

Univerzita Karlova v Praze

Přírodovědecká fakulta

Ústav hydrogeologie, inženýrské geologie a užití geofyziky

Studijní program: Aplikovaná Geologie

Studijní obor: Inženýrská geologie



Bc. Marian Takáč

Studium odvodnění technologických kalů z těžby sklářských písků

Dewatering of Slurry from Glass Sand Mining

Diplomová práce

Vedoucí diplomové práce: doc. RNDr. David Mašín, Ph.D.

Charles University in Prague

Faculty of Science

Institute of hydrogeology, engineering geology and applied geophysics

Study programme: Applied geology

Branch of study: Engineering geology



Bc. Marian Takáč

Dewatering of Slurry from Glass Sand Mining

Studium odvodnění technologických kalů z těžby sklářských písků

Diploma thesis

Supervisor: doc. RNDr. David Mašín, Ph.D.

Prohlášení

Prohlašuji, že jsem závěrečnou práci vypracoval samostatně, a že jsem uvedl všechny použité informační zdroje a literaturu. Tato práce ani její podstatná část, nebyla předložena k získání jiného nebo stejného akademického titulu.

V Praze dne 16. 8. 2017

Podpis

Poděkování

Chtěl bych především poděkovat vedoucímu práce doc. RNDr. Davidu Mašínovi, Ph.D. za vedení, rady a zkušenosti, které přispěly ke zdárnému dokončení této práce. Dále Ing. Lukáši Horákovi ze společnosti Sklopísek Střeleč a.s. za spolupráci. V neposlední řadě chci poděkovat celé své rodině za podporu během studií.

Abstrakt

Práce se zabývá způsoby odvodnění technologických kalů vznikajících jako vedlejší produkt při těžbě nerostných surovin. Problematika je vztažena k současnému systému odvodnění kalů v provozu lomu Sklopísek Střeleč a.s., kde je využíváno usazovacích nádrží, které je nutné každý rok vybírat a kal převážet na trvalé odkaliště. Řešení je primárně zaměřeno na technologie strojního odvodnění jemnozrnných materiálů s vysokým obsahem vody. V práci jsou popsány nejpoužívanější průmyslové technologie zpracování kalů z těžby nerostných surovin, jako například kalolisy, odstředivky, pásové lisy a bubnové filtry. Laboratorní zkoušky postihují převážně mineralogické, chemické a zrnitostní složení zkoumaných kalů. Práce přibližuje také aspekty určení investičních a provozních nákladů na pořízení a provoz technologie schopné odvodnit kaly ve velkých provozech.

Abstract

This thesis deals with methods for dewatering technological slurry as a byproduct in the mining industry. The objective focuses on the current sludge dewatering system in the Sklopísek Střeleč a.s. quarry, where only clarifier tanks and gravitational thickening are used for solids separation. The solution is primarily focused on the technology of mechanical dewatering of fine-grained materials. The body of this thesis describes the most used industrial technologies for the processing of sludge from mineral extraction, such as presses, centrifuges, belt presses and drum filters. Laboratory tests mainly affect the mineralogical, chemical and grain composition of the sludge. This thesis will also analyze the investment and operating costs for the acquisition and operation of technology capable of dewatering sludge in larger scaled operations.

Obsah

1	Úvod.....	8
2	Obecné informace	9
2.1	Geologické poměry zájmové oblasti	9
2.2	Geologie ložiska Střeleč.....	12
2.3	Historie těžby a kalové problematiky	14
3	Vznik odpadních kalů při těžbě a zpracování sklářských písků.....	16
3.1	Těžba sklářských písků	16
3.2	Zpracování produktů těžby	16
4	Podstata odvodňování a faktory ovlivňující odvodnění	19
4.1	Zrnitostní složení pevné fáze.....	20
4.2	Vazba kapaliny a pevné fáze.	20
4.3	Podmínka dalšího zpracování a požadavek na stupeň odvodnění.	24
4.4	Účinnost odvodňování.	24
5	Sedimentace	26
5.1	Usazování samostatné částice	26
5.2	Sedimentace suspenzí.....	30
6	Filtrace	33
6.1	Filtrační přepážka	34
6.2	Testy filtračních přepážek	35
7	Odvodňování pomocí sedimentačních a zahušťovacích nádrží.....	36
7.1	Sedimentační nádrže.....	36
7.2	Zahušťovací nádrže	42
8	Technologie pro odvodnění pomocí filtrace.....	44
8.1	Kalolis	45
8.2	Pásové filtry.....	55
8.3	Bubnové a kotoučové filtry	58
9	Odvodňování odstředivou silou.....	63
9.1	Filtrační odstředivky	63
9.2	Sedimentační odstředivky.....	66
10	Současná kalová situace v provozu Sklopísek Střeleč.....	69
11	Vzorky a laboratorní zkoušky	72
11.1	Mineralogické složení kalů	74
11.2	Mikroanalýza	77

11.3	Chemický rozbor rentgenovou fluorescenční spektrometrií	79
11.4	Silikátová analýza	80
11.5	Zrnitostní rozbor.....	82
11.6	Vlhkost.....	84
11.7	Konzistenční meze resedimentovaného kalu	87
11.8	Jemnozrnný podíl v primárním kalu.....	89
12	Výběr vhodné technologie odvodnění	90
12.1	Provozní zkoušky	95
12.2	Objem k odvodnění.....	96
12.3	Zahuštění kalu v prostoru stávajících usazovacích nádrží.....	96
12.4	Rozdělení stávajících usazovacích nádrží.....	97
12.5	Úprava stávajících nádrží při zachování jejich funkce.....	98
13	Závěr	99
14	Seznam použitých zdrojů	101
15	Seznam obrázků.....	106
16	Seznam tabulek.....	109

1 Úvod

Diplomová práce vznikla na podnět firmy Sklopísek Střeleč a.s., která patří mezi přední producenty sklářských a slévárenských písků na našem území. Společnost těží ložisko kvádrových pískovců v Českém ráji nedaleko Jičína. Technologickou úpravou, která probíhá mokrou cestou, získává upravenou přírodní surovinu, převážně sklářský a slévárenský písek. Vedlejším produktem úpravy je množství vyplavených nejjemnějších podílů, které po usazení tvoří kaly. Jejich likvidace probíhá částečným odvodněním v kalových lagunách a následným převozem kalů na trvalé odkaliště v prostorách výsypky lomu. Protože v současné době není možné kaly odprodávat, jsou veškeré náklady na manipulaci s kaly ztrátové.

Cílem diplomové práce je vyhledat alternativní postupy a technologie, které jsou schopné nepřetržitého odvodňování jemnozrnných materiálů a mohly by být porovnány se stávajícím systémem ukládání kalů. Snahou je najít primárně technologie, díky kterým by bylo možné dosáhnout snížení nákladů na likvidaci kalů.

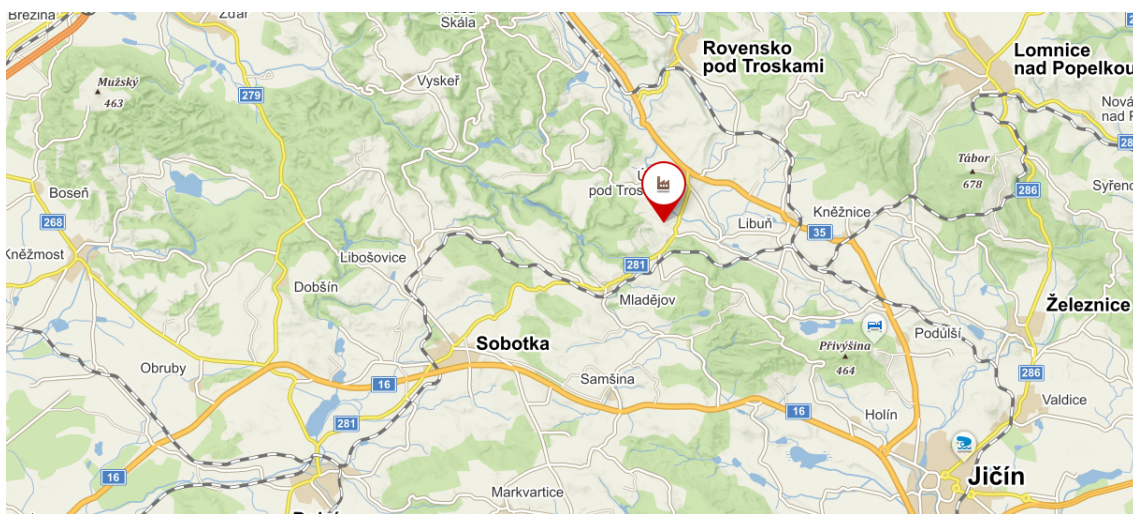
Práce má ve své první části rešeršní charakter, se záměrem shromáždit poznatky o metodách odvodňování jemnozrnných materiálů a jejich principech. Popsány jsou nejpoužívanější filtrační a sedimentační technologie a konkrétní strojní zařízení. Jako nezbytná součást širších technologických celků jsou zmíněny také sedimentační a zahušťovací nádrže a jejich principy.

Druhá část práce je tvořena především popisem základních vlastností zkoumaných kalů. Na vzorcích kalů ze Sklopísku jsme provedli několik laboratorních zkoušek. Účelem zkoušek bylo získat podklady pro výběr nejvhodnějších metod strojního odvodňování a mít možnost porovnat kal s komerčními keramickými surovinami.

Závěrečná část práce se věnuje popisu aspektů použitelnosti vybraných metod v provozu Sklopísku Střeleč a problematice určení provozních nákladů na základě laboratorních zkoušek. Jsou zmíněna jednání s dodavateli technologií a jejich role při hledání alternativy k současnému systému likvidace kalů.

2 Obecné informace

Ve Střelči je dnes jeden z nejvýznamnějších provozů vyrábějící sklářské a slévárenské písky na našem území. Pískovna produkuje přibližně $\frac{3}{4}$ veškerých sklářských písků vyráběných v České Republice (Smrček 1994). Otevřený jámový lom leží na severovýchodním okraji české křídové pánve v katastrálním území obcí Mladějov, Střeleč a Hrdoňovice, přibližně 10 km severovýchodně od města Jičína. Podél severozápadního a jihovýchodního okraje lomu prochází hranice Chráněné krajinné oblasti Český ráj. Samotný lom do Chráněné krajinné oblasti nespadá.



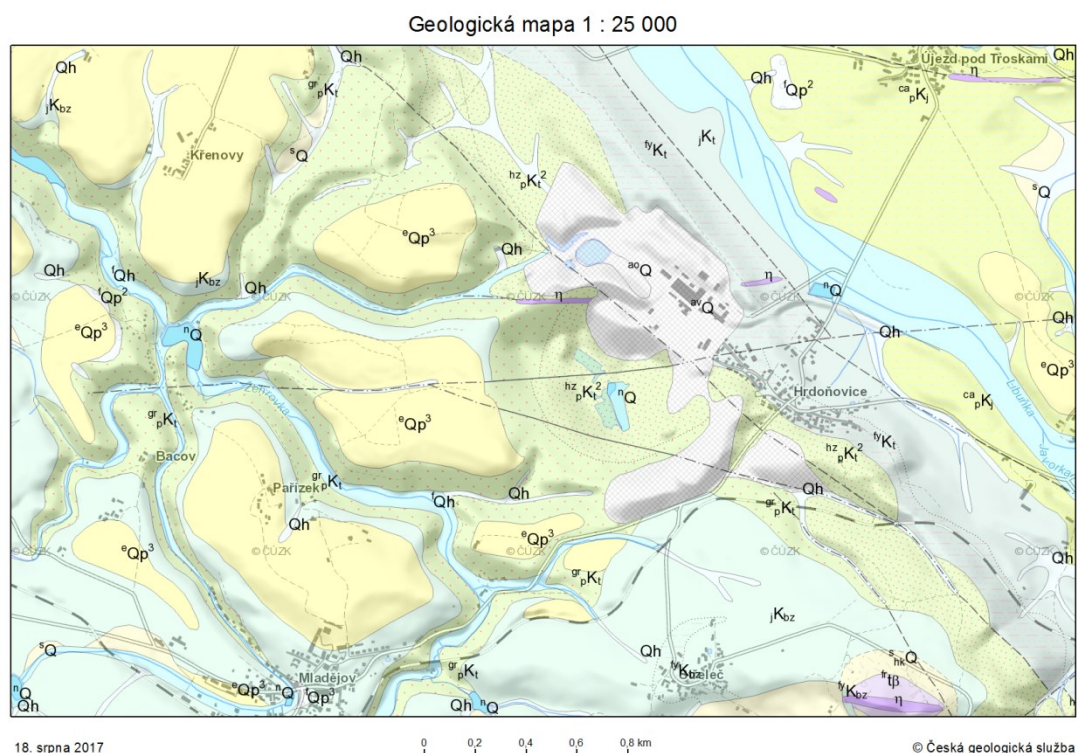
Obrázek 1: Poloha jámového lomu Sklopísek Střeleč a.s. ve Vyskeřské vrchovině Jičínské pahorkatiny.

Zdroj: mapy.cz

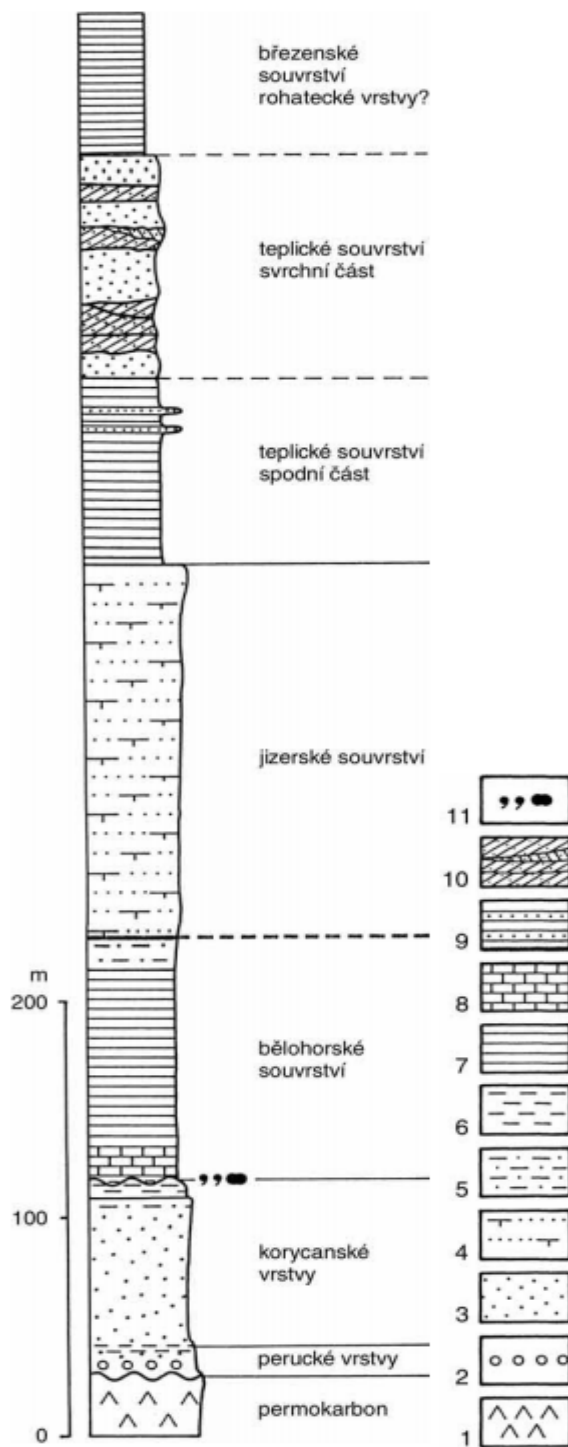
2.1 Geologické poměry zájmové oblasti

Širší geologické území je tvořeno sedimentárními horninami České křídové pánve (obr. 2), která se rozkládá od Drážďan až po severozápadní Moravu na ploše přibližně 15 000 km² (Chlupáč 2002). Zachované křídové sedimenty v oblasti zájmu jsou v rozsahu cenoman až svrchní coniac (obr. 3). Sedimentární sekvence křídových uloženin v oblasti Střelče začíná peruckým souvrstvím spodního cenomanu, které nasedá na podložní permokarbonskou podkrkonošskou pánev. Perucké vrstvy jsou vyvinuté pouze lokálně v depresích paleoreliéfu. Při bázi peruckých vrstev převládají hrubší nestejnzrné pískovce, které se postupně zjemňují na jemně až středně zrnité prachovité až jílovité pískovce. V nejvyšších částech s přechody až do jílovců (Valečka 2009). Marinní korycanské vrstvy jsou souvisle rozšířené a udržují si relativně stálou

mocnost (Valečka in Tásler 1971). Pro korynskaské vrstvy je charakteristické postupné zjemňování zrn hrubozrnných pískovců na jemnozrnné pískovce, s výskytem jílovitých a vápnitých prachovců v nejvyšších vrstevních částech. Bělohorské a jizerské souvrství je litologicky obtížně odlišitelné. Podle Valečka (2009) je bělohorské souvrství tvořené převážně šedými pevnými slínovci a má ve své bazální části polohu glaukonitických prachovitopísčitých jílovců a vrstvu jílovitých vápenců. Jizerské souvrství je charakterizováno jemnozrnnými vápnitými pískovci s obsahem jemnějších poloh prachovců i hrubších poloh pískovců. Teplické souvrství nasedá na jizerské pískovce poměrně ostře. Rozlišujeme jeho spodní část, která je tvořena vápnitými jílovcí s písčitou příměsí a svrchní část zastoupenou výhradně středně zrnitými křemennými pískovci s nepravidelným výskytem hrubozrnné frakce a podřadnými polohami štěrčků. Nad teplickým souvrstvím byly na některých místech (např. kolem vrchu Mužský) zachyceny vápnité jílovce a slínovce, které mohou tvořit ekvivalent k rohateckým nebo březenským vrstvám (Valečka 2009). Vápnité jílovce pod sprašovými hlínami na lokalitě Střeleč popisuje jako březenskou vrstvu Čech (2013).



Obrázek 2: Výřez geologické mapy pro lokalitu jámového lomu Střeleč. (Česká geologická služba).



Obrázek 3: Schematický profil křídové pánve v oblasti Jičínské pahorkatiny podle Valečka (2009). 1- předkřídové podloží, 2- slepence, 3- pískovce křemenné, jílovité, 4- pískovce vápnité, 5- prachovce, 6- jílovce, 7- slínovce, vápnité jílovce 8- vápence, 9- vápnité jílovce s vložkami pískovců (flyšoidní facie), 10- šikmé zvrstvení v pískovci, 11- glaukonit nad 10%, fosfátové konkrce.

2.2 Geologie ložiska Střeleč

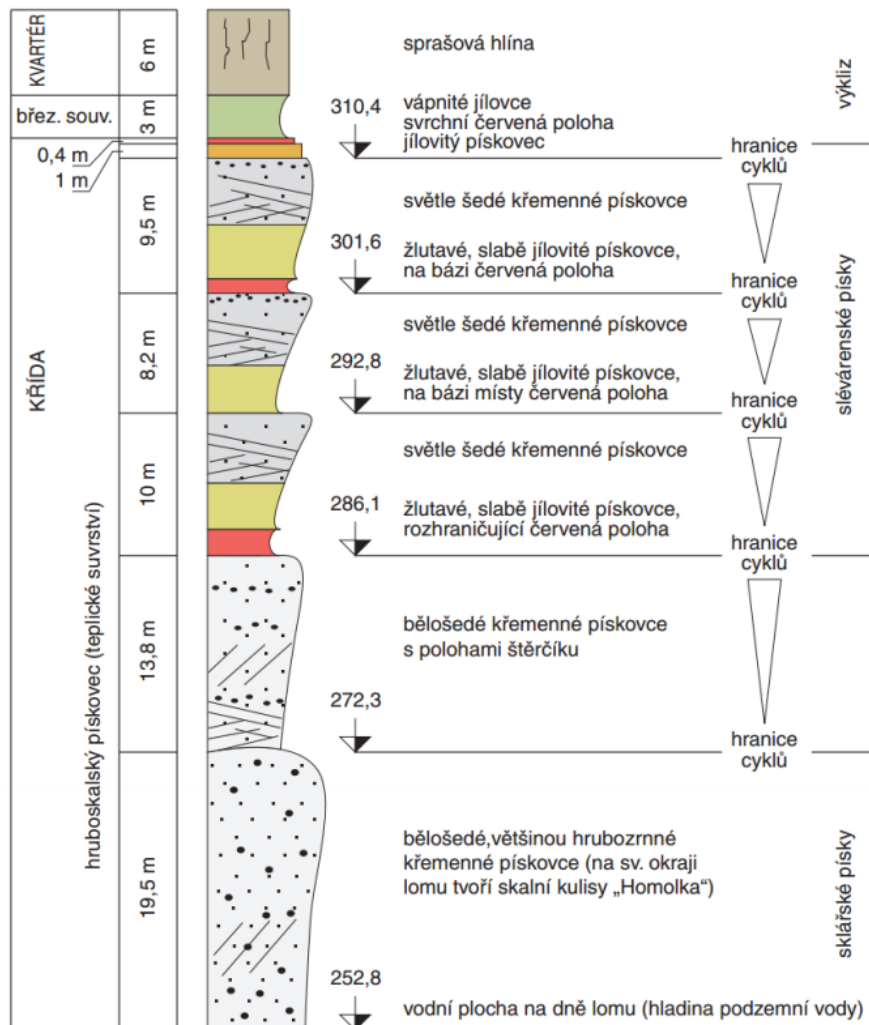
Dobývací prostor lomu Sklopísek Střeleč a.s. (obr. 4) odkrývá přibližně 80 metrů vysoký horninový profil (obr. 5). Litologicky je možné odlišit několik cyklů kvádrových pískovců, oddělených načervenalými jílovitoprachovitými pískovci (Smutek 2014). Předmětem těžby je kvádrový křemenný pískovec teplického souvrství. Pískovec je z pohledu ložiskové geologie rozdělen na dvě odlišné suroviny. Svrchní poloha pískovců, která je charakteristická žlutočerveným zbarvením, představuje tzv. slévárenské písky. Podle Uličného (2001) se žluté pískovce usazovaly nejspíše při ústí vodních toků, jako výplavové kužele mělkovodních delt. Zbarvení je ovlivněno přítomností oxidů železa, které negativně ovlivňují použití žlutých písků ve sklářském průmyslu (Smrček 1994). Proto jsou tyto písky „horší“ kvality použity převážně pro slévárenský průmysl. Mocnost žlutých slévárenských pískovců je přibližně 30 m. Je možné v nich pozorovat střídající se cykly, které jsou při bázi ostře oddělené načervenalými polohami jílovitých pískovců.

Bělošedé křemenné pískovce, ležící pod slévárenskou vrstvou představují tzv. polohu bílých sklářských písků. Jsou charakteristické bílou barvou podmíněnou obsahem jílových minerálů kaolinitické povahy. Tato poloha dosahuje mocnosti 65 m (Čech 2013). K usazování docházelo podle Uličného (2001) nejspíše v hlubším sedimentačním prostředí. V bílošedých sklářských pískovcích jsou rozeznatelné dva cykly. Svrchní cyklus je charakteristický svým křížovitým zvrstvením a polohami štěrčků. Směrem do nadloží postupně hrubne. Při bázi cyklů se místy může vyskytovat málo mocná načervenalá poloha. Spodní část sklářských pískovců, která zasahuje až pod bázi lomu, tvoří rozpadavý, jemně až středně zrnitý, středně dobře vytříděný, bílošedý pískovec s výrazně šikmým planárním zvrstvením (Čech 2011). Na základě vrtu V800 umístěného na bázi dobývacího prostoru byly v podloží kvádrových pískovců zachyceny a Čechem (2011) popsány, jílovitoprachovité a vápnité pískovce o mocnosti téměř 37 m a podložní aleuropelity s mocností 75 m.

Skrývkový materiál je tvořen sprašovými hlínami pleistocénního stáří o mocnosti do 12 m a šedozelenými vápnitými jílovci březenského souvrství o mocnosti do 3 m (Smutek 2014).



Obrázek 4: Těžební jáma lomu Sklopísek Střeleč a.s. Foto: R. Grygar



Obrázek 5: Schematický litologický profil lomu Střeleč. Zdroj: Čech (2013).

2.3 Historie těžby a kalové problematiky

První zmínky o těžbě pocházejí z roku 1881. Pro průmyslovou těžbu bylo ložisko popsáno v roce 1939 Prof. Dr. Ing. Bohuslavem Stočesem. Vzápětí vznikla společnost První česká úpravna sklářského písku, která fungovala od roku 1939 do roku 1941. Mezi roky 1941 a 1945 v lomu těžila německá Báňská hutní společnost. Po druhé světové válce se lom dostal opět do národní správy. 1946-1947 patřil pod České závody pro těžbu kaolínů, jílu a lupků, následně 1948-1961 Severočeské pískovny n. p., 1961-1966 Sedlecko-vildštejnské kaolinové a hlinné závody n.p., 1967-1991 Keramické a sklářské suroviny národní, později státní, podnik. V roce 1991 vznikl název Sklopísek Střeleč, který pod různými vlastníky přetrval až dodnes (Sklopísek 2010).

Dle informací poskytnutých společností Sklopísek Střeleč a.s. se problematika kalového hospodářství v novodobé historii lomu řeší od roku 1980, kdy byla do provozu uvedena nová mokrá úpravna písku. V souvislosti s uvedením nového provozu, byla vybudována soustava čtyř odkalovacích nádrží, akumulční nádrž, čerpací stanice a dvě hydrocyklonové stanice.



Obrázek 6: Soustava rozšířených usazovacích nádrží. Stav před rokem 1998 po zrušení hydrocyklonových stanic a před vybudováním ochranného valu. Zdroj: Sklopísek Střeleč a.s.

Hydrocyklony měly z kalové vody odstranit alespoň polovinu pevných látek. Zbylé nejjemnější kaly se měly usazovat v soustavě čtyř usazovacích nádrží. Hydrocyklonové stanice se ovšem ukázaly jako nevhodné. Nebyly schopné dosáhnout požadovaného odvodnění a byly odstaveny a zlikvidovány. Všechny kalové vody byly čerpány do odkalovacích nádrží. Pro nemožnost vybírání kalu z nádrží došlo k přestavbě na kaskádu rozšířenou o další dvě nádrže, odkud bylo možné v letních měsících odvážet vysychající kal (obr. 6). V roce 1998 musel být po schválení nového plánu otvírky, přípravy a dobývání (POPD), místo části usazovací kaskády vybudován ochranný val. K usazování tak zbyly pouze tři nádrže. Následně byla místo jedné z nádrží kaskády vybudována kalolisovna, navržená ke zpracování 70 % kalů. Odvodněný vylisovaný kal měl být částečně prodáván a částečně odvážen na výsypku. Provoz kalolisu byl ale značně nákladný a po ztrátě odběratele vylisovaného kalu byla kalolisovna odstavena z provozu. Současný systém (obr. 7) využívá soustavy dvou usazovacích nádrží (dočasných odkališť), které je nutné jednou ročně vyčistit a kaly převézt na trvalé odkaliště.



Obrázek 7: Soustava zbylých usazovacích nádrží po vybudování ochranného valu a kalolisovny. Aktuální stav. Zdroj: 3D mapy Google.

3 Vznik odpadních kalů při těžbě a zpracování sklářských písků.

Účelem těžby a úpravy sklářských písků je vyrobit z přírodního materiálu čistý sklářský písek. Proces úpravy je závislý na stavu vstupního materiálu z přírodního naleziště. Podle vlastností písku, který vstupuje do procesu, úpravy jsou použity průmyslové technologie čištění a třídění. Nežádoucí jsou těžké minerály s hustotou nad $2,9 \text{ g/cm}^3$. Nejčastější nečistotou, která se ze sklářského písku odstraňuje, je železo. Jeho obsah je zásadní pro použitelnost písku ve sklářském průmyslu (Smrček 1994). Kromě odstranění železa je základním procesem úpravy sklářských písků jejich vytřídění na požadované frakce. Snahou velkých provozů je udržovat konstantní chemické vlastnosti a zrnitost finálního produktu.

3.1 Těžba sklářských písků

Dle úložných poměrů charakteristických pro každé individuální ložisko a rozpojitelosti se využívá konkrétních metod těžby. Pískovec nebo přímo písek se těží povrchově v otevřených jamách nad nebo pod hladinou vody. Pokud se těží pod hladinou, využívá se dle rozpojitelosti plovoucích bagrů, plovoucích korečkových rypadel, případně podvodních frézovacích hlav a jiné těžké plovoucí techniky. Těžba nad hladinou vody probíhá v závislosti na rozpojitelosti těžkými bagry, rýpadly, korečkovými rypadly a další těžkou strojní mechanizací. Pro rozpojování pískovce se také používají odstřely (Smrček 1994).

3.2 Zpracování produktů těžby

Zavedených úpravnických metod v těžebním a zpracovatelském průmyslu je celá řada. Podle fyzikálních a chemických vlastností těženého materiálu jsou použity specifické technologie a jejich kombinace pro každý zpracovatelský provoz. Většina základních technologií úpravy probíhá mokrou cestou. K fungování úpraven nerostných surovin je tak často zapotřebí velké množství procesní vody. Nejjemnější podíly vyplavené během procesů úpravy tvoří po usazení kaly. Základní postupy mokré úpravy jsou dle Smrčky (1994) následující.

Drcení a prvotní prosévání

Převážně produkt těžby odstřely je nutné dál drtit. Natěžený písek nebo pískovec prochází drtičkou a prvotním prosetím přes hrubá síta. Na sítích se odstraňují velké čocky vměstků případně jiné nežádoucí větší kusy hornin.

Plavení

Plavení je základním procesem při čistění písku. Natěžený písek se pere na sítích, jejichž průměry jsou dány vlastnostmi vstupního materiálu a požadovaným výstupním materiálem. Dochází k odplavení primárně jemných podílů a části železa. Oddělují se také příliš hrubá zrna a hrudky, které se nepodařilo rozplavit. Plavení je proces náročný na spotřebu vody. Voda odnáší jemnou frakci (většinou pod 1 mm) (Smrček 1994). Vyplavená jemná frakce se nakonec zpravidla usazuje v usazovacích nádržích.

Flotace

Flotace se při úpravě sklářských písků využívá především k odstranění těžkých minerálů a oddělení písku a živce, pokud je to potřeba. Probíhá mokrou cestou (Smrček 1994). Flotace je proces, kdy se od sebe různé látky oddělují na základě rozdílné smáčivosti (Tarján 1986). Odpadním produktem flotace je voda s příměsí oddělených látek. Po usazení vzniká kal.

Otírání

Železité vrstvičky, které se z povrchu zrn neodplavily při plavení, mohou být odstraněny otíráním. Při otírání se míchá směs písku a vody. Během míchání se o sebe zrna otírají a tím se odstraňuje železo z povrchu zrn. Nakonec se písek propere vodou (Smrček 1994).

Humpryho třídění

Třídění na Humpryho spirálách slouží k oddělení minerálů o různých hmotnostech. Písek s vodou prochází skrze spirálové žlaby, kde se v suspenzi vlivem odstředivé síly oddělí těžká zrna od lehkých (Sivamohan 1985).

Protiproudé třídění

Protiproudé třídění je velmi rozšířená metoda třídění písku na různé frakce. Někdy se označuje jako brzděná sedimentace. Písek se nechává sedimentovat ve vzestupném protiproudu. Rychlost vzestupného proudu vody pak ovlivní rychlost sedimentace částic o různých velikostech a hmotnostech (Smrček 1994). Protiproudé třídění se používá na již promytém materiálu, ale i přesto může ještě docházet k vyplavování nečistot.

