



VYSOKÉ UČENÍ TECHNICKÉ V BRNĚ

BRNO UNIVERSITY OF TECHNOLOGY

FAKULTA STAVEBNÍ

FACULTY OF CIVIL ENGINEERING

ÚSTAV VODNÍHO HOSPODÁŘSTVÍ KRAJINY

INSTITUTE OF LANDSCAPE WATER MANAGEMENT

SYSTÉM PŘÍRODNÍHO ČIŠTĚNÍ ODPADNÍCH VOD V SURABAYI V INDONÉSII

NATURAL WASTEWATER TREATMENT SYSTEM IN SURABAYA, INDONESIA

BAKALÁŘSKÁ PRÁCE

BACHELOR'S THESIS

AUTOR PRÁCE

AUTHOR

Tereza Semrádová

VEDOUCÍ PRÁCE

SUPERVISOR

doc. Ing. Michal Kriška Dunajský, Ph.D.

BRNO 2023

Zadání bakalářské práce

Ústav:	Ústav vodního hospodářství krajiny
Studentka:	Tereza Semrádová
Vedoucí práce:	doc. Ing. Michal Křiška-Dunajský, Ph.D.
Akademický rok:	2022/23
Studijní program:	B3607 Stavební inženýrství
Studijní obor:	Vodní hospodářství a vodní stavby

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

System přírodního čištění odpadních vod v Surabayi v Indonézii

Stručná charakteristika problematiky úkolu:

Cílem práce je navržení konceptu řešení nakládání s odpadními vodami, které bude založeno na základě norem platných v České republice, resp. v západní Evropě a současně bude akceptovat podmínky pro vysoce specifickou lokalitu v Indonézii.

Cíle a výstupy bakalářské práce:

Bakalářská práce bude pojata jako studie možného technického řešení pro likvidaci odpadních vod, které vznikají v Surabayi (druhé největší město v Indonézii), resp. části Perumdos, která představuje v podmínkách střední Evropy menší obec do velikosti 1000 obyvatel. Práce se pokusí navrhnout řešení, které bude udržitelné, založené na extenzivních technologiích, které vychází z moderních přírodních čistíren odpadních vod. Kromě rešerše stávajícího řešení bude stěžejní část věnována návrhu + popsání provozních přístupů v místních podmínkách.

Seznam doporučené literatury a podklady:

- ČSN 75 6402: Čistírny odpadních vod do 500 ekvivalentních obyvatel, 2017. Praha: Úřad pro technickou normalizaci, metrologii a státní zkušebnictví.
- DWA, 2017. Grundsätze für Bemessung, Bau und Betrieb von Kläranlagen mit bepflanzten und unbepflanzten Filtern zur Reinigung häuslichen und kommunalen Abwassers: Arbeitsblatt DWA-A 262. Hennef: Deutsche Vereinigung für Wasserwirtschaft, Abwasser und Abfall. DWA-Regelwerk, A.262. ISBN 38-872-1547-8.
- ÖNORM B 2505- Kläranlagen – Intermittierend beschickte Bodenfilter („Pflanzenkläranlagen“)

- Dotro, Gabriela & Langergraber, Günter & Molle, Pascal & Nivala, Jaime & Puigagut, Jaume & Stein, Otto. (2017). Biological Wastewater Treatment Series, Volume 7: Treatment Wetlands.
- sciencedirect.com - databáze vědeckých článků, vyhledání klíčových slov "treatment wetland" v ostrovních státech, v tropickém a subtropickém klimatu, apod.

Termín odevzdání bakalářské práce je stanoven časovým plánem akademického roku.

V Brně, dne 30. 11. 2022

L. S.

doc. Ing. Daniel Marton, Ph.D.
vedoucí ústavu

doc. Ing. Michal Kříška Dunajský, Ph.D.
vedoucí práce

prof. Ing. Rostislav Drochytka, CSc., MBA, dr. h. c.
děkan

ABSTRAKT

Přírodní čistírna odpadních vod je v rozvojových zemích možnou cestou dlouhodobého zlepšení jakosti vypouštěných odpadních vod z domácností. Jedná se o čistírnu reflektující klimatické podmínky, kvalitu a množství vypouštěných odpadních vod a ekonomické poměry země. Nabízí jednoduchost z pohledu provozní náročnosti. Těmito výroky se zabývá i návrh přírodní čistírny odpadních vod v indonéském městě Surabaya.

Samotnému návrhu předchází analýza a pochopení stávajícího nakládání s odpadními vodami, které je v dnešní době v dané lokalitě pojato velice minimalisticky. V práci je vytvořen návrh vhodného a udržitelného řešení komunitní přírodní čistírny pro městskou část do 1 000 obyvatel. Návrh bere ohled na technicko-ekonomicko-společenské aspekty, měl by tak vést k vyšším účinnostem a delší životnosti navržené čistírny. Součástí řešení jsou i provozní doporučení pro zajištění dlouhodobého provozu čistírny.

V dané oblasti téměř neexistují komunální čistírny, případná realizace přírodní čistírny tak bude prvním řešením tohoto druhu, které buď zajistí budoucí rozšíření na základě pozitivních zkušeností, nebo naopak zavržení pro nevhodné fungování v místních podmínkách.

KLÍČOVÁ SLOVA

odpadní voda, kanalizace, čištění odpadních vod, přírodní čistírna, nakládání s odpadními vodami

ABSTRACT

In developing countries, constructed wetland is a possible way to improve the long-term quality of domestic wastewater effluent. It is a treatment plant that reflects the climatic conditions, the quality and quantity of the wastewater discharged and the economic conditions of the country. It offers simplicity in terms of operational requirements. These statements are also addressed in the design of a constructed wetland in the Indonesian city of Surabaya.

The design itself is preceded by an analysis and understanding of the existing wastewater management, which is currently very minimalist in the locality. The thesis develops a proposal for a suitable and sustainable community-based natural wastewater treatment solution for an urban area of up to 1 000 inhabitants. The proposal considers the technical-economic-social aspects and should thus lead to higher efficiency and longer lifetime of the proposed treatment plant. The solution also includes operational recommendations to ensure the long-term operation of the treatment plant.

There are hardly any municipal treatment plants in the area, so the possible implementation of a constructed wetland will be the first solution of this kind, which will either ensure future expansion based on positive experience or, on the contrary, be rejected due to unsuitable operation in local conditions.

KEYWORDS

wastewater, sewerage, wastewater treatment plant, constructed wetland, wastewater management

BIBLIOGRAFICKÁ CITACE

SEMRÁDOVÁ, Tereza. Systém přírodního čištění odpadních vod v Surabayi v Indonésii [online]. Brno, 2023 [cit. 2023-05-24]. Dostupné z: <https://www.vut.cz/studenti/zav-prace/detail/150412>. Bakalářská práce. Vysoké učení technické v Brně, Fakulta stavební, Ústav vodního hospodářství krajiny. Vedoucí práce Michal Kříška-Dunajský.

PROHLÁŠENÍ O SHODĚ LISTINNÉ A ELEKTRONICKÉ FORMY ZÁVĚREČNÉ PRÁCE

Prohlašuji, že elektronická forma odevzdané bakalářské práce s názvem *Systém přírodního čištění odpadních vod v Surabayi v Indonésii* je shodná s odevzdanou listinnou formou.

V Brně dne 25.5.2023

Tereza Semrádová
autor práce

PROHLÁŠENÍ O PŮVODNOSTI ZÁVĚREČNÉ PRÁCE

Prohlašuji, že jsem bakalářskou práci s názvem *Systém přírodního čištění odpadních vod v Surabayi v Indonésii* zpracovala samostatně a že jsem uvedla všechny použité informační zdroje.

V Brně dne 25.5.2023

Tereza Semrádová
autor práce

PODĚKOVÁNÍ

Ráda bych touto cestou poděkovala svému vedoucímu práce doc. Ing. Michalu Kriškovi Dunajskému, Ph. D. za jeho čas při vedení práce a za předané vědomosti, dále děkuji firmě CoWe za poskytnuté podklady. V neposlední řadě děkuji své rodině a přátelům za trpělivost a bezmeznou podporu během celého studia.

Obsah

1. Úvod	19
2. Extenzivní způsoby čištění odpadních vod	20
2.1. Odpadní vody a nakládání s nimi.....	22
2.2. Návrhové parametry komunální čistírny.....	23
2.2.1. Hydraulické zatížení	24
2.2.2. Látkové zatížení	25
2.3. Schéma zapojení přírodní čistírny.....	26
2.4. Primární čištění odpadních vod.....	28
2.4.1. Česle	29
2.4.2. Lapák písku	29
2.4.3. Vícekomorový septik	30
2.4.4. Anaerobní separátor	30
2.5. Sekundární a terciální čištění odpadních vod.....	34
2.5.1. Horizontální podpovrchové proudění	35
2.5.2. Vertikální podpovrchové proudění	36
2.5.3. Stabilizační nádrž.....	40
2.5.4. Hybridní systém.....	41
2.6. Porovnání účinností zvolených přírodních čistíren.....	41
2.7. Kalové hospodářství.....	43
2.8. Provoz a údržba přírodních čistíren.....	44
2.9. Monitoring přírodních čistíren.....	45
2.10. Výhody a nevýhody přírodních čistíren nejen v rozvojových zemích.....	45
2.10.1. Kolmatace.....	46
2.10.2. Eutrofizace.....	47
2.11. Způsoby čištění komunálních odpadních vod v tropickém monzunovém podnebí rozvojových zemích.....	48
3. Současná situace v Surabayi	50
3.1. Klima.....	50
3.2. Nakládání s vodami ve městě Surabaya.....	51
3.2.1. Dobrý příklad ze Surabaye.....	54
3.3. Legislativní požadavky na zpracování odpadních vod v Indonésii.....	55
3.4. Příležitosti vstupu na indonéský trh.....	56
4. Návrh extenzivního způsobu čištění odpadních vod v lokalitě Perumdos.....	57

4.1.	Lokalita a morfologie.....	57
4.1.1.	Počet obyvatel.....	59
4.2.	Kanalizační síť.....	59
4.3.	Emisní standardy.....	59
4.4.	Výpočet přírodní čistírny odpadních vod.....	60
4.4.1.	Látkové zatížení na přítoku PČOV.....	60
4.4.2.	Hydraulické zatížení na přítoku PČOV.....	60
4.4.3.	Mechanické čištění.....	62
4.4.4.	Hlavní stupeň čištění	65
4.4.5.	Kalové pole	69
4.5.	Provoz a údržba.....	71
5.	Závěr	72
6.	Seznam citované literatury	73
7.	Seznam obrázků	77
8.	Seznam tabulek	79
9.	Seznam zkratk.....	80
10.	Seznam použitých symbolů	81

1. Úvod

Čištění odpadních vod přírodě blízkým způsobem, v druhém největším městě Indonésie – Surabaya, je téma bakalářské práce, které vzniklo v souvislosti s osobní zkušeností, resp. semestrálním studiem.

Cílem bakalářské práce je navržení nového konceptu nakládání s odpadními vodami v městské části Perumdos. Návrh přírodní čistírny odpadních vod bude založen na normách platných v Evropě. Nový koncept pro likvidaci odpadních vod má za cíl respektovat specifické podmínky zájmové lokality. Snahou bude zohlednit podnebí, ale také technické a ekonomické možnosti země a popsání současných předpisů pro vypouštění komunálních odpadních vod.

Práce bude rozdělena do třech částí. V první části bude provedena rešerše literatury, která vysvětlí a popíše extenzivní technologie vycházející z moderního čištění odpadních vod, primárně podle evropských standardů. Budou popsány jednotlivé části přírodní čistírny a vstupující proměnné do návrhu. Dále budou popsány výhody a nevýhody přírodních čistíren, vhodnost implementace čistíren v teplých oblastech a provozní přístup. Druhá kapitola bude věnována popisu města Surabaya z hlediska klimatu, nakládání s vodami a současné legislativy pro komunální odpadní vody. Třetí část se bude zabývat samotným návrhem přírodní čistírny odpadních vod. Na základě předchozí rešerše bude vytvořen návrh možného řešení likvidace odpadních vod z městské části Perumdos velikostí do 1 000 obyvatel.

2. Extenzivní způsoby čištění odpadních vod

Extenzivní (přírodě blízké) způsoby čištění odpadních vod využívají přirozené samočisticí procesy, které se běžně vyskytují v půdě, vodě nebo mokřadním prostředí.

Odstraňování nerozpuštěných látek probíhá pomocí sedimentace, biologického rozkladu nebo filtrace v jemných nesoudržných zeminách.

Odstranění rozpuštěného znečištění probíhá zejména prostřednictvím bakterií a mikroorganismů, kterým je nutné vytvořit vhodné životní podmínky. Přírodní čistírny odpadních vod (PČOV), jsou zpravidla osázeny vhodnými mokřadními rostlinami, které zajišťují dobré klima ve filtru. Rostliny využívají nutrienty, kterými jsou fosfor (P) a dusík (N), k tvorbě biomasy, také slouží jako ochrana filtru a působí jako estetický prvek.

Přírodní čistírny se rozlišují na základě různých konstrukčních parametrů, nicméně třemi hlavními kritérii jsou hydrologie (otevřená hladina, podpovrchové proudění vody), typ rostlin (vynořené, ponořené, plovoucí) a směr proudění vody (horizontální a vertikální). Podrobněji uvedeno v Tab. č. 1.

Oproti ostatním technologiím čištění odpadních vod se přírodní čistírny vyznačují nízkými nároky na provoz a údržbu, dále nejsou náchylné na výkyvy na přítoku do čistírny a vykazují tak vyšší spolehlivost provozu (Dotro et al., 2017).

Tab. č. 1: Varianty využití přírodních způsobů čištění (Dotro et al., 2017)

Typ	Stručný popis
Horizontální filtr	<ul style="list-style-type: none">• Odpadní voda protéká horizontálně přes pískový nebo štěrkový filtr, hladina vody je pod povrchem• Dochází k anaerobním rozkladným procesům• Nutnost zavedení účinného primárního čištění pro odstranění pevných částic, zabránění ucpání filtru• Použití vyčnávajících (emerzních) rostlin<ul style="list-style-type: none">○ Orobinec (Typha) Obr. č. 1○ Rákos (Phragmites) Obr. č. 2○ Skřípina kořenující (Scirpus) Obr. č. 3○ Kana indická (Canna indica) Obr. č. 4• Použití pro sekundární nebo terciální čištění
Vertikální filtr	<ul style="list-style-type: none">• Odpadní voda je přerušovaně přiváděna na povrch a vertikálně prosakuje štěrkovým filtrem• Dochází k aerobním rozkladným procesům• Nutnost zavedení účinného primárního čištění pro odstranění pevných částic, zabránění ucpání filtru• Emerzní rostliny: Typha, Phragmites, Scirpus, Canna
Volná vodní hladina	<ul style="list-style-type: none">• Volná vodní hladina, vzhledově podobně jako přírodní mokřady• Vyžadují velkou plochu, zpravidla mírné zatížení

Typ	Stručný popis
Hybridní systém	<ul style="list-style-type: none"> • Použití různých druhů rostlin <ul style="list-style-type: none"> ○ emerzní: Typha, Phragmites, Scirpus, Canna ○ ponořené (submerzní): Rdest kadeřavý (Potamogeton) Obr. č. 6 ○ plovoucí: Vodní hyacint (Eichhornia) Obr. č. 5 • Použití pro terciální čištění pro podnebí mírného pásu, v tropickém a subtropickém pásu lze použít jako hlavní stupeň čištění
	<ul style="list-style-type: none"> • Více filtračních stupňů za sebou – Vertikální, horizontální filtry, volná hladina • Vyšší celkový účinek eliminace znečištění



Obr. č. 1 Orobinec (*Typha domingensis*) převzato z <https://botany.cz/cs/typha-domingensis/>



Obr. č. 2 Rákos obecný (*Phragmites australis*) převzato z <https://botany.cz/cs/phragmites-australis/>



Obr. č. 3 Skřípina kořenující (*Scirpus radicans*) převzato z <https://botany.cz/cs/scirpus-radicans/>



Obr. č. 4 Kana indická (*Canna indica*) převzato z <https://www.semenaonline.cz/kana/4288-kana-indicka-canna-indica-prodej-semen-6-ks.html>



Obr. č. 5 Vodní hyacint (*Eichhornia crassipes*)
převzato z

https://www.123rf.com/photo_63929823_water-hyacinth-in-river.html?is_plus=1



Obr. č. 6 Rdest kadeřavý (*Potamogeton crispus*) převzato z

<https://botany.cz/cs/potamogeton-crispus/>

2.1. Odpadní vody a nakládání s nimi

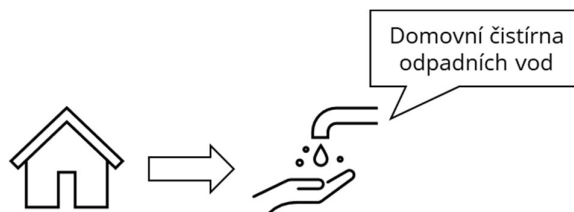
Odpadní vody jsou podle §38 vodního zákona č. 254/2001 Sb. vody, které mají po použití změněnou jakost (složení nebo teplotu) (Vodní zákon, 2001).

Pro správný návrh čistírny odpadních vod je důležité znát údaje o kvalitě a kvantitě čištěné vody. Zneškodňování (čištění) odpadních vod (OV) je v každém státě řešeno individuálně, většinou jsou stanoveny limity pro objem a míru znečištění vypouštěných odpadních vod do recipientu. V práci je uvažováno s českými i zahraničními normami, především pak s německými.

V České republice, v oboru vodního hospodářství zůstávají některé oblasti nepokryté normami. Standardy splňující nově definované cíle Evropské unie, které vedou k zefektivnění celého oboru, existují ve formě německých oborových norem DWA. Česká agentura pro standardizaci (ČAS) se rozhodla podpořit iniciativu společnosti SEWACO o přinesení německých norem DWA odborníkům v českém jazyce (Mohrmann, 2022).

Zneškodňování OV je možné realizovat decentralizovaným systémem (on-site system) či veřejnou kanalizací (centrální systém).

Decentralizovaný systém, znamená zneškodnění odpadních vod v místě produkce buď domovními čistírnami odpadních vod (DČOV), nebo akumulací odpadní vody v jímce na vyvážení. Vhodná zástavba pro implementaci systému je venkovská a příměstská zástavba (Sharma & Tyagi, & Singh, 2022).



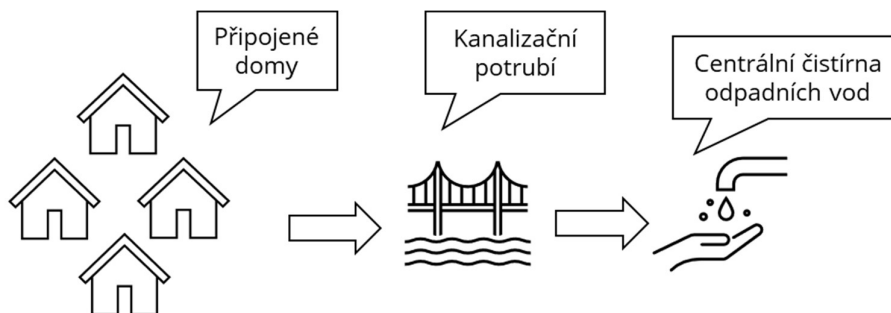
Obr. č. 7: Schéma DČOV



Obr. č. 8: Schéma jímky na vyvážení

Centrální systém čištění (komunální čistírna) odpadních vod se obvykle používá v městských oblastech, kde je hustota osídlení dostatečně vysoká, aby bylo řešení čištění ekonomicky výhodné (Sharma & Tyagi, & Singh, 2022).

Každý dům je napojen přípojkou do kanalizace (jednotná, oddílná), která gravitačně, tlakově či podtlakově přivádí vodu na čistírnu odpadních vod. Způsob, v jakém režimu je odpadní voda přiváděna na čistírnu odpadních vod, má přímý vliv na návrh technologie a dimenze ČOV. Při tlakovém systému je potřeba počítat s jiným látkovým a hydraulickým zatížením než u kanalizace gravitační. U tlakové kanalizace se nezařazují česle před anaerobní separátor (Miszta-Kruk, 2015).



Obr. č. 9: Schéma centrálního systému

2.2. Návrhové parametry komunální čistírny

Návrh komunální čistírny mechanicko-biologické i přírodní vychází z průzkumu současného a budoucího stavu a zastavěnosti území. Skladba jednotlivých objektů a technologie čistírny záleží na typu stokové sítě (oddílná, jednotná). S tím souvisí množství (hydraulické zatížení) a znečištění (látkové zatížení) odpadních vod přitékajících na čistírnu.

