



**VYSOKÉ UČENÍ TECHNICKÉ v BRNĚ**

BRNO UNIVERSITY OF TECHNOLOGY

**FAKULTA STROJNÍHO INŽENÝRSTVÍ**

FACULTY OF MECHANICAL ENGINEERING

**ÚSTAV PROCESNÍHO INŽENÝRSTVÍ**

INSTITUTE OF PROCESS ENGINEERING

**KONSTRUKCE DÁVKOVAČE ČISTÍRENSKÝCH KALŮ**

DESIGN OF THE SEWAGE SLUDGE DOSING UNIT

**DIPLOMOVÁ PRÁCE**

MASTER'S THESIS

**AUTOR PRÁCE**

**Bc. Pavel Kubín**

AUTHOR

**VEDOUcí PRÁCE**

**Ing. Jiří Bojanovský, Ph. D.**

SUPERVISOR

**BRNO 2025**

## Zadání diplomové práce

Ústav:	Ústav procesního inženýrství
Student:	<b>Bc. Pavel Kubín</b>
Studijní program:	Procesní inženýrství
Studijní obor:	bez specializace
Vedoucí práce:	<b>Ing. Jiří Bojanovský, Ph. D.</b>
Akademický rok:	2024/25

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:

### **Dávkování partikulárních látek v rotačních sušárnách a pecích**

#### **Stručná charakteristika problematiky úkolu:**

Dávkování čistírenských kalů je komplexní proces zahrnující celou řadu problematických úkolů. Jedná se například o dosažení požadovaného tvaru částic, zamezení jejich zpětné aglomerace po průchodu maticí, přidávání chemických látek za účelem jejich další úpravy či materiálového využití. Vhodná konstrukce dávkovacího zařízení zvyšuje účinnost sušení, zlepšuje možnosti materiálového využití (například získávání fosforu), zvyšuje míru hygienizace kalu a také snižuje riziko vzniku provozních problémů. Diplomová práce je zaměřena na návrh konstrukce dávkovacího zařízení zohledňujícího všechny výše zmíněné aspekty této problematiky. Dále bude vytvořena výrobní dokumentace, na základě, které bude vyroben prototyp. Funkce prototypu bude ověřena v poloprovozních podmínkách.

#### **Cíle diplomové práce:**

- Rešerše problematiky nakládání s čistírenskými kaly.
- Rešerše problematiky dávkování čistírenských kalů.
- Konstrukční návrh dávkovacího zařízení včetně výrobní dokumentace.
- Experimentální ověření funkce dávkovacího zařízení.

**Seznam doporučené literatury:**

HEYDENRYCH, M. , D. Modelling of rotary kilns. Enschede, 2001. Dissertation thesis. University of Twente. ISBN 90-36515440

BOATENG, A. Rotary Kilns, Butterworth-Heinemann, 2008. 368. ISBN 9780080557120

BAUKAL, C. , E. Heat transfer in industrial combustion. CRC press, 2000. 568. ISBN 9780849316999

Termín odevzdání diplomové práce je stanoven časovým plánem akademického roku 2024/25

V Brně, dne

L. S.

---

prof. Ing. Petr Stehlík, CSc., dr. h. c.  
ředitel ústavu

---

doc. Ing. Jiří Hlinka, Ph. D.  
děkan fakulty

## ABSTRAKT

Tato diplomová práce se zabývá problematikou nakládání s čistírenskými kaly se zaměřením na jejich dávkování. V teoretické části práce je provedena rešerše dostupných metod nakládání s čistírenskými kaly, legislativních požadavků a technologických postupů jejich zpracování. Praktická část práce se zaměřuje na návrh a konstrukci dávkovacího zařízení, které umožňuje dávkování čistírenských kalů například do rotačních sušáren. Po dokončení návrhu je zařízení vyrobeno, testováno a dále upraveno. Tím je potvrzena jeho funkčnost a jsou identifikovány možnosti jeho optimalizace. Výsledky práce přispívají ke spolehlivému a kvalitnímu dávkování čistírenských kalů, díky čemuž je jejich následné zpracování účinnější, spolehlivější a energeticky méně náročné.

## ABSTRACT

The theoretical part of the thesis focuses on the issue of sewage sludge management, particularly dosing. It includes a survey of the available management methods, the relevant legislation and the technological procedures for treating sewage sludge. The practical part of the thesis focuses on designing and constructing dosing equipment that can dose sewage sludge into rotary dryers, for example. Once the design is finalised, the device undergoes experimental testing to confirm its functionality and identify opportunities for optimisation. The results contribute to more efficient dosing of sewage sludge, making subsequent treatment more efficient and reliable.

## KLÍČOVÁ SLOVA

Partikulární látka, dávkovací zařízení, sušení, čistírenský kal, kal.

## KEYWORDS

Particulate matter, dosing device, drying, sewage sludge, sludge.

## BIBLIOGRAFICKÁ CITACE

Citace elektronického zdroje:

KUBÍN, Pavel. *Konstrukce dávkovače čistírenských kalů*. Online, diplomová práce. Jiří BOJANOVSKÝ (vedoucí práce). Brno: Vysoké učení technické v Brně, Fakulta strojního inženýrství, 2025. Dostupné z: <https://www.vut.cz/studenti/zav-prace/detail/168858>. [cit. 2025-03-17].

## ČESTNÉ PROHLÁŠENÍ

Prohlašuji, že tato práce je mým původním dílem. Zpracoval jsem jí pod vedením Ing. Jiřího Bojanovského, Ph. D., s využitím informačních zdrojů uvedených v seznamu použitých zdrojů.

V Brně dne 20. května 2025

Bc. Pavel Kubín

## PODĚKOVÁNÍ

Rád bych tímto poděkoval vedoucímu mé diplomové práce panu Ing. Jiřímu Bojanovskému, Ph. D. za odborné vedení, rady, ochotu a především jeho čas.

# Obsah

Úvod.....	11
TEORETICKÁ ČÁST.....	12
1 Čistírenský kal – obecně .....	13
1.1 Popis čističek odpadních vod a vznik čistírenského kalu.....	13
1.2 Způsoby využití a produkce čistírenského kalu v České republice a ve vybraných evropských zemích.....	15
1.2.1 Způsoby využití čistírenských kalů.....	15
1.2.2 Produkce a nakládání s čistírenskými kaly v České republice a vybraných evropských zemích.....	17
1.2.3 Spalovací systémy .....	22
1.2.4 Sušení kalů .....	25
1.3 Aktuální a plánovaná legislativa o nakládání s čistírenskými kaly.....	27
2 Dávkovací systémy .....	31
2.1 Šnekové dávkovací systémy.....	32
2.1.1 Rozlišení podle typu šneku .....	33
2.1.2 Rozlišení podle typu žlabu .....	33
2.2 Pásové dávkovací systémy .....	34
2.3 Vibrační dávkovací systém .....	36
2.4 Násypka dávkovacího systému .....	37
2.4.1 Tvar a velikost násypky.....	37
2.4.2 Vestavby do násypek.....	39
2.5 Řešení dávkovacího systému v průmyslu, shrnutí teoretické části .....	40
PRAKTICKÁ ČÁST.....	42
3 Konstrukční návrh dávkovacího zařízení .....	43
3.1 Lopatkový dávkovač – 1. návrh .....	43
3.2 Šnekový dávkovač – 2. návrh .....	44
3.3 Výběr návrhu pro realizaci .....	46
3.4 Detailní návrh a výroba šnekového dávkovače.....	46
3.4.1 Kypřící nože .....	48

3.4.2	Šneky .....	48
3.4.3	Pohon.....	49
4	Experimentální část .....	51
4.1	Zkouška 1 – 1. verze šnekového dávkovače .....	51
4.1.1	Konstrukce dávkovače verze 2.....	52
4.2	Zkouška 2 – 2. verze šnekového dávkovače .....	53
4.3	Zkouška 3 – 2. verze šnekového dávkovače .....	55
4.3.1	Konstrukce dávkovače verze 3.....	55
4.4	Zkouška 4 – 3. verze šnekového dávkovače .....	56
4.5	Zkouška 5 – 3. verze šnekového dávkovače .....	57
5	Diskuse .....	60
	Závěr.....	61
	ZDROJE:.....	62
	SEZNAM ZKRATEK:.....	67
	SEZNAM OBRÁZKŮ: .....	68
	SEZNAM PŘÍLOH:.....	70

# Úvod

Diplomová práce se zabývá problematikou nakládání s čistírenskými kaly (ČK). Konkrétněji se jedná o problematiku jejich dávkování například do sušáren za účelem snížení jejich významné vlhkosti, která tomuto materiálu významně brání v dalším zpracování či energetickém využití.

Čistírenské kaly jsou vedlejším produktem procesů čištění odpadních vod a představují významný environmentální i technologickou výzvu. Obsahují směs organických a anorganických látek včetně živin jako jsou dusík a fosfor, ale i potenciálně nebezpečných kontaminantů jako jsou těžké kovy a toxické chemikálie. Způsoby nakládání s čistírenskými kaly se proto staly klíčovou otázkou moderního odpadového hospodářství, přičemž současné trendy směřují k jejich maximálnímu využití a minimalizaci negativních dopadů na životní prostředí.

Diplomová práce se zaměřuje na komplexní řešení problematiky nakládání s čistírenskými kaly, jejich produkci, legislativní požadavky a možnosti jejich zpracování v České republice i zahraničí. Jedním z klíčových aspektů této problematiky je efektivní dávkování čistírenských kalů do sušáren. Dostatečně vysušený kal hraje zásadní roli při jeho následném zpracování, zejména jeho energetickém využití. Snížení vlhkosti ČK samozřejmě vede ke zvýšení jeho výhřevnosti.

Cílem práce je nejen analyzovat současné přístupy k dávkování čistírenských kalů, ale také navrhnout a experimentálně ověřit funkční dávkovací zařízení. Konstrukční návrh je doplněn o výrobní dokumentaci, která umožní jeho praktickou realizaci. V rámci experimentální části je zařízení rovněž testováno a vylepšováno.

Tato práce se tedy skládá ze čtyř hlavních částí: teoretické řešení problematiky nakládání s čistírenskými kaly, analýzy metod dávkování, konstrukčního návrhu dávkovacího zařízení a experimentálního ověření jeho funkce. Výsledky této práce pomohou přispět k optimalizaci procesů zpracování čistírenských kalů a podpořit jejich efektivní využití v rámci cirkulární ekonomiky.

# TEORETICKÁ ČÁST

# 1 Čistírenský kal – obecně

Tato kapitola se zabývá popisem ČOV a vznikem ČK, dále produkcí ČK v ČR a EU, problematikou jeho využití a srovnáním nakládání s ČK v Česku a v zahraničí. V této části je dále analyzována aktuální i plánovaná legislativa. Dále je poukázáno na to, proč je důležité kal kvalitně a efektivně sušit.



Obr. 1: Čistírenský kal [1]

## 1.1 Popis čističek odpadních vod a vznik čistírenského kalu

V této části práce jsou popsány základní procesy aplikované při čištění odpadních vod. Nedílným vedlejším produktem tohoto procesu je ČK.

### 1. Mechanické čištění

První krok čištění vody zahrnuje odstranění velkých nečistot jako jsou větve, listí a plastové předměty viz. Obr. 2. K tomu se používají mechanické lapače, jako jsou česla a síta. Voda je také provzdušňována, aby bylo podpořeno usazování tuků a olejů na hladině, díky čemuž se tyto látky dají z hladiny lépe jímat. [2]



Obr. 2: Česla a síta. [3]

## **2. Usazování**

Druhým krokem je usazování, kde se voda nechá stát v usazovacích nádržích. Těžší částice, jako je písek a jemné nečistoty, se usazují na dně nádrže a vytvářejí primární kal. [2]

## **3. Biologické čištění**

Třetí krok zahrnuje biologické čištění, kde se využívají mikroorganismy k rozkladu organických látek ve vodě. Tento proces probíhá v aktivačních nádržích, kde mikroorganismy spotřebovávají organické látky. Produktem tohoto procesu je biomasa, která se nazývá aktivovaný kal. [2]

## **4. Oddělení kalu**

Čtvrtý krok je oddělení aktivovaného kalu od vyčištěné vody. Děje se tak v dosazovacích nádržích, kde se kal ukládá na dně a vyčištěná voda odtéká pryč. Přebytečný aktivovaný kal se smísí s primárním kalem z usazovacích nádrží. [2]

## **5. Zahušťování kalu**

Pátý krok je zahušťování kalu, kde se snižuje obsah vody v kalu. To se provádí pomocí gravitačních nebo mechanických zahušťovačů, které oddělují vodu od pevných částic. [2]

## **6. Vyhnívání**

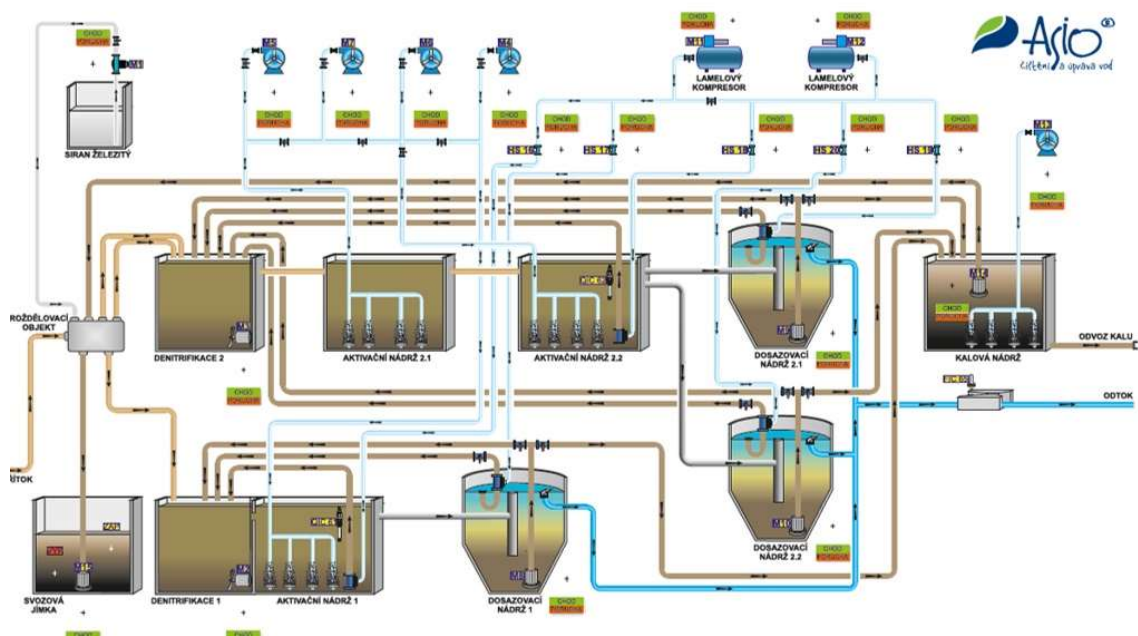
Šestý krok je vyhnívání kalu, které probíhá v anaerobních vyhnívacích nádržích. V těchto nádržích kal hnije bez přístupu vzduchu při teplotě kolem 35-55°C. Během tohoto procesu se organické látky rozkládají a produkují bioplyn, který může být využit jako zdroj energie. [2]

## **7. Odvodnění kalu**

Sedmý krok je odvodnění kalu, kde se z kalu odstraní co nejvíce vody. To probíhá pomocí odvodňovacích zařízení, jako jsou kalolisy nebo odstředivky. Výsledkem je pevný kal, který je snáze manipulovatelný a může být dále zpracován. [2]

## **8. Konečné zpracování a využití**

Tento krok zahrnuje konečné zpracování kalu, které může zahrnovat kompostování či sušení s následným spalováním. Kal může být také využit jako organické hnojivo, pokud splňuje příslušné hygienické a legislativní požadavky. [2]



Obr. 3: Technologie ČOV. [3]

## 1.2 Způsoby využití a produkce čistírenského kalu v České republice a ve vybraných evropských zemích

Kapitola se zabývá způsoby materiálového a energetického využití ČK. Mimo jiné pojednává o jeho produkci nejen v ČR a také o spalovacích systémech, které jsou důležitou technologií v otázce energetického využití kalů.

### 1.2.1 Způsoby využití čistírenských kalů

Klíčovou metodou materiálového využití ČK je jejich aplikace v zemědělství. Energetickým využitím rozumíme jejich spalování. Tato kapitole dále krátce pojednává i o nekonvenčních způsobech využití ČK.

#### Zemědělské využití

Důležitou možností pro materiálové využití kalů je jejich aplikace v zemědělství. V následujícím textu je analyzováno, za jakých podmínek jej lze takto využít.

