

Česká zemědělská univerzita v Praze

Provozně ekonomická fakulta

Katedra informačních technologií



Diplomová práce

**Simulační technologie Digital Twin a potenciál využití ve
vodohospodářství**

Jan Zháněl

© 2024 ČZU v Praze

ČESKÁ ZEMĚDĚLSKÁ UNIVERZITA V PRAZE

Provozně ekonomická fakulta

ZADÁNÍ DIPLOMOVÉ PRÁCE

Bc. Jan Zháněl

Ekonomika a management

Název práce

Simulační technologie Digital Twin a potenciál využití ve vodohospodářství

Název anglicky

Digital Twin Simulation Technology and Its Use Case in Water Management

Cíle práce

Hlavním cílem práce je analýza potenciálu simulační technologie Digitálního dvojčete ve vodohospodářství a vodních dílech v krajině. Dílčími cíli práce je vytvoření přehledu odborné literatury pro danou oblast, souhrn a charakteristiky využívaných technologií a jejich srovnání, stanovení potenciálu využití a na úrovni případové studie porovnání ekonomických ukazatelů při implementaci v reálné situaci.

Metodika

Metodika řešené problematiky diplomové práce je založena na studiu a analýze odborných informačních zdrojů. Praktická část práce je zaměřena na vypracování případové studie analyzující ekonomickou stránku implementace a využití technologie. Na základě syntézy teoretických poznatků a výsledků praktické části budou formulovány závěry diplomové práce.

Doporučený rozsah práce

60 – 80 stran

Klíčová slova

digitální dvojče, digital twin, vodohospodářství, simulace, digitalizace

Doporučené zdroje informací

- ALAHİ, Md Eshrat E. Alahı a Subhas Chandra MUKHOPADHYAY, 2019. Smart Nitrate Sensor: Internet of Things Enabled Real-Time Water Quality Monitoring [online]. Switzerland: Springer Nature Switzerland [cit. 2022-05-18]. ISBN 978-3-030-20095-4. Dostupné z: <https://ebookcentral.proquest.com/lib/czup/detail.action?docID=5771556>
- CHAUDHARY, Gopal, Manju KHARI a Mohamed ELHOSENY, ed., 2021. Digital Twin Technology [online]. 6 October 2021. Boca Raton: CRC Press [cit. 2022-05-18]. ISBN 9781003132868. Dostupné z: <https://ebookcentral.proquest.com/lib/czup/detail.action?docID=6688902>
- LANE, Alexander, Michael NORTON a Sandra RYAN, 2017. Water Resources: A New Water Architecture [online]. New York, USA: John Wiley & Sons. [cit. 2022-05-18]. ISBN 9781118794074. Dostupné z: <https://ebookcentral.proquest.com/lib/czup/reader.action?docID=4917501&ppg=1>
- OWEN, David A. Lloyd, TABERHAM, Justin, ed., 2018. Smart Water Technologies and Techniques: Data Capture and Analysis For Sustainable Water Management [online]. New York, USA: John Wiley & Sons. [cit. 2022-05-18]. ISBN 978-1-118-79390-9. Dostupné z: <https://ebookcentral.proquest.com/lib/czup/reader.action?docID=5296145&ppg=6>
- Web of Science a Scopus (citační databáze)

Předběžný termín obhajoby

2022/23 LS – PEF

Vedoucí práce

doc. Ing. Jan Jarolímek, Ph.D.

Garantující pracoviště

Katedra informačních technologií

Elektronicky schváleno dne 14. 7. 2022

doc. Ing. Jiří Vaněk, Ph.D.

Vedoucí katedry

Elektronicky schváleno dne 27. 10. 2022

doc. Ing. Tomáš Šubrt, Ph.D.

Děkan

V Praze dne 07. 04. 2024

Čestné prohlášení

Prohlašuji, že svou diplomovou práci "Simulační technologie Digital Twin a potenciál využití ve vodohospodářství" jsem vypracoval samostatně pod vedením vedoucího diplomové práce a s použitím odborné literatury a dalších informačních zdrojů, které jsou citovány v práci a uvedeny v seznamu použitých zdrojů na konci práce. Jako autor uvedené diplomové práce dále prohlašuji, že jsem v souvislosti s jejím vytvořením neporušil autorská práva třetích osob.

V Praze dne 29.3.2024

Poděkování

Rád bych touto cestou poděkoval panu doc. Ing. Janu Jarolímkovi, Ph.D., za vedení a konzultace při psaní práce. Dále Oldřichu Kupovi, odborníkovi ze společnosti Siemens na digitalizaci v oblasti vodohospodářství, panu Ing. Petru Dolejšovi, Ph.D. z VŠCHT a panu Lukáši Chalupovi, technickému řediteli společnosti VDT Technology a.s., za konzultaci při vzniku praktické části práce.

Simulační technologie Digital Twin a potenciál využití ve vodohospodářství

Abstrakt

Cílem této diplomové práce je ekonomicky analyzovat potenciál nově vznikajícího odvětví a trendu v digitalizaci vodohospodářství – digitální dvojčata na čističkách odpadních vod (ČOV). V první části práce jsou vymezeny a definovány pojmy tohoto komplexního oboru včetně té nejdůležitější legislativy, je popsána technologie a náležitosti digitálních dvojčat a snaha o definici termínu, který ještě není ustálen. Úvod druhé části práce je věnován přehledu dostupných softwarových nástrojů na trhu a jejich popisu a definování kroků návrhu digitálního dvojčete a možnosti využití softwarových řešení. Následuje případová studie na reálné čističky odpadních vod, která je pro potřeby práce anonymizována, na kterou jsou aplikovány výsledky ze zahraniční dánské studie. Trh a obchodní modely se aktuálně vyvíjejí a ceny nejsou veřejně dostupné, vznikají individuálně podle stávajícího technologického stavu infrastruktury, velikosti čističek či stupně automatizace procesů. Jedná se tedy o orientační modelový příklad, na kterém je vypočítána úspora nákladů, doba návratnosti investice, za předpokladu, že bude dosaženo stejné úspory jako v dánském příkladě. Součástí výpočtu je matice výše nákladů a doby návratnosti v letech pro snazší investiční rozhodování.

Klíčová slova: čistírny odpadních vod, digitalizace, digitální dvojče, digital twin, doba návratnosti investice, IoT, internet věcí, Voda 4.0, vodohospodářství, Průmysl 4.0, úspora nákladů

Digital Twin Simulation Technology and Its Use Case in Water Management

Abstract

The main aim of this thesis is to economically analyse the potential of an emerging market segment and current trend in digitalization of water management – digital twins for water resource recovery facilities (WRRF). In the first part of the thesis are defined main key terms of this rather complex industry including the most important legislation, as well as description of the technology, its essentials and definition, which is still not yet universally defined. The prologue of the second part of the work is dedicated to general overview of the software tools (and its description) that are currently available on the market. Main essential steps that should be taken into the consideration while creating and designing a digital twin and examples of software solutions are described. Further a case study with economic data from a real water resource recovery facility (which was for the purpose of this work anonymized) is carried out and its base is a Danish study which results are applied. The market and business models are currently evolving, and prices are not publicly available and are created on each case individually, depending e.g. on a technological state of each WRRF, its size and state of process automatization. This study is rather a model case, on which costs savings and payback period are calculated, considering the same level of savings as in Danish study leading to a matrix of examples of costs and payback period for easier investment decisions.

Keywords: water resource recovery facility, wastewater treatment plant, digitalization, digital twin, payback period, IoT, internet of things, Water 4.0, water management, Industry 4.0, cost savings

Obsah

1 Úvod.....	11
2 Cíl práce a metodika	13
2.1 Cíl práce	13
2.2 Metodika	13
3 Přehled řešené problematiky	15
3.1 Vymezení a definice pojmů	15
3.1.1 Voda a vodní cyklus	15
3.1.2 Sektory vodohospodářství.....	16
3.1.3 Procesy ve vodním hospodářství	19
3.1.4 Legislativa v Evropské Unii a České republice, normy.....	22
3.1.5 Koncept „Smart water“	25
3.1.6 Sběr dat a jejich využití v biologických procesech.....	29
3.1.7 Digitální dvojčata.....	32
3.2 Reálná nasazení digitálních dvojčat	42
3.2.1 Švédský příklad kanalizace 4.0.....	43
3.2.2 Aplikace v České republice	47
4 Vlastní práce	51
4.1 Přehled dostupných softwarových nástrojů	52
4.2 Návrh digitálního dvojčete čističky	57
4.3 Výchozí stav vybrané ČOV	60
4.4 Zpracování odhadu investičních a provozních nákladů na digitální dvojče	62
4.5 Teoretický výpočet potřebných úspor pro klienta díky digitálnímu dvojčeti ..	64
4.6 Praktický výpočet potenciálně dosažitelných úspor na dané infrastruktuře	68
4.7 Návrh návratnosti investice v různých časových horizontech	70
4.8 Tabulka návratností investice dle výše potenciální úspor.....	76
5 Výsledky a diskuse	78
6 Závěr.....	81
7 Seznam použitých zdrojů	84
7.1 Seznam obrázků	95
7.2 Seznam tabulek	95
7.3 Seznam grafů.....	95
7.4 Seznam použitých zkratk.....	96
Přílohy.....	98

1 Úvod

Voda je jedním z předpokladů života na Zemi a současně jedním z aktuálních témat problémů současného světa. Zvyšující se teplota ovzduší, nárůst populace a změna klimatu v důsledku prudkého rozvoje průmyslu, zemědělství a spotřeby v posledních desetiletích způsobuje její nedostatek a může vést ke globální krizi. Jedná se o cenný zdroj, který je potřeba chránit a nakládat s ním šetrně a efektivně. Tímto oborem lidské činnosti se zabývá obor vodní hospodářství.

Dalším současným tématem je IoT (internet of things) a digitální dvojčata (digital twins) a „cokoli“ 4.0. Cloud, sběr dat, internet, konektivita, digitalizace, všechny tyto pojmy lze nazvat módními a jsou trendy současnosti. Lze se se s nimi v kontextu domácností (kde např. chytré ledničky zasílají SMS se seznamy na nákup¹), v průmyslu (kde se např. sbírají provozní data z elektromotorů a vizualizují se v mobilních aplikacích²), v zemědělství (kde je například možné monitorovat výživu půdy³), či právě ve vodohospodářství, kde je možné digitalizovat jak vlastní vodní infrastrukturu, tak proces, ke kterému v ní dochází⁴.

Vývoj technologie uhání mílovými kroky a dostupnost internetu a zlevnění nákladů na výrobu součástek dal podnět k jejímu širokému rozšíření do všech oborů lidské činnosti. Současně se zvyšuje výpočetní výkon mikroprocesorů a zmenšuje jejich velikost, proto je možné vybavit téměř jakoukoli součástku systémů čipem či senzorem a možností odesílat provozní data do cloudového úložiště. Zde se pomocí aplikací mohou nejen zaznamenávat provozní data ex post a poskytovat tak uživateli cenné informace o aktuální kondici zařízení, ale i pomocí umělé inteligence např. predikovat poruchy, plánovat odstávky, vytvořit digitální modely produktů, továren a procesů. Dnes je již možné naprojektovat výrobní linku, továrnu nebo třeba čističku odpadních vod, ve virtuálním prostředí, odladit možné nedostatky či kritické situace, ergonomii, takt linek apod., na digitálním výrobním zařízení napsat programy, které budou dané objekty řídit, optimalizovat procesy výroby či biologické procesy takto ve virtuálním modelu (digitálním dvojčeti) – a následně továrnu, linku, či čističku postavit. Tyto digitální modely nabízejí úspory času, nákladů, materiálů,

¹ MAGAZÍN PLUS+. *Lednice, která vám vytvoří nákupní lístek. A nejen to! Co všechno umí tahle chytrá chladnička?* [online].

² ELEKTRO ČASOPIS PRO ELEKTROTECHNIKU, 2021. „Nice to have“? *Spíš otázka ekonomicky a ekologicky zdravého rozumu* [online].

³ JEŽKOVÁ, Alena, 2020. *Zemědělství 4.0 - revoluce i živočišné výrobě* [online].

⁴ PSE ENTERPRISE. *Next-generation modelling tools across the process lifecycle* [online].

snížení rizik a vysokou efektivitu, umožňují urychlit změny a inovace a napomáhají modularitě u budoucích „fyzických“ dvojčat.

Právě propojení světů vodního hospodářství a digitálních dvojčat a jejich potenciál využití v biologických procesech, které jsou pro vodohospodářství nedílnou součástí, jsou témata, která budou rozebrána na následujících stránkách práce. Budou dále představeny možnosti současné vědy a techniky, ekonomické vyhodnocení investic a přínosy pro potenciální investory.

2 Cíl práce a metodika

2.1 Cíl práce

Hlavním cílem práce je analýza potenciálu simulační technologie Digitálního dvojčete v biologických procesech ve vodohospodářství a vodních děl v krajině.

Prvním dílčím cílem práce je v části Přehled řešené problematiky (kapitola 3) vytvoření a shromáždění dostupného přehledu odborné literatury pro danou oblast. Tento přehled zahrnuje jak zahraniční, tak českou literaturu, stejně jako internetové odborné články a informace poskytované společnostmi zabývající se touto technologií. Dále jsou definovány důležité pojmy. Součástí kapitoly je také vytvoření souhrnu a charakteristiky využívaných technologií a jejich srovnání a zmapování aktuální situace v tomto oboru.

V části Vlastní práce (kapitola 4) je na základě závěrů z předchozí kapitoly analyzován potenciál využití digitálních dvojčat na úrovni konkrétních případových studií. Tato analýza zahrnuje srovnání ekonomických ukazatelů při implementaci digitálních dvojčat v reálném prostředí s cílem určit celkové technologické a ekonomické výhody. Zohledněny jsou úspory z používání dvojčat, náklady na jejich implementaci a požadovanou úroveň obsluhy těchto technologií. Konkrétní příklady jsou vybrány a diskutovány s odborníky z oblasti toho odvětví.

Kapitola 5 je zaměřena na formulaci a diskusi výsledků práce. Cílem kapitoly je zodpovědět otázky, jako: jaké přínosy nasazení digitálních dvojčat nabízí? Jaké jsou ekonomické výhody či nevýhody technologie? Proč se pro digitální dvojče rozhodnout? Jaký je jeho potenciál? Či nabízená přidaná hodnota? Kterým směrem se technologie aktuálně ubírá? V závěru je shrnut výsledek a závěry vyplývající z provedené práce.

2.2 Metodika

Metodika řešené problematiky diplomové práce je založena na studiu a analýze odborných informačních zdrojů dostupných z online databáze Web of Science, literatury a oborových periodik.

Praktická část práce je zaměřena na vypracování případové studie analyzující ekonomičnost implementace technologie při reálném využití. Pro účel vypracování studie jsou informace diskutovány formou konzultace a elektronické korespondence s odborníky na tuto problematiku.

Na základě syntézy teoretických poznatků a výsledků praktické části jsou formulovány závěry diplomové práce.

3 Přehled řešené problematiky

Na tomto místě je vhodné citovat z nóty Světové banky z roku 2014: „*Voda je jedním ze základních lidských potřeb (...). Vodní hospodářství se současném tempu rostoucí populace a rozvojem ekonomiky ocitá pod bezprecedentním tlakem. Prakticky každá výzva 21. století, ať už se jedná o zabezpečení potravin, zvládnání překotné urbanizace, energetické bezpečnosti, ochranu životního prostředí, nebo přizpůsobování se klimatické změně – vyžaduje vysokou pozornost při nakládáním s vodními zdroji. Přesto všechno je podzemní voda čerpána více, než je doplňována a její kvalita má dopad na životní prostředí a způsobuje nárůst nákladů.*“⁵. Téma vody v kontextu jejího získávání, kvality a šetrnosti při nakládání s ní, bude nyní představeno detailněji. Dále bude popsána role moderní technologie pro predikci kvality vody a srážek, modelování bioprocusů při nakládání s vodou, současné trendy a aktuální využití digitálních dvojčat.

3.1 Vymezení a definice pojmů

Pro účel této práce byl na základě odborné literatury vytvořen přehled problematiky a byly definovány pojmy, které jsou v souvislosti s tématem používány, aby bylo možné zasadit problematiku do užšího kontextu.

3.1.1 Voda a vodní cyklus

Povrch naší planety pokrývá ze 70 % voda a díky tomu získala své přizvisko „modrá“. Zhruba 1,4 mil. km³ vody je v mořích, řekách a podzemních vodách. Voda se na naší planetě vyskytuje v několika skupenstvích: kapalném (moře, řeky), pevném (sníh, led) a plynném (mlha, mraky). Veškerá tato skupenství představují hydrosféru.⁶ Nejvíce je v hydrosféře zastoupena slaná voda, celkový objem tvoří 97,5 %, přičemž poměr sladké vody tvoří zbylých 2,5 %, tedy 35,2 milionu km³. Z tohoto zlomku je 68,7 % voda v pevném skupenství, tedy v ledovcích, 30,1 % vody v podzemních vodách, 0,8 % v permafrostu a konečně 0,4 % na povrchu a atmosféře – což činí přibližně 140 tis. km³. Z této výšeče je nejvíce pitné vody v jezerech – 67,4 %, zbytek je tvořen vlhkostí půdy

⁵ OWEN, David A. Lloyd, TABERHAM, Justin, ed., 2018. *Smart Water Technologies and Techniques: Data Capture and Analysis For Sustainable Water Management* [online].

⁶ BRITTANICA. *Groundwaters* [online].

(12,2 %), koncentrací vody v atmosféře (9,5 %), mokřady (8,5 %), řekami (1,6 %) a vodou ve zvířatech a rostlinách (0,8 %).⁷

Voda ve vše skupenstvích však není statická, ale lze na ni nahlížet jako na uzavřený cyklický systém, který zajišťuje koloběh vody v atmosféře (veškerá voda na zemi – jezera, moře, vlhkost půdy, vlhkost vzduchu), hydrosféře (vzduch obklopující planetu), litosféře (pevná anorganická hmota) a zajišťuje tak důležité živiny pro biosféru (rostliny a zvířata), která je zároveň součástí oběhu. Jedná se o biogeochemický cyklus, který dále dělíme na malý a velký koloběh.

Malý koloběh vody je důležitý pro vnitrozemní oblasti, jakou je kupříkladu Česká republika, a je tvořen dešťovými srážkami, kdy voda v kapalně formě padá k zemi, kde dále odtéká do vodních toků, půdy, nebo se působením slunečního záření odpařuje a kondenzuje v mraky a znovu děšť, který navrací vodu zpátky na pevninu. Současným problémem je nedostatek volné půdní plochy, do které by se mohly srážky vsáknout, což je způsobeno zástavbou městských aglomerací, sídel a obydlí, asfaltovými dopravními cestami, úpravou koryt řek a vodních toků apod., a dochází k v nedostatečnému zavlažování půdy, doplňování zásob spodních vody, a tedy k suchu⁸. Analogicky je malým koloběhem označovaná voda z oceánů, která navracena cyklem opět do oceánů⁹.

Velkým koloběhem vody je pojmenován jev, kdy se voda odpařená z oceánů vysráží nad pevninou a naopak.¹⁰

3.1.2 Sektory vodohospodářství

Vzhledem k tomu, že voda je základní podmínkou pro život a vodní cyklus je uzavřený systém a její množství je omezené, jedná se o cenný zdroj, se kterým je potřeba nakládat šetrně a s maximální efektivitou. Navíc v dohledných letech bude tlak na efektivní nakládání s vodními zdroji dále narůstat. Podle predikcí OSN ke konci roku 2022 dosáhne počet celosvětové populace hranici 8 mil. lidí. V roce 2030 se očekává nárůst na 8,5 mil. a v roce 2050 by měl počet dosáhnout 9,7 miliard lidí¹¹. Tak velký nárůst populace vyžaduje právě zvýšenou potřebu nároků na vodní zdroje, a to ve všech oblastech, které jsou podle

⁷ LANE, Alexander, Michael NORTON a Sandra RYAN, 2017. *Water Resources: A New Water Architecture* [online].