Návrh PČOV se dimenzuje na průměrný denní přítok na čistírnu Q_{24} . Je vypočítáno maximální kapacitní vytížení čistírny pro hydraulické a látkové zatížení čistírny. Návrh dimenze čistírny je dle nejnepříznivějšího stavu.

Pokud nejsou k dispozici údaje o kvalitě a množství odpadní vody přitékající na čistírnu odpadních vod, je nutné chybějící údaje dodatečně naměřit, nebo údaje určit na základě empirických hodnot (Standard DWA-A 262E, 2017). Při návrhu dimenze je nutné zohlednit míru růstu populace v čase (ČSN 75 6402, 2017).

2.2.1. Hydraulické zatížení

Množství odpadních vod je přímo úměrné počtu ekvivalentních obyvatel (EO) a specifické produkci odpadních vod q_{spec} . Na jednoho EO jsou v evropských podmínkách doporučeny návrhové hodnoty hydraulického zatížení. Specifická produkce OV odpovídá přibližně q_{spec} 90–120 l/osobu/den.

Pokud nejsou k dispozici data ani není možné provést dodatečné měření, je nutné stanovení hydraulického zatížení pomocí vzorců. Díky nim se dá stanovit průměrný bezdeštný denní přítok $Q_{24,m}$, průměrný bezdeštný denní přítok s balastními vodami Q_{24} dle rovnice (2.1). Balastní vody Q_B jsou nežádoucím jevem, které se do gravitačních kanalizací dostávají infiltrací. Infiltrace je přímo úměrná stavebně-technickému stavu stokové sítě (kanalizační potrubí a šachty). Množství balastních vod je při výpočtu ČOV, dle českých norem (ČSN 75 6402 a ČSN 75 6401) stanoveno odborným odhadem. Pro nově navržené stokové sítě lze uvažovat 5 % z průměrného denního přítoku $Q_{24,m}$. U stávajících stok by neměly balastní vody přesahovat 15 % $Q_{24,m}$ (Hluštík, 2018). Objekty čistírny, pro které jsou návrhové parametry hydraulické zatížení či doba zdržení (anaerobní separátor, usazovací nádrž), jsou navrhovány na průměrný bezdeštný denní přítok Q_{24} .

Průměrný bezdeštný denní přítok v m^3 /den

$$Q_{24} = Q_{24,m} + Q_B = EO \cdot q_{spec} \cdot Q_B \quad (2.1)$$

Maximální bezdeštný denní přítok se vypočítá jako průměrný denní přítok bez balastních vod a je násoben koeficientem maximální denní nerovnoměrnosti k_d . Maximální denní nerovnoměrnost je závislá na počtu připojených obyvatel (1 000 EO: $k_d = 1,5$; 100 000 EO: $k_d = 1,25$). Dále jsou přičteny balastní vody (ČSN 75 6401, 2006) (ČSN 75 6402, 2017). Je nutné tento přítok znát pro povolení čistírny.

Maximální bezdeštný denní přítok v m^3 /den

$$Q_d = Q_{24,m} \cdot k_d + Q_B \quad (2.2)$$

Maximální bezdeštný hodinový přítok se určuje pro dimenzování stokové sítě a objektů čistírny, kterými jsou česle, lapáky písku či snímače průtoků, dle rovnice (2.3). Průměrný denní přítok bez balastních vod je násoben koeficientem maximální denní nerovnoměrnosti k_d a maximální hodinovou nerovnoměrností k_h . Stejně jako maximální denní i maximální hodinová nerovnoměrnost je závislá na počtu připojených obyvatel (30 EO: $k_h = 7,2$; 100 000 EO: $k_h = 1,5$). Dále jsou přičteny

balastní vody Q_B a přítok je převeden na $m^3/hodinu$ (ČSN 75 6401, 2006) (ČSN 75 6402, 2017).

Maximální bezdeštný hodinový přítok v m^3/h

$$Q_h = (Q_{24,m} \cdot k_d \cdot k_{h,max} + Q_B) / 24 \quad (2.3)$$

2.2.2. Látkové zatížení

Pro určení látkového znečištění, jsou sledovány tzv. ukazatele znečištění, kterými jsou biochemická spotřeba kyslíku při anaerobních podmínkách za 5 dní (BSK_5), chemická spotřeba kyslíku, která se u odpadních vod stanovuje dichromanem draselným ($CHSK_{Cr}$), nerozpuštěné látky (NL), amoniakální dusík ($N-NH_4^+$), celkový dusík (N_{celk}) a celkový fosfor (P_{celk}).

Pro přesné stanovení látkového znečištění odpadní vody přitékající na čistírnu, je nutné odebrat vzorky a následným rozbořem stanovit přitékající znečištění.

Pro základní studii proveditelnosti lze stanovit přitékající znečištění na základě tabelovaných orientačních hodnot produkce specifického látkového znečištění na ekvivalentního obyvatele v g/den . Orientační hodnoty jsou uvedeny například v české normě ČSN 75 6402 nebo v německých standardech DWA-A 262E, viz Tab. č. 2, kde jsou uvedeny hodnoty o látkové koncentraci znečištění přitékající vody, standardy zároveň udávají hodnoty po mechanickém předčištění vícekomorovým septikem, usazovací či štěrbínovou nádrží při době zdržení nad 2 hodiny pro průtok Q_h .

Tab. č. 2 *Specifické látkové zatížení na ekvivalentního obyvatele v $g/(EO.den)$ (Standard DWA-A 262E, 2017)*

Ukazatel	Látková koncentrace znečištění přitékající vody $g/(EO.den)$	Po předčištění – vícekomorovým septikem, usazovací a štěrbínovou nádrží s dobou zdržení ≥ 2 hodiny při Q_h $g/(EO.den)$
BSK_5	60	40
CHS_{Cr}	120	80
NL	70	25
$N-NH_4^+$	11	10
N_{celk}	11	10
P_{celk}	1.8	1.6

Nejdůležitější je však sledování látkové zátěže na odtoku z čistírny, které musí odpovídat emisním standardům. Přípustné hodnoty koncentrace vypouštěných odpadních vod jsou v České republice standardizované dle počtu připojených obyvatel. Limitní hodnoty pro vypouštění odpadních komunálních vod jsou uvedeny

v Nařízení vlády č. 401/2015 Sb. Příloha č. 1. Podle nařízení, čistírny do 2 000 EO nejsou povinny sledovat na odtoku koncentrace N_{celk} a P_{celk} . Pro 500–2 000 EO jsou uvedeny koncentrace pro jednotlivé ukazatele znečištění v Tab. č. 3.

Tab. č. 3 Emisní standardy: koncentrace ukazatelů znečištění vypouštěných odpadních vod v mg/l (NV č. 401/2015 Sb., 2015)

Kategorie ČOV (EO) nebo velikost aglomerace	CHSK _{Cr}		BSK ₅		NL		N-NH ₄		N _{celk}		P _{celk}	
	p	m	p	m	p	m	p*	m	p*	m	p*	m
500 – 2 000	125	180	30	60	40	70	20	40	-	-	-	-

p přípustné hodnoty
m maximální hodnoty
p* hodnoty průměru

2.3. Schéma zapojení přírodní čistírny

Stejně jako u mechanicko-biologických čistíren odpadních vod, je i u přírodních čistíren nutné primární čištění vody od hrubých nečistot a nerozpuštěných látek. V případě PČOV je osazení primárního čištění důležité z důvodu budoucích poruch. Výjimkou je tzv. French system, jehož prvním stupněm, po předčištění vody na česlích, je kalové vertikální pole, z něho je voda odváděna drenážním potrubím na další stupeň čištění, kterým je zpravidla vertikální filtr s podpovrchovým prouděním (Langergraber & Gabriela & Jaime, & Anacleto, 2019).



Obr. č. 10: Pohled na kalové pole French systému v Bukově

Schéma zapojení přírodní čistírny je znázorněno na Obr. č. 11. Stejně jako mechanicko-biologické čistírny se dělí na primární, sekundární, případně na terciální stupeň čištění.



Obr. č. 11: Schematické konstrukční uspořádání přírodních čistíren

Odpadní voda (viz kapitola 2.1) nejprve přitéká na mechanické předčištění. Mechanické předčištění, někdy známé pod pojmem primární čištění, je fyzikální proces, jehož úkolem je zbavit vodu hrubých viditelných nečistot (toaletní papír, exkrementy, tuky, zbytky jídla, plastické hmoty). Jedná se zejména o proces sedimentace.

Technologie pro primární čištění jsou podobné jako u čistíren mechanicko-biologických, jedná se o osazení hrubých (průliny 50–200 mm) a jemných česlí (průliny 10–20 mm), viz kapitola 2.4.1. Pokud se jedná o jednotnou kanalizaci, je vhodné osadit také lapák písku (zachycení zrn velikosti 0,2–0,25 mm), podrobněji v kapitole 2.4.2. V případech vysokého zatížení tuky a oleji se navrhuje lapáky tuků, zpravidla se umísťují přímo ke zdroji znečištění (ČSN 75 6402, 2017).

Za odseparováním hrubých nečistot se u přírodních čistíren osazují objekty, ve kterých dochází ke gravitační separaci suspendovaných částic, při specifické době zdržení. Jedná se především o objekty vícekomorových septiků, blíže popsáno v kapitole 2.4.3. Orientační procento odstranění nerozpuštěných látek (NL) je 50 % až 60 %. Anaerobní separátor, viz kapitola 2.4.4, vykazuje odstranění NL 70 % až 90 %. Při návrhu mechanického předčištění volíme kombinaci výše uvedených technických separátorů nerozpuštěného znečištění, zpravidla v pořadí – česle, lapák písku (pro jednotnou kanalizaci), anaerobní separátor. Primární stupeň je velmi důležitou částí u přírodních čistíren. Chrání hlavní stupeň čištění před zanášením a ucpáváním a díky tomu se zvyšuje pravděpodobnost dosažení delší životnosti čistírny (Wang & Sheng, & Xu, 2021).

Za mechanickým předčištěním následuje hlavní stupeň čištění (sekundární stupeň čištění), který je tvořen zemními filtry s podpovrchovým nebo povrchovým prouděním. Je rozlišován směr proudění horizontální a vertikální.

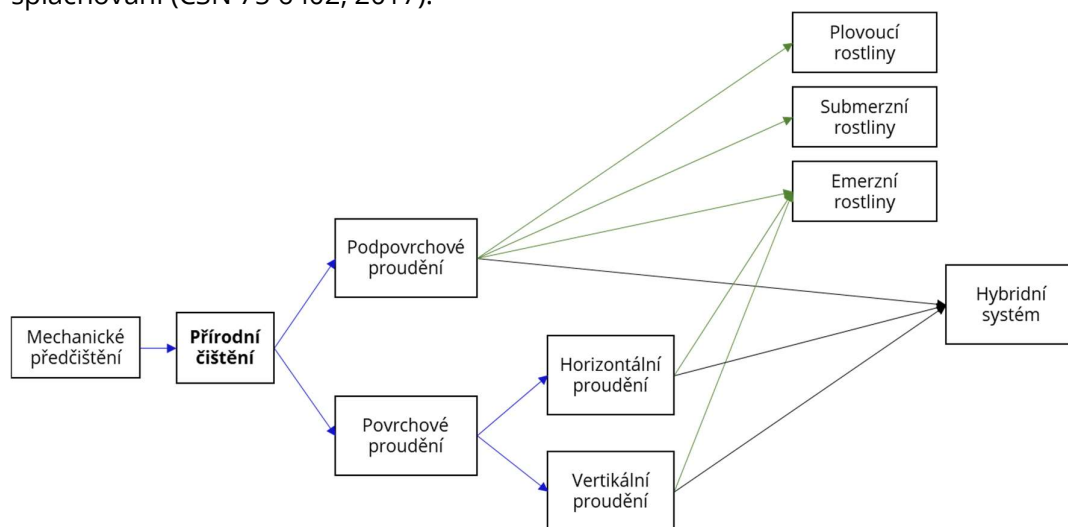
U horizontálního podpovrchového proudění převládají uvnitř filtru anaerobní podmínky, odhadovaná plocha na ekvivalentního obyvatele EO je 5–10 m² (Ilyas, & Masih, 2017), podrobněji v kapitole 2.5.1.

U vertikálního podpovrchového proudění převládají aerobní podmínky s doporučenou plochou pro chladná podnebí 3–4 m²/EO, v teplejších podmínkách je požadovaná plocha 1–2 m²/EO („CPCB“, 2019), viz kapitola 2.5.2.

Stabilizační nádrže s povrchovým prouděním jsou mělké nádrže. Ve vhodných klimatických podmínkách jsou používány jako hlavní stupeň čištění. Nevýhodou je potřeba velké plochy na připojeného obyvatele, které odpovídají zhruba ploše >10 m²/EO (Vymazal & Zhao, & Mander, 2021), viz kapitola 2.5.3.

Hybridní systémy mohou být různou kombinací výše uvedených variant přírodního čištění odpadních vod. Překonávají nevýhody horizontálního a vertikálního proudění (Martinez-Guerra & Castillo-Valenzuela, & Gnaneswar Gude, 2018), podrobněji v kapitole 2.5.4.

Dalším stupněm, který však není zařazován vždy, je dočištění, také znám pod pojmem terciální stupeň čištění. Zařazuje se, když je nutné dosáhnout vyšších účinností čistírny (požadavek na vyšší kvalitu vypouštěné vody). Jedná se o osazení stabilizační nádrže, technologický prvek, či přidání dalšího filtru odstraňující zbytkové znečištění. Následně je voda vypouštěna do recipientu, nebo je zadržována v akumulačních nádržích pro závlahu či recyklaci v domácnosti například na splachování (ČSN 75 6402, 2017).



Obr. č. 12: Rozdělení přírodních čistíren dle způsobu čištění odpadních vod převzato a upraveno (Vymazal, 2016)

2.4. Primární čištění odpadních vod

Jak už bylo zmíněno v předchozí kapitole, správné určení dimenze mechanického předčištění je první krok ke kvalitně provedené přírodní čistírně odpadních vod

s dlouhou životností. Zejména při zařazení vertikálních filtrů. Běžně používané technologie jsou popsány v následujících podkapitolách.

2.4.1. Česle

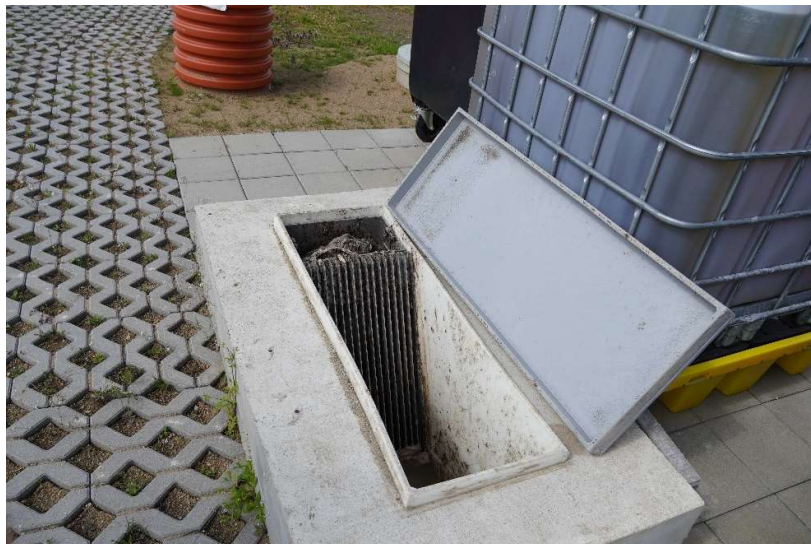
Česle slouží k odstraňování hrubých nerozpuštěných nečistot z odpadních vod přitékající na čistírnu. Rozlišují se česle podle:

- Rozteče průlin
 - hrubé – zachycení částic nad 50 mm
 - jemné – zachycení částic nad 10 mm
- Způsobu čištění
 - ručně stírané – musí být stíratelné po celé ploše, potřeba stírání v závislosti na připojených EO
 - strojně stírané – nutná ochrana před vnějšími vlivy, potřeba elektrické energie a občasnou technickou kontrolu

Sklon česlí, vzhledem kde dnu příváděcího žlabu je 45° až 60°. U přírodních čistíren se obvykle volí ručně stírané česle. Nevýhodou je potřeba každodenního stírání.

Dle ČSN 75 6402 by rychlost vody na česlích neměla překročit hodnotu $v_{\text{česle}} = 1,0$ m/s při maximálním hodinovém průtoku Q_h . Zároveň je důležité, aby rychlost před česlemi neumožňovala usazování nerozpuštěných látek.

Pro shrabky z česlí je nutno vybudovat shromažďovací prostory, které budou následně vyváženy na skládky či kompostárny (ČSN 75 6402, 2017).



Obr. č. 13: Hrubé česle ručně stírané v obci Hlína

2.4.2. Lapák písku

Lapáky písku se zařazují na základě posouzení podmínek v zájmové lokalitě (typ kanalizace, charakter odpadních vod, nepřetržitost provozu). Často však postačí zařazení ochranné prohlubně.

Rozlišujeme lapáky s vertikálním a horizontálním prouděním, provzdušňované a neprovzdušňované. Lapáky zachytí částice nad 0,2 mm.

Rychlost proudění v podélném lapáku má být do 0,3 m/s a hydraulické zatížení nemá překročit hodnotu 16 m³/(m².h). Rychlost proudění ve vertikálním lapáku by měla být do 0,05 m/s, střední doba zdržení pro oba typy při Q_h by neměla být kratší než 30 sekund.

Akumulační prostor na písek má mít kapacitu na 10 až 15 dní, na čistírně musí být vybudované zařízení pro odvodnění písku (odvodňovací kontejnery) (ČSN 75 6402, 2017).

2.4.3. Vícekomorový septik

Vícekomorový septik je vodotěsná nádrž složená zpravidla ze tří komor, které slouží k zachycování a čištění odpadních vod z domácností s velmi nízkou rychlostí proudění, aby se v ní mohly usazovat suspenze pevných předmětů a rozkládat organické látky anaerobními mikroby. Je to konvenční způsob likvidace odpadních vod v lokalitách s rozptýlenou zástavbou. Jedná se o podzemní konstrukci z plastu či železobetonu. Proces čištění OV probíhá v septiku za přírodních a technologických procesů od specifického producenta. Zralý (stabilizovaný) kal se usazuje na dně nádrže a měl by se pravidelně vypouštět v intervalu řádu jednotek let v závislosti na místních podmínkách. Z důvodu malé účinnosti odstranění znečištění, viz Tab. č. 2, by proces čištění měl být doplněn o doúpravu vytékající septické vody, například přírodní čistírnou přes filtrační pole. Pokud je individuální systém správně instalován, umístěn a udržován, může chránit veřejné zdraví a přírodní zdroje. Decentralizovaný systém je finančně výhodný s dlouhodobou možností čištění odpadních vod v málo hustě osídlených oblastech („About Septic Systems“, n. d.). Celkový účinný prostor septiku ($V_{\text{septik}} = \text{m}^3$) se vypočítá dle vzorce (2.4), zároveň by septik neměl být menší než 3 m³ (ČSN 75 6402, 2017).

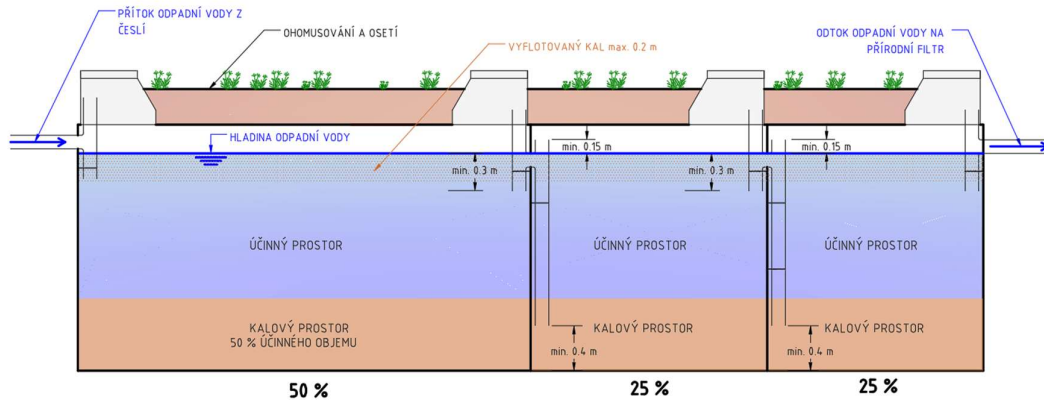
Výpočet objemu vícekomorového septiku je součin kalového prostoru (doporučeno dle ČSN 75 6402 $a = 1,5$), počtu připojených obyvatel ($n = \text{EO}$), specifické potřeby vody na osobu ($q_{\text{spec}} = \text{m}^3/\text{osobu}/\text{den}$) a střední době zdržení (doporučeno dle ČSN 75 6402 $t = 5$ dní).