Hlavním využitím ČK v zemědělství je využít ho jako hnojivo. Po stabilizaci a případné úpravě (kompostování nebo anaerobní fermentaci) může být čistírenský kal použit jako organické hnojivo. Obsahuje živiny jako dusík, fosfor a draslík, které jsou pro rostliny důležité. Takový kal se často používá na zemědělských polích, kde může přispět k obohacení půdy. [4]

Pro využití kalu na zemědělskou půdu existují specifické limity pro obsah konkrétních látek, které upravuje příloha č. 2 vyhlášky č. 273/2021 Sb. ČK musí být stabilizovaný a hygienizovaný. Dále jsou limitovány obsahy těchto prvků: Pb, Cd, Hg, Ni, Zn, Cu, Cr. Maximální dávka kalu je 5-10 tun (podle kvality kalu) sušiny na hektar jednou za tři roky. Zakazuje se využití například na záplavových územích a plochách, které se nachází v blízkosti vodních toků atd. [5]

Další možností materiálového využití kalů je jejich kompostování. Pokud je kal kompostován, je přeměněn na kvalitní humus, který je užitečný pro zlepšení struktury a úrodnosti půdy. Kompostovaný kal však musí být dostatečně ošetřen, aby se odstranily nežádoucí patogeny a nebezpečné látky. [4]

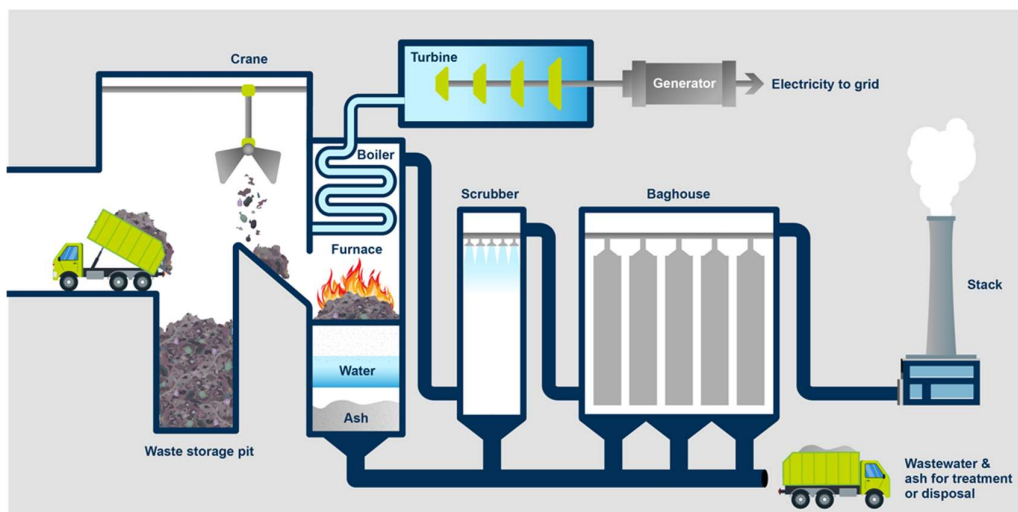
Při používání kalů na hnojení nastává problém s obdobím hnojení. Tento proces probíhá většinou jen dvakrát do roka, ale kaly se produkují stále. Přináší to sebou nutnost skladovacího místa. [4]

### Energetické využití

Jedním z nejběžnějších způsobů využití čistírenských kalů je jeho termické zpracování – spalování. Spalováním lze získat teplo i elektrickou energii. Tento proces sice umožňuje likvidaci kalu, jeho ekonomická efektivita je však diskutabilní. Důvodem je hlavně vysoká vlhkost odvodněného kalu a jeho nízká výhřevnost, tu je možné zvýšit sušením ČK. [4]

Čistírenský kal obsahuje vysoký podíl organických látek, které se mohou podrobit anaerobnímu rozkladu za účelem produkce bioplynu (metanu). Tento bioplyn může být využit pro výrobu energie (elektriny nebo tepla), většinou je takto zpracován a využit přímo v ČOV. [4]

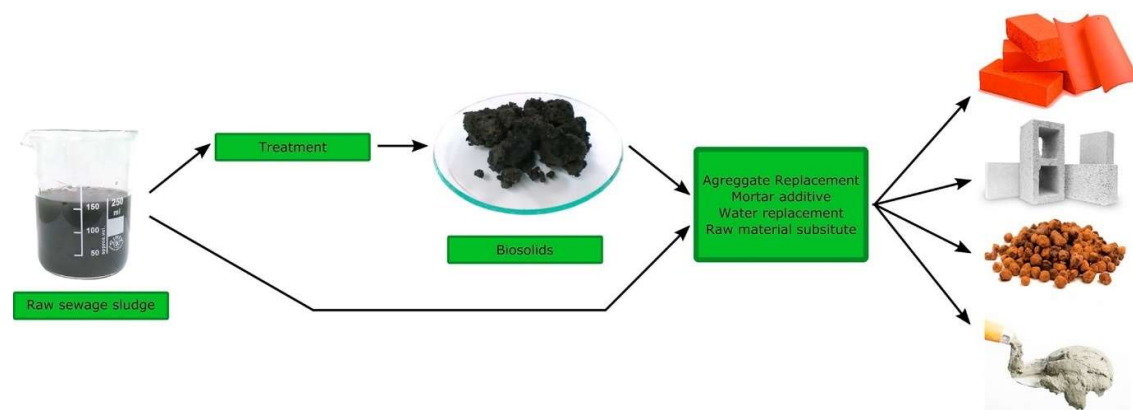
Dalším způsobem využití je pyrolýza čistírenského kalu. Jedná se o proces termického rozkladu při teplotách 300–900 °C bez přítomnosti kyslíku, jehož výslednými produkty jsou pyrolýzní plyn, kondenzát (olej a voda) a biouhel. Pyrolýzní plyn se využívá ke spalování a výrobě energie, biouhel slouží například jako půdní aditivum ke zlepšení úrodnosti půdy a jako zdroj fosforu a dusíku. Výroba pyrolýzního oleje je méně efektivní kvůli jeho nízké kvalitě, a proto se často preferuje spalování tohoto oleje. Přítomnost těžkých kovů či některých organických polutantů mohou zkomplikovat či zcela znemožnit využití biouhlu jako půdního aditiva. [6]



Obr. 4: Technologie spalování ČK. [7]

## Výroba stavebních materiálů

Popelovin v sušině, která je energeticky využitá, je velké množství, proto je využití popelu ve stavebnictví důležité. Tento popel může být využit při výrobě stavebních materiálů jako je například cement. Tento proces snižuje množství odpadu a zároveň napomáhá ekologičtější produkci stavebních hmot. [8] Dále je možné ho využít také na zpracování ekologických stavebních bloků nebo cihel, což je ekologicky šetrné a ekonomicky výhodné využití. [8]



Obr. 5: Využití ČK ve stavebnictví. [8]

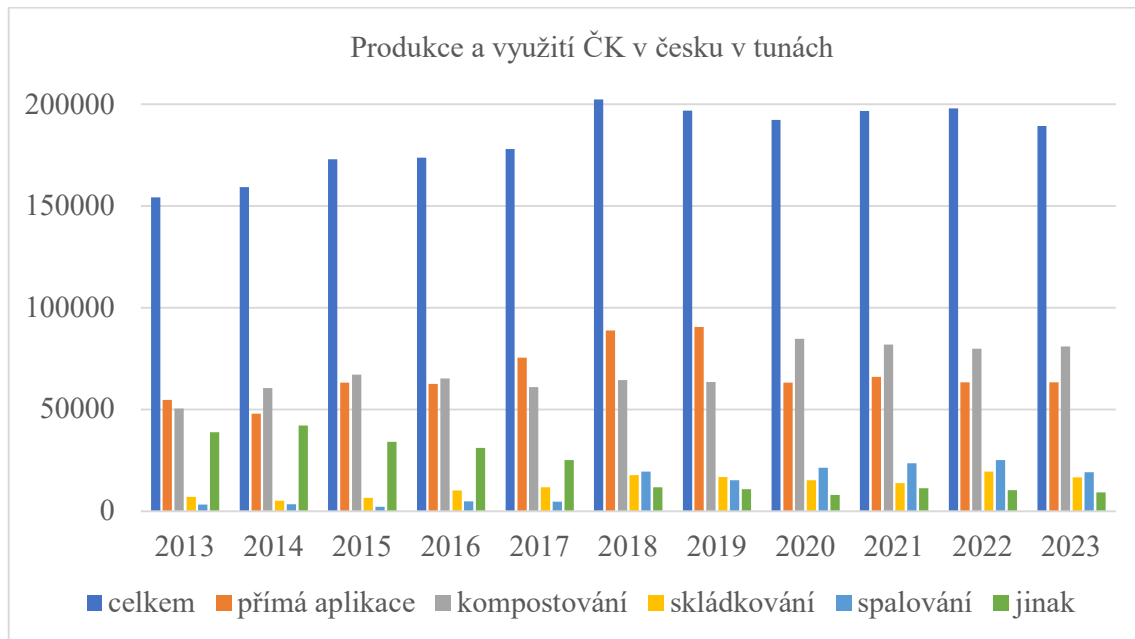
## Nekonvenční metody

Čistírenský kal může být použit pro rekultivaci krajiny například při obnově těžebních oblastí. Tento proces zlepšuje kvalitu půdy a podporuje ekologickou obnovu. Při aplikaci kalů je však třeba dbát na složení kalu, například na obsah těžkých kovů, protože by se mohly akumulovat v půdě. [9]

### 1.2.2 Produkce a nakládání s čistírenskými kalů v České republice a vybraných evropských zemích

V České republice se ročně produkuje značné množství kalu z čistíren odpadních vod. V roce 2022 bylo vyprodukováno přibližně 197 991 tun sušiny kalu. Toto množství představuje nárůst oproti předchozím rokům, ale jen o zanedbatelné množství cca 2 %. O velkém nárůstu se dá mluvit v roce 2018 konkrétně tedy o 25 % více než v přechodím roce. Nejspíše k tomu došlo z důvodu přísnějších kontrol. Od roku 2018 produkce stagnuje na podobných hodnotách. [10]

Roční produkce kalu v České republice je významná a vyžaduje efektivní způsoby nakládání. V roce 2022 přibližně 32 hm % kalu bylo využito přímo v zemědělství. Dalších 40 hm % kalu bylo využito v kompostování, 13 hm % bylo spáleno nebo spoluspaleno. Při spoluspalování je ČK přidáván v malém množství k jinému konvenčnímu palivu například biomase. Na skládky bylo uloženo 10 hm % ČK, zatímco 5 hm % bylo využito jinak. [10]

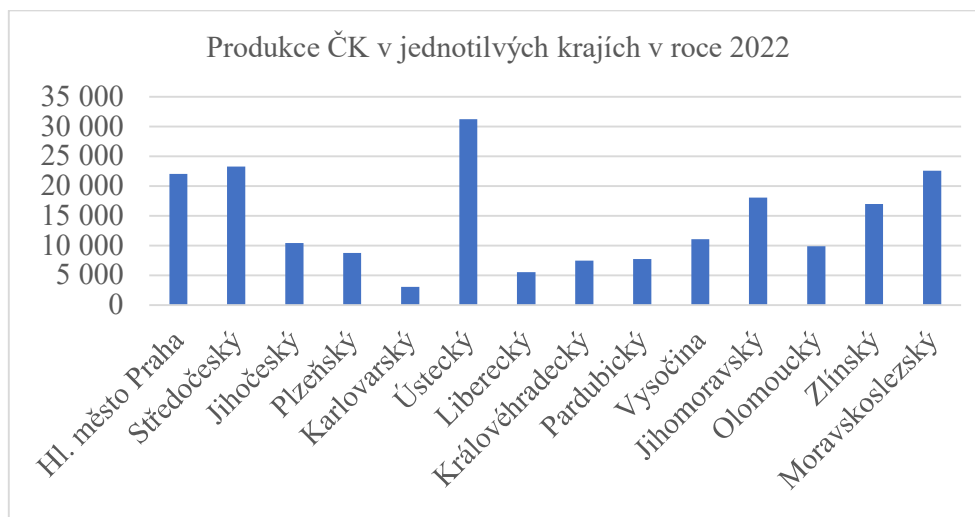


Graf 1: Nakládání s odpady v letech 2013–2023. [10]

Produkce kalu v ČR se liší podle regionů. Největší množství kalu se obvykle produkuje v krajích s vysokou hustotou obyvatelstva a průmyslovou činností. Mezi tyto kraje patří:

- **Praha:** Vysoká hustota obyvatelstva a velké množství průmyslových podniků.
- **Středočeský kraj:** Blízkost Prahy a vysoká koncentrace průmyslu.
- **Moravskoslezský kraj:** Silně průmyslový region s vysokou produkcí odpadních vod.
- **Ústecký kraj:** Silně průmyslový region s velkými provozy, jako je například rafinerie.

Graf 2 ukazuje, jak byla rozdělená produkce ČK v roce 2022 v jednotlivých krajích a je z něj zřejmé, že určité oblasti mají mnohem větší produkci kalů než jiné. V těchto oblastech může být vhodnější než v jiných stavět a využívat provozy na zpracování ČK.



Graf 2: Produkce ČK v krajích v roce 2022. [10]

Další část této kapitoly se bude věnovat produkci a nakládání s ČK v dalších státech Evropy.

## **Německo**

V roce 2023 bylo v Německu (SRN) vyprodukováno přibližně 1,6 milionu tun kalu [12]. Této zemi je věnován ve srovnání s ostatními zeměmi větší prostor, neboť vykazuje výrazně odlišný přístup k nakládání s ČK.

Německo se zaměřuje na recyklaci fosforu z kalů. v roce 2017 přijalo zákon, který vyžaduje, aby všechny čistírny odpadních vod s kapacitou nad 50 000 ekvivalentních obyvatel (jednotka vyjadřující znečištění vyprodukované osobou za den) recyklovaly fosfor z kalů. Tento přístup je součástí širší strategie zaměřené na udržitelné nakládání s odpady a ochranu životního prostředí. Německo také využívá pokročilé technologie pro anaerobní stabilizaci a spalování kalů, což umožňuje efektivní využití bioplynu a minimalizaci objemu odpadu. [13]

Energeticky využito bylo v SRN v roce 2023 80 % čistírenského kalu. V poměru přibližně 1:1 bylo rozdělení využití pro výrobu tepla a výrobu elektrické energie. Přibližně 13 % bylo stabilizováno a zužitkováno jako hnojivo v zemědělství. Zbylé množství kalu bylo kompostováno, případně jinak využito. [12]

V Německu je nakládání s čistírenskými kaly považováno za důležitou součást environmentální politiky, která se zaměřuje na udržitelné hospodaření s odpady a ochranu přírodních zdrojů. Klíčovým přístupem v této oblasti je recyklace živin, především fosforu, a snižování ekologického dopadu kalů na životní prostředí. Německo patří k lídrům v implementaci inovativních technologií, které se zabývají zpracováním čistírenských kalů, a tento přístup je podporován i legislativními požadavky.

Právní rámec pro nakládání s čistírenskými kaly v Německu je definován vyhláškou o nakládání s čistírenskými kaly (Abfallklärschlammverordnung, AbfKlärV) a vyhláškou o hnojivech (Düngemittelverordnung, DüMV [14]). Změny těchto předpisů stanovují, že v budoucnu bude většina čistírenských kalů v Německu podrobena termické likvidaci, přičemž fosfor z kalů musí být využit buď před samotným spalováním, v jeho průběhu, nebo po něm. [15]

Spalování čistírenských kalů podléhá požadavkům 17. nařízení k provedení spolkového zákona o kontrole emisí (17. Bundesimmissionschutzverordnung, 17. BImSchV), které upravuje spalování a spoluspalování odpadů. Toto nařízení stanovuje limity emisí, pravidla pro měření a monitorování emisí a také provozní požadavky na spalovny. [16]

Novela německé vyhlášky o čistírenských kalech (AbfKlärV) z října 2017 přináší významné změny v přístupu ke zpracování ČK, zejména s ohledem na využití fosforu, který je klíčovým prvkem pro zemědělství. Vyhláška zavádí povinnost zpětného získávání fosforu z čistírenských kalů nebo z popela po jejich spalování, a to zejména pro čistírny odpadních vod (ČOV) s kapacitou větší než 50 000 ekvivalentních obyvatel (EO). Tyto ČOV musí využít minimálně 50 % fosforu z kalu nebo 80 % z popela. Pro menší ČOV s kapacitou pod 50 000 EO je povoleno přímé využití kalů v zemědělství za předpokladu splnění stanovených limitních

hodnot. Látky, na které se vztahují limity, jsou podobné jako u nás. Dané limity jsou odlišné, ale nedá se říct, že jsou přísnější. Pro některé látky je limit vyšší pro jiné nižší [15]. Rozdílné jsou limity pro takzvané perfluorované látky, které u nás ještě regulovány nejsou [15]. Zákon stanovuje přechodná období do roku 2029 pro velké čistírny (nad 100 000 EO) a do roku 2032 pro ostatní, aby mohly provozovatelé připravit a implementovat příslušná opatření. Novela rovněž zpřísňuje limity na koncentrace některých látek, včetně zinku, organických halogenových sloučenin (AOX), polychlorovaných bifenylů (PCB) a benzo(a)pyrenu. Tento nový legislativní rámec odráží snahu o zvýšení udržitelnosti při nakládání s čistírenskými kaly, podporu oběhového hospodářství a ochranu životního prostředí. Povinnost získávání fosforu a jeho recyklace představuje důležitý krok k dlouhodobému snížení závislosti na fosfátových horninách, jejichž světové zásoby jsou omezené. [16]

### **Švýcarsko**

V roce 2012 bylo ve Švýcarsku vyprodukováno přibližně 195 000 tun kalu. Skladování, kompostování či jakékoliv využívání kalů v zemědělství je zde zakázáno od roku 2008. Švýcarsko má velmi pokročilé a ekologicky šetrné metody nakládání s kaly z čistíren odpadních vod. Většina kalů je zpracovávána pomocí anaerobní digesce. [17]

Po anaerobní digesci jsou kaly často sušeny a následně energeticky využity. V některých případech jsou kaly také spalovány v cementárnách nebo jiných průmyslových zařízeních, kde mohou sloužit jako zdroj energie a zároveň přispívat k redukci odpadu. [18]

Švýcarsko také klade velký důraz na recyklaci fosforu z kalů. Využíváno je zde více technologií, které umožňují extrakci fosforu z kalů, což přispívá k udržitelnosti a ochraně životního prostředí. [18]

Ve Švýcarsku je kal z čističek odpadních vod nakonec vždy zpracován spalováním, přičemž veškerý kal je spálen v moderních spalovacích zařízeních. Tento přístup je součástí švýcarské politiky zaměřené na udržitelné nakládání s odpady a minimalizaci objemu odpadu, který by mohl skončit na skládkách. Švýcarsko efektivně nakládá s ČK, zatímco podporuje cirkulární ekonomiku a šetří přírodní zdroje. [19]

### **Francie**

V roce 2022 bylo ve Francii vyprodukováno přibližně 1,1 milionu tun kalu z čističek odpadních vod (ČOV).

Podle údajů z francouzského ministerstva životního prostředí se přibližně 14 % kalů z ČOV používá pro energetické využití spalováním. Asi 49 % se používá pro výrobu bioplynu. To přispívá k výrobě obnovitelné energie. Přibližně 33 % kalu je stabilizováno a následně využíváno jako hnojivo v zemědělství. Skládkování ČK ve Francii nezastupuje ani jedno jeho celkové produkce. [20]

## **Nizozemsko**

Roční produkce kalu v roce 2022 zde byla 1,3 milionu tun. Nizozemsko je známé svým inovativním přístupem k nakládání s kaly. Země využívá pokročilé technologie pro anaerobní stabilizaci, spalování a recyklaci fosforu. Nizozemsko také investuje do výzkumu a vývoje nových metod pro zpracování kalů, včetně využití bioplynu a výroby bioplastů. [21]

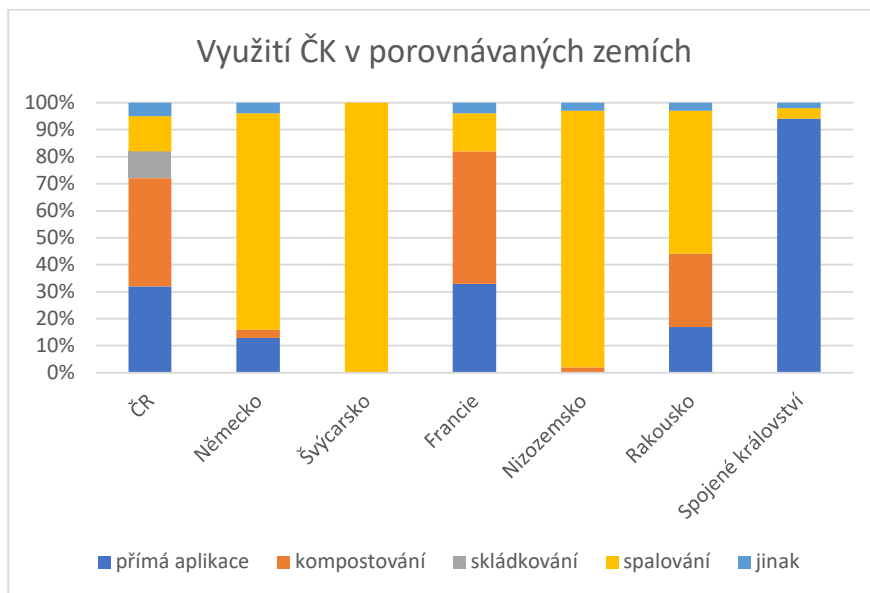
Přibližně 95 % kalů z ČOV je v Nizozemsku spalováno. Malá část z těchto 95 % je také spalována v cementárnách. Zbytek kalu, který není spálen, může být zpracován v některých případech pro materiálové využití včetně kompostování, ale tento podíl je poměrně malý. [22]

## **Rakousko**

V roce 2020 bylo v Rakousku vyprodukováno přibližně 240 000 tun kalu z čistíček odpadních vod. V Rakousku se přibližně 53 % kalu z ČOV používá pro energetické využití. Asi 27 % se používá pro výrobu bioplynu prostřednictvím anaerobní digesce. To přispívá k výrobě obnovitelné energie. Přibližně 17 % kalu je stabilizováno a následně využíváno jako hnojivo v zemědělství. [23]

## **Spojené království**

V roce 2022 byla produkce čistírenského kalu 811 000 tun. Asi 94 % kalů z ČOV ve Velké Británii byla v roce 2022 využita jako hnojivo nebo organický materiál pro zlepšení kvality půdy. Tento kal je po stabilizaci aplikován na zemědělské pozemky, kde pomáhá zlepšovat strukturu půdy a obohacovat ji o živiny, jako je fosfor a dusík. Vzhledem k opravdu velkému procentu využitému v zemědělství je tento proces podroben regulaci na obsah patogenů, těžkých kovů nebo jiných nebezpečných látek, které by mohly ohrozit zdraví lidí nebo zvířat. Rozdíl oproti ČR je v tom, že ve Velké Británii jsou sledovány koncentrace daných látek přímo v půdě, zatímco v ČR jsou sledovány koncentrace v kalu. Spalováním kalu bylo v Británii zůžitkováno přibližně 4 % celkového objemu kalu. Převážně v cementárenských provozech. Zbytek byl využit jinými způsoby. [24]



Graf 3: Využití čistírenských kalů ve vybraných evropských zemích v letech 2020-2022, Švýcarsko 2012. (graf sestaven na základě výše zmíněných informací)

Česká republika výrazně zaostává za většinou západoevropských zemí ve způsobu zpracování kalů. Zatímco v Německu a Nizozemsku se spaluje 80–95 % kalů a využívá se tak jejich energetický potenciál, v ČR je to pouze 13 %. Švýcarsko zavedlo povinné spalování a recyklaci fosforu již v roce 2008, podobně Německo od roku 2017, zatímco Česko tuto legislativu dosud nepřijalo.