Odvodnění finálního produktu

Vypraný a roztříděný písek se na konci úpravnického procesu zbavuje přebytečné vody. Voda se nechává samovolně stéct na drénovaném podkladu. Případně se využívají rotační filtry a síta, kde se proces urychlí vlivem odstředivé síly (Holbein 1983). Dосуšení pak probíhá samovolně na skládce za působení klimatických vlivů. Standardní vlhkost písku při expedici je 3-8%. Pokud je nutné získat suchý písek, musí být vysušen strojně. Sušený písek pak má vlhkost menší než 0,1% (Smrček 1994).

Jak je patrné výše, základní procesy úpravy písku probíhají ve vodném prostředí. Během plavení a praní se vyplaví největší podíl jemných příměsí, které jsou ve finálním produktu nežádoucí. Technologická voda, která v provozu koluje, pak obsahuje nejjemnější frakci pevných látek. Po usazení tato jemná frakce tvoří technologický kal.

4 Podstata odvodňování a faktory ovlivňující odvodnění

Odvodňováním, ve smyslu úpravy nerostných surovin, rozumíme odstraňování vody z hlavních nebo vedlejších produktů těžby. Při průmyslové úpravě nerostných surovin probíhá velká část technologických procesů mokrou cestou. Praní, třídění, flotace nebo separace v suspenzích se z pravidla děje ve vodním prostředí (viz kapitola 3.2). Produkty úpravy, tedy vytříděnou pevnou fází (písek, štěrky, kamenivo atp.) nebo vedlejší produkty (zpravidla kaly) je následně nutné zbavit již nežádoucí vody (Holbein 1983).

Nadbytečnou vodu můžeme od pevné fáze oddělit dvěma základními způsoby. Pokud primárně využíváme tepelnou energii nebo proud vzduchu, pak se jedná o sušení. Termické sušení je zpravidla energeticky, a tedy i finančně velmi náročné, využívá se hlavně při vysoušení finálních produktů těžby, u kterých je požadavek na nízký obsah vody. Při řešení této práce bude velmi okrajově zmíněno pouze dosoušení proudem vzduchu, jako dílčí proces některých filtračních metod odvodňování.

Probíhá-li odstraňování vody, tedy dělení pevné a kapalné fáze mechanicky, pak hovoříme ve smyslu úpravnictví nerostných surovin o odvodňování. Metod a technologií určených k odvodňování je celá řada. K dělení pevné a kapalné fáze se v průmyslu využívá tlakové, gravitační nebo odstředivé síly (Nováček 1997).

Jednotlivé metody odvodňování se ohledem na základní princip fungování dělí na:

- Filtrační metody
- Sedimentační metody

Volba nejvhodnějších metod k odvodňování konkrétních směsí pevných látek a vody je zpočátku ovlivněna několika následujícími faktory.

4.1 Zrnitostní složení pevné fáze.

Dle zrnitostního složení je možné částečně odvodit, zda bude pro odvodnění vhodné využívat tlakové, gravitační nebo odstředivé síly a jakou škálu technologií bude možné použít. Hrubozrnné a středně zrnité materiály jsou na odvodnění technologicky nejjednodušší. Naopak odvodňování jemnozrnných materiálů, tedy i kalů, je technologicky podstatně náročnější (Slivka 2002). Platí, že s klesající velikostí zrn v odvodňované směsi roste obtížnost odvodňování.

4.2 Vazba kapaliny a pevné fáze.

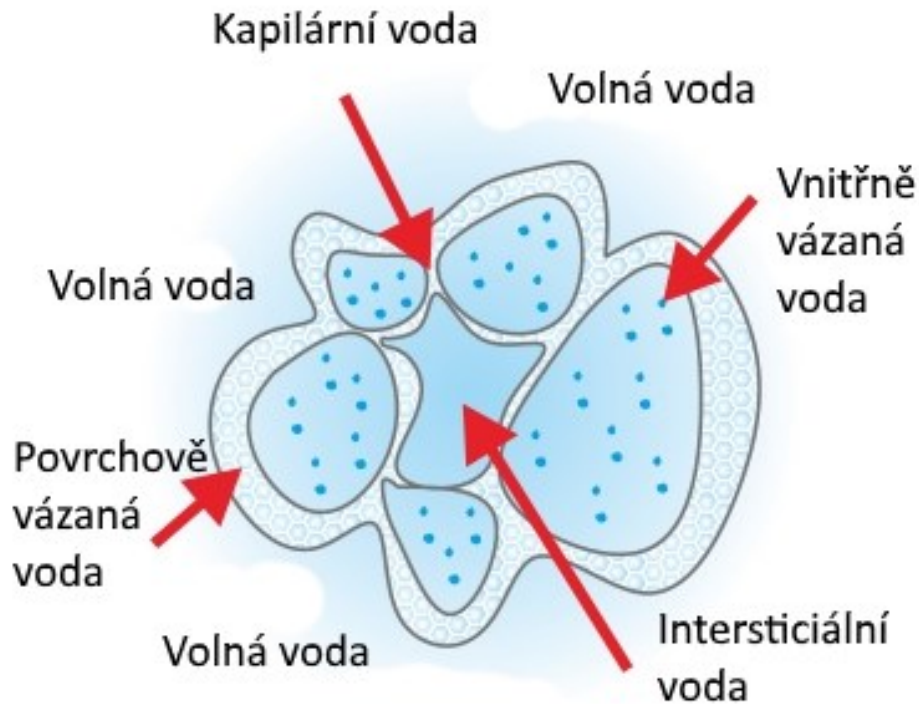
Mechanickým odvodňováním není možné odstranit všechnu vodu, která je ve směsi vázaná. Způsob a pevnost vazby pevných látek s vodou ovlivňuje výsledek mechanického odvodňování. Čím pevněji je voda v materiálu vázána, tím náročnější je její odstranění (Slivka 2002).

Z pohledu mechaniky zemin rozlišujeme několik typů vody v zemině. Pro potřeby odvodňování jemnozrnných produktů těžby (kalů) je v literatuře (Chen 2002; Nováček 1997; Slivka 2002; Vesilind 1994) rozdělení vody ve směsi popisováno mírně odlišně. Základní typy vody a jejich charakteristiky známé z mechaniky zemin, jsou ale zachovány.

Rozdělení vody v zemině podle mechaniky zemin je následující:

- **Gravitační voda** zahrnuje volnou vodu a kapilární vodu.
Volná voda v zemině souvisle vyplňuje póry a dutiny pod hladinou podzemní vody. Kapilární voda vyplňuje drobné kapiláry i nad hladinou podzemní vody.
- **Vázaná voda** zahrnuje adsorbovanou a osmotickou vodu.
Adsorbovaná voda vyplňuje nejmenší póry a je pevně vázaná k porézním povrchům zrn, zatímco osmotická neboli obalová voda je k zrnům vázána slabší vazbou.
- **Strukturní voda** představuje vodu, která je součástí minerálů.
- **Vodní páry**

Z hlediska mechanického odvodňování nepohlížíme na kal jako a trojfázový systém, ve kterém vystupuje zemina, voda a vzduch. Neuvažujeme vodu ve formě vodních par ani stav pod a nad hladinou vody. Kal je zpravidla homogenní směs vody a pevných látek. Voda může představovat naprostou většinu objemu kalu. V primárním kalu, jehož odvodněním se zabývá tato práce, je koncentrace pevných látek do 2 % objemu. Z pohledu odvodňování rozlišujeme vazby vody ve směsi následovně:



Obrázek 8: Schematické znázornění rozložení vody ve směsi. Zdroj: Taiwan Passcal.

- **Vnitřně vázaná voda** je obsažena zpravidla ve vnitřních kapilárách a připočítáváme k ní i vodu chemicky vázanou v minerálech. Představuje ekvivalent strukturní vody popisované v mechanice zemin. Vnitřně vázanou vodu mechanicky neodvodňujeme (Nováček 1997).
- **Volná voda** představuje podle Chena (2002) takovou vodu, která nemá s povrchy zrn pevných látek žádnou vazbu. Vesilind (1994) popisuje volnou vodu jako objem čisté vody, který vznikne usazováním 1 litru kalu ve válci po 30 minutách. Volná voda může být ze směsi odstraněna pouhým gravitačním usazováním.

- **Intersticiální voda** se váže v prostorech mezi zrny. K této vodě bývá připočítávána i **kapilární voda**, která vyplňuje kapiláry mezi zrny. Intersticiální i kapilární vodu je možné ze směsi odstranit za působení mechanických sil (Chen2002). Nováček (1997) a Slivka (2002) řadí intersticiální a kapilární vodu k vodě povrchově vázané.
- **Povrchově vázaná voda** je poutána na povrchových plochách pevných částic. Z pohledu odvodňování kalů nejčastěji zahrnuje adsorpční vodu a adhezní vodu (Chen 2002). Jedná se tedy o ekvivalent vázané vody z terminologie mechaniky zemin. Adsorpční voda je celkovém objemu odvodňované vody je málo významná. Váže se na povrch tuhých látek, polárního nebo hydrofilního charakteru. Povlak adsorpční vody má na zrnech pevných látek tloušťku pouze 0.1-1 μ m (Nováček 1997). Adhezní voda představuje vrstvu vody, která je uložena na adsorpční vrstvě. Na rozdíl od adsorpční vody je adhezní voda s pevnou látkou spojena slabší vazbou. Podle Nováčka (1997) můžeme v případě adhezní vody určit adhezní práci, která představuje energii, potřebnou k odtržení sloupce kapaliny o jednotkovém průřezu od pevné částice. Povrchově vázanou, tedy adsorpční ani adhezní vodu při běžném mechanickém odvodňování ze směsi neodstraňujeme.

Běžnými metodami mechanického odvodňování je tedy možné ze směsi odstranit volnou, intersticiální a kapilární vodu. Zbylou vnitřně vázanou a povrchově vázanou vodu mechanickým odvodňováním nelze odstranit. Zjednodušeně lze všechnu vodu, kterou není možné mechanicky odvodnit označit jako vodu vázanou. Vázaná voda pak představuje teoretický limit mechanického odvodňování (Vesilind 1994; Chen 2002).

Při odvodňování kalů, které je předmětem této práce, se jedná o odvodňování poměrně málo koncentrované suspenze (viz kapitola 11.7). Na celý proces by se do určité fáze dalo nahlížet jako na separaci pevných látek z vodního prostředí. Naprostou většinu vody ve směsi tvoří volná voda, kterou je možné odstraňovat usazováním za působení gravitační síly. V první fázi odvodňování tak půjde především o odstranění této volné vody. Toho může být dosaženo sedimentací při běžném gravitačním zrychlení (viz kapitola 7) nebo jeho násobku (viz kapitola 9.2) případně filtrací.

Následně může být za působení další síly odstraněna i intersticiální a kapilární voda. Některé technologie odvodnění odstraňují volnou, intersticiální i kapilární vodu prakticky současně.

Tlak, který je nutné vyvinout k **odstranění kapilární vody**, vázané mezi zrny vlivem kapilárních sil, lze podle Nováčka (1997) vypočítat následovně:

$$z \cdot \rho \cdot g \cdot h_k = \sigma_{lg} \left(\frac{1}{R_1} - \frac{1}{R_2} \right)$$

Kde z ...násobek zrychlení, potřebný pro oddělení vody z vodního klínu
 ρ ...hustota vody
 g ...gravitační zrychlení
 h_k ...výška vodního klínu
 σ_{lg} ...měrná volná energie na rozhraní kapalné a plynné fáze
 R_1, R_2 ...hlavní poloměry zakřivených ploch

Odstraňování vody vázané v kapalinových klínech kapilár je efektivnější, probíhá-li odvodnění materiálu v pohybu. Zrna pevné fáze tedy při odvodňování mění svojí vzájemnou pozici (Nováček 1997).

Rovnováhu sil, respektive síly, které je nutné překonat pro **odstranění intersticiální vody** z prostorů mezi zrny, lze určit podle Nováčka (1997) z následujícího vztahu.

$$z \cdot \rho \cdot g \cdot h_k = 2\sigma_{lg} \cos\vartheta \left(\frac{1}{r_{min}} - \frac{1}{r_{max}} \right)$$

kde z ...násobek zrychlení, potřebný pro oddělení vody z vodního klínu
 ρ ...hustota vody
 g ...gravitační zrychlení
 h_k ...výška vodního klínu
 r_{min}, r_{max} ... poloměry nejmenší a největší kapiláry

σ_{lg} ... volná měrná energie na rozhraní kapalné a plynné fáze

ϑ ... styčný úhel smáčení

Zrnitostní složení a těsnost kontaktu zrn určují hodnoty r_{min} a r_{max} . Pokud je hodnota r_{max} dostatečně velká, můžeme hodnotu $\frac{1}{r_{max}}$ ve vztahu zanedbat (Nováček 1997).

4.3 Podmínka dalšího zpracování a požadavek na stupeň odvodnění.

Důležitým faktorem při volbě metody odvodnění, je podmínka dalšího zpracování odvodněného materiálu. Při odvodňování například vedlejšího produktu těžby, který už nebude určen k dalšímu zpracování, mohou být požadavky na odvodnění odlišné od odvodnění finálního produktu či meziprojektu těžby, určeného k dalšímu zpracování (Slivka 2002). Pokud není možné mechanickým odvodňováním odstranit ze směsi dostatečné množství vody, využívá se ještě termických metod – sušení (Špaldon 1986). Úvaha o požadovaném stupni odvodnění je zásadní zejména z ekonomického hlediska. Se snižující se výslednou vlhkostí odvodněného, případně sušeného materiálu, rostou náklady na takové odvodnění. A to jak z hlediska nákladů provozních, tak nákladů na pořízení účinné technologie.

4.4 Účinnost odvodňování.

Pro potřeby hodnocení odvodnění uvažujeme odvodňovaný materiál jako směs vody a pevných částic. Na základě známého objemu vody a pevné fáze v kalu určeném k odvodnění a známém objemu vody a pevné fáze v jednom z produktů odvodňování, můžeme hodnotit proces odvodnění. Pokud by při odvodňování došlo k absolutnímu rozdělení směsi na produkt obsahující pouze pevné částice, a produkt obsahující pouze vodu, považovali bychom takové odvodnění za dokonalé (Slivka 1997). Hmotnost oddělené vody by se v ideálním případě rovnala hmotnosti vody původně obsažené v neodvodněné směsi. Metody odvodnění ale reálně nejsou dokonale účinné. Z principu běžně používaných metod mechanického odvodnění, které budou popsány

v následujících kapitolách, není možné naprosto dokonale oddělit vodu od směsi s pevnou látkou. Po odvodnění tak zpravidla dochází k situaci, kdy v oddělené pevné fázi zůstane určitý objem vody a naopak v oddělené vodě zůstane určitý objem pevné fáze. Účinnost takového odvodňování pak můžeme podle Nováčka (1997) hodnotit dle následující rovnice:

$$\eta_0 = (\varepsilon_t - \varepsilon_w) \cdot 100\%$$

Kde η_0 ...účinnost odvodnění
 ε_t ...výtěžnost tuhé fáze do odvodněné směsi
 ε_w ...výtěžnost vody do odvodněné směsi

Kvantitativně pak můžeme spočítat účinnost technologie odvodnění (obr. 9) z následujícího vztahu:

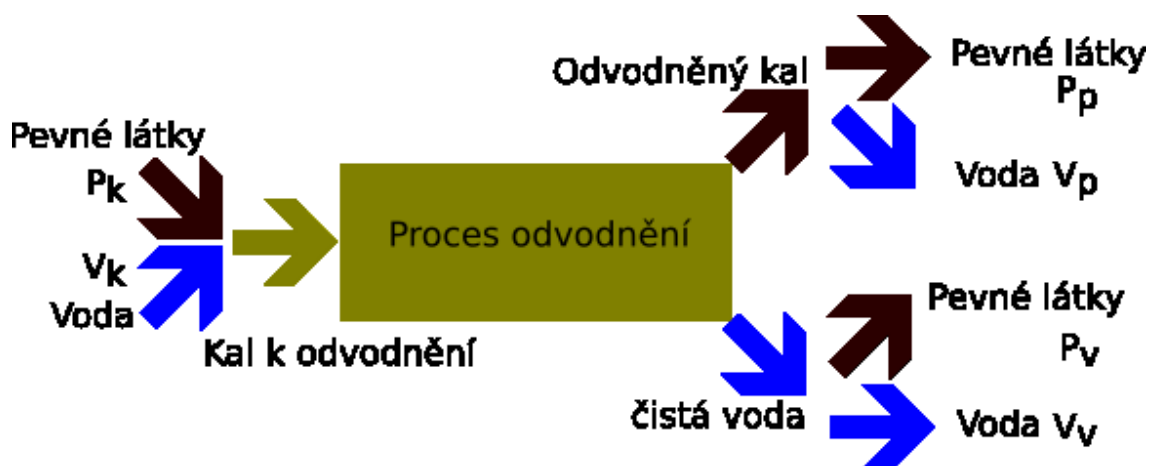
$$\eta_0 = \left(\frac{P_P}{P_K} - \frac{V_P}{V_K} \right) \cdot 100\%$$

Kde P_P ...objem pevných látek v odvodněném kalu
 P_K ...objem pevných látek v kalu k odvodnění
 V_P ...objem vody v odvodněném kalu
 V_K ...objem vody v kalu k odvodnění

Pokud není možné určit parametry odvodněného kalu, lze účinnost analogicky spočítat z rozdílu výtěžnosti kapalně a pevně fáze do čisté vody (obr. 9). Rovnice by pak vypadala následovně:

$$\eta_0 = \left(\frac{V_V}{V_K} - \frac{P_V}{P_K} \right) \cdot 100\%$$

Kde V_V ...objem vody v čisté vodě
 V_K ...objem vody v kalu k odvodnění
 P_V ...objem pevných látek v čisté vodě
 P_K ...objem pevných látek v kalu k odvodnění



Obrázek 9: Diagram odvodnění.

Pro danou směs určenou k odvodnění je ekonomicky výhodné najít takovou technologii, která při co nejnížší energetické náročnosti/provozních nákladech dosahuje nejvyšší účinnosti.

5 Sedimentace

Usazování neboli sedimentace se uplatňuje v širokém spektru úpravnických technologií zpracování nerostných surovin. Zároveň využíváme principů sedimentace v některých způsobech odvodnění. Obecně sedimentace označuje jev, kdy dochází k oddělování částic rozptýlených v kapalině nebo plynu vlivem hmotnostní síly (Bustos 1999). Hmotnostní sílu může představovat gravitační, odstředivá, setrvačná nebo elektrostatická síla (Nováček 1998). Dle definice je hmotnostní síla působící na částici úměrná součinu hustoty a objemu částice, tedy její hmotnosti. Základní principy usazování suspenzí, jako souborů částic, vycházejí z popisů usazování jednotlivých zrn.

5.1 Usazování samostatné částice

Při popisu usazování jedné částice uvažujeme, že na částici v kapalině působí síla vztlačku, síla odporu prostředí a hmotnostní síla. Výsledná síla, podle které se bude řídit pohyb částice, je rovna součtu všech výše zmíněných sil (Nováček 1998). Hmotnostní síla je úměrná hmotnosti částice násobené tíhovým zrychlením a působí ve směru

sedimentace. Velikost vztlakové síly je dle Archimédova zákona rovna tíze kapaliny o objemu, který je vytlačen sedimentující částicí. Síla odporu prostředí je funkční závislostí tvaru částice, rychlosti pohybu a viskozity kapaliny. V závislosti na podmínkách sedimentace vyjádřených Reynoldsovým číslem, je možné odporovou sílu určit podle Stokesova zákona.

$$F_o = -6\pi\eta r v$$

Kde	F_o	...odporová síla
	η	...dynamická viskozita kapaliny
	r	...poloměr částice
	v	...rychlost částice

Velikost odporové síly, má být při nízkém Reynoldsově čísle, přímo úměrná velikosti rychlosti částice (Červenka 2011).

S růstem velikosti rychlosti částice roste také odpor prostředí vůči jejímu pohybu. Zrychlení sedimentující částice je pak dáno výslednicí hmotnostní síly, vztlakové síly a síly odporu. Jakmile se při usazování tyto síly dostanou do rovnováhy, částice už nezrychluje, ale sedimentuje rovnoměrným pohybem (Nováček 1998).

$$v_p = v_s + v_f$$

Kde	v_p	...rychlost pohybu částice
	v_s	...sedimentační rychlost
	v_f	...rychlost kapaliny

Výsledná rychlost pohybu částice v kapalině v_p je tedy závislá na rychlosti sedimentace a směru a pohybu kapaliny (Nováček 1998). Rovnoměrný pohyb částice při usazování je nazýván sedimentační rychlost (Bustos 1999). Velikost sedimentující částice je přímo úměrná sedimentační rychlosti částice.

Základní popis pro určení sedimentační rychlosti kulové částice vychází ze Stokesova zákona a je dán následující rovnicí:

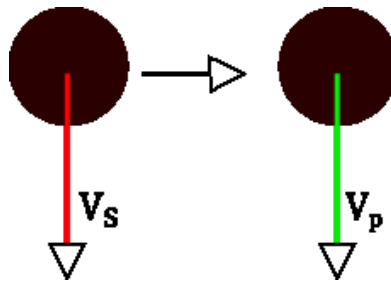
$$v_s = \frac{2gr^2(\rho_s - \rho_l)}{9\mu}$$

Kde	v_s	...sedimentační rychlost
	g	...gravitační zrychlení
	r	...průměr částice
	ρ_s	...měrná hmotnost částice
	ρ_l	...měrná hmotnost kapaliny
	μ	...dynamická viskozita kapaliny

V závislosti na směru pohybu kapaliny, v které probíhá sedimentace, rozlišujeme tři základní průběhy sedimentace.

- Sedimentace v kapalině, která se nepohybuje.

Při usazování částice v nehybné kapalině (obr. 10) platí, že rychlost pohybu částice je rovna rychlosti sedimentace. Tedy $v_p = v_s$.

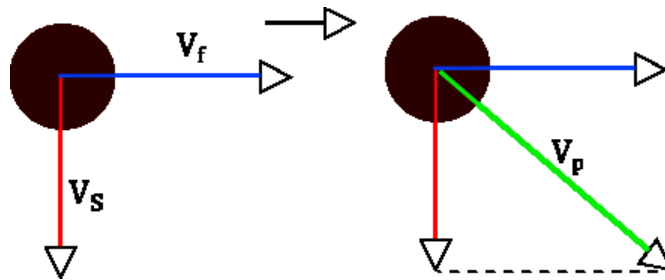


Obrázek 10: Částice se usazuje v nehybné kapalině ve směru působení hmotnostní síly. Rychlost pohybu částice je stejná s rychlostí sedimentace.

- Sedimentace v kapalině, která proudí rovnoměrně a zároveň kolmo na směr usazování.

V případě proudění kapaliny rovnoměrně v kolmém směru na směr usazování,

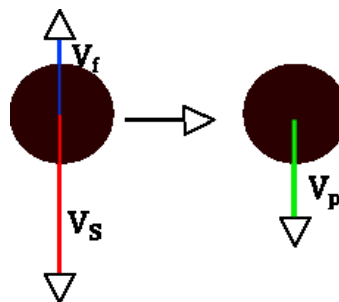
(obr. 11) je výsledná rychlost částice dána součtem vektorů sedimentační rychlosti a rychlosti pohybu kapaliny V_s a V_f .



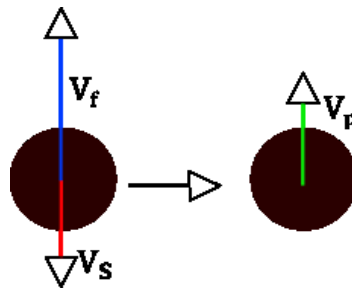
Obrázek 11: Sedimentace v kapalině, která proudí kolmo na směr působení hmotnostní síly částice.

- Sedimentace v kapalině, která proudí rovnoběžně se směrem usazování rovnoměrnou rychlostí.

Pokud kapalina proudí ve směru usazování (obr. 12), pak je výsledná rychlost pohybu částice dána součtem rychlosti kapaliny a sedimentační rychlosti. V případě, kdy kapalina proudí proti směru usazování (obr. 13), rychlost kapaliny a sedimentační rychlost se od sebe odečítají. Získáme výslednou rychlost pohybu částice (Nováček 1998).



Obrázek 12: Sedimentace v kapalině, která proudí proti směru hmotnostní síly částice. Rychlost usazování částice je v tomto případě větší než rychlost proudění kapaliny. Částice se proto pohybuje ve směru sedimentace.



Obrázek 13 Sedimentace v kapalině, která proudí proti směru hmotnostní síly částice. Rychlost usazování částice je menší než rychlost proudění kapaliny. Částice se bude pohybovat ve směru proudění.

5.2 Sedimentace suspenzí

Technologické kaly vznikající při zpracování sklářských písků jsou různě koncentrované suspenze kapaliny a pevných částic. Usazováním (obr. 14) můžeme poměrně jednoduše oddělovat volnou vodu od pevné fáze. Sedimentace suspenzí se proto uplatňuje na konci mokřích úpravěn písků, kdy usazováním vzniká vyčiřená voda, která rovnou koluje zpět do úpravní a sedimentovaný kal určený k dalšímu odvodnění. Součástí technologie následného odvodnění vzniklého kalu může být znovu proces sedimentace.

Sedimentace suspenze se z pohledu jednotlivých zrn podle Nováčka (1998) dělí na tři základní typy následovně:

- Prostá sedimentace

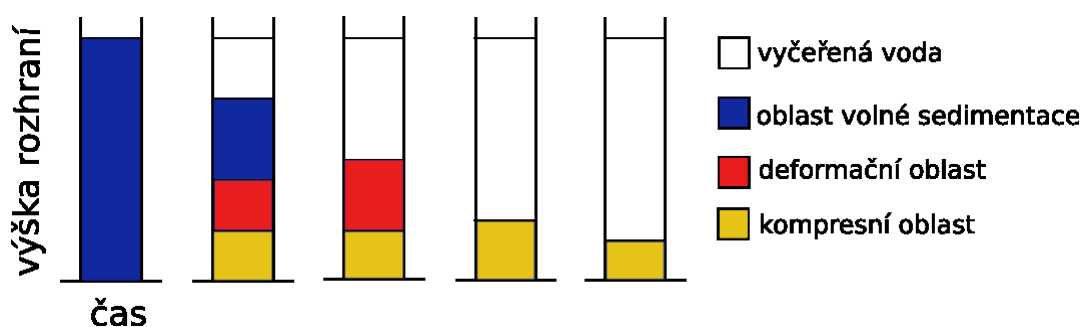
Pokud při sedimentaci nedochází k ovlivňování částic mezi sebou navzájem, jedná se o prostou sedimentaci. Každá jednotlivá částice sedimentuje jako by se jednalo o částici izolovanou.

- Rušená sedimentace

Pokud je koncentrace částic v daném objemu suspenze větší než 0.5%, může nastat situace, kdy se různé částice usazují společně. Jednotlivé částice se pak navzájem ovlivňují a z toho důvodu je pro výpočet rychlosti sedimentace nutné brát v úvahu viskozitu a hustotu suspenze místo hustoty a viskozity kapaliny. Částice si sice zachovávají individuální charakter, ale rychlost sedimentace se snižuje (Nováček 1998).

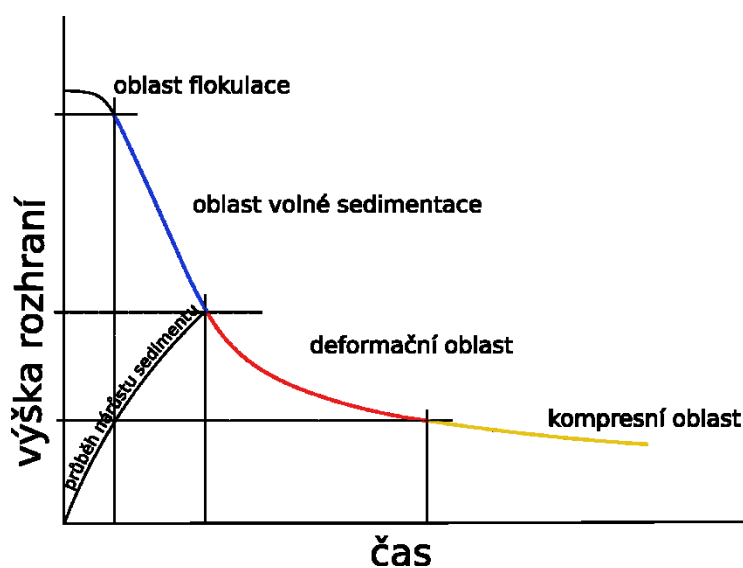
- Zahušťování suspenze

V případě, že při sedimentaci dojde ke vzniku oblasti s dostatečnou koncentrací pevných částic, vytvoří se rozhraní viditelně oddělující vyčiřenou vodu a vrstvu usazeného kalu. Pohyb jednotlivých pevných částic bude navzájem omezován a tyto částice tak ztratí individuální charakter. V horních vrstvách usazeného kalu se netvoří koncentrační gradient, ale rozhraní usazený kal / vyčiřená voda je ostré (Nováček 1998).



Obrázek 14: Průběh sedimentace ve válci s odlišenými jednotlivými oblastmi sedimentace. Upraveno podle Špaldona (1986).

Průběh zahušťování suspenze ilustruje zahušťovací křivka (obr. 15), která popisuje jednotlivé fáze sedimentace v pozorovaném vzorku (Wills 1992). Můžeme podle ní také vyneset průběh nárůstu sedimentu. Na osy vyneseme čas a výšky rozhraní. Podle pohybu rozhraní a vykreslených bodů je možné ze zahušťovací křivky určit několik fází zahušťovacího procesu.



Obrázek 15: Zahušťovací křivka suspenze podle Tarján (1981).

- Oblast flokulace

První fáze sedimentace, kdy dochází jen k velmi malému pohybu rozhraní. V některých případech oblast flokulace není vůbec patrná. S flokulací částic dochází k tvorbě malých kanálků, kterými poté voda proudí vzhůru (Wills 1992).

- Oblast volné sedimentace

V oblasti volné sedimentace nedochází k zahušťování, rozhraní se pohybuje konstantní rychlostí, přičemž částice se navzájem omezují. Nedochází k tvorbě koncentračního gradientu. Na dně se ale postupně usazující částice dostávají do přímého kontaktu a vytváří koncentrační gradient, který tvoří rozhraní mezi volně ulehlými částicemi a zbytkem sedimentující suspenze. S nárůstem sedimentu se pak rozhraní pohybuje směrem vzhůru. Podle časového průběhu pohybu tohoto spodního rozhraní, můžeme do grafu zahušťovací křivky vykreslit křivku průběhu nárůstu sedimentu. Tato křivka pak protne zahušťovací křivku v bodě, kde se dělí oblast volné sedimentace a deformační oblast, označovaném jako kritický bod (Nováček 1998). Od kritického bodu už jsou všechny pevné částice ze suspenze koncentrovány pouze ve spodních dvou vrstvách. Tedy v deformační a kompresní oblasti (Tarján 1986).

- Deformační oblast

V deformační oblasti jsou již všechny částice vzájemně v kontaktu, suspenze se zahušťuje v celém svém sloupci (Wills 1992).

- Kompresní oblast

Vytvoří se vrstva usazeného kalu s maximální ulehlostí. Voda se z kalu postupně vylučuje za působení tíhové síly částic tuhé fáze v nadložních vrstvách kalu (Nováček 1998).

6 Filtrace

Filtrace je proces oddělování pevných látek od kapalných při průtoku filtrační přepážkou (Wills 1992). Jako filtrační přepážku většinou uvažujeme porézní vrstvu z různých materiálů (keramika, tkanina, mikrovlákna, kov, atp.). Někdy ale pojem filtrační přepážka obecně zahrnuje i polopropustné membrány a filtrační lože ze zrnitých materiálů.