Celkový účinný prostor septiku v m³

$$V_{\text{septik}} = a \cdot n \cdot q_{\text{spec}} \cdot t \quad (2.4)$$

2.4.4. Anaerobní separátor

U centrálního systému je dalším stupněm, po hrubém předčištění (česle, lapák písku), anaerobní separátor (AS). Návrh separátoru vychází z principu klasického vícekomorového septiku.



Obr. č. 14: Prostorové uspořádání anaerobního separátoru

Konstrukce separátoru je většinou železobetonová prefabrikovaná či monolitická. Separátor je opatřen minimálně třemi komorami. První komora nádrže by měla tvořit 50 % celkového objemu separátoru, druhá a třetí komora pak tvoří 25 %. Třetí komora slouží jako dávkovací nádrž pro přírodní čistírnu (ČSN 75 6402, 2017). Komory jsou odděleny přepážkami (tl. 150, 300 mm), které jsou vzájemně propojeny normými stěnami z PVC T tvarovek. Kalový objem je uvažován 50 % z účinného prostoru nádrže, na povrchu se nachází vyflotovaný kal, který by neměl klesnout pod nátok normé stěny (0,3 m), která vede vodu do druhé komory. Zároveň by neměl převýšit zavzdušňovací potrubí ve výšce 0,15 m v druhé komoře. Separátor je opatřen revizními šachtami vždy na přítoku a odtoku a v částech normých stěn, kde jsou do šachet vyvedeny zavzdušňovací kusy. Anaerobní separátor je navržen tak, aby odpadní voda musela urazit co nejdelší cestu, je to zajištěno jak v příčném, tak v půdorysném směru. Objem celkového separátoru je přímo úměrný době zdržení. Výhodné umístění filtru vůči filtračním polím je do vyšší úrovně, následně je voda přiváděna na filtr gravitačně bez nutnosti čerpání.

Podle české normy je výpočet anaerobního separátoru stejný jako u vícekomorového septiku, viz rovnice (2.4). Je zde však optimalizovaná střední doba zdržení ($t = 3-4$ dny), zvyšuje se tak účinnost čištění a minimální celkový objem separátoru $V = 4 \text{ m}^3$ (ČSN 75 6402, 2017).

V německých standardech DWA-A 262E je výpočet objemu anaerobního separátoru značně zjednodušen, viz rovnice (2.5). Požadovaná velikost separátoru musí být nejméně $0,3 \text{ m}^3/\text{EO}$ a minimální objem separátoru $V = 3 \text{ m}^3$. Přičemž dle rakouské normy (ÖNORM B 2505, 2009) by plocha neměla být menší než $0,06 \text{ m}^2/\text{EO}$, rovnice (2.6). Hydraulická doba zdržení v první a druhé komoře (75 % celkového objemu) je dopočtena, dle rovnice (2.7). Optimální hydraulická doba zdržení je nejvýhodnější 1 až 2 dny (Leicester & Amezaga & Moore, & Heidrich, 2020).

Je zřejmé, že návrhový objem dle české normy vůči německým a rakouským standardům je nadhodnocen. Hlavním rozdílem je četnost vyvážení sedimentu z anaerobního separátoru. Zatím co, AS s vyšším objemem (doba zdržení 4-5 dní) je vyvážen v řádech let, AS s menším objemem (doba zdržení 1-2 dny) je vyvážen

v řadech měsíců, přibližně 4x do roka. Dále standard předpokládá, že se v anaerobním separátoru odstraní 1/3 přitékajícího CHSK_{Cr} při době zdržení větší než 2 hodiny (Standard DWA-A 262E, 2017).

Minimální objem anaerobního separátoru v m^3

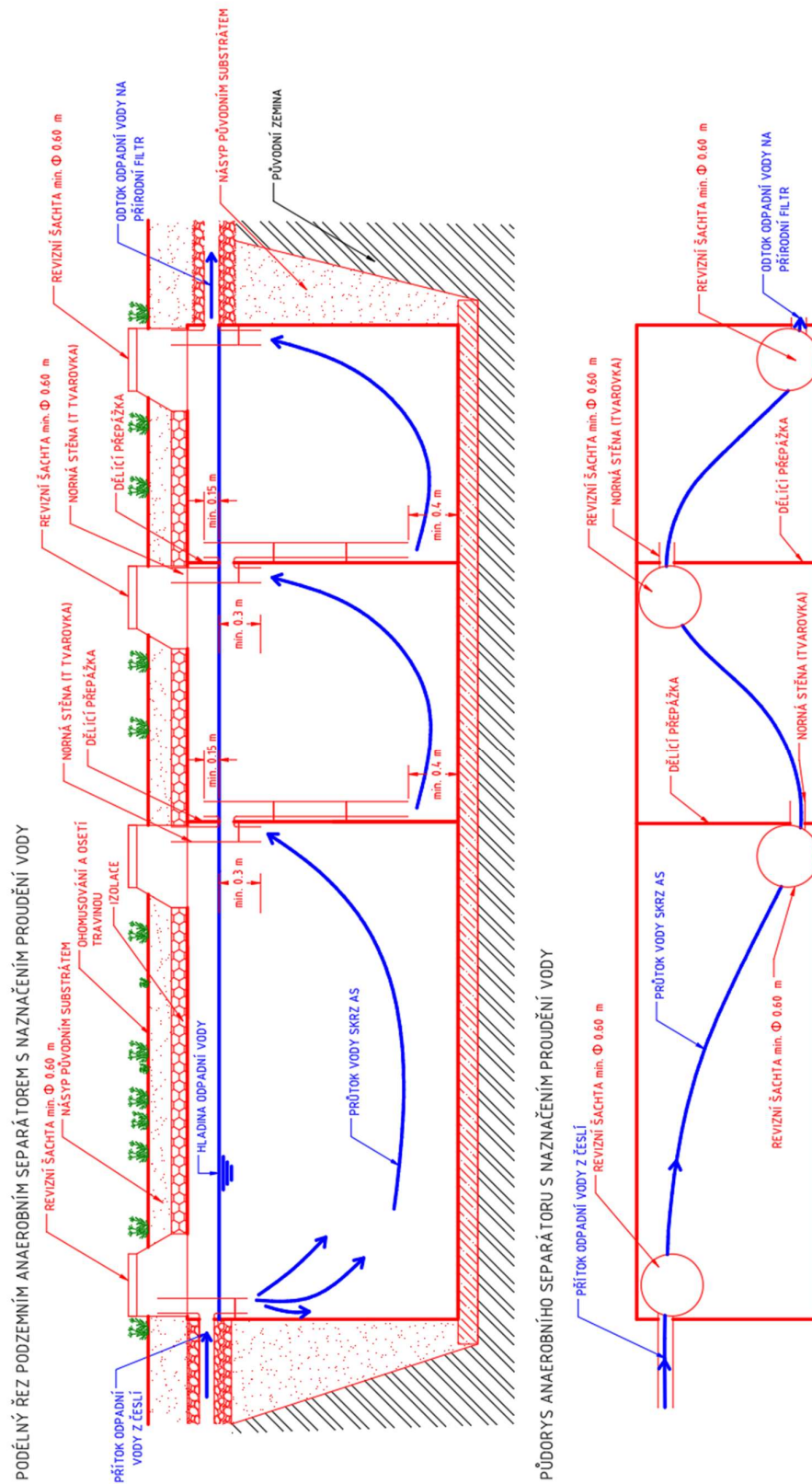
$$V_{AS} = EO \cdot 0,3 \quad (2.5)$$

Minimální plocha anaerobního separátoru v m^2

$$A_{AS} = EO \cdot 0,06 \quad (2.6)$$

Doba zdržení v první a druhé komoře anaerobního separátoru ve dnech

$$t_{AS} = \frac{V \cdot 0,75}{Q_{24}} \quad (2.7)$$



Obr. č. 15: Technický výkres konstrukčního anaerobního separátoru ve výkopu



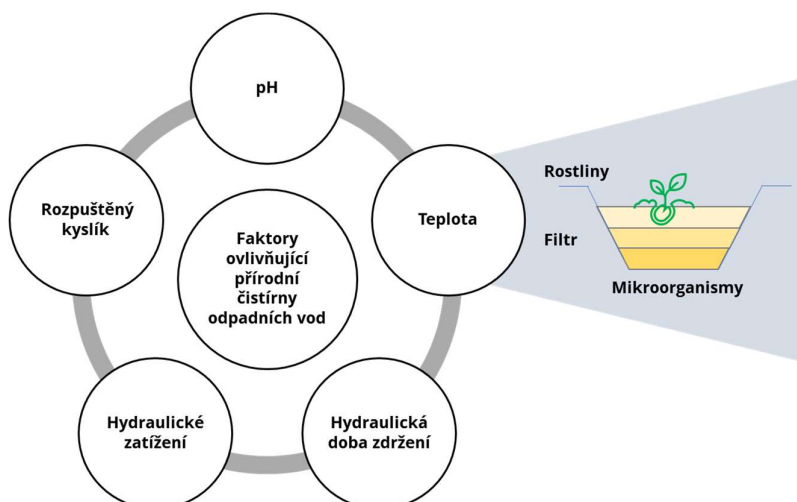
Obr. č. 16: Opevněná a zatravněná plocha anaerobního separátoru v obci Hlína

2.5. Sekundární a terciální čištění odpadních vod

Nejdůležitějšími konstrukčními parametry u sekundárního a terciálního čištění odpadních vod jsou hydrologie (volná vodní hladina, podpovrchové a povrchové proudění), typ rostlin (vyčnívající, ponořené a volně plovoucí) a dráha proudění (horizontální a vertikální). Čisticí účinnost PČOV může záviset na hydraulickém zatížení, hydraulické době zdržení, pH, teplotě či rozpuštěném kyslíku. (Varma & Kumar Gupta & Sarathi Ghosal, & Majumder, 2020).

Sekundární čištění je hlavním stupněm u PČOV, které je většinou realizováno vertikálním a horizontálním podpovrchovým prouděním. V oblastech tropického a subtropického pásu je možné použít i stabilizační nádrže s volnou hladinou.

Terciální čištění je dočišťovacím stupněm, který se zařazuje v případě požadavku na vyšší kvalitu vody, je realizováno například stabilizačními nádržemi s volnou hladinou, nebo technologickým prvkem (dávkování činidla).



Obr. č. 17 Faktory ovlivňující PČOV převzato a upraveno z (Varma & Kumar Gupta & Sarathi Ghosal, & Majumder, 2020)

Filtrační lože o mocnosti 0,6–1,0 m musí být od okolního prostředí vodotěsně odděleno, protože nesmí docházet ke styku čištěných odpadních vod s podzemní vodou. Pokud je hydraulická vodivost podložní zeminy vyšší než $K = 10^{-8}$ m/s je nutné docílit vodotěsnosti vhodnými úpravami, například plastovými fóliemi (ČSN 75 6402, 2017).

Tab. č. 4 Typické hodnoty hydraulické vodivosti nasycených půd převzato a upraveno (Cheng-Yu, 2013)

Typ zeminy	Hydraulická vodivost (m/s)
Štěrk	1–0.01
Hrubý písek	$0.01-10^{-3}$
Jemný písek	$10^{-3}-10^{-5}$
Hlinitý písek	$10^{-5}-10^{-7}$
Jíl	$< 10^{-8}$

2.5.1. Horizontální podpovrchové proudění

Horizontální proudění (HP) přírodních čistíren je v ČR intenzivně zkoumáno prof. Ing. Janem Vymazalem, CSc., který působí na České zemědělské univerzitě v Praze. U HP PČOV proudí mechanicky předčištěná odpadní voda horizontálně pod povrchem přes porézní filtrační materiál, který je osázen emerzními rostlinami (Phragmites, Typha, Scirpus) (Vymazal, 2019). Požadovaná plocha je přibližně 5–10 m² na osobu (Ilyas, & Masih, 2017).

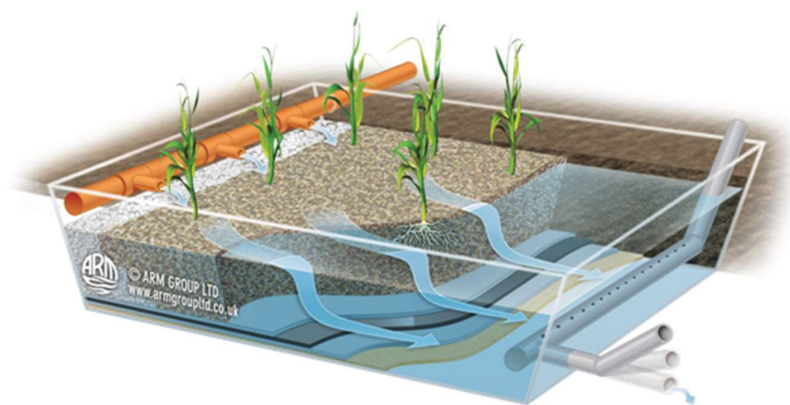
Doba zdržení je uváděna v řádech hodin, v některých případech i dní a hraje významnou roli v odstranění N_{celk} a je závislá na teplotě.

Typickým materiálem používaných v hlavních vrstvách o mocnosti min. 0,5 m je štěrk frakce 8–16 mm a pro vtokové a odtokové zóny je používána frakce 50–200 mm (Langergraber & Gabriela & Jaime, & Anacleto, 2019).

Pro dimenzování plochy HP PČOV je odvozen vzorec, vycházející z reakce prvního řádu pro pístový tok při odstraňování BSK₅ (2.8) (Vymazal, 2016). Průměrný průtok OV Q₂₄ (m³/den) je vynásoben podílem, kde v čitateli je rozdíl přirozeného logaritmu koncentrace BSK₅ na přítoku filtračního pole (FP) c_p (mg/l) a požadované koncentrace znečištění BSK₅ na odtoku c_o (mg/l) a ve jmenovateli je součin rychlostní konstanty úbytku znečištění BSK₅ k_{BSK} (m/den), kde doporučená hodnota je 0,1 m/den, dále pórovitost filtru n (doporučeno 0,4–0,45) a hloubka filtru h (m), zhruba 1 m. Vypočtená plocha zajišťuje dostatečné odstranění organických a nerozpuštěných látek (ČSN 75 6402, 2017).

Plocha vegetační čistírny s horizontálním podpovrchovým prouděním v m²

$$A_{HF} = Q_{24} \frac{\ln c_p - \ln c_o}{k_{BSK} \cdot n \cdot h} \quad (2.8)$$



Obr. č. 18 Schéma horizontálního filtru převzato z („Global wetland technology“, n. d.)

2.5.2. Vertikální podpovrchové proudění

U vertikální proudění (VP) přírodních čistíren obecně platí, že ve vertikálních filtrech s pulzním vypouštěním (voda dávkována několikrát denně na filtr) degraduje organické znečištění (BSK₅, CHSK_{Cr}) a celkový dusík (N_{celk}) aerobně, nerozpuštěné látky a patogenní organismy se odstraňují mechanickým čištěním. Minimální rychlost proudění vody v rozváděcích potrubích by neměla být menší než v_{vertikál} = 0,7 m/s, je tím zajištěno její samočištění (Langergraber & Gabriela & Jaime, & Anacleto, 2019). Účinnost čištění je přímo závislá na použitém filtračním materiálu. Vertikální filtr je osázen vhodnou emergentní vegetací, kterou je například Phragmites, Typha, Scirpus nebo Canna indica.

Vertikální filtry v chladných oblastech (mírný pás) vyžadují plochu 3–4 m² na EO a v teplých oblastech (tropický, subtropický pás) je požadovaná plocha 1–2 m² („CPCB“, 2019). Doba zdržení je v řádech hodin, v některých případech i v řádech dnů.

Dimenze filtračního pole vychází z látkového a hydraulického zatížení, které je následně porovnáno. PČOV je dimenzována na nejnepříznivější variantu.

Výpočet plochy dle látkového zatížení vychází z koncentrace $CHSK_{Cr}$, účinnost odstranění látkového znečištění je $U_{CHSK} = 15 \text{ g}_{CHSK}/\text{m}^2/\text{den}$ až $20 \text{ g}_{CHSK}/\text{m}^2/\text{den}$, viz rovnice (2.9). Do rovnice vstupuje součin koncentrace $CHSK_{Cr}$ po mechanickém čištění c_{1CHSK} s průměrným bezdeštným denním přítokem v m^3/den , který je vydělen zvoleným U_{CHSK} podle lokality.

Potřebnou plochu filtru lze také vypočítat na základě hydraulického zatížení, viz rovnice (2.10). Výpočet vychází z předpokladu, že maximální hydraulické zatížení by nemělo překročit $v_f = 0,15 \text{ m}/\text{den}$. Dalšími vstupními hodnotami jsou součinitel místních podmínek k (1,0 až 1,3) a Q_{24} v m^3/den .

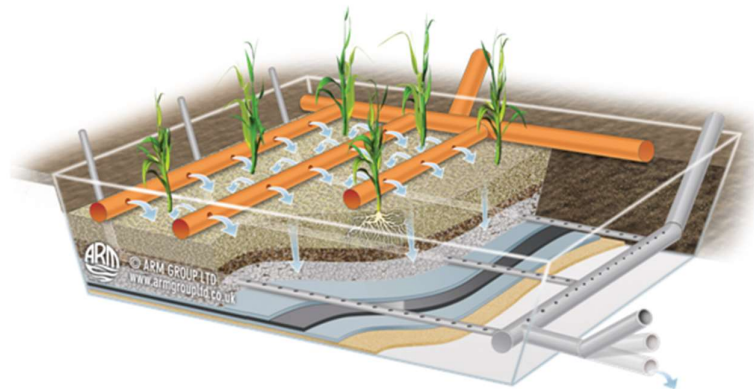
Výškový rozdíl nátoky a výtoku na filtr je minimálně 1 m (ČSN 75 6402, 2017).

Plocha přírodní čistírny s vertikálním podpovrchovým prouděním v m^2

$$A_{LZ} = \frac{c_{1CHSK} \cdot Q_{24}}{U_{CHSK}} \quad (2.9)$$

Plocha přírodní čistírny s vertikálním podpovrchovým prouděním v m^2

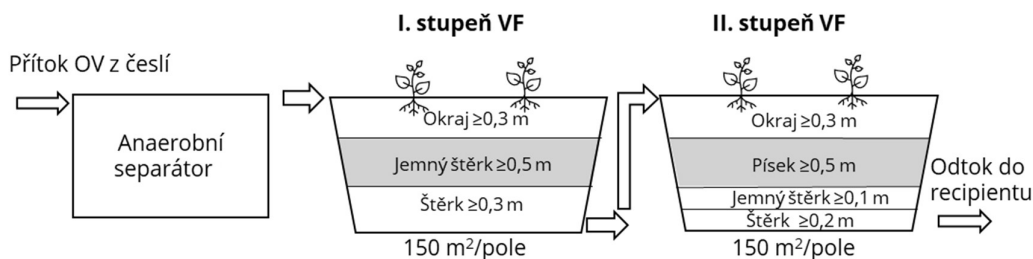
$$A_{HZ} = k \frac{Q_{24}}{v_f} \quad (2.10)$$



Obr. č. 19 Schéma vertikálního filtru převzato z („Global wetland technology“, n. d.)

Dvoustupňové uspořádání vertikálních filtračních polí znamená zařazení dvou vertikálních filtrů s odlišnou frakcí hlavní vrstvy.

Uspořádání je používáno z důvodu dosažení vyššího odstranění přitékajícího znečištění, díky použití různých frakcí v hlavních filtrech. Filtrační pole jsou navrhována na základě požadavků německých norem (Standard DWA-A 262E, 2017). Hlavní filtrační vrstvu prvního filtru představuje jemného štěrku frakce 2–8 mm, resp. písek frakce 0–4 mm v druhém filtru. Schéma zapojení je naznačeno na Obr. č. 20. Velikost prvního stupně VF odpovídá $1 \text{ m}^2/\text{EO}$, druhý stupeň VF je pak dimenzován na $1 \text{ m}^2/\text{EO}$ (ÖNORM B 2505, 2009).



Obr. č. 20 Schéma důležitých mocností jednotlivých vrstev dvoustupňového vertikálního filtru

Hlavní filtrační vrstva u I. stupně vertikálního filtru je o mocnosti $\geq 0,5$ m, používá se praný jemný štěrk frakce 2–8 (1–4) mm. Pod hlavní filtrační vrstvou je drenážní vrstva o mocnosti $\geq 0,3$ m, kterou tvoří praný štěrk frakce 16–32 mm. Okraje u filtrů jsou vysoké zhruba 0,3 m.