Ve srovnání s Francií a Rakouskem, kde se klade důraz na výrobu bioplynu prostřednictvím anaerobní digesce (např. 49 % ve Francii), je na tom Česko podobně. Nizozemsko i Švýcarsko tyto zastaralé způsoby zpracování kalů zcela opustily a investují do moderních technologií včetně pokročilé recyklace.

Spojené království se odlišuje silným zaměřením na zemědělské využití kalů (94 %) podobně jako ČR, avšak s vyšším důrazem na jejich hygienizaci a stabilizaci. Celkově tak většina srovnávaných států využívá kal mnohem efektivněji – ať už spalováním, recyklací fosforu nebo výrobou bioplynu – zatímco Česká republika zůstává u technologicky jednodušších metod, jejichž dopad na životní prostředí je však diskutabilní. Inspiraci by mohla čerpat zejména z Německa a Nizozemska, kde se zaměřují na pokročilé technologie a minimalizaci odpadu. Švýcarsko ukazuje, že je možné zcela eliminovat skládkování kalů a plně je energeticky zhodnocovat.

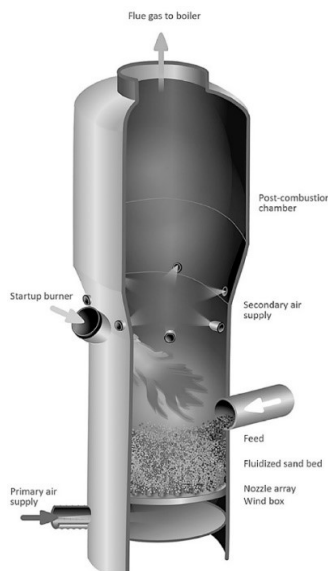
### 1.2.3 Spalovací systémy

Z předešlého textu je patrné velké zaměření na spalování čistírenského kalu, proto je následující kapitola věnována právě tomuto procesu. Tato část stručně představí používaná spalovací zařízení. Hlavní technologií pro monospalování (spalování bez dalších paliv a příměsí)

čistírenských kalů v celosvětovém měřítku i v Německu je stacionární fluidní spalovací systém. Kromě této technologie se využívají také rotační pece, kombinované vícepecní fluidní pece a vícenásobné nístějové pece. V poslední době se mezi technologie pro monospalování začleňují i prachové hořáky a systémy s pohyblivým ložem, které se ukazují jako vhodné zejména pro decentralizované aplikace. U následujících dvou aplikací, kterou jsou ve velké míře využívány na spalování ČK, je vhodné čistírenský kal nejprve vysušit. [16]

### Stacionární fluidní lože

Stacionární fluidní pece (viz. Obr. 6) mají spalovací komoru s žáruvzdornou výstelkou a tryskovým dnem, na kterém je pískové lože. Lože se fluidizuje prouděním primárního vzduchu skrz trysky, což zajišťuje intenzivní promíchávání pískového lože, paliva a vzduchu. Tento proces zlepšuje přenos tepla i materiálu a zajišťuje účinné spalování. Spalování probíhá ve dvou stupních: nejprve ve fluidním loži s mírně omezeným množstvím vzduchu (substechiometricky) a poté ve druhé komoře, kde se s přidávkem sekundárního vzduchu dokončuje oxidace plynů. Tento postup minimalizuje emise oxidů dusíku a CO, zároveň snižuje tepelné ztráty a usnadňuje kompaktní čištění spalin. ČK pro spalování v této peci musí být předsušen. [16]

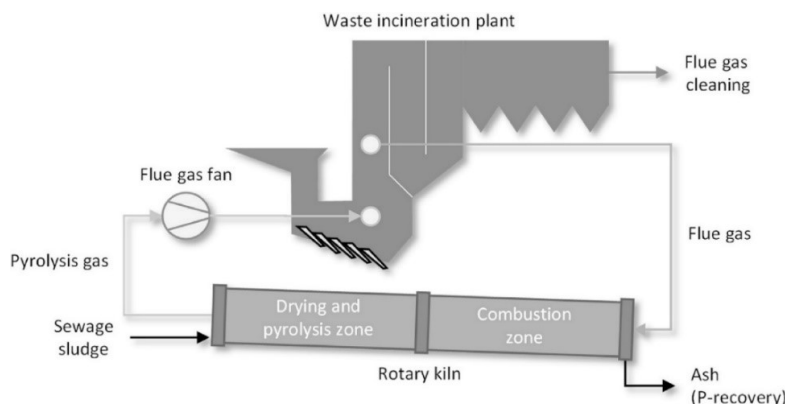


Obr. 6: Stacionární fluidní pec. [16]

### Rotační pece

Rotační pece (viz. Obr. 7) jsou zařízení složená z pomalu se otáčejícího válce/bubny s žáruvzdornou výstelkou. Používají se hlavně ke spalování nebezpečných odpadů a při výrobě cementu se spoluspalováním odpadů, neboť vykazují relativně dlouhou zdržnou dobu vsázky v peci a velmi vysoké provozní teploty. Teplo potřebné k procesu zajišťují hořáky uvnitř pece nebo se do ní přivádí horký plyn. Vzduch a horké spaliny v peci proudí nad vsázkou, ale neprocházejí jí. To znamená, že dochází k menšímu promíchání vzduchu s palivem, a proto je potřeba více vzduchu k dosažení úplného dohoření paliva. To vede ve srovnání s jinými

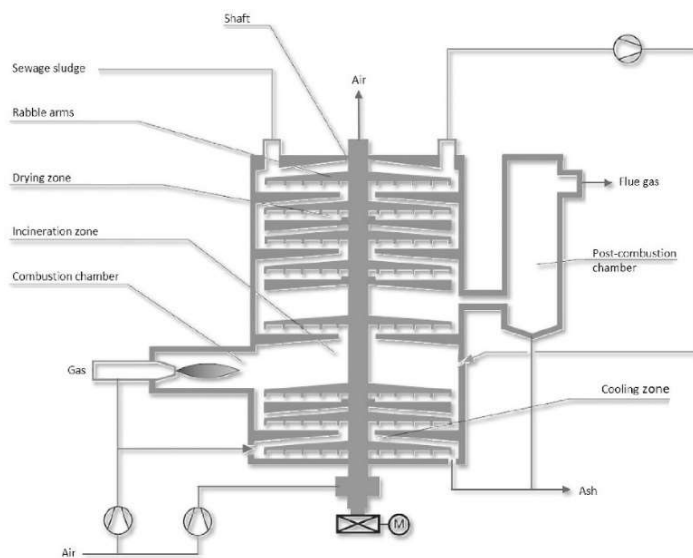
technologiemi, jako jsou například fluidní pece, k nižší energetické účinnosti. I u této pece je vhodné, aby byl kal předsušen, díky toho nebude potřeba dodávat takové množství tepla. [16]



Obr. 7: Rotační pec. [16]

### Vícenásobná nístějová pec

Tyto pece jsou určeny pro zpracování mechanicky odvodněných čistírenských kalů. Jejich schéma je zobrazeno na Obr. 8. Předsušení kalu tedy není nutné, protože se předsuší na prvních patrech pece, kde kal vstupuje. Tyto zařízení se skládají ze svislé válcové pece, v níž jsou umístěny vodorovné žáruvzdorné zásobníky. Pomalu se pohybující ramena přivádějí kal shora přes různé úrovně pece. Svislý hřídel uprostřed pece pohání ramena. Hřídel i ramena jsou duté a chlazené vzduchem, který se ohřívá a následně slouží jako spalovací vzduch. Každé patro je vybaveno otvory, které umožňují pohyb vzduchu středem a na okrajích. Nevýhodou této pece jsou vyšší pořizovací a provozní náklady. Dále pec vyžaduje optimální distribuci kalu, neboť může snadno dojít k jejímu zahlcení. Zapotřebí je také častější údržba a čištění oproti ostatním pecím. [16]



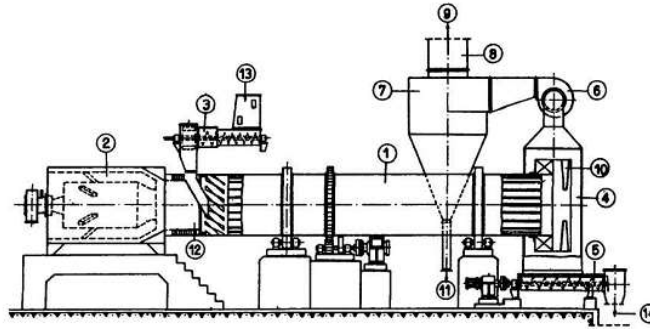
Obr. 8: Vícenásobná nístějová pec [16]

## 1.2.4 Sušení kalů

Úprava čistírenských kalů během termochemické přeměny vyžaduje po odvodnění ČK v ČOV další sušení za účelem zvýšení výhřevnosti. Při obsahu sušiny 20 hm. % má kal běžně výhřevnost okolo 2 MJ/kg, zatímco po vysušení na 80 hm. % sušiny okolo 7 MJ/kg. Dále samozřejmě záleží na konkrétním složení kalu. Kal s vyšším podílem organických látek má větší výhřevnost. Výhřevnost čisté sušiny se může pohybovat ve velkém rozmezí od 9,3 do 17,4 MJ/kg v závislosti na složení odpadních vod a způsobu jejich zpracování v ČOV. [25]

Požadovaný obsah vody a technologie sušení se mohou výrazně lišit, přičemž se obecně rozlišuje částečné sušení s obsahem sušiny pod 85 hm. % a úplné sušení s více než 85 hm. % sušiny. Snižování obsahu vody přímo zvyšuje výhřevnou hodnotu kalu, což je klíčové pro jeho další využití. Podle způsobu přenosu tepla lze sušení čistírenských kalů rozdělit na několik typů. Kontaktní sušení probíhá přenosem tepelné energie prostřednictvím vyhřívaného povrchu, přičemž kal nepřichází do přímého kontaktu s teplotním médiem jako je pára, výfukové plyny, horká voda nebo termální oleje. Na rozdíl od této metody je při konvekčním kontaktním sušení kal v přímém kontaktu s teplotním médiem, což umožňuje efektivní odvod vlhkosti pomocí spalín, páry nebo jiných horkých plynů. Vznikající páry jsou odváděny spolu se sušicím plynem. Další možností je radiační sušení, které využívá infračervené nebo mikrovlnné záření k přenosu tepelné energie přímo do kalu. V průmyslovém měřítku se k sušení čistírenských kalů využívá i sluneční záření, což představuje energeticky úspornou variantu s minimálními provozními náklady. Nevýhodou je potřeba velké plochy pro výstavbu skleníků a celkově je to pomalejší proces, který vyžaduje více času. [16]

Pro sušení čistírenských kalů se v praxi využívají různé technologie, přičemž mezi nejpoužívanější patří kotoučové, bubnové (viz. Obr. 9), fluidní a pásové sušičky. Diskové sušičky pracují na principu přenosu tepla přes duté disky uvnitř válce, zatímco tenkovrstvé sušičky využívají dvoustěnný válec, kde se kal suší v tenké vrstvě na vnitřní stěně. Bubnové sušárny fungují na rotačním principu a využívají konvekční sušení pomocí páry nebo spalín, přičemž je možné i kontaktní ohřívání pláště. Fluidní sušičky kombinují ohřev horkým plynem a výměníky tepla, což umožňuje efektivní přenos energie. Pásové sušičky suší kal konvekcí, kdy horký plyn proudí skrz materiál na dopravním pásu, což zajišťuje téměř bezprašný výstupní produkt. Pro zajištění efektivního sušení je potřeba ČK vhodně dávkovat, kde důležitými aspekty jsou dávkované množství a tvar dávkovaného materiálu. [16]



- |                                 |                                   |
|---------------------------------|-----------------------------------|
| 1. Buben sušárny                | 8. Odvod brýd                     |
| 2. Hořák nebo ohřívák vzduchu   | 9. Odtah                          |
| 3. Dopravník kalů               | 10. Hradící zařízení              |
| 4. Zásobník sušeného kalu       | 11. Prach                         |
| 5. Šnekový vynašeč suchého kalu | 12. Napojení zdroje tepla k bubnu |
| 6. Ventilátor                   | 13. Zásobník odvodněného kalu     |
| 7. Odlučovač prachu             | 14. Usušený granulát              |

Obr. 9: Rotační bubnová sušárna. [26]

Pro malé čistírny je vhodné solární sušení, kde se kaly rozprostírají ve sklenících a vlhkost se odstraňuje přirozeným větráním. Díky nízkým teplotám není obvykle nutná kondenzace ani další úprava odcházejících par. [16]



Obr. 10: Solární sušárna. [27]

Proces sušení v sobě zahrnuje také dopravu a dávkování kalu do sušárny, přičemž tato operace může být velmi problematická. Během sušení dochází k výrazné změně konzistence čistírenského kalu. Při obsahu sušiny mezi 45–65 % ČK vstupuje do adhezní fáze. V této fázi se ČK stává vysoce viskózním, lepkavým a houževnatým materiálem, což může komplikovat jeho dávkování a zpracování. Je také vhodné, aby byl materiál vstupující například do technologie sušení v menší frakci, díky čemuž lze dosáhnout efektivnějšího provozu. Při správném dávkování materiálu je možné dosáhnout konkrétního tvaru na výstupu z dávkovacího zařízení, a to za účelem optimalizace teplosměnné plochy a objemu dávky. Mechanické namáhání například při dopravě šnekovými dopravníky je v této fázi extrémní a může vést k deformaci zařízení. Aby se tomuto problému předešlo, mohou se využít

vícestuňňové sušárny nebo remixovací systémy, kde se kal před sušením míchá se suchým materiálem, čímž se eliminuje adhezni fáze. [16]

### 1.3 Aktuální a plánovaná legislativa o nakládání s čistírenskými kaly

Text kapitoly nastiňuje, jaké zákony a vyhlášky upravují nakládání s ČK v ČR. Dále se zabývá budoucími podmínkami a trendy ve využití kalu.

#### **Zákon č. 541/2020 Sb., o odpadech [28]**

- Definuje čistírenský kal jako odpad, který spadá do systému odpadového hospodářství.
- Stanovuje hierarchii nakládání s odpady v souladu s 4R (vysvětleno níže).
- Požaduje přednostní využití odpadu před jeho odstraněním.

#### **Vyhláška č. 273/2021 Sb., o podrobnostech nakládání s odpady [5]**

- Určuje podmínky pro skladování, úpravu a evidenci čistírenských kalů.
- Omezuje přímé skládkování kalů s vysokým organickým obsahem.
- Definuje podmínky pro aplikaci kalů na zemědělskou půdu.
- Stanovuje maximální limity těžkých kovů a dalších znečišťujících látek.
- Vyžaduje hygienizaci kalů před použitím v zemědělství.

#### **Zákon č. 201/2012 Sb., o ochraně ovzduší [29]**

- Reguluje spalování čistírenských kalů v cementárnách, spalovnách či kogeneračních jednotkách.

V České republice se nakládání s čistírenskými kaly řídí principy 4R – Reduce (snižování), Reuse (opětovné použití), Recycle (recyklace) a Recover (energetické využití). Tyto principy jsou zakotveny v legislativě, zejména v zákoně č. 541/2020 Sb., o odpadech, a v vyhlášce č. 273/2021 Sb., o podrobnostech nakládání s odpady. [28]

**Snižování (Reduce):** Cílem je minimalizovat množství produkovaného kalu optimalizací procesů čištění odpadních vod. To zahrnuje zavádění moderních technologií a postupů, které snižují tvorbu kalu již v počátečních fázích čištění. Například optimalizací biologických procesů lze dosáhnout nižší produkce přebytečného kalu. [28]

**Opětovné použití (Reuse):** Jednou z možností je aplikace upravených kalů na zemědělskou půdu jako hnojiva. Tento postup je regulován vyhláškou č. 437/2016 Sb., o použití upravených kalů na zemědělské půdě, která stanovuje podmínky pro bezpečné použití kalů v zemědělství, včetně limitů pro obsah škodlivých látek a požadavků na hygienizaci. Před aplikací musí být kaly upraveny tak, aby splňovaly stanovené hygienické a chemické parametry, čímž se zajišťuje ochrana životního prostředí a lidského zdraví. [28]

**Recyklace (Recycle):** Recyklace kalů zahrnuje procesy, které umožňují získávání cenných složek z kalů pro další využití. Například lze z kalů extrahovat fosfor, který je důležitým prvkem pro výrobu hnojiv. Tento přístup přispívá k oběhovému hospodářství tím, že vrací hodnotné materiály zpět do produkčního cyklu a snižuje závislost na primárních surovinách. [28]

**Energetické využití (Recover):** Kaly mohou být využity pro výrobu energie prostřednictvím procesů jako je anaerobní digesce, při které dochází k produkci bioplynu. Tento bioplyn lze následně využít k výrobě tepla a elektřiny, což přispívá k energetické soběstačnosti čistíren odpadních vod. Další možností je spalování kalů ve specializovaných zařízeních, kde se energie uvolněná při spalování využívá pro výrobu tepla nebo elektřiny. [28]

Implementace těchto principů v praxi přispívá k udržitelnému nakládání s čistírenskými kaly, minimalizaci jejich negativních dopadů na životní prostředí a maximálnímu využití jejich potenciálu jako zdroje cenných látek a energie. [10]

Na základě předchozího textu lze říct, že v České republice i celé Evropské unii se do budoucna očekává zpřísnění pravidel pro nakládání s čistírenskými kaly. Hlavním cílem je minimalizace skládkování, zvýšení recyklace fosforu a dalších cenných látek, rozšíření energetického využití a snížení environmentální zátěže.

