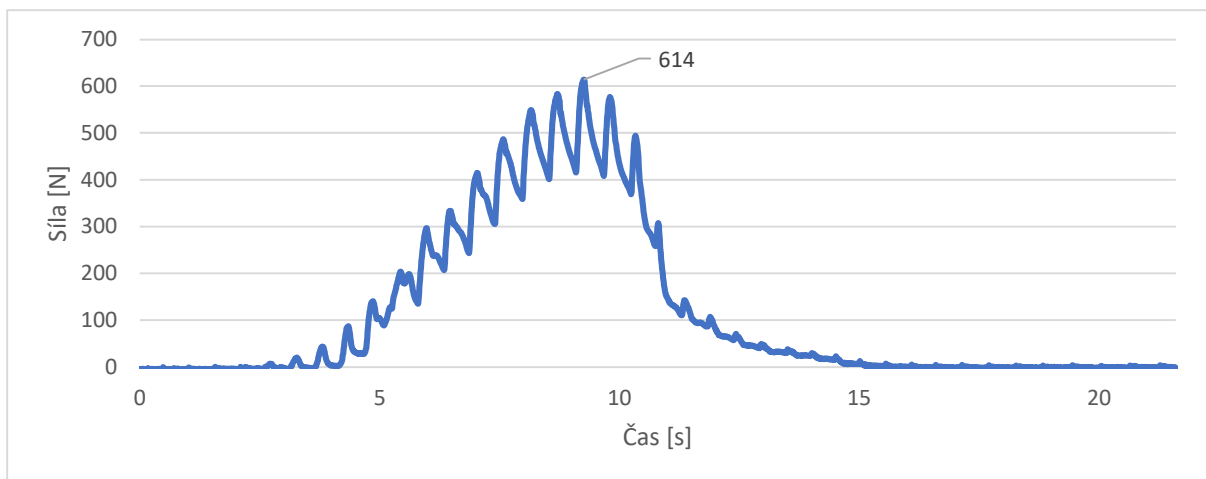
Obr. 9.6: Vlastní prototyp



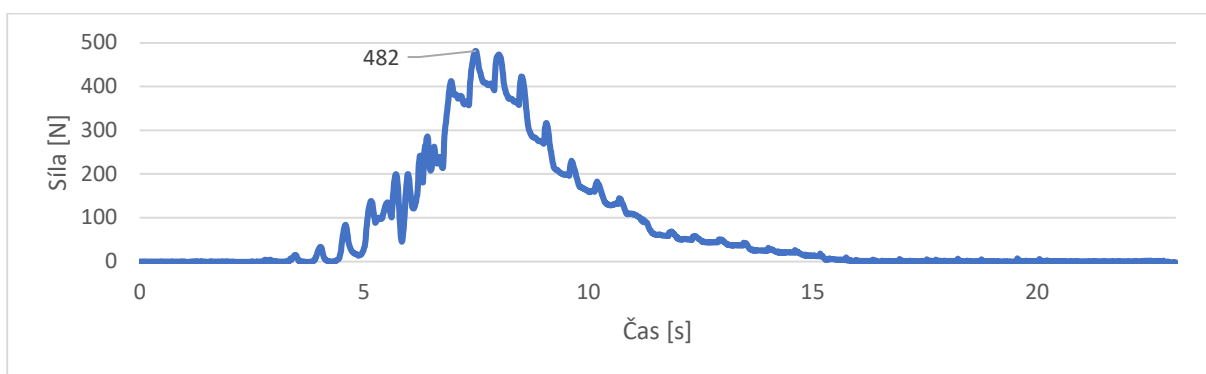
Obr. 9.7: Kotva č. 1, měření 1



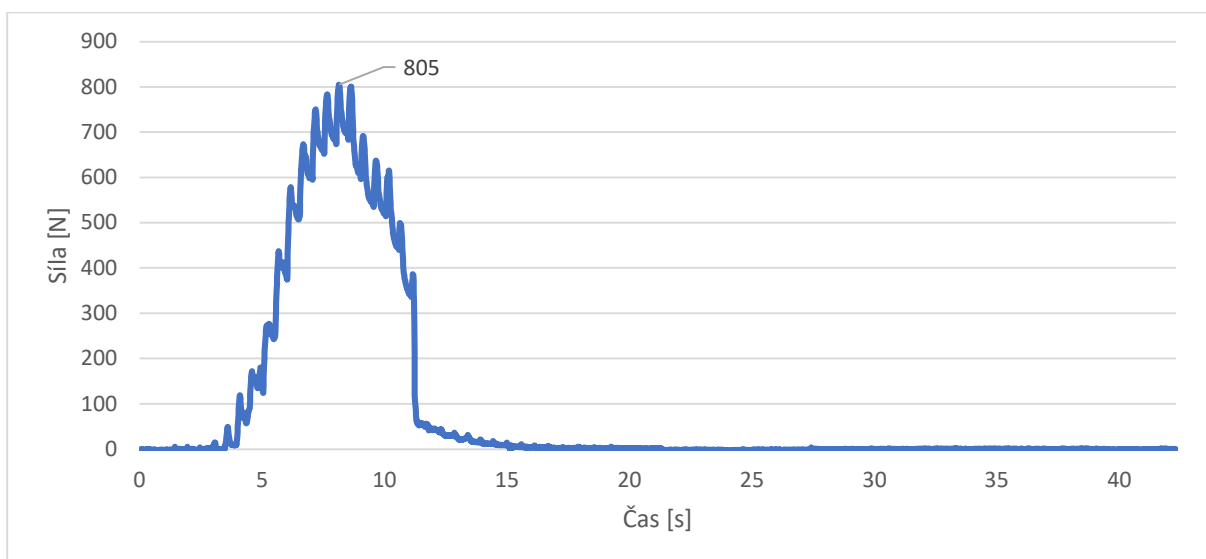
Obr. 9.8: Kotva č. 1, měření 2



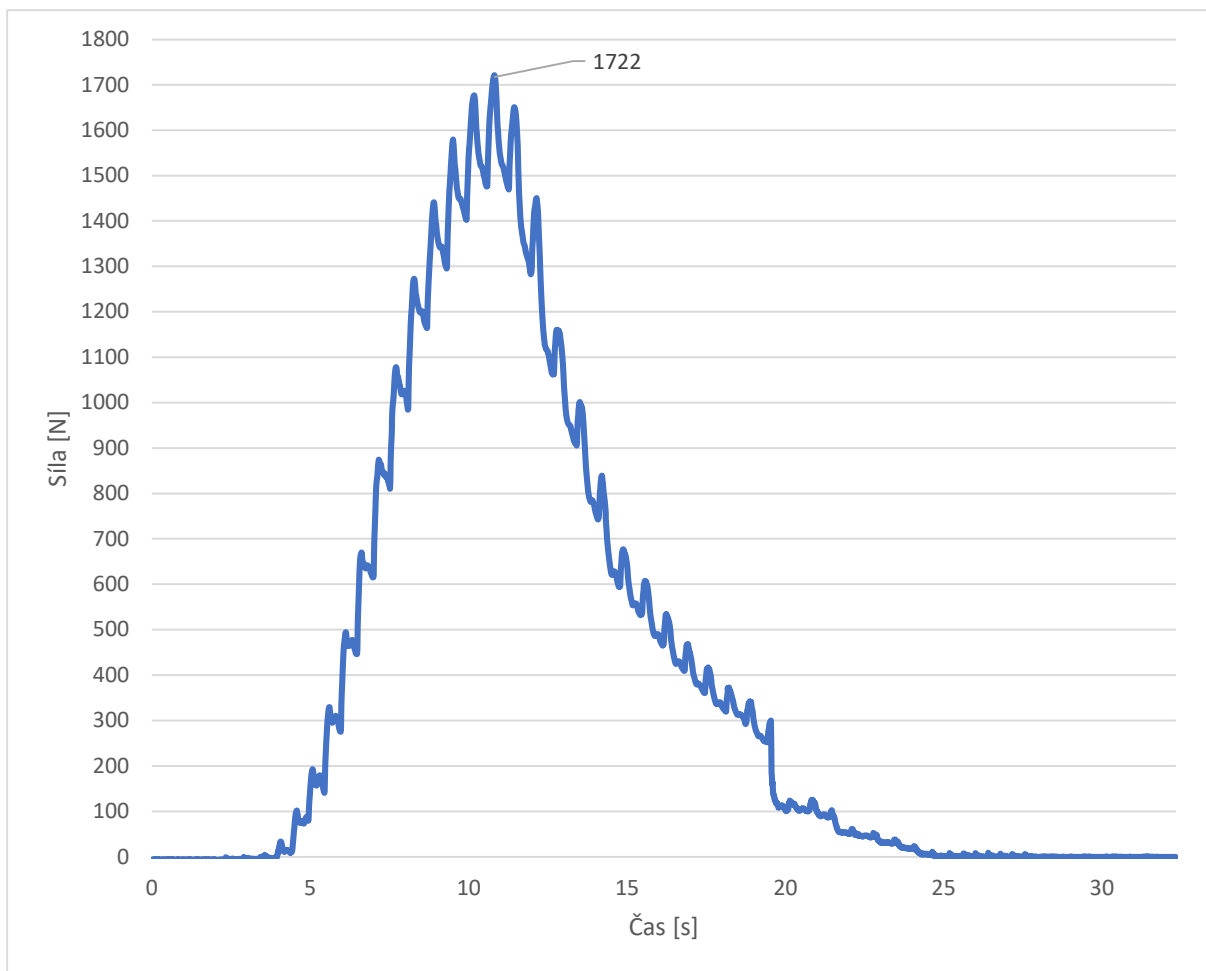
Obr. 9.9: Kotva č. 2, měření 1