Ve II. stupni vertikálního filtru je použita hlavní filtrační vrstva o mocnosti $\geq 0,5$ m za použití praného betonářského písku (s minimem prachových částic) frakce 0–4 mm. Pod hlavní vrstvou se nachází přechodová vrstva z praného jemného štěrku frakce 2–8 mm tloušťky $\geq 0,1$ m. Spodní část filtru tvoří drenážní vrstva tloušťky $\geq 0,2$ m s praným hrubým štěrkem frakce 16–32 mm. Účinnost, kterou toto zapojení vykazuje se blíží ke 100 % (Standard DWA-A 262E, 2017).

Vliv použitých frakcí ve filtru (0,06–4 mm, 1–4 mm a 4–8 mm) byl simulován pomocí softwaru HYDRUS Wetland Module pro vertikální filtry (Pucher, & Langergraber, 2019). Autoři dospěli k závěru, že čím je filtrační materiál hlavní vrstvy zrnitější, tím je nižší účinnost odstraňování. Účinnost lze zvýšit buď použitím většího počtu dávek za den, nebo použitím hustější sítě rozvodných trubek na povrchu filtračního pole. Na druhou stranu jsou u jemnějšího materiálu delší časové intervaly mezi dávkami odpadní vody, aby se udrželo dostatečné provzdušnění filtračního lože (Vymazal & Zhao, & Mander, 2021).

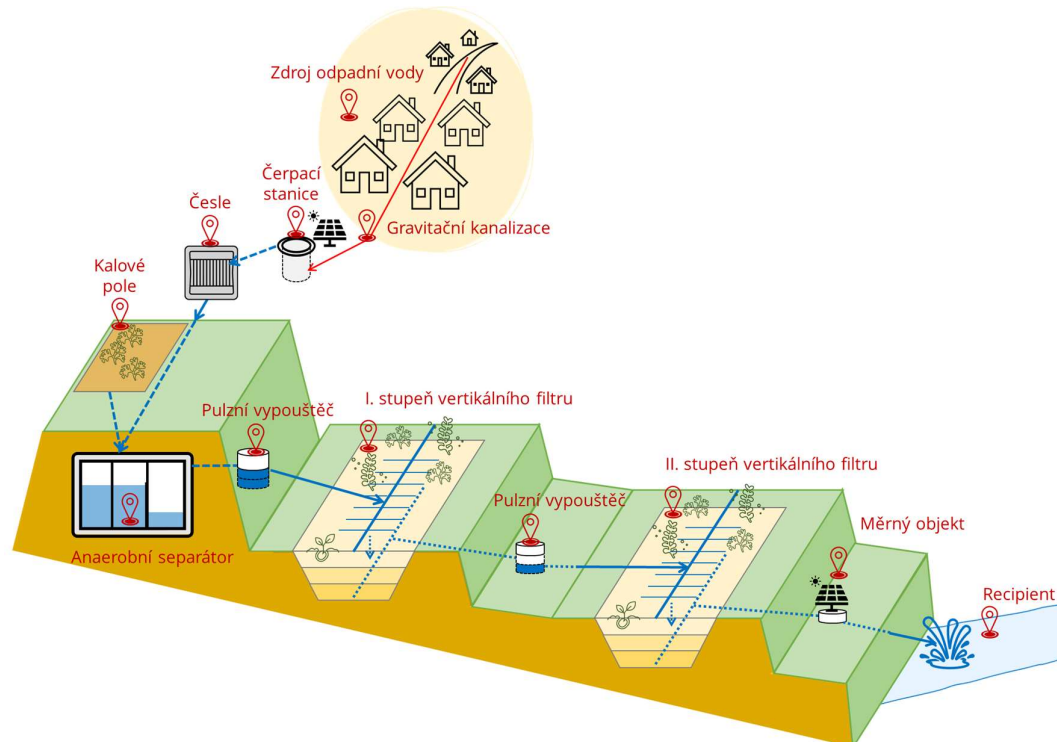


Obr. č. 21 Dvoustupňový vertikální filtr v obci Hlína – Rakouský systém

Výškové uspořádání přírodních čistíren odpadních vod je navrženo tak, aby voda na čistírně protékala gravitačně bez nutnosti použití elektrické energie. Návrh závisí na výškovém uspořádání stavební parcely, zda bude nutnost náspu či výkopu. Dále záleží na morfologii zástavby, zda bude zvolená kanalizační síť gravitační, tlaková či podtlaková.

V případě rovinatého povrchu jsou možnými variantami, buď vybudování tlakové kanalizace, nebo vybudování gravitační kanalizace s vybudováním čerpací stanice před čistírnou. V obou případech je nutné zařazení elektrické energie. V oblastech s dostatečnou dobou slunečního svitu během roku je vhodným řešením umístění fotovoltaických panelů s bateriemi.

Na čistírně jsou vhodné osadit pulzní vypouštěče, které jsou alternativou čerpadel.



Obr. č. 22 Výškové uspořádání dvoustupňového vertikálního filtru

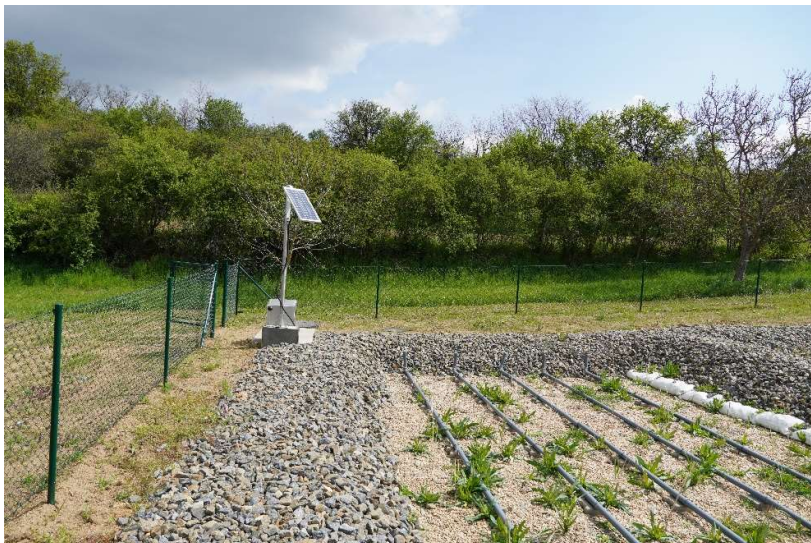
Pulzní vypouštěč (CW-PULZ) je technologický prvek na PČOV. Jedná se o užitný vzor č. 28083 VUT. Jedná se o alternativní způsob čerpadla, který dávkuje odpadní vodu do rozvodného a distribučního potrubí, které je nad plochou vertikálních filtrů. Doporučená velikost jednoho vertikálního filtru, pro správné fungování je 50–150 m². Principem je plnění a prázdnění nádrže v čase. Vodní hladina je korigována polystyrenovým plovákem. Když je zásobní nádrž naplněna po okraj, otevře se spodní výpust až do doby vyprázdnění, následuje uzavření a nové plnění nádrže. Výhodou pulzního vypouštěče je funkčnost bez elektrické energie a bez obsluhy. Možnou nevýhodou je minimální výška vodního sloupce 2 m (ConWe, 2018).



Obr. Č. 23 Pulzní vypouštěč na vertikální filtr v obci Hlína

Přírodní čistírna většinou funguje v gravitačním režimu, proto je nezávislá na eklektické energii. Elektrická energie je nutná pouze pro měření průtoků na konci PČOV, v případech vysokého znečištění fosforem se elektrická energie využívá pro dávkování činidla na srážení fosforu.

Odběr elektrické energie je malý a pro pokrytí potřeby stačí využití fotovoltaických panelů doplněných o baterie. Systém je tedy nezávislý na elektrické síti.

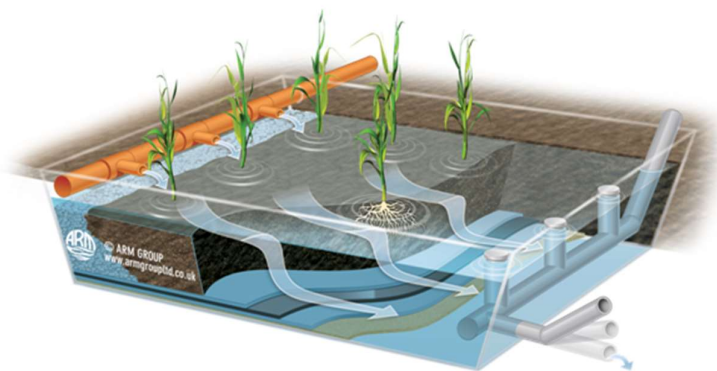


Obr. č. 24 Solární panel jako zdroj energie pro měřící zařízení v obci Hlína

2.5.3. Stabilizační nádrž

Stabilizační nádrže (SN) existují v režimu vertikálního či horizontálního povrchového proudění. Jedná se o přírodní čistírny s volnou hladinou, které jsou rozšířeny zejména v Austrálii a Severní Americe (Langergraber & Gabriela & Jaime, & Anacleto, 2019). Hloubka vody v nádrži se pohybuje okolo 0,7 až 2,0 m, pokud je možnost

zámru, je přidávána aerace. Střední doba zdržení by měla být nejméně 5 dní lépe 20 dní (ČSN 75 6402, 2017). Doporučená plocha pro stabilizační nádrže s volnou hladinou je $>10 \text{ m}^2/\text{EO}$ (Dotro et al., 2017). Účinnost odstraňování znečištění je u stabilizačních nádrží velmi kolísavá, zejména v chladném podnebí. Například odstranění N.NH_4^+ je 20 až 90 % dle (ČSN 75 6402, 2017).



Obr. č. 25 Schéma stabilizační nádrže s horizontálním prouděním převzato z („Global wetland technology“, n. d.)

Stabilizační nádrže s volnou vodní hladinou jsou osázeny vodními rostlinami, které jsou buď emerzní, plovoucí nebo submerzní. Procesy, které vedou k čištění vody ve stabilizačních nádržích jsou především sedimentace, oxidace, degradace a adsorpce. Jsou velmi podobné přírodním mokřadům a v širokém měřítku zvyšují biodiverzitu, protože přitahují širokou škálu živočichů, kterými jsou ryby, obojživelníci, plazy, ale také hmyz (Langergraber & Gabriela & Jaime, & Anacleto, 2019).

2.5.4. Hybridní systém

Hybridní systém se skládá z výše uvedených způsobů čištění, tedy horizontálních a vertikálních s podpovrchovým prouděním či stabilizačních nádrží s volnou hladinou. Při hybridním zapojení jsou kompenzovány nedostatky jednotlivých řešení, z tohoto důvodu dosahují hybridní systémy více než 90% účinnosti při odstraňování N_{celk} . Také jsou velmi účinné při odstraňování CHSK_{Cr} a BSK_5 , kdy dosahují účinností 94 % resp. 81 % (Martinez-Guerra & Castillo-Valenzuela, & Gnaneswar Gude, 2018).

2.6. Porovnání účinností zvolených přírodních čistíren

Dle článku (Varma & Kumar Gupta & Sarathi Ghosal, & Majumder, 2020) a současné platné české normy ČSN 75 6402 z roku 2017, bylo provedeno grafické porovnání účinností odstraněných ukazatelů znečištění sledovaných v odpadních vodách, kterými jsou BSK_5 , CHSK_{Cr} , N_{celk} a P_{celk} .

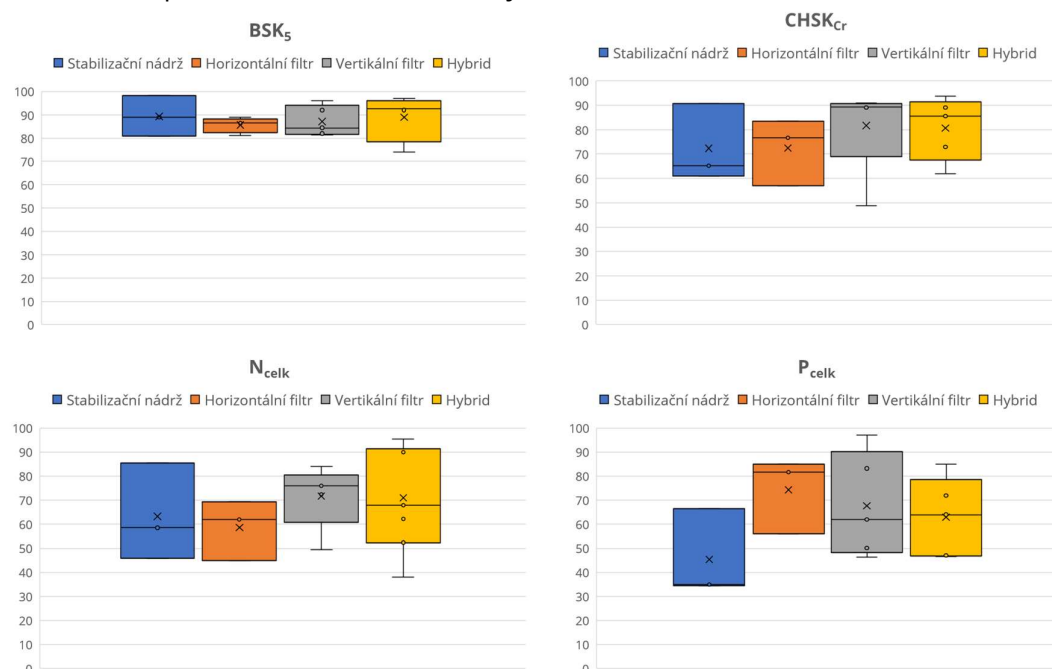
Článek se zabývá porovnáním a vyčíslením účinností přírodních čistíren různého typu v teplém a chladném podnebí. V Tab. č. 5 jsou přehledně vypsány průměrné účinnosti odstranění sledovaného znečištění na jednotlivých typech PČOV v teplém

podnebí. Doba zdržení byla určena jako průměr dob zdržení jednotlivých sledovaných PČOV, požadovaná plocha na čistírny na EO byla určena dle (Dotro et al., 2017).

Tab. č. 5 Průměrná účinnost odstranění znečištění v % v tropickém a subtropickém podnebí (Varma & Kumar Gupta & Sarathi Ghosal, & Majumder, 2020)

Typ PČOV	Doba zdržení den	Požadovaná plocha m ² /EO	BSK ₅	CHSK _{Cr}	N _{celk}	P _{celk}
Stabilizační nádrž	2.7	> 10	89.0	72.0	63.0	45.0
Horizontální filtr	5.2	3–10	85.0	72.0	58.0	74.0
Vertikální filtr	4.5	1–2	87.0	87.0	68.0	68.0
Hybridní systém	2.6	1–10	89.0	85.0	69.0	67.0

Nejlepší výsledky vykazují hybridní čistírny (horizontální-vertikální filtr) ve kterých jsou překonány nevýhody horizontálního a vertikálního proudění. Systém dosahuje vyšších účinností (Martinez-Guerra & Castillo-Valenzuela, & Gnaneswar Gude, 2018). Vertikální filtry vykazují lepší odstranění BSK₅, CHSK_{Cr} a N_{celk}, než horizontálními filtry. Co se týká odstranění fosforu, je výsledek téměř srovnatelný, je však zapotřebí zohlednit velikost horizontálního filtru, který je až 2x větší než filtr vertikální (Varma & Kumar Gupta & Sarathi Ghosal, & Majumder, 2020).

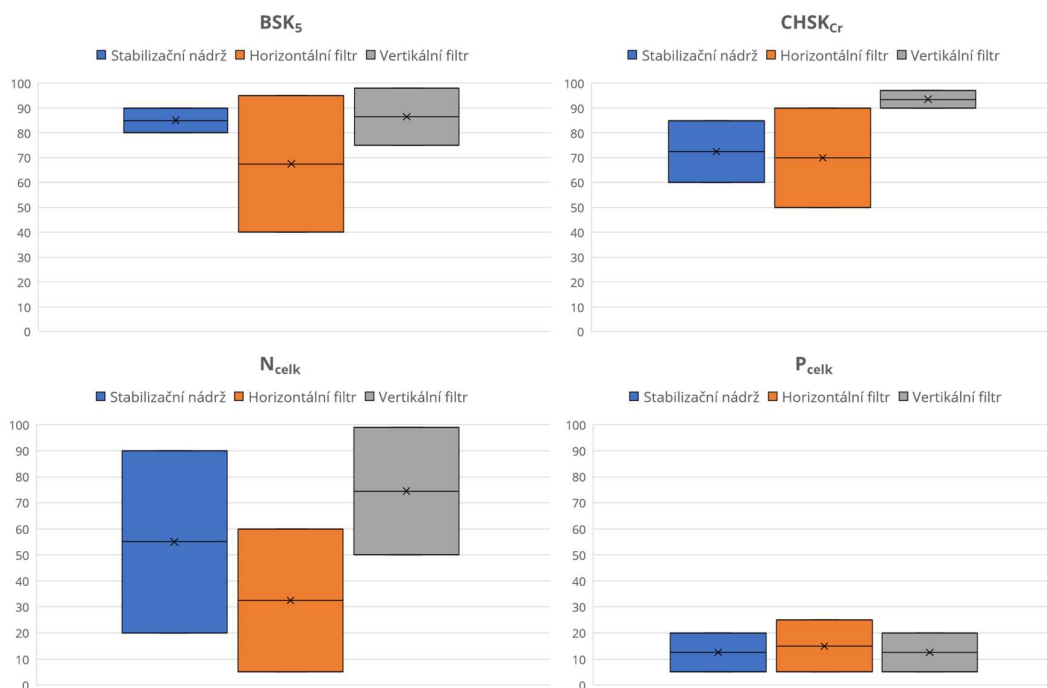


Obr. č. 26 Porovnání účinnosti odstraňování ukazatelů látkového znečištění pro různé typy přírodních čistíren data převzata z (Varma & Kumar Gupta & Sarathi Ghosal, & Majumder, 2020)

Při porovnání s průměrnými hodnotami, které uvádí česká norma (ČSN 75 6402, 2017), je výrazný rozdíl v odbourávání fosforu s rozdílem více než 60 %, dále norma neuvádí účinnosti pro hybridní zapojení a průměrnou dobu zdržení. Je zřejmé, že průměrné účinnosti jsou v subtropickém a tropickém podnebí vyšší oproti standardům mírného pásu, dle výše uvedené normy. Může to být způsobeno tvorbou ledu nebo špatným fungováním biotických a abiotických složek v zimních měsících (Varma & Kumar Gupta & Sarathi Ghosal, & Majumder, 2020). Na základě tohoto tvrzení je zajímavostí, že průměrné procento odstranění CHSK a N_{celk} na VF je dle ČSN vyšší zhruba o 6 %.

Tab. č. 6 Průměrná účinnost odstranění znečištění v % (ČSN 75 6402, 2017)

Typ PČOV	Požadovaná plocha m ² /EO	BSK ₅	CHSK _{Cr}	N _{celk}	P _{celk}
Stabilizační nádrž	>10	85.0	72.5	55.0	12.5
Horizontální filtr	1–5	67.5	70.0	32.5	15.0
Vertikální filtr	1–5	86.5	93.5	74.5	12.5



Obr. č. 27 Orientační hodnoty účinnosti pro jednotlivé typy technologií (ČSN 75 6402, 2017)

2.7. Kalové hospodářství

Pro vyprodukované kaly z čistírny odpadních vod je typické vybudování kalového pole, známé pod pojmem reed bed. Pole využívá fyzických procesů, pro odvodnění

kalů. Reed bed je umísťován na horní část přírodní čistírny blízko anaerobního separátoru, kal je přerušovaně přiváděn na filtrační pole, odpadní voda prosákne skrz vícevrstvý štěrkový filtr a perforovaným potrubím je následně vedena zpět do anaerobního separátoru (Huong & Tan & Tang, & Agus, 2022). Kal je přiváděn zhruba jednou za čtvrt roku (závislost na velikosti AS) za pomoci fekálního vozu. Kal by měl být rovnoměrně rozložen po kalovém poli asi do výšky 0,4 m, zároveň by neměl zaplavit vzrostlé rostliny (ČSN 75 6402, 2017). Přestože je reed bed častokrát nákladnější než zařazení mechanického odvodnění kalů, kvůli pozemkové náročnosti, nabízejí nižší až nulovou spotřebu energie, nevyužívají chemii a produkují poměrně kvalitní biosložku, která lze použít pro zemědělské účely (Huong & Tan & Tang, & Agus, 2022).