⁸ ENDRLOVÁ, Radka, 2020. *Malý a velký koloběh vody. Lišnický zpravodaj* [online].

⁹ VODOHOSPODÁŘSKÁ SPOLEČNOST BENEŠOV A.S., 2021. *Koloběh vody* [online].

¹⁰ tamtéž

¹¹ UNITED NATIONS DEPARTMENT OF ECONOMIC AND SOCIAL AFFAIRS, Population Division, 2022. *World Population Prospects 2022: Summary of Results* [online].

některých zdrojů členěny na zemědělství, průmysl a obce. OSN přidává ještě kategorii vodních děl (např. přehrady, rybníky), pro účel tohoto textu je ale chápeme jako vstupy, které slouží uvedeným sektorům.

Pro sektor zemědělství dostatek vody stěžejní. Německá Společnost pro Mezinárodní spolupráci (*Deutsche Gesellschaft für Internationale Zusammenarbeit GmbH* – zkráceně GIT) uvádí, že globálně až 70 % (v roce 1995 to bylo 2500 km³/rok¹²), „vytěžené“ povrchové a podzemní vody je využíváno k zalévání zemědělských plodin a v některých rozvojových zemích je to až 90 %¹³. Státům, jejichž ekonomika je tvořena převážně zemědělstvím, hrozí přímý nedostatek vody, způsobený nárůstem populace a potřebou pěstování většího množství potravin. Kromě zalévání plodin, se při zachytávání srážek a kropení v zemědělství využívá úprav terénu a pro záchyt hydrologických procesů mají podstatný vliv. Podle GIT je potřeba dosáhnout integrovaného vodního a půdního hospodářství, který ji umožní ukládat déle a zefektivní její distribuci. Efektivita a udržitelnost v tomto sektoru znamená pěstovat více, s menším objemem vody. Problém, se kterým se zemědělství potýká, je splavování pesticidů a herbicidů do koryt řek a rezervoárů, čímž dochází ke kontaminaci vodních toků. Chemikálie a sedimentace mohou snižovat výkonnost čističek odpadních vod a snižovat objem rezervoárů.¹⁴

Pro potřeby průmyslu se globálně používá ročně zhruba 750 km³ vody (údaj pro rok 1995)¹⁵, tedy 19 % z celkové spotřeby pitné vody. Názorně dělí spotřebu vody podle odvětví průmyslu archivní článek Eurostatu z roku 2014 (data pouze pro státy Evropské Unie)¹⁶. Jednotlivé země se samozřejmě liší podle toho, jaký typ průmyslu v dané zemi převládá, (což je dáno dostupností zdrojů a historicko-politickým vývojem a v dané zemi), ale uvedený článek poslouží alespoň pro vytvoření obrazu, jak je v průmyslu voda využívána. Eurostat dělí průmysl na čtyři hlavní odvětví, ke kterým sbírá data o využívání vodních zdrojů, a to hornictví a těžba, výroba, energetika a stavebnictví a jiné průmyslové aktivity. Energetika ve statistikách zahrnuje i vodu určenou pro chlazení, nebo např. při

¹² WORLD WATER COUNCIL, William J. COSGROVE a Frank R. RIJSBERMAN, 2000. *World Water Vision: Making Water Everybody's Business* [online].

¹³ DEUTSCHE GESELLSCHAFT FÜR INTERNATIONALE ZUSAMMENARBEIT (GIZ) GMBH. *Water in agriculture* [online].

¹⁴ LANE, Alexander, Michael NORTON a Sandra RYAN, 2017. *Water Resources: A New Water Architecture* [online].

¹⁵ WORLD WATER COUNCIL, William J. COSGROVE a Frank R. RIJSBERMAN, 2000. *World Water Vision: Making Water Everybody's Business* [online].

¹⁶ EUROSTAT: STATISTICS EXPLAINED, 2014. *Water use in industry* [online].

výrobě elektrické energie v jaderných elektrárnách, kde je používána k roztáčení lopatek turbín. Výroba je dále dělena na další podsektory:

- Potravinářství
- Textilní průmysl
- Papírenství a celulózy
- Výroba rafinovaných ropných produktů
- Metalurgie
- Výroba dopravních prostředků
- Jiná výroba

Je zcela patrné že, žádné z odvětví průmyslu se bez vody neobejde. Voda je využívána jako surovina, chladicí či promývací činidlo. Kromě jejího množství je pro průmysl důležitá také její kvalita. Před vstupem do výrobního procesu bývá zpravidla upravována a při výstupu čištěna a znovu využívána nebo vypouštěna.¹⁷ Při čištění je voda zbavována chemického a mechanického znečištění. Důležitost vody v průmyslu, či přímo jeho závislost na vodě, podtrhují následující příklady. Například na „výrobu“ kilogramu hovězího masa je potřeba 15 tisíc litrů vody, čokolády 17 tisíc litrů, šálek čaje 27 litrů, jednoho kilogramu papíru 300 litrů¹⁸, výroba počítačového čipu 32 litrů vody, automobilu (včetně veškerých součástí) 400 tisíc litrů vody.¹⁹ Průmyslové podniky jsou proto často situovány do oblasti povodí řek a vodních toků, ze kterých tuto surovinu čerpají. Je tedy i důležitým faktorem při cenotvorbě produktů, ve které se promítají náklady na její zpracování. Snahou průmyslu je tedy s touto surovinou nakládat šetrně, vodu recyklovat a znovu využívat, a to i s rostoucím tlakem regulačních orgánů s ohledem na životní prostředí. V každém odvětví je rozdílný prostor pro úspory, např. dle projektu EnviMod v roce 2014 byl v chemickém průmyslu identifikován více než 50% potenciál pro úspory. Používání moderních technologií a procesů by tak mohlo hrát stěžejní roli pro jeho dosažení.

Obce jsou dalším sektorem a zároveň jedním z megatrendů souvisejícím s tématem vodohospodářství. Téma urbanizace a dostupnosti vodních zdrojů, rovněž rezonuje světovou ekonomikou. Podle OSN má podíl světové populace žijící ve městech do roku 2030 vzrůst na 60 %. Nárůst obyvatelstva ve městech se od roku 1950, kdy žilo ve městech

¹⁷ ČERMÁK, Jan, 2014. *Voda a průmysl* [online].

¹⁸ FIRSTSTYLE MAGAZINE. *Která odvětví průmyslu jsou nejnáročnější na vodu?* [online].

¹⁹ ČERMÁK, Jan, 2014. *Voda a průmysl* [online].

30 % světové populace, navýšil v roce 2018 na 55 %, z čehož nejrychleji roste počet obyvatelů měst v Asii a Africe.²⁰ Městská infrastruktura na to musí být připravena, a to např. od dopravních komunikací, rozvodovou elektrickou sítí, přes zásobování pitnou vodou až po odpadní kanalizace.

3.1.3 Procesy ve vodním hospodářství

Zásobárnami vody pro výše uvedené sektory jsou přehrady, vodní toky, nebo podzemní vody, kde se zpravidla ukládá či jímá tzv. surová voda. Surová voda je následně dopravována potrubní infrastrukturou či s pomocí čerpacích stanic do úpravní vody (zkráceně ÚV), kde dochází k jejímu čištění a dezinfekci (v ČR je to u větších měst proces chlorace, u menších oblastí do 10 tis. obyvatel také ozonace, chlordioxidace a chloraminace²¹), a to pomocí filtrů na vodu, UV lamp a dalšími chemicko-technologickými procesy. Zde dochází také k rozboru vody, který má zajistit dostatečnou kvalitu vody, či navrhnout procesy ke zlepšení její kvality²². Surová voda se dělí do čtyř kategorií upravitelnosti dle ČSN 75 7111:

1. Dezinfikování, případně filtrace pískem, mechanické odkyselení, provzdušňování
2. Jednoduchá úprava, koagulační filtrace, jednostupňové odželezování, resp. odmanganování, či umělá infiltrace a dezinfekce.
3. Dvou a více stupňová úprava čiřením, sorpcí, oxidací, odželezováním, odmanganováním s dekarbonizací, případně využívající dalších fyzikálně chemických mikrobiologických a biologických procesů
4. Nevhodná k úpravě, použitelná pouze k ve výjimečných případech
5. Velmi silně znečištěná²³.

Upravená voda je dále dopravována do akumulárního vodojemu a do rozvodové sítě, kde je uživateli použita ke konzumaci, splachování, sprchování, mytí, zkrátka k běžnému užítku. Znečištěná voda, tzv. odpadní voda, odtéká komunálními stokami do čistíren odpadních vod, aby před byla před vypuštěním do recipientu (jezero, nádrž, moře, vodní tok, který přijímá odpadní vodu²⁴) vyčištěna²⁵. V čistírnách odpadních vod (zkráceně

²⁰ MIGRATION DATA PORTAL. *Urbanization and Migration* [online].

²¹ ČESKÉ VYSOKÉ UČENÍ TECHNICKÉ V PRAZE, Fakulta stavební. *Zásobování vodou* [online].

²² ČISTÁ VODA S.R.O. *Úprava vody* [online].

²³ ČESKÉ VYSOKÉ UČENÍ TECHNICKÉ V PRAZE, Fakulta stavební. *Zásobování vodou* [online].

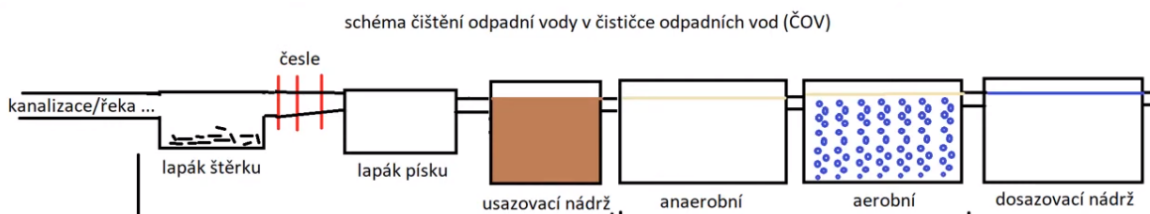
²⁴ POVODÍ MORAVY, S.P. *Vodohospodářský slovník: Recipient* [online].

²⁵ PRAŽSKÉ VODOVODY A KANALIZACE, A.S. *Odpadní voda* [online].

ČOV) dochází k fyzikálním, chemické a biologickým procesům, které odstraňují fyzikální, chemické a biologické nečistoty²⁶, aby nedošlo k zhoršení jakosti povrchových a podzemních vod (pro ilustraci pohled na ČOV viz Obrázek 2). Odpadní voda je možné členit dle původce, a to na splaškové (domácnosti, nemocnice...), městské (směs splaškových a z drobné průmyslové činnosti), průmyslové, zemědělské a dešťové odpadní vody. Čistírny jsou pak přizpůsobeny danému druhu podle typu odpadní vody, protože každá vyžaduje specifický proces. Obecně je proces čištění i několikastupňový (schéma procesu čištění znázorňuje obrázek Obrázek 1):

1. Mechanické čištění
2. Biologické čištění
3. Biologické odstraňování biogenních prvků (sloučenin dusíku a fosforu)
4. Fyzikálně-chemické čištění
5. Následné nakládání s kaly a odpady

Velikost, uspořádání a kapacitu čistírny určuje tzv. počet ekvivalentních obyvatel (zkráceně EO)²⁷, vyjadřující, zjednodušeně řečeno, počet obyvatel, kteří jsou na čistírnu trvale napojeni²⁸. Do procesu mechanickému čištění (sloužící k separaci pevných nerozpuštěných látek, což je podstatná část odpadní vody) řadíme cezení, usazování a zahušťování ve speciálních nádržích, vzplývání, filtrace, flotace a odstředování. Druhým stupněm je biologické čištění odpadních vod od organických látek, které jsou biologicky rozložitelné (odstraňování pomocí mikroorganismů, nejčastěji tzv. aktivací, které se následně oddělují usazováním) a biologicky nerozložitelné. Z aktivačních nádrží, kde proces aktivace probíhá, odtéká odpadní voda do sedimentačních nádrží a odtud pak do recipientu. Se vzniklým kalem je pak dále nakládáno (cca 1–2 % objemu čištěných vod



Zdroj: Youtube

²⁶ SCD SLOVENSKO, S.R.O. *Co se děje při čištění vody v ČOV* [online].

²⁷ PECHÁČEK, Jiří. *Čištění odpadních vod* [online].

²⁸ tamtéž

s koncentrací až 50-80 % původního znečištění) a je s ohledem na životní prostředí, udržitelnost, a ekonomičnost buď recyklován (např. výroba hnojiv) nebo likvidován (např. na skládkách, spalováním, zplynováním). V systému zásobování vodou je stěžejní sledovat čistotu vody, předcházet únikům a monitorovat je, kontrolovat kvalitu splaškové vody, rychle odstraňovat ucpávání odtokových tras a ideálně jim předcházet. I zde moderní technologie hrají významnou roli²⁹.

Vodní rezervoár je definován jako vodní útvar, ať už uměle vytvořená člověkem (přehradou) anebo přírodou (jezera) za účelem udržení vodní zásoby pro zásobování vodou. Tři hlavní typy rezervoárů jsou:

- Přehradu: využívají přírodní scenérii (kopcovité a hornaté území) přehrazením údolí.
- Rezervoáry: při říčních tocích-vznikají odvedením vodního toku z koryt řek.
- Servisní rezervoáry (vodojemy): jsou produktem pouze lidské činnosti, jako betonové jímky nebo cisterny.

Tyto vodní stavby nejsou důležité jen jako zásobárny vody, ale také jako např. generátory zelené elektrické energie (vodní energie produkuje přibližně 16 % celosvětového množství elektřiny), ochrana před povodněmi, pro rekreační účely a akumulátory energie z jiných zdrojů (například solární energie). Využívání vodních děl s sebou nese i jistá rizika, jako decimace vodních živočichů a rostlin a může hrozit také riziko protržení přehradu.³⁰

Toto členění odpovídá i definici dle české legislativy, a to dle zákona č. 254/2001 (tzv. vodní zákon), kde se *vodním útvarem rozumí vymezené soustředění povrchové vody v určitém prostředí, například v jezeru, ve vodní nádrži, či v korytě vodního toku nebo podzemní vody soustředěné v kolektorech tvořené horninovou vrstvou (...), sloužícími pro pitné účely, využívání energetického potenciálu, využívání k plavě nebo plavení dřeva, k chovu ryb či vodní drůbeže, odběr a vypouštění odpadních vod do nich atd.*³¹

²⁹ SIEMENS. *Umělá inteligence pomáhá ve vodárenství*, 2022. Visions [online].

³⁰ EP ENERGY TRADING, A.S., 2021. *Vodní energie: Princip fungování, využití a největší producenti* [online].

³¹ Zákon č. 254/2001 Sb. *Zákon o vodách a o změně některých zákonů (vodní zákon)* [online].

Obrázek 2 Ústřední čistírna odpadních vod Praha



Zdroj: PRAŽSKÉ VODOVODY A KANALIZACE, A.S.

3.1.4 Legislativa v Evropské Unii a České republice, normy

Zajímavostí je, že kořeny právních předpisů na našem území týkající se vody a vodohospodářství sahají až do římského práva, kde samozřejmě upravovaly tehdejší užití a nakládání s vodou, ale položily v podstatě základ pro dnešní „vodní zákon“³².

Česká republika (ČR), jakožto člen Evropské unie (EU), je zavázána v rámci jejích smluv plnit její právní předpisy (nařízení a směrnice EU). Jinak tomu není ani pro oblast ochranu vodních zdrojů a vodního hospodářství, což podtrhává i geografická poloha v ČR: v srdci Evropy a na území, kde se nachází rozvodí hned tří moří (Severního, Baltského a Černého moře)³³.

³² NIETSCHEOVÁ, Jaroslava a Michal KRÁTKÝ. *Vodní právo na území České republiky. Historie a současnost 1. část. Historie – od římského vodního práva po rakouské vodní zákony. Vodní hospodářství* [online].

³³ *Hlavní evropské rozvodí* [online], 2020.

Právní základ (čl.191 až 193 Smlouvy o fungování Evropské unie) pro ochranu a obnovu vod (a to veškerých typů: podzemní, povrchové, brakické³⁴, pobřežní) a požadavky na udržitelnost využívání je členským státům předepsán rámcovou směrnicí o vodě, kterou doplňují konkrétnější směrnice a předpisy, jako směrnice o pitné vodě, o podzemních vodách, o povodích, o vodách ke koupání, o čištění městských odpadních vod, o strategii pro mořské prostředí) a další mezinárodní dohody, a tyto směrnice pak dále konkretizují např. bezpečnostní normy, frekvenci odběru vzorků, pravidla pro monitorování vody určené ke spotřebě, normy a limity při čištění odpadní vody, kontroly likvidace kalů z čistíren, způsoby likvidace kalů – resp. formulují požadavek na nevypouštění kalů do moře. Směrnice pro ochranu podzemních vod například stanoví limitní hodnoty dusičnanů a pesticidů, hodnoty zbylých sledovaných látek si pak stanoví jednotlivé členské státy³⁵.

V České republice je legislativa týkající se vodního hospodářství tvořena zákony, vyhláškami, nařízeními vlády a metodickými pokyny či prováděcími předpisy. Ústředním orgánem státní správy ve vodohospodářství je ústřední vodoprávní úřad (vykonává Ministerstvo zemědělství, Ministerstvo životního prostředí, Ministerstvo obrany. Ministerstvo dopravy a spojů a Ministerstvo zdravotnictví³⁶). Legislativa upravuje právní vztahy při využívání povrchových vod, stanoví sazby a metodiku výpočtu výše penalizací za znečištění odpadních vod atd³⁷. Hlavními předpisy pro oblast ochrany vod povrchových i podzemních jsou (již výše zmíněný) tzv. *vodní zákon* (č. 254/2001 Sb.) a zákon č. 274/2001 Sb. *o vodovodech a kanalizacích pro veřejnou potřebu ve znění pozdějších předpisů*. Dalšími právními předpisy jsou např. zákon č. 500/2004 Sb. *správní řád ve znění pozdějších předpisů*, zákon č.183/2006 Sb. *o územním plánování a stavebním řádu ve znění pozdějších předpisů*³⁸ a zákon č. 258/2000 Sb. *o ochraně veřejného zdraví*³⁹. Vybrané vyhlášky a prováděcí předpisy, např: vyhláška č. 142/2005 Sb., *o plánování v oblasti vod* a Nařízení vlády č. 61/2003 Sb., *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*⁴⁰, vyhláška č.

³⁴ Brakické vody – koncentrace solí na pomezí mořské a sladkovodní, zdroj: EUROCLEAN S. R. O., 2016. *Brakická voda a její odsolování* [online].

³⁵ KURRER, Christian a Nicoleta LIPCANEANU, 2023. *Ochrana vody a vodní hospodářství* [online].

³⁶ MINISTERSTVO PRŮMYSLU A OBCHODU, 2008. *Vodní hospodářství* [online].

³⁷ Tamtéž.

³⁸ MÁLEK, Antonín. *Legislativa ve vodním hospodářství* [online]. s. 30.

³⁹ TUHOVČÁK, Ladislav. *Quo vadis, české vodárenství? Vodní hospodářství* [online].

⁴⁰ MINISTERSTVO PRŮMYSLU A OBCHODU, 2008. *Vodní hospodářství* [online].