Rozlišujeme filtraci s příčným tokem a filtraci průtočnou. Z hlediska odvodňování kalů je podstatná průtočná filtrace. Při filtraci v principu kapalina prochází soustavou drobných kanálků filtrační přepážky, které jsou ovšem dostatečně malé, aby zabránily průchodu zrn pevných látek (Zamani 2009).

Z hlediska průtočné filtrace odlišujeme podle kvality a složení filtrované suspenze a podle vlastností filtrační přepážky tři typy filtrace.

- **Tok čistých kapalin vrstvou zrnitého materiálu**

Využíván například u technologií filtrace úpraven vod, změkčování vod, iontové výměny, odstraňování dusičnanů atp. (Nováček 1998). Používají se nejrůznější moderní filtrační materiály s velmi jemnými póry.

- **Tok málo koncentrovaných suspenzí vrstvou zrnitého materiálu**

Filtrace suspenzí s koncentrací pevných látek pod 0,1 % obj. (Nováček 1998). Pevné látky se zachytávají uvnitř vrstvy filtračního lože tvořeného například filtračním pískem. Nejprve se zachytávají zrna částic z filtrované suspenze pouze o zrna materiálu filtrační vrstvy. S narůstajícím zanášením filtračního materiálu a změnou filtračních cest se začnou zachytávat původní filtrovaná zrna o jiná zrna ze suspenze. Ze samotného filtrovaného materiálu se tak stává filtrační vrstva (Zamani 2009). Po úplném zanesení filtračního lože je nutné jeho vyčištění nebo výměna.

- **Zachytávání suspendovaných látek ze suspenzí větších koncentrací na filtrační přepážce**

Pokud suspenze obsahuje více než cca 1% pevných částic, využívá se k filtraci tuhých filtračních přepážek, na kterých je pevná fáze zachycena, zatímco voda proudí skrz (Nováček 1998). Během procesu filtrace se na přepážce tvoří vrstva ze zachyceného materiálu, která dále narůstá a funguje jako filtrační přepážka. Takovou vrstvu označujeme jako filtrační koláč (Sutherland 2008). Filtrace na přepážce za tvorby filtračního koláče je využívána v mnoha průmyslových odvětvích včetně odvodňování kalů. Filtrovaná suspenze je tlačena skrz koláč a přepážku vlivem rozdílu tlaků před koláčem a za přepážkou. Vliv na průběh filtrace má kromě rozdílu tlaků také odpor filtrační přepážky, plocha povrchu, skrz který dochází k filtraci, viskozita filtrátu, odpor filtračního koláče a odpor na styku koláče a přepážky (Wills 1992).

Během filtrace dochází k zanášení filtrační přepážky a nárůstu vrstvy filtračního koláče, který se zároveň deformuje. Filtrační odpor koláče je pak vyšší než odpor přepážky. Přepážka tak často slouží jen jako struktura pro vytvoření vrstvy filtračního koláče, který je pro další efektivní průběh filtrace nezbytný. S rostoucím časem filtrace a nárůstem koláče vzrůstá odpor k průchodu tekutiny a rychlost filtrace klesá (Nováček 1998). Když se rychlost filtrace snížila pod přijatelnou mez, je nutné odstranit filtrační koláč a promýt přepážku. Zatímco kapalina z původně odvodňované suspenze protekla skrz koláč a přepážku, pevné částice se zastavily na přepážce, utvořily vrstvu, která dále zvyšovala účinnost filtrace, a nakonec budou ve formě filtračního koláče z přepážky odstraněny. Tento proces se v různých formách periodicky opakuje u většiny filtračních metod odvodňování.

6.1 Filtrační přepážka

Principy fungování filtračních metod jsou na většině zařízení, kde k filtraci dochází podobně. Kromě výběru správného filtračního zařízení a jeho technického seřízení k odvodňování suspenze o daných vlastnostech, hraje významnou roli volba filtrační přepážky. Ačkoliv filtrační přepážka sama o sobě zachytává pevná zrna, její účinnost bez vytvořeného filtračního koláče nebývá dostačující. Účelem filtrační

přepážky je vytvářet podporu pro tvorbu filtračního koláče, který má zpravidla lepší účinnost zachycení zrn pevných částic než filtrační přepážka samotná (Wills 1992). V moderních zařízeních má filtrační přepážka charakter tkaniny a často ji nazýváme filtrační plachetka.

Materiály, ze kterých se i filtrační přepážky vyrábějí, jsou rozmanité. Také samotná konstrukce a vazba vláken je různá. Pro správnou filtraci je nutné najít tkaninu ze správného materiálu, vhodné plošné hmotnosti a vazbě (Sutherland 2008). Od přepážky vyžadujeme, aby co nejlépe zachytávala pevné částice současně s co nejmenším odporem k průtoku kapaliny. Musí být mechanicky odolná, a její vlastnosti stálé. Velice rozšířeným materiálem pro výrobu filtračních přepážek byla v minulosti bavlna. Její výhodou je cena, dostupnost a velmi široké spektrum zápletu výsledné tkaniny. U filtrační přepážky z bavlny výrobci udávají schopnost zachytávat až zrna o velikosti 10 μ m. Další používané jsou například vlněné, lněné, jutové a jiné přírodní příze a tkaniny. Využívají se tkaniny ze sklených nebo uhlíkových vláken, kovů i gumy. Moderní filtrační přepážky jsou ale zpravidla tvořeny syntetickými tkaninami z moderních materiálů na bázi plastů a polymerů nebo kombinacemi více druhů vláken. Nejběžnější jsou polypropylen, polyester, polyamid, nilon, a další umělé hmoty (Wills 1992). Syntetické tkaniny se objevují pod různými značkami a obchodními názvy. Protože tkanina jako filtrační přepážka podléhá opotřebení, je po určité době provozu nutná její obměna.

6.2 Testy filtračních přepážek

Ačkoliv je proces filtrace a proudění kapaliny poměrně dobře matematicky popsán, vhodnost filtrační tkaniny k filtraci konkrétní suspenze se předběžně stanovuje experimentálně. Bez filtračních testů není možné určit, jak bude konkrétní filtrační tkanina fungovat při filtrování konkrétní suspenze (Wills 1992). Kal je v laboratoři filtrován přes vzorek filtrační tkaninu pomocí vakuové pumpy. Filtrační koláč, který se utvoří na vzorku filtrační tkaniny je vysušen a zvážen. Kapacita filtrační tkaniny pak může být určena suchou hmotností filtračního koláče na jednotku plochy. Během testu je možné simulovat cyklické i kontinuální podmínky provozu filtru, promývání tkaniny,

případně stlačování filtračního koláče (Wills 1992). Pokročilejší testy jsou pak specializované pro konkrétní zařízení, kde bude filtrační tkanina použita. Výrobci odvodňovacích zařízení jsou schopni testovat odvodnění v malém měřítku na přenosných zařízeních vycházejících z konstrukce průmyslových strojů.

7 Odvodňování pomocí sedimentačních a zahušťovacích nádrží

Jak je zmíněno výše, nejjednodušší metodou, jak lze v těžebních provozech oddělovat pevné částice od kapaliny, je sedimentace. V provozech pískoven, kde probíhá proces úpravy písků mokrou cestou, postupně dojde k zatížení provozní vody nejjemnějšími podíly pevných látek. Provozní voda následně teče do sedimentačních nádrží, kde se mají pevné částice usadit, aby mohla být voda následně opět použita v procesech úpravy písků. Sedimentační nádrže tedy mají za úkol zachytit nežádoucí pevné látky, které poté zpravidla ve formě kalu pokračují k dalšímu odvodnění. Z hlediska následného strojního odvodnění sedimentovaných kalů, je výhodné přivádět k odvodnění kaly, které mají v čase relativně konstantní vlastnosti a mají vysokou koncentraci pevných látek (Chen 2002). K dodatečnému zahuštění kalů zachycených sedimentačními nádržemi se používají zahušťovací nádrže. Úkolem zahušťovacích nádrží je dále zvýšit koncentraci pevných látek v kalu (Fuerstenau 2003).

7.1 Sedimentační nádrže

Konstrukčně rozlišujeme několik základních typů sedimentačních nádrží. Liší se hlavně svým tvarem, pracovním cyklem, způsobem shrnování a vybírání kalu. Nádrže mohou být zasazené do okolního terénu, postavené na úrovni okolního terénu nebo na vyvýšených konstrukcích (obr. 16). Vyrobeny mohou být z betonu, monolitických betonových bloků, kovu, plastu případně jiných pevných materiálů (Flori 2016). Sedimentační nádrže lze také budovat jako rybníky se sypanou hrází.



Obrázek 16: Kruhové usazovací nádrže na vyvýšené konstrukci. Zdroj: Ampmineral.

Podle provozu dělíme usazovací nádrže na:

- Nádrže s přerušovaným provozem
- Nádrže s kontinuálním provozem

Nádrže s přerušovaným provozem

Nádrže s přerušovaným provozem pracují v cyklech. Nejprve je nádrž napuštěna suspenzí, následně je nutné přívod suspenze odstavit a po uběhnutí doby, kdy se i nejpomaleji sedimentující částice usadí, je možné nádrž vypustit a vyčistit (Nováček 1998). Vyčiřená voda je postupně vypouštěna ventily v různých výškách nádrže nebo odčerpána. Usazený kal je nutné vybrat. Právě přerušovaný provoz nádrží může být v některých provozech jejich zásadní nevýhodou.

Nádrže s kontinuálním provozem

Nádrže s kontinuálním provozem mohou pracovat bez přerušování přívodu suspenze k sedimentaci. Vyčiřená voda i usazený kal může z nádrže odtékat nepřetržitě. Nádrže jsou zpravidla vybaveny shrabovacím zařízením, které shrnuje usazený kal do míst odkud je čerpán, nebo gravitačně vypouštěn (Fuerstenau 2003). Odvod vyčiřené kapaliny bývá nejčastěji řešen přepadem.

Podle tvaru rozdělujeme usazovací nádrže na dva základní typy.

- Pravoúhlé nádrže
- Kruhové nádrže

Pravoúhlé nádrže

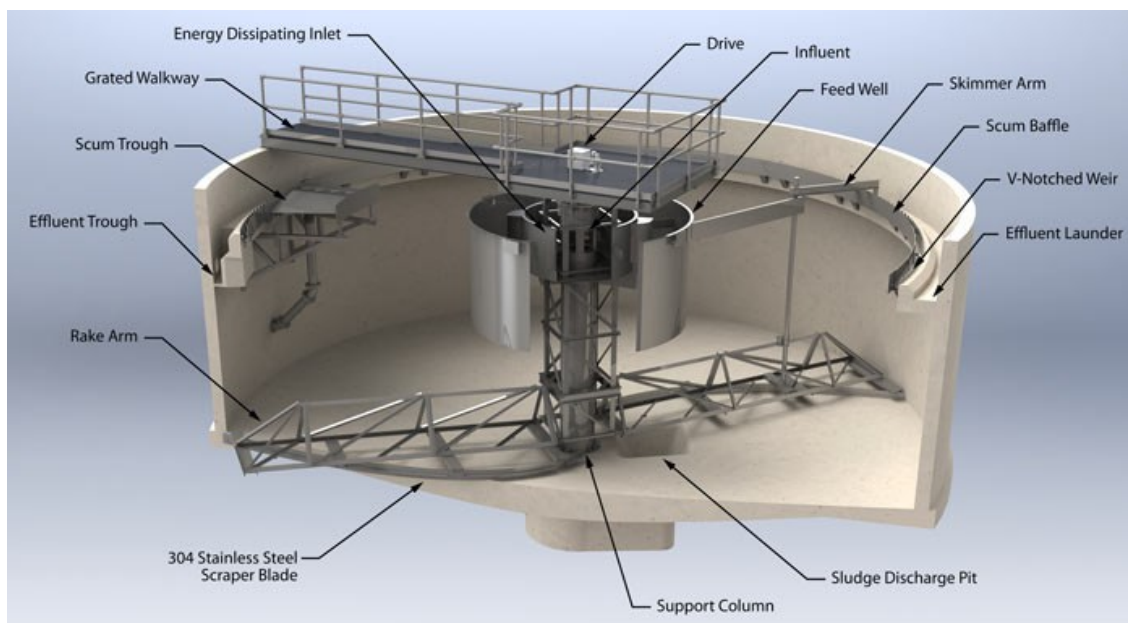
Pravoúhlé nádrže (obr. 17) jsou konstruovány převážně na obdélníkovém půdorysu, s horizontálním průtokem. Přítok suspenze do nádrže a odtok vyčiřené vody je na protilehlých stranách nádrže. K sedimentaci se tak využívá celé plochy nádrže, která může být i několik desítek metrů dlouhá. Při okraji nádrže, zpravidla na straně přítoku, je kalový prostor, kam se pravidelně shrabuje sedimentovaný kal ze dna nádrže Nováček (1998). Pro tento účel jsou nádrže vybaveny shrabovacím mechanismem. Z kalového prostoru je pak kal gravitačně vypouštěn nebo odčerpáván k dalšímu zpracování. Ke shrabování kalu ze dna nádrže se používají v zásadě dva typy shrabovacích mechanismů, řetězové shrabováký a pojízdné mostíky (Fuerstenau 2003). Řetězové shrabováký jsou plastové nebo kovové lišty spojené hnacím řetězem. Jsou umístěné uvnitř nádrže a v nekonečné smyčce seřazené za sebou. Spolu s řetězy se pak otáčejí a kontinuálně shrnují kal na dně nádrže. Pojízdný shrabovací most je naproti tomu tvořen konstrukcí, která celá pojíždí po stěnách nádrže a pouze jednou lištou umístěnou v nádrži shrnuje kal na dně. Existují konstrukční řešení, kde na pojízdném mostě není umístěna shrnovací lišta, ale čerpadlo, které postupně s pohybem mostu odsává usazený kal ze dna nádrže.



Obrázek 17: Konstrukční řešení pravoúhlé usazovací nádrže s instalovanými řetězovými shrabováký.
Zdroj: Brentwoodindustries.

Kruhové nádrže

Kruhové sedimentační nádrže (obr. 18) jsou běžným typem nádrží určených k sedimentaci pevných částic. Standardně jsou navrhovány jako nádrže s radiálním průtokem. Jejich rozměry jsou dle požadovaného výkonu i 100 metrů v průměru. Dno se svažuje do středu, kde je kalový prostor a výpust. Suspenze k sedimentaci se do nádrže přivádí v jejím středu (Bustos 1999). Přívod suspenze do nádrže je vyveden pod hladinou vody, aby nedocházelo ke zbytečnému rozvíření vyčeřené kapaliny. Okolo přívodu suspenze může být konstrukčně různě řešený uklidňovací vtokový válec. Podél celého obvodu nádrže je přepadová hrana, přes kterou do odvodního žlabu přetéká vyčiřená voda. Shrabovací mechanismus je tvořen samonosnou klecí, která má pohon ve středu nádrže nebo je řešena jako pojízdný shrabovací most, který pojíždí po stěně nádrže. U dna nádrže je pak rameno, které opisuje kruh okolo středu a stírá kal do středové prohlubně, odkud je kal čerpán nebo gravitačně vypouštěn (Fuerstenau 2003). Princip kruhových usazovacích nádrží vychází z patentu z roku 1910 a po svém vynálezcí jsou kruhové usazovací nádrže často označovány jako Dorrovy usazovací nádrže (Fleming 1927).



Obrázek 18: Řez kruhovou usazovací nádrží s popisky základních komponent.

Zdroj: Monroe Enviromental.

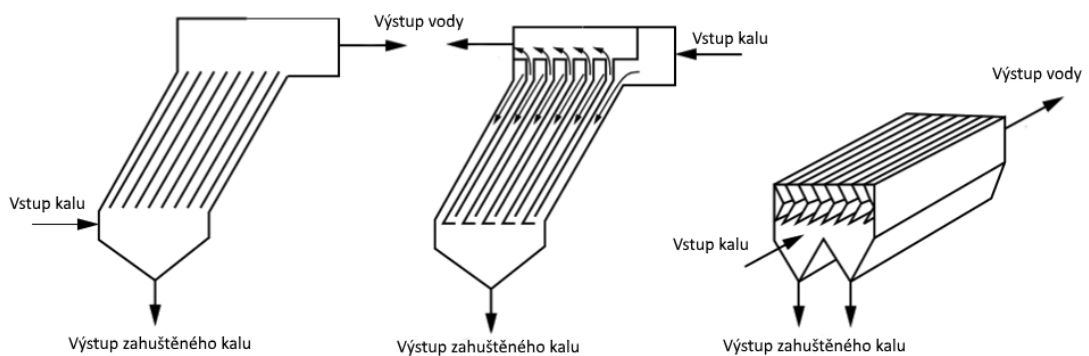
Nádrže s vertikálním průtokem

Pravouhlé a kruhové nádrže existují také v konstrukčních variantách s vertikálním průtokem. Kal je přiváděn do středu nádrže potrubím, které pod hladinou ústí vertikálně směrem ke dnu. Naproti ústí přívodu kalu je odrazový štít, který slouží ke změně směru proudění přitékající suspenze. Kal přiváděný shora se odráží od štítu a proudí vzhůru (Nováček 1998). Během proudění kalu vzhůru dochází k sedimentaci pevných částic ve směru působení gravitačního pole. Vyčiřená voda při hladině odtéká přepadem, zatímco sedimentovaný kal se hromadí na zkosném dně nádrže. Sediment je pak vypouštěn nebo odčerpáván.

Lamelové usazovací nádrže

Pro zvětšení usazovací plochy a tím i zvýšení účinnosti usazování jsou navrhovány speciální lamelové sedimentační nádrže (obr. 19) (Nováček 1998). Vyrábějí se varianty s vzestupným a sestupným prouděním. Nádrž samotná může mít různý tvar, spíše než kruhové se lamelové usazovárny konstruují jako pravouhlé nádrže, tak aby byly přizpůsobené lamelové vestavbě. Přívod kalu může být v jednom nebo více

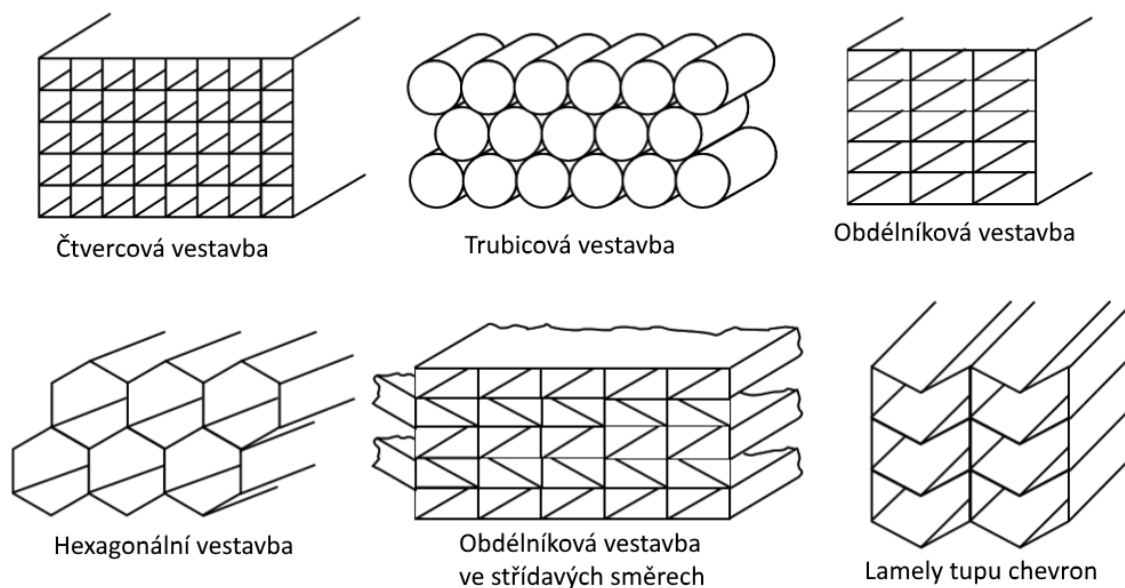
místech. U varianty se sestupným prouděním je kal přiváděn nad lamelami. V případě vzestupné varianty je kal do nádrže napouštěn pod lamelami. Přívod je zaveden do uklidňovacího prostoru, kde ihned začíná sedimentace. Kapalina následně proudí skrz systém lamel. Na lamelách sedimentují další částice a postupně sklouzávají na dno nádrže, které je zkosené a tvoří kalový prostor. V nejhlubším místě je vypouštěcí ventil, kterým se odčerpává sedimentovaný kal. Vyčeřená voda odtéká přepadem do žlabu na povrchu nádrže.



Obrázek 19: Lamelové usazovací nádrže různých konstrukcí. Nádrž se spodním přívodem (vlevo), nádrž s horním přívodem (uprostřed), nádrž s podélným průtokem (vpravo). Upraveno z Crittenden (2012).

Účelem lamelové vestavby (obr. 20) je zvětšit sedimentační plochu nádrže a tím zvýšit účinnost sedimentace. Lamelové usazovací nádrže tak mohou mít při zachování stejného sedimentačního výkonu menší vnější rozměry než nádrže bez lamel. Při použití lamelových vestaveb lze dosáhnout až desetinásobného snížení zastavěné plochy oproti obyčejným nádržím (Špaldon 1986).

Lamely jsou většinou vyráběny z plastu, ale podle jednotlivých výrobců a obchodních značek se liší se svým tvarem, rozměry, uspořádáním a použitým materiálem. Účinnost lamelových usazovacích nádrží je kromě tvaru lamel ovlivněna postavením lamel vzhledem ke směru proudění a sklonem vůči směru usazování (Crittenden 2012).



Obrázek 20: Základní typy vestaveb pro lamelové usazovací nádrže. Upraveno z Crittenden (2012).

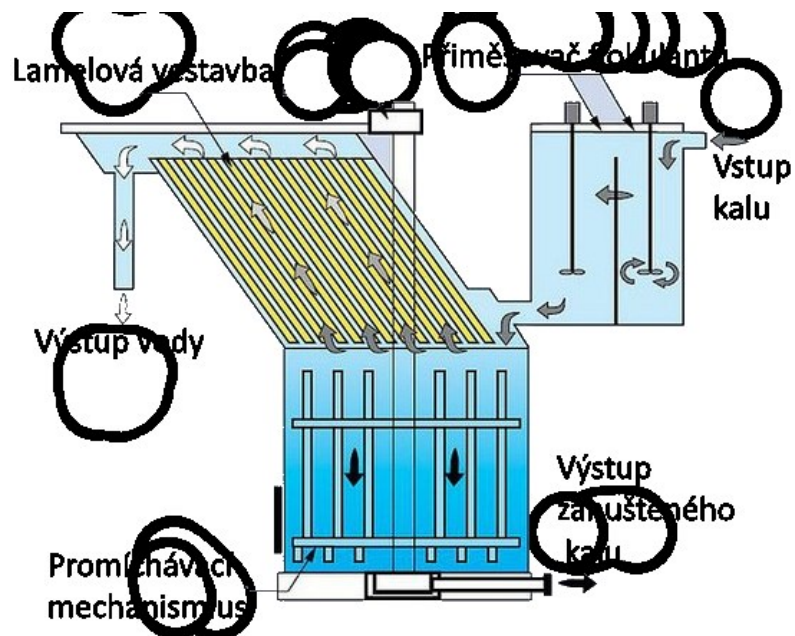
7.2 Zahušťovací nádrže

Zahušťovací nádrže (obr. 21) konstrukčně vycházejí z nádrží usazovacích. Jsou určeny k dalšímu odvodnění kalu získaného z primárních usazovacích nádrží. Fungují na stejném principu jako výše zmíněné usazovací nádrže. Pokud jsou zařazeny za primární usazovací nádrží, pak mohou být jejich rozměry, za předpokladů použití flokulantů, mnohonásobně menší. Zpravidla zpracovávají pouze usazený kal již zbavený přebytečné vody prvotní sedimentací. Mohou být konstruovány jako pravoúhlé, kruhové, lamelové (obr. 22). Jsou vybaveny promíchávacím zařízením, které kal promíchává a má za úkol umožnit vodě dostat se z usazeného kalu. Samotný shrabovací mechanismus musí být konstruován s ohledem na větší odpor, který zahuštěný kal při shrabování a promíchávání klade (Fuerstenau 2003). Úkolem zahušťovacích nádrží je snížit celkový objem kalu, který je nutné čerpat ke strojnímu odvodnění (Nováček 1998). Zahušťovací nádrže bývají často předřazeny technologiím strojního odvodnění, kdy pracují zároveň jako vyrovnávací nádrže a zaručují přívod kalu k odvodnění v konstantním objemu a s relativně konstantní koncentrací pevných látek. Takové nádrže se někdy nazývají jako zahušťovák, jejich rozměry jsou poměrně malé (řádově průměr pouze několik metrů).

Vysoko kapacitní zahušťovací nádrže mohou mít průměry několik desítek metrů. Konstrukčně jsou řešené jako kruhové sedimentační nádrže ale promíchávací mechanismus a shrabovací zařízení včetně pohonu je uzpůsobené nutnosti překonávat větší odpor kalů s vysokou koncentrací pevných látek (Fuerstenau 2003).



Obrázek 21: Vysokokapacitní kruhová zahušťovací nádrž. Zdroj: Enviro-Clear.



Obrázek 22: Schematické znázornění konstrukce lamelového zahušťovačku. Zdroj: Rabu (2012).

8 Technologie pro odvodnění pomocí filtrace.

Filtrace koncentrovaných suspenzí za účelem jejich odvodnění je v průmyslu velmi rozšířený postup. Existuje celá řada zařízení pracujících na odlišných technických principech využití filtrace. Jednotlivé metody bývají schopné odvodnit suspenze odlišných vlastností. Ve velkých provozech se zpravidla odvodňují poměrně značné objemy suspenzí, proto je výhodné zvolit nejvhodnější filtrační zařízení s co nejlepší účinností odvodnění pro danou suspenzi za co nejnižších provozních nákladů.

Zařízení pro odvodnění koncentrované suspenze metodou filtrace dělíme podle několika aspektů jejich fungování.

V závislosti na časovém průběhu filtrace rozlišujeme zařízení:

- Kontinuálně pracující
- Polokontinuálně pracující
- Periodicky pracující

Podle způsobu vyvozování změny tlaku před a za přepážkou rozlišujeme filtry:

- Přetlakové
- Podtlakové

Pro použití v různých provozech mají jednotlivé principi fungování své výhody i nevýhody. Obecně má využívání přetlakových filtrů oproti podtlakovým zařízením výhody. Přetlakem je možno dosáhnout jednodušeji větších tlaků než podtlakem (Wills 1992). Zároveň přetlakové filtry bývají konstrukčně jednodušší než podtlakové.

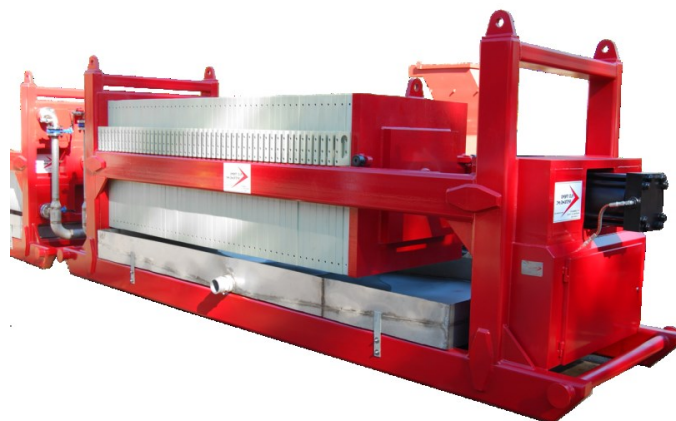
8.1 Kalolis

Kalolisy patří mezi průmyslově nejpoužívanější tlaková filtrační zařízení k odvodňování suspenzí (Wills 1992). Jsou to periodicky pracující přetlaková filtrační zařízení. Principiálně kalolisy fungují periodicky v cyklech a nejsou to tedy ryze kontinuální zařízení (Slivka 2002). Moderní kalolisy ale mohou být plně automatizované. V ideálním případě pak mohou pracovat téměř bezobslužně. Kalolisy se podle svých konstrukčních řešení dělí na tři základní typy.

- Komorový kalolis
- Rámový kalolis
- Membránový kalolis

Konstrukce kalolisů se dle jednotlivých typů, výrobců, velikostí a modelů liší. Základní komponenty a principy jsou ale u všech typů velmi podobné. Volba konkrétního typu a modelu kalolisu je určena především provozem, ve kterém má zařízení fungovat, objemem který bude nutné odvodnit, požadavkem na stupeň odvodnění a vlastnostmi kalu. Od toho se také odvíjejí případná přídatná zařízení, která se ke kalolisům montují.

Základem kalolisu je ocelový rám, který má funkci nosné konstrukce. Rám musí být dostatečně tuhý, protože bude namáhán při stlačování desek kalolisu a jeho zatížení se bude v závislosti na průběhu cyklů měnit. Na nosný rám jsou pomocí svorníků zavěšeny filtrační desky. Podle provedení rámu kalolisu se používá rám s bočními svorníky (obr. 23) nebo rám s horním svorníkem (obr. 24).



Obrázek 23: Komorový kalolis s bočními svorníky a hydraulickým uzavíráním push to close. Zdroj: Flotrend.

Pracovní prostor kalolisu je tvořen filtračními deskami. Desky kalolisu, které jsou potaženy filtrační tkaninou / plachetkou jsou seřazeny za sebou a podle filtračního cyklu jsou buď přitlačeny těsně k sobě (zavřený kalolis) nebo s mezerami roztaženy (otevřený kalolis). Zavírání kalolisu může probíhat mechanicky nebo hydraulicky. Moderní zařízení používají hydraulické písty a dosahují přtlaku při zavření až 30MPa. Rozlišují se také dva typy funkce hydraulických pístů. První konstrukční řešení je push to close, kde hydraulický píst tlačí desky proti pevné konstrukci kalolisu a tím je k sobě přitlačuje. Druhá varianta je pull to close, kde zpravidla několik hydraulických pístů přitahuje desky k pevné konstrukci kalolisu.

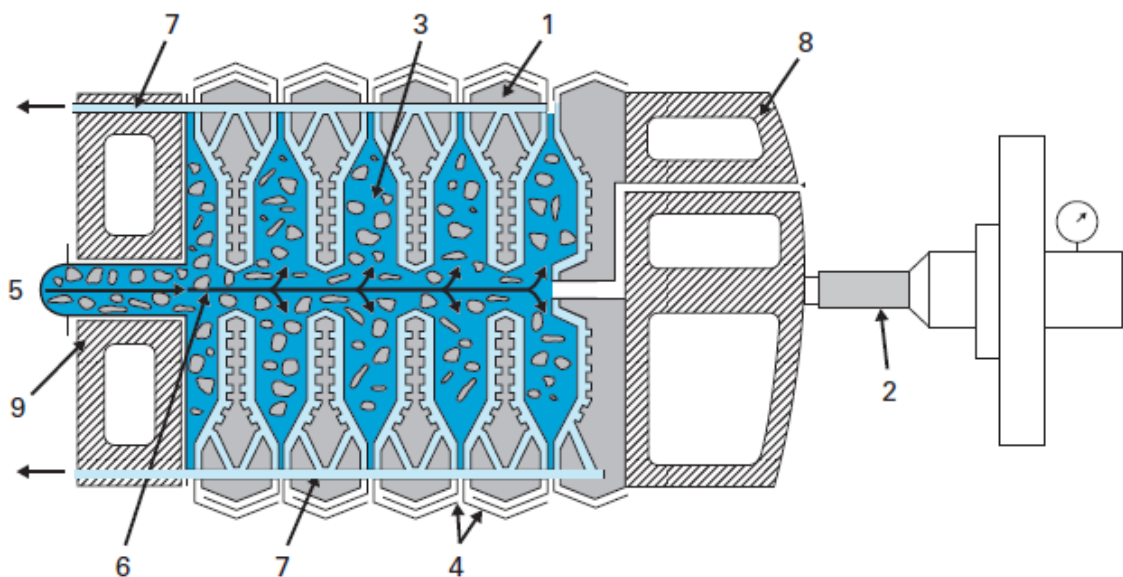


Obrázek 24: Komorový kalolis s horním svorníkem. Zdroj: Delta Enviro.