Fosfor je klíčový prvek pro zemědělství, ale jeho přírodní zásoby jsou omezené. Evropská unie proto tlačí na členské státy, aby zavedly technologie umožňující jeho získávání z kalů a popelů po jejich spalování. Příklad technologie pro získávání fosforu vizte Obr. 11. [30]

Budoucími trendy v nakládání s ČK nejspíše budou povinná recyklace fosforu z kalů v souladu s evropskou legislativou. Vznikají projekty zaměřené na chemickou extrakci fosforu z čistírenských kalů a jejich popelů. Srážecí metody jsou nahrazovány filtračními sorpčními a biofiltračními procesy. To umožňuje efektivní získávání fosforu pro výrobu hnojiv. [30]



Obr. 11: Sorbent pro navázání fosforu [30]

Použití čistírenských kalů jako hnojiva bylo dlouho běžnou praxí, ale kvůli obsahu mikroplastů, těžkých kovů a perzistentních organických polutantů se v EU i ČR očekává zpřísnění regulace. [31]

- Pravděpodobně dojde k dalšímu zpřísnění limitů pro obsah rizikových látek v kalech.
- Alternativou bude výroba bezpečnějších hnojiv z kalů pomocí termochemických a chemických úprav.
- Místo přímé aplikace kalů se může více rozvíjet pyrolýza nebo spalování s následnou recyklací živin. [31]

Čistírenské kaly mají vysoký obsah organických látek, což umožňuje jejich energetické využití. Do budoucna lze očekávat:

- Rozšíření anaerobní digesce – zvýšená produkce bioplynu, který může být využit jako zdroj obnovitelné energie pro čistírny odpadních vod či komunální sféru.
- Spalování kalů ve spalovnách komunálního odpadu s možností využití tepla a elektřiny.
- Vývoj menších regionálních zpracovatelských center pro efektivnější využití kalů v místě jejich vzniku. [31]

Spalování ČK je zřetelným trendem celé Evropské unie, ale v České republice zatím není tak rozšířené. Spalování kalů výrazně snižuje jejich objem, což pomáhá v řešení problémů spojených s jejich skladováním a transportem. Spalování může pomoci eliminovat patogeny, bakterie a nebezpečné mikroorganismy v kalu, které by při aplikaci kalů na zemědělskou půdu mohly představovat zdravotní riziko. Zajišťuje také odstranění některých kontaminantů jako jsou organické znečišťující látky a mikroplasty. Spalování kalů v zařízeních pro energetické využití může generovat teplo a elektřinu, což představuje obnovitelný zdroj energie. Proces tak přispívá k cirkulární ekonomice a pomáhá pokrýt energetické nároky přilehlých oblastí. [32]

Tato technologie zpracování s sebou však přináší i nevýhody. Popel z procesu spalování kalů může obsahovat nebezpečné látky, jako jsou těžké kovy a další kontaminanty. Tento popel je třeba vhodně zpracovávat a likvidovat, což může být nákladné a ekologicky náročné. Moderní spalovací technologie, které minimalizují negativní environmentální dopady jsou nákladné na výstavbu i provoz. Také výhřevnost samotného materiálu je velmi nízká (řečeno v přechozím textu) ve srovnání s konvenčními palivy. Dále je potřebné dbát na recyklaci živin (fosfor, dusík), které se při tomto procesu mohou ztrácet a z jiných zdrojů jsou náročné na získání. I přes všechny tyto nevýhody je spalování ČK každým rokem rozšířenější. Z toho vychází závěr, který ukazuje, že výhody jsou mnohem silnější než nevýhody. Proto má smysl se touto problematikou hlouběji zabývat, technologii dále zdokonalovat a tím vytvořit prostor pro identifikaci dalších výhod a postupné odstraňování nevýhod. [32]

Z kapitoly 1 vyplývá, že produkce kalu je důležitým aspektem environmentálního managementu. Efektivní nakládání s kaly je klíčové pro minimalizaci jejich negativních dopadů na životní prostředí a pro využití jejich potenciálu jako zdroje živin pro zemědělství. Místa s vyšší produkcí kalů jsou strategické pro výstavbu zařízení, které ČK zpracovávají. Díky správně zvolené lokaci výstavby mohou být ušetřeny nemalé náklady za logistiku. Dále je z textu zřetelné, že spalování ČK je do budoucna důležitým trendem a k tomu se úzce váže i jeho vhodné dávkování do těchto technologií. Proto se následující kapitoly budou zabývat dávkovacími systémy, návrhem a v neposlední řadě výrobou dávkovače pro ČK.

## 2 Dávkovací systémy

Následující kapitola pojednává o jednotlivých typech dávkovacích zařízení partikulárních látek analyzuje ta zařízení, která jsou vhodná pro dávkování ČK a dále detailněji popisuje klíčovou konstrukční část dávkovacích systémů – násypku. Kapitola je členěná podle typů prvků, které v dávkovacím systému tvoří hlavní součást, uvádějící partikulární látku do pohybu.

Čistírenský kal je partikulární látka, a proto technologie jeho dávkování vychází z předpokladů o dávkování partikulárních látek. Vhodný způsob dávkování je důležitý pro efektivní a spolehlivou funkci dávkovacího zařízení. Tato kapitola popisuje způsoby dávkování partikulárních látek a také vhodnosti jednotlivých zařízení pro aplikaci na čistírenský kal. [33]

Dávkovací systémy hrají klíčovou roli v přesné a efektivní manipulaci s čistírenským kalem. Jejich hlavním úkolem je regulovatelné podávání materiálu v požadovaném množství, velikosti a rychlosti. Tím je zajištěn plynulý chod přívodu kalu do příslušného procesního zařízení. Příkladem takového zařízení může být sušárna, ve které se snižuje obsah vázané vlhkosti v ČK, čímž dochází k navýšení výhřevnosti ČK před jeho spalováním či jiným zpracováním. [33]

Hydraulická doprava využívá kapalinu (obvykle vodu) k přepravě materiálů potrubím. Je vhodná pro mokré, pastovité a jemnozrné materiály, jako je i čistírenský kal. Materiál je unášen proudem kapaliny a dopravován na požadované místo. Tento systém umožňuje efektivní transport a je často používán v uzavřených systémech, což minimalizuje únik zápachu a kontaminaci. [34]

Pneumatická doprava využívá stlačený vzduch nebo jiný plyn k přepravě sypkých a suchých materiálů potrubím. Tento systém je vhodný pro lehké a jemné látky, jako jsou prášky nebo granule. Existují dva hlavní typy: podtlaková (sání) a přetlaková (foukání) doprava. [34]

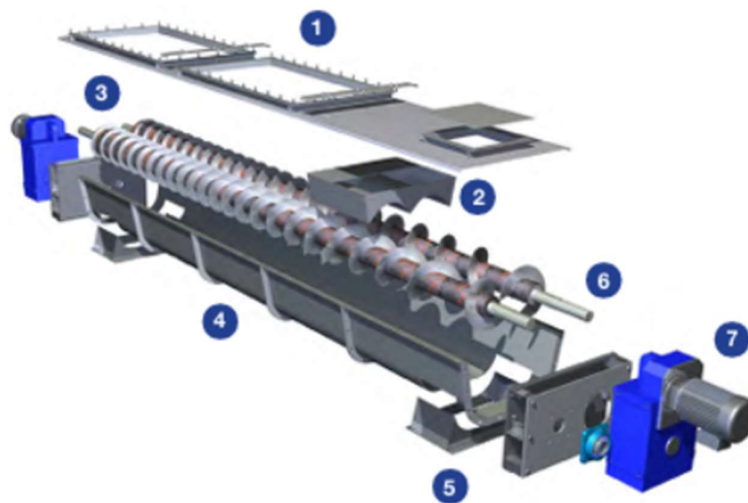
Mechanické dávkovací systémy jsou častou volbou pro dávkování čistírenského kalu, zejména pokud je potřeba zajistit stabilní a kontrolovaný přísun materiálu. Tyto systémy využívají pohyblivé mechanické prvky jako jsou například šneky, pásové nebo vibrační dávkovače, které umožňují přesné dávkování i v náročných podmínkách. Při dávkování kalu, který může mít různou konzistenci a viskozitu je kladen důraz na to, aby byl systém dostatečně robustní a odolný vůči abrazivnímu účinku kalu, zejména pokud je tento kal hustý nebo obsahuje pevné částice. [33]

Každý z těchto systémů má své specifické výhody i omezení, a proto je důležité zvážit jejich vhodnost podle charakteristik a požadavků procesu. Pro aplikaci dávkování ČK do sušárny určitě není vhodné zvolit hydraulickou dopravu, protože by byla na materiál navázána další vlhkost a pokud má následně docházet k vysoušení, tak takovýto proces nedává smysl. Ani použití pneumatického dávkování není vhodné pro takovýto druh materiálu. Z výše uvedených důvodů se následující část práce zaměří na mechanické systémy, které jsou pro dávkování ČK vhodnou volbou.

## 2.1 Šnekové dávkovací systémy

Šnekové dávkovače jsou jedním z nejběžnějších mechanických systémů pro dávkování ČK, jelikož umožňují plynulé a efektivní dávkování i při změnách konzistence materiálu. Tento systém je obzvláště vhodný pro kontinuální dávkování kalu do sušárny nebo dalších částí čistírenského procesu, protože šnek dokáže materiál rovnoměrně distribuovat. Další výhodou je, že šnekový systém umožňuje nastavení dávkování podle potřeby, což je výhodné při změnách v množství nebo kvalitě kalu. Změna se dá zajistit změnou otáček šneku, případně výměnou průtláčné matrice. [35]

Hlavním pracovním prvkem těchto zařízení je rotační šnek umístěný v uzavřeném korpusu nebo otevřeném žlabu viz. Obr. 12. Otáčením šneku dochází k plynulému posunu materiálu, přičemž dávkovací přesnost lze regulovat změnou otáček nebo úpravou průměru a stoupání. Tento princip zajišťuje rovnoměrné podávání materiálu bez jeho nadměrného shlukování nebo segregace. Výhodou šnekových dávkovacích systémů je jejich jednoduchá konstrukce, vysoká spolehlivost a nízké nároky na údržbu. Zároveň umožňují přesné řízení dávkování, což je zásadní pro optimalizaci výrobních procesů a minimalizaci materiálových ztrát. Nicméně u některých typů materiálů, zejména těch s lepidly nebo abrazivními vlastnostmi, je nutné zajistit správné konstrukční provedení šneku, aby nedocházelo k jeho nadměrnému opotřebení nebo ucpávání. [35]



Obr. 12: Dvoušnekový dávkovač. [36]

### 2.1.1 Rozlišení podle typu šneku

Plný šnek (Standardní šnek) je nejčastěji používaný typ vhodný pro většinu partikulárních látek. Má spojitou šroubovitou lopatku navinutou na centrální hřídeli. Poskytuje vysokou účinnost a rovnoměrný transport materiálu. [35]

Šnek s jádrem a proměnným stoupáním slouží k řízenému dávkování a regulaci toku materiálu. U vstupu má menší stoupání šroubovice, které se směrem k výstupu zvětšuje. Pomáhá zlepšit rovnoměrné plnění a zabraňuje ucpávání. [35]

Bezhlídelový šnek nemá centrální hřídel, což umožňuje transport lepivých, vlhkých nebo vláknitých materiálů. Používá se například pro kal v čistírnách odpadních vod nebo organické odpady. Díky absenci hřídele se minimalizuje zanášení a ucpávání materiálu. Můžeme vidět na Obr. 13. [37]

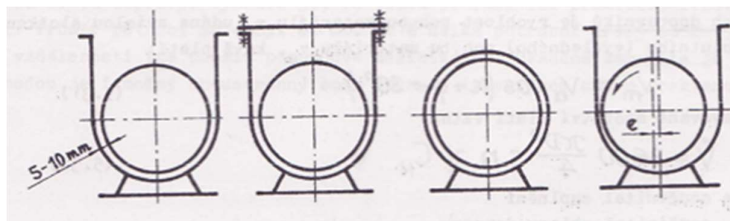


Obr. 13: Dávkoč s jedním šnekem. [36]

Dvojitý šnek je používán tam, kde je třeba zvýšit výkon nebo zpracovávat velmi jemné materiály. Dvě spirály mohou rotovat stejným nebo opačným směrem pro efektivnější transport. [35]

### 2.1.2 Rozlišení podle typu žlabu

Žlaby mohou být krytované nebo otevřené, přičemž jejich použití záleží na charakteru materiálu a nutnosti čištění zařízení. Uzavřený žlab může snižovat prašnost nebo únik materiálu. Jedná se o hygieničtější řešení. Typické tvary žlabu jsou buď ve tvaru písmene U nebo písmene V. Šnekovnice může být umístěná v ose půlkruhové základny nebo excentricky tak, že mezera mezi šnekem a žlabem se ve směru frekvence otáčení rozšiřuje. Tímto uložením se zamezí případnému vzepření materiálu. Možné uložení viz. Obr. 14. [34]



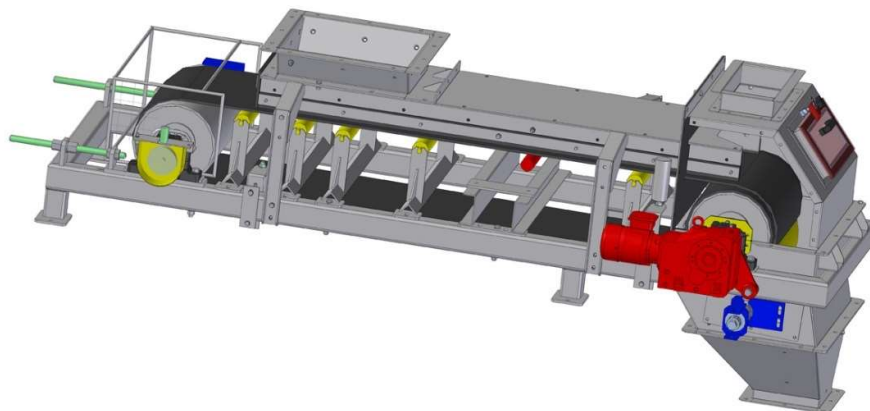
Obr. 14: Možnosti uložení šneku ve žlabu. [34]

Šnekový dávkovač je pro dávkování čistírenského kalu vhodným řešením díky své spolehlivosti a schopnosti zpracovávat materiály s vyšší vlhkostí a viskozitou. Bezosé šneky jsou obzvláště efektivní, protože eliminují riziko ucpávání a umožňují plynulý tok i u lepivých nebo vláknitých kalů. Uzavřená konstrukce minimalizuje úniky a zápach, což je výhodné pro hygienický provoz. Nevýhodou může být vyšší opotřebení šneku při manipulaci s abrazivním kalem a potřeba pravidelné údržby.

## 2.2 Pásové dávkovací systémy

Pásové dávkovací systémy slouží k plynulému a řízenému podávání sypkých nebo pastovitých materiálů včetně čistírenského kalu. Využívají nekonečný pohyblivý pás, který transportuje materiál mezi jednotlivými částmi technologického procesu.

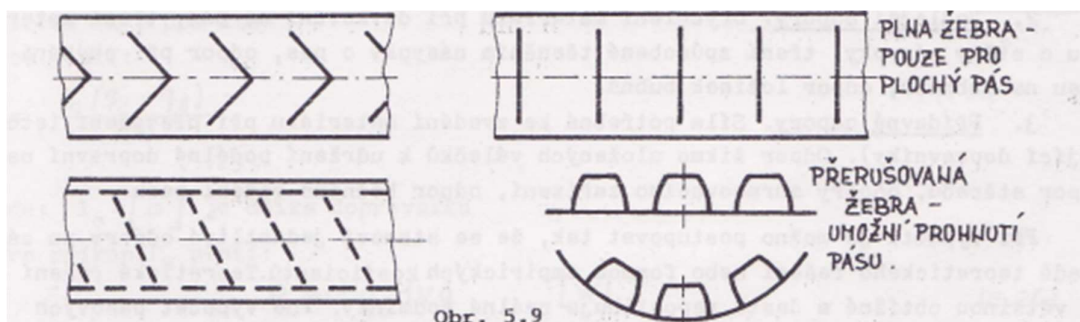
Pásový dávkovač (viz. Obr. 15) se skládá z několika klíčových částí, které zajišťují jeho efektivní a spolehlivý provoz. Základní součástí je dopravní pás, který tvoří hlavní transportní plochu pro dávkovaný materiál. Tento pás je obvykle vyroben z odolných materiálů, jako je pryž nebo PVC, Díky čemuž je schopen dopravovat různé druhy materiálů včetně abrazivních nebo vlhkých látek. Další důležitou částí je pohon, který zahrnuje elektromotor a převodovku. Tyto komponenty pohánějí hnací buben, jenž zajišťuje pohyb pásu požadovanou rychlostí. Pro správné vedení pásu slouží rám a podpěry, které stabilizují celou konstrukci a udržují pás v požadované poloze. Materiál se na pás dostává přes zásobník (násypku), který může regulovat množství dávkovaného materiálu. Pro zajištění přesného dávkování mohou být součástí systému také váhové nebo průtokové senzory, které měří množství přepravovaného materiálu a umožňují automatickou regulaci dávkovacího procesu. Aby pás správně fungoval, je vybaven napínacím mechanismem, který udržuje optimální napětí a zabraňuje jeho prokluzování nebo nerovnoměrnému pohybu. [34]



Obr. 15: Pásový dávkovač. [38]

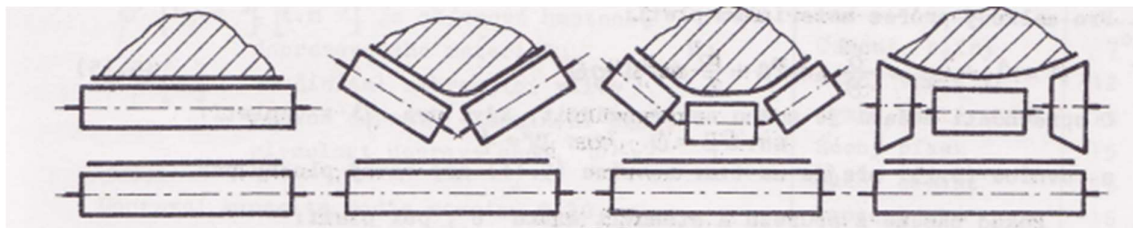
Pásový dávkovače lze rozlišovat podle vzorování pásu (viz. Obr. 15), které výrazně ovlivňuje jejich schopnost přepravovat materiál. Vzorování pásu hraje klíčovou roli v přilnavosti materiálu, jeho stabilitě během dávkovacího procesu a minimalizaci ztrát.