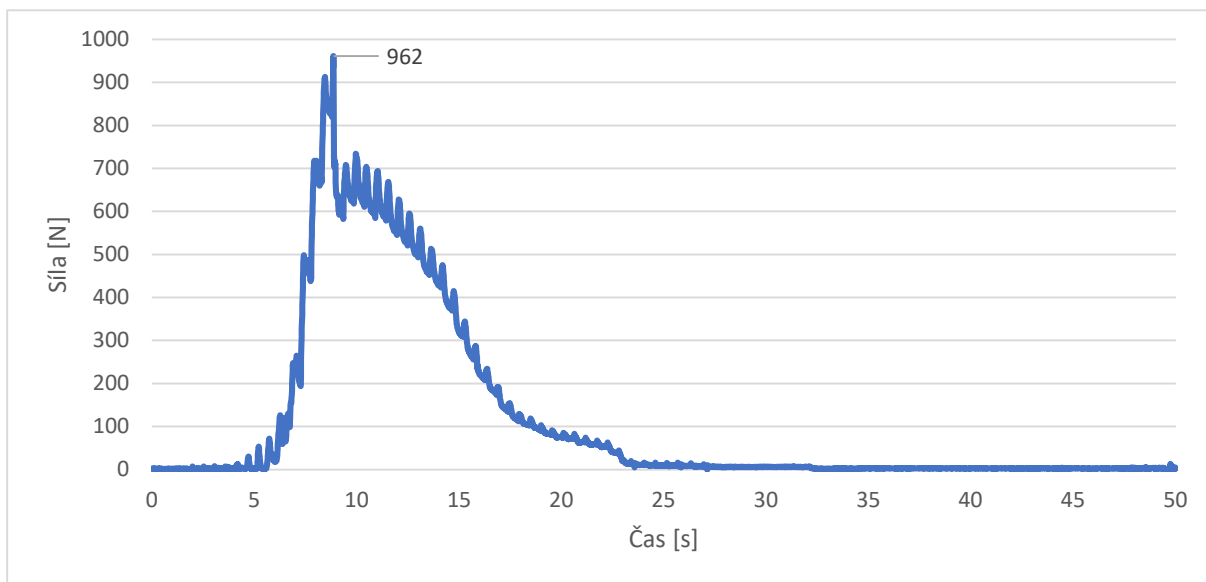
Obr. 9.10: Kotva č. 2, měření 2



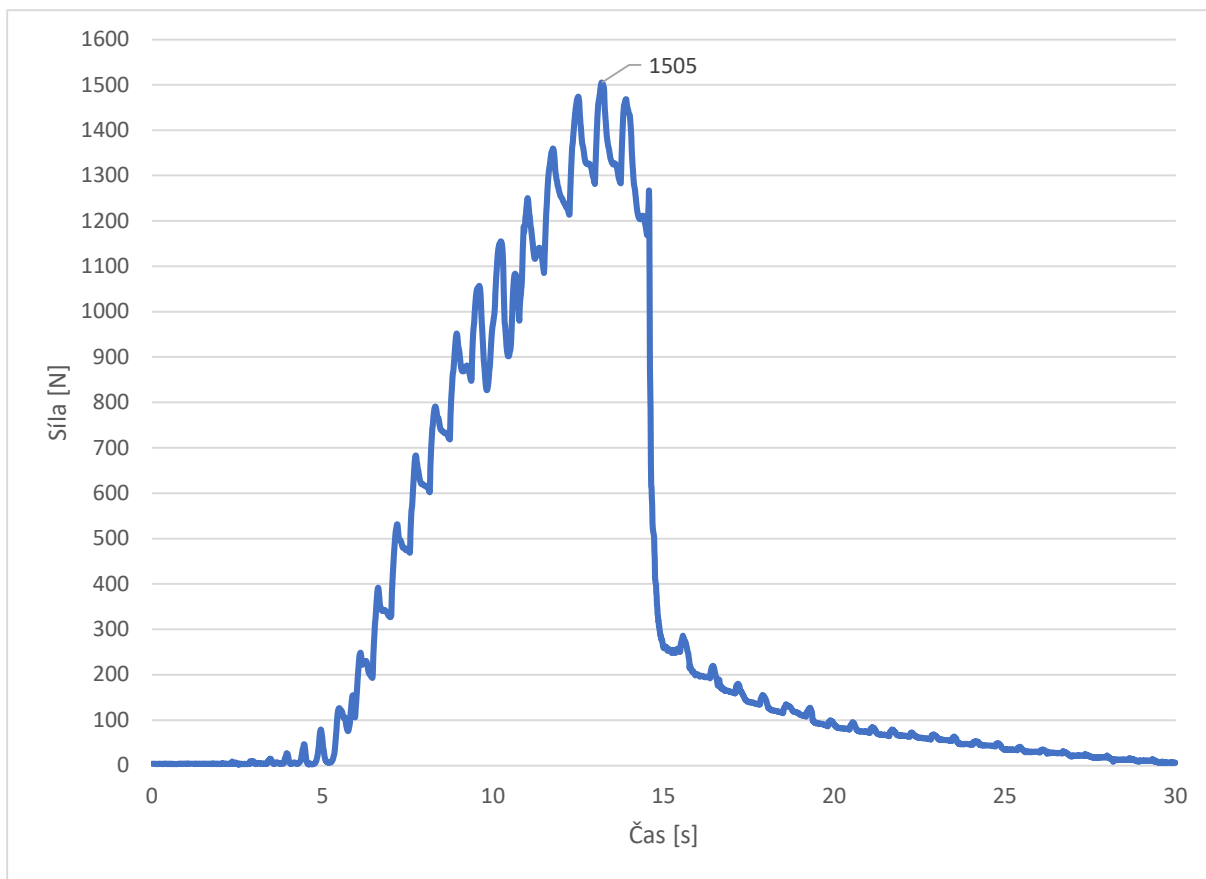
Obr. 9.11: Kotva č. 2, měření 3



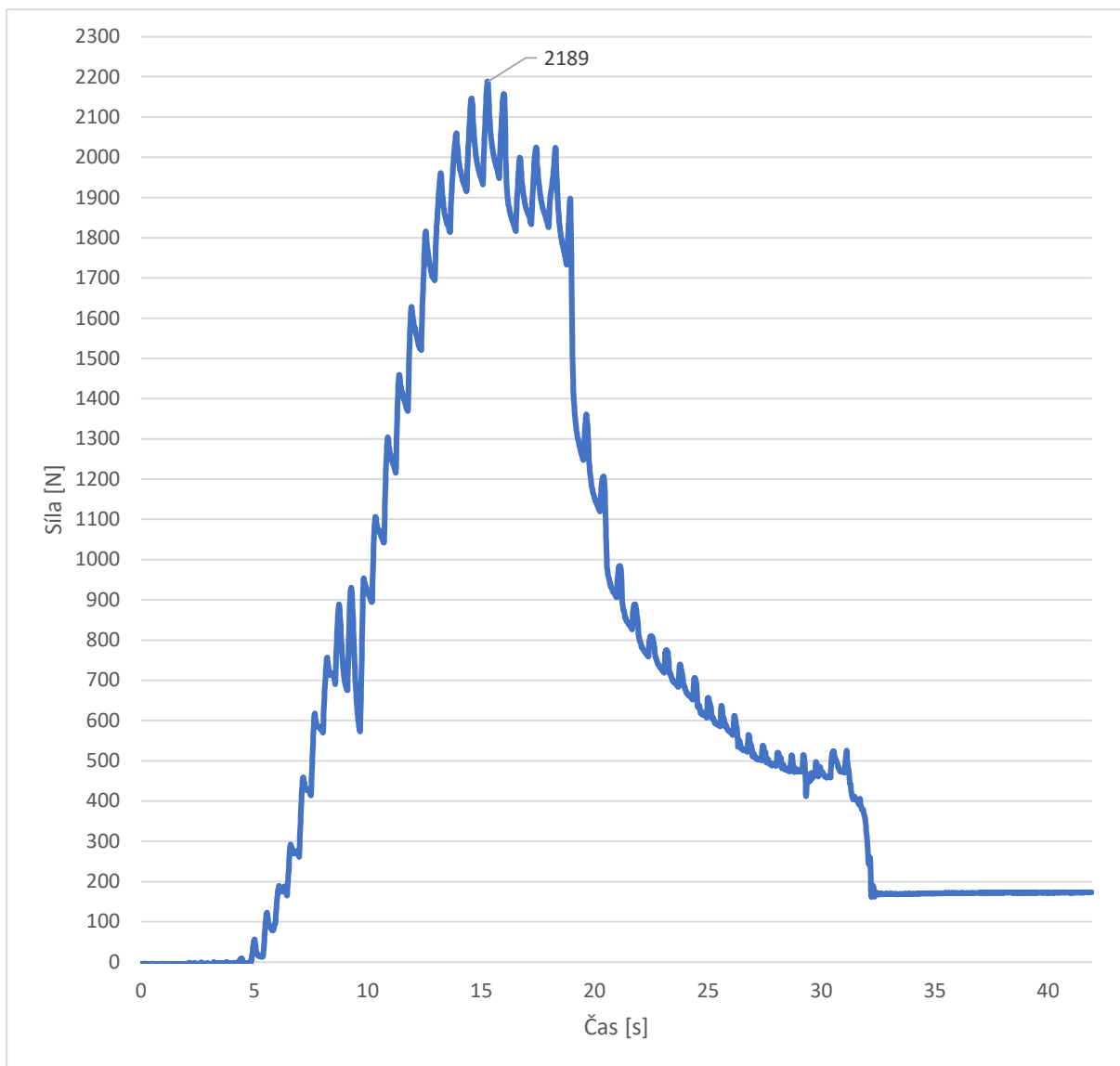
*Obr. 9.12: Kotva č. 3, měření 1*



*Obrázek 9.13: Kotva č. 3, měření 2*