Otevírání a roztahování desek pak může být ruční nebo automatické. Otevření kalolisu slouží k vyprázdnění odfiltrovaného kalu, který má ve formě filtračních koláčů vypadnout gravitačně z kalolisu na pásový dopravník nebo meziskládku. V některých situacích koláč samovolně nevypadne a proto je nutné desky oklepat. Oklep desek buď provádí obsluha, nebo musí být kalolis vybaven automatickým oklepem. Některé kalolisy jsou vybaveny vedením pro proplach filtračního koláče a regeneraci filtračních plachetek.

Komorový kalolis

Komorový kalolis je v současné době převládajícím typem kalolisu v průmyslu. Konstrukce rámu a pomocných zařízení kalolisu je podobná s ostatními typy. Základním rozdílem mezi jednotlivými typy je řešení filtračního prostoru. Filtračním prostorem jsou v případě komorového kalolisu filtrační komory (obr. 21). Komory jsou tvořeny deskami, které jsou navrženy tak, aby po jejich vzájemném přitlačení k sobě, vznikly komory o potřebném objemu (Slivka 2002). Toho je docíleno vhodným geometrickým tvarem desek, kde jejich okraje mají větší šířku než zbylá plocha desky. Sousední desky se k sobě přitlačí okraji natěsno, ale prostor mezi deskami zůstane prázdný. Sečtením hloubek obou desek získáme šířku filtrační komory.



Obrázek 25: Schéma filtračního prostoru zavřeného komorového kalolisu. 1- deska, 2- hydraulický píst, 3- filtrační komora, 4- přehnutá filtrační plachetka, 5- vstup kalu, 6- přívodní kanál, 7- kanál pro odvod filtrátu, 8- posuvná část rámu kalolisu, 9- pevná část rámu kalolisu Zdroj: Degremont.

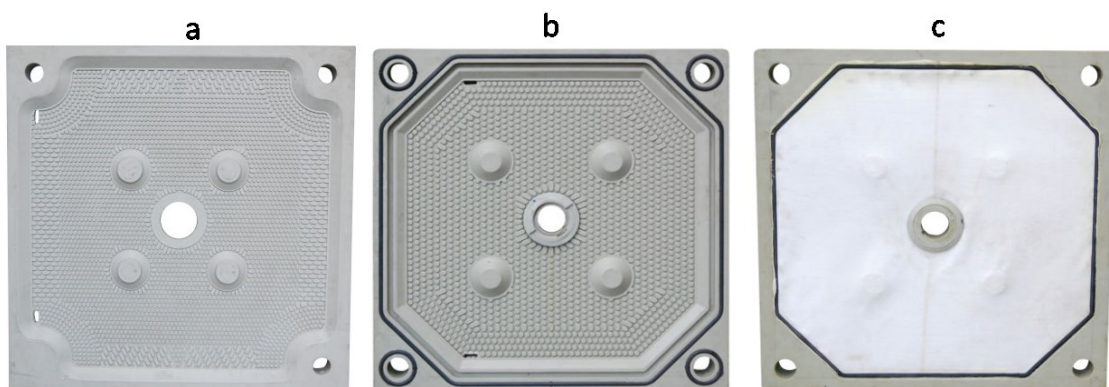
Povrch desek, který tvoří stěny komor, je upraven kanálky pro drénování přefiltrované vody. Desky jsou celé nebo jen částečně obaleny ve filtrační plachetce, která tvoří filtrační membránu. Materiál, z kterého je vyrobena plachetka, je zvolen v závislosti na vlastnostech odvodňované suspenze. V současnosti se používají plachetky z různých, převážně syntetických, materiálů. Také materiál pro výrobu desek může být různý, rozhodující je stejně jako v případě plachetek pro jakou suspenzi bude kalolis určený. Pro odvodňování kalů z těžby písků se často používá polypropylen jak pro výrobu desek, tak i pro výrobu plachetek. Pro různá průmyslová odvětví se vyrábějí desky z mnoha různých materiálů. Například NBR, EPDM, PVDF, nerezová ocel, hliník a další. Rozměr jednotlivých desek a tedy i filtrační plocha nebo objem komor se stanovuje pro každé použití individuálně. Běžně nabízené kalolisy jsou s deskami o rozměrech od 200x200mm u menších zařízení, až například 2000x2000mm u zařízení relativně velkých. Výrobci ale nabízejí i zařízení s deskami většími. Tloušťka desek se standardně pohybuje v rozmezí 15-50mm. Filtrační komory mají u běžných kalolisů šířku mezi 10-50mm a objem řádově od 15dm³ do 10000dm³. Protože v kalolisu je umístěno velké množství filtračních desek těsně za sebou, má zařízení poměrně velkou filtrační plochu vzhledem k velikosti celého zařízení ve srovnání s některými jinými filtračními technologiemi.

Desky mají standardně jeden větší vstup pro kal a jeden nebo dva výstupy pro filtrát. Umístění vstupu a výstupů může být různé. Výstupy filtrátu bývají v rozích nebo jinde při okraji desky. Vstup kalu je velmi často ve středu desky nebo v některé z rohových částí. Během pracovního cyklu jsou k sobě jednotlivé desky těsně přitlačeny. Přítlak u moderních kalolisů obstarává hydraulický píst, který na desky vyvíjí uzavírací tlak až 30MPa. Vstup kalu a výstupy filtrátu jednotlivých desek pak po přitlačení desek k sobě tvoří souvislé kanálky. Výrobci rozlišují dva způsoby odvodu filtrátu. Pokud jsou výstupní kanálky jednotlivých desek spojeny a výstup filtrátu není z každé desky zvlášť, pak se jedná o uzavřený systém. Jestliže výstupy jednotlivých desek nejsou spojeny ale filtrát z každé jednotlivé desky ústí rovnou do odtoku odtokového žlabu kalolisu, pak se jedná o otevřený systém.

Moderní komorové kalolisy používají dva druhy desek, které se liší v osazení filtrační plachetkou. Základním typem jsou desky zapuštěné (obr. 26a). Na obvodu mají silný okraj a ve zbytku plochy desky je vybrání s rýhováním. Zapuštěné desky se obalují

do filtrační plachetky celé. Na styku dvou desek jsou k sobě desky přitlačeny přes filtrační plachetky.

Druhým typem desek pro komorové kalolisy jsou desky těsněné (obr. 26b,c). Podél zesíleného vnějšího okraje mají drážku na těsnění. Vybrání desky má standardní rýhování. Filtrační plachetka nezakývá celou desku, ale jen rýhované prohloubení. Sousední desky jsou k sobě přitlačeny přes pružné těsnění, které zároveň přimačkává filtrační plachetku k desce. Výhodou těchto desek je dle výrobce (Auro Filtration) lepší těsnost zavřeného kalolisu.



Obrázek 26: Desky komorového kalolisu. Zleva: zapuštěná deska, těsněná deska, těsněná deska s filtrační plachetkou Zdroj: Auro Filtration.

Proces odvodnění v komorovém kalolisu

V první fázi je kalolis uzavřen, desky jsou pevně přitlačeny k sobě a jejich otvory tvoří souvislé kanálky. Středovým nebo jinak umístěným přívodním kanálkem je čerpadly do soustavy desek přivedena suspenze k odvodnění. Komory tvořené deskami se zaplní a voda se začíná filtrovat přes filtrační plachetku a po rýhovaných stěnách desek odtéká do odvodního kanálku. Během filtrace se na plachetce zachycují pevné částice a tvoří se vrstva filtračního koláče. S narůstající vrstvou roste filtrační odpor a pro zachování průtoku je nutné zvyšovat filtrační tlak. Postupně je dosaženo maximálního plnicího tlaku, který moderních komorových kalolisů dosahuje až 3MPa. Filtrační komory se zaplní pevnými látkami a průtok filtrátu klesne. Následně je ukončena fáze plnění, další kal už se do systému netlačí. Po ukončení fáze filtrace může dojít ke snížení tlaku v systému na původní hodnotu před začátkem filtrace. Zbytky

kalu v kanálkách jsou vyfouknuty stlačeným vzduchem a kalolis se může otevřít. Dojde z uvolnění hydraulického přitlaku na desky a jejich roztažení. Pevné látky nahromaděné ve filtračních komorách mezi deskami pak ve formě filtračních koláčů gravitačně vypadnou z kalolisu

Rámový kalolis

Konstrukce rámového kalolisu je velmi podobná komorovému a membránovému kalolisu. Zásadní odlišnost je v uspořádání pracovního prostoru. Na rozdíl od ostatních dvou typů kalolisů, rámový kalolis se kromě desek skládá ještě z ráků (Nováček 1998). Desky a ráky jsou střídavě umístěny za sebou. Dvě sousední desky a mezilehlý rám tvoří filtrační komoru. Filtrační plachetka je napnutá na povrchu desek a přehnutá přes okraj ráků (Wills 1992). Jednotlivé desky a ráky jsou k sobě přitlačeny přes filtrační plachetku. Povrch desek je rýhován pro lepší odvod filtrátu. Rozměry filtračních desek a ráků jsou standardně od 400x400mm do 1500x1500mm, pro speciální potřeby a velké objemy se ale vyrábějí i zařízení větších rozměrů, případně pro malé objemy menších rozměrů. Filtrační plachetka může být stejně jako u komorových kalolisů vyrobena z nejrůznějších materiálů, nejběžnější je polypropylen. Desky a ráky jsou často vyrobeny z plastu. Standardní je stejně jako u plachetek polypropylen, používají se ale i jiné plastické hmoty jako například NBR, EPDM, PVDF. Pro některé aplikace mohou být desky a ráky vyrobeny z kovů. Desky jsou opatřeny otvory pro vstup kalu, výstup filtrátu, případně také pro vstup a výstup promývacího média. Po seřazení desek a ráků za sebe a jejich těsnému přitisknutí tvoří otvory souvislé kanálky (Nováček 1992). Kanálky výstupu filtrátu mohou ústít z každé desky rovnou ven, pak se jedná o otevřený odvod filtrátu. Pokud jsou jednotlivé kanálky výstupu filtrátu propojeny, tvoří uzavřený odvod filtrátu. Přítlak jednotlivých desek a ráků k sobě může být řešen mechanicky přes závit nebo hydraulicky.

Proces odvodnění v rámovém kalolisu

Rámový kalolis pracuje stejně jako ostatní kalolisy v cyklech. U moderních zařízení je snaha o co největší automatizaci a nejmenší nároky na obsluhu. Kal je ve formě suspenze čerpán do zavřeného kalolisu. Jednotlivé desky a rámy jsou k sobě těsně přitlačeny, v případě moderních kalolisů stejně jako u ostatních typů hydraulickým tlakem více než 30MPa. Kal protéká otvory v rozích desek a ráků, které tvoří souvislé kanálky ústící do jednotlivých komor. Prostor tvořený rámem se postupně zaplňuje a dochází k filtraci na filtrační plachetce. Přefiltrovaná voda prochází skrz plachetku a po rýhovém povrchu desky odtéká do odvodního kanálku (Wills 1992). Pevné částice se zachycují a vytvářejí filtrační koláč. Filtrát je sváděn kanálky a potrubím z desek a kalolisu pryč. Pevné látky zůstávají ve formě filtračního koláče zachycené v prostoru ohraničeném rámem a deskami. V počátku filtrace je průtok suspenze konstantní. Postupně dochází k nárůstu vrstvy filtračního koláče a vzrůstu filtračního odporu. Tlak v systému se během filtrace zvyšuje, až dojde k dosažení maximálního přednastaveného filtračního tlaku. Probíhá filtrace při konstantním tlaku. Průtok filtrátu postupně pomalu klesá (Nováček 1998). Moderní rámové kalolisy pracují s filtračními tlaky řádově 0,6-1,5MPa. Po zaplnění ráků filtračním koláčem a nárůstu filtračního odporu natolik, že je průtok filtrátu dostatečně nízký dojde k ukončení filtračního cyklu.

V následné fázi může začít promývání filtračního koláče, pokud je žádoucí. Desky a rámy jsou opatřeny zvláštními promývacími otvory, které při zavřeném kalolisu tvoří promývací kanálky. Skrze kanálky je do desek přivedena promývací kapalina, která se tlačí přes filtrační koláč a tím jej proplachuje. Při požadavku na velmi nízký zbytkový obsah vody ve filtračním koláči je možné stejným způsobem do systému pustit stlačený vzduch a tím filtrační koláč zbavit zbytků vody a dosušit. Dále může dojít k vyfouknutí nepřefiltrovaného kalu z přívodního kanálu.

Nakonec je uvolněn přitlak a desky s rámy jsou od sebe odtaženy. Odtahování probíhá často po sériích několika desek postupně. Odfiltrované pevné látky ve formě filtračního koláče jsou nakonec odstraněny z ráků.

Membránový kalolis

Základní konstrukce membránového kalolisu je velmi podobná komorovému i rámovému typu. Membránový kalolis by se dal označit za pokročilejší komorový kalolis. Hlavní odlišnost je v uspořádání filtračního prostoru a filtračních deskách. Konstrukčně membránové desky vycházejí z desek komorového kalolisu. Membránové desky jsou však navíc vybaveny pružnou membránou, jejímž účelem je po natlakování kapalinou nebo vzduchem mechanické vytlačení vody z filtračního koláče. V zásadě se používají dva druhy membránových desek. Desky s pevnou membránou jsou takové, kde je pružná membrána rovnou pevnou součástí desky. Druhým typem desek jsou desky s výměnnou membránou. Standardní materiál pro výrobu desek a membrán je polypropylen, pro speciální aplikace se ale používají i další materiály na bázi plastů.

V zavřeném stavu jsou k sobě desky těsně přitlačeny a jednotlivé otvory pro vstup kalu a výstup filtrátu tvoří souvislé kanálky. Přítlak desek je vyvozován buď mechanicky, nebo hydraulicky. Jako u ostatních moderních automatických systémů je hydraulický tlak až 30MPa. Pracovní prostor membránového kalolisu je vymezen dvěma deskami s vybráním a membránou. Drenážní rýhování je na povrchu membrány. Celá deska je pak potažena filtrační tkaninou. Šířka komor mezi deskami je standardně od 30-50mm. Přívod kalu může být středový nebo v rohu desky. Odvod filtrátu bývá umístěn standardně při okraji desky. Pracovní tlak při filtraci je standardně 0,8MPa. Membrány se tlakují řádově na 1,5MPa, u některých modelů až do 3MPa.

Díky možnosti využít taku membrány na filtrační koláč, dosahuje dle výrobců (např. Andritz) membránový kalolis vyššího obsahu sušiny ve filtračním koláči než komorový nebo rámový kalolis. Zařízení o stejném výkonu tak může být menší. Doba, za jakou proběhne filtrační cyklus, by měla být také nejpříznivější u membránových kalolisů. Díky možnosti řízení přítlaku membrány je účinnější i promývání filtračního koláče. V neposlední řadě jsou membránové kalolisy méně choulostivé na nepravidelné vlastnosti (obsah pevných částic) v přiváděné suspenzi.

Výhody membránových kalolisů jsou na druhé straně vykoupeny vyššími vstupními náklady na plně membránové zařízení způsobené vyšší cenou membránových desek. V praxi se tak často používá takzvaných smíšených svazků. V kalolisu jsou použity jak standardní komorové desky používané v komorových

kalolisech, tak desky membránové. Výsledná účinnost kalolisu bude vyšší než u komorového, ale pořizovací náklady budou nižší než u kompletně membránového kalolisu.

Proces odvodnění v membránovém kalolisu

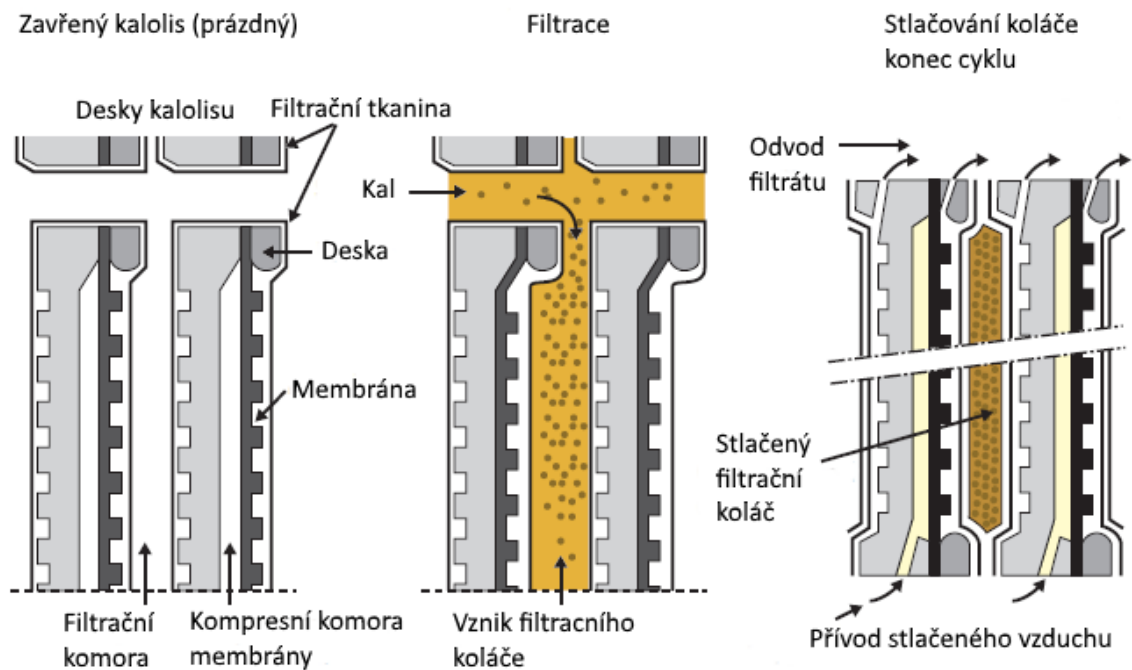
Stejně jako ostatní typy i membránový kalolis (obr. 27) pracuje v cyklech. Moderní zařízení jsou plně automatizována. Zavření a plnění kalolisu probíhá stejně jako u ostatních typů. Kal je do zavřeného kalolisu čerpán skrz vstupní otvory desek a dál rozváděn systémem kanálků. Filtrační komory se zaplní a voda se začne filtrovat přes filtrační plachetky natažené přes rýhované membrány desek. Dochází k zachytávání pevných látek na filtrační tkanině a tvorbě filtračního koláče. Filtrační odpor roste, tlak v systému stoupá a průtok klesá. Maximální filtrační tlak, kterým tlačí čerpadla kal do kalolisu, bývá řádově 0,8MPa. Po dosažení maximálního filtračního tlaku a snížení průtoku pod stanovenou mez je čerpání kalu zastaveno. Filtrační komory jsou v této fázi plné odfiltrovaného kalu v podobě filtračního koláče. Následné postupy se liší podle toho, zda má dojít k promytí filtračního koláče či nikoliv.

Pokud není promytí koláče nezbytné, po přerušení čerpání kalu do zařízení je zahájeno napouštění vody nebo vzduchu do prostoru mezi membránou a deskou. Médium se pouští pod membránu až do dosáhnutí hodnoty maximálního tlaku. Pružná membrána se tak deformuje a vyklenuje do prostoru filtrační komory, přičemž přes filtrační plachetku tlačí na filtrační koláč. Tím je z koláče vytlačována zbylá voda. Běžné maximální plnicí tlaky membrán jsou 1,5MPa, nabízejí se ale i zařízení s možností vyvinout tlak dvojnásobný. Po dosažení maximálního tlaku a vytlačení zbylé kapaliny je vyfouknut zbytek kalu z přívodního kanálku. Následně dojde k otevření kalolisu a roztažení desek. Pevné látky ve formě filtračního koláče gravitačně vypadnou z kalolisu. Případně jsou vyklepnuty oklepovým zařízením nebo ručně.

V případě, že je nutné promytí filtračního koláče, postup tlakování membrány je tomu přizpůsoben. Po zastavení čerpání kalu do systému dojde k natlakování membrány jen na určitý požadovaný tlak, ale nikoliv na maximální. Z filtračního koláče je tak vytlačena jen část kapaliny. Následně začne promývání. Pokud jsou desky vybaveny promývacími kanálky, pak je přes ně do prostoru komor pouštěna promývací

kapalina. Místo promývacích kanálů je také možné využít kanálků pro odvod filtrátu. V takovém případě je pak promývací kapalina napouštěna vždy ob jednu desku a ob desku vytéká. Díky přítlaku desek se snižuje obtok koláče a promývání je tak efektivnější než u desek bez membrán. Po ukončení promývání je zvýšen tlak membrán na maximální hodnotu. Tím dojde k vytlačení zbylé promývací kapaliny z filtračního koláče. Následně je vyfouknut kal z přívodních kanálků. Před otevřením kalolisu je ještě nutné vypustit médium, které tlakuje membrány a snížit tak tlak. Nakonec dojde k otevření kalolisu a odstranění filtračního koláče.

Jestliže je nutné filtrační koláč dále dosušit, místo promývací kapaliny je do systému vháněn stlačený vzduch. Dosoušení se zpravidla používá po promytí koláče.



Obrázek 27: Průběh filtrace na membránovém kalolisu. Zdroj: Degremont.

8.2 Pásové filtry

Pásové filtry jsou kontinuálně pracující filtrační zařízení. Rozlišujeme dvě základní konstrukční řešení.

- Podtlakové pásové filtry
- Přetlakové pásové filtry

Podtlakový pásový filtr

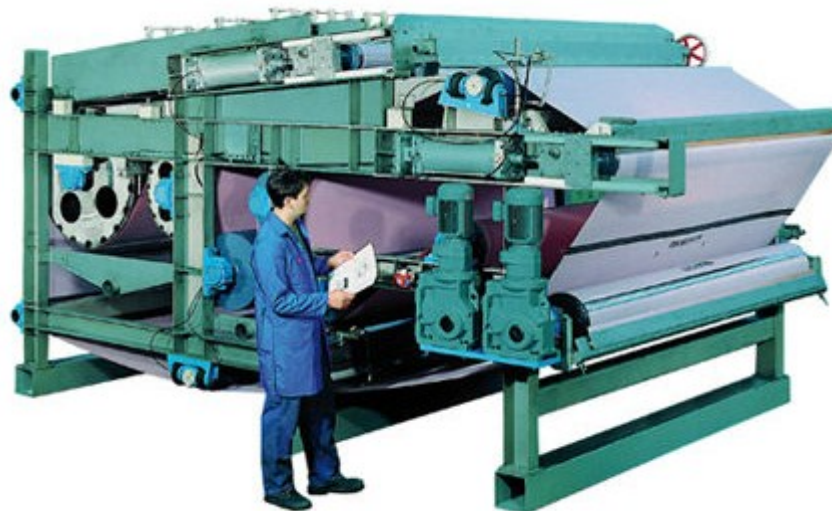
Podtlakový pásový filtr je relativně jednoduché filtrační zařízení, které se podobá pásovému dopravníku. K získání požadovaného rozdílu tlaku před a za filtrační přepážkou je v tomto případě dosahováno pomocí vakuových pump vyvolávajících podtlak ve vakuové komoře, kterou pás během provozu prochází. Pás má perforace pro spojení s vakuovou komorou a jeho povrch je rýhován. Celý je navíc obepnutý filtrační tkaninou. Kal k filtraci je rovnoměrně podáván na pás. Filtrace probíhá podtlakem, kdy pás ve své horní části prochází přes vakuovou komoru, která skrz perforaci v pásu odsává přes filtrační tkaninu kapalinu ze směsi. Díky rýhování pásu pod tkaninou může voda dobře odtékat. Na pásu během průchodu vakuovou zónou vzniká filtrační koláč. Pás se točí v nekonečné smyčce, čehož je využito k odstranění filtračního koláče z pásu. Odvodněný filtrační koláč se samovolně uvolní z pásu v místech, kde se pás ohýbá přes buben a pokračuje nazpět k přívodu suspenze. Podtlakové pásové filtry se ale příliš nehodí k odvodnění nejjemnějších kalů.

Tlakový pásový filtr

Přetlakové pásové filtry (obr. 28) jsou poměrně rozšířená zařízení v mnoha průmyslových odvětvích. Jedná se o kontinuálně pracující filtrační zařízení, kde je k vyvolání tlakového rozdílu před a za filtrační přepážkou využíváno mechanického tlaku. V praxi se tlakové pásové filtry často nazývají sítopásové lisy. Pro odvodnění na sítopásovém lisu je velmi často nutné suspenzi předupravit. Cílem předúpravy suspenze je zahustit kal k optimální funkci lisu. Zařízení k zahuštění mohou být součástí

lisu nebo fungovat jako samostatná předřazená zařízení. V procesu předúpravy je zpravidla dávkováno množství flokulačního činidla a suspenze je tak částečně odvodněna. Smyslem předodvodnění je dávkovat do lisu optimální suspenzi pro práci lisu a zároveň snaha dávkovat suspenzi konstantními vlastnostmi v čase.

Filtrační prostor sítopásových lisů je tvořen dvojicí nekonečných pásů navinutých ve stroji. Pásky fungují jako filtrační přepážky, jsou vyrobeny z různých materiálů dle požadavků na odvodnění a vlastností suspenze. Běžné materiály jsou PP nebo PET, ale i jiné umělé hmoty. U výběru vhodných pásů je nutné zkombinovat několik faktorů. Základní jsou filtrační vlastnosti pro danou suspenzi. Stejně jako u filtračních tkanin kalolisů musí být filtrační pásy propustné, ale zároveň mít schopnost zachytit i nejmenší pevné částice. Filtrační pás v sítopásovém lisu je ale mechanicky značně namáhán. Během procesu filtrace je v pohybu, a proto je důležitá i jeho odolnost proti otěru, mechanická pevnost a rozměrová stálost. Moderní pásy mohou kombinovat několik materiálů, typů vláken i vazeb tkaniny. Pásky se vyrábějí buď rovnou jako nekonečné se zapletenými spoji nebo jsou opatřené rozebíratelným spojem. U rozebíratelných pásů je výhodná jejich zjednodušená instalace. Nekonečně zapletené pásy s vetkanými spoji se vyznačují větší pevností (Chen 2002).



Obrázek 28: Sítopásový lis. Zdroj: Direct Industry.

Průběh odvodnění na sítopásových lisech

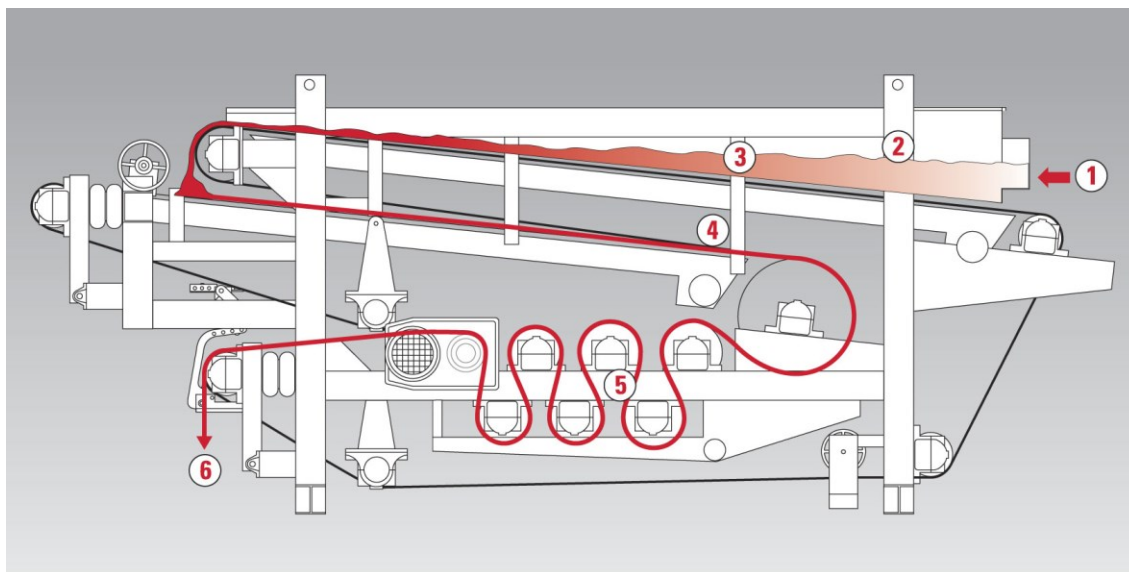
Proces odvodnění na sítopásových lisech dělíme do čtyř sekcí (obr. 29). Nejprve dochází k homogenizaci kalu za použití flokulačního činidla. Už během homogenizace může dojít k odstranění části vyčiřené vody. K homogenizaci a aplikaci flokulačních činidel se používá rotujících bubnů, homogenizačních nádrží nebo například usazovacích nádrží, kde dojde k rychlé sedimentaci pevných částic a vyčiření části vody ze suspenze.

Z homogenizační nádrže pak pokračuje předzahustěný kal do sítopásového lisu k odvodnění. Kal je rozlíván na pohybující se pás, kde dochází ke gravitačnímu filtrování prvního množství vody skrz pás. Tato první nátoková část lisu se nazývá gravitační zóna. Na rozlívání kalu zatím nepůsobí žádné mechanické síly.

Následně je kal na pásu dopraven do nízkotlaké zóny. Zde přijde do styku i s druhým pohyblivým pásem. Někdy se tato zóna označuje jako klínová. Kal je stlačován do klínu mezi dva pohyblivé pásy a pokračuje dále už sevřený mezi filtračními pásy.

Pásy se k sobě dále přibližují a přicházejí do vysokotlaké zóny. Procházejí přes soustavu válců, které pás stlačují. S každým dalším válcem se zvyšuje tlak, který na pásy působí. Tímto způsobem dochází k vymačkání vody z kalu skrze pásy. Odvodněná pevná fáze se po výstupu z vysokotlaké zóny z pásu odloupne a odpadáva za stroje pryč. Pás nakonec prochází skrz oplach, kde je proudem vody očištěn a následně je na něj znovu rozhrnut kal. Pás se točí ve stroji nepřetržitě ve smyčce, kontinuálně je přidáván kal a kontinuálně odpadáva odvodněný materiál. Vytlačená voda je žlaby a potrubím odváděna ze stroje. Odvodněný kal padá do kontejnerů nebo na dopravníkový pás.

Rychlost jakou se pás pohybuje je u různých typů a výrobců odlišná, řádově se ale jedná o stovky metrů za hodinu. Lisovací tlak jakému je kal vystaven, závisí na nastavení a konkrétním modelu stroje. Běžně ale sítopásový lis dosahuje 3MPa.



Obrázek 29: Schéma fungování pásového lisu. 1- přívod kalu, 2- distribuční prostor, 3- gravitační zóna, 4- klínová zóna, 5- vysokotlaká zóna, 6- vývod odvodněného materiálu. Zdroj: Minco Tech

8.3 Bubnové a kotoučové filtry

Bubnové filtry (obr. 30) jsou jedny z nejstarších průmyslově používaných typů filtrů. Jedná se o filtrační zařízení s kontinuálním provozem (Wills 1992). Bubnové a kotoučové filtry se mírně konstrukčně liší, jejich principy fungování jsou ale stejné.