Nejjednodušším typem je hladký pás, který nemá žádné vzorování ani profilování. Tento typ se používá pro přepravu lehkých a sypkých partikulárních látek, přičemž je vhodný zejména pro suché látky, které nemají tendenci sklouzávat. Další možností je využití pásu s podélným vzorem, jenž obsahuje podélné rýhování nebo drážky, které zvyšují stabilitu materiálu a zabraňují jeho posouvání. Pokud je nutné materiál dávkovat přes distributor na konci pásu a je potřeba pro tento účel vytvořit alespoň malý tlak, pak se používá pás s příčným vzorem také nazývaný žebrovaný pás. Tento pás obsahuje vystouplé příčné profily (žebra), které brání skluzu materiálu. Různé typy vzorování mohou být použity pro konkrétní aplikaci například v kombinaci s vhodně zvoleným koncovým distributorem. [34]



Obr. 16: Profilování pásu. [34]

Tvar uložení pásu je zapotřebí rozlišovat zejména v případě, že má materiál tendenci se na páse rozprostřít. Pokud k tomuto dochází, tak může dojít k nežádoucímu přepadávání materiálu přes okraj. Pro aplikaci na čistírenský kal je tedy lepší použití pásu tvaru V nebo U. Tvary uložení pásu jsou zobrazeny na Obr. 17. [34]



Obr. 17. Tvar pásu. [34]

Pásový dávkovač je vhodnou volbou pro dopravu čistírenského kalu. Tento systém umožňuje plynulé a řízené podávání materiálu, přičemž díky různým typům pásů lze přizpůsobit jeho vlastnosti specifickým požadavkům na manipulaci s kalem. Pro pastovité a vlhké materiály, jako jsou ČK, jsou vhodné pásy s příčným vzorováním, které zajišťují stabilitu materiálu a zabraňují jeho sklouzávání. Systém může být doplněn o váhové nebo průtokové senzory, což umožňuje přesné řízení dávkování. Hlavní výhodou pásového dávkovače je jeho schopnost podávat větší objemy materiálu kontinuálně a bez přerušení. Potenciální nevýhodou může být větší prostorová náročnost a nutnost pravidelné údržby pásu. Tento způsob ale neumožňuje dobré použití matrice pro tvarování materiálu vycházejícího ze zařízení, a to může být problémem, pokud je zapotřebí, aby materiál měl určitý tvar a velikost. [34]

## 2.3 Vibrační dávkovací systém

Vibrační dávkovače nejsou ideální volbou pro dávkování ČK, zejména kvůli jeho pastovité konzistenci. Tyto dávkovače fungují na principu vibrací, které usnadňují pohyb sypkých materiálů, ale u lepivých a soudržných látek, jako je čistírenský kal, může dojít k ulpívání na povrchu vibračního žlabu čímž se narušuje plynulost dávkování.

Dalším problémem je omezená kontrola toku materiálu, protože kal často tvoří hrudky a má tendenci se shlukovat, což může vést k nerovnoměrnému dávkování. Navíc vysoká vlhkost kalu může způsobit ucpávání vibračního systému, což vede k časté nutnosti čištění a údržby. Vibrační dávkovač je zobrazený na Obr. 18.



Obr. 18: Vibrační dávkovač. [39]

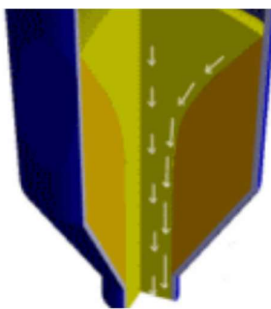
## 2.4 Násypka dávkovacího systému

Násypka je v zásadě zásobník nebo přechodový prvek, který slouží k rovnoměrnému a kontrolovanému dávkování partikulárních látek do dávkovačů. Násypka je klíčovou součástí mechanických i pneumatických dopravních systémů, protože pomáhá optimalizovat tok materiálu a zabraňuje jeho ucpávání či nerovnoměrnému dávkování. Může nastat například nežádoucí jádrový tok, který spočívá v průchodu materiálu násypkou, kdy je nejprve vyprazdňován materiál ze střední části násypky směrem k té vnější[40] Násypky se rozlišují zejména podle tvaru nebo pomocných zařízení podporujících tok materiálu. [40]

### 2.4.1 Tvar a velikost násypky

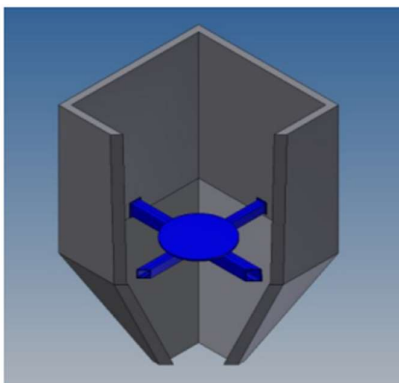
Správně zvolený tvar násypky zajišťuje, aby při průchodu materiálu skrze ni nedocházelo k nežádoucím jevům. U násypky tvaru jehlanu může nastat například pěchování, klenbování, usazování v zákoutích atp. Těmto jevům lze přecházet pomocí vhodného konstrukčního řešení. Dalším aspektem je velikost, ta se musí vztahovat k celkové konstrukci samotného dávkovacího zařízení a také k potřebnému množstevnímu toku materiálu. [40]

**Násypka s kuželovým dnem** se vyznačuje jednoduchou výrobou a nízkými náklady. Klíčovým aspektem při jejím návrhu je správné určení sklonu kužele, který vychází ze sypného úhlu, a vhodná volba povrchové úpravy. Pokud tyto faktory nejsou pečlivě řešeny, může docházet k usazování materiálu podél stěn, což vede ke vzniku jádrového toku. Tento typ násypky je náchylný k několika problémům včetně tvorby klenb, nepravidelného dávkování materiálu a jeho nerovnoměrného rozvrstvení podél stěn, což dále přispívá k nežádoucím efektům při jeho pohybu. [40]



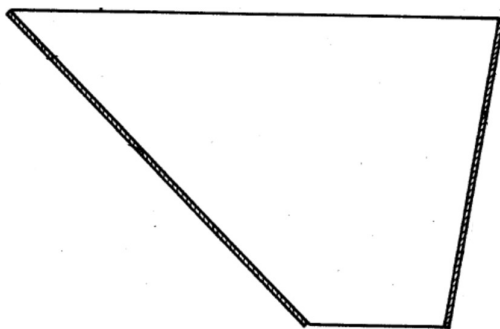
Obr. 19: Násypka s kuželovým dnem. [40]

**Násypka se dnem tvaru jehlanu** (viz. Obr. 20) se svými vlastnostmi podobá variantě s kuželovým dnem a čelí obdobným problémům. z hlediska usazování materiálu je však méně výhodná, protože v oblasti hran může docházet k hromadění materiálu snadněji než na plynulém povrchu kužele. Mezi hlavní přednosti tohoto řešení patří větší vnitřní objem při zachování stejné zástavbové plochy a jednodušší, a tím i ekonomičtější výroba. [40]



Obr. 20: Násypka se dnem tvaru jehlanu. [40]

**Nesymetrická násypka** díky své specifické geometrii výrazně snižuje pravděpodobnost vzniku modifikovaného jádrového toku. Usazování materiálu se může objevit převážně na jedné straně, konkrétně na té s menším sklonem, kde má materiál větší tendenci ulpívat. Nevýhodou tohoto řešení jsou vyšší výrobní náklady a také větší požadavky na zástavbový prostor. Tato varianta je na Obr. 21. [40]



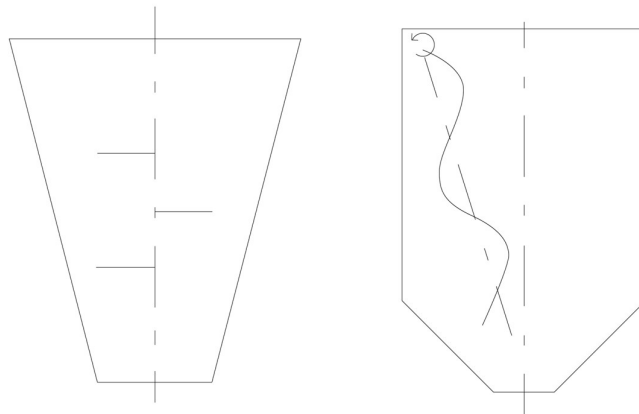
Obr. 21: Nesymetrická násypka. [40]

## 2.4.2 Vestavby do násypky

Vestavby jsou konstrukční prvky, které pomáhají rychlé a bezproblémové průchodnosti materiálu skrze násypku. Používají se v problematických aplikacích, kdy dochází k ucpávání na vstupu do zařízení. Existují dvě formy těchto vestaveb. Konkrétně se jedná o pasivní a aktivní. Vzhledem ke konkrétní aplikaci má smysl se zabývat jen těmi aktivními viz. Obr. 22.

Na rozdíl od pasivních vestaveb obsahují aktivní vestavby pohyblivý prvek, například šnek. Obvykle se umísťují přímo do místa toku materiálu, kde zvyšují jeho kinetickou energii a usnadňují jeho pohyb. Tato dodatečná energie napomáhá průchodu materiálu. Existuje několik typů aktivních vestaveb, mezi které patří mechanické, pneumatické a vibrační systémy. [41]

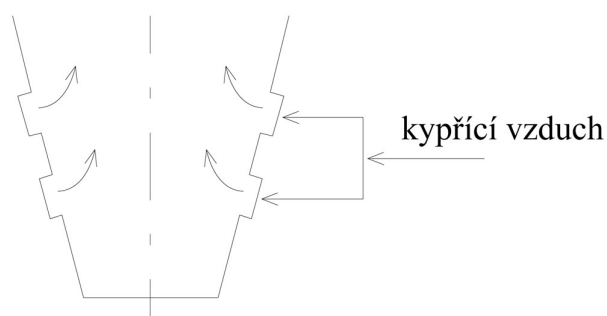
První možností je mechanická vestavba. Základem je vložení mechanického prvku do násypky. Používají se především rotační prvky jako jsou šneky, lopatková kola nebo kotouče. Tyto vestavby zároveň napomáhají provzdušnění a nakypření materiálu. Tato skutečnost může být využita při dávkování ČK. Při jejich použití je důležité zajistit, aby násypka nebyla zcela zaplněná, jinak by nemohla vestavba správně plnit svou funkci. Přibývá zde nutnost vyřešit přívod mechanické energie k pohyblivým prvkům, nejčastěji tuto funkci zajišťuje elektromotor, či využití energie z jiného pohyblivého prvku zařízení. Výhodou je především stabilní průchod materiálu a také jeho zvýšená kinetická energie, která zajišťuje i lepší pohyb materiálu v následujících částech přístroje. Její nevýhody jsou zejména vysoké pořizovací náklady a zvětšení celkové velikosti zařízení. [41]



Obr. 22: Příklad aktivní vestavby. [41]

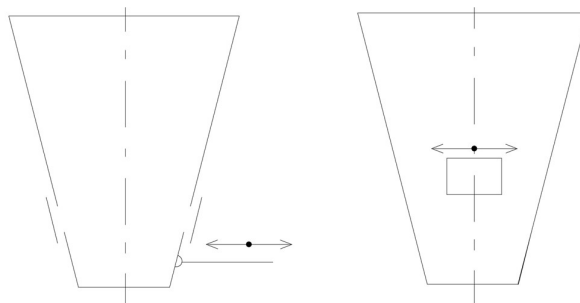
Další možností je použití pneumatické vestavby (viz Obr. 23) spočívá v přivádění tlakového vzduchu do násypky přes otvory k tomu navržené. Dochází zde k takzvané fluidizaci materiálu, což znamená, že se materiál svými vlastnostmi přibližuje kapalině. Díky tomuto jevu je hmota prokypřena a zároveň lépe teče ve směru dalšího zpracování. Množství a tlak vzduchu musí být navržen tak, aby nedocházelo k zastavení samotného toku, nebo dokonce úletu materiálu. Takováto úprava není finančně ani časově náročná. Často je možné využít tlakový vzduch,

který bývá v technologických provozech běžně zaveden pro jiné účely. Nevýhodou je snížení kinetické energie materiálu vlivem směru proudění vzduchu proti požadovanému směru průchodu materiálu a spotřeba energie na tvorbu stlačeného vzduchu. [41]



Obr. 23: Pneumatická vestavba. [41]

Poslední možností je vibrační vestavba (viz Obr. 24), kde tok materiálu je urychlován pomocí vibrací, které jsou do materiálu přenášeny. Přenos vibrací do materiálu lze u těchto vestaveb zajistit dvěma způsoby. První jednodušší varianta spočívá v umístění vibračního tělesa přímo do násypky. Toto přináší nevýhodu ve formě přidání dalšího tělesa do prostoru násypky, ale celkové zařízení nepodléhá tak značnému množství vibrací. Druhá, konstrukčně náročnější a finančně nákladnější možnost, zahrnuje použití celé vibrační násypky. Jak už bylo výše zmíněno, je zde problematické vibrace odizolovat od zbytku stroje. Při těchto řešeních je nezbytné zajistit účinné odhlučnění stroje a izolaci vibrací. Zároveň dochází k výraznému namáhání konstrukce násypky, která proto musí být dostatečně pevná a odolná. Celkově se jedná o technologicky složité a výrobně nákladné řešení. Další nevýhodou může být konsolidace materiálu vlivem vibrací. U tohoto řešení je proto nutné udržovat správné, předem stanovené množství náplně v násypce. [41]



Obr. 24: Vibrační vestavba. [41]

## 2.5 Řešení dávkovacího systému v průmyslu, shrnutí teoretické části

Pro zjištění aktuálně využívaných technologií v České republice autor obeslal několik čistíček odpadních vod (ČOV). Informace poskytly ČOV Karlovy Vary, VaK Přerov a ČOV Opava.

Karlovy Vary a Přerov poskytly popis jejich aktuálně využívaného řešení. Dle získaných informací v ČOV Opava k sušení ČK nedochází. [33]

ČOV Přerov používá systém šneků a šnekových čerpadel na jejichž konci je kal protlačován skrze matici. [33]

ČOV Karlovy Vary využívá oběžné lopatkové kolo, které ve vhodně tvarovaném žlabu protlačuje kal skrze matici a dělá z něj malé “ špagety “. [33]

Zařízení využívané na Ústavu procesního inženýrství FSI VUT v Brně pracuje s jednou hřídelí, na které jsou z krajů navinuté protiběžné šneky a v prostřední části jsou čtyři lopatky protlačující kal skrze síto. Celý tento mechanismus je doplněn vhodně tvarovanou násypkou.

Z teoretické části vyplývá, že pro dávkování ČK jsou vhodné zejména šnekové dávkovače, a to z důvodu přesného dávkování, které umožňuje využití matrice, která může dávat materiálu požadovaný tvar. Dále by pro kal mohlo být přínosné využití nějakého typu aktivní vestavby, ta totiž zajišťuje prokypření materiálu a jeho lepší průchodnost přes násypku. Dále mohou být použity například systémy využívající lopatky k unášení a protlačování kalu skrze síto požadované frakce.

# PRAKTICKÁ ČÁST

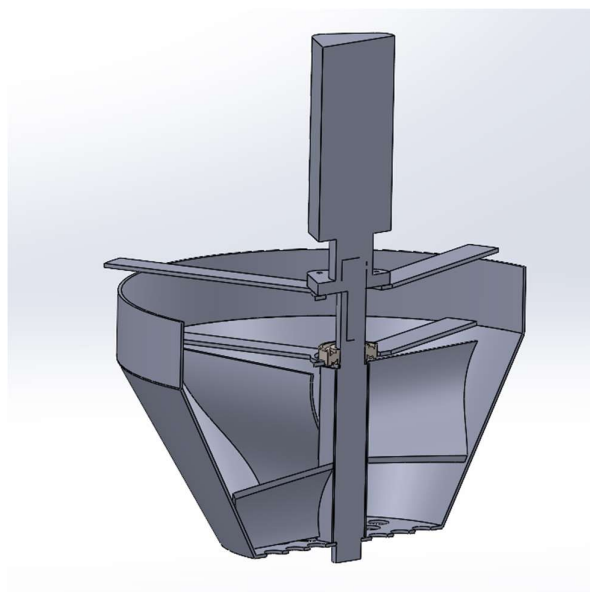
### 3 Konstrukční návrh dávkovacího zařízení

Návrh zařízení vzešel z poznatků z teoretické části této práce a z konzultací autora a vedoucího práce. Konstrukce a výrobní a montážní podklady byly následně zhotoveny autorem práce. Vše bylo nejprve zpracováno ve virtuální formě v programu SOLIDWORKS 2022 a následně postupně přenášeno do reálné podoby.

V rámci zadání byly vymezeny zejména kapacita zařízení (30 kg/hod) a také možnosti technologie výroby. Nejprve autor práce slovně navrhnul několik řešení. Vybrána nakonec byla dvě technická řešení pro dávkování ČK. Rozhodující přitom byla robustní konstrukce, výrobní jednoduchost a předpokládaná spolehlivost zařízení. Tato dvě řešení byla následně zpracována do prvotního návrhu ve 3D programu. Jedno vybrané řešení bylo následně vyrobeno, testováno a modifikováno.

#### 3.1 Lopatkový dávkovač – 1. návrh

Prvním návrhem dávkovacího zařízení pro čistírenský kal je lopatkový dávkovač. Jedná se o zařízení skládající se z několika částí. Jejich pořadí v rámci tohoto popisu odpovídá pořadí, ve kterém jimi kal prochází. Celým základem konstrukce je násypka ve tvaru válce, která ve spodní části přechází do tvaru jehlanu. Dále je v ose tohoto zásobníku zabudovaná hřídel osazená několika lopatkami, jejichž úkol je tlačit ČK směrem k ústí dávkovacího zařízení. Poslední částí, kterou kal prochází, je element zajišťující rozpad ČK na menší částičky. Materiál je přiváděn přes horní část okolo motoru. 3D model zařízení na Obr. 25.



Obr. 25: Lopatkový dávkovač v řezu

Tvar dávkovacího zařízení byl zvolen s ohledem na vhodnost pro zabudování vnitřního elementu vykonávajícího rotační pohyb. Kuželová část je zde pro zvýšení tlaku na dávkovaný materiál. Množství materiálu, které je hnáno přes širší část dávkovače, je následně stlačováno do užšího úseku. Díky čemuž je dosaženo již zmíněného zvýšení přítlaku. Vhodné tvarování mají také lopatky. Ty opět zajišťují zvýšení tlaku na materiál. ČK má tendenci být vtahován do těchto zakřivených lopatek. Energie je do lopatek přenášena pomocí hřídele, kterou pohání elektromotor přes převodovou skříň. Pomocí změny otáček elektromotoru je možné měnit rychlost dávkování. Tvar materiálu odcházejícího ze zařízení může být měněn dle potřeby pomocí výměnné matrice.

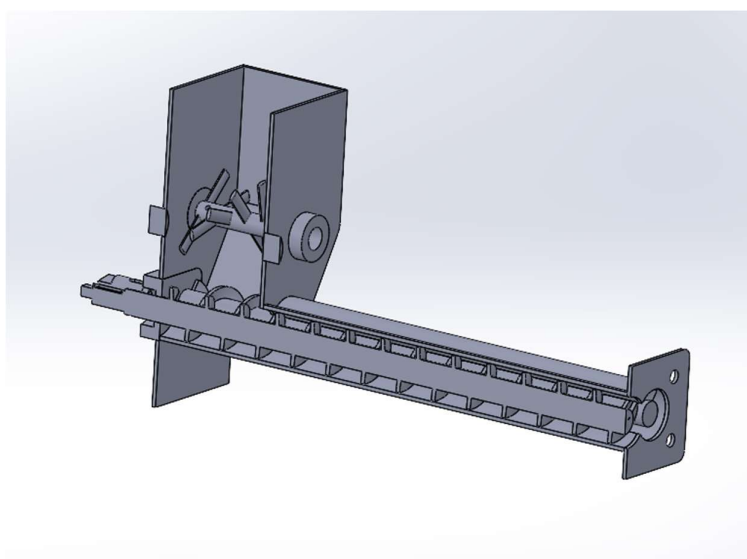
Předpokládané výhody:

- Snadné spojení s motorem, není potřeba další převodové ústrojí.
- Snadná úprava objemu dávkovaného materiálu, změnou otáček motoru.
- Málo použitých součástí – levné řešení.
- Snadné čištění a údržba.