Návrhové parametry jsou uvedeny v (ČSN 75 6402, 2017). Plocha kalového pole záleží na meteorologickém vlivu, odpovídá 0,3 až 0,5 m²/EO v případě skleníkových či fóliových konstrukcí je možné snížit potřebnou plochu až na 0,2 m²/EO. Hloubka vnitřního prostoru může dosahovat hloubek 2 až 4 m, čím vyšší hloubka, tím je zajištěna delší životnost kalového pole. Kalového pole je ohraničeno pytli s pískem či hlínou.



Obr. č. 28 Kalové pole v obci Hlína

2.8. Provoz a údržba přírodních čistíren

Požadavky na provoz a údržbu byly přehledně popsány v publikacích (Dotro et al., 2017) a (Langergraber & Gabriela & Jaime, & Anacleto, 2019). Obecně PČOV vykazují malé provozní zatížení ve srovnání s jinými řešeními čištění odpadních vod. Při návrhu čistírny je nutné určit již na začátku požadavky na její provoz a údržbu, který zahrnuje následující.

- Odstraňování kalu z primárního čištění (četnost, metoda, zpracování)
- Údržba vegetace na filtračních polích (četnost a doba sečení)

- Obecné povinnosti a úkoly běžného provozu, monitorování a údržby (provozní řád)
- Předpokládaný nutný větší zásah (odstranění kalu z povrchu mokřadu, praní/výměna filtru)
- Postup prací pro případnou větší údržbu či opravu PČOV

Stěžejní činnost obsluhy spočívá v kontrolování systému, zda nedošlo k zásadní poruše nebo nedochází ke změnám předchozímu stavu. Přírodní čistírna nevyžaduje trvalou přítomnost obsluhy, nepřetržitý dispečink nebo monitoring. Samotná kontrola u čistíren do 500 EO je v řádech desítek minut týdně, u větších čistíren je časová náročnost na EO v rozsahu půl hodiny denně.

Provoz je naprosto jednoduchý, udržitelný a zvládnutelný zaškolenou, ale spolehlivou obsluhou.

2.9. Monitoring přírodních čistíren

Přírodní čistírny jsou monitorovány na látkové zatížení na přítoku a odtoku, průtoky jsou monitorovány na odtoku. Tato místa musí být vybudována se snadným přístupem. Odběry vzorků a potřebná analýza přítomného znečištění přispívá ke správnému fungování PČOV. Na základě výsledků lze v průběhu čistírenského procesu upravovat hodnoty na výtoku. V provozním řádu je definována četnost, místo odběru a také jsou uvedeny parametry, které by čistírna měla vykazovat (Langergraber & Gabriela & Jaime, & Anacleto, 2019).

2.10. Výhody a nevýhody přírodních čistíren nejen v rozvojových zemích

Tak jako každá technologie má i přírodní čistírna odpadních vod své výhody i nevýhody. Při správném návrhu a realizaci je předpokladem, že systém bude fungovat bez poruchy několik desetiletí, nicméně vše závisí na obsluze, její spolehlivosti a údržbě systému.

Výhody přírodního způsobu čištění odpadních vod v porovnání s mechanicko-biologickou ČOV, jsou nízké konstrukční a provozní náklady, ale také ekologický a estetický charakter. Údržba čistírny nevyžaduje speciálně zaškolenou obsluhu. PČOV mohou být využívány v lokalitách s nízkými koncentracemi ukazatelů znečištění OV a nerovnoměrným hydraulickým zatížením. Dají se vybudovat svépomocí. Ve srovnání s variantou on-site system (jímka - vyvážení) je přírodní čistírna po investiční stránce dražší, na druhou stranu vykazuje výrazně nižší provozní náklady. Další výhodou je absence elektrické energie pro zajištění čistícího procesu. Čištění probíhá gravitačně, bez elektřiny. Elektřina je potřebná, v závislosti na lokalitě stavby, na přečerpání vody k anaerobnímu separátoru a pro měrný objekt průtoků na konci čistírny.

Výhodou zavedení přírodní čistírny v tropických oblastech je výpar z filtračního pole a z listů rostlin, které částečně snižuje objem vypouštěné vody. Dále jsou u přírodních čistíren budovány kalová pole, na kterých je tvořen humus, který může

být využit pro zahrádkáře na pěstování rostlin (Langergraber & Gabriela & Jaime, & Anacleto, 2019).

Nevýhody přírodních čistíren jsou nejčastěji spojovány s náročností na plochu a pokud není zapojena elektrická energie, tak i s výškovým převýšením mezi přítokem a odtokem, které by mělo být alespoň 2,5 m, kvůli distribuci vody na filtr.

V důsledku špatného provozování může dojít k ucpávání filtru (kolmataci), což je blíže uvedeno v kapitole 2.10.1. Dále může docházet k eutrofizaci, která je podrobněji uvedena v kapitole 2.10.2. Úkolem je problémy v důsledků špatného provozování popsat a navrhnout preventivní opatření.

2.10.1. Kolmatace

Kolmatace neboli zanášení je významným negativním vlivem na kořenových čistírnách, která způsobuje snižování porozity čistícího filtru. Vede k nižší hydraulické vodivosti (propustnosti), a tak k celkovému snižování účinnosti čistírenského procesu.

Kolmataci lze rozdělit na základě dvou aspektů, kterými jsou vnější faktory (teplota, znečištění, rostliny, mikroorganismy) a vnitřní faktory (fyzikální a chemické vlastnosti substrátu). Přičemž hlavní faktory ovlivňující kolmataci přírodních čistíren jsou organické zatížení a pórovitost použitého filtrátu (Wang & Sheng, & Xu, 2021).

Prevenčními opatřeními vzniku kolmatace mohou být vhodná dimenze mechanického předčištění a jeho správná údržba, použití správné velikosti částic substrátu, zpětné proplachování filtru, výběr vodních rostlin s vyvinutým kořenovým systémem a včasné odstraňování listů a odumřelých kořenů.

Pokud je filtr zanešený do míry, kdy je účinnost čistírny nedostačující, přistupuje se k zpětnému proplachování filtru, výměně filtru. Nová studie (Wang & Sheng, & Xu, 2021) však navrhuje alternativu v podobě aplikace půdních živočichů. Výzkum byl založen na aplikaci žížal *Eisenia foetida* (žížala hnojní), které jsou schopny až o 60 % zvýšit propustnost substrátu, kompostují organické látky a podporují růst rostlin a mikroorganismů, čímž dokáží až o 45 % snížit obsah nerozpuštěných látek. Studie tak dokazuje, že náklady na aplikaci žížal u přírodních čistíren jsou výrazně nižší než náklady na výměnu substrátu a zpětné proplachování.

Přehledné rozdělení vlivů a možné prevence vzniku kolmatace je rozepsáno v Tab. č. 7.

Tab. č. 7: Hlavní ovlivňující parametry vzniku kolmatace (Wang & Sheng, & Xu, 2021)

Faktor	Klasifikace	Hlavní charakteristika	Prevence
Vnitřní faktory	Vlastnosti substrátu	Substrát se silnou adsorbí (tekutina je pevně vázána na povrch sorbentu) může rychle odstranit znečišťující látky, dochází však k ucpávání filtru.	Vhodné a dostatečně dimenzované mechanické předčištění, vrstvy

Faktor	Klasifikace	Hlavní charakteristika	Prevence
		Pokud je velikost částic substrátu malá, snadno způsobuje ucpávání Čím menší pórovitost, tím lehčí ucpávání filtru	filtru z různých frakcí kameniva
Vnější faktory	Teplota	Stálá teplota přispívá k růstu rostlin a adsorpci znečištění kořeny rostlin. Také přispívá k mikrobiálnímu rozmnožování a rozkladu znečišťujících látek.	
	Látkové zatížení	Vysoké organické a hydraulické zatížení mohou vést akumulaci znečištění na povrchu filtru, což vede ke kolmataci	Nízké látkové zatížení na přítoku
	Dodávka kyslíku	Přívod kyslíku zvyšuje objem mikrobiální biomasy a rozkládá odumřelou biomasu	Kontrola dodávky kyslíku, dostatek vede k vyhnutí ucpání filtru
	Vodní rostliny	Kořeny vodních rostlin zvyšují porozitu substrátu. Ochlazují povrch filtru transpirací.	Pravidelné odstraňování stařiny mokřadní vegetace
	Mikroorganismy	Rozklad znečišťujících látek mikroorganismy pomáhá zmírnit zanášení filtru	
Provozní podmínky			Dávkovací strategie, rovnoměrné rozdělení po celé šíři filtračního pole mechanicky předčištěné OV Četnost vyvážení mechanického předčištění

2.10.2. Eutrofizace

Eutrofizace je obohacování vod nejčastěji sloučeninami dusíku a fosforu (nutrienty), které urychlují růst řas a sinic, voda zpravidla zezelená. Eutrofizace u přírodních čistíren, s podpovrchovým režimem vzniká v důsledku špatného provozování (nízká účinnost čištění). Pokud je voda obohacena nutrienty a vypouštěna do povrchových vod, způsobí zhoršení její kvality. Vysoké koncentrace mohou způsobit prudký

pokles koncentrace rozpuštěného kyslíku a být toxické pro ryby a další vodní živočichy (Langergraber & Gabriela & Jaime, & Anacleto, 2019).

Vhodným řešením pro likvidaci již přítomných nutrientů na volné vodní hladině je zavedení plovoucích ostrovů. I když je výzkum plovoucích ostrovů relativně na začátku, je prokázáno, že mají vliv na redukci dusíku, fosforu, ale také BSK a CHSK. Plovoucí ostrov je lehkou konstrukcí. Je zde využita schopnost emergentních druhů (rákos, orobinec, kana) vznášet se. Rostliny jsou pak připevněny na plovoucí konstrukci z bambusu, nebo polystyrenu. Je důležité, aby rostliny měly rozvinutý kořenový systém již před instalací na vodní hladinu (Vymazal & Zhao, & Mander, 2021).



Obr. č. 29 Plovoucí ostrov převzato z <http://conwe.cz/plovouci-ostrovy.html>

2.11. Způsoby čištění komunálních odpadních vod v tropickém monzunovém podnebí rozvojových zemích

Typický návrh pro rozvojové země by měl spočívat v jednoduchosti, nízkých počátečních nákladech i nízkých nákladech na provoz a údržbu čistírny. Všechny tyto aspekty PČOV splňují, proto jsou vhodným řešením. Rozvojové země jsou typické ekonomickými kontrasty, kdy vedle sebe existují technicky vyspělé oblasti s oblastmi velmi chudými.

Princip způsobu přírodního čištění komunálních odpadních vod v rozvojových zemích od čištění odpadních vod v zemích rozvinutých se zásadně neliší. Odlišnosti spočívají v aspektech spojených s teplým podnebím. V tropických oblastech probíhají biochemické reakce a některé fyzikální procesy rychleji, což lze považovat za výhodné, a to zejména v požadavku na plochu filtru při dané kvalitě přitékající odpadní vody. Také lze očekávat vyšší účinnost čistírny.

Další odlišností je hydrologie PČOV, která může být ovlivněna srážkovým režimem. V tropickém monzunovém podnebí se pravidelně střídá období sucha a dešťů. V suchém období hraje důležitou roli evapotranspirace, která vede ke ztrátám vody

a rychlejšímu odbourávání organických látek v odpadní vodě, v období s intenzivními srážkami mohou do kanalizace vstupovat balastní vody. Přírodní čistírny však vykazují velkou odolnost při špičkové hydraulické zátěži (Langergraber & Gabriela & Jaime, & Anacleto, 2019).

Při každém plánování je nutné dbát na jednoduchý princip „co může selhat, selže“, proto by systémy měli být co možná nejodolnější a nejrobustnější. Je vhodné omezit elektromechanická zařízení. V některých člancích je doporučeno vyhnout se i mechanickému předčištění a použít French system (Langergraber & Gabriela & Jaime, & Anacleto, 2019).

3. Současná situace v Surabayi

Město Surabaya (v jávském jazyce Sura – žralok; Baya – krokodýl) je druhým největším velkoměstem Indonésie a zároveň hlavním městem provincie Východní Jáva. Městem protéká řeka Kali Mas, která je ramenem řeky Brantas, největší řekou Východní Jávy. Město se nachází na severovýchodním pobřeží ostrova na pobřeží Jávského moře.

Indonéská republika je rozvojovou zemí, která zároveň patří do G20 (Group of Twenty), skupiny největších ekonomik světa. Indonésie má také úzké vazby na Evropskou unii. Mimo jiné je třetím největším znečišťovatelem světa a je tedy klíčovým hráčem v oblasti environmentálních výzev (Waisová, & Cabada, 2020).

Ve městě k roku 2020 žije 2 874 314 obyvatel na ploše 350,5 km² („Kota Surabaya“, n. d.), hustota zalidnění je 8 200 obyvatel/km², je to zhruba 120 m²/osobu, což je o 30 % menší plocha, než mají Pražané v České republice.

Město se skládá z jednotlivých Kampongů, které by se v evropském měřítku daly popsat jako čtvrtě do 1 000 obyvatel, avšak s velmi vesnickou kulturou. Kampongy byly historicky zakládány rodiči, kteří pro každé své dítě postavili dům a pokračovalo to tak i po další generace.



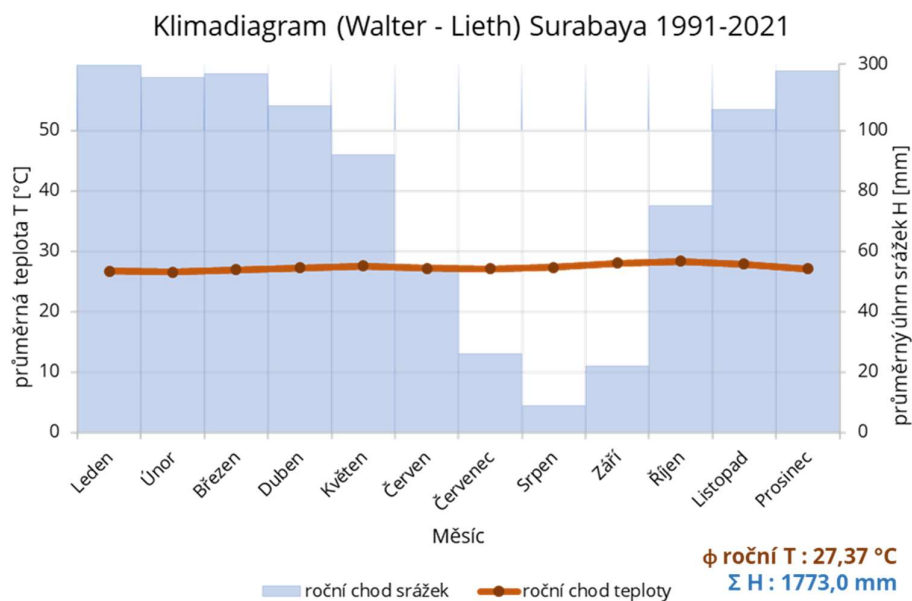
Obr. č. 30: Globus s vyznačenou Surabayou (Google Earth)

3.1. Klima

Dle Köppen-Geigerovy klasifikace podnebí se Surabaya nachází v tropickém monzunovém podnebí (Am). Charakteristické, pro toto podnebí je střídání se období dešťů (monzunů) (říjen–květen) a sucha (červen–září). Průměrná roční teplota mezi

lety 1991–2021 byla 27,4 °C, průměrný roční úhrn srážek je 1 773 mm. Maximální měsíční průměrná teplota 31,6 °C dosáhla v září a říjnu, minimální měsíční průměrná teplota 24,6 °C byla v červenci a srpnu. Největší průměrný měsíční úhrn srážek 296 mm byl v lednu, nejméně srážek 9 mm byl v srpnu. Průměrná doba slunečního svitu je 9,4 hod/den („SURABAYA: KLIMATABELLE UND WETTER IM GESAMTEN JAHR“, n. d.).

Na základě dat byl sestaven graf dle Walter-Lietha. Na vodorovné ose jsou zaznamenány měsíce. Na levé svislé ose jsou vykresleny teploty, na pravé svislé ose jsou úhrny srážek za dané období. Z grafu lze odvodit, že v Surabaji začíná období s nedostatkem vláhy v červnu a končí v září.



Obr. č. 31: Klimadiagram dle Walter – Lietha v období 1991–2021 data převzata z „SURABAYA: KLIMATABELLE UND WETTER IM GESAMTEN JAHR“, n. d.)

3.2. Nakládání s vodami ve městě Surabaya

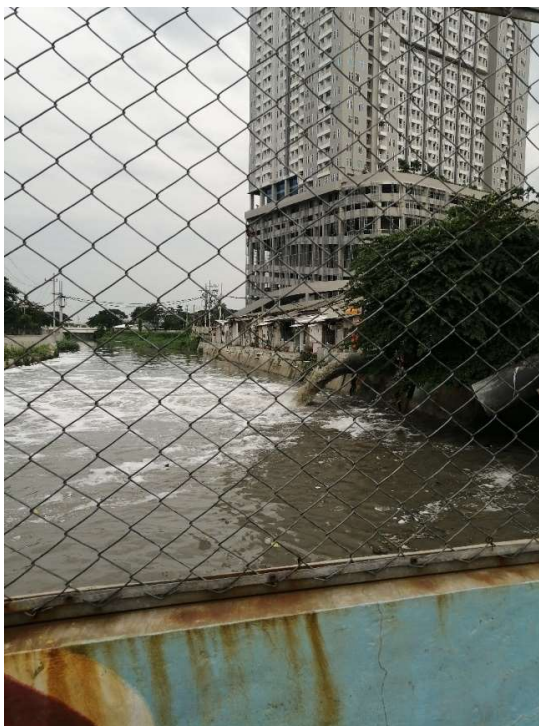
Dostupnost zdrojů pitné vody v Surabaji je nízká. Kvůli pronikání slané vody do podzemních zdrojů a převažujícího jílu v půdě je čerpání podzemních vod velmi složité a finančně náročné. Z tohoto důvodu je jako hlavní zdroj užitkové vody řeka Kali Mas. (Kösters & Bichai, & Schwartz, 2019). Ve městě je vybudován vodovod, který přivádí užitkovou vodu do domácností, škol, zdravotnických zařízení i nákupních center. Průměrná spotřeba vody na obyvatele se odhaduje na 200 l/os/den (Susnik et al., 2017). Pitná voda je zpravidla poskytována v obchodech nebo vybranými společnostmi v plastových barelech o objemu 18,9 l.

Řeka, ze které je voda upravována a distribuována obyvatelstvu, je velmi znečištěná neupravenými odpadními vodami z nákupních středisek, apartmánů a domácností. Odhadované denní látkové zatížení činní BSK₅ = 65 000 kg a CHSK_{Cr} = 170 000 kg, přičemž znečištění stále stoupá s rostoucím počtem nákupních středisek. Ve městě

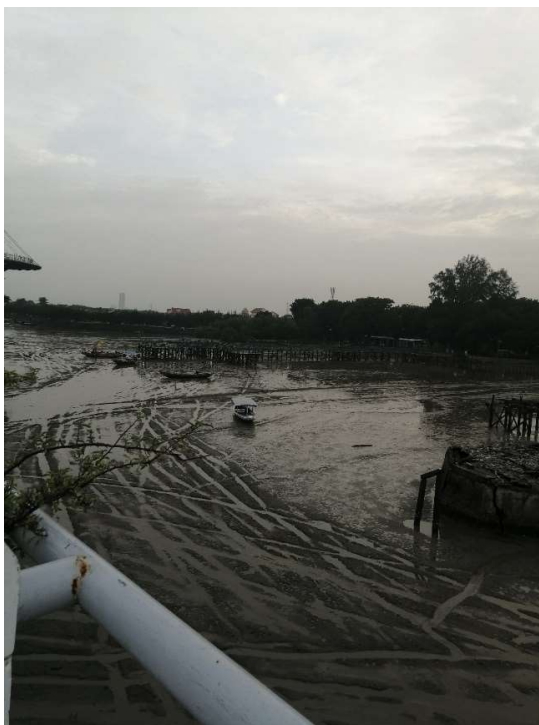
neexistuje rozsáhlá kanalizační infrastruktura. Černé odpadní vody jsou většinou akumulovány na pozemcích ve dvoukomorových septicích, šedé OV jsou rovnou zaústěny do otevřených koryt podél silnic, které jsou zaústěny do koryta řeky. Několik soukromých firem čistí OV pro nákupní střediska či kampusy. Odborníci odhadují, že 80 % obyvatel v Surabaji používá septiky pro odvádění černé vody (WC) z domácností a pouze 5–25 % obyvatel používá septik pro odvádění vod šedých (umyvadla, sprchy, dřezy). Zbývající procento obyvatel, zahrnující restaurace, prádelny, myčky aut, vypouštějí vodu do otevřených kanálů, které jsou zaústěny do řeky Kali Mas. Kromě toho mnoho lidí likviduje komunální odpad v otevřených kanálech, například protože jejich oblast není pokryta svážením odpadu, nebo aby se vyhnuli placení poplatku za odvoz odpadu (Kösters & Bichai, & Schwartz, 2019). Na základě spotřeby vody (asi 80 %) lze určit vypouštění černých a šedých odpadních vod. K roku 2011 bylo v městských oblastech vypouštěno 42 l/os/den černých vod a 60–178 l/os/den vod šedých (Widyarani et al., 2022).