Obrázek 30: Vakuový bubnový filtr. Zdroj: Komline-Sanderson.

Podle způsobu vyvolávání rozdílů tlaků před a za filtrační přepážkou rozlišujeme:

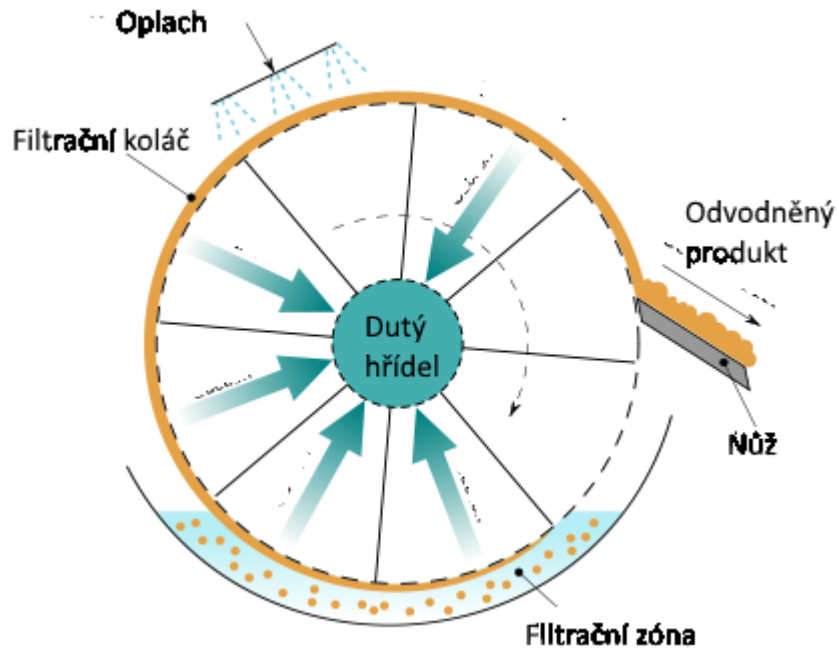
- Vakuové bubnové filtry
- Vakuové kotoučové filtry
- Tlakové bubnové filtry
- Tlakové kotoučové filtry

Vakuové bubnové filtry

Základem zařízení je horizontálně uložený buben, který je uvnitř rozdělen na několik samostatných komor (obr. 31). Skrz buben prochází dutý hřídel, který je propojený s komorami. Čela jsou uzavřena. Jednotlivé komory je možné přes hřídel připojit k vývěvě, jako zdroji podtlaku. Povrch bubnu je perforovaný a obalený ve filtrační tkanině (Slivka 2002). Buben je položen v nádrži a částečně ponořen do suspenze určené k odvodnění. Proces odvodnění probíhá ve fázích. Buben se pomalu otáčí na hřídeli. V komoře, která je ponořena do suspenze, je vytvořen podtlak. Kal je nasáván přes filtrační tkaninu, voda prochází skrz, ale pevné látky se zachycují a vytvářejí filtrační koláč. Jak se buben otáčí, filtrační koláč je na povrchu bubnu vnesen nad hladinu kalu v nádrži. Z koláče je podtlakem neustále odsávána kapalina. V další fázi může projít promýváním, kdy je na povrch koláče přiváděna promývací kapalina a za stálého podtlaku v komoře dojde k propláchnutí koláče promývací kapalinou. Pak je z koláče odsán i zbytek promývací kapaliny a do části bubnu pokryté promytým a odvodněným filtračním koláčem je místo podtlaku přiveden přetlak. Tím dojde k odfouknutí koláče z povrchu bubnu. Odfouknutí může probíhat při současném stírání koláče stíracím nožem. Následně může dojít ještě k regeneraci filtrační tkaniny oplachem. Poté se tkanina opět ponoří do nádrže s kalem a celý proces se opakuje.

Umístění filtrační tkaniny na vnější straně bubnu má v některých případech nepříznivý vliv na tvorbu filtračního koláče. Pod tlakem jsou nejdříve nasávány lehčí a menší částice, které vytvoří velmi jemnou vrstvičku s velkým filtračním odporem. Odpor koláče se pak rychle zvětšuje. Tuto nevýhodu může eliminovat umístění filtrační

tkaniny na vnitřní straně bubnu a napuštění kalu k filtraci zevnitř bubnu. Při takovém konstrukčním řešení dochází nejprve k zachytávání hrubších částic, to má za následek příznivější tvorbu filtračního koláče. Zařízení s vnitřní filtrační přepážkou jsou ale podstatně konstrukčně a provozně náročnější (Wills 1992).



Obrázek 31: Schéma vakuového bubnového filtru. Zdroj: Saraswathi (2016).

Vakuové kotoučové filtry

Na stejném principu jako bubnové vakuové filtry pracují i kotoučové vakuové filtry (obr. 32). Nejedná se ale o buben, na kterém dochází k filtraci nýbrž o soustavu disků, které jsou ve svých středech spojeny. Jednotlivé disky jsou rozdělené na segmenty, ve kterých je nezávisle možné vyvíjet podtlak nebo přetlak. Celé disky jsou pak potaženy filtrační tkaninou stejně jako buben. Filtrační plocha je ale při stejných rozměrech zařízení oproti bubnu podstatně větší. Samotný filtrační cyklus se od zařízení s bubnem výrazně neliší. Nádrž s kalem, ve které jsou disky částečně ponořeny, je přizpůsobena svým tvarem diskům. Na straně, kde dochází k odfuku a seškrabávání filtračního koláče má nádrž výsypku po které filtrační koláč může vypadávat.

Výhody kotoučových filtrů oproti bubnovým jsou hlavně ve velikosti filtrační plochy při zachování stejných rozměrů zařízení a možnosti odstavení pouze jednotlivých disků například při porušení filtrační tkaniny (Nováček 1998).



Obrázek 32: Vakuový kotoučový filtr. Zdroj: Huate.

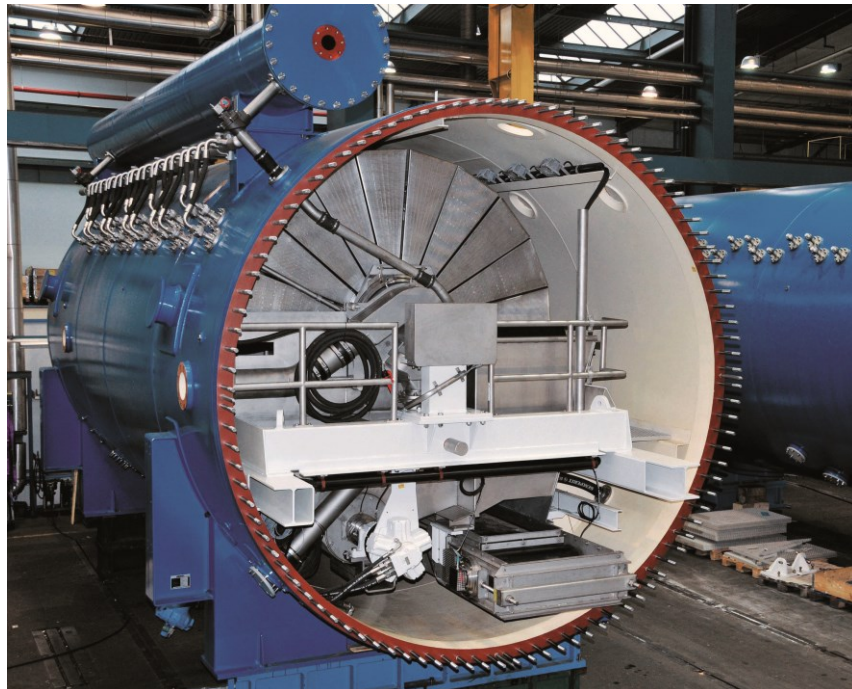
Tlakové bubnové filtry

Princip fungování tlakových bubnových filtrů je velmi podobný s filtry podtlakovými. Výhodou tlakových bubnových filtrů oproti podtlakovým je větší tlakový rozdíl tlaků, kterých je možné před a za filtrační přepážkou dosáhnout. Díky tomu je možné docílit nižší výsledné vlhkosti filtračního koláče. Nicméně pořizovací a provozní náklady tlakových filtrů jsou podstatně vyšší (Nováček 1998). Celý buben včetně nádrže a zařízení k odstranění filtračního koláče musí být uzavřen v hermeticky těsné tlakové nádobě. V tlakové nádobě je udržován vyšší tlak než v bubnu. Kal je do nádrže k odvodnění přiváděn rovněž pod zvýšeným tlakem. Do tlakové nádoby je také nutné přivádět tlakový vzduch. Tlak okolo bubnu je pak vyšší než tlak uvnitř něho. Tím dochází k filtraci kapaliny do bubnu přes filtrační přepážku stejně jako u podtlakových filtrů. Při smočení filtrační přepážky v kalu se na části bubnu ponořené do kalu tvoří vlivem rozdílu tlaků filtrační koláč. Následně je vyzdvižen z nádrže, promyt a odfouknut nebo seškrábnut z povrchu bubnu. Filtrát odchází z tlakové nádoby ventilem skrz hřídel bubnu. Filtrační koláč musí být z tlakové nádoby odstraněn tak, aby nedošlo

k výraznému poklesu vnitřního tlaku. K tomu slouží buď speciální utěsněný šroubovicový dopravník, nebo speciální vypustný ventil (Nováček 1998)

Tlakové kotoučové filtry

Tlakové kotoučové filtry (obr. 33), stejně jako bubnové, vycházejí konstrukčně z filtrů podtlakových. Kotouče filtrů jsou spolu s nádrží na kal umístěny v tlakové nádobě, kde probíhá filtrace. Kal je do nádrže přiváděn pod zvýšeným tlakem a celá nádoba je navíc tlakována vzduchem. Filtrace probíhá díky rozdílům tlaků uvnitř nádoby a uvnitř kotoučů, kdy před filtrační přepážkou, tvořenou kotouči potaženými filtrační tkaninou, je oblast s vyšším tlakem než za přepážkou. Filtrační cyklus probíhá stejně jako u vakuové verze filtru. Odvod filtrátu je řešen skrz hřídel procházející kotouči. Výstup odvodněného kalu musí být z důvodu zachování přetlaku řešen těsněným šnekovým dopravníkem nebo speciálním dvojitým ventilem stejně jako u přetlakového bubnového filtru (Nováček 1998).



Obrázek 33: Hyperbarický kotoučový filtr v přetlakové nádobě. Zdroj: Andritz.

9 Odvodňování odstředivou silou

Metody odvodňování založené na využití odstředivé síly jsou poměrně hojně průmyslově využívány. Pro odvodňování hrubozrnných produktů těžby nebo volné vody z jemnozrnných materiálů často stačí využití gravitační síly. V případě účinného odvodňování jemnozrnných materiálů jako jsou například i kaly z těžby sklářských písků, je ale gravitační síla k porušení vazby jemných částic a vody nedostatečná. Proto se používá uměle generované síly odstředivé, která může dosahovat až několikatisícinásobku zemského gravitačního zrychlení a tím na materiál vyvodit mnohonásobně větší sílu (Holbein 1983). Zařízení využívajících primárně odstředivé síly se ve zpracování těžných písků využívá několik. K třídění písků na různé frakce mokré provozy využívají Humpřeho spirály nebo hydrocyklóny. Zařízení určená primárně k odvodňování jsou odstředivky. Rozlišujeme dva základní typy:

- Filtrační odstředivky
- Sedimentační odstředivky

9.1 Filtrační odstředivky

Filtrační odstředivky pracují na principu filtrace přes filtrační přepážku. Rozdíl tlaků před a za přepážkou je způsoben odstředivou silou. Během procesu odvodňování zároveň probíhá proces filtrace. U nejjemnějších kalů může být problém s průchodem pevných částic skrz otvory sít nebo filtrační přepážku (Slivka 2002). Dle konstrukčního řešení buď vzniká filtrační koláč, který je nutné odstranit, nebo jsou odfiltrované pevné látky ze zařízení kontinuálně vyhrnovány. Využití filtračních odstředivek pro odvodňování jemnozrnných suspenzí je silně limitováno malou velikostí pevných částic.

Bubnová filtrační odstředivka / vyřezávací odstředivka

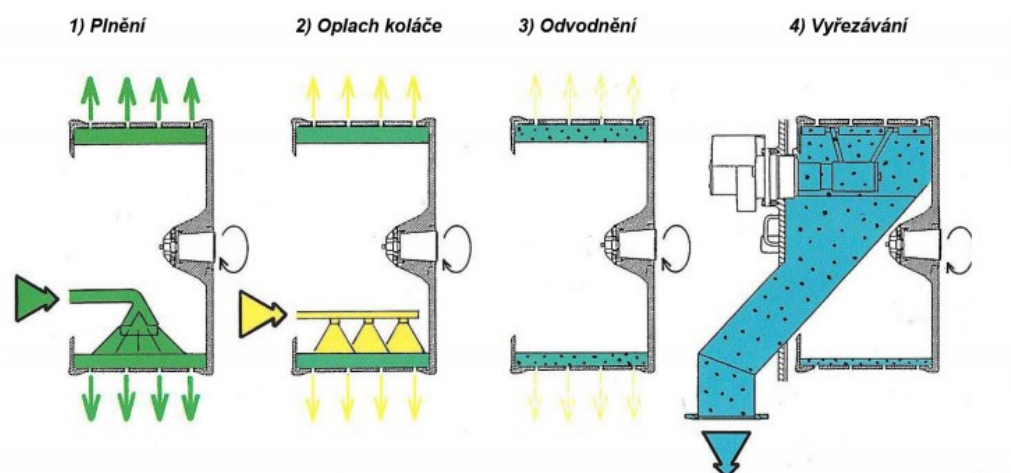
Vyřezávací odstředivka je polokontinuálně pracující zařízení, sestávající z horizontálně nebo vertikálně umístěného bubnu, do kterého je přiváděn kal k filtraci.

Buben může být perforovaný a vystlaný filtrační tkaninou nebo vyroben z hustého síta, které svými filtračními vlastnostmi nahrazuje filtrační tkaninu. Pracovní cyklus zařízení je možné rozdělit do čtyř základních fází (obr. 34). Fáze plnění, promytí koláče, odvodnění a vyřezávání. Pracovní cyklus tedy probíhá následovně:

Do roztočeného bubnu je nejprve přivedena suspenze kalu. Následně dojde ke zvýšení otáček bubnu a za působení odstředivé síly je voda filtrována přes filtrační přepážku. Na přepážce se zachytávají pevné látky a tvoří se filtrační koláč. Přívod kalu je přerušen a při maximálních otáčkách je z filtračního koláče odstředěno maximální množství vody.

Pokud je požadavek na promytí koláče, do bubnu je při stálé rotaci přivedena promývací kapalina, která prochází skrz filtrační koláč a filtrační tkaninu. Koláč je tímto způsobem pročištěn. Následně je přívod promývací kapaliny přerušen a za stálých maximálních otáček je z koláče odstředěna zbytková kapalina. Odvodněné pevná fáze tak ve formě filtračního koláče zůstává na stěnách bubnu. Odstranění koláče z bubnu probíhá vyřezáváním (Wakeman 2005). Do bubnu je automaticky zasouván vyřezávací nůž, který za stálého otáčení bubnu ze stěn odstraňuje koláč. Jakmile je koláč odstraněn, celý cyklus se opakuje.

Protože vyřezávání koláče probíhá mechanicky, mezi vyřezávacím nožem a filtrační přepážkou zůstává drobná mezera. Po vyřezání koláče pak v bubnu zůstává vrstvička filtračního koláče, kterou se nepodařilo vyříznout. Po vyřezávání tak ještě může následovat odstranění této vrstvičky stlačeným vzduchem. Tento proces může být prováděn až po několika cyklech vyřezání v závislosti na množství zbytkového koláče a tím ovlivněné filtraci.



Obrázek 34: Princip odvodnění horizontální vyřezávací odstředivkou. Zdroj: Rousselet Robotel.

Vibrační filtrační odstředivka

Vibrační odstředivka pracuje kontinuálně. Vyrábí se jako jednostupňová, složená ze dvou do sebe vložených válcových bubnů, nebo vícešupňová složená z více bubnů. Bubny o odlišných průměrech jsou v sobě vloženy a společně se otáčejí stejnou rychlostí. Jsou perforovány a vystlány filtrační tkaninou nebo přímo tvořeny jemnou perforovanou mřížkou, která má nahradit filtrační tkaninu. Suspenze k odvodnění musí být často dopředu zahuštěna, protože správné fungování zařízení je závislé na stálých vlastnostech přiváděného kalu. Přítok a množství tuhé fáze v suspenzi by měl být co nejvíce konstantní (Holbein 1983).

Suspenze je za stálé rotace přiváděna do nejmenšího bubnu a speciálním nátokovým ventilem rovnoměrně distribuována. Čelo bubnu nebo celé bubny vibrují podél osy otáčení. Vlivem odstředivé síly způsobené rotací bubnů dochází ihned k filtraci vody přes filtrační přepážku (stěny bubnu). Vlivem vibrace jsou pevné látky posouvány směrem ven z bubnů. Filtrát prochází skrz filtrační přepážku a je odváděn kanálky.

I během kontinuálního provozu zařízení je možné promývat filtrační koláč. Do bubnu je přiváděna tryskami promývací kapalina. Nanáší se v místech, kde už je filtrační koláč dostatečně odvodněn, ale ještě než koláč z bubnu vypadne, stihne dojít k odstředění promývací kapaliny.

Další konstrukční variantou vibrační odstředivky je použití pouze jednoho bubnu, přičemž buben není tvaru válce, ale kónický. Směrem ven se rozšiřuje. Pevné látky jsou pak vlivem vibrací vysouvány po stěnách bubnu ven (Holbein 1983).

Šneková filtrační odstředivka

Šneková odstředivka pracuje kontinuálně, odvodnění probíhá stejným způsobem jako u vibrační odstředivky. Rozdíl je ve způsobu vyhrnování odvodněného materiálu. Buben má kónický tvar, ale nevibruje (Špaldon 1986). Je osazen šnekovým podavačem, který slouží ke konstantnímu vyhrnování filtračního koláče. Suspenze k filtraci je přiváděna ventilem do spodní části kónického bubnu a vlivem odstředivé síly se ihned

filtruje přes filtrační přepážku na stěně bubnu. Šnek uvnitř bubnu se otáčí pomaleji než buben samotný a pomalu vyhrnuje nahromaděný filtrační koláč. Pokud je nutné promytí koláče, pak je promývací kapalina přiváděna do střední části bubnu, kde už je filtrační koláč dostatečně odvodněný, ale ještě stihne dojít k odstředění promývací kapaliny, než bude z bubnu vyhrnut.

9.2 Sedimentační odstředivky

Odvodňování nejjemnějších kalů je na filtračních odstředivkách komplikované, protože může docházet k průchodu pevných částic skrz filtrační přepážku. Proto jsou na velmi jemné kaly s výhodou používána zařízení využívající k oddělení pevné a kapalné fáze pouze sedimentaci. Často jsou označovány jako dekantální nebo plnoplášťové odstředivky. Nemají perforovaný buben ani filtrační tkaninu. Jsou to zpravidla kontinuálně pracující zařízení. V případě dekantálních odstředivek příliš nezáleží na zrnitostním složení kalu. Podstatným faktorem pro účinné odvodnění je hmotnost jednotlivých zrn vůči hmotnosti kapaliny (Chen 2002).

Kuželová a válcová plnoplášťová odstředivka

Základními typy sedimentačních odstředivek jsou plnoplášťové odstředivky. Skládají se z neperforovaného vnějšího bubnu a dutého vnitřního šneku. Dle konstrukce bubnu rozlišujeme válcové, kuželové a složené plnoplášťové odstředivky. Jednotlivé typy principiálně fungují stejně, ale výsledky odvodnění se mohou lišit.

Válcová plnoplášťová odstředivka se skládá z neperforovaného kovového bubnu tvaru válce, který je připojen na elektromotor. V bubnu je umístěn dutý šnek, který slouží k vyhrnování odstředěných pevných látek a je skrz něj přiváděna suspenze k odvodnění. Výstupy odstředěné kapaliny a odstředěných pevných látek jsou na opačných stranách bubnu (Holbein 1983). Při odvodnění se buben odstředivky otáčí vysokou rychlostí a skrz dutý šnek je do bubnu přiváděn kal. Suspenze se ihned rozprostírá po vnitřním povrchu bubnu. Vlivem odstředivé síly jsou těžká zrna tlačena na plášť bubnu, zatímco voda je ve vyšších vrstvách. Šnek umístěný uvnitř bubnu se

otáčí menší rychlostí než plášť a vyhrnuje pevné látky otvorem na konci bubnu, zatímco voda vytéká přepadem na druhém konci válce. Kal je do bubnu přiváděn blíže k vývodu pevných látek. Válcové odstředivky dosahují vyšší čistoty odstředěné vody oproti kuželovým odstředivkám, ale odstředěná sušina obsahuje větší podíl zbytkové vody (Holbein 1983).

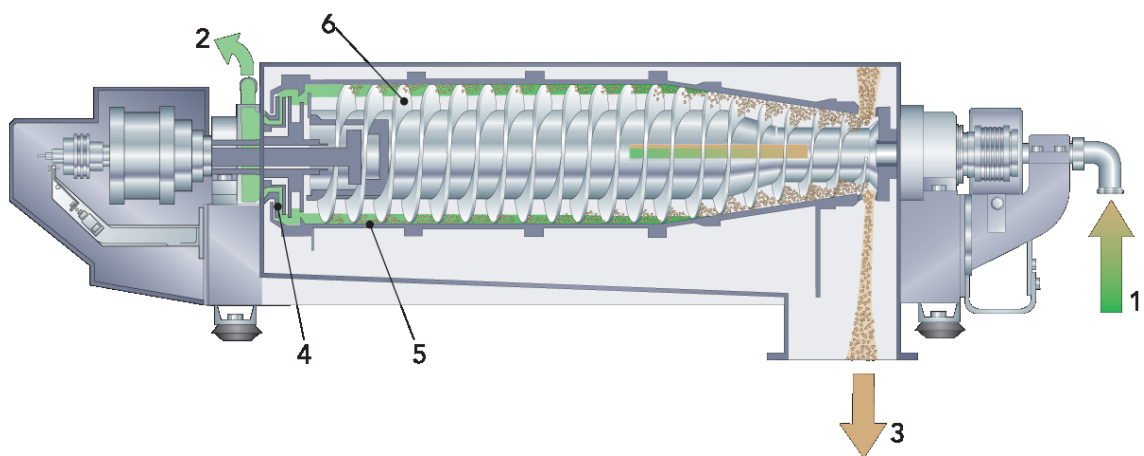
Kuželové odstředivky v principu fungují stejně jako válcové. Liší se ve tvaru bubnu a místě přívodu kalu. Jak je již z názvu patrné buben kuželové odstředivky mají tvar kužele. Tvaru bubnu je uzpůsoben i tvar vnitřního šneku. Kal je v kuželových odstředivkách přiváděn blíže k odtoku vody, odvodňovací dráha je pak delší a kuželová odstředivka dosahuje menšího konečného obsahu vody v odvodněném produktu než odstředivka válcová (Holbein 1983).

Protože v praxi je požadována co největší čistota odstředěné vody a zároveň co nejmenší obsah vody v odvodněném produktu, používá se kombinace válcové a kuželové odstředivky zároveň.

Složená plnoplášťová dekantační odstředivka

Složená plnoplášťová odstředivka (obr. 35) je průmyslově nejpoužívanějším typem odstředivek k odvodňování jemnozrnných suspenzí a kalů (Wills 1992). Buben má konický tvar, který přechází do válcového. Díky tomu jsou spojeny výhody kuželové odstředivky s válcovou. Zařízení dosahuje vysoké čistoty výstupní vody a nízké vlhkosti sušiny (Holbein 1986). Vyhrnovací šnek je svým tvarem přizpůsoben tvaru pláště. Kal je přiváděn skrz dutou hřídel šneku a je rozstříkovan zhruba v přechodu kónické části bubnu do válcové. Pevné látky jsou vlivem odstředivé síly přitlačeny na stěnu pláště. Vnější buben se otáčí přibližně o 2% rychleji než vyhrnovací šnek (Slivka 2002). Díky rozdílu otáček pláště a šneku dochází k mechanickému vytlačování pevných látek ven z odstředivky. Výstup odvodněných pevných látek je na konci kuželové části. Výsledný obsah vody v odvodněném produktu je ovlivněný délkou kuželové části pláště. Čím je kónická část delší, tím nižší bude obsah vody v sušině. Voda, která se v odstředivce během odvodňování oddělí, vytéká na opačném konci, tedy na konci válcové části odstředivky. Délka válcové části ovlivňuje čistotu výstupní vody. Čím je válcová část delší, tím menší bude zbytkový obsah pevných částic v odstředěné vodě (Wills 1992).

U standardních typů dekantačních odstředivek je běžné, že plášť i vnitřní buben se otáčejí stejným směrem, pouze odlišnou rychlostí. Některá moderní zařízení mají speciálně upravený šnek, který se otáčí opačným směrem než plášť. Taková odstředivka by měla dle výrobce (Andritz) dosahovat lepších výsledků než standardní provedení. Maximální provozní otáčky a zároveň násobek gravitačního zrychlení se dle jednotlivých výrobců a modelů liší. Standardní provedení pracují při několika tisících otáčkách za minutu. Vyvozené gravitační zrychlení je závislé na otáčkách a průměru bubnu. Moderní odstředivky pracují při 2 - 4 tisících G a jsou při svém provozu poměrně bezúdržbové.



Obrázek 35: Schéma složené dekantační odstředivky v řezu. 1- vstup kalu, 2- výstup čisté vody, 3- výstup pevných látek, 4- regulační přetok, 5- vnější plášť, 6- šnek.

Zdroj: Dairy processing handbook.

Kombinovaná odstředivka

Pokud není možné dosáhnout požadovaného stupně odvodnění plnoplášťovou odstředivkou, je možné kombinovat plnoplášťový buben s perforovaným. Vznikne tak kombinace sedimentační a filtrační odstředivky. Nejprve dojde k odvodnění v sedimentační plnoplášťové části bubnu. Odtud je materiál šnekem tlačěn do filtrační perforované části. V perforované části bubnu dochází k dodatečnému odvodnění stejným principem, jaký využívají filtrační odstředivky. Následně je odvodněná pevná frakce vytlačena šnekem ze zařízení ven (Holbein 1986).

10 Současná kalová situace v provozu Sklopísek Střeleč

V současnosti veškeré produkty těžby procházejí mokrou úpravou. Těžba a úprava písku je realizována v cyklech, kdy zhruba 16-20 dní v měsíci funguje výroba 24hodin denně bez přestávky. Provozní voda z praní písku a ostatních technologických postupů ústí do dvou kruhových usazovacích nádrží typu Dorr. Pokud je to provozně možné, jedna z nádrží slouží k usazování pevných částic z úpravy bílých sklářských poloh a druhá nádrž k usazování pevných částic z úpravy žlutých slévárenských písků. Vyčiřená voda se horním přelivem z nádrží vrací zpět do provozu.

Kal usazený v Dorr nádržích (dále budeme pro přehlednost nazývat jako primární kal) je kontinuálně odváděn na dočasné odkaliště, které je tvořeno soustavou dvou usazovacích nádrží a akumulací nádrže (obr. 37). Jednotlivé nádrže jsou hrazeny sypanou zemní hrází a slouží pouze k dočasnému usazení pevných částic primárního kalu a akumulaci provozní vody. Naprostá většina pevné frakce sedimentuje v první z nádrží. Voda dále přepadem pokračuje skrz druhou nádrž, kde sedimentuje jen velmi nepatrné množství kalu a do akumulací nádrže, už vtéká čistá voda.

První z nádrží se během jednoho roku zcela zaplní usazeným kalem, proto musí být každoročně vybírána. Kal je nutné přemístit na trvalé odkaliště, tedy vnitřní výsypku lomu. Vzhledem k provozu lomu je možné kal z nádrže vyvážet pouze v zimních měsících. V lednu dochází k odčerpání co největšího možného množství vody z hladiny nádrže. Následně je prokopána sypaná zemní hráz první nádrže, a kal je rypadly postupně odebírán a nakládán na nákladní automobily. Zároveň s nakládkou a vývozem kalu je nutné do nádrže navážet únosný materiál a průběžně budovat cestu pro nákladní vozy (obr. 37). Jakmile je všechn kal z nádrže vyvezen, zlikviduje se ještě dočasně zbudovaná cesta (obr. 38). Nakonec je znovu vystavěna hráz a nádrž je možné uvést opět do provozu. Vybírání nádrže trvá řádově dva týdny. Samotný kal, který je takto odvážen, má relativně vysoký obsah vody (viz 11.5). Nádrž není možné dopředu odstavit a nechat kal vysychat. Protože k vybírání nádrže dochází v lednu, počasí nemusí být úplně příznivé. Nízké teploty, sníh a led, který se spolu s kalem odváží, celý proces komplikují. Během transportu kalu dochází ke znečišťování komunikací v lomu. Přemístění kalu na trvalé odkaliště/výsypku je zatíženo potencionálními vícenáklady

spojenými s převozem množství nežádoucí vody a vícepracemi na budování a odstraňování cesty a hráze.

V ideálním případě by mělo dojít k nahrazení stávajícího systému práce s kalem tak, aby nebylo nutné nádrž každý rok vybírat. Zároveň je žádoucí, aby výsledný obsah vody v převáženém kalu byl snížen a tím došlo ke snížení celkových objemů kalů, které se vyváží na výsypku. K tomuto účelu byla v minulosti zřízena kalolisovna (viz kapitola 4). Provoz kalolisovny byl ale natolik ekonomicky nákladný, že bylo výhodnější přejít na současný systém.



Obrázek 36: Přehled. 1- Dorrovy usazovací nádrže, 2- první usazovací nádrž, 3- druhá usazovací nádrž, 4- akumulční nádrž, 5- trvalé odkaliště/výsypka, 6- dobývací prostor, 7- mokrá úpravna, 8- prostor kalolisovny, 9- místo kde dochází k prokopání hráze při vybírání kalů.



Obrázek 37: Vyvážení kalu z nádrže při současném budování cesty.



Obrázek 38: Cesta do poloviny nádrže v prostoru již vyvezeného kalu.

11 Vzorky a laboratorní zkoušky

Aby bylo možné hledat vhodné metody odvodnění primárního kalu bylo nutné získat základní informace o vlastnostech kalů. Získaná data měla současně sloužit pro komunikaci s firmami, které by přicházely v úvahu jako případní zhotovitelé technologie odvodnění. Zároveň jsme chtěli ověřit, zda se vlastnosti kalu nějakým způsobem podobají komerčně prodávaným produktům kaolinek a tudíž zda by mohl být potenciál odprodeje odvodněného kalu. Za účelem provedení některých základních laboratorních zkoušek bylo postupně odebráno několik vzorků kalu (tab. 1), (obr. 39).