252/2004 Sb. nařizující *hygienické požadavky na pitnou a teplou vodu a četnost a rozsah kontroly pitné vody*⁴¹, a další. Snížením dopadu znečištění odpadních vod se dále zabírají významné strategické dokumenty *Státní politika životního prostředí* a *Program na snížení znečištění povrchových vod nebezpečnými závadnými látkami a zvláště nebezpečnými závadnými látkami*⁴².

Požadavky na oblast vodohospodářství upravují české technické normy, především třídy 75 (ČSN 75 0000), a dle zákona č.22/1997 v platném znění není norma obecně závazná. Požadavky na jejich dodržení přesto mohou vyplynout z rozhodnutí správních orgánů, z právních předpisů, ze smluv atd. Převážně jde o třídy:

- 751 – Hydrologie
- 752 – Hydrotechnika
- 754 – Hydromeliorace
- 755 – Vodárenství
- 756 – Kanalizace
- 757 – Jakost vody
- 758 – Charakterizace kalů

České technické normy dále doplňují odvětvové technické normy a další metodické pokyny⁴³.

Do vodohospodářství a příslušné legislativy se promítne i nová směrnice EU platná od ledna 2023, týkající se změn kybernetické bezpečnosti, zkráceně NIS2 (network internet security), a to v druhé půli roku 2024⁴⁴, kdy v ČR vejde směrnice v účinnost. NIS2 nahrazuje již stávající směrnici NIS z roku 2016, podle které byl novelizován zákon č. 181/2014 Sb. tedy zákon o kybernetické bezpečnosti. Obecně jde o nastavení bezpečnostního rámce pro tzv. oblasti základní služby, jejíž poskytování je závislé na informačních a komunikačních technologiích a jejíž narušení by mohlo mít negativní dopad na ekonomiku nebo společnost. Vedle vodohospodářství zde patří oblasti jako energetika, doprava, bankovníctví, chemický průmysl a další⁴⁵. NIS2 a následná novelizace

⁴¹ TUHOVČÁK, Ladislav. *Quo vadis, české vodárenství?* Vodní hospodářství [online].

⁴² MINISTERSTVO PRŮMYSLU A OBCHODU, 2008. *Vodní hospodářství* [online].

⁴³ MINISTERSTVO ZEMĚDĚLSTVÍ. *Technické normy* [online].

⁴⁴ NÁRODNÍ ÚŘAD PRO KYBERNETICKOU A INFORMAČNÍ BEZPEČNOST. *Nová směrnice EU o kybernetické bezpečnosti „NIS2“ a návrh nového zákona o kybernetické bezpečnosti, plánovaná platnost změn v kybernetické bezpečnosti od 2024* [online].

⁴⁵ Zákon č. 181/2014 Sb. *Zákon o kybernetické bezpečnosti a o změně souvisejících zákonů (zákon o kybernetické bezpečnosti)* [online].

zákona přinese rozšíření a prohloubení požadavků na kybernetickou bezpečnost. Vymezení dopadů na konkrétní odvětví v případě narušení bezpečnosti pak stanoví vyhláška č. 437/2017⁴⁶. Podle aktuální legislativy je chápána jako kritická infrastruktura např. ČOV Praha a ČOV Plzeň. Podle NIS2 to budou i další provozy.

Další novinkou je Cyber Resilience Act (CRA), který v rámci Evropské Unie sjednotí požadavky na bezpečnost hardware a software, které mohou být připojeny k internetu. Výrobci a obchodníkům nastaví základní požadavky na kyberbezpečnost. Regulace má přijít v platnost v roce 2024 a výrobci budou poté mít 36 měsíců na to regulaci aplikovat⁴⁷.

Problematika vodohospodářství, zahrnující nakládání s vodou, využívání dešťových vod, úpravy a čištění, je klíčovou součástí plánu pro implementaci ESG (Environment, Social, Governance) programu. Zveřejňování a hodnocení environmentálních, sociálních a správních aspektů vodohospodářských a čistírenských společností přinese řadu výhod. To povede ke zlepšení řízení rizik, posílení vztahů se všemi stakeholdery a podpoře udržitelného rozvoje. Tato oblast se neustále rozvíjí a je důležité sledovat legislativní změny.⁴⁸

3.1.5 Koncept „Smart water“

Aktuální možnosti v oblasti informačních a komunikačních technologií (ICT)

Obrázek 3 Schéma vyčítání provozních stavů z motorů pomocí cloudové aplikace v procesu čištění odpadních vod



Zdroj: Siemens

⁴⁶ NÁRODNÍ ÚŘAD PRO KYBERNETICKOU A INFORMAČNÍ BEZPEČNOST, 2022. *Informace o institutu základní služby: Shrnutí způsobu určení provozovatele základní služby a informačního systému základní služby* [online].

⁴⁷ EUROPEAN COMMISSION. *EU Cyber Resilience Act* [online].

⁴⁸ BŘEZINOVÁ, Hana, 2013. *ESG a veřejný sektor* [online].

dovolují sbírat provozní data z přístrojů a řídicích systémů, které řídí procesy v každém odvětví vodohospodářství sloužící pro jejich analyzování, optimalizaci a modelování (sběr dat v ČOV ilustruje obrázek Obrázek 3 výše). Již se začíná využívat i umělá inteligence a digitální dvojčata. Pro tyto technologie a systémy se používá souhrnný název Chytrá voda (Smart water), nebo také Voda 4.0 (Water 4.0, výzva German Water Partnership z roku 2016), termín, který byl přenesen z iniciativy Průmysl 4.0 (Industry 4.0), a má podtrhnout využití digitalizace a ICT v dané oblasti průmyslu.⁴⁹

Nejjednodušší vysvětlení pojmu Smart water, resp. konceptu Smart obecně, je myšlenka „dosahovat více, při nižších nákladech“. Toho má být dosaženo pomocí konceptů „Chytrého měření“ a „Chytré sítě“. Chytrou sítí je v tomto směru míněno snižování spotřeby elektrické energie její optimální distribuce tak, aby jí bylo vyrobeno přesně tolik, kolik je v síti v reálném čase potřeba, a to bez zbytečných přenosových ztrát (s pomocí ICT při monitorování a řízení sítě) a využíváním tzv. „čistých zdrojů“ energie, tedy vyrobené z obnovitelných zdrojů. V zásadě se jedná o souhrn moderních technologií, které využívají informační a komunikační technologie ICT k přenosu dat získávaných měřeními z přístrojů ve vodovodní síti prostřednictvím internetu nebo internetu věcí (IoT). Tyto technologie jsou zaměřeny na snížení a minimalizaci lidského zásahu do životního prostředí. Z pohledu vodohospodářství tyto technologie pomáhají řídit distribuci a užívání vody, distribuci splaškových vod, nakládání s nimi a jejich čištění, hlídání kvality, či průtoky v umělém či přírodním prostředí. Na celý koncept je s ohledem na velice konzervativní prostředí vodohospodářství nahlíženo jako na radikální, což vysvětluje i poněkud váhající vývoj „chytrých“ systémů pro tuto oblast průmyslu, který ještě, úplně nedocenil nabízející se možnosti moderních technologií.⁵⁰

Sběr informací a dat lze dělit na pět oddělených stupňů, které mohou využívat přístupy jako JCS (systém řízení práce s daty), CRM (systém řízení vztahů se zákazníky prostřednictvím vyhrazeného řízení dat), chytré telefony pro nakládání s daty a GIS (geografický informační systém zpracovávající informace z GPS satelitů), následovně:

1. Monitorování a sběr
2. Přenos a četnost přenosu

⁴⁹ OMOTAYO, Alabi Micheal, Arnesh TELUKDARIE a Nickey Janse van RENSBURG, 2019. *Water 4.0: An Integrated Business Model from an Industry 4.0 Approach* [online].

⁵⁰ OWEN, David A. Lloyd, TABERHAM, Justin, ed., 2018. *Smart Water Technologies and Techniques: Data Capture and Analysis For Sustainable Water Management* [online].

3. Manipulace
4. Interpretace
5. Prezentace⁵¹

Ad 1) Systém by měl umožnit monitorování provozních dat v reálném čase (alespoň do míry, která pro daný proces vyžaduje jejich další zpracování a nakládání s nimi). Například: průtok a tlak v rozvodové síti, teplota, hladina pH, kalnost, či přítomnost chemikálií a kontaminantů.⁵²

Ad 2) Data z různých senzorů a měřidel vodárenské distribuční sítě, stokové odpadní sítě, domácností nebo z povrchových vod jsou shromažďována v datových centrech. Mobilní data jsou využívána tam, kde je to ekonomicky oprávněné, tedy tam, kde jsou náklady na přenos dat nižší, než hodnota informací získaná z těchto dat. Důležité je také zvážit, s jakou frekvencí mají být data do úložišť odesílána a podle toho vybrat odpovídající infrastrukturu.

Ad 3) Platforma pro sběr dat by měla být dostatečně otevřená a flexibilní, aby uživatelům umožňovala snadné přidávání nových IoT zařízení a dalších softwarových i hardwarových komponentů. Tímto způsobem je možné jednoduše rozšiřovat funkčnost a výkon systému podle potřeb a rozvoje technologií. Zajištění otevřenosti platformy či systému je klíčové pro zachování aktuality a efektivity řešení v dlouhodobém horizontu pro integraci dat rozličných zdrojů, a to od spotřeby vody, přes poptávku po ní, dále např. informace o aktuálním počasí a předpovědi, a monitorování externích událostí, které mohou mít vliv na poptávku po vodě⁵³.

Ad 4) Správná interpretace dat je klíčová pro získání hlubšího pochopení informací obsažených v datech a jejich využití k informovanému rozhodování a optimalizaci procesů. Analytické nástroje a algoritmy jsou využívány k identifikaci trendů, anomálií a vzorců v datech, což umožňuje strategické plánování, predikci budoucích událostí a monitorování aktuálního stavu a výkonnosti systémů a procesů. Tato interpretace dat poskytuje základ pro optimalizaci rozhodování v oblastech jako je řízení zásob, plánování údržby a služeb, a to v konečném důsledku přispívá k dosažení strategických cílů organizace a zlepšení její efektivity a konkurenceschopnosti.

⁵¹ OWEN, David A. Lloyd, TABERHAM, Justin, ed., 2018. *Smart Water Technologies and Techniques: Data Capture and Analysis For Sustainable Water Management* [online].

⁵² Tamtéž.

⁵³ Tamtéž.

Ad 5) Veškerá data, která byla sbírána jsou analyzována a prezentována tak, aby s nimi mohl uživatel pracovat co nejjednodušeji a nejefektivněji. Data bývají často zpracována zjednodušeně graficky včetně případných odchylek, které zobrazí upozornění pro uživatele. Ti pak mají možnost se dostat do nižších vrstev, kde je již možno zjistit konkrétní problémy nebo důvody upozornění a nalézt, kde přesně se odchylka v infrastruktuře nachází a co je problém. Na základě získaných dat, a informací z nich, se tedy v této páté fázi mohou uživatelé činit kvalifikovaná rozhodnutí. Jako příklad uvádí literatura domácnosti a regulování spotřeby vody a nákladů, či pěstitele, který rozhoduje o tom, kdy kropit plodiny apod. a čerpá z definice z příspěvku konference průmyslové skupiny SWAN (Smart Water Networks Forum) prvků „chytré“ sítě:

- Fyzická vrstva (včetně průtokoměrů)
- Senzorika a řízení (včetně tzv. „chytrých“ měřidel)
- Sběr a komunikace
- Management dat a zobrazování
- Fúze dat, filtrování a analýza
- Automatické rozhodování a operace

Jaké aplikace se tedy pomocí „smart“ technologií řídí? Lze definovat sedm principů, které se mohou prolínat:⁵⁴

1. Systémy pro distribuci vody – poskytují nástroje pro optimalizaci využívání vodních zdrojů a jejich distribuce, snižují ztráty z tzv. non-revenue water (NRW)⁵⁵, tedy způsobené úniky vody v distribuční síti, díky monitoringu sítě (i vzdálené detekce úniků) a sledování kvalitu vody díky „chytrým“ zařízením pro měření, řízení tlaku, distribuci elektrické energie. Minimalizace spotřeby je založena na principu řízení poptávky.
2. Splaškové systémy – spočívají v minimalizování dopadu nakládání s odpadovými vodami na životní prostředí (jak v komunální, tak i průmyslové sféře, či i z dešťové vody), a to včetně snížení spotřeby využívané energie, s ohledem na ukládání vody a kapacitu čističek (pomocí měření průtoků a condition monitoring⁵⁶).

⁵⁴ OWEN, David A. Lloyd, TABERHAM, Justin, ed., 2018. *Smart Water Technologies and Techniques: Data Capture and Analysis For Sustainable Water Management* [online].

⁵⁵ THE PUBLIC-PRIVATE INFRASTRUCTURE ADVISORY FACILITY. *Non-revenue water (NRW)* [online].

⁵⁶ SIEMENS. *Condition Monitoring* [online].

3. Využívání a rekuperace energie – v sobě nese minimalizaci potřeby elektrické energie od optimalizace spotřeby přes její výrobu při využívání toků vody a splaškové vody, včetně získávání elektrické energie např. z bioodpadů a tepelných čerpadel, fotovoltaiky a větrné energie.⁵⁷
4. „Chytrý ekosystém“ - celé prostředí založené na monitorování dat v reálném čase, udržování integrity vodovodních systémů a prediktivní analýzou pro rychlé zachycení jakýchkoli odchylek ve vodohospodářských aplikacích. Řízení požadovaného množství vody ať už v komunální, průmyslové, nebo zemědělské sféře (např. při zavlažování).
5. Protipovodňová ochrana a snížení dopadů – předcházení povodním a jejich dopadů pomocí sledování dat v reálném čase o srážkách, vodních tocích, vlhkosti půdy, a hladin podzemních vod ve spádových oblastech, tak aby bylo efektivně předcházeno možným katastrofám.
6. Nakládání s vodními zdroji – monitorování zdrojů vody, a to ze všech jejich zdrojů: povrchových, z rezervoárů a podzemních vod a predikce poptávky po vodě, tak, aby byly zajištěny optimální zdroje.
7. Integrované nakládání s vodou – „chytré“ nakládání s vodou má v sobě potenciál vytvořit uzavřené decentralizované systémy (ať už menších měst, městských částí, průmyslových areálů), ve kterých bude účinná úprava, distribuce a rekultivace vodních zdrojů s důrazem na optimální spotřebu elektrické energie.

3.1.6 Sběr dat a jejich využití v biologických procesech

Jak již bylo zmíněno, data, která se z přístrojů v procesech aplikací ve vodárenství sbírají, hrají velkou roli mj. pro vytváření digitálních dvojčat (modelů) procesů a infrastruktury. Tato práce se zaměřuje na digitální dvojčata biologických procesů, ve kterých je právě důležité měření proměnných, a to v takovém množství a rozsahu, jak jen je možné. Přístroje se během posledních let průběžně vyvíjejí, a to doslova od pozorovacích metod, které byly zapisované operátory, k bezdrátovým sensorům, optickému skenování v reálném čase a analýzu z obrazových záznamů. Pro každou proměnnou se používá jiný způsob měření, obecně dělíme proměnné do tří skupin:

⁵⁷ KRŮŽ, Jan. *Odpadní vody jako zdroj energie pro města* [online].

fyzikální, chemické a biologické. Příklady měřených proměnných a způsob měření je přehledně zobrazen v tabulce Tabulka 3-1.⁵⁸

Tabulka 3-1 Proměnné v bioprocesech a příklady měřících technik

Kategorie	Technika	Způsob měření
Fyzikální proměnné	Teplota	Termostat, tepelné čidlo
	Pěna	Odpor
	Viskozita	Viskozimetr
	Tlak	Tlakoměr
Chemické proměnné	Kyslík	Elektrochemický, optický, atd.
	Kysličník uhličitý	Elektrochemický, optický, atd.
	Substráty a metabolity	Biosensory, elektrochemické, spektroskopické
	Hodnota pH	Elektrochemický, optický, atd.
	Těkavé plyny	Biosensory, GC-MS ⁵⁹
Biologické proměnné	Biomasa	Spektroskopický, impedanční, mikroskopie in situ
	Morfologie buněk	Mikroskopie in situ, průtoková cytometrie
	Metabolismus buněk	Měření fluorescence

Zdroj: vlastní zpracování, Herwig, et al. (2021)

Moderní aplikace jsou těmito senzory a měřidly vybaveny a jejich výhodou je odolnost vůči lidské chybě a přesné výsledky. Data dále mohou být získána z databází jako LiMBs⁶⁰ nebo bioTRAK⁶¹.

Nově vznikající technologie a metody doplňují tradiční způsoby měření a stávají se nedílnou součástí při řízení biologických procesů. Dle publikace *Digital Twins: Tools and Concepts for Smart Biomanufacturing* z roku 2021 tyto metody zahrnují také nové nástroje, využívají data a sofistikované výpočetní metody. Mezi ně mj. patří: volně plovoucí bezdrátové sensory (neinvasivní měřiče poskytující data přímo z prostředí dějů, ve kterém dochází k chemickým reakcím), spektroskopické senzory (taktéž neinvasivní

⁵⁸ HERWIG, Christoph, ed., 2021. *Digital Twins: Tools and Concepts for Smart Biomanufacturing* [online].

⁵⁹ Plynová chromatografie s hmotností spektrometrií

⁶⁰ LAWTON, John R., Frances A. MARTINEZ a Christian BURKS, 1989. *Overview of the LiMB database*. In: *Nucleic acids research* [online].

⁶¹ OECD. *BioTrack Product Database* [online].

technologie využívající interakce světla s látkou⁶², soft senzory (software senzor – kombinuje procesní data na vstupu s modely pro predikování výstupu⁶³) a využití chemometrie (využívá matematických a statistických metod pro zpracovávání fyzikálně chemických dat⁶⁴).

Nové technologie mohou být limitovány svojí krátkou působností na trhu, zároveň je u nich vyžadována vysoká míra kvalifikace obsluhy a nezbytná nutnost dále investovat do těchto technologií pro jejich další rozvoj.⁶⁵

Sběr dat probíhá v rozsáhlém množství (ať už strukturovaná, částečně strukturovaná a nestrukturovaná) a kvůli jejich objemu se pro ně zažil termín Big data. Jejich přenos, ukládání a analyzování mají vysoké nároky na zdroje. Big data jsou charakterizována tzv. 4V:

- Volume – objem dat a nároky na jejich ukládání
- Variety – různorodost dat
- Velocity – rychlost zpracování – některá dat je potřeba zpracovávat v reálném čase (např. hodnota pH)
- Value – pomocí algoritmů (SVM nebo ANN) nacházet hodnotná dat (v biologických procesech se tyto algoritmy stále vyvíjejí).⁶⁶

V literatuře je možné se také potkat s definicí pátého V:

- Veracity – důraz na věrohodnost dat, které pocházejí z různých zdrojů⁶⁷

V souvislosti s ukládáním dat se v odborné literatuře používá členění na datová jezera, datové sklady a databáze. Datová jezera, datové sklady a databáze jsou klíčové prvky datového hospodářství. Datová jezera umožňují ukládat velké objemy dat v různých formátech a zdrojích. Jsou navržena tak, aby byla schopna zpracovávat a analyzovat nestrukturovaná a strukturovaná data. Zatímco datové sklady slouží k integraci dat do jednotného úložiště, datové sklady jsou navrženy tak, aby poskytovaly konzistentní a spolehlivé datové zdroje pro analýzu a reporting. Databáze jsou softwarem, který umožňuje ukládat, organizovat a manipulovat s daty. Je nutné dbát na to, aby byla sbírána

⁶² OPTIXS, S. R. O. *Spektroskopie* [online].