*Obrázek 9.14: Kotva č. 3, měření 3*

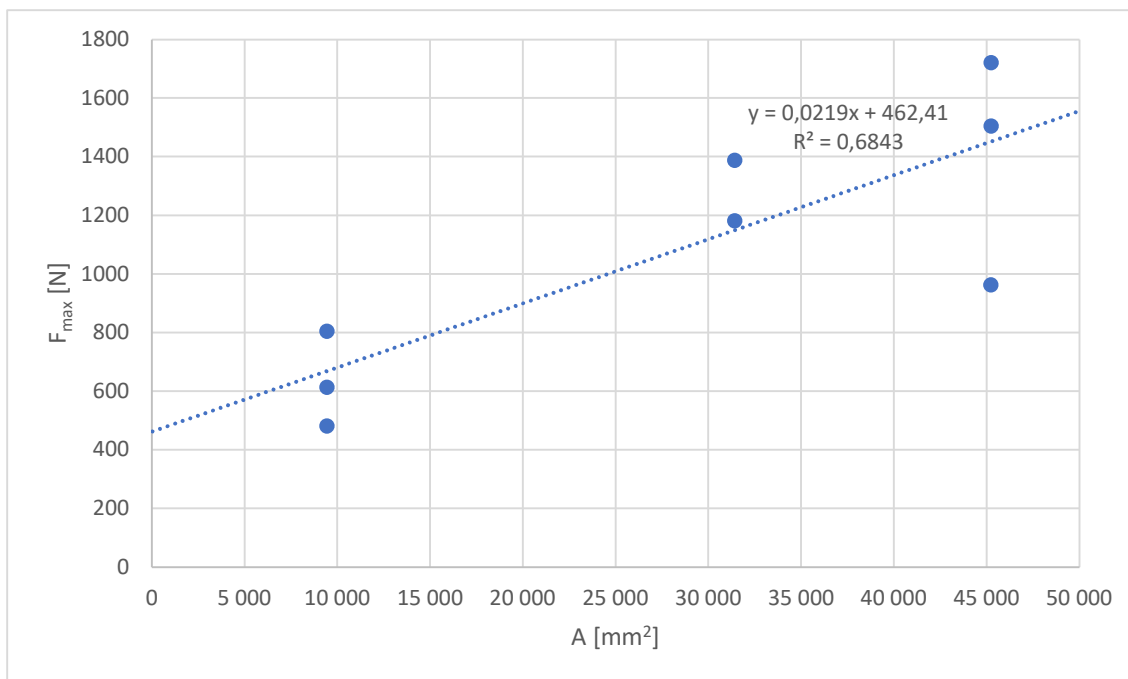


Obrázek 9.15: Kotva č. 5

Z naměřených dat a rozměrů kotev (tab. 9.2) jsem opět sestavil graf závislosti maximální síly na zatěžovací ploše (obr. 9.16). Jelikož kotvu č. 2 se tentokrát nepodařilo zavést do celé délky její závrtné části, počítám zde pouze s délkou skutečně zavedenou do země, což bylo přibližně 100 mm.

Tab. 9.2: Hodnoty max. síly a zatěžované plochy z prvního měření

Kotva	vlastní	1		2			3			5
Měření č.	–	1	2	1	2	3	1	2	3	–
$F_{\max}$ [N]	630	1388	1182	614	482	805	1722	962	1505	2189
D [mm]	–	40	40	30	30	30	60	60	60	–
L [mm]	–	250	250	100	100	100	240	240	240	–
A [mm <sup>2</sup> ]	–	31 416	31 416	9 425	9 425	9 425	45 239	45 239	45 239	–



Obr. 9.16: Závislost maximální síly na zatěžovací ploše s proloženou přímkou

Zkoumaná závislost je i při tomto měření poměrně nejasná a obsahuje velké odchylky. Koeficient determinace  $R^2$  dosahuje hodnoty 0,68 neboli 68%. Při samotném testování jsem také zaznamenal, že při několika měřeních došlo při vytahování kotvy k přetržení kořene, který jistě kladl nějaký odpor a mohl tedy ovlivňovat měření.