Vzorek č.	Druh	Místo odběru	Hloubka (m)	Popis	Datum
1	Primární kal	Levá trubka		Suspenze voda+ pevné látky přitékající z Dorr	02.12.2015
2	Primární kal	Levá trubka		Suspenze voda+ pevné látky přitékající z Dorr	11.10.2016
3	Primární kal	Pravá trubka		Suspenze voda+ pevné látky přitékající z Dorr	11.10.2016
4	Resedimentovaný kal	Výsypka	0,2	Jeden rok uložená konsolidvaný kal	02.12.2015
5	Resedimentovaný kal	Okraj nádrže vpravo	2,5	Kal odebraný při vybírce	05.01.2016
6	Resedimentovaný kal	Pravá část nádrže	1	Kal odebraný při vybírce	05.01.2016
7	Resedimentovaný kal	Střed nádrže	2	Kal odebraný při vybírce	05.01.2016
8	Resedimentovaný kal	Levá část nádrže	1,5	Kal odebraný při vybírce	05.01.2016
9	Voda	Přítok 3. nádrže		Voda přitékající z druhé do třetí nádrže	11.10.2016
10	Voda	Levá trubka vzadu		Čistý přítok vody	11.10.2016
11	Primární kal	Levá trubka		Suspenze voda+ pevné látky přitékající z Dorr	31.03.2017
12	Primární kal	Levá trubka		Suspenze voda+ pevné látky přitékající z Dorr	31.03.2017
13	Primární kal	Pravá trubka		Suspenze voda+ pevné látky přitékající z Dorr	31.03.2017
14	Primární kal	Pravá trubka		Suspenze voda+ pevné látky přitékající z Dorr	31.03.2017
15	Voda	Přítok 3. nádrže		Voda přitékající z druhé do třetí nádrže	31.03.2017

Tabulka 1: Seznam odebraných vzorků.



Obrázek 39: Mapa odebraných vzorků k tabulce 1.

Přehled použitých termínů při popisování vzorků:

Primární kal

Primární kal (obr. 40) je do nádrže přiváděn dvojitým potrubím. Každé přivádí kal z jedné z usazovacích Dorr nádrží a ústí nad hladinou cca 5-8 m od okraje nádrže. Kal dopadá do nádrže z výšky závislé na stavu hladiny. Vzorky byly odebírány pomocí odběráku na dlouhé tyči.



Obrázek 40: Primární kal přitékající z Dorrovy nádrže do první usazovací nádrže.

Resedimentovaný kal

Resedimentovaný kal byl odebrán při vyvážení kalu z nádrže. Vzorky pocházejí z míst, kam bylo v době odběru možné dosáhnout bagrem. Kal byl nejprve nabrán do lžíce bagru a následně ze lžíce odebrán a uzavřen do kbelíků.

Resedimentovaný kal z výsypky

Odebraný na trvalém odkališti. Kal byl na výsypce uložen téměř jeden rok. Vzorek by měl reprezentovat stav po jednom roce konsolidace, za působení přirozených klimatických a povětrnostních vlivů.

11.1 Mineralogické složení kalů

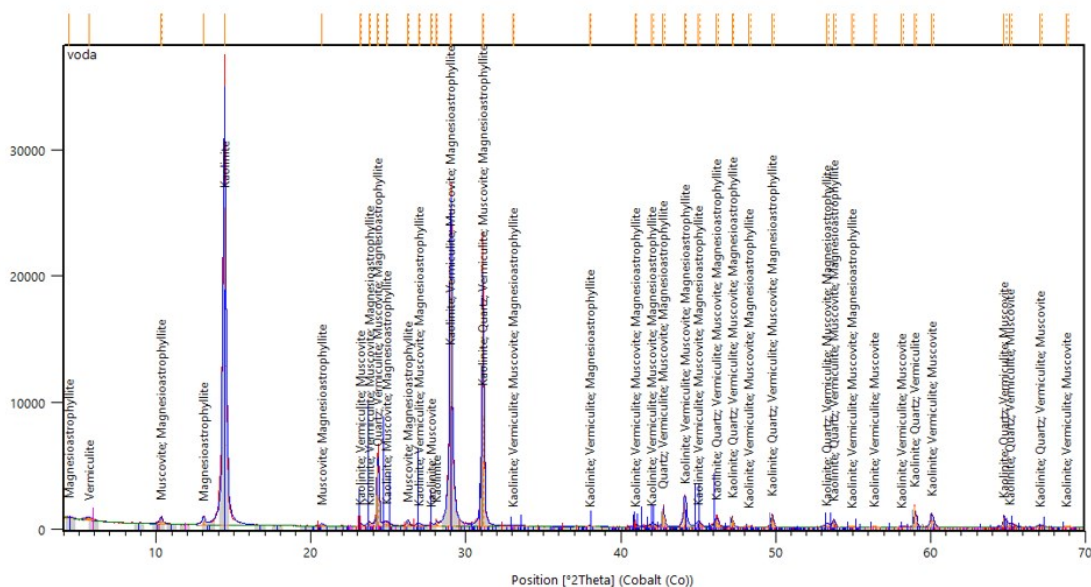
Pomocí rentgenové práškové difrakce jsme zjišťovali mineralogické složení několika vzorků kalu. Ačkoliv není důvod, aby se v mineralogickém složení lišil primární a resedimentovaný kal rozbor jsme udělali u vzorků obou. Použito bylo zařízení Ústavu geochemie, mineralogie a nerostných zdrojů Přírodovědecké fakulty Univerzity Karlovy. Rentgenový přístroj Philips PW 1730/10 a práškový difraktometr PW1050 s kobaltovou rentgenkou emitující CoK záření.

Pro analýzu je dostatečný vzorek v řádu několika málo gramů. Primární i resedimentovaný kal byl nejprve zbaven vody vysušením při teplotě 105°C tak aby nedošlo k fázovým změnám minerálů. Následně jsme jej smíchali s lihem a v čistém hmoždíři ručně namleli. Líh má za úkol vzorek během mletí chladit a zároveň je výhodný při nanášení vzorku na nosič. Namletý vzorek smíchaný s lihem jsme pipetou nanесли na křemíkovou destičku. Líh se odpaří a na nosné křemíkové destičce zůstává malá vrstva pevných částic. Následně je vzorek vložen do komory difraktometru a začíná měření.

Princip metody spočívá v ozařování vzorku rentgenovým zářením a současným měření energií difragovaného záření od vzorku v různých úhlech (Dinnebier 2008). Zdrojem záření je rentgenka, vakuovaná skleněná baňka, uvnitř které je katoda a anoda. Jakmile je rentgenka připojena k dostatečnému zdroji napětí, dochází k zahřívání katody. Díky tomu dojde k uvolnění elektronů, které jsou vlivem rozdílu elektrických potenciálů na katodě a anodě urychlovány směrem k anodě. Po dopadu elektronů na anodu dochází k interakci mezi atomy anody a elektrony. Během této interakce se naprostá většina kinetické energie (99%) změní na teplo a zbytek energie je vyzářen ve formě fotonů jako rentgenové záření (Dolníček 2005). Po dopadu takto emitovaného rentgenového záření na krystaly zkoumaného vzorku může dojít k difrakci záření. Difragované záření je pak zachyceno detektorem a vyhodnoceno. Aby mohlo dojít k difrakci, musí být splněna Braggova podmínka. Podmínka říká, že dráhový rozdíl paprsků difraktovaných na dvou sousedních rovinách krystalu, musí být roven celistvému násobku vlnové délky rentgenova záření (Dolníček 2005).

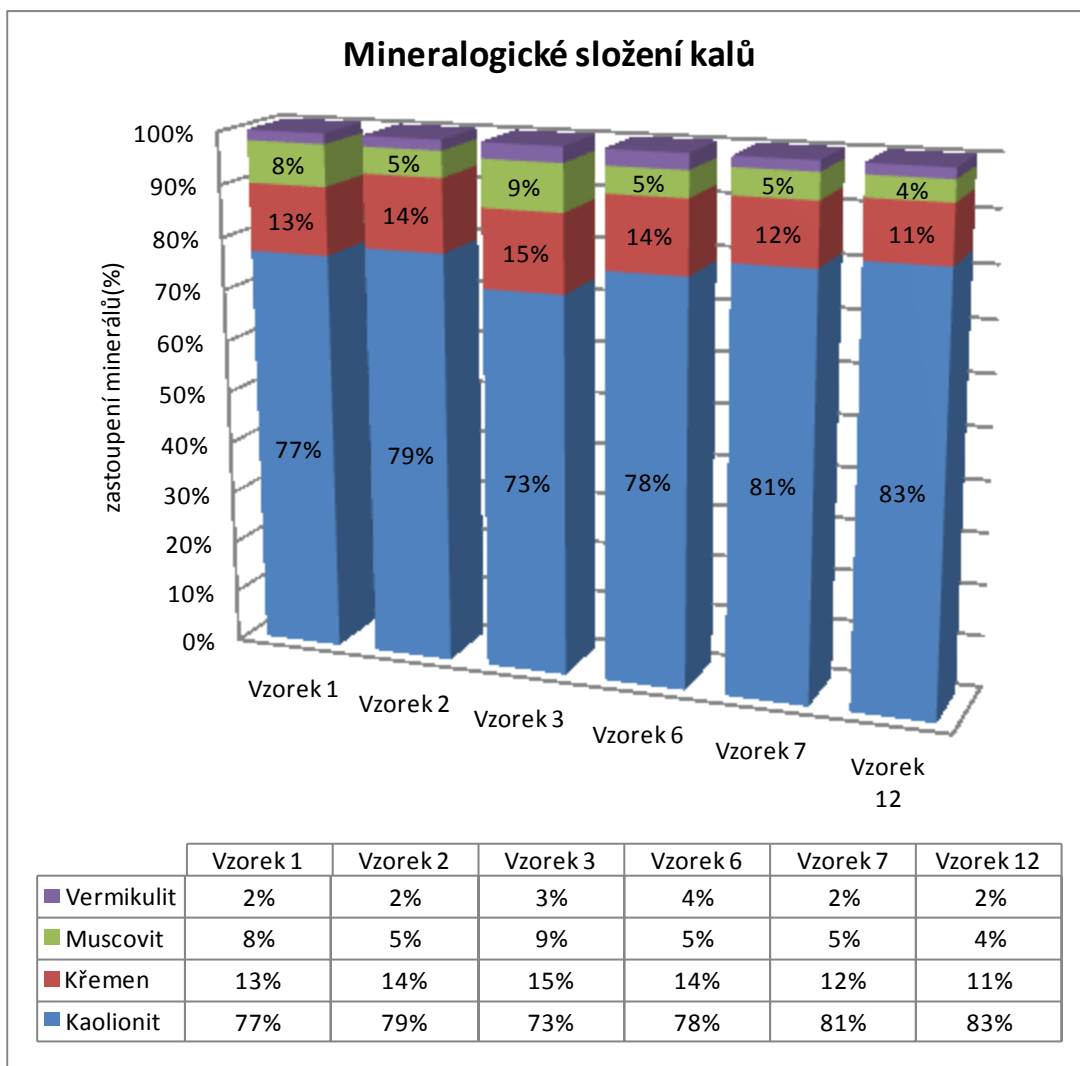
Naměřená data jsme kvalitativně vyhodnotili softwarem Highscore plus. Vyhodnocení spočívá v sestavení difraktogramu (obr. 41), kde na ose x je úhel difragovaného záření a na ose y intenzita difragovaného záření. Vysoké intenzity difragovaného záření jsou v difraktogramu vykresleny jako „peaky“ u příslušných úhlů. K výrazným výškovým a objemovým peakům jsme následně přiřadili minerály, pro které jsou takové „peaky“ dle tabulek charakteristické.

Nejvyšší zastoupení měl ve vzorcích dle předpokladů kaolinit. Dále jsme zjistili křemen, vermikulit a muskovit.



Obrázek 41: Difraktogram vzorku č. 1. Na ose x je úhel a na ose y intenzita difragovaného záření.

Z difraktogramu je patrné, že difrakční maxima mohou reprezentovat i další minerály, které se ve vzorku mohou nacházet. Určení takových minerálů by ovšem bylo velmi nejisté a jejich množství jen velmi malé. Proto jsme je neurčovali. Bereme ale v úvahu, že ve vzorku jsou kromě námi určených (obr. 42), v malém množství i případně další minerály. Proto může být reálné procentní zastoupení námi určených minerálů nepatrně menší. Chyba měření se v případě práškové difrakční analýzy může pohybovat až v rozmezí 5-10% (Dolníček 2005).



Obrázek 42: Výsledky mineralogických analýz jednotlivých vzorků kalů.

Informace o mineralogickém složení kalů mají význam z několika důvodů. Díky známému mineralogickému složení, je možné částečně porovnat kal s produkty kaolinových lomů (tab. 2), což může být výhodné při shánění odběratele při potencionálním odprodeji odvodněného kalu.

Mineralogické složení je ale též výhodné znát při uvažování technologií odvodnění. Technologie pracující na principu sedimentace, zejména pak odstředivky, správně pracují díky rozdílu hmotností kapaliny pevných látek. Pevná zrna s větší objemovou hmotností jsou snadněji odstředěna, než zrna lehčí.

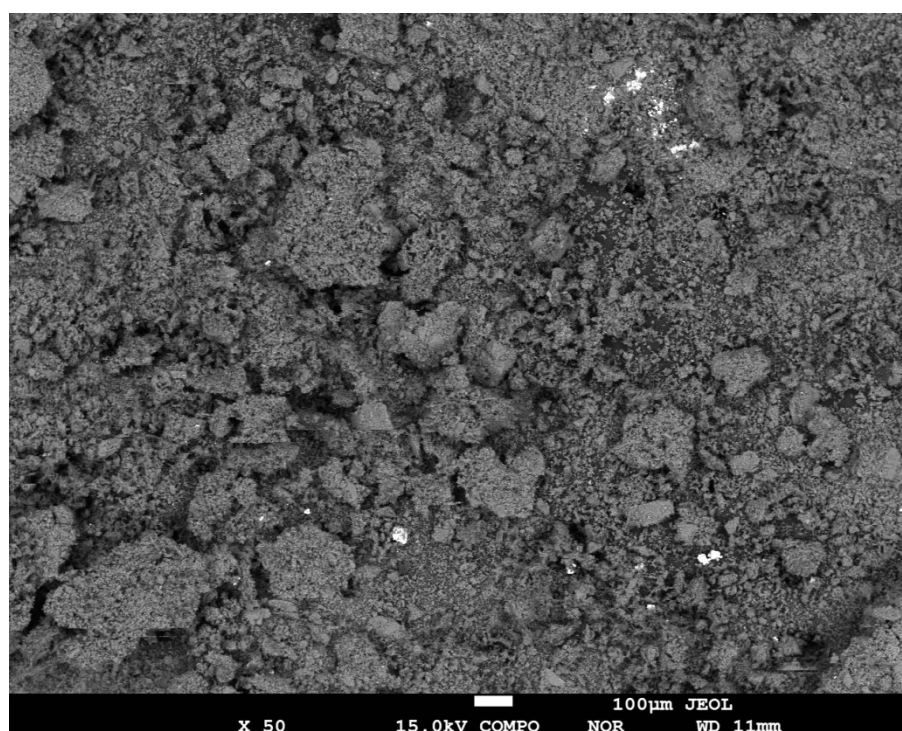
Objemové hmotnosti pro zjištěné minerály jsou pro kaolinit 2,6-2,68 g/cm³, křemen 2,65 g/cm³, muscovit 2,76 - 3 g/cm³, vermikulit 2,4 g/cm³ (Mursky 1958).

Značka/oblast	Kaolinit (%)	Křemen (%)	Slídové minerály (%)
Sedlec I a	91	2	7
Imperial	90	2	8
Premier	88	3	9
T79	90	2	8
MK	85	7	8
MK I	87	6	7
MK II	89	5	6
PK 3	73	7	20
OT 80	90	2	8
Plzeňsko SPEX	84	13	3
Podbořansko	78	17	5

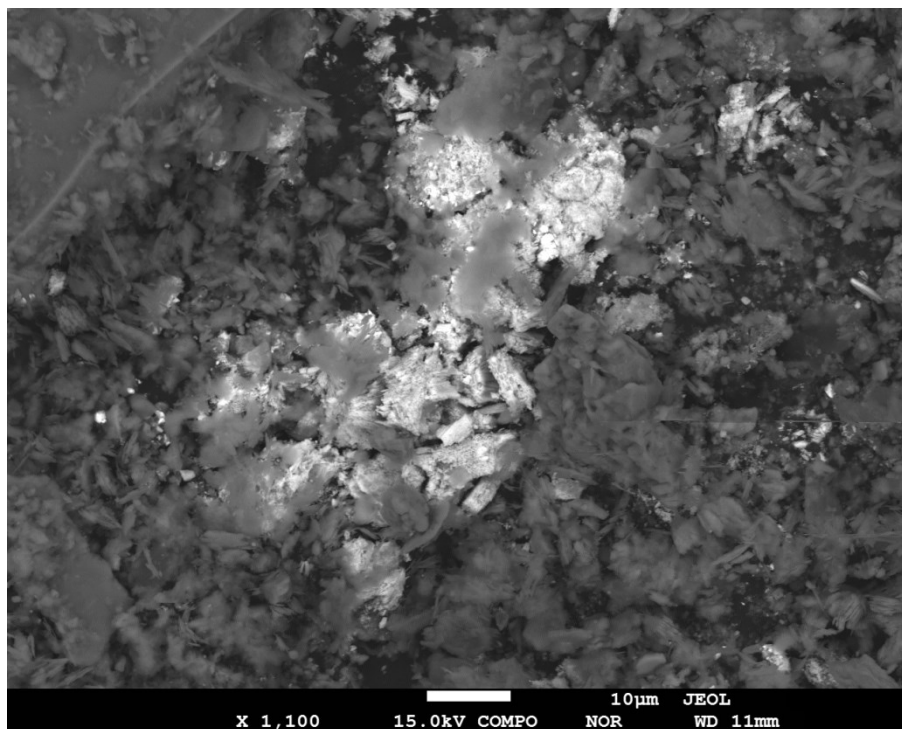
Tabulka 2: Mineralogické složení keramických surovin (kaoliny a keramické hlíny) českých producentů.
Zdroj: Hanykýř (2008).

11.2 Mikroanalýza

V případě vzorku kalu č. 1 byla provedena analýza na elektronovém mikroanalýzátoru v Laboratoři mikrosondové analýzy Ústavu petrologie a strukturní geologie. Na základě metody zpět odražených elektronů (BSE), ukazující relativní rozdíly ve střední atomové hustotě, byly pořízeny snímky vzorku (obr. 43 a 44).



Obrázek 43: Snímek vysušeného vzorku kalu, kde většinu materiálu tvoří kaolinit.



Obrázek 44: Detail na shluk olova uranu a thoria (světlá barva).

Ze snímků jsou patrné lupínky kaolinitů (šedá barva). Bylo nalezeno i několik shluků těžších látek, v tomto případě určených jako směs olova, uranu a thoria. Chemickým rozbořením rentgenovou fluorescenční spektrometrií se zvýšený obsah těchto prvků ve vzorcích nepotvrdil. Vyhodnocení chemického složení probíhá na základě charakteristických hodnot odražených elektronů pro jednotlivé prvky. Vzorek byl získán vysušením primárního kalu a předán k mikroanalýze v suchém stavu. Na obrázku 43 jsou dobře patrné hrudky tvořené kaolinitem, které vznikly při vysychání.

Měření spočívá v bombardování vzorku proudem elektronů. Elektrony se vzorkem interagují a mimo jiné „vznikají“ tzv. odražené elektrony. Právě ze signálů odražených elektronů byly při použité skenovací metodě BSE sestaveny výsledné snímky. Zpětně odražené elektrony představují primární elektrony, které se od vzorku vrací k detektoru a během interakce se vzorkem ztratily pouze malé množství energie. Počty odražených elektronů závisí především na středním protonovém čísle vzorku. Oblasti tvořené lehkými prvky se ve výsledném obraze jeví jako tmavá místa, zatímco oblasti s těžkými prvky tvoří světlá místa. Z výsledného obrazu vzorku je tak možné odlišit místa s odlišným prvkovým složením (Kubínek 2011).

11.3 Chemický rozbor rentgenovou fluorescenční spektrometrií

Pomocí přístroje Olympus Delta Professional (obr. 39), Ústavu hydrogeologie, inženýrské geologie a užití geofyziky, Přírodovědecké fakulty Univerzity Karlovy, jsme analyzovali chemické složení vzorků č. 1 a č. 3.



Obrázek 45: XRF Spektrometr Delta s měřicí stíněnou komorou. Zdroj: Olympus Corporation.

Vzorky pro analýzu není nutné nijak speciálně připravovat. V tomto případě došlo pouze k vysušení kalu při teplotě 105°C po ochlazení byl vzorek umístěn do stíněné komory. Měření probíhalo při fokusaci 3mm. Vzorek překrýval celou optiku měřícího zařízení, aby bylo jisté, že fokusovaný měřící paprsek bude měřit celou plochou pouze vzorek. Samotné měření je pak plně automatické. Zařízení používá 4W rentgenovou trubici k emitování rentgenového záření. Vzorek je ozařován vysokou energií (40keV). Vlivem záření dochází u atomů ozařovaného vzorku k vyražení elektronů z jejich původních drah. Vyražené elektrony jsou pak okamžitě nahrazeny jinými z vyšší energetické hladiny. Přebytek energie je ze zkoumaného vzorku vyzářen ve formě fotonů (Jenkins 1999). Detektor přístroje takovou energii zachytí. K zachyceným energiím jsou pak přiřazeny odpovídající prvky.

Určili jsme všechny prvky, které přístroj v dané konfiguraci zvládl (tab. 3 a 4). Vzhledem k provozu, ze kterého kal pochází, jsme nepředpokládali signifikantní výskyt prvků, které by mohly ovlivnit způsob nakládání s kalem. Ačkoliv elektronová mikroskopie ukázala shluk některých těžkých prvků, zjištěné zastoupení těžkých kovů ve vzorcích pomocí rentgenové fluorescence je nízké.

Prvek	Mg	Al	Si	Ti	Mn	Cr	Ba
%	2,57	21,53	35,02	0,2776	0,0641	0,116	0,0431
Prvek	Zr	Nb	Mo	Y	Cd	Sn	
%	0,0147	0,0014	0,0013	0,0026	0,0018	0,0001	
Prvek	Fe	Ni	Zn	As	Rb	Sr	
%	2,0111	0,003	0,0056	0,0008	0,0026	0,0103	
Prvek	La	Ce	Ta	U	Pb	Th	
%	0,01	0,0156	0,0012	0,0004	0,0116	0,0034	

Tabulka 3: Výsledky rentgenové fluorescenční spektrometrie. Vzorek č. 1.

Prvek	Mg	Al	Si	Ti	Cr	Mn	Ba
%	2,62	22,21	36,2	0,2562	0,103	0,0526	0,0372
Prvek	Zr	Nb	Mo	Y	Cd	Sn	
%	0,121	0,0016	0,0011	0,0021	0,0011	0,0001	
Prvek	Fe	Ni	Zn	As	Rb	Sr	
%	2,7122	0,004	0,0042	0,0009	0,0031	0,00163	
Prvek	La	Ce	Ta	U	Pb	Th	
%	0,0163	0,0123	0,0019	0,0002	0,0098	0,0049	

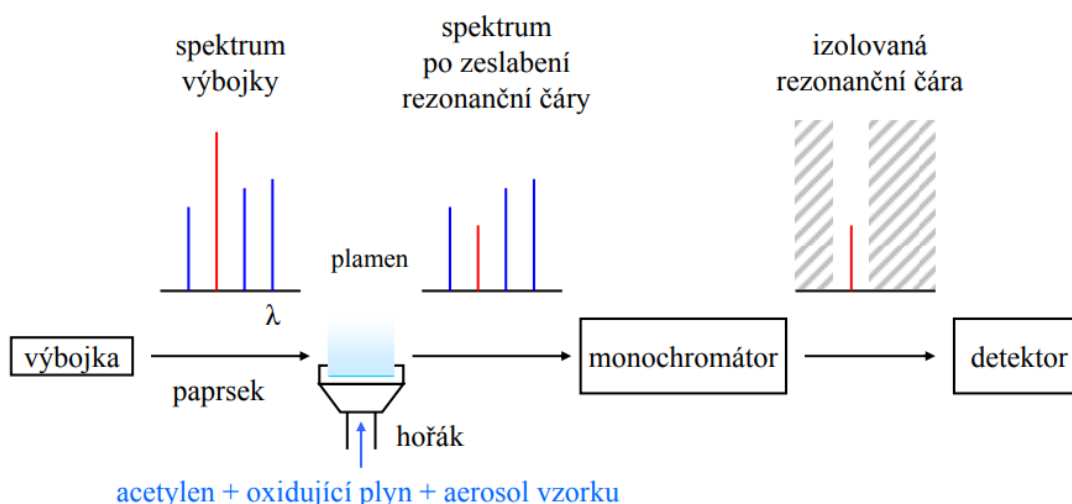
Tabulka 4: Výsledky rentgenové fluorescenční spektrometrie. Vzorek č. 3.

11.4 Silikátová analýza

Za účelem stanovení procentuálního složení vzorku kalu, vyjádřeného v oxidické formě, tedy hmotnostními procenty obsahu oxidů jednotlivých prvků, byla provedena silikátová analýza (obr. 46).

Analýzu provedli pracovníci laboratoře plamenové atomové adsorpční spektrometrie na Přírodovědecké fakultě Univerzity Karlovy. Laboratoř je vybavena přístrojem Varian SpectrAA 280 FS. K analýze byl dodán vysušený vzorek č. 2.

Metoda atomové adsorpční spektrometrie je optická analytická metoda, která využívá vlastností volných atomů adsorbovat záření o vhodném kmitočtu (Kaňa). Z analyzovaného vzorku je nutné uvolnit atomy jednotlivých prvků, které jsou následně prozařovány monochromatickým zářením. Při průchodu záření přes obaly volných atomů, mohou elektrony absorbovat energii a posunout se tak na vyšší energetické vrstvy. Na základě měření absorbance energie je možné určit, o jaké atomy se jedná (Komárek 2000).



Obrázek 46: Schéma měření atomové adsorpční spektrometrie. Zdroj: Koplík, VŠCHT.

Za účelem získání volných atomů je vzorek ve formě aerosolu přiváděn do plamene, kde dochází k atomizaci. Palivem plamene je acetylen se vzduchem nebo oxidem dusným, případně vodík se vzduchem. Plamen je prozařován modulovaným zářením emitovaným výbojkou. Při průchodu záření plamenem je část záření absorbováno elektrony volných atomů. Vlnová délka, která je atomem absorbována, je pro každý prvek charakteristická a odpovídá svými vlnovými délkami rezonančním čarám (Klouda 2016). Záření následně prochází přes monochromátor, který je umístěn za plamenem. Monochromátor má za úkol izolovat a propouštět do detektoru pouze záření o určitých vlnových délkách (Komínková 1997). Je nutné odstranit balastní záření blízkých vlnových délek, které může vznikat tepelnou excitací záření během atomizace (Komárek 2000). Detektor by měl analyzovat jen rezonanční čáru odpovídající rezonanční čáře zkoumaných atomů. Standardně je jako detektor používán fotonásobič, který zesiluje zachycený signál (Komínková 1997). Naměřená data zpracovává počítač. Protože měřením získané hodnoty jsou relativní, koncentrace měřených prvků software vypočítává extrapolací naměřených hodnot ke kalibrační křivce sestavené z referenčních kalibračních vzorků (García 2012).

Výsledky silikátové analýzy vzorku ukázaly velmi podobné chemické složení kalu ze Střelče některým komerčním keramickým surovinám (tab. 5). Z hlediska technologie odvodnění nehrají data získaná silikátovou analýzou nijak zásadní roli. Data ukazují na vhodný potenciál kalu ke komerčnímu využití. Pro využití silikátové analýzy jako

podkladu k případnému odprodeji kalu by bylo vhodné provést analýzu na větším množství vzorků.

	Hmotn.%								
Původ, značka	SiO ₂	Al ₂ O ₃	Fe ₂ O ₃ tot.	TiO ₂	CaO	MgO	(K,Na) ₂ O	Ztráta žháním	MnO
Střeleč	72,78	18,51	0,78	0,21	0,02	0,05	0,31	6,76	0,09
Český Brod	70-78	18-24	0,7-1,1	0,7-0,9	0,2	0,1	0,7	7-8,9	
Plzeňsko SPEX	50	34,5	0,8	1,2	0,06	0,17	1,47	11,8	
Karlovarsko MK	50,5	34,4	1,1	0,35	0,4	0,35	1,45	11,4	

Tabulka 5: Porovnání chemických složení komerčních keramických surovin tuzemských producentů a chemického složení kalu dle silikátové analýzy. Data k porovnání převzata z Hanykýře (2008).

11.5 Zrnitostní rozbor

Abychom zjistili velikosti pevných částic v kalu a přibližné zastoupení jednotlivých zrnitostních frakcí, udělali jsme zrnitostní rozbor vybraných vzorků primárního i resedimentovaného kalu. K sestavení zrnitostní křivky jsme použili dvě metody. Podle normy ČSN ISO/TS 17892- 4 pro geotechnický průzkum a zkoušení jsme nejprve stanovili zrnitost u vzorku č. 1. Protože se jedná o jemnozrný materiál, nebylo nutné dělat prosévání. Zrnitostní křivka byla stanovena pouze na základě hustoměrné zkoušky. To je metoda používaná buď samostatně na jíly a hlíny nebo při kombinovaných metodách jako dílčí zkouška k prosévání. Měřením poklesu hustoty suspenze vody a pevných částic v čase, je možné na základě opakovaných měření zjistit usazovací rychlosti částic a určit tak průměr zrn a procentní zastoupení ve vzorku. Hustoměrnou zkouškou byla ve vzorku č. 1 dle usazovacích rychlostí zastoupena zrna do průměru cca 0,035mm.

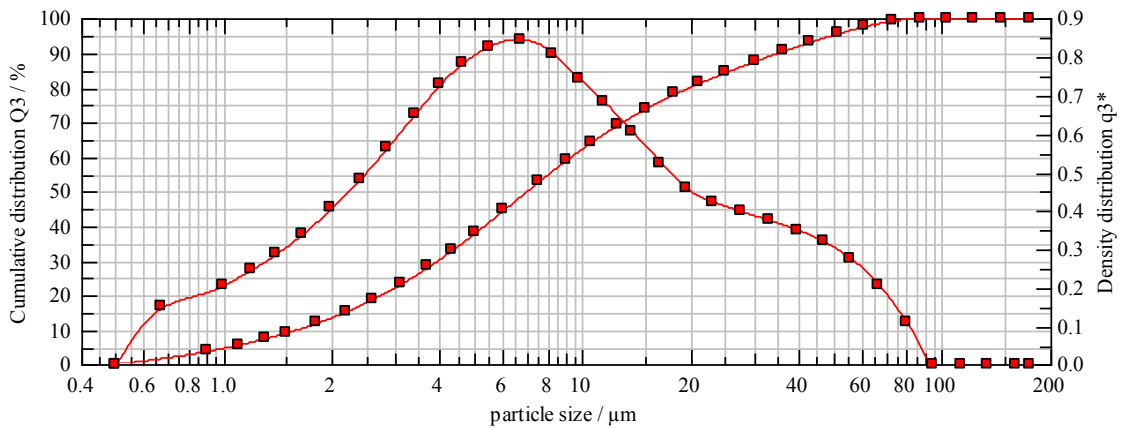
Za účelem získání detailních zrnitostních křivek byly provedeny další zrnitostní rozbor pomocí laserové difrakce. Znalost výsledků hustoměrné zkoušky je výhodná při volbě vhodné optiky pro laserové měření, ale není nezbytná. Zkouška byla provedena přístrojem Sympatec Helos katedry fyzické geografie a geoekologie Přírodovědecké fakulty Univerzity Karlovy. Laserová difrakce je nejrozšířenější metoda k analyzování velikosti částic. Její principy vycházejí z teorie rozptylu elektromagnetického záření částicemi a jsou z matematického hlediska velmi dobře popsány (Pabst 2007). Analýza se provádí buď na suchém vzorku, nebo na vzorku rozptýleném v suspenzi. V našem případě bylo měření provedeno ve vodním prostředí. Přístroj Sympatec s použitou

disperzní jednotkou Quixel potřebuje k analýze pouze několik mililitrů vzorku, v závislosti na koncentraci pevných částic. Princip měření je založený na průtoku pevných částic měřicí celou (kyvetou) při současném ozařování laserem (Šimek 2014). Na částicích dochází k disperzi laseru, podle které je následně určena velikost částic. Během měření je prosvětováno velké množství částic najednou. Pokud by ale koncentrace zrn byla příliš velká, mohlo by docházet k vzájemným překryvům a zabránění rozptylu laseru. Zároveň malá koncentrace negativně ovlivňuje poměr signálu a šumu.