Obr. č. 32: Typické WC



Obr. č. 33: Vypouštění odpadních vod z nákupního centra do koryta řeky Kali Mas



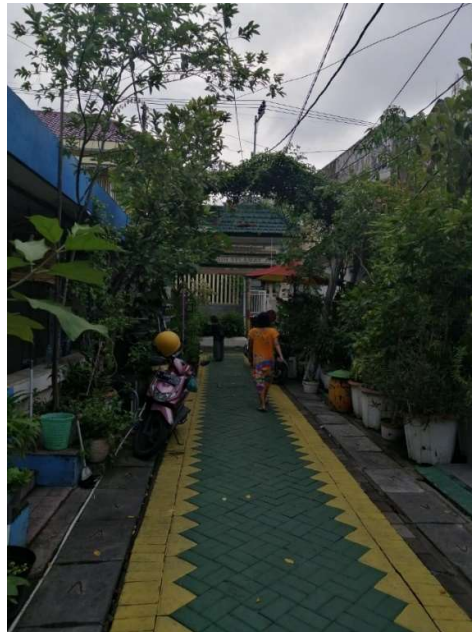
Obr. č. 34: Pobřeží Surabayi

3.2.1. Dobrý příklad ze Surabaye

V jedné ze surabayských ulic je čištěna šedá a dešťová voda z otevřených koryt. Voda je čištěna přes důmyslný systém kořeny rostlin. Místní následně v korytech chovají ryby a ulice má velmi estetický ráz. Takový počin je jasným důkazem, že vůle místních lidí žít v čistém a estetickém prostředí je a zároveň to je jeden z prvních úspěchů.



Obr. č. 35: Systém čištění šedé vody přes kořenový systém rostlin a chov ryb



Obr. č. 36: Ulice s čištěnými šedými a dešťovými vodami

3.3. Legislativní požadavky na zpracování odpadních vod v Indonésii

Odpadní vody byly v Indonésii do roku 2009 ponechány v péči domácností a ekonomických subjektů. Zhoršující se kvalita vodních zdrojů a vyšší produkce odpadních vod vlivem nárůstu počtu obyvatel, turistiky a následně vyšší výroby, spotřeby energie a potravin vedli k tomu, že zpracování odpadních vod začalo být upravováno legislativou a financováno z veřejných zdrojů.

Nakládání s odpadními vodami, doporučení a pokuty za nedodržení předpisů má Indonéská republika zakotvena ve třech hlavních legislativních dokumentech, jedná se o nařízení Ministra životního prostředí a lesnictví Indonéské republiky z roku 2021 (PermenLHK No. 6/202) (PERATURAN MENTERI LINGKUNGAN HIDUP DAN KEHUTANAN REPUBLIK INDONESIA, 2021), zákon č. 32 z roku 2009 o ochraně a řízení životního prostředí (UU PPLH) (UNDANG-UNDANG REPUBLIK INDONESIA, 2009), v neposlední řadě zákon č. 32/2009 o ochraně a řízení životního prostředí (Environmental Protection and Management, 2009), vydán organizací OSN pro výživu a zemědělství Food and Agriculture Organization of the United Nations (FAO). Jedná se však o limitní standardy pro vypouštění odpadních vod z průmyslu, a nově vybudovaných soukromých objektů (hotely, nákupní střediska). Pokud se subjekty nejsou schopny napojit na veřejnou kanalizaci (která ve většině případů existuje), je soukromý subjekt povinen vybudovat individuální čistírnu odpadních vod na černé vody, kterou je většinou vyhnívací septik. Příslušné úřady pak ČOV kontrolují a jsou udělovány pokuty, pokud nejsou vybudovány. Ukazuje se, že levnější variantou je pořízení čistírny než setrvale platit pokuty. Kanalizace a čistírny průmyslových odpadních vod reálně existují jen v nových průmyslových zónách (Waisová, & Cabada, 2020).

Vypouštění komunálních odpadních vod je stále ponecháno na každé domácnosti. Každá obec podél řeky Brantas je zodpovědná za vypouštění odpadní vody do řeky. Surabaya a většina dalších měst podél řeky však tyto předpisy nedodržuje. Ve většině měst totiž není žádná organizace pověřena monitorováním čištění odpadních vod z domácností. Přestože si mnohé místní organizace uvědomují závažnost problému, váhají s přijetím opatření a tvrdí, že to není v jejich kompetenci. Limitní standardy, vypouštěných komunálních odpadních vod byly poskytnuty prof. Joni Hermana, který působí univerzitě ITS v Surabayi.

Tab. č. 8 Limitní standardy komunálních odpadních vod poskytnuty prof. Joni Hermana (ITS)

Parametr	Jednotka	Maximální hladina
pH	-	6–9
BSK ₅	mg/l	30
CHSK _{Cr}	mg/l	100
NL	mg/l	30
Olej a tuk	mg/l	5
N-NH ₄ ⁺	mg/l	10
Celkový počet koliformních bakterií	množství/1000 ml	3 000

Jakákoliv změna v systému se zdá být nedosažitelná, protože města nejsou ochotna investovat do zlepšení své infrastruktury. K dosažení trvalé transformace je třeba zásadně reformovat institucionální uspořádání v Surabaji. Je nezbytné, aby si město nejprve uvědomilo problémy, které skrývá absence účinné likvidace odpadních vod, aby byla možná změna (Kösters & Bichai, & Schwartz, 2019).

Dobrym příkladem možné účinné institucionální změny je například město Malang, které se rovněž nachází v provincii Východní Jáva. Po mnoho let nebyla oficiálně odpovědná za monitoring odpadních vod žádná organizace. Změna přišla, když vedení města oficiálně pověřilo místní vodárenskou společnost, PDAM Malang. Tím se vyjasnila odpovědnost a kompetence, což usnadnilo účinná opatření proti znečištění řek ze strany všech příslušných aktérů (Kösters & Bichai, & Schwartz, 2019).

3.4. Příležitosti vstupu na indonéský trh

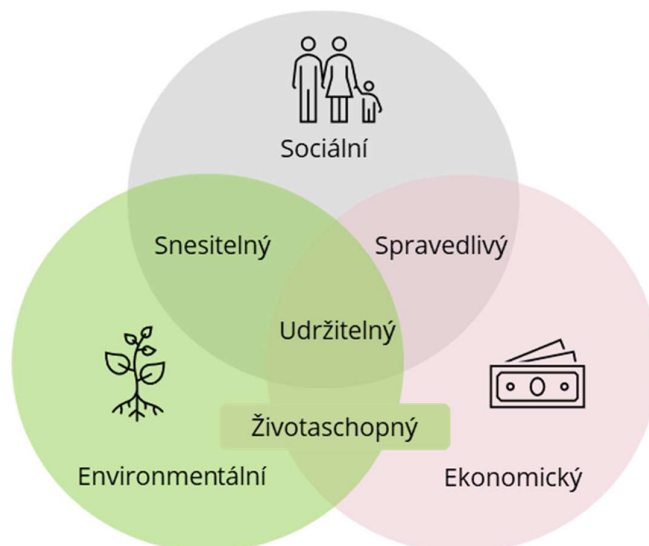
Příležitostí vstupu na trh dle (Waisová, & Cabada, 2020) je mnoho, jedná se zejména o snižování znečištění ovzduší, vody, zpracování a recyklace odpadu či péče o zemědělskou půdu. Odpadní vody nejsou zatím v Indonésii systematicky odváděny ani čištěny, indonéské úřady uvádějí, že zhruba 25 milionů obyvatel nemá přístup k toaletám a potřebu vykonávají venku, další obyvatelé využívají buď veřejné či domácí toalety.

Ekonomické i politické vztahy mezi Českou a Indonéskou republikou trvají již několik desetiletí. Indonésie však nepatří mezi prioritní země české rozvojové pomoci, což vede k tomu, že české firmy mají jen malé finanční prostředky pro vstup na indonéský trh.

Na indonéském trhu působí některé české firmy, kterými jsou Cekindo (založená v roce 2012 a odkoupena v roce 2018 firmou InCorp Global), specializuje se na obchodní poradenství, průzkumy trhu, registraci firem a vyhledávání místních partnerů. Další firmou je PT. Indonesian Water Equipment Technology (PT. IWET), která je první joint-venture (společný podnik ve spojení dvou nebo více stran, usilující o rozvoj jednoho podniku / projektu) firma, zabývající se výstavbou ČOV a poskytování technologických řešení pro vodní zařízení. Společnost sídlí na Jávě ve městě Bandung, byla založena skupinou firem (IWET Brno, GEOtest Brno a SIGMA Group Lutín) a indonéskou firmou PT (Waisová, & Cabada, 2020).

4. Návrh extenzivního způsobu čištění odpadních vod v lokalitě Perumdos

Návrh extenzivního způsobu čištění odpadních vod pro Perumdos (Blok U) má za úkol vytvoření udržitelného řešení, které zahrnuje sociální, environmentální a ekonomický aspekt, který by měl zajistit vyšší účinnost a delší životnosti navržené přírodní čistírny.



Obr. č. 37: Pilíře udržitelného rozvoje převzato z („Udržitelný rozvoj“, 2008–2023)

V tuto chvíli se ve čtvrti Perumdos, likvidují pouze černé odpadní vody decentralizovaným systémem v septických, šedé vody jsou vypouštěny přímo do otevřených kanálů podél silnic. Součástí návrhu je proto nejen vybudování přírodní čistírny, ale i vybudování oddílné splaškové kanalizace, která by na čistírnu přiváděla černé i šedé vody.

4.1. Lokalita a morfologie

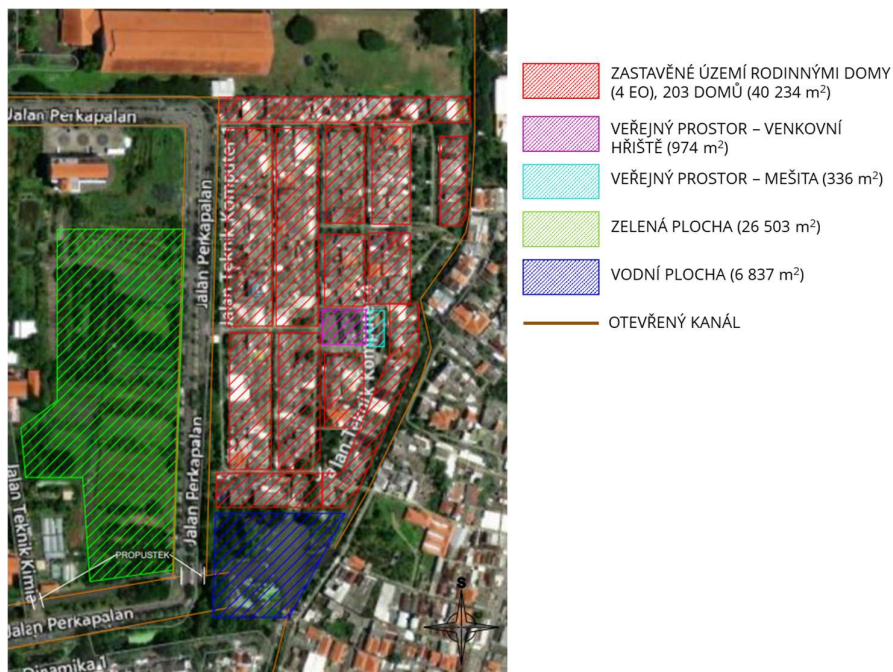
Zájmové území se nachází v intravilánu areálu univerzity ITS (Sepuluh Nopember Institute of Technology). Blok U (Perumdos) má přibližnou rozlohu 64 000 m². Jedná se o učitelskou rezidenci, lektorů ITS.

Území se nachází ve výšce 5 m n. m., povrch je rovinatý. Hydraulická vodivost zeminy se podle dostupných informací nachází mezi hlinitým pískem a jílem, je uvažováno s hodnotou hydraulické vodivosti 10⁻⁸ m/s. Pro reálný návrh čistírny je však zapotřebí odebrat vzorky a provést zkoušky pro změření skutečné hydraulické vodivosti.



Obr. č. 38: Vyznačené zájmové území (Seznam Mapy)

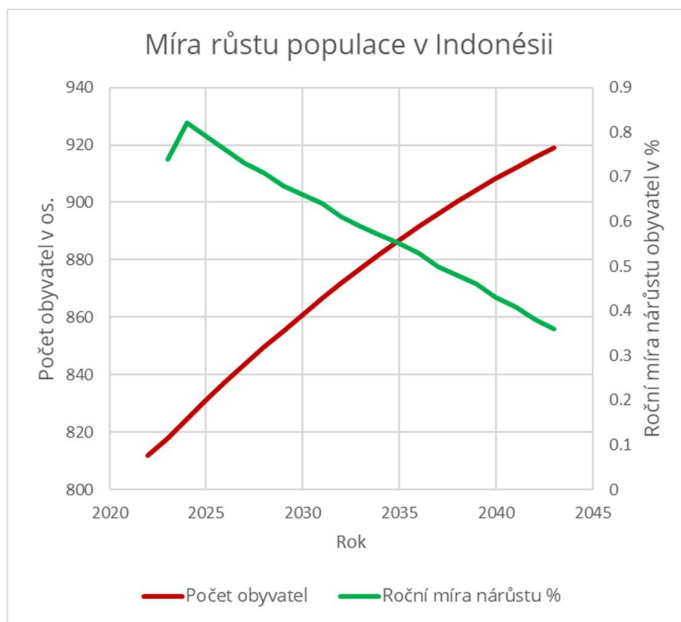
Na zastavěném území o ploše zhruba 40 200 m² nyní žije 812 obyvatel, v bloku se nachází volejbalové hřiště, modlitebna a dva malé obchody, které jsou součástí domů. Dále se ve čtvrti nachází vodní plocha o velikosti zhruba 6 800 m². Jedná se o průtočnou vodní plochu mezi dvěma otevřenými kanály. Tato vodní plocha zapáchá a nachází se na ní vodní květ. Přes silnici je nezastavěná zelená plocha, o velikosti cca 26 500 m², která by mohla být vhodným místem pro vybudování přírodní čistírny.



Obr. č. 39: Architektonická situace zájmového území

4.1.1. Počet obyvatel

V městské čtvrti Perumdos k roku 2023 bydlí 812 obyvatel. Životnost PČOV je navržena na 20 let, proto je nutné započítat přírůstek obyvatel, který k roku 2023 činí 0,74 %. Na základě statistických údajů bude od roku 2024 tendence přírůstku obyvatel za rok klesající a predikce míry růstu populace k roku 2043 bude 0,34 % (Indonesia Population Growth Rate 1950-2023, n. d.). Do návrhu je tento přírůstek zohledněn a PČOV bude dimenzována na 920 EO.



Obr. č. 40 Míra růstu populace v Indonésii (Indonesia Population Growth Rate 1950-2023, n. d.)

4.2. Kanalizační síť

V současné době jsou černé odpadní vody sváděny do dvoukomorových septiků, které nejsou téměř udržovány. Šedé vody jsou přímo zaústěny do otevřených kanálů, které slouží především jako dešťová kanalizace. Otevřené kanály jsou vybudovány po okrajích každé silnice, následně ústí do řeky a do Jávského moře. Pro tento návrh bude uvažováno s vybudováním nových rozvodů odpadního potrubí v domácnostech, do kterého budou připojeny šedé i černé vody. Dále budou odpadní vody svedeny do gravitační stokové sítě, která bude přivádět odpadní vody na čistírnu. Po revizi vodotěsnosti je možné septiky ponechat zapojené a z nich vést kanalizaci.

4.3. Emisní standardy

Emisní standardy v Indonésii (Tab. č. 8) jsou poměrně mírné. Vzhledem k absenci monitoringu vypouštěných komunálních odpadních vod zřejmě ani nehrozí za nedodržení emisních standardů pokuta.

Hlavním cílem návrhu je však jít dobrým příkladem a vytvořit čistírnu s téměř 100% účinností čištění, proto je cílem dodržet limitní hodnoty pro vypouštění komunálních odpadních vod dle nařízení české vlády ČR 401/2015, viz Tab. č. 3.

4.4. Výpočet přírodní čistírny odpadních vod

Pro výpočet přírodní čistírny odpadních bylo poskytnuto látkové zatížení od obyvatelstva přitékající na přírodní čistírnu. Dále je vypočítáno hydraulické zatížení a počet připojených obyvatel s ohledem na růst populace. Také jsou určeny limitní hodnoty pro vypouštění OV dle české legislativy. Stavba čistírny se uvažuje na nezastavěné zelené ploše, která se nachází přes silnici od Perumdos.

4.4.1. Látkové zatížení na přítoku PČOV

Kvalita vypouštěné odpadní vody na území Perumdos byla poskytnuta z laboratoře Sepuluh Nopember Institute of Technology (ITS). Jedná se o údaje ze smíšené šedé a černé vody. Chemická kvalita vody je určena dle jednotlivých ukazatelů znečištění. Hodnota pH je 6,75, tuky 50 mg/l, nerozpuštěné látky (NL) 214 mg/l, chemická spotřeba kyslíku (CHSK_{Cr}) 543 mg/l, biologická spotřeba kyslíku (BSK₅) 290 mg/l, dalšími sledovanými parametry byl amoniakální dusík N-NH₄⁺ 161,1 mg/l a mikrobiologická kvalita vody, bakterie E. Coli 7 000 000 MPN/100 ml. Přehledně uvedeno v Tab. č. 9.

Tab. č. 9 Látkové zatížení na přítoku PČOV

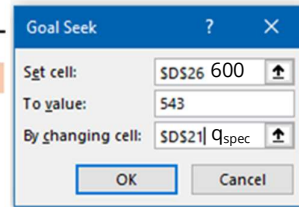
Ukazatel	Hodnota	Jednotka
pH	6.75	
Oleje a tuky	50	mg/l
NL	214	mg/l
CHSK _{Cr}	543	mg/l
BSK ₅	290	mg/l
N-NH ₄ ⁺	161.1	mg/l
E. Coli	7 000 000	MPN/100ml

4.4.2. Hydraulické zatížení na přítoku PČOV

Specifická potřeba vody na obyvatele je v Indonésii asi 200 l/os/den. Množství odpadních vod, dle kapitoly 3.2 je rozděleno na černé vody, kde $q_{spec} = 42$ l/os/den a šedé vody, kde $q_{spec} = 150$ l/os/den vod. Vzhledem ke znalosti hodnoty CHSK ve čtvrti, bylo za pomoci softwaru Excel a funkce Hledání řešení, vypočítána specifická produkce odpadní vody na obyvatele ve čtvrti, která odpovídá 220 l/os/den.

Orientační hodnoty produkce specifického zatížení na 1 EO v g/den
dle DWA - A 262E

Ukazatel	Látková koncentrace znečištění přitékající vody g/(EO.den)
BSK ₅	60
CHSK_{Cr}	120
NL	70
N-NH ₄ ⁺	11
N _{celk}	11
P _{celk}	1.8



Definice přítokového průtoku a koncentrací znečišťujících látek

Přítok odpadní vody

pH

Nerozpuštěné látky

Chemická spotřeba kyslíku

Biochemická spotřeba kyslíku

Celkový dusík

E. Coli

specifická spotřeba

Ekvivalentní obyvatel

počet domů

počet obyvatel na jeden dům

pH

NL

CHSK_{Cr}

BSK₅

N_{celk}

Q_{spec}

EO

6.75
214 mg/l
543 mg/l O₂
290 mg/l O₂
161.1 mg/l
7,000,000 MPN/100ml

200.0 l/os/den

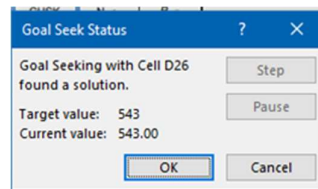
920

203

4

$$600.00 \text{ mg/l} = \text{CHSK} / \text{Qspec} * 1000$$

Obr. č. 41 Stanovení specifické potřeby vody dle CHSK_{Cr}



pH 6.75
NL 214 mg/l
CHSK_{Cr} 543 mg/l O₂
BSK₅ 290 mg/l O₂
N_{celk} 161.1 mg/l
7,000,000 MPN/100ml
Q_{spec} 221.0 l/os/den
EO 920
203
4
543.00 mg/l

Obr. č. 42 Stanovení specifické potřeby vody dle CHSK_{Cr}

Procento balastních vod Q_B v nové kanalizaci je uvažováno 5 %. Předpokládaná průměrná produkce odpadní vody dle rovnice (2.1) je 212,5 m³/den.