Předpokládané nevýhody:

- Složitá výroba lopatek.
- Dávkovací komora není uzavřená, může hrozit úlet materiálu do okolí.
- Je potřeba zachytit velké axiální síly, které vznikají vtahováním materiálu pod lopatky. Při snaze zařízení protlačit kal matricí se bude vytvářet síla, která bude působit do hřídele směrem k motoru

### 3.2 Šnekový dávkovač – 2. návrh



Obr. 26: Šnekový dávkovač – druhý návrh v řezu.

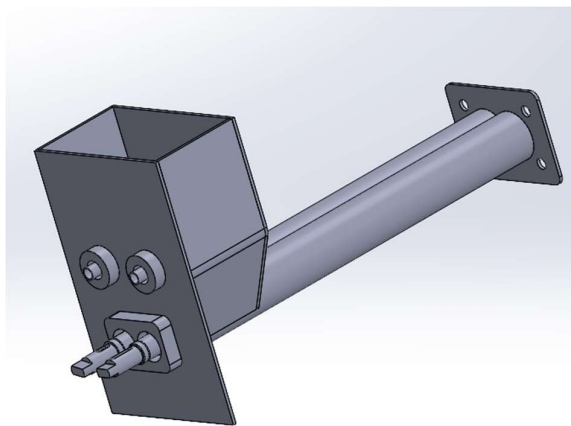
Druhým návrhem dávkovacího zařízení pro čistírenský kal je šnekový dávkovač. Jedná se o zařízení skládající se z několika základních částí, které budou opět zmíněny podle pořadí, ve kterém jimi kal prochází. Řez modelem zařízení ve 3D je na Obr. 26. První prvek je násypka dávkovače, do které je kal nepřetržitě doplňován v potřebné množství. Materiál prostupuje do zúžené části, kde propadá nad aktivní vestavbu, kterou tvoří dva kypřící nože. Ty jsou do procesu zařazeny z důvodu rozmělnění, a tudíž zlepšení průchodnosti látky skrze tuto část stroje. Dále tyto nože zabraňují klenbování a v neposlední řadě kypří ČK. Následuje propad ke šnekovému podavači, jakožto nejdůležitější části této technologie. Nacházejí se zde dva protichůdné šneky, které zajišťují, aby byl materiál vtahován mezi ně a následně do šnekového koryta. Dále je materiál protlačován do prostoru extruderu. Zde je pomocí tvarových nástavců, respektive i různých typů extrudérů distribuován v požadovaném tvaru a objemu dále do technologie sušení. Pohyb celého ústrojí je realizován pomocí elektromotoru a převodového ústrojí tvořeného ozubenými koly a řemenovými převody. Celé zařízení je na Obr. 27.

Předpokládané výhody:

- Dávkovací komora je uzavřená, tudíž by nemělo docházet ke znečištění okolí.
- Možnost změny tvaru distribuovaných částic použitím různých tvarů extruderu.
- Snadná úprava objemu dávkovaného materiálu, pomocí změny otáček motoru.

Předpokládané nevýhody:

- Složitá výroba šneků a kypřících nožů.
- Složitější sestavení celého zařízení.
- Je zapotřebí zhotovit převodové ústrojí, pomocí kterého bude realizován pohyb všech rotačních součástí.
- Složitější údržba při poruše.
- Složitější čištění.



Obr. 27: Šnekový dávkovač – druhý návrh.

### 3.3 Výběr návrhu pro realizaci

Výběr konkrétního způsobu dávkování proběhl rozvahou mezi autorem a vedoucím práce. Hodnoticí hledisko byla zejména předpokládaná funkčnost zařízení po jeho vyrobení a sestavení. Dále bylo rozhodující, zda je technologicky možné ve školních podmínkách potřebné součásti vyrobit, případně jestli se dají koupit. Byl zohledněn také přínos daného zařízení pro případný rozvoj daného řešení a možnosti modularity (snadnost úprav a vylepšení).

Vyhodnocení optimálního návrhu pro realizaci bylo provedeno pomocí Tabulka 1. Každé kritérium bylo hodnoceno na škále od nejlepšího (1) po nejhorší (5). Dále byly jednotlivá kritéria ohodnocena jejich váhou. Například dostupnost materiálu (složitost nákupu materiálu či jednotlivých komponent) není kritérium, které by hrálo tak velkou roli, jako hodnota experimentu. Následně byla vypočítána celková průměrná známka, na jejímž základě bylo vybráno zařízení do výroby a testování.

Tabulka 1: Volba dávkovacího zařízení

Kritérium	Váha kritéria	Lopatkový dávkovač	Šnekový dávkovač
Dostupnost materiálu	0,5	1	2
Náročnost výroby	0,8	3	4
Montáž a údržba	0,5	2	4
Očekávaná životnost	0,5	4	2
Bezpečnost při používání	0,5	4	3
Modularita	0,8	3	2
Hodnota experimentu	1	4	2
Celková známka	4,6	3,11	2,67

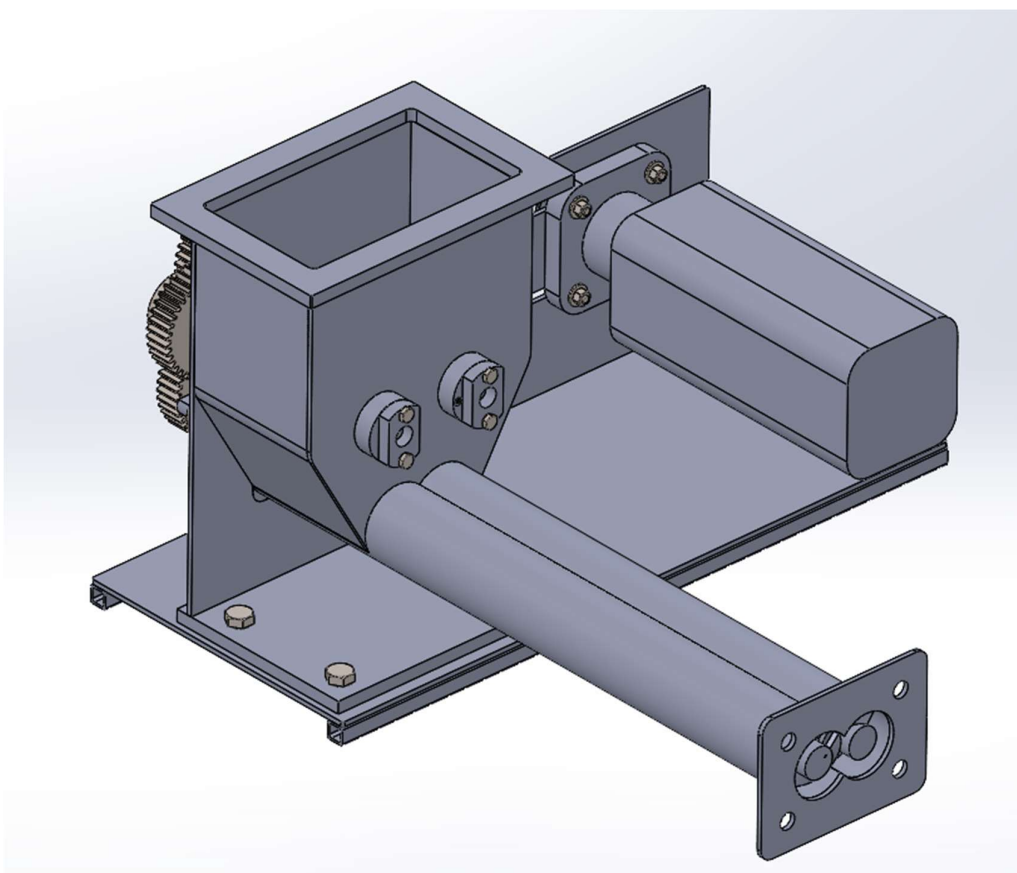
Je zřejmé, že dávkovací zařízení s technologií šneků a nožů dopadlo o něco lépe než lopatkový dávkovač. z toho vyplývá, že následující část práce bude zaměřována na 3D návrh a sestavení výkresové dokumentace pro výrobu a následné testování tohoto dávkovače.

### 3.4 Detailní návrh a výroba šnekového dávkovače

Kapitola popisuje konstrukci a přípravu výrobních podkladů dávkovače. Zařízení bylo navrženo tak, aby splňovalo požadovanou kapacitu 30 kg ČK za hodinu. Jako materiál pro výrobu skeletu dávkovacího zařízení byla zvolena nerezová ocel kvůli přítomnosti korozního prostředí, vysoké pevnosti a ořezuvzdornosti. Jednotlivé části plechu jsou svařeny do vhodného tvaru podle výkresové dokumentace. Na bocích zařízení v oblasti šneků jsou inspekční otvory sloužící zejména k čištění zařízení při jeho možném zahlcení. Konstrukční řešení první verze šnekového dávkovače vizte Obr. 28.

Dávkovač obsahuje čtyři součásti vykonávající rotační pohyb. Dvě hřídele nožů a dvě šnekové hřídele. Tyto prvky jsou v obou případech párové a je potřeba zajistit stejnou rychlost rotace

součástí v rámci daného páru. V této technologii musí být zamezen vzájemný prokluz šneků a nožů. Pro zajištění správné funkce těchto částí stroje jsou hřídele osazeny ozubenými koly. Rozteče hřídelí jsou navrhnuty tak, aby se k nim dalo snadno dohledat vhodné nakupované ozubené kolo. Vzdálenost os nožů je 40 mm. Hřídele kypřících nožů jsou tedy osazeny ozubenými koly s modulem M2 20 zubů. Druhá dvojice hřídelů disponuje vzdáleností os 76 mm. Zde jsou použity ozubená kola s modulem M2 38 zubů. Modul M2 byl zvolen pro rozmanitost ve volbě průměru ozubeného kola a dostatečné robustnosti ozubení. Všechny rotační prvky jsou uloženy v kluzných ložiscích. Pro tuto aplikaci autor vybral kluzná ložiska vyrobená z bronzu. Byla vybrána standardní normalizovaná ozubená kola a ložiska běžně dostupná na českém trhu. Další důležitou komponentou zajišťující těsnost všech uložení hřídelí byla těsnící šňůra. Ta byla vložena do prostoru mezi hřídel a její zajišťující prvek.

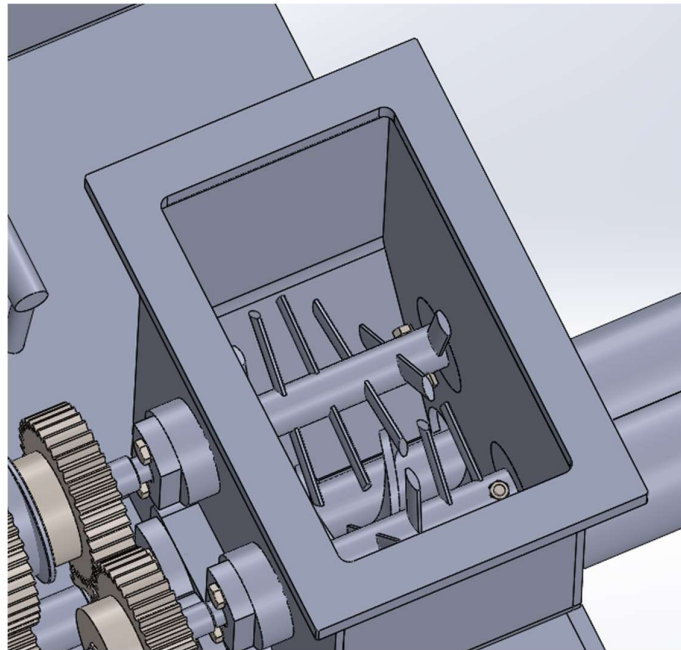


Obr. 28: Šnekový dávkovač 3D model 1. verze

V následujících kapitolách jsou detailně představeny klíčové části dávkovacího zařízení, které byly vyrobeny a v praktické části práce testovány v poloprovozních podmínkách.

### 3.4.1 Kypřicí nože

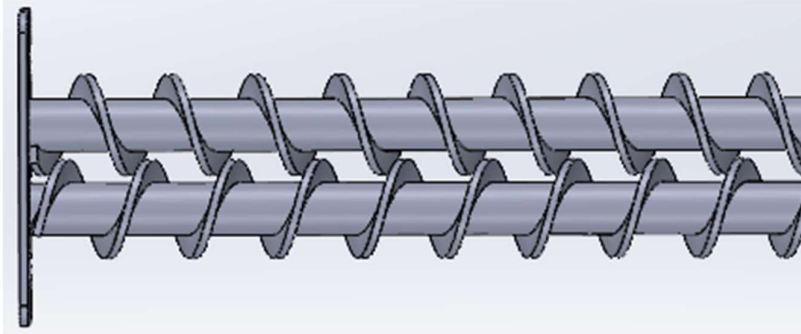
Kypřicí nože (viz Obr. 29) jsou do konstrukce přidány za účelem kypření ČK. Skládají se ze dvou částí. První částí je samotný nůž a druhou částí je hřídel, která prochází dutinou v ose nože. Břity jsou navařeny na hřídelích v konkrétních místech a délkách tak, aby se vzájemně mýjely a pomáhaly si čistit usazený materiál. Toto uspořádání je patrné na Obr. 29. Přenos krouticího momentu je zajištěn pomocí šroubu s maticí. Průmyslové řešení by bylo řešeno čepem, protože neobsahuje vruby. Složení ze dvou částí bylo zvoleno z důvodu jednoduchosti smontování celé sestavy.



Obr. 29: Kypřicí nože šnekového dávkovače

### 3.4.2 Šneky

Šneky jsou vyrobeny ze dvou komponent. Prvním komponentem je šneková spirála, která se následně navařuje na hřídel šneku. Hřídel je předem opracována na požadované rozměry a je do ní vyfrézována drážka pro pero a pojistný kroužek. Šneky mají opačnou orientaci vinutí, což umožňuje jejich uložení tak, aby se jejich vnější průměry překrývaly viz. Obr. 30. Toto uspořádání zajišťuje, že mezi šneky nedochází k hromadění a zhutňování materiálu. Aby se zabránilo prokluzu mezi šneky a jejich vzájemnému kontaktu, je mezi nimi použit převod pomocí ozubených kol. Tento převod synchronizuje jejich otáčení a předchází případnému zaseknutí.



Obr. 30: Šnekové ústrojí šnekového dávkovače

### 3.4.3 Pohon

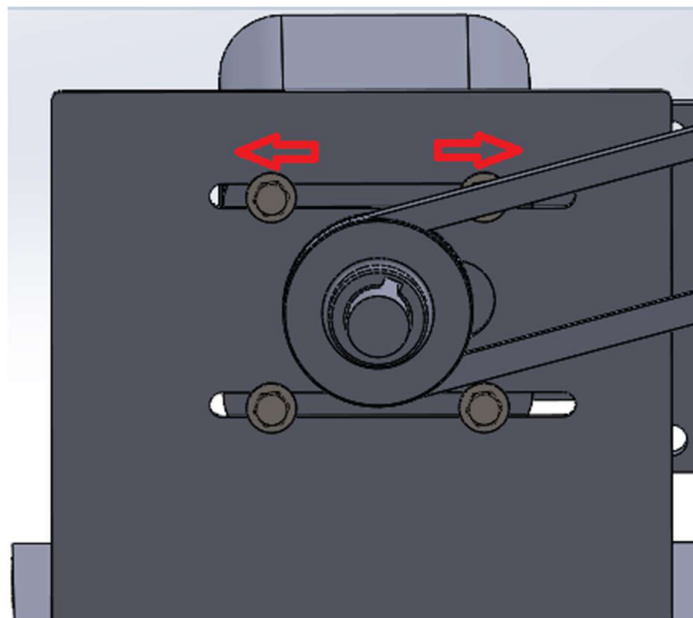
Pro zajištění pohonu celé soustavy je použit motor s převodovkou. Krouticí moment generovaný elektromotorem se přenáší na soustavu pomocí řemenového převodu. Mezi hnací nožovou hřídelí a hřídelí motoru je převodový poměr 1:1.

Řešení je navrženo tak, aby nedocházelo k přetížení motoru – ochranu zajišťuje možnost prokluzu řemene a motorový spouštěč s nastavitelným proudem, při němž dojde k vypnutí motoru.

Pro motor je navržena konstrukce, která umožňuje jeho uchycení k základně a zároveň dovoluje změnu osové vzdálenosti mezi hřídelí motoru a hnanou hřídelí. Toto nastavení je důležité pro správné napnutí řemene a zajištění bezchybné funkce převodu. Regulace osové vzdálenosti je umožněna pomocí podélných drážek vyfrézovaných v konstrukci uchycení, které umožňují horizontální posun motoru vizte Obr. 31.

Umístění motoru a konstrukce jeho uchycení se odvíjí od délky použitého řemene a typu řemenic. Délka řemene je volena s ohledem na co nejmenší zástavbovou velikost a případnou možnost napínání.

Typ řemene i řemenic je doporučen na základě konzultace s technikem firmy MATEZA s. r. o. Použitý klínový řemen je řezaný ZX31. 5/10x822 Lw super TX od výrobce OPTIBELT. Zvolené řemenice jsou typy PT1 SPZ56 a PT2 SPZ56.



Obr. 31: Konstrukce napínání řemene.

Převod krouticího momentu z hnací nožové hřídele na hnací hřídel šneku je zajištěn řemenovým převodem s klínovým řemenem. Použitý převodový poměr je 2:1, což znamená zpomalení otáček hnací hřídele šneku. Tím je zajištěno, že na šnek je neustále přiváděno větší množství kalů, než kolik jich odebírá.

Při výběru nakupovaných součástí se zohledňují parametry jako osová vzdálenost, typ řemenice na hnací hřídeli nožů a skutečnost, že nelze provádět napínání řemene. Vstupními parametry pro výběr komponent jsou osová vzdálenost řemenic a dostupné délky řemenů. Typ řemene a řemenic je doporučen na základě konzultace s technikem firmy MATEZA s. r. o.

Použit je řezaný klínový řemen typu 10ZX 422 Lw (ZX 15) VB od výrobce OPTIBELT. Zvolená řemenice je typu PT1 SPZ100.

Všechny výše uvedené konstrukční prvky zajišťují přenos krouticího momentu. Na všech hřídelích je přenos krouticího momentu na prvky převodového ústrojí realizován pomocí těsných per, zatímco axiální posuv je eliminován pomocí pojistných kroužků.

Konstrukce dále zahrnuje základní desku, která spojuje motor a dávkovač. V praxi se na tuto základnu připevňuje i ochranný kryt zařízení, který slouží k zajištění bezpečnosti obsluhy.