⁶³ BRUNNER, Vincent, Manuel SIEGL, Dominik GEIER a Thomas BECKER, 2021. *Challenges in the Development of Soft Sensors for Bioprocesses: A Critical Review. Frontiers in Bioengineering and Biotechnology* [online].

⁶⁴ PLEYER, Olga. *Využití chemometrie při analýze paliv* [online]. 2019-07-30 [cit. 2023-10-22].

⁶⁵ HERWIG, Christoph, ed., 2021. *Digital Twins: Tools and Concepts for Smart Biomanufacturing* [online].

⁶⁶ Digital Twins : Tools and Concepts for Smart Biomanufacturing,, 2021

⁶⁷ SMOLOVÁ, Bára, 2018. *Big Data - charakteristika a zpracování nestrukturovaných dat* [online].

data, která jsou důležitá a se kterými má smysl dále pracovat. Existuje několik typů databází, které se liší v architektuře, organizaci dat a způsobu přístupu. Mezi nejběžnější patří relační databáze, které ukládají data do tabulek s řádky a sloupci propojenými pomocí klíčů a používají SQL pro manipulaci s daty. Dalšími typy jsou nerelační databáze, grafové databáze, in-memory databáze, databáze časových řad a objektově-orientované databáze. Každý typ databáze má své specifické vlastnosti a vhodné použití v závislosti na potřebách a požadavcích aplikace nebo projektu.⁶⁸

V článku *Mining bioprocess data: opportunities and challenges* je možno data dále členit podle frekvence jejich získávání, a to na online (kontinuální měření) a offline (periodické měření). Parametry jako koncentrace, či index kvality může být dostupný pouze v určitém časovém úseku, a tedy mohou být měřitelné periodicky, jiné vyžadují kontinuální měření (např. hladina pH, teplota). Kromě toho mohou být některá procesní data také pouze binární (zapnutí a vypnutí čerpadla). Také některá procesní data chemických procesů mohou být diskrétní. V biologických procesech se setkávají různé typy dat a v této souvislosti literatura zdůrazňuje jejich heterogenitu.⁶⁹

K vyhodnocování těchto dat se používají statistické metody jako SNR (Signal-to-noise, poměr signálu k šumu), SVM (Support vector machines, metoda podpůrných vektorů) a shlukové analýze množin. Velký objem dat s sebou nese také míru nejistoty, k její odstranění je potřeba znalost procesů a nejčastěji dva hlavní statistické přístupy: frekventistické a bayesovské. Pro vytvoření efektivního digitálního dvojčete biologického procesu je tedy nutné velké množství kvalitních dat, která jsou tříděna dle důležitosti pro proces a následnou digitalizaci.⁷⁰

3.1.7 Digitální dvojčata

Koncept je širěji znám od roku 2002, kdy zazněl na Michiganské univerzitě na přednášce pro průmysl v prezentaci Dr. Grievese nazvané *Conceptual Ideal for Product Lifecycle Management*, kde byl pohled na fyzický model produktu rozšířen o model virtuální, který obsahoval informace o reálném produktu. Model se sestával z prvků reálného prostředí, virtuálního prostředí a jejich propojení, pro tok dat a informací

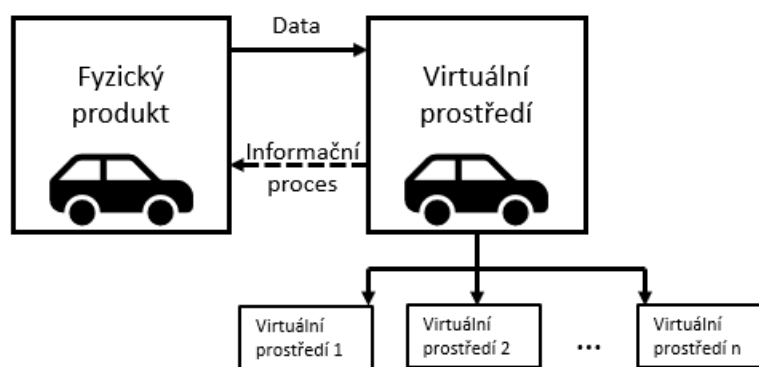
⁶⁸ HERWIG, Christoph, ed., 2021. *Digital Twins: Tools and Concepts for Smart Biomanufacturing* [online].

⁶⁹ CHARANIYA, Salim, Wei-Shou HU a George KARYPIS, 2008. *Mining bioprocess data: opportunities and challenges* [online].

⁷⁰ HERWIG, Christoph, ed., 2021. *Digital Twins: Applications to the Design and Optimization of Bioprocesses* [online].

z virtuálního prostředí do reálného prostředí, či do virtuálního sub-prostředí⁷¹ (model konceptu viz Obrázek 4), zdroje uvádí, že původ využívání samotné technologie sahá až do šedesátých let dvacátého století, a to v NASA při sestavování modelů pro vesmírné programy. Jako příklad uvádí literatura využití digitálního dvojčete při modelování podmínek na palubě při záchraně posádky Apolla 13 v dubnu 1970. Samotný pojem „Digital twin“, pak údajně poprvé zazněl v roce 1998 při tvorbě digitální kopie hlasu herce Alana Aldy v seriálu *Art of Science*^{72,73}.

Obrázek 4 Rozšíření produktu o virtuální model



Zdroj: vlastní zpracování, Grieves (2002)

Použitím názvu životní cyklus výrobku (Product Lifecycle Management, užívá se zkratka PLM, a to i v české literatuře) podtrhl Grieves propojenost fyzického produktu a jeho virtuálního modelu po čas celého životního cyklu produktu, od jeho návrhu, přes výrobu, provoz (servis produktu), po jeho ukončení a útlum výroby (držení a výroba náhradních dílů)⁷⁴. Na počátku (v roce 2002) byl tento model nazýván Grievesem *Mirrored Spaces Model*, později v roce 2006, pak Grieves používá název *Information Mirroring Model*, poprvé se sousloví Digital Twin v souvislosti s technologiemi popisující integrovanou multi-fyzikální, vícestupňovou pravděpodobnostní simulaci vozu nebo jiného zařízení, která využívá nejlepší fyzikální modely, data ze senzorů, historická data o

⁷¹ GRIEVES, Michael a John VICKERS, 2016. *Excerpted based on: Trans-Disciplinary Perspectives on System Complexity – All rights reserved Digital Twin: Mitigating Unpredictable, Undesirable Emergent Behavior in Complex Systems* [online].

⁷² MISKINIS, Carlos, 2019. *The history and creation of the digital twin concept* [online].

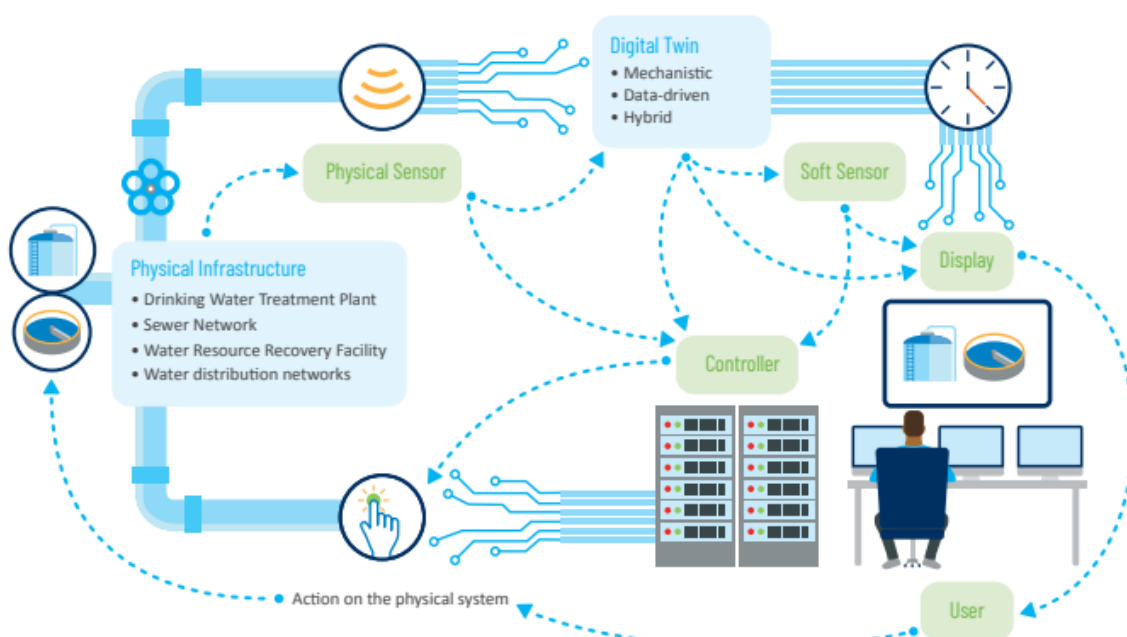
⁷³ The Art of Science: díl 804. 1998. *The Chedd-Angier Production Company*.

⁷⁴ ONEINDUSTRY. PLM - *Product Lifecycle Management - Řízení životního cyklu výrobku* [online].

provozu, atd., k vyobrazení jeho skutečného dvojčete objevuje v dokumentech NASA z roku 2010⁷⁵.

Model informační smyčky z fyzického do digitálního a zpět do fyzického světa je využíván také při tvorbě digitálních dvojčat biologických procesů a potažmo v celém procesním průmyslu. Autoři se shodují, že základními pilíři k tvorbě digitálních dvojčat data a modely.

Obrázek 5 Základní schéma digitálního dvojčete čistírny odpadních vod



Zdroj: Valverde-Peréz (2021)

V souvislosti s digitálními dvojčaty uvádí také pojem *Digital shadows* (digitální stíny), pojem, který dle jeho textu není ještě plně definován, ale panuje všeobecná shoda na definici ústavu Fraunhofer Austria Research GmbH, jakožto jistém „jednosměrném“ odrazu reality v digitálním prostředí, na rozdíl od digitálního dvojčete, které je schopno dvousměrného toku dat (z reality do digitálního prostředí a zpět), přičemž je digitální dvojčete je nadřazenější digitálnímu stínu díky své obsáhlosti. Internetový článek Raguthana z roku 2019 pak dále slovníček pojmů rozšiřuje o termíny Digital Threads (volně

⁷⁵ SHAFTO, Mike, Mike CONROY, Rich DOYLE, Ed GLAESSGEN, Chris KEMP, Jacqueline LEMOIGNE a Lui WANG, 2010. *DRAFT Modeling, Simulation, Information Technology and Processing Roadmap* [online].

přeloženo jako digitální vlákna) a Digital Ghosts (digitální duchové). Ve svém článku pro pojem Digital Threads cituje definici Deloitte, jako "streaming dat", tzv. bežešvý proud dat, který je přenášen nebo zpracováván bez přerušení. Tento proud je dat je generován a přenášen neustále, aniž by byl uložen do tradičního úložiště dat. Místo toho je zpracováván a analyzován v reálném čase, anebo v krátkých časových intervalech. V kontextu PLM se týká životního cyklu produktu. Zahrnuje veškerá data generovaná v průběhu vývoje, výroby, provozu a údržby produktu. Tento přístup umožňuje lepší rozhodování, optimalizaci procesů a efektivnější řízení s cílem maximalizovat hodnotu produktů. S konceptem digitálních duchů, podle Raguthana, přichází společnost General Electric (GE). Digitální duchové slouží jako bezpečnostní pojistka proti kybernetickým útokům. Digitální dvojčata jsou vyvíjena pro kritické procesní operace, při kterých se učí „normální“ chování infrastruktury. Při kybernetickém útoku může dojít k situaci, kdy se útočník nabourá do systému a změní příchozí data ze sensorů, což bude vést k chybnému vyhodnocování, chování dvojčat a celé technologie. Digitální duch dokáže anomálie nahradit očekávanými výsledky, a tak se vyhnout vážným dopadům na infrastrukturu a zároveň může údržba pracovat na napravování poruch, aniž by narušila proces výroby.⁷⁶

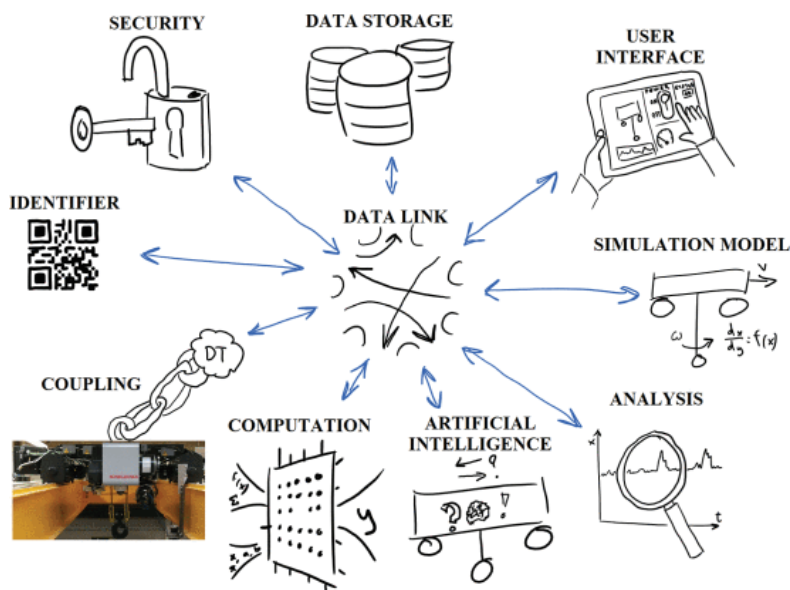
Na práci Grievse a Vickerse z roku 2017 a dalších literárních zdrojích vystavěli o dva roky později Autiosalo et al.⁷⁷ definici průmyslového Digitálního dvojčete a definují jej jako soubor následujících prvků (Obrázek 6):

1. Datový spoj
2. Rozhraní fyzického a digitálního prostředí
3. Identifikátor
4. Bezpečnost
5. Datové úložiště
6. Uživatelské rozhraní
7. Simulace
8. Analýza
9. Umělá inteligence
10. Výpočetní proces

⁷⁶ RAGHUNATHAN, Vijay, 2019. *Digital Twins, Digital Threads, Digital Ghosts and Digital Shadows* [online].

⁷⁷ AUTIOSALO, Juuso, Jari VEPSÄLÄINEN, Raine VIITALA a Kari TAMMI, 2020. *A Feature-Based Framework for Structuring Industrial Digital Twins* [online].

Obrázek 6 Prvky digitálního dvojčete



Zdroj: Autiosalo (2020)

Ad. 1. Datový spoj (*Datalink*)– autoři definují na základě literárních zdrojů datový spoj jako uzel pro spojení všech dalších rysů digitálního dvojčete s fyzickým dvojčetem. Nachází se mezi DNS (Domain Name System) a komunikačními protokoly (OPC UA, MQTT, REST, SOAP, a O-MI). Základním předpokladem datového spoje je kompatibilita s užívanými internetovými prohlížeči, což má umožnit dostupnější využití digitálních dvojčat. Datový spoj využívá hvězdicové topologie, kde je přístup k internetu zprostředkován „agentem“ uprostřed. Propojení digitálního a fyzického světa pak umožňuje rozhraní.

Ad. 2. Rozhraní fyzického a digitální prostředí (*Coupling*) – obousměrná „spojka“ mezi digitálním a fyzickým světem, přes kterou proudí data z reálného světa do světa digitálního (a naopak) díky identifikátoru.

Ad. 3. Identifikátor (*Identifier*) – je-li datový tok mezi digitálním a fyzickým produktem umožněn prostřednictvím jakési „spojky“ (viz. Ad.2), k průchodu oběma směry je potřeba identifikátor, který autoři také dělí na fyzický a digitální (v závislosti na tom, ve kterém „světě“ se nachází). To umožňuje například technologie RFID (Radio-frequency identification), která stála u základu IoT technologie. Alternativou digitálního identifikátoru je URI (uniform resource identifier), nadřazená kategorie URL adres (běžně

používá například DOI a Arxiv, či další poskytovatelé). Digitální identifikátor by měl splňovat:

- a) unikátnost na dostatečné úrovni, a to úrovni ideálně globální,
- b) umožňovat přístupnost k digitálnímu dvojčeti kdekoli ze sítě digitálního dvojčete, optimálně z internetu.

Ad. 4. Bezpečnost (*Security*) – význam počítačové a kybernetické bezpečnosti narůstá nejen s rostoucí komplexností a propojeností informačních systémů, ale také s měnícím se prostředím a možnostmi, které informační systémy přinášejí. S příchodem pandemie Covid-19 koncem roku 2019 posílil a zrychlil trend digitalizace společnosti a s ním nároky na kybernetickou bezpečnost⁷⁸. Oproti klasické počítačové bezpečnosti, jejichž základní koncepty přetrvávají od vzniku počítačových technologií, je kybernetická bezpečnost pojem relativně nedávny, který se soustředí právě na kyberprostor. Autoři⁷⁹ ke členění bezpečnostních rizik v kyberprostoru používá práci Choua et al. z roku 1999⁸⁰:

- a) základní rizika (předtím, než je bezpečnost v organizaci zavedena⁸¹)
- b) technologická a procedurální rizika plynoucí z nedostatků technologie
- c) neautorizované prolomení bezpečnostních systémů
- d) legislativní problematika

Pro bezpečnost digitálních dvojčat se v literatuře zažívá pojem kyber-fyzická bezpečnost (Cyber-physical security – CPS), jakožto nový předmět zkoumání a expertízy, ve kterém zatím ještě chybí standardy a směrnice.

Ad. 5. Datové úložiště (*Data Storage*) – sběru a podobě dat se věnuje kapitola 3.1.6 *Sběr dat a jejich využití v biologických procesech* výše. Nejdříve Autiosalo et al. dělí data na maloobjemová dat (existuje nepřehledné množství ukládání dat menších objemů) a rozsáhlá velkoobjemová data, které je nutné ukládat do specifických databází, která dělí dle způsobu jejich ukládání na základě bloků, souborů a objektů. U všech způsobů však je podmínkou rychlý a jednoduchý přístup k datům a zároveň schopnost komunikovat prostřednictvím datového spoje. Dále člení data na data nižší a vyšší úrovně, přičemž druhou skupinu na SQL a tzv. ne-SQL ukládání.

⁷⁸ NABE, Cedric. *Impact of COVID-19 on Cybersecurity* [online].

⁷⁹ AUTIOSALO, Juuso, Jari VEPSÄLÄINEN, Raine VIITALA a Kari TAMMI, 2020. *A Feature-Based Framework for Structuring Industrial Digital Twins* [online].

⁸⁰ CHOU, David C., David C. YEN, Binshan LIN a Philip HONG-LAM CHENG, 1999. *Cyberspace security management. Industrial Management & Data Systems* [online].

⁸¹ KOST, Edward, 2023. *What is Inherent Risk? You Could Be at Risk of a Data Breach* [online].