## 10. Závěr

Závěrem bohužel musí být řečeno, že hlavní cíl práce, tedy návrh vlastního kotvícího prostředku pro letouny byl sice splněn, ale dosažený výsledek nelze považovat za úspěšný. Prototyp se sice podařilo s nesnázemi vytvořit, ale při jeho testování vyšly na povrch jeho nedostatky. Těmi bylo zejména jeho poškození při instalaci a tím pádem prostředek nemohl fungovat tak, jak byl navrhnut a nemožnost zavést jej do rozumné hloubky, kde by měla význam jeho navrhovaná funkce. Lze předpokládat, že ve vlhčím a měkčím podkladu by instalace byla snadnější, ale ani v tu chvíli bych neočekával výsledky očekávané při návrhu. Obecně lze příčinu selhání hledat ve složitosti návrhu, který je tak náchylný k poškození, ale zároveň zapříčiňuje velké rozměry konstrukce, které je pak náročné zavést do země.

Lepších výsledků by pravděpodobně bylo dosaženo při realizaci návrhu č. 1, kde ale nejsou velké pochybnosti o jeho potenciální funkčnosti a z hlediska vývoje by tedy nešlo o významný posun. Pro případ výroby produktu určeného pro reálné použití tedy lze doporučit použít spíše tento návrh.

Jako praktický výsledek lze rovněž považovat poznatek, že nejlepší únosnost vykazují kotoučové kotvy velkého průměru (až 1800 N), u kterých se ovšem mohou vyskytnout potíže při instalaci. Tyto kotvy jsou tedy dobrou volbou, pokud předpokládáme zeminu v místě kotvení spíše vlhčí a měkčou, a právě zde by mohla najít uplatnění kotva vytvořená podle návrhu č. 1. Naopak při tvrdé, suché, případně udusané zemině lze doporučit spíše kotvy založené na principu zatloukaných trnů, jako je tomu u kotvy č. 5. Zvláště při suchých podmínkách zde nelze očekávat únosnost o mnoho nižší (pokud vůbec) než u kotvy kotoučové (až 2200 N).

Jak lze vidět i z hodnot uvedených výše, nedosahují hodnoty únosnosti ani u nejlepších modelů nijak přehnaně vysokých hodnot, únosnost lze u jedné kotvy očekávat v nižších stovkách, v horším případě pouze v desítkách kilogramů. To může být i při standardním použití tří kotev oproti vztlaku křídla letadla s hmotností v jednotkách tun vytvářenému při velkých rychlostech větru stále nedostatečné a při očekávání velmi nepříznivých podmínek a zejména u těžších letounů je tedy zřejmě nutné lepší zajištění. To může být provedeno například přidáním balastní zátěží (kotva je však i zde vhodná k zamezení posuvu letadla po ploše) nebo ukotvením k betonové patce, pokud je taková možnost k dispozici. Při instalaci kotev je také vhodné, a to zvláště u kotev štíhlejšího tvaru, zavádět kotvu do země skloněnou směrem od letadla, neboť při takovémto způsobu instalace a zatížení kolmo k ose kotvy bude tělo kotvy částečně fungovat jako trn a tím vzroste její celková únosnost (pro ztrátu funkce je třeba kotvu nejprve v zemi natočit, a teprve pak vytáhnout). Rozhodujícím faktorem únosnosti kotvícího prostředku je pak jednoznačně jeho velikost.

Z teoretického hlediska se nepodařilo zcela potvrdit zkoumanou závislost únosnosti kotvy na jejích rozměrech, nelze ji nicméně ani vyvrátit. Měření uskutečněná v rámci této práce byla bohužel zatížena velkými nejistotami, ať už jde o různý tvar kotev, nejasností ohledně rozhodujících rozměrů, nebo nehomogenity zeminy, kam lze zařadit i kořeny, kterými je ovlivněno druhé měření. Je nutné též zmínit skutečnost, že prokládané přímky v obou případech nemířili do počátku souřadného systému, ale při nulovém průměru předpovídaly nenulovou kladnou hodnotu únosnosti (asi 240 N při prvním měření a 460 N při druhém). To ukazuje, že i v případě správnosti předpokladu lineární závislosti se zde pravděpodobně vyskytuje ještě nějaký faktor, který nebyl odhalen.