Celé řešení bylo převedeno do výkresové dokumentace a bylo předáno do výroby. Výrobu zařízení zajistila dílna Ústavu procesního inženýrství. Výrobní dokumentace je v přílohách k tomuto dokumentu.

## 4 Experimentální část

Tato kapitola popisuje jednotlivé experimenty a modifikace, které byly udělány na základě nedostatků zjištěných při testování. V jednotlivých podkapitolách jsou popsány průběhy experimentů.

### 4.1 Zkouška 1 – 1. verze šnekového dávkovače

Zkouška proběhla dne 5. 8. 2024. Zkoušku prováděli vedoucí práce a autor práce. Z důvodu nevhodnosti provádění zkoušky s kalem, byla v těchto fázích testování použita navlhčená rašelina. Obsah vody byl určen tak, aby konzistence odpovídala ČK. Ze zkoušky byl pořízen videozáznam a také zpracovaná podrobná zpráva o problémech a poznacích, které se vyskytly. Nedostatky byly následně eliminovány v dalších verzích konstrukčního návrhu.

Vstupní materiál: navlhčená rašelina

Zařízení bylo uvedeno do provozu spuštěním motoru, přičemž jištění motoru bylo nastaveno na nejnižší hodnotu rozsahu, konkrétně na 1,5 A. V první fázi zkoušky byla do zařízení přidána malá dávka materiálu o hmotnosti přibližně 0,3 kg. Zařízení v tomto režimu pracovalo bez obtíží a dávkování probíhalo plynule. Následně byla testována větší dávka materiálu, přibližně 1 kg. Při tomto množství došlo k zahlcení nožů, jak je patrné na Obr. 32. Tento problém se projevil prokluzováním řemene na řemenici motoru, což negativně ovlivnilo výkon zařízení. Jako protiopatření byla upravena osová vzdálenost řemenic, čímž došlo k napnutí řemene. Tato úprava prokluzování odstranila a zařízení bylo schopné bez problémů dávkovat a protlačit maticí menší dávky materiálu. Po této úpravě byla opět přidána větší dávka materiálu (cca 1 kg). I přes předchozí opatření došlo znovu k zahlcení zařízení. Zahlcený materiál byl následně mechanicky odstraněn a zařízení bylo opět zprovozněno. V průběhu dalších zkoušek se v prostoru mezi šneky a noži vytvořila materiálová klenba, která způsobila zastavení dávkování.

Řešení problému zaseknutí:

- 1) Přidat napínák řemene, aby bylo možno vytvořit větší přítlak na řemen spojující motor a nože .
- 2) Vyměnit obyčejný řemenový převod za převod ozubeným řemenem.

Řešení problému klenbování:

- 1) Změna vzájemné polohy nožů tak, aby se potkávali čepeli proti sobě
- 2) Prodloužení nožů, aby dosáhli blíže šnekům (je potřeba udělat konstrukční úpravu)
- 3) Stejná rychlost otáčení šneků i nožů. (rychlejší odebrání materiálu pod noži)

Konstrukční řešení těchto bodů je představeno v následující podkapitole.



Obr. 32: Zahlcení nožů.

#### 4.1.1 Konstrukce dávkovače verze 2

Zkouška 1 odhalila nedostatky, které byly řešeny následujícími kroky. Do této verze byl přidán také extruder (viz. Obr. 33), pro tvarování materiálu vycházejícího ze zařízení.



Obr. 33: Extruder

Jako hlavní úprava je změna rychlosti otáčení mezi šneky a noži. Zvolená rychlost 1:1 je dosažena pomocí výměny řemenice na hnané nožové hřídeli a hnané šnekové hřídeli. Klínové řemenice jsou nahrazeny ozubenými řemenicemi. Díky této úpravě je také zamezeno případnému prokluzu mezi noži a šneky. Typ řemene a řemenic je doporučen na základě konzultace s technikem z firmy MATEZA s. r. o. Použit je ozubený řemen 15 HTD 5M 335 CONTI® SYNCHROBELT. Zvolené řemenice jsou ozubené řemenice HD 32 - 5M 15.

Také je přidán napínák řemene mezi řemenici motoru a řemenici hnacího hřídele nožů. Pro konstrukční řešení byl zvolen SV-75 výrobce PROMA – příruční svěrák, kterému je odstraněna pevná čelist a také lože, které tuto čelist drží. Svěrák je přišroubován přímo na držák motoru

a jeho pohyblivá čelist tlačí na plochu motoru. Řemen je napínán tak, že pohybový šroub na svěráku je dotahován a tlačí motor dále od dávkovacího zařízení.

Tyto dvě úpravy byly zvoleny z důvodu výrobní jednoduchosti a také možnosti nezasahovat do stávající konstrukce zařízení.

K zařízení je zkonstruován a vyroben také extruder. Ten plynule navazuje na dopravní žlaby. Směrem k výstupu materiálu je výstup zužován a na konci zařízení je příruba pro montáž matrice.



Obr. 34: Pohonné ústrojí verze 2.

## 4.2 Zkouška 2 – 2. verze šnekového dávkovače

Zkouška proběhla dne 23. 9. 2024. Zkouška proběhla za stejných podmínek jako zkouška 1.

Vstupní materiál: navlhčená hlína

Zařízení bylo uvedeno do provozu spuštěním motoru, přičemž jištění motoru bylo nastaveno na nejnižší hodnotu rozsahu, konkrétně 1,5 A. Motor běžel stabilně a zařízení fungovalo správně. Následně byla do zařízení přidána malá dávka materiálu o hmotnosti přibližně 0,3 kg. Zařízení i v tomto případě pracovalo bez obtíží a materiál byl plynule zpracován. Při přidání větší dávky materiálu, přibližně 1 kg, došlo k mírnému prokluzu řemenu. Předpokládá se, že příčinou byla přítomnost tvrdého tělesa (pravděpodobně kámen) obsaženého v rašelině. V dalším kroku byl na výstup zařízení připojen extruder. Krátce po jeho uvedení do provozu došlo

k zahlčení zařízení (viz. Obr. 35) a jeho následnému zastavení. K přerušení činnosti došlo v důsledku ucpání extruderu, což vedlo k opětovnému prokluzu řemenu. Extruder byl následně demontován a prověřen obsah materiálu uvnitř. Bylo zjištěno výrazné zhutnění materiálu, které způsobilo jeho ucpání a tím i celkové zahlčení systému. Po odstranění extruderu bylo zařízení opět uvedeno do provozu. Došlo k uvolnění a obnovení pohybu celé soustavy, přičemž zařízení dále fungovalo bez známek poruchy.

Řešení problému zaseknutí:

- 1) Odebrání extruderu se zužujícím se tvarem a nahrazení jen maticí.



Obr. 35: Zahlčený extruder.

Zhodnocení zkoušky.

Oproti předchozí zkoušce byly odstraněny přechozí nedostatky. V této verzi dávkovače nedochází ke klenbování a v případě, že není nasazen extruder, tak si soustava poradí s bezproblémovým chodem při plném naplnění materiálem. Z této skutečnosti lze usuzovat, že provedené úpravy byly účinné.

Úprava zařízení po této zkoušce spočívá tedy jen v odstranění extruderu a nahrazení pouze maticí.

## 4.3 Zkouška 3 – 2. verze šnekového dávkovače

Zkouška proběhla dne 16. 10. 2024. Zkouška proběhla za stejných podmínek jako zkouška 1.

Stav zařízení: Zařízení bylo kompletně sestaveno, na konci extruderu není přítomná matrice.

Vstupní materiál: navlhčená hlína

Zařízení bylo uvedeno do provozu spuštěním motoru, přičemž jištění motoru bylo nastaveno na nejnižší hodnotu rozsahu, konkrétně 1,5 A. Motor pracoval stabilně a zařízení fungovalo bez závad. Do zařízení byla následně přidána malá dávka materiálu o hmotnosti přibližně 0,3 kg. Zpracování probíhalo bez jakýchkoli obtíží a chod zařízení byl plynulý. Ve třetí fázi zkoušky byla do zařízení přidána větší dávka materiálu, přibližně 1 kg, přičemž zařízení dále bez problémů fungovalo. Následně byla k výstupu zařízení připojena matrice a celé zařízení bylo opět uvedeno do chodu. Po spuštění byl chod zařízení správný a došlo k extruzi materiálu skrz matici. Po zhruba jedné minutě provozu však došlo k zahlcení volného prostoru mezi maticí, přírubou a těsnícím lanem. V důsledku toho došlo k mechanickému zaseknutí převodu mezi nožovou a šnekovou hřídelí, konkrétně u ozubeného řemenu. Došlo k přeskokům zubů a následnému prokluzu řemenu v řemenici na motoru, což způsobilo úplné zastavení zařízení. Po demontáži matrice bylo zařízení opět uvedeno do provozu, přičemž následný chod probíhal bez jakýchkoli problémů.

Řešení problému zaseknutí:

- 1) Nahrazení převodu s ozubeným řemenem za ozubená kola.
- 2) Vymezení prostoru, kde došlo ke zchutnění materiálu tak, aby k tomuto jevu dojít nemohlo.

Zhodnocení zkoušky.

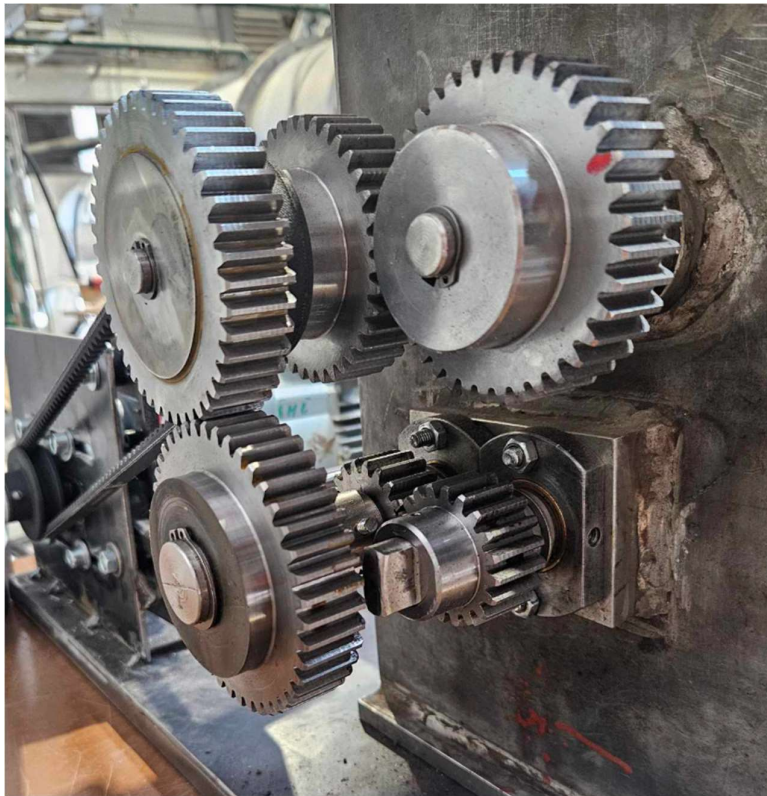
Oproti předchozí zkoušce je zde zřetelné zlepšení. Bohužel výsledek není dle očekávání a následuje další úprava zařízení.

### 4.3.1 Konstrukce dávkovače verze 3

Po zkoušce č. 3, která odhalila nedostatky v oblasti pohonu došlo k obou navrhovaným úpravám. Pro převod jsou použity ozubená kola s modulem M2 43 zubů (viz. Obr. 37). Zvoleno kvůli zachování převodového poměru 1:1. v rámci úpravy byla také změněna polarita motoru, abychom docílili správné orientace točení šneků, protože přidáním ozubeného převodu se mění orientace otáčení. Díky tomuto došlo ke změně orientace točení nožů, což bylo také žádoucí. Do zařízení byl také přidán rámeček k vymezení volného prostoru.



Obr. 36: Extruder s distančním členem.



Obr. 37: Pohonné ústrojí šneků a nožů.

#### 4.4 Zkouška 4 – 3. verze šnekového dávkovače

Zkouška proběhla dne 31. 1. 2025. Zkouška proběhla za stejných podmínek jako zkouška 1.

Vstupní materiál: navlhčená hlína

Zařízení bylo uvedeno do provozu spuštěním motoru. Jištění motoru bylo nastaveno na nejnižší hodnotu rozsahu, tedy 1,5 A. Motor běžel stabilně a zařízení fungovalo správně. V první fázi

zkoušky byla do zařízení přidána malá dávka materiálu o hmotnosti přibližně 0,3 kg. Chod zařízení byl plynulý a bez jakýchkoli obtíží. Následně byla do zařízení přidána větší dávka materiálu, přibližně 1 kg. Ani v tomto případě se nevyskytly žádné provozní problémy a zařízení pokračovalo ve správné činnosti. Po rozběhnutí zařízení došlo k bezproblémové extruzi materiálu skrz matrici, což potvrdilo správnou funkci celého systému. V další fázi byla testovaná hlína opětovně navlhčena s cílem přiblížit její konzistenci co nejvíce charakteru čistírenského kalu. Poté byla do zařízení přidána větší dávka tohoto upraveného materiálu. Zařízení nadále pracovalo bez obtíží a zpracování probíhalo plynule. Závěrem bylo zařízení vypláchnuto vodou, aby byla ověřena těsnost jednotlivých spojů. Tento test umožnil posoudit kvalitu utěsnění konstrukčních částí zařízení.

Zhodnocení zkoušky.

Oproti předchozí zkoušce je zde zřetelné zlepšení. Funkce zařízení je ověřena na vlhčené rašelině, při plné zátěži nedošlo k žádnému zaseknutí a materiál vycházející z matrice má požadovaný tvar a konzistenci. Těsnost zařízení je také dobrá. Tento pokus byl úspěšný a v následujícím testu je zapotřebí použít čistírenský kal.

#### 4.5 Zkouška 5 – 3. verze šnekového dávkovače

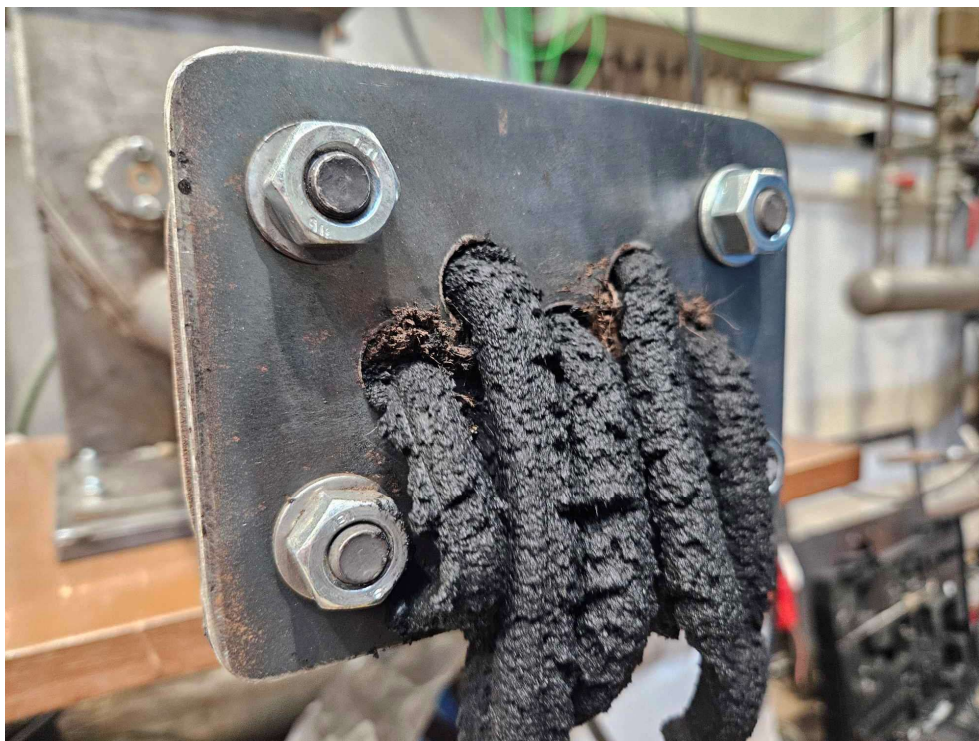
Zkouška proběhla dne 26. 3. 2025. Zkouška proběhla za stejných podmínek jako zkoušky přechází s rozdílem v dávkovaném materiálu.

Vstupní materiál: čistírenský kal

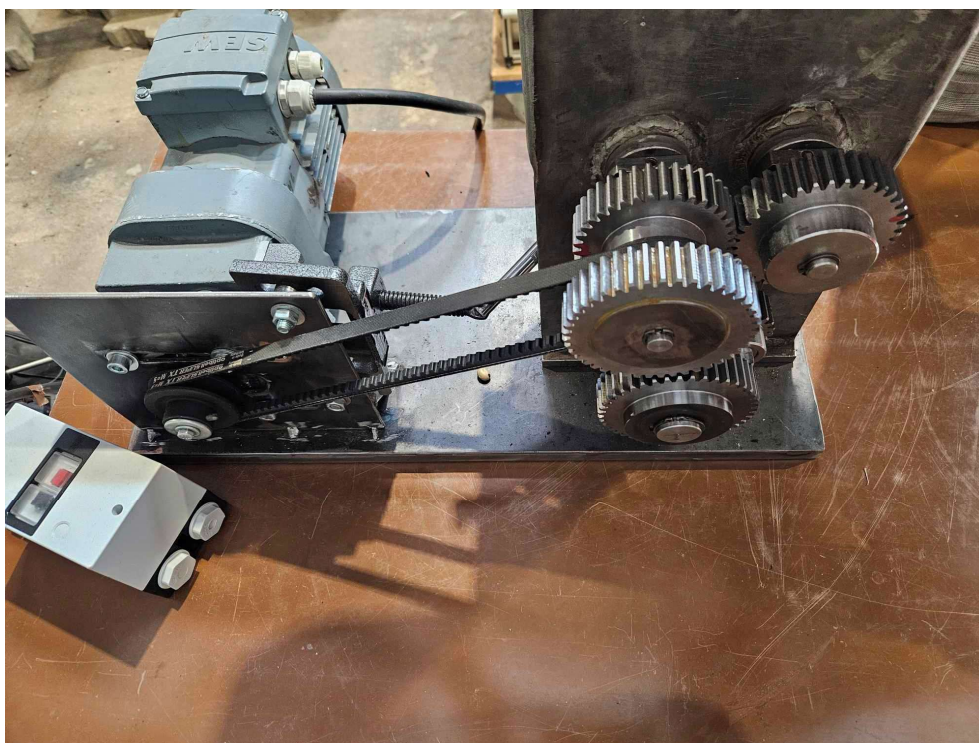
V první fázi zkoušky byla do zařízení přidána malá dávka materiálu o hmotnosti přibližně 0,3 kg. Chod zařízení byl plynulý a bez jakýchkoli obtíží. Následně byla do zařízení přidána větší dávka materiálu, přibližně 1 kg. Ani v tomto případě se nevyskytly žádné provozní problémy a zařízení pokračovalo ve správné činnosti. Po rozběhnutí zařízení došlo k bezproblémové extruzi materiálu skrz matrici, což potvrdilo správnou funkci celého systému. Zařízení pracovalo delší dobu bez jakýchkoli problémů a proces zpracování materiálu probíhal plynule. Na závěr bylo zařízení vyčištěno a následně vypnuto.