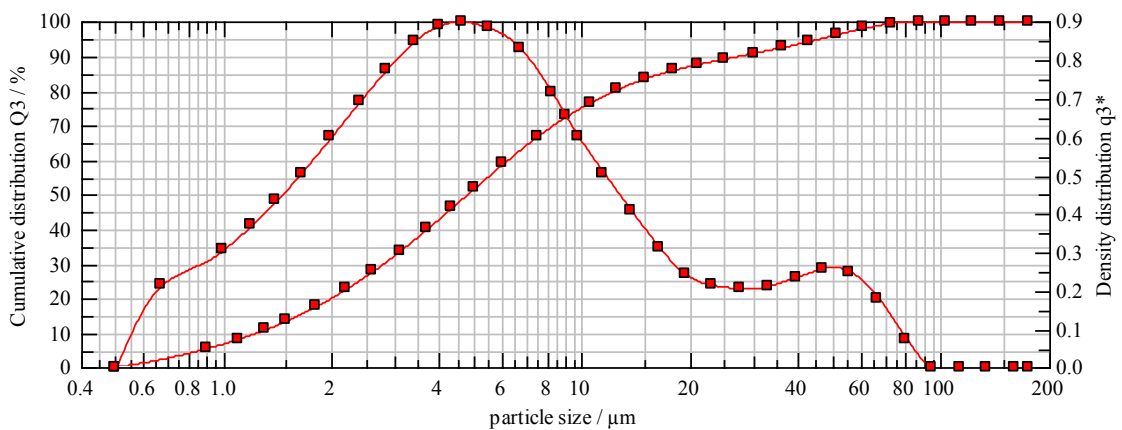


Obrázek 47. Vzorky primárního kalu pro zrnitostní rozbor.

Vzorek kalu (obr. 47) byl pipetou vnesen do disperzní jednotky s destilovanou vodou. Protože kal nevločkoval, nebylo nutné použít ultrazvuku k rozdužení částic. Suspenze destilované vody s obsahem pevných částic je následně pumpována skrz kyvetu, která je umístěná mezi zdrojem laseru a detektorem. V kyvetě je vzorek procházející suspenze prosvětován laserem a díky pevným částicím, které kyvetou procházejí, dochází k rozptylu procházejícího paprsku. Malé částice ohýbají světlo ve velkém úhlu s nízkou intenzitou, zatímco velké částice ohýbají světlo v malém úhlu s vysokou intenzitou. Částicemi rozptýlené laserové světlo je pak na druhé straně kyvety zachyceno detektorem jako difrakční obraz. Před detektorem může být umístěna optika s čočkou, která má za úkol usměrnit paprsky rozptýlené pod určitými úhly do konkrétní části detektoru bez ohledu na pozici osvětlovaných částic v kyvetě (Pabst 2007). Úhly ohybu paprsku a jejich intenzita jsou pak zpracovány počítačem a interpretovány jako objemově vážená rozdělení velikosti. Výsledky laserové difrakce ukázaly zastoupení jemnozrně frakce o velikosti zrn cca od 0,00045 do 0,1mm (obr. 48 a 49)



Obrázek 48: Zrnitostní složení vzorku č. 2.



Obrázek 49: Zrnitostní složení vzorku č. 3.

Zrnitostní křivky byly sestaveny také pro vzorky č. 1 a č. 6. Výsledky se výrazně neliší od vzorků č. 2 a č. 3.

11.6 Vlhkost

Abychom mohli kvantifikovat stav, ve kterém je kal v současné době převážně z usazovacích nádrží na trvalé odkaliště/výsypku, zjišťovali jsme vlhkost vzorků resedimentovaného kalu. Kal byl nejprve nabrán bagrem a následně jsme z jeho lžice odebrali vzorek. Během nabírání kalu bagrem se v lžici promíchal kal zhruba jeden metr mocně vrstvy. Hloubky odběru uvedené v seznamu vzorků jsou relativní. Resedimentovaný kal v nádrži tvořil několik zón, kde bylo již na základě pozorování možné odlišit různé stupně zvodnění (obr. 50). Na povrchu kalu byla v době začátku výběrky vrstva asi 5cm ledu a sněhu, která postupně roztála. V době odběru vzorků už byl led kompletně roztátý (obr. 51). Na povrchu usazeného kalu bylo maximálně

zvodněné pásmo, kde měl kal tekutou konzistencí. S rostoucí hloubkou a směrem k okrajům nádrže se obsah vody evidentně snižoval. Místa odběru vzorků jsme dle možností volili tak, aby byly vzorky (obr. 46) co možná nejvíce reprezentativní pro jednotlivé oblasti.



Obrázek 50: Pohled na resedimentovaný kal při vybírání usazovací nádrže.

Vlhkost zeminy vyjadřuje poměr hmotnosti vody ve vzorku k hmotnosti vysušeného vzorku a určovali jsme ji vážením. Nejprve jsme do suché váženky o známé hmotnosti odebrali kal. Váženku se vzorkem jsme zvážili. Poté byly vzorky umístěné v peci, kde cca 72 hodin při teplotě 105°C vysychaly. Následně jsme nechali vzorky v exsikátoru vychladnout. Vychladlé vzorky jsme pak zvážili a umístili je na několik hodin opět do pece. Poté jsme vzorky nechali znovu vychladnout v exsikátoru. Nakonec jsme je opět zvážili. Váha po prvním a druhém sušení se nelišila, vzorky tudíž byly vysušené do konstantní hmotnosti. Z hmotností před a po sušení jsme pak vypočetli vlhkost u jednotlivých vzorků (tab. 6).



Obrázek 51. Bagr při odběru vzorků z pravé strany nádrže.

Vzorek č. 5, který byl odebrán při pravém okraji v hloubce cca 2,5m se už při odběru svojí konzistencí jevil jako méně zvodněný. Jeho vlhkost je nejnižší naměřená, a sice 48%. Kal o podobné konzistenci byl vidět hlavně při stěnách nádrže a svým relativně malým zastoupením v nádrži nepředstavoval charakteristický vzorek. Ostatní materiál více do prostoru nádrže byl při pozorování mnohem více zvodněný a jeho konzistence řidší.

Vzorek č. 6 byl odebrán při povrchu v pravé části nádrže a hloubce cca 1m. jeho vlhkost byla určena na 61,39%.

Přibližně ve středu nádrže a hloubce cca 2m jsme odebrali vzorek č. 7, kde vlhkost dosáhla 65,69%. V levé části nádrže jsme pak při povrchu vzorek č. 8 s vlhkostí 59,72%. Vzorky č. 6, č. 7 a č. 8 se svojí konzistencí jevily jako nejvíce reprezentativní pro většinu materiálu v nádrži. Z pozorování bylo patrné, že okrajové části jsou zvodněné méně a obsah vody stoupá směrem do středu nádrže. Povrchová vrstva kalu byla maximálně zvodněná na celé ploše nádrže a v některých mělkých depresích se držela voda. Zjištěné vlhkosti dokladují, že během vybírání kalu z nádrže se spolu s kalem převáží značné množství vody. Na trvalém odkališti, v prostoru výsyvky lomu, jsme odebrali z hloubky cca 20cm vzorek č. 4. Kal byl na výsypkce uložen jedenáct měsíců a zjištěná vlhkost byla 45,38 %.

Vzorek č.	m nádoby (g)	vlhký + nádoba (g)	suchý + nádoba (g)	vlhký (g)	md (g)	mw (g)	vlhkost (%)
4	15,294	28,285	24,23	12,991	8,936	4,055	45,38
5	16,86	32,293	27,288	15,433	10,428	5,005	48,00
6	15,85	33,445	26,752	17,595	10,902	6,693	61,39
7	15,704	35,481	27,64	19,777	11,936	7,841	65,69
8	106,13	383,47	279,77	277,34	173,64	103,7	59,72

Tabulka 6: Vlhkosti vzorků resedimentovaného kalu.

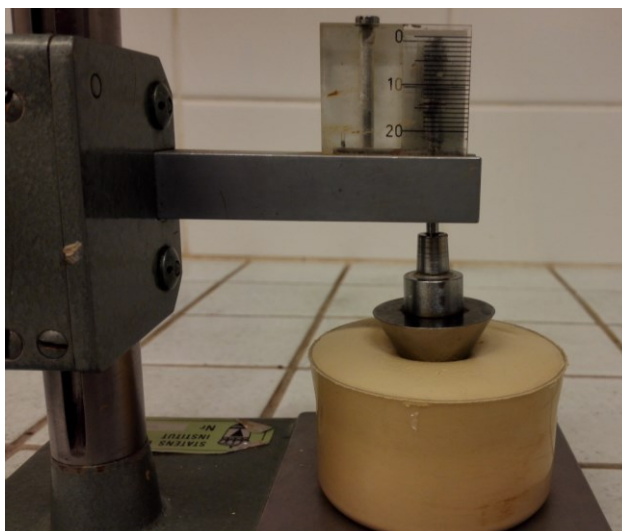


Obrázek 52: Různě zbarvené vzorky resedimentovaného kalu. Zleva: vzorek č. 5, č. 6, č. 4, č. 7.

11.7 Konzistenční meze resedimentovaného kalu

U vzorků resedimentovaného kalu č. 6 a 7, jsme určili konzistenční meze. Tedy mez tekutosti, vyjádřenou vlhkostí zeminy, při které zemina přechází z plastického do tekutého stavu a mez plasticity, vyjádřenou vlhkostí zeminy, při které je zemina v plastickém až polopevném stavu. Ze zjištěných hodnot je možné určit index plasticity jako rozdíl vlhkostí na mezi tekutosti a mezi plasticity. Při známé počáteční vlhkosti lze určit číslo konzistence, které charakterizuje stav zeminy.

Vlhkost na mezi tekutosti jsme určili kuželovou zkouškou (obr. 51). Vzorek zeminy je penetrován leštěným kuželem o předepsané hmotnosti a zkosení. Cílem je zkoušky je určit vlhkost vzorku při penetraci 10mm.



Obrázek 53: Kuželová penetrační zkouška.

Vlhkost na mezi plasticity jsme určovali válením válečků z homogenizovaného vzorku. Během válení se postupně snižuje průměr válečku. Vzorek má vlhkost na mezi plasticity právě ve chvíli, kdy dojde k rozlámání válečku o průměru 3 mm na válečky 8-10 mm dlouhé.

Měřené hodnoty a výsledky zkoušky jsou zobrazené v tabulce 7. Pokud budeme za počáteční vlhkost vzorků uvažovat vlhkosti při odebrání vzorku během vývozu kalů, číslo konzistence bude menší než 0. Konzistenci resedimentovaného kalu pak označujeme jako kašovitou.

	Mez tekutosti (kužel)							Mez plasticity					
	6a	6b	6c	6d	7a	7b	7c	6e	6f	Prům. 6	7d	7e	Prům. 7
Vzorek č.													
Hmotnost misky [g]	15,29	17,189	16,402	15,701	17,189	15,701	15,316	16,402	15,31		17,19	15,69	
Vlhká z. s miskou [g]	33,785	43,398	40,776	54,225	43,271	46,575	35,362	20,852	19,485		24,52	21,40	
Suchá z. s miskou [g]	28,613	35,402	33,612	43,021	36,544	37,94	29,864	20,157	18,86		23,10	20,41	
Hmotnost vody v z. [g]	5,172	7,996	7,164	11,204	6,727	8,635	5,498	0,695	0,625		1,42	0,98	
Hmotnost suché z. [g]	13,323	18,213	17,21	27,32	19,355	22,239	14,548	3,755	3,55		5,91	4,72	
Vlhkost [%]	38,820	43,903	41,627	41,010	34,756	38,828	37,792	18,509	17,606	18,057	23,98	20,84	22,41
Penetrace[mm]	8	11,5	10,5	10	8	11	10,3	-					
										Vzorek č.	6	7	
										Mez tekutosti	41	37,5	
										Mez plasticity	18	22,4	
										Index plasticity	23	15,1	

Tabulka 7: Konzistenční meze vzorků 6 a 7.

11.8 Jemnozrnný podíl v primárním kalu

Primární kal je výchozím materiálem, který je nutné odvodnit, respektive v tomto případě zbavit vodu rozptýlených pevných částic. Jedná se v podstatě o vodu s ne příliš velkou příměsí pevných látek. U několika odebraných vzorků primárního kalu jsme určili zastoupení pevných částic. Vzorky jsme odebírali v přítoku do první z usazovacích nádrží. Pro objem jednoho litru jsme určili podíl pevných částic v suspenzi odpařením vody a následným zvážením zbylé pevné frakce (tab. 7). Ve vzorcích jsme určili obsah cca 27 g – 62 g pevných látek na litr suspenze. Po přepočtení na objem při uvažované měrné hmotnosti 2,6 g/cm³ (dle mineralogie), představují pevné látky v primárním kalu nejvýše 2,37 % objemu.

vzorek č.	objem kalu (l)	hmotnost sušiny (g)	hmotnost sušiny (%)	objem sušiny (%)	obj. hm. kalu (kg/cm ³)
1	1	45	4,5	1,71	1029
2	1	37,5	3,75	1,43	1024
3	1	27,6	2,76	1,05	1017
11	1	62,3	6,23	2,37	1040
14	1	54,2	5,42	2,06	1035

Tabulka 8: Podíl pevných částic v celkovém objemu primárního kalu.

Objemová hmotnost byla určena pomocí známých hodnot hmotnostní koncentrace pevných látek, objemové hmotnosti pevných látek a hustoty vody.

$$\rho_m = 100\% / \left[\frac{c_w}{\rho_s} + (100\% - c_w) / \rho_l \right]$$

- Kde ρ_m ...objemová hmotnost suspenze
 c_w ...hmotnostní koncentrace pevných látek v %
 ρ_l ...objemová hmotnost vody
 ρ_s ...objemová hmotnost pevné frakce

U vzorku č. 1 byla objemová hmotnost měřena nejprve hustoměrem ve válci. Do jedné minuty po rozmíchání vzorku byla naměřena hodnota 1025 kg/m³.

12 Výběr vhodné technologie odvodnění

V případě lomu Sklopísek Střeleč a.s. je motivací ke změně stávajících postupů při „likvidaci“ kalů snaha o šetrné hospodaření a primárně snížení nákladů spojených s vyvážením kalů usazených na dočasném odkališti, pokud toho bude možné nějakou alternativní technologií dosáhnout.

Při hledání vhodného způsobu odvodňování v podstatě existují dva soubory metod, kterými lze v provozech jako je Sklopísek kal odvodňovat. Jednou skupinou metod jsou přírodní kalová pole a laguny, což jsou v podstatě rozlehlé nádrže, kde je kal odvodňován přírodním vysycháním. Nádrže je buď po vyschnutí nutné vybrat a kal převézt nebo dojde k navýšení hráze a nádrž se znovu zaplaví dalším kalem. Současné postupy, které jsou ve Střelči aplikovány, by se daly přirovnat k odvodňování v kalových lagunách. Nicméně pro nedostatek prostoru není možné celou nádrž na delší časový úsek odstavit, nechat vysychat a vymrznout tak, aby se snížil podíl vody. Takové postupy byly možné v soustavě nádrží před vybudováním ochranného valu a zřízení kalolisovny (obr. 1). V současné době na takovou soustavu není místo. Nicméně i v případě že by bylo místo a došlo ke změně uspořádání současných usazovacích nádrží a vytvoření kalových lagun, které by mohly být na delší dobu odstaveny tak jak je pro vyschnutí nutné, není možné navyšovat hráze. Laguny by musely být stejně vybírány a kal převážen na trvalé odkaliště. Některé provozy (lom Kaznějov,...) využívají například dotěženého dna lomu, kde mají systém odkalovacích nádrží, které po vyschnutí zvedají. Takové laguny mají charakter trvalých odkališť a kal není nutné vybírat a dále transportovat. Tento systém ale ve Střelči možný není.

V provozu jako je Sklopísek se tedy nabízí druhá skupina metod odvodňování, a sice využití strojních zařízení. Ideální představa je taková, že současné usazovací nádrže by zůstaly na svém místě. Před nádržemi by mělo být umístěné strojní zařízení, které bude kontinuálně odvodňovat primární kal. Odvodněné pevné látky, by průběžně ze zařízení vypadávaly na hromadu/mezideponii, odkud by pak byly pravidelně převáženy na trvalé odkaliště. Čistá voda, kterou je nezbytné vrátit do výroby, má pokračovat skrze usazovací nádrže do akumulární nádrže, jako je tomu doposud. Do stávajících technologických postupů, které jsou při výrobě ve Sklopísku v současnosti využívány,

by tak přibyl pouze jeden technologický celek a nic dalšího by nebylo nutné výrazně upravovat.

Zachování stávajících usazovacích nádrží by mělo sloužit jako pojistka pro případ poruchy technologie strojního odvodnění. Primární kal by pak po dobu odstávky mohl být veden do nádrží stejně, jako je tomu doposud. Zaměřili jsme se tedy na hledání takové technologie, která může alespoň částečně splnit požadavky, jak jsou nastíněny výše. Podstatným a nakonec rozhodujícím faktorem ovšem bude ekonomický aspekt odvodnění. Náklady na strojní odvodňování by neměly převýšit náklady na „likvidaci“ kalů současným způsobem. Vychází se ze situace, kdy není odběratel, který by měl o kal zájem a prodej tedy není primárním účelem odvodnění. Veškeré náklady na odvodnění jakýmkoliv způsobem, jsou pro Sklopísek výrobní náklady navíc. Všechny uvažované strojní technologie by měly být schopné odvodnit kal do rypného stavu s velmi nízkým obsahem vody oproti stávající situaci. Díky tomu by došlo ke snížení celkového objemu materiálu nutného převážet na výsypku.

Zrnitostní rozborů jak primárního, tak i resedimentovaného kalu dokladují, že ke strojnímu odvodnění je nutné použít metody pro odvodňování jemnozrnných materiálů. Z hlediska odvodnění jsou jemnozrnné materiály charakterizovány velikostí zrn menších než 0,5 mm (Slivka 2002). Pak máme na výběr mezi škálou filtračních a sedimentačních metod, které jsou popsány výše. Oslovil jsem čtrnáct tuzemských i zahraničních firem, které se zabývají technologiemi odvodňování kalů, a dodal jsem jim základní poznatky nabyté laboratorními zkouškami. Z možných technologických řešení nakonec zbyly tři technologie. Kalolisy a pásové lisy z kategorie filtračních metod a dekantační odstředivky z kategorie metod sedimentačních. To jsou nejpoužívanější zařízení, potencionálně schopná odvodnit kal ve Sklopísku.

Mezi průmyslově vůbec nejrozšířenější zařízení, které by přicházelo v úvahu, patří kalolis. K odvodňování kalů je používán například v pískovně Provodín, která se svým provozem Sklopísku částečně podobá. Kalolis se ovšem ve Střelči neosvědčil.

Za účelem odvodnění primárních kalů byla ve Sklopísku původně zřízena kompletní kalolisovna, která také přispěla ke snížení prostoru v oblasti usazovacích nádrží. Instalovaný je plně automatizovaný komorový kalolis Diemme o hmotnosti 45tun s bočními svorníky a hydraulickým zavíráním push to close (obr. 47). Zařízení má 75 polypropylenových desek o rozměru 1500 x 1500 mm a lisovací výkon 6000 kg

vylišované suroviny o předpokládané vlhkosti 25 % za hodinu. Před kalolisé byla umístěna vyrovnávací nádrž, zaručující konstantní přívod kalu. Požadavek na přívod kalu byl 22 l/s při hustotě 1,126 kg/l. Filtrační koláč z kalolisu padal rovnou na dopravníkový pás. Celkový instalovaný příkon byl 90kW.



Obrázek 54: Současný odstavený kalolis, vlevo vzadu deska obalená ve filtrační plachetce.

Během provozu kalolisu se vyskytovaly některé provozní problémy. Docházelo k zalepování filtračních plachetek jemným kalem, protrhávání plachetek a i přes automatické oklepávání filtračního koláče se stávalo, že ne vždy vypadl koláč ze všech desek. Přesto, že zařízení bylo plně automatizované, nepracovalo úplně bezobslužně. Pro příliš vysoké provozní náklady a nároky na údržbu a obsluhu, byla kalolisovna nakonec odstavena. Kalolisovna, tak jak byla postavena a vybavena, je momentálně mimo provoz, ale je stále k dispozici. Nemá proto smysl uvažovat o pořízení nového kalolisu. V úvahu přicházelo zmodernizovat stávající kalolis tak, aby došlo ke snížení provozních nákladů, pokud by to bylo možné. Realizaci předběžně nabídla firma původně nabízející dodání nového kalolisu. Po dodání parametrů stávajícího zařízení ale žádná nabídka na konkrétní vylepšení technologie učiněna nebyla.

Dalším uvažovaným zařízením, na které se podařilo získat potenciálního dodavatele je pásový lis. Podle dodaných podkladů, získaných laboratorními zkouškami, byla získána předběžná finanční nabídka na kompletní linku. Zahraničnímu výrobcí byl zaslán vzorek primárního kalu, na základě kterého mohl alespoň částečně ověřit vlastnosti ve vlastních zkouškách. Jako poměrně zásadní se ukázala nutnost předzahustění kalu za použití flokulantu. Primární kal má řádově 2% objemu sušiny (viz

kapitola 11.6). Pro optimální provoz konkrétního sítopásového lisu by bylo vhodné dosáhnout 4 % objemového zastoupení sušiny.

V červnu 2017 jsem zorganizoval jednání ve Sklopísku Střeleč a.s. se zástupcem zahraniční firmy vyrábějící sítopásové lisy, zástupcem společnosti dodávající filtrační pásy pro pásové lisy a zástupcem společnosti dodávající flokulanty. Na základě prohlídky provozu byla firma schopna upřesnit původní technologickou a finanční nabídku. Prostory současné kalolisovny se ukázaly jako vhodné i pro případné umístění pásového lisu. Navíc možnost použít některé ze stávajících vybavení kalolisovny (čerpadla, rozvody vody a elektřiny, pásový dopravník, atp.), by měly snížit případnou počáteční investici do pořízení nové technologie. Odvodnění primárního kalu pásovým lisem je technologicky možné. Zařízení je konstruováno na tento typ materiálu. Zrnitostní složení kalu dle výrobce nepředstavuje pro filtrační pásy potíže, problémy s lepivostí, které se projevily u kalolisu zanášením plachetek, by měly být eliminovány díky kontinuálnímu systému oplachu filtračního pásu. Oproti kalolisu by pásový lis díky kontinuálnímu provozu neměl klást tak vysoké nároky na obsluhu. Při správně seřízeném lisu je obsluha nutná pouze k najetí do provozu a odstavení z provozu. Výhodou oproti kalolisu je menší velikost zařízení a energeticky úspornější provoz. Ačkoliv je v pásovém lisu velké množství pohyblivých částí, které mohou podléhat opotřebení, a samotný pás je nutné po určité době měnit, výrobce deklaruje bezproblémový nepřetržitý provoz zařízení. Jako nevýhoda této technologie se ale ukázala nutnost předzahustění primárního kalu. Před samotným pásovým lisem by byla zahušťovací nádrž a aktivační zařízení na přimíchávání flokulantu. Velká část odvodnění by proběhla právě v zahušťovací nádrži. Po přidání vhodného flokulantu se mají pevné částice téměř okamžitě usazovat, zatímco vyčiřená čistá voda z nádrže kontinuálně odtéká horním přepadem. Do samotného pásového lisu je pak čerpán pouze předzahustěný kal. Tím dojde ke snížení objemu, který je následně odvodňován v pásovém lisu. Díky tomu jsou sice sníženy požadavky na velikost a výkon pásového lisu a tím i sníženy náklady na provoz lisu jako takového. Nicméně náklady na flokulant se v předběžných propočtech ukázaly jako nepříznivě vysoké. Skutečné provozní náklady a finální návrh technologie ovšem není možné provést na základě laboratorních zkoušek ani odeslaných vzorků. Jak bude v reálném provozu zařízení

fungovat, kolik flokulantu je třeba dávkovat, jaká bude čistota vody a vlhkost sušiny je možné určit pouze pomocí provozních zkoušek.

Zatím poslední strojní zařízení, které se potencionálně zdá jako vhodné, je kombinovaná dekantační odstředivka. Velmi rozšířená technologie, která spojuje výhody válcové a kuželové plnoplášťové odstředivky (viz kapitola 9.2). Dodavatelem technologie by mohla být tuzemská firma, co může mít výhodu v dostupnosti servisu. Výrobci jsem k předběžnému návrhu poskytl výsledky laboratorních zkoušek, následně byla získána předběžná nabídka a později se uskutečnila návštěva zástupce firmy spolu s technikem ve Sklopísku Střeleč a.s. Protože se jedná o sedimentační metodu, kde je výhodné oddělovat látky s odlišnou objemovou hmotností, primární kal obsahující dle mineralogického rozboru převážně kaolinit a křemen by měl být velmi dobře odvoditelný díky poměrně vysoké měrné hmotnosti (viz 11.1). Podle zkušeností výrobce by odstředivka měla fungovat bez přidávání flokulantů i přes poměrně nízký objem pevných látek. Tím odpadají náklady na flokulant. Na druhou stranu, odstředivka bude muset mít dostatečnou kapacitu, aby bylo možné odvodňovat celý objem, který přitéká z Dorr nádrží. Samotný provoz zařízení by měl být téměř bezobslužný. Obsluha je potřeba při najetí a odstavení zařízení. Oproti pásovému lisu má odstředivka podstatně méně pohyblivých částí a komponent, které podléhají opotřebení. Během provozu může dojít k opotřebení ložisek, případně při odvodňování abrazivních materiálů se mohou uvnitř bubny opotřebovat některé vnitřní komponenty, které jsou k tomu ovšem uzpůsobeny. Na rozdíl od pásového filtru nebo kalolisu, kam je nutné dávkovat kal čerpadlem pod tlakem (v případě kalolisu pod vysokým tlakem), vstup kalu u odstředivky se chová částečně jako čerpadlo sám o sobě (ústní sdělení, konstruktér společnosti). Úplně tím neodpadá použití plnicího čerpadla u odstředivek, podtlak není dostatečný, ale namáhání a opotřebování abrazivním materiálem by mělo být u čerpadel plnicích odstředivky nižší než u ostatních metod. Ve Sklopísku by navíc byla odstředivka umístěna v záporné hydraulické výšce oproti Dorr nádržím, ze kterých primární kal přitéká. Díky tomu by plnění odstředivky probíhalo téměř samospádem. Čerpadlo by sloužilo spíše jako regulátor konstantního plnění. Odstředivka k svému provozu nepotřebuje žádná zásadní přídatná zařízení a v podstatě by neměla být nutná ani předřazená vyrovnávací nádrž. Problémy při odvodnění kalu by v případě odstředivky mohla dělat lepivost. V závislosti na vlhkosti,

jaké by bylo možné odvodňováním dosáhnout, by mohl být problematický výstup sušiny ze zařízení. Tam může docházet k nahromadění lepkavého kalu, který by pak negativně ovlivnil funkci odstředivky.

Výrobci jednotlivých zařízení uvádějí kapacitu odstředivek v hodinovém objemu, který jsou zařízení schopna zpracovat. Protože se ale odstředivky používají v mnoha odvětvích a kapacita není standardizována na určitý materiál, reálná kapacita stejného zařízení se v jednotlivých provozech liší. Určit s jistotou, zda je odstředivka bez problémů schopna odvodnit primární kal ve Střelci, v jakém objemu, jaký k tomu bude nutný výkon a od toho se odvíjející provozní náklady, je možné stejně jako v případě pásového lisu až na základě provozní zkoušky.

12.1 Provozní zkoušky

Provozní zkoušky slouží k ověření správného fungování zařízení strojního odvodňování. Realizují je zpravidla výrobci zařízení. Do místa předpokládaného provozu je dopraveno mobilní odvodňovací zařízení, na kterém je v reálných podmínkách testován jeho výkon pro konkrétní kal. „Malé“ mobilní zařízení (obr. 55) je stejné konstrukce jako uvažované stálé zařízení. Proto je možné dosažené výsledky mobilním zařízením přepočítat na konkrétní uvažovanou linku. V jednoduchých provozech mohou zkoušky trvat v řádech hodin. V případě technologie pro Sklopísek Střeleč bylo navrženo provádět zkoušku déle (až několik týdnů v případě obou technologií). Výrobci sice udávají parametry, jakých jsou jejich zařízení schopná dosáhnout. K zjištění nejnižších možných provozních nákladů, je ale nutné ladit zařízení na místě a zajistit tak správnou funkci i v případě kolísání vlastností vstupního kalu.



Obrázek 55: Mobilní pásový lis německé firmy. Zdroj: Bellmer Separation Technology.

12.2 Objem k odvodnění

V náročném provozu, jaký ve Sklopísku panuje, je výběr zařízení velkou mírou ovlivněn nabídkami dodavatelů technologií. Při provozu není prostor pro experimentování, zařízení musí bezproblémově fungovat 24 hodin denně po dobu až 20 dní v kuse během celého roku a mít garantovaný dostupný servis.

Významnou roli při výběru zařízení i výši následných provozních nákladů hraje objem kalu, který je nutné odvodnit. Ve Sklopísku není úplně snadné určit přesné hodnoty. Celkový roční objem kalu je závislý na objemu těžby, který se rok od roku mění. Průtok primárního kalu z Dorr nádrží do usazovacích nádrží se neměří a navíc nemusí být konstantní. Vycházíme tedy z informace, že při současném trendu těžby je rozdíl v hmotnosti materiálu, který vstoupí do mokré úpravy, oproti materiálu, který ve formě finálního produktu z úpravny vystoupí, přibližně 30 000 t. Těchto třicet tisíc tun materiálu je ve formě kalu vyplaveno z písků během procesů úpravy za přibližně 170 dní provozu. Pro případ, kdy v 1 litru primárního kalu je dle měření přibližně 45 gramů pevných látek, lze určit přibližný průtok primárního kalu na 162 000 l za hodinu (45 l/s). Za předpokladu kontinuálního provozu je tedy vyplaveno přibližně 7,3 tuny pevných částic za hodinu. Zařízení, která jsou schopna zpracovat 7300 kg pevné frakce za hodinu a mají zároveň hydraulickou kapacitu 162 m³/h patří zpravidla výkonnějším řadám dané technologie. Celkové instalované výkony a provozní náklady jsou pak poměrně značné.

Pomocí zahuštění kalů lze snížit celkový objem čerpaný ke strojnímu odvodnění. Díky tomu mohou být využita zařízení s nižší hydraulickou kapacitou, která zpravidla mají zpravidla nižší investiční a provozní náklady, jako je tomu například v návrhu pásového lisu. Nicméně pak je nutné uvažovat náklady na zahuštění, které jsou, jak se ukázalo při předběžných propočtech, značné.

12.3 Zahuštění kalu v prostoru stávajících usazovacích nádrží

Snížením objemu kalů čerpaných ke strojnímu odvodnění se sníží náklady na provoz strojní technologie. V návrhu pásového lisu by k takovému zahuštění docházelo díky přimíchávání flokulantů, které jsou ovšem poměrně drahé.