Z grafů zatěžování lze také dobře vidět, že zemina při zatížení velmi rychle relaxuje. Vzhledem k manuálnímu zatěžování byla síla na kotvu zvyšována pulzně a po každém zatížení je v grafu patrné každé zatížení a následné okamžité odlehčení sestavy. Pokud by tedy zkouška byla řízena silově nebo by kotva byla zatížena trvale konstantní silou, lze očekávat větší deformace při nižším zatížení a možná i nižší únosnosti. Je tedy zřejmé, že přestože použitý postup šlo dobře použít pro porovnání jednotlivých konstrukcí, pro získání spolehlivých hodnot by bylo vhodné vytvořit přesnější metodu.

Shodu s teorií však lze pozorovat v tom, že ve všech případech byla únosnost získaná při druhém měření vyšší než při prvním, což odpovídá tvrdší zemině, ve které bylo prováděno druhé testování.

Závěrem lze říci, že v oblasti kotvicích prostředků pro letouny určených pro nezpevněné plochy se podle zkušeností nabytých v této práci nenachází mnoho prostoru pro inovace. Je sice možné drobně upravovat existující typy kotev například pro lepší uživatelský komfort, ale zcela nové, komplikované návrhy nemají velkou šanci překonat klasické, jednoduché konstrukce, a to zejména z důvodu jejich citlivosti na vnější vlivy, složitosti a náchylnosti na poruchu. Odlišně lze pohlížet na teoretickou stránku věci a na otázku testování takovýchto prostředků. Při použití zkoušky s lépe kontrolovanými podmínkami by jistě bylo možné vypracovat model únosnosti kotvy na základě jejích vlastností a dalších parametrech. Otázkou je, zda by bylo možné takový model prakticky využít. V současnosti výrobci u produktů většinou neuvádí žádnou únosnost a uživatel je tak odkázán na vlastní zkušenosti s problémem. Testování prostředků by tedy mohlo být více rozpracováno a aplikováno například výrobci, což by umožnilo lepší přehled zákazníka o parametrech jednotlivých produktů.

## Seznam použitých zdrojů

- [1] WEIGLOVÁ, Kamila. *Mechanika zemin*. Vyd. 1. Brno: Akademické nakladatelství CERM, 2007. ISBN 978-80-7204-507-5.
- [2] VANÍČEK, Ivan. *Mechanika zemin*. Praha: České vysoké učení technické v Praze, 1983.
- [3] *Rozbor bezpečnosti za 1. čtvrtletí 2020* [online]. Ústav pro odborné zjišťování příčin leteckých nehod, 2020, [cit. 2022-02-18]. Dostupné z: <https://uzpln.cz/novinka/rozbor-bezpecnosti-za-1-ctvrtleti-2020>
- [4] Tying Down Aircraft. *EAA* [online]. Oshkosh: Experimental Aircraft Association Inc., 2020 [cit. 2022-02-18]. Dostupné z: <https://www.eaa.org/en/airventure/eaafly-in-flying-to-oskosh/ground-operations/tying-down-aircraft>
- [5] *Rozbor bezpečnosti za 4. čtvrtletí 2021* [online]. Ústav pro odborné zjišťování příčin leteckých nehod, 2022, [cit. 2022-03-06]. Dostupné z: <https://uzpln.cz/porady-k-bezpecnosti>
- [6] CHALMOVSKÝ, Juraj. *Analýza chování kořene kotvy v jemnozrnných zeminách*. Brno, 2016, 169 s. Disertační práce. Vysoké učení technické v Brně, Fakulta stavební, Ústav geotechniky. Vedoucí práce Doc. Ing. Lumír Miča, Ph.D.