Zhodnocení zkoušky.

Zařízení funguje správně, je schopné plynule a dlouhodobě dávkovat čistírenský kal. v násypce je sporadicky vidět náznak klenbování. z toho lze usuzovat, že tvar násypky by mohl být opraven, aby se to nestávalo.



Obr. 38: Zkouška s čistírenským kalem.



Obr. 39: Finální verze převodů.



Obr. 40: Finální verze zařízení.

## 5 Diskuse

Zařízení po provedení všech úprav a po rozsáhlém testování spolehlivě splňuje svou funkci. Zařízení dávkuje/protláčí testovací materiál (čistírenský kal) – skrze extrudér.

Konstrukce byla vyhotovena tak, aby byla co nejjednodušší a nejlevnější na výrobu. Pro testovací účely byl tento rozsah dostatečný. Pro komerční řešení je však zapotřebí udělat několik úprav zejména směrem k větší bezpečnosti obsluhy zařízení.

Nedostatkem je absence mazání všech ozubených kol. Pokud nedochází k mazání, může docházet k zahřívání mechanismu a nadměrnému opotřebení převodů. Pro nepřetržitý provoz by byla potřeba převody zakrytovat a mazat plastickým mazivem, nebo lépe olejem.

Mazání by však mohlo způsobit při nechtěném úniku na řemenici prokluz řemene, a tedy i zástavu celého zařízení. Proto by bylo vhodné zvážit také výměnu řemenového převodu, například za řetězový.

Dále by při průmyslovém využití nemělo chybět celkové krytování zařízení. V první řadě je krytování důležité z hlediska možného zranění obsluhy, ale také kvůli vnášení nečistot do prostoru s převody.

Pokud by se šneky vyráběly, mohlo by být výhodné je zkrátit. To by znamenalo, že by šneky nemusely tlačit materiál tak daleko skrz šnekové žlaby. Tento přístup by mohl vést k nižší spotřebě elektrické energie, nižšímu opotřebení celého ústrojí a také lepší konzistenci kalu (více nakypřené) při opouštění dávkovače.

Zajištění šnekového hřídele v axiálním směru by mělo být vyřešeno lépe než opřením šneku o stěnu dávkovače.

Délka břitů na noži by mohla být větší, díky čemuž by docházelo k lepšímu vzájemnému čištění mezibřítových prostor.

U inspekčních otvorů uvnitř zásobníků by bylo možné vyvarovat se hran kvůli kterým docházelo k zasekávání zařízení. V prostoru mezi břitů nožů a hranou inspekčního otvoru se několikrát vzpříčila nečistota (například malý kámen).

Také by bylo možné optimalizovat tvar násypky, ve které se někdy vytvořila klenba.

## Závěr

Tato diplomová práce se zaměřila na problematiku nakládání s čistírenskými kaly, zejména na jejich dávkování do sušáren z důvodu možnosti jejich následného zpracování. V rámci práce byla provedena rešerše současných přístupů k nakládání s čistírenskými kaly, analýza legislativních požadavků a návrh dávkovacího zařízení.

Navržené dávkovací zařízení bylo podrobena experimentálnímu testování, které potvrdilo jeho funkčnost, ale odhalilo i oblasti vhodné k optimalizaci. Bylo zjištěno, že je potřeba upravit délku břitů na noži pro lepší vzájemné čištění mezer, odstranit hrany v oblasti inspekčních otvorů a zlepšit systém axiálního zajištění šnekové hřídele. Také bylo doporučeno zvážit úpravu převodového mechanismu pro zvýšení spolehlivosti a bezpečnosti provozu.

Výsledky práce přispívají k efektivnějšímu dávkování čistírenských kalů, což má přímý dopad na následné procesy jejich zpracování, především sušení. Optimalizace dávkovacího procesu umožňuje plynulejší přísun materiálu do sušáren, díky čemuž se zlepšuje celková účinnost a snižuje energetická náročnost těchto zařízení. Správné dávkování také pomáhá minimalizovat provozní problémy a zajišťuje stabilní provoz sušících jednotek.

Celkově lze konstatovat, že práce splňuje stanovené cíle a poskytuje praktické návrhy pro zlepšení dávkování čistírenských kalů. Dále přináší řešení, která mohou být aplikována v průmyslovém měřítku. Další výzkum by se mohl zaměřit na dlouhodobé testování navrženého zařízení v reálném provozu a jeho případnou integraci.

## ZDROJE:

- [1] EHN. Online. 2016. Dostupné z: [https://www.ehn.org/opinion\\_a\\_solution\\_to\\_the\\_challenge\\_of\\_land-disposed\\_sewage\\_sludge-2497212989.html](https://www.ehn.org/opinion_a_solution_to_the_challenge_of_land-disposed_sewage_sludge-2497212989.html). [cit. 2025-03-28].
- [2] ZEJDA, Vojtěch. *Návrh vybraných strojně technologických zařízení ČOV se zaměřením na zlepšení hydraulických účinností*. Dizertační práce. Brno: VUT FSI, 2021.
- [3] ASIO. Online. 2020. Dostupné z: <https://www.asio.cz/cz/news/cistení-odpadních-vod-a-rekreacní-objekty.1027>. [cit. 2025-03-28].
- [4] TRÍDĚNÍ ODPADŮ CZ. *KALY Z ČISTIČEK A ODPADNÍ VODY*. Online. 2022. Dostupné z: <https://www.trideniodpadu.cz/kaly-z-cisticek-odpadnich-vod>. [cit. 2024-12-02].
- [5] Vyhláška č. 273/2021 Sb.: Vyhláška o podrobnostech nakládání s odpady. In: <https://www.zakonyprolidi.cz/cs/2021-273>. 2021.
- [6] HAVRÁNEK, Miroslav. *Přehled technologií pro zpracování kalů a recyklaci fosforu*. Online - PDF. 2022.
- [7] TDG. Online. 2023. Dostupné z: <https://en.tdgtic.com/blog/what-is-sludge-drying-and-incineration.html>. [cit. 2025-03-28].
- [8] ŚWIERCZEK, Lesław; CIEŚLIK, Bartłomiej Michał a KONIECZKA, Piotr. The potential of raw sewage sludge in construction industry – A review. Online. *Journal of Cleaner Production*. 2018, roč. 200, č. 1, s. 342-356. ISSN 09596526. Dostupné z: <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2018.07.188>. [cit. 2025-03-28].
- [9] *Mendelova univerzita v Brně*. Online. 2023. Dostupné z: <https://mendelu.cz/vedci-ldf-mendelu-dokazi-vyuzit-cistirensky-kal-pridavaji-ho-do-substratu-pro-pestovani-stromu/>. [cit. 2025-01-23].
- [10] ČESKÝ STATISTICKÝ ÚŘAD. *Statistická ročenka České republiky - 2023*. Online. 2023. Dostupné z: <https://csu.gov.cz/produkty/statisticka-rocenka-ceske-republiky-2023>. [cit. 2024-12-02].

- [11] KYNCL, Miroslav. *Technologie zpracování a využití vodárenských kalů: monografie*. Ostrava: Vysoká škola báňská - Technická univerzita ve spolupráci s vydavatelstvím Montanex, 2007. ISBN 978-80-248-1604-3.
- [12] *Statistisches Bundesamt*. Online. 2024. Dostupné z: <https://www.destatis.de/EN/Themes/Society-Environment/Environment/Water-Management/Tables/liste-disposal-sewage-sludge-land.html#fussnote-7-1394788>. [cit. 2025-01-21].
- [13] POHOŘELÝ, Michael; HUŠEK, Matěj; MOŠKO, Jaroslav a ŠYC, Michal. *Legislativa pro nakládání s čistírenskými kaly ve vybraných státech Evropské unie: Německo, Rakousko, Francie.: 0563582 - ÚCHP 2023 CZ*. Praha. 2022.
- [14] Düngemittelverordnung (DüMV): Vyhláška o hnojivech. In: [https://www.gesetze-im-internet.de/d\\_mv\\_2012/](https://www.gesetze-im-internet.de/d_mv_2012/). 2012.
- [15] Verordnung zur Neuordnung der Klärschlammverwertung (AbfKlärV): BGBl. I S. 3465, ausgegeben zu Bonn. In: [https://www.gesetze-im-internet.de/abfkl\\_rv\\_2017/BJNR346510017.html](https://www.gesetze-im-internet.de/abfkl_rv_2017/BJNR346510017.html). 2017.
- [16] SCHNELL, Matthias; HORST, Thomas a QUICKER, Peter. Thermal treatment of sewage sludge in Germany: A review. Online. *Journal of Environmental Management*. 2020, roč. 263, s. 3-8. ISSN 03014797. Dostupné z: <https://doi.org/10.1016/j.jenvman.2020.110367>. [cit. 2025-01-27].
- [17] SWISSINFO. *Switzerland is a 'wastewater treatment pioneer'*. Online. 2017. Dostupné z: <https://www.swissinfo.ch/eng/climate-change/switzerland-is-a-wastewater-treatment-pioneer/43298188>. [cit. 2024-12-02].
- [18] EPFL. *Turning wastewater sludge into energy and mineral salts*. Online. 2019. Dostupné z: <https://actu.epfl.ch/news/turning-wastewater-sludge-into-energy-and-mineral-/>. [cit. 2024-12-02].
- [19] *Bundesamt für Umwelt BAFU*. Online. 2019. Dostupné z: <https://www.bafu.admin.ch/bafu/de/home/themen/abfall/abfallwegweiser-a-z/biogene-abfaelle/abfallarten/klaerschlamm.html>. [cit. 2025-01-21].
- [20] *L'assainissement collectif est propulsé par la direction de l'eau et de la biodiversité*. Online. 2023. Dostupné z: <https://assainissement.developpement-durable.gouv.fr/pages/data/statsGeneral.php>. [cit. 2025-01-21].

- [21] OWUSU-AGYEMAN, Isaac; PLAZA, Elzbieta; ELGINÖZ, Nilay; ATASOY, Merve; KHATAMI, Kasra et al. Conceptual system for sustainable and next-generation wastewater resource recovery facilities. Online. *Science of The Total Environment*. 2023, roč. 2023, č. 885, s. 1. ISSN 00489697. Dostupné z: <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2023.163758>. [cit. 2025-01-21].
- [22] *Statistics Netherlands*. Online. 2024. Dostupné z: <https://www.cbs.nl/en-gb/figures/detail/7477eng?q=sewage%20sludge>. [cit. 2025-01-21].
- [23] *Danube region strategy*. Online. 2021. Dostupné z: [https://waterquality.danube-region.eu/wp-content/uploads/sites/13/sites/13/2021/05/12-Austria\\_SLUDGE\\_Lukas-Egle-1.pdf](https://waterquality.danube-region.eu/wp-content/uploads/sites/13/sites/13/2021/05/12-Austria_SLUDGE_Lukas-Egle-1.pdf). [cit. 2025-01-23].
- [24] *GOV.UK*. Online. 2024. Dostupné z: <https://www.gov.uk/government/publications/wastewater-treatment-in-england-data-for-2022/wastewater-treatment-in-england-data-for-2022#:~:text=In%202022%2C%20water%20companies%20produced,land%20reclamation%20and%20restoration>. [cit. 2025-01-21].
- [25] KRÓL, KAROL; ISKRA, KRZYSZTOF; FERENS, WIESŁAW a MİDOŃSKI, JAN M. Testing properties of sewage sludge for energy use. Online. *Environment Protection Engineering*. 2019, roč. 45, č. 4. ISSN 0324-8828. Dostupné z: <https://doi.org/10.37190/epe190405>. [cit. 2025-05-09].
- [26] *Technologické postupy pro zpracování odpadních kalů*. Online. Zpracování kalů. 2008. Dostupné z: <http://hgf10.vsb.cz/546/ZpracovaniKalu/postupy.html>. [cit. 2025-05-09].
- [27] *ENOX*. Online. Dostupné z: <https://enox.tech/en/sludge-drying/>. [cit. 2025-03-28].
- [28] Zákon č. 541/2020 Sb.: Zákon o odpadech. In: <https://www.zakonyprolidi.cz/cs/2020-541>. 2020.
- [29] Zákon č. 201/2012 Sb.: Zákon o ochraně ovzduší. In: <https://www.zakonyprolidi.cz/cs/2012-201>. 2012.
- [30] KOTZUROVÁ, Iveta a HOLBA, Marek. *Porovnání technologií odstraňování a recyklace fosforu na komunálních čistírnách v České republice*. Online. *Vodní hospodářství*. 2021. Dostupné z: <https://vodnihospodarstvi.cz/porovnani-technologiei-odstranovani-a-%E2%80%AFrecyklace-fosforu-na-komunalnich-cistirnach-v-ceske-republice/>. [cit. 2025-02-01].

- [31] *Nakládání s čistírenskými kaly: V Evropě, Česku a v zákoně o odpadech*. Online. 2021. Dostupné z: <https://www.prumyslovaekologie.cz/info/nakladani-s-cistirenskymi-kaly-v-evrope-cesku-a-v-zakone-o-odpadech>. [cit. 2025-02-01].
- [32] Spalování čistírenských kalů pro a proti. *PRO-ENERGY magazín*. 2017, roč. 3/2017, č. 1, s. 60-61.
- [33] KUBÍN, Pavel. *Dávkování partikulárních látek v rotačních sušárnách a pecích*. Bakalářská práce. Brno: VUT FSI, 2023.
- [34] MEDEK, Jaroslav. *Mechanické pochody*. 2. doplněné vydání. Učební texty vysokých škol (Vysoké učení technické v Brně). Brno: Ediční středisko VUT, 1991. ISBN 9788021402775.
- [35] MCGLINCHEY, Don. *Bulk Solids Handling*. Online. Wiley, 2008. ISBN 9781405158251. Dostupné z: <https://doi.org/10.1002/9781444305449>. [cit. 2025-02-11].
- [36] *Conveying Solutions*. Online. Dostupné z: <https://www.kwsmfg.com/engineering-guides/screw-conveyor/types-of-screw-feeders/>. [cit. 2025-03-31].
- [37] *Screw Conveyors*. Online. 2016. Dostupné z: <chrome-extension://efaidnbmnnnibpcajpcglclefindmkaj/https://www.kwsmfg.com/wp-content/uploads/Screw-Conveyor-Engineering-Guide.pdf>. [cit. 2025-02-12].
- [38] *Belt Feeder*. Online. Kešner a.s. 2009. Dostupné z: <http://www.kesnercz.com/en/product/belt-feeder-dp/>. [cit. 2025-05-11].
- [39] *VVV MOST*. Online. Dostupné z: <https://vvvmost.cz/vibracni-podavace/>. [cit. 2025-03-31].
- [40] DOSPIVA, Petr. *Inovativní metody řešení poruch toku při vynášení ze zásobníku: autoreferát doktorské disertační práce*. Vědecké spisy Fakulty strojní. Autoreferáty disertačních prací, sv. 193. Ostrava: VŠB - Technická univerzita Ostrava, 2011. ISBN 978-80-248-2623-3.
- [41] PERNA, Marek. *Návrh zásobníku na sypký vápenný hydrát*. Online, Diplomová práce, vedoucí Jiří Malášek. Brno: Vysoké učení technické v Brně. Fakulta strojního inženýrství. Ústav automobilního a dopravního inženýrství, 2009. Dostupné z: <http://hdl.handle.net/11012/9070>. [cit. 2025-02-05].



## SEZNAM ZKRATEK:

<b>Zkratka</b>	<b>Význam</b>
<b>4R</b>	Reduce (snižování), Reuse (opětovné použití), Recycle (recyklace), Recover (energetické využití)
<b>17. BImSchV</b>	17. Bundesimmissionsschutzverordnung – německé nařízení o kontrole emisí při spalování odpadů
<b>AbfKlärV</b>	Abfallklärschlammverordnung – německá vyhláška o čistírenských kalech
<b>AOX</b>	Adsorbovatelné organické halogeny
<b>CAD</b>	Computer-Aided Design (počítačem podporované navrhování)
<b>ČK</b>	Čistírenský kal
<b>ČOV</b>	Čistírna odpadních vod
<b>ČR</b>	Česká republika
<b>ČSN</b>	Česká technická norma
<b>DüMV</b>	Düngemittelverordnung – německá vyhláška o hnojivech
<b>EO</b>	Ekvivalentní obyvatel (metrika pro kapacitu ČOV)
<b>EU</b>	Evropská unie
<b>FME</b>	Fakulta strojního inženýrství (Faculty of Mechanical Engineering – VUT)
<b>PCB</b>	Polychlorované bifenylly
<b>SRN</b>	Spolková republika Německo
<b>VUT</b>	Vysoké učení technické v Brně

## SEZNAM OBRÁZKŮ:

Obr. 1: Čistírenský kal [1].....	13
Obr. 2: Česla a síta. [3].....	13
Obr. 3: Technologie ČOV. [3] .....	15
Obr. 4: Technologie spalování ČK. [7].....	16
Obr. 5: Využití ČK ve stavebnictví. [8] .....	17
Obr. 6: Stacionární fluidní pec. [16] .....	23
Obr. 7: Rotační pec. [16].....	24
Obr. 8: Vícenásobná nístějová pec [16] .....	24
Obr. 9: Rotační bubnová sušárna. [26].....	26
Obr. 10: Solární sušárna. [27] .....	26
Obr. 11: Sorbent pro navázání fosforu [30] .....	28
Obr. 12: Dvoušnekový dávkovač. [36] .....	32
Obr. 13: Dávkovač s jedním šnekem. [36].....	33
Obr. 14: Možnosti uložení šneku ve žlabu. [34] .....	34
Obr. 15: Pásový dávkovač. [38] .....	35
Obr. 16: Profilování pásu. [34].....	35
Obr. 17. Tvar pásu. [34] .....	36
Obr. 18: Vibrační dávkovač. [39].....	37
Obr. 19: Násypka s kuželovým dnem. [40].....	38
Obr. 20: Násypka se dnem tvaru jehlanu. [40].....	38
Obr. 21: Nesymetrická násypka. [40].....	38
Obr. 22: Příklad aktivní vestavby. [41] .....	39
Obr. 23: Pneumatická vestavba. [41] .....	40
Obr. 24: Vibrační vestavba. [41].....	40
Obr. 25: Lopatkový dávkovač v řezu .....	43
Obr. 26: Šnekový dávkovač – druhý návrh v řezu. ....	44
Obr. 27: Šnekový dávkovač – druhý návrh. ....	45
Obr. 28: Šnekový dávkovač 3D model 1. verze.....	47

Obr. 29: Kypřicí nože šnekového dávkovače.....	48
Obr. 30: Šnekové ústrojí šnekového dávkovače .....	49
Obr. 31: Konstrukce napínání řemene.....	50
Obr. 32: Zahlcení nožů.....	52
Obr. 33: Extruder.....	52
Obr. 34: Pohonné ústrojí verze 2.....	53
Obr. 35: Zahlcený extruder. ....	54
Obr. 36: Extruder s distančním členem.....	56
Obr. 37: Pohonné ústrojí šneků a nožů. ....	56
Obr. 38: Zkouška s čistírenským kalem.....	58
Obr. 39: Finální verze převodů.....	58
Obr. 40: Finální verze zařízení.....	59

## SEZNAM PŘÍLOH:

Příloha1	Kusovník
Příloha2	Výkresová dokumentace