Při současném systému používání flokulantu Superfloc a dávkování 2kg/24hodin jsou náklady na flokulant zanedbatelné. Přesto v první usazovací nádrži dochází k zahuštění a usazení téměř veškerého obsahu pevné frakce z primárního kalu. Nádrž svými rozměry stačí k zdržení pevných částic na dobu dostatečně dlouhou k úplné gravitační sedimentaci. Díky nepřetržitému provozu navíc neustále sedimentující částice svojí hmotností zatěžují sediment pod sebou, čímž vytlačují další vodu (viz kapitola 5.2). Odhadovaný objem kalu vyvezeného z nádrže po ročním cyklu (170 dní provozu) je přibližně 28000 m³ při průtoku 660 960 m³ primárního kalu za rok. Průtok zhruba odpovídá primárnímu kalu s koncentrací 1,7 % obj. (4,5 % hm.) při 30 000 tunách pevných látek. Objem veškerého kalu usazeného v nádrži tvoří pouze 4,2 % objemu primárního kalu.

Za předpokladu, že by místo stávající usazovací nádrže mohla být vystavěna zahušťovací nádrž/nádrže s možností průběžného odebírání kalu bez narušení procesu sedimentace, zařízení strojního odvodnění by mohlo být plněno zahuštěným kalem. Tím by došlo k značnému snížení objemu, který by se strojně odvodňoval.

Této alternativě by mohly být přizpůsobeny i stávající usazovací nádrže například vybavením pohyblivými kalovými čerpadly nebo shrabováký tak, aby bylo možné zahuštěný kal z nádrže kontinuálně odvádět bez nutnosti jejího odstavení. Jistě by vznikly, další náklady spojené s provozem a údržbou jakékoliv zahušťovací nádrže. Takovou variantu je ale dobré brát při rozhodování v úvahu.

12.4 Rozdělení stávajících usazovacích nádrží

Před vybudováním ochranného valu a kalolisovny byla v provozu soustava nádrží, kterou bylo možné odstavit a kal nechat vysychat (viz kapitola 2.3). Objem vody v kalu se snížil přirozeným odvodněním. Přestavění stávajících usazovacích nádrží na podobný systém je alternativou, která by neměla být opomenuta. Odstavením nádrže na delší časový úsek, by došlo ke snížení celkového objemu vody, který je v současné době s kalem vyvážen. Na základě vlhkosti vzorku č. 4, byla určena vlhkost kalu po jednom roce konsolidace 45 %. V současné době je vyvážen kal o vlhkosti přibližně 60 %.

Aby bylo možné nechat kal vysychat jeden rok, bylo by nutné výrazně změnit rozložení stávajících usazovacích nádrží. První z usazovacích nádrží, která je po jednom

roce těžby zaplněna kalem, má přibližně dvojnásobný objem oproti druhé usazovací nádrži. Po zaplnění a odstavení první usazovací nádrže by bylo možné přivádět primární kal do druhé usazovací nádrže nejdéle po dobu půl roku. To platí za předpokladu, že by nedošlo k výraznému navýšení objemů těžby například oproti posledním rokům. Zmenšením objemu akumulární nádrže by mohlo dojít ke zvětšení objemu druhé usazovací nádrže a tím prodloužení maximální doby odstávky a vysychání první nádrže.

Změna rozložení stávajících nádrží by mohla přinést úspory ve formě snížení objemu vody převážené spolu s kalem na výsypku. Prostor potřebný pro vybudování soustavy nádrží s dostatečnou kapacitou na roční odstavení by ale nutně snížil objem retenční nádrže. Odstranění druhé usazovací nádrže by navíc bez dalších opatření znamenalo zatížení retenční nádrže pevnými částicemi, které v současné době sedimentují v druhé nádrži.

12.5 Úprava stávajících nádrží při zachování jejich funkce

Při stávajícím systému usazování kalů, hraje nejdůležitější roli první z usazovacích nádrží. Kromě vody, která je s kalem vyvážena, jsou náklady na vybírání kalu navýšeny i nutností rozebírat a budovat hráz a cesty. Objem druhé usazovací nádrže není dostatečný, aby na celoroční provoz nahradil první nádrž. K zachytávání pevných látek, které nestačily sedimentovat v první nádrži, druhá nádrž postačuje na mnoho let. Do první nádrže by tak mohl být vybudován šikmý nájezd. Objem, který by nájezd v první nádrži zabíral, by mohl být nahrazen částí druhé nádrže. Při vybírání kalů by díky nájezdu nemusela být rozebírána hráz. Zpevněním stěn a dna nádrže například monolitickými betonovými panely by odpadla nutnost budování a rozebírání cesty v nádrži při každém vybírání.

V porovnání s některými alternativami a technologiemi strojního odvodnění zmíněnými výše, by se jednalo o relativně jednoduchou úpravu, která by nepřinesla výrazné snížení objemů kalů, které je nutné převážet na výsypku. Úspora by spočívala v nákladech na zemní práce nutné k budování a rozebírání cest. Zároveň by například oproti vybudování zahušťovacích nádrží nebo pořízení strojní technologie nevznikaly další povozní náklady.

13 Závěr

Účelem práce bylo pomoci společnosti Sklopísek Střeleč a.s. při hledání alternativního řešení odvodnění technologických kalů. Vhodnou alternativou by byla taková technologie, která by vedla především ke snížení současných nákladů na „likvidaci“ kalů, aniž by došlo k ovlivnění stávajících výrobních postupů v mokré úpravě písků. Protože v místech, kde je nutné řešit alternativní postupy odvodnění, není prostor na výstavbu trvalých odkališť a kal je v každém případě nutné odvážet na výsypku, zaměřil jsem se na metody strojního odvodnění.

Původní představou bylo připravit na základě rešerší a laboratorních zkoušek seznam vhodných technologií strojního odvodnění, investičních nákladů na jejich pořízení a odhady provozních nákladů. Během řešení práce se sice podařilo vybrat metody, které jsou vhodné pro odvodňování kalů ve Sklopísku Střeleč, nicméně se ukázalo, že stanovení investičních ani provozních nákladů není možné s potřebnou přesností realizovat pouze na základě poznatků nabytých rešerší nebo zkouškami na malých vzorcích. Výběr konkrétních technologií je do značné míry ovlivněn nutností najít dodavatele. Na základě laboratorních zkoušek se podařilo získat několik nabídek technologie od konkrétních firem. Výběr se zúžil na kalolisy, sítopásové lisy a dekantační odstředivky. Předběžné finanční návrhy byly ale spíše orientační. Na jaře 2017 se ve Sklopísku Střeleč uskutečnila jednání se zástupci vybraných firem. Díky prohlídkám provozu došlo k částečnému upřesnění nabídek. Přesto se ukázalo, že ke stanovení reálných čísel a ověření správného fungování navrhovaných technologií je nutné provést provozní zkoušky. O termínu uskutečnění se jedná, do data odevzdání této práce nebyly realizovány. Protože se předběžné provozní náklady ukázaly být velmi blízko současným nákladům, není bez provedených provozních zkoušek možné s jistotou říct, zda jsou moderní strojní technologie odvodnění schopná pracovat z ekonomického hlediska efektivněji než současný „primitivní“ a na první pohled nevhodný systém vybírání kalu.

Jako výhodné ve vztahu ke strojnímu odvodnění se ukázalo snížení celkového objemu kalů, čerpaných k odvodnění. Zahušťování je ale zatíženo náklady na flokulanty nebo výstavbu a provoz rozměrných zahušťovacích nádrží. Alternativy v podobě úpravy stávajících usazovacích nádrží, ať už k využití před strojním odvodněním nebo za

účelem zlepšení současného stavu bez využití strojních technologií, je nutné brát v úvahu.

Ačkoliv práce vycházela ze stavu, kdy pro odvodněný kal neexistuje odběratel, učinili jsme srovnání mineralogických a chemických vlastností kalů s produkty tuzemských producentů keramických surovin. V obou aspektech se ukázaly vlastnosti poměrně příznivé pro potencionální odprodej kalu jako keramické suroviny. Při možnosti odprodat kal, alespoň za náklady na zpracování, by strojní odvodnění bylo výhodnější než stávající systém. Nicméně společnost Sklopísek Střeleč a.s. již několikrát odběratele neúspěšně hledala a nedá se předpokládat, že v budoucnu s jistotou nějakého najde.

Paralelně s diplomovou prací vznikla průběžná zpráva, od které pak byly odvozeny podklady pro potencionální dodavatele technologií. Veškeré finanční nabídky, přehledy stávajících nákladů při konkrétních objemech těžby a od nich se odvíjející propočty nákladů na nové technologie, nebylo možné včlenit do diplomové práce. Data budou společnosti Sklopísek Střeleč a.s. poskytnuta ve formě závěrečné zprávy.

Diplomová práce splnila svůj účel ve smyslu předložení alternativních metod ke stávajícímu postupu odvodňování kalů, kdy pro některé technologie se zároveň podařilo najít potencionální dodavatele. Zda bude některou z technologií výhodné nahradit stávající systém, se ukáže až na základě reálných provozních zkoušek.

14 Seznam použitých zdrojů

- 1) BUSTOS, C., M., CONCHA, Raimund BÜRGER a ELMER M. TORY. *Sedimentation and Thickening Phenomenological Foundation and Mathematical Theory*. Dordrecht: Springer Netherlands, 1999. ISBN 9401593272.
- 2) ČECH, S., Smutek, D., 2013. *Nové poznatky o geologii a hydrogeologii lomu Střeleč*. SOVAK 22/4, 8-12.
- 3) ČECH, S.; Rejchrt, M.; Štaffen, Z. (2011). Křídové sedimenty ve vrtu V 800 Střeleč, jejich petrografie, litostratigrafie a chemostratigrafie. Zprávy o geologických výzkumech v roce 2010. ČGS, Praha, 14-19.
- 4) ČERVENKA, M. Měření viskozity kapalin Stokesovou metodou, kapitola 1, 2011 [online]. [cit. 29.07.2017]. Dostupné z:
<http://herodes.feld.cvut.cz/mereni/downloads/navody/viskozita.pdf>
- 5) CRITTENDEN, John C. et al. *MWH's Water Treatment: Principles and Design*.3. Aufl.;3rd;. Hoboken: Wiley, 2012. ISBN 9780470405390.
- 6) DINNEBIER, Robert E. a S. J. L. BILLINGE. *Powder diffraction: theory and practice*. Cambridge: Royal Society of Chemistry, 2008. ISBN 9780854042319.
- 7) DOLNÍČEK, Z.; P. SULOVSKÝ. *Laboratorní metody výzkumu*. [online]. [cit.2017–07–25]. Univerzita Palackého, Přírodovědecká fakulta, Katedra geologie. Olomouc, 2005, 62 s.
Dostupné z:[https://www.geology.upol.cz/upload/studijni_materialy/plne_texty_skript/2005_Do Inicek_Zdenek_Metody_laboratorniho_vyzkumu.pdf](https://www.geology.upol.cz/upload/studijni_materialy/plne_texty_skript/2005_Do%20Inicek_Zdenek_Metody_laboratorniho_vyzkumu.pdf)
- 8) FLEMING, John D. *The use of the Dorr clarifier in water treatment*. Journal (*American Water Works Association*), vol. 17, no. 2, 1927, pp. 215–219. JSTOR.
- 9) FLORI, Mihaela a Lucia VÎLCEANU. *About sedimentation process in secondary clarifiers*. *Annals of the Faculty of Engineering Hunedoara*. 2016, vol. 14, no. 4, s. 217-220. ISSN 15842665.
- 10) FUERSTENAU, Maurice C. a Kenneth N. HAN. *Principles of mineral processing*. Littleton, Colo.: Society for Mining, Metallurgy, and Exploration, c2003. ISBN 0873351673.

- 11) GARCÍA, R., A. P. Báez, *Atomic Absorption Spectrometry (AAS)*. in *Atomic Absorption Spectroscopy*, M. A. Farrukh, Ed., chapter 1, pp. 1–13, InTech, 2012.
- 12) HANYKÝŘ, Vladimír a Jaroslav KUTZENDÖRFER. *Technologie keramiky*. Praha: Silikátový svaz, 2008. ISBN 978-80-86821-48-1.
- 13) HOLBEIN, Milan. *Úpravnictví*. 1. vyd. Praha: Nakladatelství techn. lit, 1983.
- 14) CHEN, Guohua, Po LOCK YUE a Arun S. MUJUMDAR. *Sludge dewatering and drying*. *Drying Technology*. 2002, vol. 20, no. 4-5, s. 883-916. ISSN 0737-3937.
- 15) CHLUPÁČ, I. *Geologická minulost České republiky*. Praha: Academia, 2002, 436 str. ISBN 80–200–0914–0.
- 16) JENKINS, Ron. *X-ray fluorescence spectrometry*. 2nd ed. New York: Wiley, c1999. ISBN 9780471299424.
- 17) KAŇA, Vladimír. *Atomová absorpční spektrometrie*. [online]. Copyright © [cit. 29.07.2017]. Dostupné z: <http://old.vscht.cz/anl/lach2/AAS.pdf>
- 18) KLOUDA, Pavel. *Moderní analytické metody*. Třetí, upravené vydání. Ostrava: Pavel Klouda - nakladatelství Pavko, 2016. ISBN 9788086369228.
- 19) KOMÁREK, Josef. *Atomová absorpční spektrometrie*. Masarykova univerzita, 2000.
- 20) KOMÍNKOVÁ, J., MESTEK O. *Atomová absorpční spektrometrie*. Vysoká škola chemicko-technologická v Praze: Ústav analytické chemie VŠCHT Praha, Laboratoř z analytické chemie II [online]. 1997 [cit. 2017-06-28]. Dostupné z: <http://www.vscht.cz/anl/lach2/AAS.pdf>
- 21) KOPLÍK, R., *Přednášky z předmětu Analytické metody ve forenzní analýze*,
- 22) Vysoká škola chemicko-technologická v Praze, [online]. [cit. 05.07.2017]. Dostupné z: https://web.vscht.cz/~koplir/6_FA_atomov%C3%A1_%20spektrometrie.pdf.
- 23) KUBÍNEK, R., ŠAFÁŘOVÁ, K., VŮJTEK, M., *Elektronová mikroskopie*. Univerzita Palackého v Olomouci: Katedra experimentální fyziky a Centrum výzkumu nanomateriálů [online]. 2011 [cit. 2017-06-28]. Dostupné z: <https://fyzika.upol.cz/cs/system/files/download/vujtek/granty/elmikro.pdf>
- 24) MURSKY, G. A., and Robert Mitchell Thompson. "A specific gravity index for minerals." *The Canadian Mineralogist* 6.2 (1958): 273-287.

- 25) NOVÁČEK, Jiří. *Pomocné procesy I*. Ostrava: Vysoká škola báňská - Technická univerzita, 1997. ISBN 80-7078-409-1.
- 26) NOVÁČEK, Jiří. *Pomocné procesy II*. Ostrava: Vysoká škola báňská - Technická univerzita, 1998. ISBN 80-7078-480-6.
- 27) PABST, W., Gregorová, E., *Charakterizace částic a částicových soustav*. [online]. [cit.2017-07-25]. VŠCHTPraha, 2007, Dostupné z: http://www.old.vscht.cz/sil/keramika/Characterization_of_particles/CPPS%20Czech%20version_.pdf
- 28) SARASWATHI, B., *Drum filters, Pharmaceutical Information*, [online]. © 2016 Pharmainfo.net. [cit. 11.07.2017]. Dostupné z: <http://www.pharmainfo.net/book/pharmaceutical-machines/drum-filters>
- 29) SIVAMOHAN, Rajaratnam, and Eric Forsberg. "Principles of spiral concentration." *International journal of mineral processing* 15.3 (1985): 173-181.
- 30) SLIVKA, Vladimír. *Těžba a úprava silikátových surovin*. Praha: Silikátový svaz, 2002. ISBN 80-903113-0-X.
- 31) SMRČEK, Antonín a František VOLDŘICH. *Sklářské suroviny*. Praha: Informatorium, 1994. Sklářská knihnice. ISBN 80-85427-47-8.
- 32) SUTHERLAND, Ken. *Filters and filtration handbook*. 5th ed. Oxford: Elsevier/Butterworth-Heinemann, 2008. ISBN 9781856174640.
- 33) SMUTEK, D., 2014. *Hydrogeologie těžebny sklářských písků Střeleč a její vztah na podzemní vody určené pro vodárenské zásobování*. SOVAK 23/7-8, 24-30.
- 34) ŠIMEK, M., Grunwaldová, V., Kratochvíl, B., *Současné metody měření velikosti částic farmaceutických látek a jejich omezení*. [online]. [cit.2017-07-25]. Chem. Listy 108, 50-55 (2014) Dostupné z: http://www.chemicke-listy.cz/docs/full/2014_01_50-55.pdf
- 35) ŠPALDON, František. *Úprava nerostných surovin*. Bratislava: Alfa, 1986. Edícia baníckej literatúry.
- 36) TARJÁN, Gusztáv. *Mineral processing*. Budapest: Akadémiai Kiadó, 1986.
- 37) TÁSLER, R. et al. (1971): *Strukturní vrt VŠ-1 Všeň (u Turnova)*. – MS Čes. geol. služba – Geofond. Praha.

- 38) ULIČNÝ, D., 2001. Depositional systems and sequence stratigraphy of coarse-grained deltas in a shallow-marine, strike-slip setting: the Bohemian Cretaceous Basin, Czech Republic. *Sedimentology* 48, 599-628.
- 39) VALEČKA, J., Zelenka, P. *Křídové sedimenty na území listu 03-341 Kněžmost*. Zprávy o geologických výzkumech v roce 2009, s. 78 - 81.
- 40) VESILIND, P.A. 1994. The Role of Water in Sludge Dewatering. *Water Environmental Research*, 66: 4–11.
- 41) WAKEMAN, Richard J. a E. S. TARLETON. *Solid/liquid separation: principles of industrial filtration*. 1st. Kidlington: Elsevier, 2005. ISBN 9781856174190.
- 42) WILLS, Barry A. *Mineral processing technology: An introduction to the practical aspects of ore treatment and mineral recovery. In SI/metric units*. 5. ed. Oxford: Pergamon Press, 1992.
- 43) ZAMANI, Amir a Brij MAINI. *Flow of dispersed particles through porous media — Deep bed filtration*. *Journal of Petroleum Science and Engineering*. 2009, vol. 69, no. 1, s. 71-88. ISSN 0920-4105.
- 44) *Filter press, side-bar and overhead design*. [online]. [cit. 25.07.2017]. Dostupné z: <https://www.andritz.com/products-en/group/separation/filter-presses/filter-press-side-bar-overhead>.
- 45) Sklopísek Střeleč a.s. [online]. Copyright © 2010 Sklopísek Střeleč [cit. 21.07.2017]. Dostupné z: <http://www.glassand.eu/index.php?page=historie>.
- 46) *Brentwoindustries* [online]. [cit. 13.08.2017]. Dostupné z: https://www.brentwoodindustries.com/wp-content/uploads/2016/12/4-shaft-rectangular-clarifier_sm.jpg.
- 47) *Ampmineral* [online]. [cit. 13.08.2017]. Dostupné z: http://www.ampmineral.com/images/equipos/pch/tanques_clarificadores_02_thumb.jpg.
- 48) *Enviro-Clear* [online]. [cit. 13.07.2017]. Dostupné z: <http://enviro-clear.com/clarifier-thickener/high-retention-conventional>.
- 49) RABU., *Parallel Plate Vertical Clarifier*, 2012. [online]. [cit. 12.07.2017]. Dostupné z: <http://4.bp.blogspot.com/-vCP78ETzOD8/T7NmVc98VSI/AAAAAAAAAC8/jz82bk9bEZc/s400/vertical+clarifier+flow+diagrams+408x640+tickener.jpg>

- 50) *Flotrend, Dewatering Equipment Supplier in Houston*. [online]. [cit. 13.07.2017].
Dostupné z: <http://flotrend.com/wp-content/uploads/2016/04/Power-Pak-Filter-Press.png>
- 51) *PT. Delta Enviro Indonesia, Environmental - Engineering Design - Laboratory Supplies - Chemicals* [online]. [cit. 13.07.2017]. Dostupné z: http://www.delta-enviro.com/files/index/images_products/92filterpress.jpg
- 52) *Degremont, Home SUEZ's degremont water handbook, Conventional recessed plate filter press*. [online]. [cit. 11.07.2017]. Dostupné z:
<https://www.suezwaterhandbook.com/processes-and-technologies/liquid-sludge-treatment/filter-press/conventional-recessed-plate-filter-press>
- 53) *Auro Filtration* [online]. [cit. 11.07.2017]. Dostupné z:
http://filterpresssuppliers.com/filter_press_with_gasketed_filter_plate.html
- 54) *Direct Industry, The online Industrial Exhibition* [online]. Copyright © 2017 [cit. 10.07.2017]. Dostupné z: <http://www.directindustry.com/prod/andritz-kmpt-gmbh/product-34052-1415711.html>
- 55) *Minco Tech, Mineral Processing & Mining Equipment* [online]. Copyright © 2015 Mincotech [cit. 13.07.2017]. Dostupné z: <http://www.minco-tech.com/dewatering/pheonix-filter-presses/>
- 56) *Komline-Sanderson* [online]. [cit. 13.07.2017]. Dostupné z: http://www.komline.com/docs/rotary_drum_vacuum_filter.html
- 57) *Vacuum Disc Filter - Huate. Magnetic Separator, Mining Equipment Manufacturer - Huate* [online]. Dostupné z: <http://sdseparator.com/5-3-disk-vacuum-filter.html>
- 58) *Andritz hyperbaric disc filter HBF* [online]. ©2017 [cit. 09.07.2017]. Dostupné z:
<https://www.andritz.com/products-en/group/separation/disc-drum-filters/andritz-hyperbaric-disc-filter-hbf>
- 59) *Rousselet Robatel* [online]. ©2015 [cit. 13.08.2017]. Dostupné z: <http://www.rousselet.cz/principy.html>
- 60) *Dairy Processing Handbook* [online]. © Tetra Pak 2017 [cit. 05.07.2017].
Dostupné z: <http://dairyprocessinghandbook.com/chapter/centrifugal-separators-and-milk-standardization>

- 61) *Handheld XRF Analyzers. Olympus* [online]. © Olympus Corporation [cit. 05.07.2017]. Dostupné z: <http://www.olympus-ims.com/en/xrf-xrd/xrf-handheld/>
- 62) *Bellmer Separation Technology* [online]. [cit. 2017-06-28]. Dostupné z: <http://www.bellmer.de/sprache2/n144567/i156183.html>
- 63) *Monroe Environmental. Air Pollution & Water Treatment* [online]. Copyright © 2017 Monroe Environmental Corp. [cit. 14.07.2017]. Dostupné z: <https://www.monroenvironmental.com/water-and-wastewater-treatment/>
- 64) *Taiwan Passal CO.,LTD Vacuum Drying Filter Press .* [online]. Copyright © 2014 All Rights Reserved. [cit. 19.08.2017]. Dostupné z: <http://www.passal.com/en/Vacuum%20Drying%20Filter%20Press>

15 Seznam obrázků

Obrázek 1: Poloha jámového lomu Sklopísek Střeleč a.s. ve Vyskeřské vrchovině Jičínské pahorkatiny. Zdroj: mapy.cz	9
Obrázek 2: Výřez geologické mapy pro lokalitu jámového lomu Střeleč. (Česká geologická služba).....	10
Obrázek 3: Schematický profil křídové pánve v oblasti Jičínské pahorkatiny podle Valečka (2009). 1- předkřídové podloží, 2- slepence, 3- pískovce křemenné, jílovité, 4- pískovce vápnité, 5- prachovce, 6- jílovce, 7- slínovce, vápnité jílovce 8- vápence, 9- vápnité jílovce s vložkami pískovců (flyšoidní facie), 10- šikmé zvrstvení v pískovci, 11- glaukonit nad 10%, fosfátové konkrce.	11
Obrázek 4: Těžební jáma lomu Sklopísek Střeleč a.s. Foto: R. Grygar.....	13
Obrázek 5: Schematický litologický profil lomu Střeleč. Zdroj: Čech (2013).....	13
Obrázek 6: Soustava rozšířených usazovacích nádrží. Stav před rokem 1998 po zrušení hydrocyklonových stanic a před vybudováním ochranného valu. Zdroj: Sklopísek Střeleč a.s.....	14

Obrázek 7: Soustava zbylých usazovacích nádrží po vybudování ochranného valu a kalolisovny. Aktuální stav. Zdroj: 3D mapy Google.	15
Obrázek 8: Schematické znázornění rozložení vody ve směsi. Zdroj: Taiwan Pascal. ..	21
Obrázek 9: Diagram odvodnění	26
Obrázek 10: Částice se usazuje v nehybné kapalině ve směru působení hmotnostní síly. Rychlost pohybu částice je stejná s rychlostí sedimentace.....	28
Obrázek 11: Sedimentace v kapalině, která proudí kolmo na směr působení hmotnostní síly částice.	29
Obrázek 12: Sedimentace v kapalině, která proudí proti směru hmotnostní síly částice. Rychlost usazování částice je v tomto případě větší než rychlost proudění kapaliny. Částice se proto pohybuje ve směru sedimentace.....	29
Obrázek 13 Sedimentace v kapalině, která proudí proti směru hmotnostní síly částice. Rychlost usazování částice je menší než rychlost proudění kapaliny. Částice se bude pohybovat ve směru proudění.	30
Obrázek 14: Průběh sedimentace ve válci s odlišenými jednotlivými oblastmi sedimentace. Upraveno podle Špaldona (1986).	31
Obrázek 15: Zahušťovací křivka suspenze podle Tarján (1981).	31
Obrázek 16: Kruhové usazovací nádrže na vyvýšené konstrukci. Zdroj: Ampmineral. ..	37
Obrázek 17: Konstrukční řešení pravouhlé usazovací nádrže s instalovanými řetězovými shrabováky. Zdroj: Brentwoodindustries.	39
Obrázek 18: Řez kruhovou usazovací nádrží s popisky základních komponent. Zdroj: Monroe Enviromental.	40
Obrázek 19: Lamelové usazovací nádrže různých konstrukcí. Nádrž se spodním přívodem (vlevo), nádrž s horním přívodem (uprostřed), nádrž s podélným průtokem (vpravo). Upraveno z Crittenden (2012).....	41
Obrázek 20: Základní typy vestaveb pro lamelové usazovací nádrže. Upraveno z Crittenden (2012).....	42
Obrázek 21: Vysokokapacitní kruhová zahušťovací nádrž. Zdroj: Enviro-Clear.	43
Obrázek 22: Schematické znázornění konstrukce lamelového zahušťováku. Zdroj: Rabu (2012).....	43
Obrázek 23: Komorový kalolis s bočními svorníky a hydraulickým uzavíráním push to close. Zdroj: Flotrend.	46

Obrázek 24: Komorový kalolis s horním svorníkem. Zdroj: Delta Enviro.	46
Obrázek 25: Schéma filtračního prostoru zavřeného komorového kalolisu. 1- deska, 2- hydraulický píst, 3- filtrační komora, 4- přehnutá filtrační plachetka, 5- vstup kalu, 6- přívodní kanál, 7- kanál pro odvod filtrátu, 8- posuvná část rámu kalolisu, 9- pevná část rámu kalolisu Zdroj: Degremont.	47
Obrázek 26: Desky komorového kalolisu. Zleva: zapuštěná deska, těsněná deska, těsněná deska s filtrační plachetkou Zdroj: Auro Filtration	49
Obrázek 27: Průběh filtrace na membránovém kalolisu. Zdroj: Degremont.	54
Obrázek 28: Sítopásový lis. Zdroj: Direct Industry.	56
Obrázek 29: Schéma fungování pásového lisu. 1 přívod kalu, 2 distribuční prostor, 3 gravitační zóna, 4 klínová zóna, 5 vysokotlaká zóna, 6 vývod odvodněného materiálu	Zdroj: Minco Tech
Obrázek 30: Vakuový bubnový filtr. Zdroj: Komline-Sanderson.	58
Obrázek 31: Schéma vakuového bubnového filtru. Zdroj: Saraswathi (2016).	60
Obrázek 32: Vakuový kotoučový filtr. Zdroj: Huate.	61
Obrázek 33: Hyperbarický kotoučový filtr v přetlakové nádobě. Zdroj: Andritz.	62
Obrázek 34: Princip odvodnění horizontální vyřezávací odstředivkou. Zdroj: Rousselet Robotel.	64
Obrázek 35: Schéma složené dekantační odstředivky v řezu. 1- vstup kalu, 2- výstup čisté vody,	68
Obrázek 36: Přehled. 1 Dorrovy usazovací nádrže, 2 první usazovací nádrž, 3 druhá usazovací nádrž, 4 akumulární nádrž, 5 trvalé odkaliště/výsypka, 6 dobývací prostor, 7 mokrá úpravna, 8 prostor kalolisovny, 9 místo kde dochází k prokopání hráze při vybírání kalů.	70
Obrázek 37: Vyvážení kalu z nádrže při současném budování cesty.	71
Obrázek 38: Cesta do poloviny nádrže v prostoru již vyvezeného kalu.	71
Obrázek 39: Mapa odebraných vzorků k tabulce 1.	72
Obrázek 40: Primární kal přitékající z Dorrovy nádrže do první usazovací nádrže	73
Obrázek 41: Difraktogram vzorku č. 1. Na ose x je úhel a na ose y intenzita difragovaného záření.	75
Obrázek 42: Výsledky mineralogických analýz jednotlivých vzorků kalů.	76
Obrázek 43: Snímek vysušeného vzorku kalu, kde většinu materiálu tvoří kaolinit.	77

Obrázek 44: Detail na shluk olova uranu a thoria (světlá barva)	78
Obrázek 45: XRF Spektrometr Delta s měřicí stíněnou komoru. Zdroj: Olympus Corporation.....	79
Obrázek 46: Schéma měření atomové adsorpční spektrometrie. Zdroj: Koplík, VŠCHT.	81
Obrázek 47. Vzorky primárního kalu pro zrnitostní rozbor.	83
Obrázek 48: Zrnitostní složení vzorku č. 2.	84
Obrázek 49: Zrnitostní složení vzorku č. 3.	84
Obrázek 50: Pohled na resedimentovaný kal při vybírání usazovací nádrže.	85
Obrázek 51. Bagr při odběru vzorků z pravé strany nádrže.	86
Obrázek 52: Různě zbarvené vzorky resedimentovaného kalu. Zleva: vzorek č. 5, č. 6, č. 4, č. 7.....	87
Obrázek 53: Kuželová penetrační zkouška.	88
Obrázek 54: Současný odstavený kalolis, vlevo vzadu deska obalená ve filtrační plachetce.....	92
Obrázek 55: Mobilní pásový lis německé firmy. Zdroj: Bellmer Separation Technology.	95

16 Seznam tabulek

Tabulka 1: Seznam odebraných vzorků	72
Tabulka 2: Mineralogické složení keramických surovin (kaoliny a keramické hlíny) českých producentů. Zdroj: Hanykýř (2008).....	77
Tabulka 3: Výsledky rentgenové fluorescenční spektrometrie. Vzorek č. 1.....	80
Tabulka 4: Výsledky rentgenové fluorescenční spektrometrie. Vzorek č. 3.....	80
Tabulka 5: Porovnání chemických složení komerčních keramických surovin tuzemských producentů a chemického složení kalu dle silikátové analýzy. Data k porovnání převzata z Hanykýře (2008).	82
Tabulka 6: Vlhkosti vzorků resedimentovaného kalu.....	87
Tabulka 7: Konzistenční meze vzorků 6 a 7.	88
Tabulka 8: Podíl pevných částic v celkovém objemu primárního kalu.	89