Koeficienty pro výpočet maximálního denního a hodinového přítoku, byly určeny na základě normy (ČSN 75 6401, 2006). Koeficient maximální denní nerovnoměrnosti byl uvažován k_d = 1,5, koeficient maximální hodinové nerovnoměrnosti k_h = 2,26, byl vypočítán lineární interpolací pro 920 EO.

Na území Perumdos se nachází mešita a dva malé obchody, které jsou využívány pouze obyvateli této části, proto při návrhu nebudou nijak zvlášť zohledňovány.

$$Q_{24} = EO \cdot q_{spec} \cdot Q_B = 920 \cdot 0,22 + (920 \cdot 0,22) \cdot 5\% \quad (4.1)$$

$$= 212,5 \text{ m}^3/\text{den}$$

$$Q_d = Q_{24,m} \cdot k_d + Q_B = 202,4 \cdot 1,5 + 10,12 = 313,7 \text{ m}^3/\text{den} \quad (4.2)$$

$$Q_h = (Q_{24,m} \cdot k_d \cdot k_{h,max} + Q_B)/24 \quad (4.3)$$

$$= (202,4 \cdot 1,5 \cdot 2,26 + 10,12)/24$$

$$= 29,1 \text{ m}^3/\text{hod}$$

4.4.3. Mechanické čištění

Anaerobní separátor je navržen dle (Standard DWA-A 262E, 2017) a (ÖNORM B 2505, 2009). Byl proveden výpočet objemu tříkomorového anaerobního separátoru pro 920 EO, který má po zaokrouhlení objem 300 m³ a plochu 100 m². Pro snazší výrobu je doporučeno paralelně osadit dva anaerobní separátory o objemu 150 m³, hloubce 3 m a s dobou zdržení 1 den. Přičemž první komora bude o objemu 75 m³, zbývající dvě o objemu 37,5 m³.

$$V_{AS} = EO \cdot 0,3 = 920 \cdot 0,3 \doteq 300 \text{ m}^3 \quad (4.4)$$

$$A_{AS} = EO \cdot 0,06 \doteq 100 \text{ m}^2 \quad (4.5)$$

$$t_{AS} = \frac{V \cdot 0,75}{Q_{24}} = \frac{300 \cdot 0,75}{212,5} = 1,1 \text{ den} \quad (4.6)$$

Je uvažováno s vybudováním čerpací stanice před anaerobním separátorem. Čerpací stanice může být v suchém, nebo mokřím režimu. Umístění česlí u suché nádrže není nutné, ale může zajistit delší životnost čerpadla. U mokřích varianty čerpací stanice by česle měly být vybudovány.

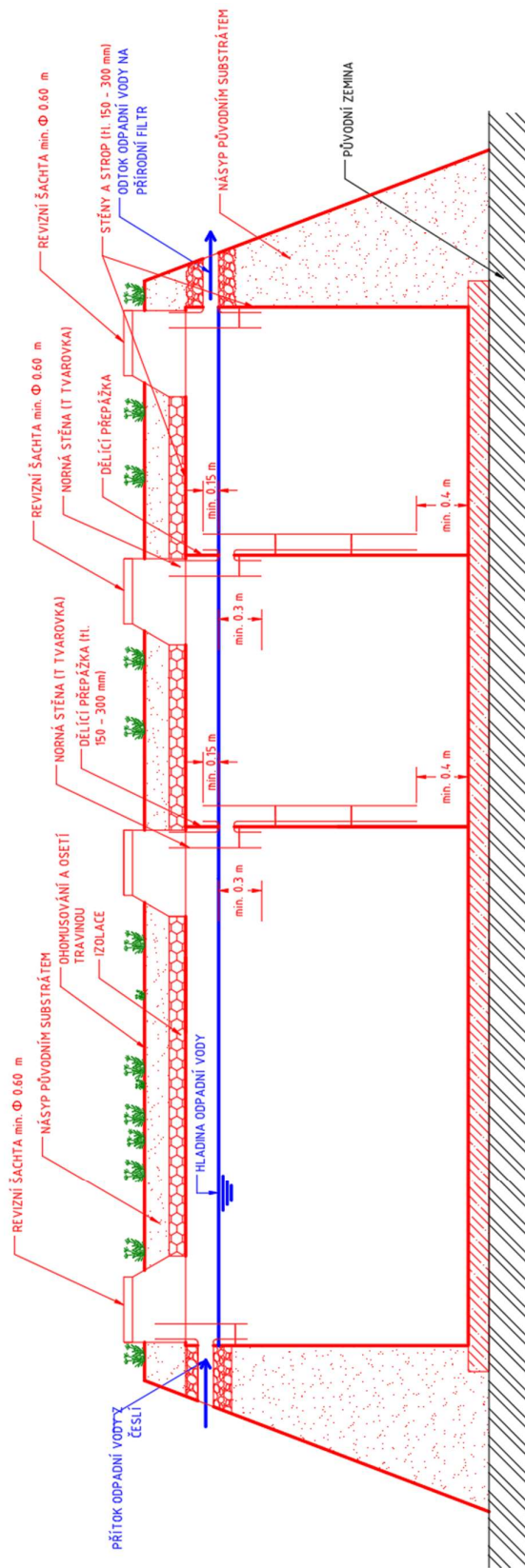
Voda bude čerpána z gravitační kanalizace nejprve do rozdělovací šachty, která bude rozdělovat vodu do dvou anaerobních separátorů. Poté již gravitačně, bez nutnosti elektrické energie bude voda distribuována na filtrační pole, viz Obr. č. 47
Technologické schéma zapojení PČOV.



Obr. č. 43: Rozdělovací šachta před anaerobními separátory v obci Hlína

Byl vypracován vzorový výkres anaerobního separátoru v náspu, který může sloužit k budoucímu vypracování projektové dokumentace.

PODÉLNÝ ŘEZ PODZEMNÍM ANAEROBNÍM SEPARÁTOREM V NÁSPU



Obr. č. 44 Vzorový technický výkres anaerobního separátoru v náspu

4.4.4. Hlavní stupeň čištění

Vzhledem k vysokému zatížení amoniakálního dusíku a mikrobiologickému zatížení E. Coli je navrženo, jako hlavní stupeň čištění, dvoustupňové vertikální filtrační pole, viz kapitola 2.5.2, které zajistí dostatečné odstranění.

Byly použity procentuální účinnosti odstranění znečištění, které byly představeny kapitole 2.6. Pro návrh bude uvažováno s gravitační stokovou sítí, která bude přivádět odpadní vody na přírodní čistírnu.

Tab. č. 10 Předpokládané koncentrace v mg/l a celková účinnost čištění PČOV

Sledování ukazatele znečištění	BSK ₅	CHSK _{Cr}	NL	N-NH ₄ ⁺
Vstupní koncentrace znečištění c₀	290	543	214	161.1
Orientační hodnoty účinnosti mechanického předčištění	33%	33%	64%	9%
Koncentrace znečištění po mechanickém čištění c ₁	194.3	363.8	77.0	146.6
Orientační hodnoty účinnosti I. stupně VF	87%	87%	92%	68%
Koncentrace znečištění po I. stupni VF c ₂	25.3	47.3	6.2	46.9
Orientační hodnoty účinnosti II. stupně VF	87%	87%	92%	68%
Koncentrace znečištění po II. stupni VF c₃	3.3	6.1	0.5	15.0
Celková účinnost čištění E_c (%)	98.9	98.9	99.8	90.7

Koncentrace na odtoku z čistírny vykazují téměř 100% účinnost odstranění organických a nerozpuštěných látek. Vypouštěný amoniakální dusík bude odstraněn zhruba z 90 %, předpokládaná koncentrace je 15 mg/l. Vypouštěné odpadní vody za navrženou přírodní čistírnu budou vyhovovat stanoveným limitním hodnotám.

Velikost I. a II. stupně vertikálního filtru byl vypočítán na základě rakouské normy (ÖNORM B 2505, 2009). Je uvažováno, že I. a II. stupeň bude mít plochu 1 m²/EO. Hlavní filtrační vrstva I. stupně, bude o mocnosti >0,5 m, frakce 1–4 mm. II. stupeň vertikálního filtru, bude také o mocnosti >0,5 m, při použité frakci 0–4 mm. Vzhledem k tropickému klimatu v lokalitě Surabaya lze očekávat, potencionálně lepší čistící účinnosti ve srovnání s klimatem mírného pásu, viz kapitola 2.112.6.

Velikost I. stupně vertikálního filtru

$$A_{I.st} = 1,0 \cdot EO = 920 \text{ m}^2 \quad (4.7)$$

Velikost II. stupně vertikálního filtru

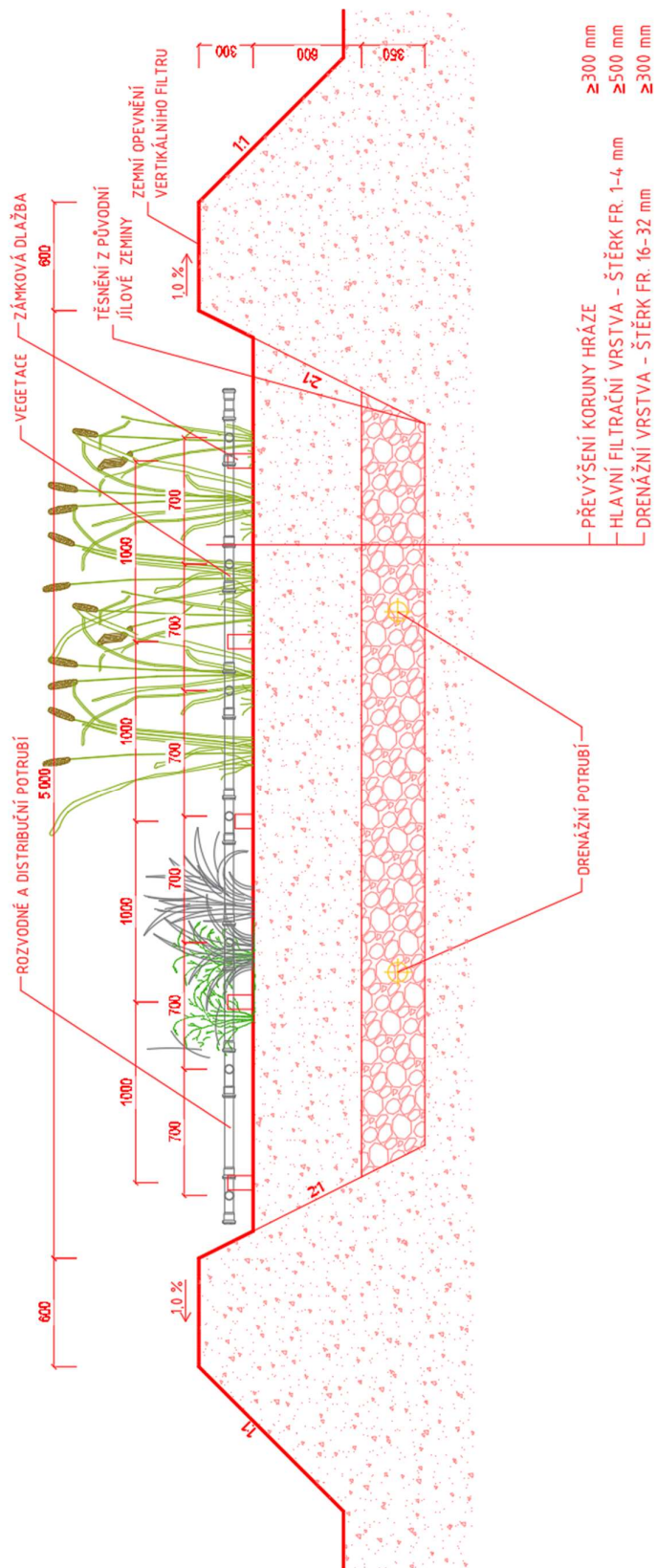
$$A_{II.st} = 1,0 \cdot EO = 920 \text{ m}^2 \quad (4.8)$$

Plocha jednoho vertikálního filtru by měla být 150 m². Vzhledem k předpokládaným rychlejším biochemickým a některým fyzikálním procesům v teplém podnebí, je možné pro účely studie počítat s menší celkovou plochou prvního i druhého filtru a zvolit velikost 900 m², první a druhý stupeň bude tedy rozdělen na 6 polí.

Z důvodu rovinatého pozemku uvažované čistírny bude nutné provedení náspu pro anaerobní separátor a jednotlivá vertikální pole pro dosažení gravitačního spádu. Voda z čistírny bude odváděna do otevřeného kanálu, který se nachází na okraji pozemku.

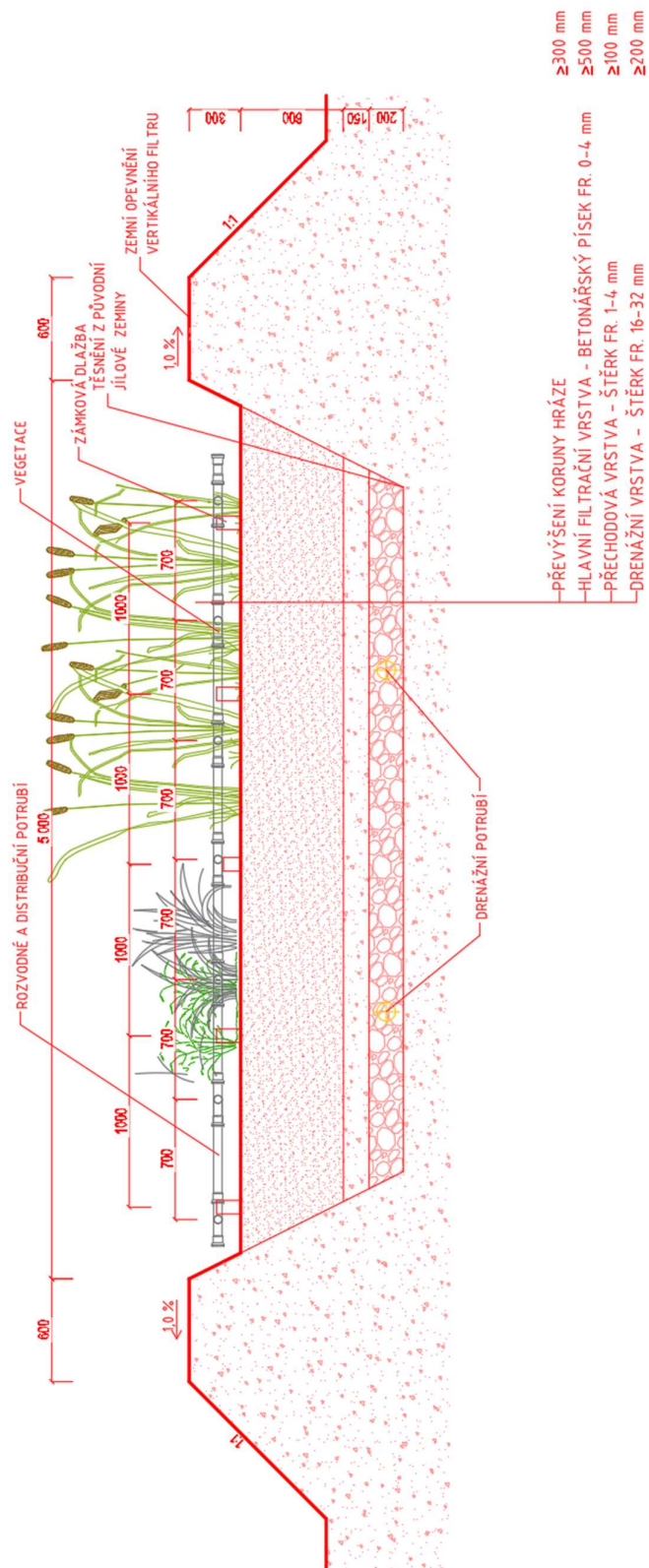
Byly zpracovány vzorové příčné řezy vertikálních filtrů, které mohou sloužit jako podklad pro budoucí vypracování projektové dokumentace.

I. STUPEŇ VERTIKÁLNÍHO FILTRU (1-4 mm)



Obr. č. 45 Vzorový příčný řez I. stupněm vertikálního filtračního pole

II. STUPĚŇ VERTIKÁLNÍHO FILTRU (0-4 mm)

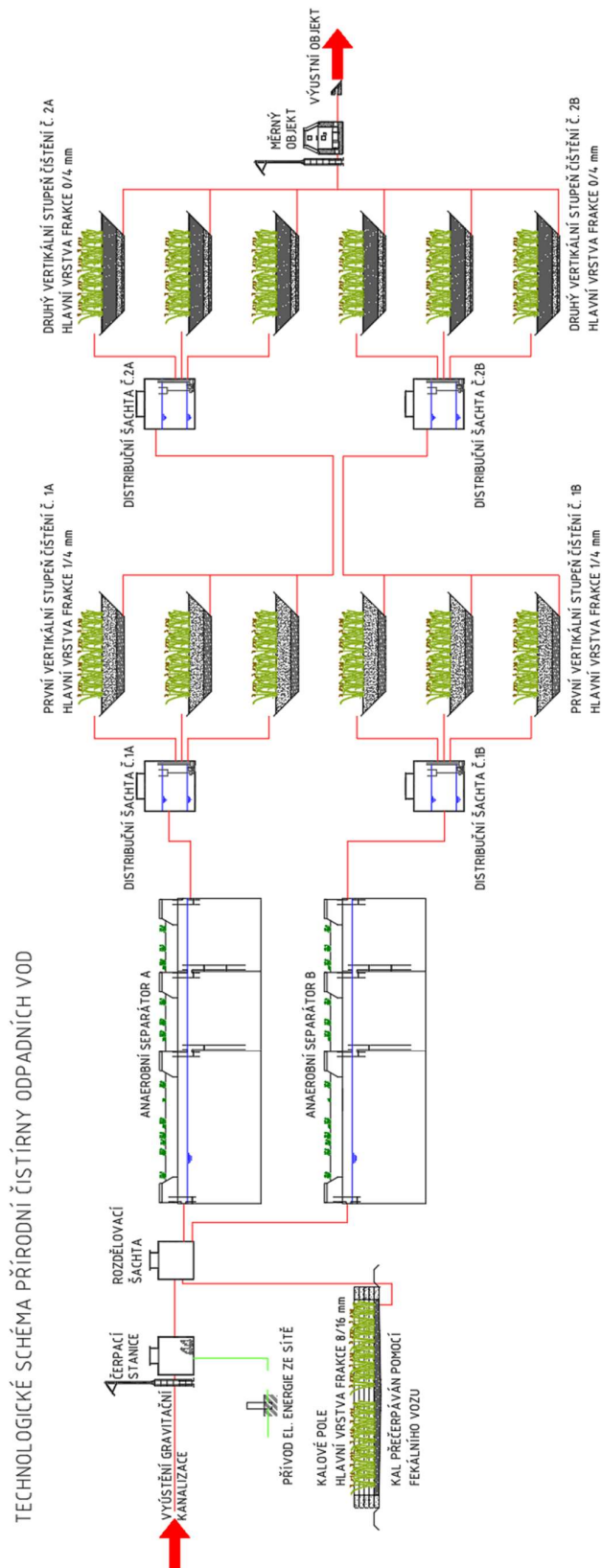


Obr. č. 46 Vzorový příčný řez II. stupněm vertikálního filtračního pole

4.4.5. Kalové pole

Kalové pole vzhledem ke klimatickým podmínkám lokality je dle (ČSN 75 6402, 2017) dimenzované na $0,2 \text{ m}^2/\text{EO}$ s hloubkou $2,5 \text{ m}$. Dle výpočtu je plocha kalového pole 200 m^2 .

$$A_{KP} = EO \cdot \frac{1}{5} = 920 \cdot \frac{1}{5} \doteq 200 \text{ m}^2 \quad (4.9)$$



Obr. č. 47 Technologické schéma zapojení PČOV

4.5. Provoz a údržba

Provoz a údržba, která je známá v podmínkách mírného pásu se nebude významně lišit od údržby v tropickém podnebí, viz kapitola 2.8.