Dále je možno pohled na databáze členit z hlediska umístění úložiště. Takto bychom rozdělili data na uchovávaná tzv. „na okraji“ sítě zpravidla uvnitř továrny či čistíčky (Edge) a v úložišti (Cloud)⁸². Laštovková popisuje výhody tzv. Edge computingu oproti Cloud computingu např. snížení latence (zpomalení datového toku) infrastruktury, zrychlení výpočetních operací, bezpečnost dat na úkor nároků na lokální hardware a procesory. Výhodou Cloudu je možnost sdílení dat velkému množství uživatelů současně, snížení rizika jejich ztráty, úspora na nákladech a údržbu vlastních severů, případně využívání softwarů jako službu (SaaS – Software as a service) a tím také snížení nákladů. Setkáváme se zde s dalším pojmem, a to Fog computing. Zatímco Cloud computing je centralizovaný model, kde jsou data ukládána, zpracovávána a přístupována z vzdáleného datového centra, fog computing je decentralizovaný model, kde jsou data zpracovávána blíže k okrajovým zařízením.⁸³

Ad. 6. Uživatelské rozhraní (*User interface*) – umožňuje uživateli efektivně interagovat s digitálním dvojčtem. Zde je potřeba, zmínit, že v rámci digitálního dvojčete budou jeho různí uživatelé vyžadovat různá data a vizualizace modelu. Například projektant bude pracovat s návrhovou fází dvojčete, designér s 3D modelem, údržba s vizualizací stavů výrobní infrastruktury k predikci údržby a k plánování odstávek či provádět servis za použití rozšířené reality (AR – Augmented reality), výzkumní pracovníci modelovat scénáře vývoje, vyhodnocovat je a upravovat produkt či proces. Požadavky na uživatelské rozhraní se různí a je tedy kladen důraz na jednoduchou ovladatelnost a transparentnost⁸⁴. Proto kupříkladu nelze považovat za model digitálního dvojčete SCADA (Supervisory Control And Data Acquisition) systém, který sice ukládá, vizualizuje a umožňuje ovládání skrze model, neumožňuje však simulaci a pokročilejší analytiku a obvykle vyžaduje vysokou míru expertní znalosti.⁸⁵

Ad. 7. Simulace (*Simulation*) – podle Autiosala et al. je simulace používána napříč odvětvími a simulačního modelu se využívá k popisu vizuální, grafické, resp. číselné podstaty modelovaného objektu (fyzického produktu, systému, procesu apod.) a to až už v statickém nebo dynamickém formě. Obecně je úkolem modelu je generovat data s jejichž

⁸² DEY, Arin, 2020. *A Primer on Edge Computing* [online].

⁸³ LAŠTOVKOVÁ, Lucie, 2021. *Edge computing versus cloud computing* [online].

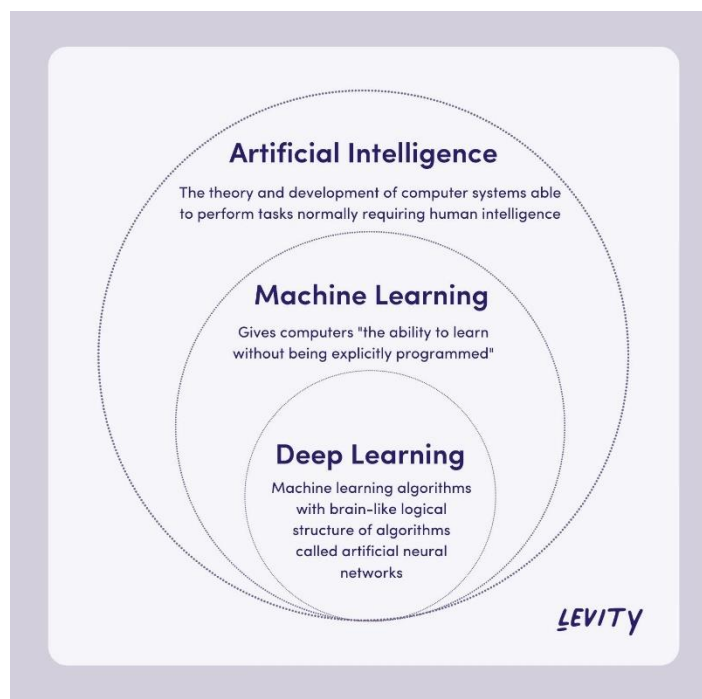
⁸⁴ KRŽÍŽ, Lukáš, 2021. *Digitální dvojčata závisí na kvalitě dat. Hospodářské noviny* [online].

⁸⁵ PEDERSEN, Agnete N., Morten BORUP, Annette BRINK-KJÆR, Lasse E. CHRISTIANSEN a Peter S. MIKKELSEN, 2021. *Living and Prototyping Digital Twins for Urban Water Systems: Towards Multi-Purpose Value Creation Using Models and Sensors* [online].

pomocí lze odhadnout chování reálné předlohy modelu v čase a za optimální náklady. Simulační modely mohou být použity při virtuálním zprovoznění či vytvoření virtuálních prototypů⁸⁶. Simulovat však je možné i fyzikální a chemické procesy⁸⁷ či celý výrobní systém⁸⁸. Současně bývá často pojem simulace nesprávně zaměňován za digitální dvojče. Dle *The Welding Institute* (TWI Ltd) jsou klíčovými rozdíly s následujícími příklady⁸⁹:

- a) Statičnost vs. dynamičnost: Modely a simulace vytvořené pomocí programů CAD-CAE (Computer Aided Design – Engineering) modelují produkt nebo proces pro testovací účely. Takovýto model je nicméně statický a neměnný, pokud nezadá-li projektant další vstupy. Digitální dvojče oproti tomu také začíná jako simulační model, nicméně sbírá data ze senzorů z průběhu svého životního cyklu a díky nim dokáže vlastní model upravovat a tím nabízí více aktivní (dynamickou) simulaci, která není ve statickém modelu možná.
- b) Možné vs. aktuální: Oproti simulaci, která zobrazuje možné teoretické scénáře

Obrázek 7 Rozdíl AI, ML, DL



Zdroj: Wolfewicz (2023)

⁸⁶ AUTIOSALO, Juuso, Jari VEPSÄLÄINEN, Raine VIITALA a Kari TAMMI, 2020. *A Feature-Based Framework for Structuring Industrial Digital Twins* [online].

⁸⁷ SIEMENS. *Simulation & Test for Process Industry Applications* [online].

⁸⁸ SIEMENS. *Manufacturing Simulation* [online].

⁸⁹ TWI GLOBAL. *Simulation vs Digital twin (What is the difference between them?)* [online].

v budoucnu (zjednodušeně řečeno: „co by so mohlo stát, kdyby...“), zobrazuje digitální dvojče aktuální stav. Projektant je v reálném čase schopen na základě aktuálních informací měnit i vstupy produktu či procesu a automaticky se tak mění výrobní proces, požadavky na výrobu apod.

- c) Rozsah využití: Dalším zásadním rozdílem je v neposlední řadě rozsah digitálního dvojčete. Od CAD-CAE simulací očekáváme testování scénářů, jejichž výstupy budou využity např. pro další design produktu, zatímco přesah digitální dvojčete je v tom, že prostupuje každou fází životního cyklu produktu a jeho výstupy neslouží zdaleka pro samotný design produktu, ale na základě jeho dat jsou kupříkladu upravovány procesy výroby či nasbírané podklady dále slouží pro širší manažerské rozhodování.

Ad. 8. Analýza (*Analysis*) – na digitální dvojče lze nahlížet doslova jako na nástroj, na kterém lze provádět analýzy dat (pocházející ať už z reálného předobrazu dvojčete nebo z jeho simulací). Používá se např. korelační analýza, či analýza citlivosti, a její výstupy jsou k dispozici uživateli nebo umělé inteligenci pro další rozhodování.⁹⁰

Ad. 9. Umělá inteligence (*Artificial intelligence – AI*) – definice umělé inteligence se mírně liší napříč autory, což je pravděpodobně dáno faktem, že i samotný pojem inteligence je i u člověka abstraktní, subjektivní a těžko definovatelný⁹¹. Pro účely práce využijeme definici Evropské komise, jež byla použita ve zprávě *A definition of AI: Main Capabilities and Disciplines* z roku 2019, kterou vydala nezávislá expertní skupina (oficiální název skupiny zní *High-level Expert Group on Artificial Intelligence*, v dokumentech se používá zkratka AI HLEG) založená právě EK. Definice zní: „*Umělá inteligence odkazuje na systém, který vykazuje inteligentní chování analýzou vlastního prostředí a reakcemi na něj, a to s jistým stupněm autonomie, aby dosáhl specifických cílů. Systémy založené na umělé inteligenci mohou být čistě softwarové, reagující ve virtuálním světě (např. hlasoví asistenti, software analyzující fotografie, vyhledávače, systémy pro rozpoznávání hlasu či tváří), nebo může být zabudována do hardwarových zařízení (např. so fistikovaní roboti, autonomní auta, drony nebo aplikace IoT).*“⁹²

⁹⁰ AUTIOSALO, Juuso, Jari VEPSÄLÄINEN, Raine VIITALA a Kari TAMMI, 2020. *A Feature-Based Framework for Structuring Industrial Digital Twins* [online].

⁹¹ SAMOILI, Sofia, Montserrat LOPEZ COBO, Emilia GOMEZ GUTIERREZ, Giuditta DE PRATO a Fernando MARTINEZ-PLUMED, 2020. *AI WATCH. Defining Artificial Intelligence* [online].

⁹² EUROPEAN COMMISSION, 2018. *A definition of Artificial Intelligence: main capabilities and scientific disciplines* [online].

Součástí umělé inteligence je strojové učení (*machine learning*), umělé neuronové sítě (*artificial neural networks*), hluboké učení (*deep learning*) a lze na ně nahlížet jako na podmnožiny umělé inteligence (viz Obrázek 7). Strojové učení je obecný termín, který je používán pro učení softwaru z dat. Jde v podstatě o průnik počítačové technologie a statistiky, kdy algoritmy plní specifické úkoly, aniž by byly pro tento účel konkrétně naprogramovány, ale rozpoznávají vzorce z dat a vytvářejí predikce pro nově příchozí data. Podle typu dat pro algoritmy může na tento proces dohlížet buď člověk, nebo jsou vykonávány autonomně. Tradiční algoritmus pro strojové učení může být např. lineární regresní model. Pozornost na sebe poslední dobou strhává pojem hluboké učení. Jedná se o sofistikovanou matematicky komplexní metodu, která byla vyvinuta na bázi strojového učení. Hluboké učení však analyzuje data v logické struktuře podobné výsledku lidského úsudku, a to jak s dohledem, tak bez dohledu, lidského pracovníka. K tomu využívá algoritmy strukturované do vrstev zvané umělé neuronové sítě (*artificial neural networks – ANN*) po vzoru neuronových sítí lidského mozku.⁹³

Ad. 10. Výpočetní proces (*Computation*) –řeší výpočetní proces matematické operace, díky kterým generuje systém data. Umístění výpočetní kapacity závisí na čase potřebném ke zpracování výsledných operací, či objemu zpracovávaných dat, jejich důležitosti a také na struktuře či požadavku na jejich zobrazování. Výpočetní proces tak můžeme být prováděn lokálně (*Edge computing*) nebo vzdáleně (Cloud computing), či hybridně, jak již bylo nastíněno výše.⁹⁴

Tolik tedy vyčerpávající souhrn rysů digitálního dvojčete pro jeho definici podle *Autiosala et al. (2019)*. *Wright a Davidson* ve sborníku *Advanced Modeling and Simulation in Engineering Sciences* z roku 2020 se pokoušejí definici zjednodušit do definice o třech hlavních bodech a čerpají při tom z prací *Westa a Blackburna* z roku 2017⁹⁵ a *Dreisbacha* z roku 2018⁹⁶: *Digitální dvojče objektu obsahuje jeho model, rozvíjející se sadu dat ve vztahu k objektu a způsoby dynamického aktualizování těchto dat či samotného objektu v závislosti na získaných datech.*⁹⁷ Autoři také kladou důraz na vysvětlení právě dynamiky

⁹³ WOLFEWICZ, Arne, 2023. *Deep Learning vs. Machine Learning – What's The Difference?* [online].

⁹⁴ AUTIOSALO, Juuso, Jari VEPSÄLÄINEN, Raine VIITALA a Kari TAMMI, 2020. *A Feature-Based Framework for Structuring Industrial Digital Twins* [online].

⁹⁵ WEST, Timothy D. a Mark BLACKBURN. *Is Digital Thread/Digital Twin Affordable? A Systemic Assessment of the Cost of DoD's Latest Manhattan Project* [online].

⁹⁶ DE SOUZA, Althea, 2018. *Digital Twin-Looking Behind the Buzzwords* [online].

⁹⁷ WRIGHT, Louise a Stuart DAVIDSON, 2020. *How to tell the difference between a model and a digital twin* [online].

a zpětné vazby dat a jejich využívání pro úpravu a rozvoj digitálního dvojčete v kontrastu s klasickým počítačovým modelem objektu.

A konečně, pro oblast vodohospodářství, se o definici hledá Pedersen et al. ve svém článku v časopise *Water* z roku 2021, který shrnuje, rozšiřuje a definuje pojem pro tuto konkrétní oblast, slovy: „*Systematická virtuální reprezentace a dynamika systému složená z rysů definovaných Autiosaliem et al. (2019), které jsou organizované v hvězdicové struktuře.*“ Přičemž klade důraz na význam prvku pro propojení fyzického a digitálního světa, přes který proudí obousměrně data a dochází tak v obou rovinách ke změnám modelu v reálném čase pomocí analýzy a odráží tak realitu v co nejvyšší míře (*coupling* – viz. výše). Díky tomuto prvku a vlastnostem dvojčete tak rozšiřují pojem na „*živé*“ *digitální dvojče (a living DT)*, a to i ve vodohospodářství.⁹⁸ Pro účel této práce bude nicméně používán pouze termín digitální dvojče.

3.2 Reálná nasazení digitálních dvojčat

Doposud byla tato práce zaměřena na vysvětlení pojmů a základním principům. Na následujících řádcích budou uvedeny příklady aplikací z prostředí vodohospodářství, na kterých se již digitální dvojče používá nebo je v pokročilém vývoji. Tato sada příkladů byla vybrána na základě analýzy článků z odborných časopisů s cílem ilustrovat současný stav použití digitální transformace a její přidanou hodnotu a přínos pro uživatele. Tím se potvrdí, že digitální revoluce postupuje i do odvětví vodárenství. Již i v České republice jsou zaznamenány první iniciativy a projekty implementace těchto technologií. ČR se tak řadí vedle Singapuru⁹⁹, Portugalska (Porto)¹⁰⁰, Austrálie (Melbourne)¹⁰¹ a v neposlední řadě také například ke Kanadě (Toronto)¹⁰², k zemím, které již transformují vodohospodářské sítě a technologii digitálních dvojčete využívají.

Digitální dvojčata aktuálně nacházejí svá uplatnění při plánování investic skrze analýzy budoucích scénářů založených na modelech z historických dat, jako podklad pro strategické rozhodování založený na datech, modelech a simulacích, při školení operátorů,

⁹⁸ PEDERSEN, Agnete N., Morten BORUP, Annette BRINK-KJÆR, Lasse E. CHRISTIANSEN a Peter S. MIKKELSEN, 2021. *Living and Prototyping Digital Twins for Urban Water Systems: Towards Multi-Purpose Value Creation Using Models and Sensors* [online].

⁹⁹ JACOBS, 2020. *Jacobs Creating First Digital Twin of PUB's Changi Water Reclamation Plant in Singapore* [online].

¹⁰⁰ ELLIOT, Teresa, 2021. *Digital advancements in water* [online].

¹⁰¹ NADEL, Jeremy, 2023. *Melbourne Water predicting recycled water quality two days in advance* [online].

¹⁰² WSP. *Fast Digital Twin of Water Systems for City of Toronto and York Region* [online].

optimalizaci úspor energií, zdrojů a kvality, údržbě a v neposlední řadě také pro epidemiologické rozbory odpadních vod.

3.2.1 Švédský příklad kanalizace 4.0

V publikaci vydané Mezinárodní asociací pro vodu (*the International Water Association* zkráceně IWA) nazvané *Digital Water: Operational digital twins in the urban water sector: case studies*, která vyšla v roce 2021 z per autorů Valverde-Peréz et al., jsou popsány dvě případové studie využití DT z oblasti vodohospodářství – pro kanalizační sítě a v čističce odpadních vod¹⁰³. Pro názornost použití DT byla vybrána první případová studie pro kanalizační síť.

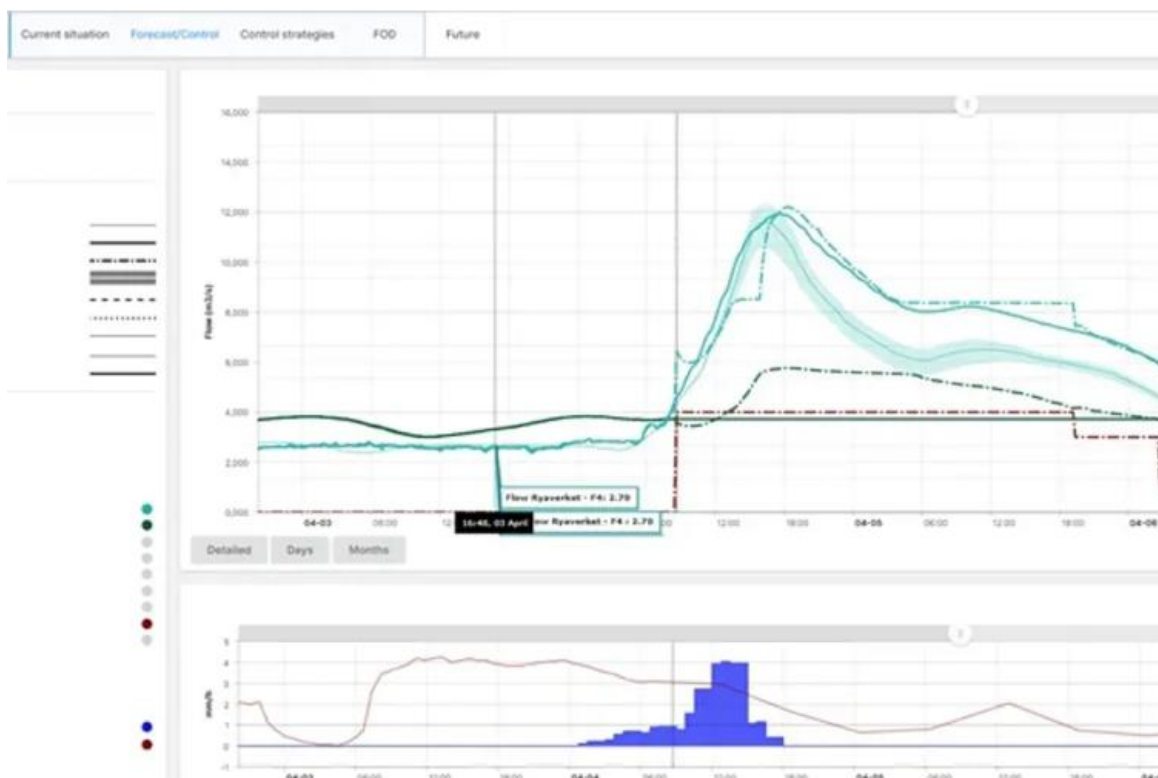
Jak bylo zmíněno v úvodu této práce, mezi aktuální témata, kterým lidstvo čelí, a na která se musí do budoucna soustředit, patří změna klimatu a s ním intenzivní přivalové deště, nárůst hustoty populace městských sídel a jejich rozšiřující se výstavba, tání ledovců a zvyšování mořských hladin. Všechny tyto vlivy vytváří tlak na zastarávající infrastrukturu vodohospodářských sítí¹⁰⁴. Tento tlak pocítují převážně vlastníci a provozovatelé infrastruktury. Nepředvídatelné srážky vedou k naplnění sběrných nádrží z důvodu přetížení čerpadel systému a následnému přetékání přepady nevyčištěné vody kombinovaných kanalizačních systémů (anglický termín je *combined sewer overflow*, v odborné zahraniční literatuře se používá zkratka CSO) do okolního životního prostředí. Kromě dopadů na životní prostředí a zdraví populace (hrozí například šíření bakterií) s sebou tento jev nese zvýšení nákladů na čištění vody a možné záplavy.

¹⁰³ VALVERDE-PÉREZ, Borja, Bruce JOHNSON, Christoffer WÄRFF, Douglas LUMLEY, Elena TORFS, Ingmar NOPENS a Lloyd TOWNLEY, 2021. *Digital Water: Operational digital twins in the urban water sector* [online].

¹⁰⁴ DHI. *Future City Flow* [online].

V roce 2018 odstartoval pilotní projekt pro vlastníka a provozovatele městské kanalizační sítě v Göteborgu, druhém největším městě Švédska¹⁰⁵, společnost *Gryaab AB*, ve spolupráci se společností *Future City Flow*¹⁰⁶. V Göteborgu je přibližně 40 % kombinovaných stokových systémů (tento systém stokových sítí bývá navrhován tam, kde

Obrázek 8 Předpověď srážek využívající deset různých meteorologických modelů, míru nejistoty zobrazuje zelené pásmo



Zdroj: DHI Group

je vhodnější větší část obydlené plochy odvodňovat jednotnou stokovou sítí a v okrajových částech pak soustavou oddílnou pro dešťové a kanalizační vody zvlášť¹⁰⁷). To vede k významným rozdílům v zatížení hydraulického systému čistírny odpadních vod, což je zvláště patrné při přetékání stokové vody. Tato skutečnost a potřeba snížení dopadů intenzivních dešťových srážek byly hlavními tématy projektu¹⁰⁸. V letech 2019 až 2021 byl

¹⁰⁵ CKLUB S.R.O. *Göteborg: průvodce* [online].

¹⁰⁶ DHI. *Urban Water Intelligence* [online].

¹⁰⁷ HÁNKOVÁ, D., 2005. *Kanalizační stoky* [online].

¹⁰⁸ GUIDA, Samuela, 2021. *DTHub: Future City Flow in Gothenburg, Sweden* [online].

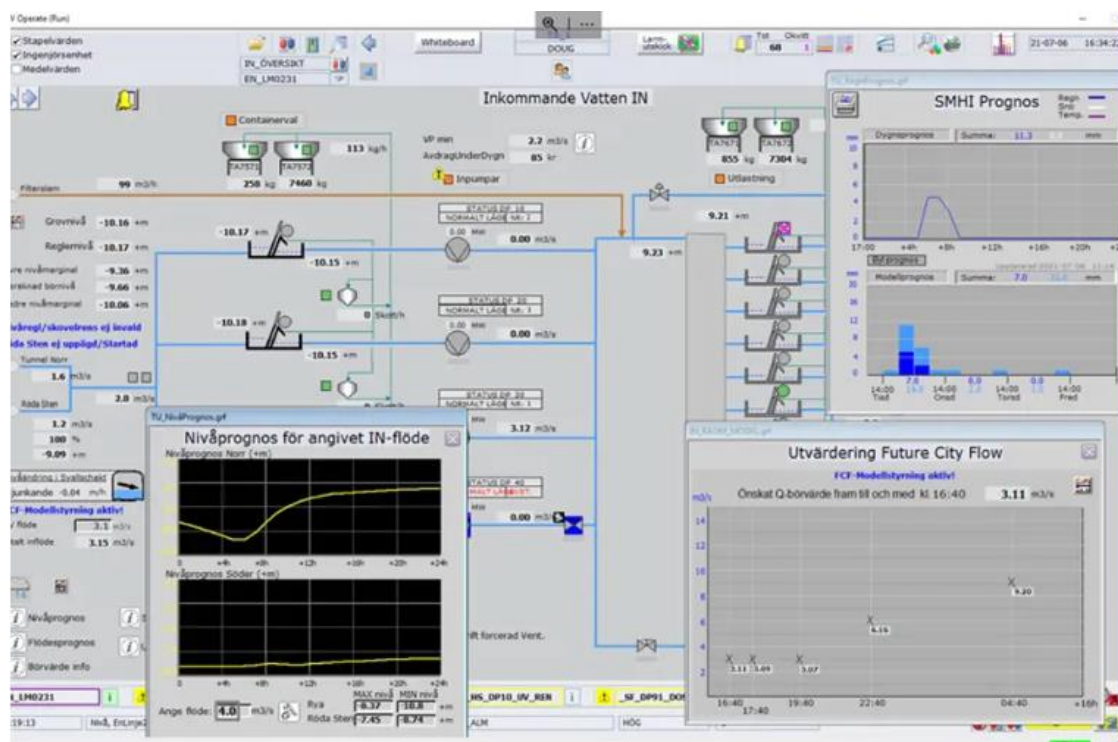
při finální fázi projektu nasazen ucelený koncept modelového prediktivního řízení (Model Predictive Control, MPC), viz Obrázek 8.

ČOV v Göteborgu dosahuje kapacity 900 tis. EO se spádovou oblastí 240 km² (z toho 20 km² v nepřístupných oblastech). V důsledku výše popsaných meteorologických vlivů docházelo k úniku nevyčištěné vody z kombinovaných stokových systémů o objemu až 3 miliard litrů za rok (2,2 % celkového průtoku ČOV). Cílem bylo snížit tyto úniky a s nimi související dopady na životní prostředí za pomoci digitálního dvojčete, jehož úkolem je modelovat předpovědi průtoků sběru reálných dat a poskytovat tak dostatek podkladů pro rozhodování operátorům kanalizační sítě, a to až na dva a půl dne dopředu. Doporučenou strategii dvojčetem řídí algoritmus, který optimalizuje chod čerpadel tak, aby zohlednil maximální budoucí objem přítoku na kanalizační síť, kapacitu čerpadel, podmínky čerpání apod. Dvojče pro simulace neustále porovnává a koriguje naměřená data z přístrojů s daty v modelu. K tomu využívá metody asimilace dat.

Hlavní struktura a komponenty digitálního dvojčete jsou zde tvořeny navzájem propojenou fyzickou a digitální infrastrukturou:

- Fyzická infrastruktura se sestává z průtokoměrů, hladinoměrů, čerpadel, ventilů a klapek z celé fyzické stokové sítě. Výsledky jejich měření či stavů jsou online a v reálném čase vyčítány a posílány pro další zpracování a využití do modelu a k vizualizaci.
- Digitální model stokové sítě vytvořený v software MIKE URBAN (který se manuálně kalibruje na základě informací o počasí, průtokoměrů a senzorů), složený z několika modulů:
 - o Dynamický model hydrauliky potrubí a infrastruktury
 - o Koncepční hydraulický model povodí a spádových oblastí
 - o Optimalizační moduly pro řízení v reálném čase
 - o Moduly pro předpovědi srážek a jejich měření

Obrázek 9 Future City Flow online aktivně upravující chod čerpacích stanic



Zdroj: DHI Group

- Vizualizace (oddělená od SCADA systému) zobrazuje přes webové rozhraní (viz Obrázek 9) operátorům informace o aktuálních stavech průtoků, přítoků ve spádové oblasti i na čistírnu (očekávatelných i neočekávatelných). Ve výchozích nastaveních je zobrazena reaktivní řídicí strategie (na základě empirického vztahu hladina-průtok) a simulací doporučená řídicí strategie. Operátor má možnost v simulátoru otestovat a vybrat vhodnou strategii (do budoucna má být model dovybaven o pravděpodobnostní kontrolu vybrané strategie).

Z textu vyplývají následující výzvy:

- Simulace a model pracuje s předpovědí počasí, a tedy mírou nejistoty
- Simulace a model musí při předpovědi nátoků na čistírnu zohlednit hydrologické děje v krátkodobém i dlouhodobém období, jako vsakování a odtok dešťové vody, přímý nátok, apod, podložená historickými a predikovanými průběžně shromážděnými daty.
- Vytvoření zabezpečeného a robustního přenosu dat a práce s daty vyžadující např. časová razítka, kombinování rozsáhlých dat o počasí, o srážkách, úpravu SCADA systému

- Jako kritickou výzvu autoři pojmenovávají lidský faktor – a to operátory, jejich zaškolení, porozumění modelu a jeho limitům, vybudování důvěry a srozumitelné znázornění nejistoty mnoho možných scénářů, které model zobrazuje uživateli

Závěrem autoři uvádějí přínosy použití digitálního dvojčete, a to v první řadě možnost snížení CSO (combined sewer overflow) ideálně až o 50 %, snížení rizika špiček a kritických náporů na infrastrukturu, zvýšení jistoty rozhodování, více stabilní procesy v infrastruktuře díky rozložení zátěže v podobě přítoků, více prostoru pro řešení poruch na čerpadlech nebo na zanesených česlích čističky odpadních vod.

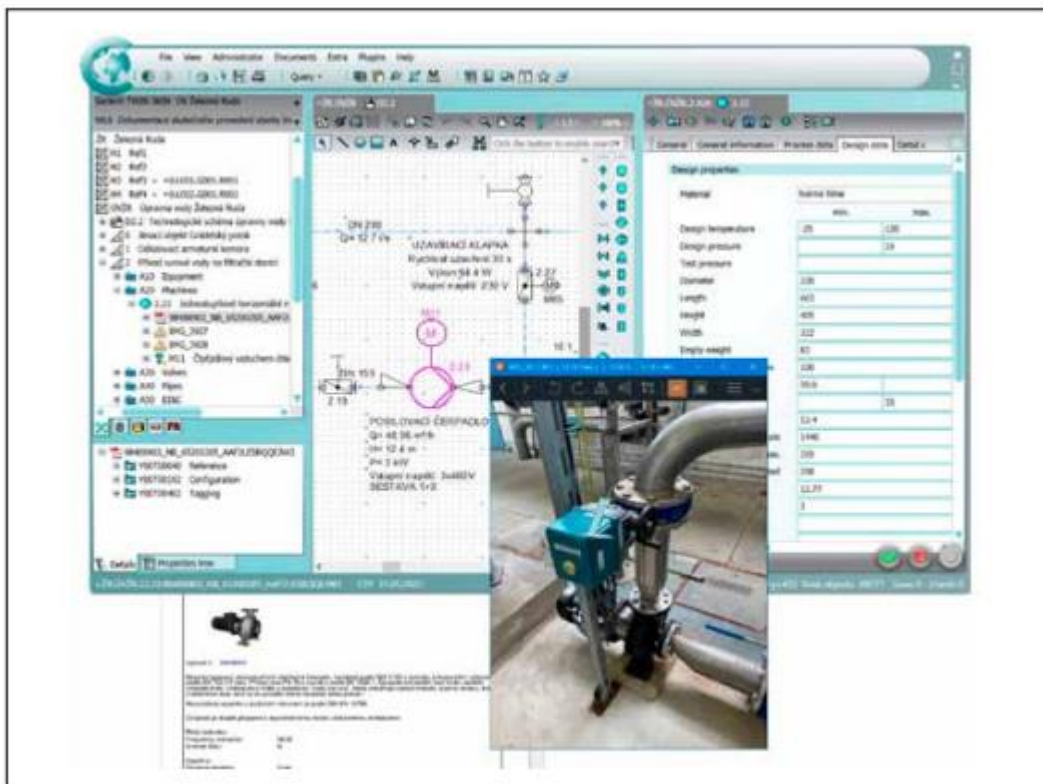
3.2.2 Aplikace v České republice

Pod patronací Vysoké školy chemicko-technologické v Praze, v kooperaci se společností VDT Technology a.s. a Ústavem pro hydrodynamiku AV ČR, pod vedením Ing. Petra Dolejše Ph.D. (Ústav technologie vody a prostředí) vznikly v poslední době tři projekty nasazení digitálních dvojčat ve vodohospodářství na reálných vodohospodářských objektech. Digitální dvojčata „běží“ na operačním systému pro průmyslový internet věcí (IIOT) MindSphere (nově InsightsHub¹⁰⁹) od společnosti Siemens.

Jedním z těchto projektů je vytvoření digitálního dvojčete úpravny pitné (ÚV) vody v Železné Rudě. Zde, na základě sbíraných dat o zákalu a barvě vody, průtoku v potoce, srážkách z Českého hydrometeorologického ústavu, stavu nasycenosti vody v půdě, v kombinaci s daty ze strojně-technologického vybavení v objektové architektuře vytvořeného digitálního modelu ÚV, pomáhá DT zefektivnit proces úpravy vody. A to díky predikci kvality vody na vstupu až na 2-5 hodin dopředu, ačkoliv kvůli geografické poloze úpravny, která se nachází v horské lokalitě, kde dochází k výkyvům kvality vody, je nejrelevantnější predikce v horizontu 1-2 hodin dopředu. Praktické využití nachází tato technologie např. při blížící se přívalové srážce, simulaci jevu a následnou úpravu procesů a výkon ÚV, tak aby zvládla po určitou dobu bezproblémově zásobovat město pitnou vodou.

¹⁰⁹ SIEMENS. *Insights Hub* [online].

Obrázek 10 Projekt v prostředí nástroje COMOS společnosti Siemens umožňuje logické třídění komponentů v databázi, zobrazování schémat a fotografií komponentu



Zdroj: Kadlas Blumelová (2023)

Projektová dokumentace je jedinečná díky tomu, že přeměňuje fyzickou infrastrukturu do digitální podoby s využitím objektově orientované architektury (viz Obrázek 10). Jednotlivým prvkům, od čerpadel, přes rozvaděče, včetně trubních rozvodů a kabelů, lze takto přiřadit atributy v podobě informací o statistických i dynamických datech, které DT dále využívá. Ve zjednodušeném 3D modelu jsou pak zobrazovány informace např. o motohodinách na čerpadlech, spotřeba energie čerpadla, množství vyrobené vody a nastavit si upozornění pro případy poruchy.

Další vrstvou digitálního dvojčete je proces úpravy vody jako takový. Technologické stupně procesu byly modelovány v grafickém programovacím prostředí Simulink matematicky popsány a simulovány. Simulace pracuje se stávajícími hodnotami kvality vody a umožňuje obsluhu bez rizika a v reálném čase vyzkoušet různé provozní stavy na vstupu úpravně vody (ÚV).

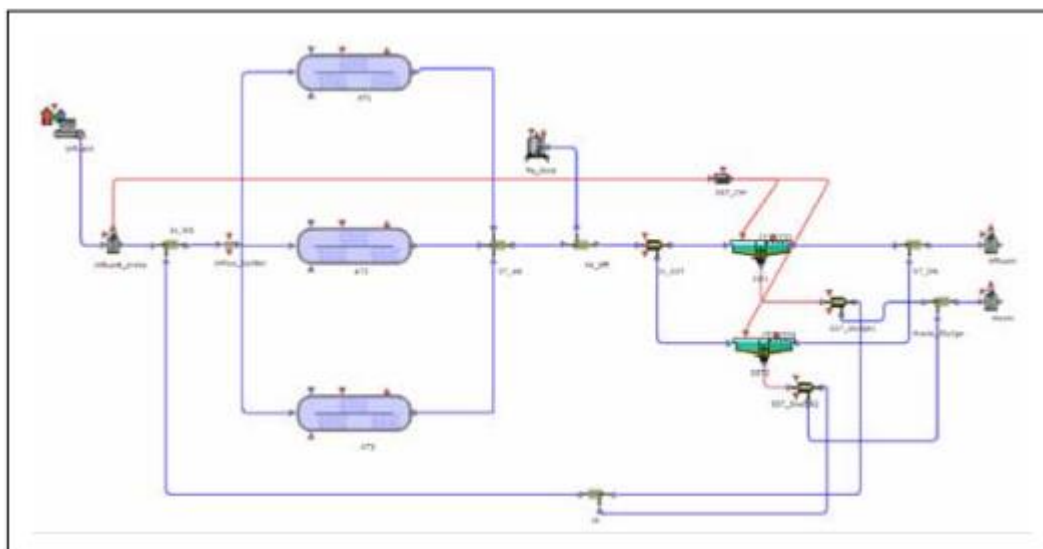
Digitální dvojče dále využívá zpětnovazební model založený na technologii neuronových sítí, který na základě výše uvedených parametrů kvality vody zajišťuje

predikci dat, která vstupují do procesu a díky němu lze vypočítat dopřednou kvalitu vody na výstupu ÚV.

Druhým projektem je čistička odpadních vod (ČOV) v Berouně, kde z důvodu komplexnosti čistícího procesu (několik stupňů filtrace) byl použit nástroj společnosti WEST od DHI (viz Obrázek 11), který nabízí vkládání technologických celků z knihovny procesů do modelu. Do těchto celků jsou přivedeny vstupy z reálné infrastruktury fyzické technologie. Výstupem modelu jsou pak simulované látkové bilance, účinnosti čištění, náklady na provoz, spotřeba chemikálií a v neposlední řadě, a to díky nasazení chytrých elektroměrů, také energetickým managementem, pro vyhodnocení energetické spotřeby a efektivity jednotlivých strojů a simulování různých procesních dějů pro optimalizaci celkového procesu čištění. Součástí digitálního dvojčete je i vizualizace těchto výstupů. Díky použitým elektroměrům lze navíc měřit energetickou efektivitu celé čističky odpadních vod, a tedy spotřebu energie spotřebičů (dmychadla) podílejících se na kvalitě výstupní čištěné vody, která dle legislativy v České republice musí splňovat stanovené limity. Lze tedy simulovat zvýšení či snížení kvality čištění vůči legislativně požadovaným limitům na výstupu, a tedy hledat úspory v procesu. V ČR legislativa pouze sleduje, zda provozovatel splní, či nesplní požadované limity, avšak nezvýhodňuje provozovatele, kteří by čistili nad rámec těchto limitů (jako např. ve Švýcarsku). V budoucnu se také chystá rozšíření o další vrstvu, a to přenosu dat z fyzického zařízení do objektové dokumentace.

Zajímavostí je, že se zde pro predikci nevyužívají neuronové sítě, ale provozní

Obrázek 11 Technologické schéma matematického modelu ČOV



Zdroj: Kadlas Blumelová (2023)

zanalyzovaná historická data, z nichž je možné předpovědět poměrně přesně chování odpadní vody na pár hodin dopředu i v závislosti na ročním období.

Třetím projektem, který se v této době nachází ve fázi počátečního rozvoje, je digitalizace kontejnerů určených pro recyklaci vody v ČOV Brno. Součástí projektu je modernizace elektrozařízení těchto kontejnerů, jejich příprava pro připojení do cloudu a vytvoření modelů fyzikálně-chemických procesů v čistícím procesu filtrace. Cílem projektu je sledovat účinnost membránových separací, parametry na přítoku a odtoku.¹¹⁰

¹¹⁰ KADLAS BLÜMELOVÁ, Kristina, 2023. *Digitální dvojčata zajistí vyšší efektivitu vodního hospodářství*. Technický týdeník [online].

4 Vlastní práce

Digitalizace ve vodárenství byla doposud převážně zaměřena na procesy úpravy a distribuci pitné vody (vznikají i podporující programy zainteresovaných organizací, jako IWA's digital water program, SWAN working group on Digital Twins applications, atd.), čistírny odpadních vod byly de facto na okraji zájmu digitalizačních iniciativ, a to z důvodu komplexních biologických procesů, které v čističkách probíhají a náročnosti na sběr dat a vývoj modelu¹¹¹.

V praktické části práce bude sestaven souhrn dostupných softwarových nástrojů na trhu. Cílem nebylo vytvořit vyčerpávající seznam, jako spíše nastínit nabídku softwarových nástrojů. Lze předpokládat, že tento trh v budoucnu dále poroste.

Dalším krokem je popis návrhu postupu digitalizace a použití digitálního dvojčete. Vždy je potřeba vyhodnotit, co od digitálního dvojčete vlastníci infrastruktury, nebo provozovatel, očekává a s ohledem na cíle zvolit nejvhodnější řešení.