Hlavním provozním problémem vertikálních filtrů je kolmatace, způsobená nedůsledným odstraňováním kalu z anaerobního separátoru, které vzhledem k velikosti, by mělo být jednou za 4 měsíce. Také by se měla hlídat nitrifikace ve filtru, měřením $N-NH_4^+$ na odtoku, které by mělo být s měsíční periodicitou a zaznamenáváno v knize údržby, společně s ostatními úkony na čistírně. Odstraňování vegetace z vertikálního filtru, vzhledem k teplému podnebí, bude pravděpodobně častější. Během prvního roku, bude nutné odstraňování plevelnatých rostlin alespoň každý týden, v průběhu dalších let by mokřadní rostliny měli být každý půlrok pokoseny a sklizeny z povrchu filtru. Dále by měly být kontrolovány pulzní vypouštěče, rozvodné a distribuční potrubí, zda voda dávkuje vodu na filtry správně, alespoň v periodicitě odstraňování vegetace z filtru (Langergraber & Gabriela & Jaime, & Anacleto, 2019).

Tab. č. 11 Úkony údržby na PČOV v časových intervalech

Úkon	Časový interval
Přečerpání kalu z anaerobního separátoru	4x za rok
Měření $N-NH_4^+$ na odtoku z čistírny	1x za měsíc
Odstraňování vegetace z filtru	<ul style="list-style-type: none">• během prvního roku odstraňování plevelných rostlin 1 x týdně• následně mokřadní rostliny koseny a sklizeny z VF 2x ročně
Kontrola pulzních vypouštěčů a rozvodného potrubí	<ul style="list-style-type: none">• během prvního roku odstraňování plevelných rostlin 1 x týdně• následně mokřadní rostliny koseny a sklizeny z VF 2x ročně

Vypsaneé úkony jsou pouze orientační, další provozní a udržovací práce na přírodní čistírně jsou zpravidla zpracovány a poskytnuty v provozním řádu.

5. Závěr

Způsobů přírodního čištění odpadních vod je mnoho, vybrat však jeden správný pro danou lokalitu, se všemi jejími specifiky, tak, by její účinnost byla co největší a životnost co možná nejdelší je komplikované. Důraz by měl být především kladen na nezobecňování, naopak individualitu každého řešeného projektu. Přírodní čistírny odpadních vod nabízejí nejen kvalitně vyčištěnou vodu, ale také nízké technické i ekonomické nároky, navíc mohou být prvkem utužující mezilidské vztahy, například možností výstavby svépomocí.

Návrhu komunitní čistírny odpadních vod předcházela analýza stávajícího nakládání s odpadními vodami v bloku Perumdos. V současné době je zaveden decentralizovaný systém likvidace odpadních vod v podobě dvoukomorových septiků pro černé vody a absence čištění vod šedých. Studie zahrnuje výstavbu přírodní čistírny a zároveň vybudování nové gravitační kanalizační sítě, která bude odvádět všechny odpaní vody z domácností. Vzhledem k vysokému zatížení amoniakálním dusíkem a přítomnosti patogenních mikroorganismů, byl jako hlavní stupeň čištění navržen dvoustupňový vertikální filtr podpovrchově protékány. Komunální přírodní čistírna je dimenzována pro 920 EO. Před vertikálním filtrem jsou zařazeny dva anaerobní separátory o celkovém objemu 300 m³. Voda dále natéká na I. stupeň vertikálního filtru, který je rozdělen do 6 polí o celkové ploše 900 m², dále je voda přiváděna na II. stupeň vertikálního filtru, který je o stejné ploše a stejném členění. Také je navrženo, ve výškové úrovni anaerobního separátoru, kalové pole s plochou 200 m². Účinnost odstranění znečištění dvoustupňového vertikálního filtru je dle výpočtu téměř 100%. Pro správný a dlouhodobý chod čistírny je důležitá ne příliš náročná, ale pravidelná údržba čistírny, v podobě pravidelného vyvážení sedimentu z anaerobního separátoru na kalové pole či sečení vegetace na vertikálních filtrech. Kromě výstavby nové čistírny by dalším prvkem, zlepšující jakost vody, mohly být plovoucí ostrovy na vodní hladině, nacházející se v zájmové čtvrti.

V současné době chybí motivační nebo sankční režim pro nakládání s odpadními vodami z domácností, ať už jde o zajištění kvality stávajících septiků pro černé vody nebo pro vybudování čistíren pro vody šedé. Možným řešením by mohl být motivační či dotační systém, uplatňován na úrovni domácností, komunit či městských orgánů. Dále jsou potřeba kvalifikovaní odborníci, kteří zajistí projekty a stavební dozor staveb, zde se jeví možnost využití volného místa na trhu pro evropské firmy, zabývající se likvidací odpadních vod.

6. Seznam citované literatury

About Septic Systems. (n. d.). Retrieved from: <https://www.epa.gov/septic/about-septic-systems>

Cheng-Yu, K. (2013). A Novel Method for Solving Ill-conditioned Systems of Linear Equations with Extreme Physical Property Contrasts. *Computer Modeling in Engineering and Sciences*, 96(9).

ConWe: Vypouštěč. (2018). Retrieved from: <http://conwe.cz/vypoustec.html>

(2019). CPCB: Manual on Constructed Wetland as an Alternative Technology for Sewage Management.

ČSN 75 6401: Čistírny odpadních vod pro ekvivalentní počet obyvatel (EO) větší než 500. (2006). (2014).

ČSN 75 6402: Čistírny odpadních vod do 500 ekvivalentních obyvatel. (2017). (Tato norma nahrazuje ČSN 75 6402 z února 1998). Úřad pro technickou normalizaci, metrologii a státní zkušebnictví, 2017.

Dotro, G., Langergraber, G., Molle, P., Nivala, J., Puigagut, J., Stein, O., & von Sperling, M. (2017). Biological wastewater treatment series: Treatment Wetlands. (volume 7).

Environmental Protection and Management: Law No. 32/2009. (2009). FAO: FAO, FAOLEX.

Global wetland technology: Treatment Wetlands - Constructed Wetlands. (n. d.). Retrieved from: <https://www.globalwettech.com/about-constructed-wetlands.html>

Hlušík, P. (2018). Vady na potrubí: infiltrace, exfiltrace, poškození potrubí. In: *Wavin*. Vysoké učení technické v Brně, Fakulta stavební, Ústav vodního hospodářství obcí. Retrieved from: <https://blog.wavin.com/cs-cz/vady-na-potrubi>

Huong, Y., Tan, Y., Tang, F., & Agus, S. (2022). Modelling of Hydraulic Dynamics in Sludge Treatment Reed Beds with Moving Boundary Condition.

Ilyas, H., & Masih, I. (2017). Intensification of constructed wetlands for land area reduction: a review. *Environmental Science and Pollution Research*.

Indonesia Population Growth Rate 1950-2023. (n. d.). Retrieved from: <https://www.macrotrends.net/countries/IDN/indonesia/population-growth-rate> Indonesia Population Growth Rate 1950-2023. www.macrotrends.net. Retrieved 2023-05-11.

Kořenovky. (n. d.). Retrieved from: <https://www.korenova-cisticka.cz/korenove-cistirny/korenova-cistirna-pro-obce>

Kösters, M., Bichai, F., & Schwartz, K. (2019). Institutional inertia: challenges in urban water management on the path towards a watersensitive Surabaya, Indonesia. *International Journal of Water Resources Development*.

Kota Surabaya. (n. d.). *City population*. Retrieved from: https://www.citypopulation.de/en/indonesia/jawatimur/reg/admin/3578_kota_surabaya/

Langergraber, G., Gabriela, D., Jaime, N., & Anacleto, R. (2019). *Wetland Technology: Practical Information on the Design and Application of Treatment Wetlands*. Knowledge Unlatched: IWA Publishing.

Leicester, D., Amezaga, J., Moore, A., & Heidrich, E. (2020). Optimising the Hydraulic Retention Time in a Pilot-Scale Microbial Electrolysis Cell to Achieve High Volumetric Treatment Rates Using Concentrated Domestic Wastewater. *Molecules*.

Martinez-Guerra, E., Castillo-Valenzuela, J., & Gnaneswar Gude, V. (2018). Wetlands for Wastewater Treatment. *Water Environment Research*, pp. 1537 - 1562.

Miszta-Kruk, K. (2015). Reliability and failure rate analysis of pressure, vacuum and gravity sewer systems based on operating data. *Engineering Failure Analysis*.

Mohrmann, P. (2022). Zavádění DWA v českém vodohospodářském prostředí bude znamenat vyšší kvalitu.

NV č. 401/2015 Sb.: Nařízení vlády o ukazatelích a hodnotách přípustného znečištění povrchových vod a odpadních vod, náležitostech povolení k vypouštění odpadních vod do vod povrchových a do kanalizací a o citlivých oblastech. (2015).

ÖNORM B 2505: Kläranlagen - Intermittierend beschickte Bodenfilter ("Pflanzenkläranlagen") - Anwendung, Bemessung, Bau, Betrieb, Wartung und Überprüfung. (2009). Wien: Österreichisches Normungsinstitut.

PERATURAN MENTERI LINGKUNGAN HIDUP DAN KEHUTANAN REPUBLIK INDONESIA: NOMOR 6 TAHUN 2021. (2021). MENTERI LINGKUNGAN HIDUP DAN KEHUTANAN REPUBLIK INDONESIA.

Pucher, B., & Langergraber, G. (2019). Influence of design parameters on the treatment performance of VF wetlands – a simulation study.

Sharma, M., Tyagi, V., & Singh, N. (2022). Sustainable technologies for on-site domestic wastewater treatment: a review with technical approach. *Environ Dev Sustain*, (24).

Standard DWA-A 262E: Principles for Dimensioning, Construction and Operation of Wastewater Treatment Plants with Planted and Unplanted Filters for Treatment of Domestic and Municipal Wastewater. (2017). German Association for Water, Waste water and waste (DWA).

SURABAYA: KLIMATABELLE UND WETTER IM GESAMTEN JAHR. (n. d.). *de.climate-data.org*. Retrieved from: <https://de.climate-data.org/asien/indonesien/ost-java/surabaya-977158/t/januar-1/>

Susnik, J., Yuniarto, A., Hadi, W., Sharma, S., Pathirana, A., Cabrera, A., & Bichai, F. (2017). Water supply and demand in Surabaya, Indonesia: Current situation and future scenarios.

Udržitelný rozvoj. (2008–2023). *Ministerstvo životního prostředí*. Retrieved from: https://www.mzp.cz/cz/udrzitelny_rozvoj

UNDANG-UNDANG REPUBLIK INDONESIA: NOMOR 32 TAHUN 2009. (2009).

Varma, M., Kumar Gupta, A., Sarathi Ghosal, P., & Majumder, A. (2020). A review on performance of constructed wetlands in tropical and cold climate: Insights of mechanism, role of influencing factors, and system modification in low temperature. *Science of the Total Environment*.

Vodní zákon: č. 254/2001. (2001).

Vymazal, J. (2019). Is removal of organics and suspended solids in horizontal sub-surface flow constructed wetlands sustainable for twenty and more years?. *Chemical Engineering Journal*, (378).

Vymazal, J. (2016). *Kořenové čistírny odpadních vod: Využití ve světě, České republice a Plzeňském kraji*. Plzeň.

Vymazal, J., Zhao, Y., & Mander, Ü. (2021). Recent research challenges in constructed wetlands for wastewater treatment: A review. *Ecological Engineering*.

Waisová, Š., & Cabada, L. (2020). *Trh s environmentálními technologiemi s důrazem na vodní hospodářství Indonésie: Stav, perspektivy a obchodní příležitosti* (Západočeská univerzita v Plzni, Česká republika: Západočeská univerzita v Plzni). Retrieved from: https://www.mzv.cz/public/9d/11/47/4556276_2806864_Trh_s_environmentalnymi_technologiemi_s_durazem_na_vodni_hospodarstvi_Indonesie.pdf

Wang, H., Sheng, L., & Xu, J. (2021). Clogging mechanisms of constructed wetlands: A critical review. *Journal of Cleaner Production*, (295).

Widyarani., Wulan, D., Hamidah, U., Komarulzaman, A., Rosmalina, R., & Sintawardani, N. (2022). Domestic wastewater in Indonesia: generation, characteristics and treatment. *Environmental Science and Pollution Research*.

7. Seznam obrázků

Obr. č. 1 Orobinec (<i>Typha domingensis</i>) převzato z https://botany.cz/cs/typha-domingensis/	21
Obr. č. 2 Rákos obecný (<i>Phragmites australis</i>) převzato z https://botany.cz/cs/phragmites-australis/	21
Obr. č. 3 Skřípina kořenující (<i>Scirpus radicans</i>) převzato z https://botany.cz/cs/scirpus-radicans/	21
Obr. č. 4 Kana indická (<i>Canna indica</i>) převzato z https://www.semenaonline.cz/kana/4288-kana-indicka-canna-indica-prodej-semen-6-ks.html	21
Obr. č. 5 Vodní hyacint (<i>Eichhornia crassipes</i>) převzato z https://www.123rf.com/photo_63929823_water-hyacinth-in-river.html?is_plus=1	22
Obr. č. 6 Rdest kadeřavý (<i>Potamogeton crispus</i>) převzato z https://botany.cz/cs/potamogeton-crispus/	22
Obr. č. 7: Schéma DČOV	23
Obr. č. 8: Schéma jímky na vyvážení	23
Obr. č. 9: Schéma centrálního systému	23
Obr. č. 10: Pohled na kalové pole French systému v Bukově	26
Obr. č. 11: Schematické konstrukční uspořádání přírodních čistíren	27
Obr. č. 12: Rozdělení přírodních čistíren dle způsobu čištění odpadních vod převzato a upraveno (Vymazal, 2016)	28
Obr. č. 13: Hrubé česle ručně stírané v obci Hlína	29
Obr. č. 14: Prostorové uspořádání anaerobního separátoru	31
Obr. č. 15: Technický výkres konstrukčního anaerobního separátoru ve výkopu ...	33
Obr. č. 16: Opevněná a zatravněná plocha anaerobního separátoru v obci Hlína ..	34
Obr. č. 17 Faktory ovlivňující PČOV převzato a upraveno z (Varma & Kumar Gupta & Sarathi Ghosal, & Majumder, 2020)	35
Obr. č. 18 Schéma horizontálního filtru převzato z („Global wetland technology“, n. d.)	36
Obr. č. 19 Schéma vertikálního filtru převzato z („Global wetland technology“, n. d.)	37
Obr. č. 20 Schéma důležitých mocností jednotlivých vrstev dvoustupňového vertikálního filtru	38
Obr. č. 21 Dvoustupňový vertikální filtr v obci Hlína – Rakouský systém	38
Obr. č. 22 Výškové uspořádání dvoustupňového vertikálního filtru	39
Obr. č. 23 Pulzní vypouštěč na vertikální filtr v obci Hlína	40
Obr. č. 24 Solární panel jako zdroj energie pro měřící zařízení v obci Hlína	40
Obr. č. 25 Schéma stabilizační nádrže s horizontálním prouděním převzato z („Global wetland technology“, n. d.)	41
Obr. č. 26 Porovnání účinnosti odstraňování ukazatelů látkového znečištění pro různé typy přírodních čistíren data převzata z (Varma & Kumar Gupta & Sarathi Ghosal, & Majumder, 2020)	42
Obr. č. 27 Orientační hodnoty účinnosti pro jednotlivé typy technologií (ČSN 75 6402, 2017)	43

Obr. č. 28 Kalové pole v obci Hlína	44
Obr. č. 29 Plovoucí ostrov převzato z http://conwe.cz/plovouci-ostrovy.html	48
Obr. č. 30: Globus s vyznačenou Surabayou (Google Earth).....	50
Obr. č. 31: Klimadiagram dle Walter – Lietha v období 1991–2021 data převzata z převzata („SURABAYA: KLIMATABELLE UND WETTER IM GESAMTEN JAHR“, n. d.)	51
Obr. č. 32: Typické WC	52
Obr. č. 33: Vypouštění odpadních vod z nákupního centra do koryta řeky Kali Mas	53
Obr. č. 34: Pobřeží Surabayi.....	53
Obr. č. 35: Systém čištění šedé vody přes kořenový systém rostlin a chov ryb	54
Obr. č. 36: Ulice s čištěnými šedými a dešťovými vodami.....	54
Obr. č. 37: Pilíře udržitelného rozvoje převzato z („Udržitelný rozvoj“, 2008–2023)	57
Obr. č. 38: Vyznačené zájmové území (Seznam Mapy).....	58
Obr. č. 39: Architektonická situace zájmového území	58
Obr. č. 40 Míra růstu populace v Indonésii (Indonesia Population Growth Rate 1950-2023, n. d.)	59
Obr. č. 41 Stanovení specifické potřeby vody dle $CHSK_{Cr}$	61
Obr. č. 42 Stanovení specifické potřeby vody dle $CHSK_{Cr}$	61
Obr. č. 43: Rozdělovací šachta před anaerobními separátory v obci Hlína	63
Obr. č. 44 Vzorový technický výkres anaerobního separátoru v náspu	64
Obr. č. 45 Vzorový příčný řez I. stupněm vertikálního filtračního pole	67
Obr. č. 46 Vzorový příčný řez II. stupněm vertikálního filtračního pole	68
Obr. č. 47 Technologické schéma zapojení PČOV	70

8. Seznam tabulek

Tab. č. 1: Varianty využití přírodních způsobů čištění (Dotro et al., 2017).....	20
Tab. č. 2 Specifické látkové zatížení na ekvivalentního obyvatele v g/(EO.den) (Standard DWA-A 262E, 2017)	25
Tab. č. 3 Emisní standardy: koncentrace ukazatelů znečištění vypouštěných odpadních vod v mg/l (NV č. 401/2015 Sb., 2015)	26
Tab. č. 4 Typické hodnoty hydraulické vodivosti nasycených půd převzato a upraveno (Cheng-Yu, 2013)	35
Tab. č. 5 Průměrná účinnost odstranění znečištění v % v tropickém a subtropickém podnebí (Varma & Kumar Gupta & Sarathi Ghosal, & Majumder, 2020).....	42
Tab. č. 6 Průměrná účinnost odstranění znečištění v % (ČSN 75 6402, 2017).....	43
Tab. č. 7: Hlavní ovlivňující parametry vzniku kolmatace (Wang & Sheng, & Xu, 2021)	46
Tab. č. 8 Limitní standardy komunálních odpadních vod poskytnuty prof. Joni Hermana (ITS)	55
Tab. č. 9 Látkové zatížení na přítoku PČOV	60
Tab. č. 10 Předpokládané koncentrace v mg/l a celková účinnost čištění PČOV	65
Tab. č. 11 Úkony údržby na PČOV v časových intervalech	71

9. Seznam zkratk

EO	Ekvivalentní obyvatel
OV	Odpadní voda
ČOV	Čistírna odpadních vod
PČOV	Přírodní čistírna odpadních vod
BSK	Biochemická spotřeba kyslíku
CHSK	Chemická spotřeba kyslíku
NL	Nerozpuštěné látky
N_{celk}	Celkový dusík
$N\text{-NH}_4^+$	Amoniakální dusík
P_{celk}	Celkový fosfor
HP	Horizontální proudění
VP	Vertikální proudění
Am	Tropické monzunové podnebí
MPN	Metoda nejvíce pravděpodobného počtu
AS	Anaerobní separátor
a	Součinitel kalového prostoru
n	Počet připojených obyvatel
t	Střední doba zdržení
K	Hydraulická vodivost
FP	Filtrační pole
VF	Vertikální filtr
HF	Horizontální filtr
SN	Stabilizační nádrž
KP	Kalové pole
ČS	Čerpací stanice

10. Seznam použitých symbolů

Q_{24}	Průměrný bezdeštný denní přítok	m^3/den
$Q_{24,m}$	Průměrný denní přítok odpadních vod	m^3/den
q_{spec}	Specifická produkce odpadních vod	$l/os/\text{den}$
Q_B	Balastní vody	m^3/den
$k_{h,max}$	Součinitel maximální hodinové nerovnoměrnosti	-
k_d	Součinitel denní nerovnoměrnosti	-
Q_d	Maximální bezdeštný denní přítok	m^3/den
Q_h	Maximální bezdeštný hodinový přítok	m^3/hod
V_{septik}	Objem septiku	m^3
V_{AS}	Objem anaerobního separátoru	m^3
A_{AS}	Plocha anaerobního separátoru	m^2
t_{AS}	Doba zdržení v anaerobním separátoru	den
A_{LZ}	Plocha VF dle zátkového zatížení	m^2
A_{HZ}	Plocha VF dle hydraulického zatížení	m^2