Následuje případová studie teoretického nasazení digitálního dvojčete na reálné čistírně odpadních vod o 35 000 EO (ekvivalentních obyvatel), pro kterou budou využity dostupné literární zdroje ze zahraničního projektu. V tuto chvíli nejsou data z reálných projektů digitálních dvojčat v České republice k dispozici. Bude vypočtena doba návratnosti investice při nasazení technologie, nelze však zohlednit všechny aspekty – je nutno vše brát jako model. Informace o referenční čističce odpadních vod budou anonymizována a ocenění jednotlivých položek bude provedeno orientačně. Práce je konzultována s odborníky z oboru na danou problematiku, a to jak z akademické, tak soukromé sféry a kombinována s dostupnými literárními zdroji. Podkapitoly budou členěny dle tematicky řazených celků s dílčími cíli vypočítat dobu návratnosti investice, odhadnout investiční a provozní náklady na digitální dvojče, vydefinovat teoretický a praktický výpočet potenciálních úspor v různých časových horizontech životnosti investice. Je nutné podotknout, že se náklady mohou lišit v závislosti na velikosti čističky, aktuálním stavu strojné technologické infrastruktury a jejího technického vybavení, a také podle použité technologie.

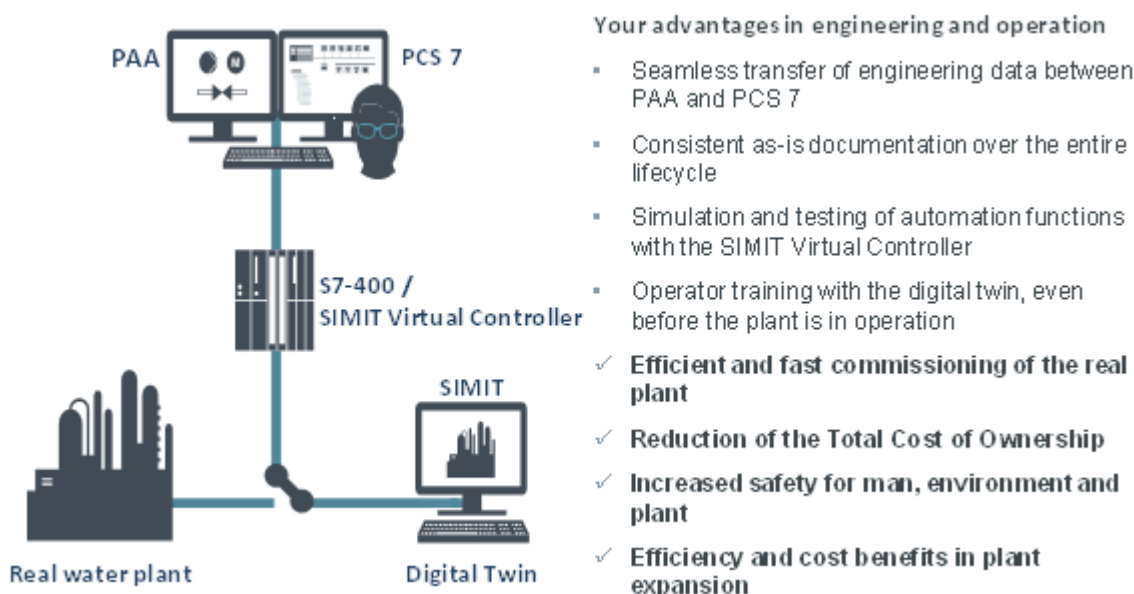
¹¹¹ TORFS, Elena; NICOLAÏ, Niels; DANESHGAR, Saba; HAIMI, Henri; IKUMI, David et al. *The transition of WRRF models to digital twin applications*. [online].

4.1 Přehled dostupných softwarových nástrojů

Vývojem digitálních dvojčat se zabývají technologické společnosti specializující se na průmyslovou automatizaci a softwarové firmy. S ohledem na rozmanité možnosti je vhodné, aby potenciální investor předem uvážil, jaká očekávání má ohledně digitálního dvojčete. Může se jednat o optimalizaci procesů, snížení nákladů na chemikálie, předpověď přítoků do čistíren nebo úpraven vody, dosažení uhlíkové neutrality, školení údržby či detekci úniků? Zároveň je důležité zvážit, zda bude digitální dvojče využíváno pro strategická (dlouhodobá), taktická (střednědobá) či operativní (krátkodobá) rozhodnutí¹¹². Následně je nutné vybrat vhodného partnera pro jeho implementaci, což vyžaduje průzkum trhu a dostupných řešení. Tato podkapitola si klade za cíl zmapovat trh a hlavní hráče v této rostoucí oblasti, i když není jejím účelem poskytnout kompletní výčet všech možností, ale spíše identifikovat klíčové aktéry na poli digitálních dvojčat.

Siemens¹¹³ jako leader na poli automatizace a procesního řízení nabízí v rámci divize Digital Industries celou škálu hardwarových a softwarových řešení pro vodohospodářství. Od řídicích systémů a komponent integrovaných do TIA Portal a procesních řídicích systémů SIMATIC PCS 7, přes vizualizaci WinCC a SCADA systémy.

Obrázek 12 Software SIMIT



Zdroj: Siemens

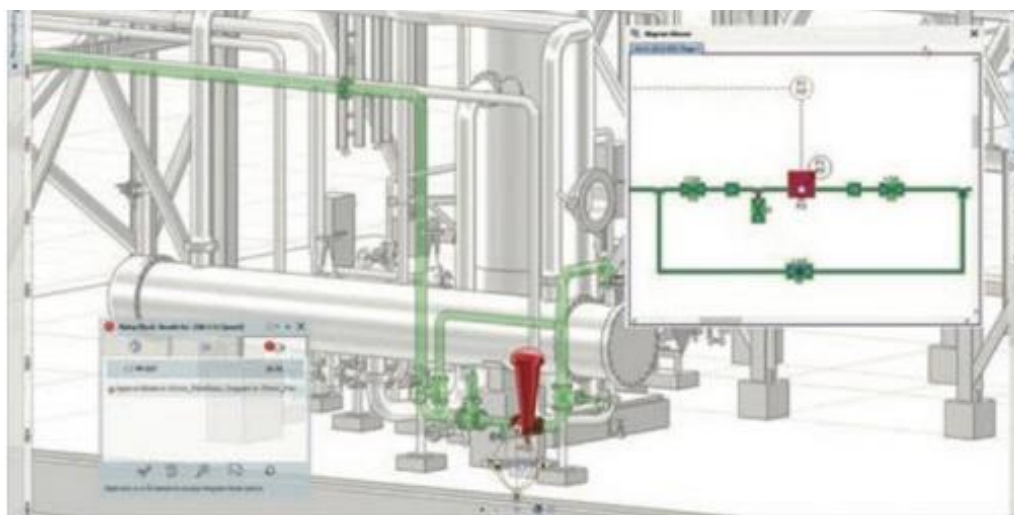
¹¹² DHI. *Digital Twins in the water sector: what are they and how do we get there?* [online].

¹¹³ SIEMENS, 2022. *With AI and Digital Twin to a sustainable water management* [online].

Dále platformu pro Edge Computing nebo operační systém pro cloudová úložiště Insights Hub a, kde je možné vytvářet či využívat aplikace např. pro detekci úniků ve vodovodních potrubích s využitím umělé inteligence (SIWA Leak a SIWA LeakPlus), sběr a vizualizaci provozních parametrů např. motorů čerpadel a efektivní plánování zásahů na základě prediktivní údržby pomocí SIPLUS CMS. Infrastrukturu je možné digitalizovat pomocí softwarové platformy COMOS, která umožňuje řídit a optimalizovat procesy a správu zařízení provozů (čistíren, čerpacích stanic, úpraven, atp.). V neposlední řadě také nabízí simulační nástroj SIMIT (Obrázek 12) s knihovnamy pro vodárenské aplikace. Siemens v roce 2019 rozšířil své portfolio o modelovací software gPROMS (od společnosti PSE) pro vytvoření digitálních dvojčat biologických a fyzikálně-chemických procesů, mj. např. i pro čističky odpadních vod.

Schneider Electric¹¹⁴ (SE) je další významný leader v oblasti automatizace a energetického managementu, který také investuje do vývoje digitálních dvojčat. Do oblasti vodárenství, kromě hardwarových prvků, nabízí také služby a softwarová řešení, jako ExoStructure Water Cycle Advisor – District Energy a ExoStructure Water Cycle Water Simulation, která mají uživateli pomoci například k snížení dopadů emisí CO₂, zvýšení efektivity procesů, snížení tepelných ztrát, a zároveň umožňuje testování a simulaci provozních stavů. Nástroje implementují digitální senzory, detekují úniky vody a predikují

Obrázek 13 Návrhový software AVEVA využívá technologie digitálních dvojčat



Zdroj: Aveva Group

¹¹⁴ SCHNEIDER ELECTRIC, 2022. *Water, wastewater and district energy utilities to increase decarbonization and operational efficiency, with upgraded digital twin tools from Schneider Electric* [online].

budoucí stavu¹¹⁵. SE na svých stránkách prezentuje své ambice pokračovat ve vývoji digitálních dvojčat. V roce 2023 dokončil akvizici softwarové společnosti AVEVA¹¹⁶, v níž doposud vlastnil 60% podíl, a která se vývojem digitálních dvojčat zabývá. Prostředí softwaru AVEVA zobrazuje Obrázek 13.

ABB¹¹⁷ je neméně význačný výrobce průmyslových technologií, elektrotechniky a softwaru. V široké nabídce produktů nabízí řešení pro různé sektory průmyslu od decentrálních řídicích systémů pro procesní řízení a dalších komponenty provozní technologie (OT), průmyslových a kolaborativních robotů, přes vybavení operátorských místností včetně Symphony® Plus SCADA systému, nechybí ani řešení pro vodohospodářství a celý vodní cyklus a produkty, které cílí na automatizaci, elektrifikaci a digitalizaci úpraven a čistíren vod a jejich infrastruktury. Digitální dvojče je součástí technologie ABB Ability™ Smart Solution for Wastewater a slouží k optimalizaci procesů, snížení nákladů na energii a provoz, simulaci provozu, zvýšení kvality vody na výstupu a dopadu na životní prostředí¹¹⁸. ABB spolupracuje na vývoji s dánskou společností DHI Group, se kterou v roce 2021 podepsala partnerství¹¹⁹.

IBM¹²⁰ přišlo na trh s několika řešeními využívající digitální dvojčata, jako například Maximo Asset Monitor, který využívá konektivity sensorů k vytvoření jejich digitálních kopií k jejich analýze a monitorování¹²¹. DT dokáže detekovat anomálie, automaticky spouštět úkoly podle předdefinovaných pravidel a předvídat výstupy. Využívá k tomu internet věcí (IoT), umělé inteligence (AI) a strojového učení (ML) a integruje v sobě geografický informační systém (GIS), EAM (Enterprise Asset Management), simulace a data o počasí.

Bentley Systems¹²² nabízí digitální dvojčata infrastruktury a balík softwarů pod názvem OpenFlows™, pro analýzu, predikci a simulaci stávajícího stavu a výkonnosti. Integruje v sobě data z GIS systémů, EAM, CIS (Customer Information System), SCADA, hydraulické modelování a nástroje pro rozhodování a prediktivní údržbu. Díky dvojčeti je

¹¹⁵ SCHNEIDER ELECTRIC, 2023. *EcoStruxure Water Advisor – Water Simulation* [online].

¹¹⁶ RESNICK, Craig, 2023. *The AVEVA Acquisition by Schneider Electric Is Complete* [online].

¹¹⁷ SMART WATER MAGAZINE, 2022. *ABB launches digital solution to reduce energy use and optimize operations in wastewater* [online].

¹¹⁸ ABB. *ABB Ability™ Smart Solution for Wastewater* [online].

¹¹⁹ ABB, 2021. *ABB and DHI Group join forces to create smarter, more sustainable water management solutions* [online].

¹²⁰ BOYLES, Ryan, 2019. *How do you supply clean water to a city beneath the sea?* [online].

¹²¹ DERRICK, Maya, 2023. *Top 10: Digital twin technologies available to data centres* [online].

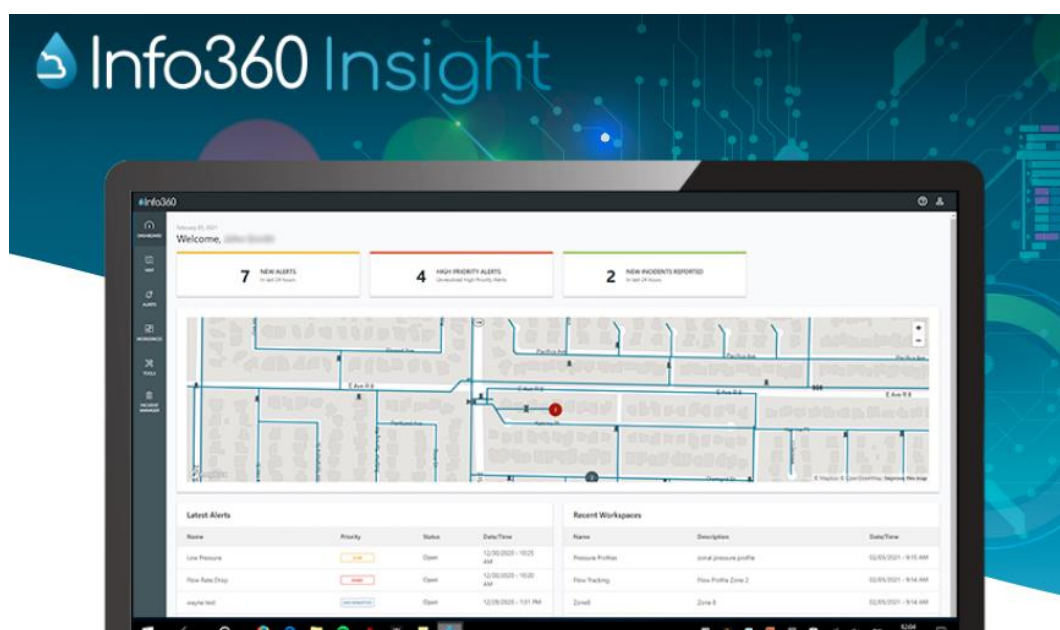
¹²² BENTLEY. *Digital Twins Connect The Physical And Virtual World* [online].

možné bezpečně např. testovat různé scénáře operativních strategií, automaticky upravovat a optimalizovat tlak v infrastruktuře, sledovat svá zařízení v reálném čase a plánovat údržbu, detekovat anomálie, předcházet kontaminaci pitné vody a optimalizovat spotřebu energií.

Trimble¹²³ nabízí celou řadu softwarových balíčků, jako Trimble NIS (Network Information System), digitální dvojče sítě, využitelné mj. pro vodovodní síť. Kombinuje v sobě data z GIS, topologie sítě a podporu pro řízení životního cyklu jejích komponent. Jedná se o digitální repliku fyzické infrastruktury, která umožňuje centrální přístup k dokumentaci a informacím o provozu jejích jednotlivých prvků. Nad rámec toho nabízí model další aplikace pro inteligentní údržbu, správu, kalkulace sítě, a řízení investic do sítě¹²⁴. V nabídce společnosti je pak několik dalších aplikací, jako Trimble SiteVision for Utilities využívající rozšířenou realitu (Augmented Reality) pro zobrazování plánované nebo stávající infrastruktury (např. potrubí v podzemí) z dat získaných z GIS, NIS, CAD systémů v reálném světě (přes obrazovku mobilního telefonu).

Innovyze (od roku 2021 součást společnosti Autodesk)¹²⁵ globální leader ve vývoji softwarových řešení pro vodohospodářství uvedl „své“ digitální dvojče pod názvem

Obrázek 14 Digitální dvojče infrastruktury v prostředí Innovyze Info360 Insight



Zdroj: Wilson (2021)

¹²³ TRIMBLE. *Water Solutions* [online].

¹²⁴ TRIMBLE. *Trimble NIS: Manage utility network assets with a digital twin* [online].

¹²⁵ WILSON, Mary, Greg THOMPSON a Patrick KEANEY, 2021. *Innovyze Introduces Dynamic Digital Twins to the Water Industry with Info360 on AWS* [online].

Info360.com a Info360 Insight (viz Obrázek 14) pro vizualizaci vodovodní sítě. Dvojče je dostupné jako SaaS (Software as a Service) - software na cloudu Amazon Web Services (AWS). Model se díky datům z reálné infrastruktury a propojováním historických a aktuálních dat dokáže učit a adaptovat okolnostem. Data jsou využívána a analyzována pro operativní úkony, např. pro detekci poruch potrubí a úniků vody a zároveň k plánování údržby a vykrývání nerovností nátoky na hydraulický systém. Dvojče provádí simulace, prediktivní analýzu a nabízí možnost vyzkoušet různé scénáře (změny počasí, povodňové situace apod.).

DHI¹²⁶ je zkratka pro Danish Hydraulic Institute, který se zabývá vývojem software pro vodní hospodářství a modelování hydraulických jevů. Software MIKE URBAN+, resp. jeho aktuální verze Mike+, je využíván pro modelování veškerých vodohospodářských sítí (od distribučních sítí, přes odtok kanalizačních a dešťových vod) a doplnitelný o moduly pro modelování např. ekologických dopadů při úniku nevyčištěné vody (CSO) nebo přímo digitální dvojče čistírny odpadních vod TwinPlant pro úsporu energií, nákladů a snížení uhlíkové stopy. Na základě reálných dat a prediktivního modelování umožňuje testovat strategie a scénáře a operátor tak může činit lepší informovaná rozhodnutí a plánovat údržbu. V neposlední řadě je součástí balíčku také simulační nástroj WEST (viz také kapitola 3.2.2 Aplikace v České republice). DHI je partnerem společnosti ABB¹²⁷.

Vývojem digitálních dvojčat se zabývají i další důležití hráči z odvětví procesní automatizace, jako **Emerson**¹²⁸, se systémem Mimic Simulation SoftwareTM pro procesní průmysl, **Honeywell**¹²⁹ s Digital Prime, nebo dceřiná společnost General Electric **GE Digital** s Predix Platform. V neposlední řadě **Microsoft Azure**, která nabízí škálovatelné kopie reálných prostředí¹³⁰. Lze očekávat, že v budoucnu bude význam digitálních dvojčat narůstat¹³¹. Digitální dvojčata (a to včetně simulace procesů) nyní procházejí evolucí. V roce 2021 odhadovaná hodnota globálního trhu digitálních dvojčat činil 3,1 miliard

¹²⁶ DHI. *TwinPlant: Save energy, cut costs and reduce your WWTP's carbon footprint* [online].

¹²⁷ ABB, 2021. *ABB and DHI Group join forces to create smarter, more sustainable water management solutions* [online].

¹²⁸ EMERSON. *Digital Twin Solutions Improve performance and safeguard operations with digital twin solutions that enable operator training and advanced testing of equipment and processes through dynamic simulation*. [online].

¹²⁹ HONEYWELL. *Honeywell Process Digital Twin* [online].

¹³⁰ MICROSOFT AZURE. *Azure Digital Twins: Create live, digital models of the physical world*. [online].

¹³¹ SACHDEVA, Nikita, 2023. *How Will Digital Twins Evolve in the Future? Predictions and Emerging Trends* [online].

amerických dolarů. Už v roce 2026 by to mělo být 48 miliard amerických dolarů¹³². Lze tedy předpokládat i růst počtu společností v oboru a zdokonalování technologií.

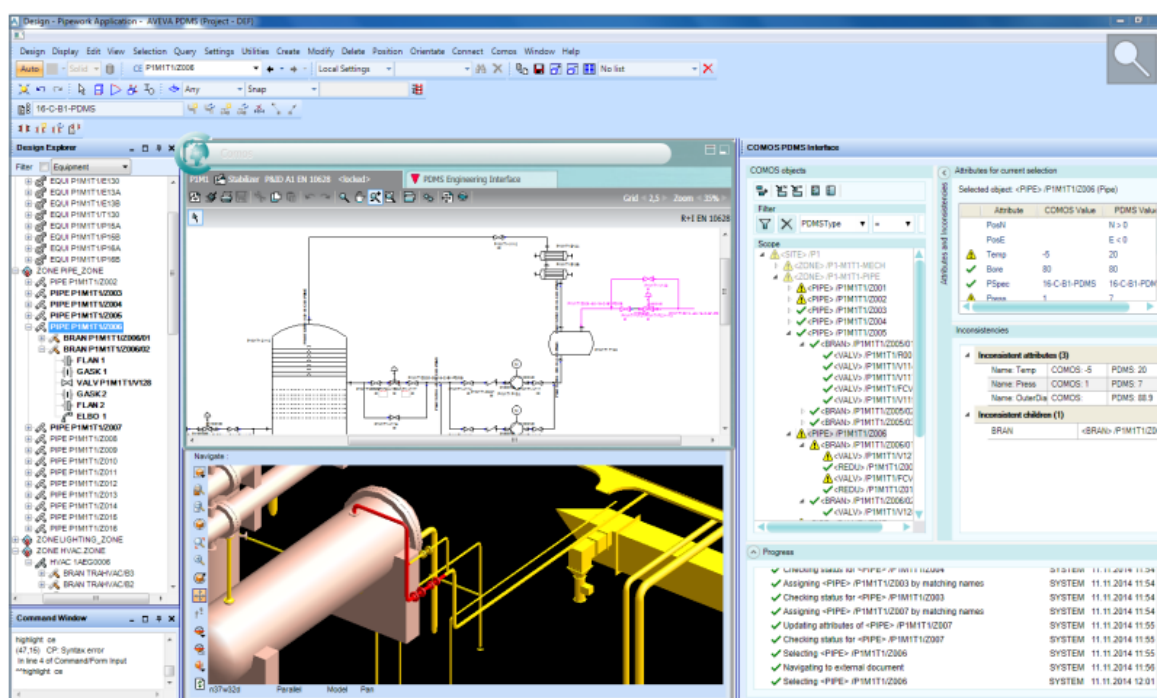
4.2 Návrh digitálního dvojčete čističky

Ačkoliv primárním cílem práce není technický návrh digitálního dvojčete, ale spíše zkoumání jeho ekonomických přínosů pro vlastníka či provozovatele, je vhodné stručně shrnout možné postupy při jeho tvorbě a uvést softwarové nástroje, které by mohly být použity. Inspirací pro tuto kapitolu může sloužit společnost VDT Technology, jež byla první, kdo zavedl digitální dvojče na úpravně vody v České republice.¹³³

Proces digitalizace infrastruktury pro tvorbu digitálního dvojčete lze rozložit na tři fáze: Sběr dat, integrace dat a vytvoření digitálního dvojčete.

V první fázi sběru dat je důležité vybrat relevantní data pro modelování, simulaci a analýzu a další zpracovávání. Jak již bylo popsáno výše, jedná se o data:

Obrázek 15 Nástroj COMOS společnosti Siemens



Zdroj: Siemens

¹³² SARTORIUS, 2021. *Opportunities for Digital Twins in Bioprocess Development* [online].

¹³³ VDT TECHNOLOGY. *VDT Technology představuje digitální dvojče úpravně vody v Železné rudě. Inovativní monitorování a simulace provozu* [online].

- provozní (hladiny, průtoky, spotřeba elektrické energie apod.)
- údržbě (historie oprav, zásahů apod, technického stavu zařízení.)
- laboratorní (kvalita vypuštěné vody)
- geografická (poloha jednotlivých zařízení, potrubí)
- hydrometeorologická (předpověď počasí)

Pokud jsou již definovaná data určená ke zpracování, je klíčové pečlivě zvážit, jakou technologii použít pro jejich sběr. V případě vybrané ČOV jsou veškerá provozní data sbírána z řídicích systémů (PLC) a vizualizována ve SCADA systému pro vzdálenou správu. Je tak možné získat v reálném čase informace o průtocích, hladině, koncentraci

Obrázek 16 Ukázka prostředí digitálního dvočete společnosti DHI TwinPlant



Zdroj: DHI Group

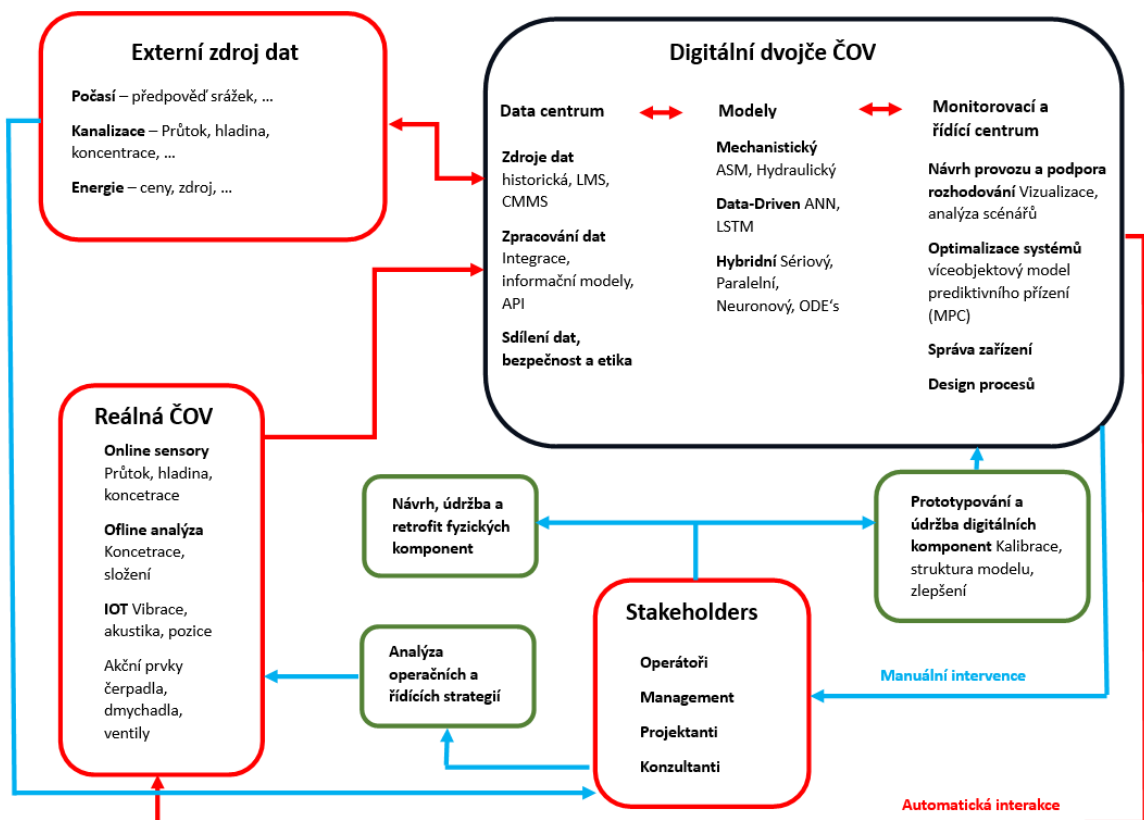
znečišťujících látek, a dalších veličinách. Díky konektivitě a průmyslového internetu věci je možné údaje doplnit o sledování vibrací, informace o akustice, provozních stavech čerpadel, dmychadel nebo ventilů.

Infrastruktura může být digitalizována například pomocí softwarového nástroje COMOS od společnosti Siemens (Obrázek 15), který v objektově orientované databázi umožňuje ukládat grafické a datové informace o komponentech čistírny – například informace o čerpadlech. Veškeré informace a dokumenty jsou dostupné pod jedním objektem. Mimo to lze díky tomuto nástroji také např. vytvářet procesní diagramy, struktury a 3D modely. Jedná se o mezioborový softwarový nástroj využitelný např.

odděleními (elektro projekce, konstrukce) pro inženýring a management. Navíc optimalizuje práci údržby uchováváním dokumentace.

Takto jsou digitalizována interní data z čističky. Pro digitální dvojčte jsou často relevantní také externí data, jako již zmíněné informace o počasí a srážkách, cenách energií, informace o stokové síti – hladiny, průtoky, koncentrace. Aby se s těmito daty mohlo dále pracovat, je nutné, aby byly aplikace poskytující tyto informace psány

Obrázek 17 Schéma digitálního dvojčete



Zdroj: vlastní zpracování, Torfs (2022)

v otevřené architektuře.

V další fázi je potřeba vybrat vhodné cloudové úložiště a databázovou technologii. Pro průmyslové využití je možno sáhnout po digitální platformě od společnosti Siemens Insights Hub, která slouží jako nástroj pro zpracování a zobrazování dat z průmyslového internetu věcí (Industrial Internet of Things, IIoT). Data z různých zdrojů jsou zde integrována, standardizována, čištěna a validována. Je také potřeba zvolit vhodné zabezpečení.

Následuje vystavění modelu, nejvíce se používají typy mechanistické, empirické (data-driven) a hybridní (více viz kapitola 3.1.7 Digitální dvojčata). Parametry datového

modelu jsou automaticky kalibrovány – upravovány/aktualizovány, např. na základě pravidelných intervalů nebo pokud nastanou odchylky mezi simulovanými a naměřenými hodnotami, či jsou používány neuronové sítě.

Vstupy ve formě dat jsou v modelu zpracovávány a pomocí softwarových nástrojů (např. gProms, DHI Mike, TwinPlan – viz Obrázek 16) jsou využívány pro simulaci a predikci scénářů, trénování neuronových sítí, modelování, analýzu a vizualizaci a následně zpětnou úpravu parametrů v reálné infrastruktuře. Vždy záleží na tom, co a do jakého detailu chce vlastník infrastruktury, resp. zadavatel digitálního dvojčete, sledovat a pro koho jsou výstupy určeny, zdali bude výstupy využívat management, operátoři, údržba, projektanti apod. Schéma digitálního dvojčete, včetně procesů a stakeholderů zobrazuje Obrázek 17.

4.3 Výchozí stav vybrané ČOV

Data o referenční čistírně odpadních vod jsou získána z veřejně dostupných zdrojů, konkrétně z aktuálního kanalizačního řádu, který vydává správce kanalizace. Tato čistírna se nachází v okresním městě ve středočeském kraji, ale pro účely této práce byla anonymizována. Využívá technologii mechanicko-biologického čištění, s jemnobublinnou aerací a kalovým hospodářstvím s kapacitou 35 tisíc EO (ekvivalentních obyvatel. ČOV je již kompletně zautomatizována a na probíhající procesy je možno vzdáleně dohlížet z dispečerského pracoviště).

Na čistírnu je napojena jednotná stoková síť dlouhá cca 100 km. Stoková síť přivádí kanalizaci ze tří obcí, kterou využívá 28 tisíc obyvatel (25 tisíc EO). Denně produkuje 7,2 tis m³ odpadní vody. Na síti se dále nachází 5 čerpacích stanic a několik odlehčovacích komor s výustními objekty. Na čističku jsou, kromě domácností, napojeny tři průmyslové (komerční objekty).

Roční průměrný úhrn srážek v oblasti je 534 mm. Pro případ přívalových srážek je součástí areálu ČOV také zdrž pro jejich zachycení.

Mechanický proces čištění odpadní vody začíná nejprve v lapáku šterku hrubým předčištěním (odstraněním šterku a velkých předmětů), následně odpadní voda pokračuje přes automaticky stírané česle, kde se odstraní další plovoucí předměty a znečištění, dále do provzdušňovaného lapáku písku, kde je odstraněn písek a menší mechanické nečistoty.

Biologický proces čištění je založen na systému oběhové aktivace, na ČOV jsou k dispozici tři oběhové aktivace, ale provozuje dvě s nepřetržitým chodem míchadel.

Vzduch je dodáván do procesu v intervalu 100 minut chod a 100 minut pauza a hladina kyslíku je hlídána sondami.

Separace kalu probíhá ve dvou dosazovacích nádržích a část kalu je čerpána zpět do aktivačních nádrží. Zbylý kal je v kalových nádržích aerobně dostabilizován.

Tabulka 4-1 Položky pro výpočet stočného z roku 2019

Skutečné náklady pro výpočet stočného za rok 2019		Měrná jednotka
Materiál	2,95	mil. Kč
- chemikálie	1,80	mil. Kč
- ostatní materiál	1,15	mil. Kč
Energie	5,50	mil. Kč
- elektrická energie	5,20	mil. Kč
- ostatní energie (plyn, pevná a kapalná)	0,30	mil. Kč
Mzdy	14,70	mil. Kč
- přímé náklady	10,70	mil. Kč
- ostatní osobní náklady	4,00	mil. Kč
Ostatní přímé náklady	30,60	mil. Kč
- odpisy	19,10	mil. Kč
- opravy infrastrukturního majetku	7,90	mil. Kč
- nájem infrastrukturního majetku	1,80	mil. Kč
- odpisy pronajatého majetku	1,80	mil. Kč
Provozní náklady	23,80	mil. Kč
- poplatky za vypouštění odpadních vod	0,60	mil. Kč
- ostatní provozní náklady externí	8,40	mil. Kč
- ostatní provozní náklady ve vlastní režii	14,80	mil. Kč
Ostatní výnosy	-7,80	mil. Kč
Výrobní režie	2,50	mil. Kč
Správní režie	10,30	mil. Kč
Úplné vlastní náklady vč. prostředků na obnovu	80,80	mil. Kč
Hodnota infrastruktury podle VÚME	2784,00	mil. Kč
Voda odpadní odváděná fakturovaná	2,25	mil. Kč
- z toho domácnosti	1,43	mil. Kč
Voda srážková fakturovaná	0,38	mil. Kč
Voda odpadní čištěná	4,50	mil. Kč

Zdroj: vlastní zpracování, anonymní vodohospodářská společnost

Náklady na provoz ČOV lze odhadnout z výpočtu stočného, k dispozici jsou data z roku 2019 byly zpracovány do Tabulka 4-1 (výše) Tabulka 4-1 Položky pro výpočet stočného. Tyto berme jako orientační, protože vlivem snahy o nezávislosti na dovozu plynu z Ruska (z důvodu ruského útoku na Ukrajinu), odstávky francouzských jaderných

elektráren a suchu v Evropě (vliv na vodní elektrárny), ceny energií v posledních letech rostly¹³⁴. Díky této situaci mimochodem vrostla v období 2019-2023 inflace o 40 %.¹³⁵

Použitá data jsou zaokrouhlena. Z těchto údajů na čištění odpadních vod lze alespoň pro orientační účely použít některé položky pro kalkulace v dalších krocích.

Pro zajímavost se cenotvorba stočeného sestává ze dvou složek (náklady a přiměřený zisk) a cena je kalkulována na následující období (rok). Vodárenské společnosti jsou de facto monopolem ve svých regionech. Aby nedocházelo ke zneužívání svého postavení na trhu, jsou společnosti přísně regulovány (ministerstvem financí, ministerstvem zdravotnictví a ministerstvem životního prostředí), a to na základě definování oprávněných nákladů a přiměřeného zisku. Jako regulátor vystupuje také vlastník infrastruktury, provozují-li společnosti cizí vodohospodářskou infrastrukturu. Na doporučení Světové zdravotnické organizace a Světové banky by neměla cena vody přesáhnout 2 % průměrného příjmu domácnosti.¹³⁶

4.4 Zpracování odhadu investičních a provozních nákladů na digitální dvojče

Odvětví digitálních dvojčat pro čističky odpadních vod je v nyní ve fázi prvotních nasazování a vyhodnocování. Existující softwarové nástroje mapuje kapitola 4.1 „Přehled dostupných softwarových nástrojů“. Společnosti na svých webových stránkách nezveřejňují ceníky, jelikož nabízejí produkty šité na míru konkrétním zákazníkům. V oblasti aplikací často spolupracují akademický a soukromý sektor. Každý projekt je přístupován individuálně a jednotlivé položky se mohou výrazně lišit. Je důležité mít na paměti, že jsme teprve na začátku rozvoje trhu digitálních dvojčat a s postupem času bude jejich využití čím dál běžnější, což se projeví i na rozvoji trhu jako celku.

Pokud vlastník nebo provozovatel infrastruktury uvažuje o nasazení digitálního dvojčete na ČOV, měl by mít jasnou vizi ohledně očekávaných funkcí tohoto dvojčete. Mohou se jednat například o potřebu získávání provozních informací, testování různých provozních scénářů, předpovídání počasí nebo podobných událostí, a na základě těchto dat činit informovaná rozhodnutí a aktivně s nimi pracovat s cílem optimalizovat provoz. Dále může být požadováno trénování personálu v bezpečných virtuálních prostředích nebo

¹³⁴ HAUSER, Šimon, 2022. *Co ovlivňuje současné ceny energií? Důvody a příčiny přehledně*. Greenpeace [online].

¹³⁵ CVEK, Boris, 2023. *Inflace od roku 2019 je 40 procent – a co se stalo s příjmy a výdaji státu* [online].

¹³⁶ SVAZ PRŮMYSLU A DOPRAVY ČR. *Jak je tvořena cena vodného a stočného v ČR* [online].

využití Modelu Prediktivního Řízení (MPC) pro optimalizaci spotřeby energie a minimalizaci emisí sledovaných látek. Alternativně může být digitální dvojče využito již během návrhu čistírny a procesů, kde na základě reálných dat bude sloužit pro vývoj a testování nových verzí a v budoucnu pak i pro provozní řízení.

Náklady na převedení veškeré infrastruktury do digitálního prostředí se budou odvíjet od aktuálního stavu reálné infrastruktury, technologie čištění na vybrané ČOV, počtu zařízení, které bude potřeba digitalizovat, schopnosti jejich konektivity, použitého softwaru a technologie, úrovně stávajících datových rozhraní.

Další důležitou položkou bude zaškolení údržby a provozních pracovníků, kteří budou s dvojčetem pracovat a budou jej využívat ve více holistickém přístupu, dvojče totiž může být integrováno od rozhodovacího systému vyšší úrovně. Je také nutné vybudovat důvěru provozních pracovníků a vedení společností v digitální dvojčata.¹³⁷

V tabulce níže je zpracován odhad investičních nákladů po konzultaci s odborníky z oboru. Z výše uvedených důvodů je v tuto chvíli možné uvést pouze rozpětí nákladů, které zobrazuje Tabulka 4-2.

Tabulka 4-2 Jednotlivé položky cenotvorby digitálního dvojčete, odhadované náklady

Položka	Odhadované náklady
Digitalizace infrastruktury	Stovky tisíc Kč – miliony Kč
Implementace SW nástrojů a jejich kalibrace	1 milion až několik miliónů Kč
Tvorba uživatelského rozhraní	Řádově stovky tisíc Kč
Zprovoznění/zaškolení	Řádově stovky tisíc Kč
SME poplatky ¹³⁸ / Datové přenosy	Řádově stovky tisíc Kč / ročně

Zdroj: vlastní zpracování, konzultace s odborníky v oboru

¹³⁷ TORFS, Elena; NICOLAÏ, Niels; DANESHGAR, Saba; HAIMI, Henri; IKUMI, David et al. *The transition of WRRF models to digital twin applications*. [online].

¹³⁸ Small and medium enterprise poplatky za využití software – roční předplatná – například: SIEMENS. *Insights Hub IIoT Data Package S* [online].

4.5 Teoretický výpočet potřebných úspor pro klienta díky digitálnímu dvojčeti

Příklad možných úspor ilustruje článek v internetovém časopise Smart Water Magazine¹³⁹, který popisuje digitalizaci vodárenské infrastruktury ve španělské Valencii. Digitalizaci prováděla společnost Idrice a podle jejich expertů je nejdůležitější nejdříve znát cíl, který chceme digitalizací dosáhnout. V případě Valencie a Gandie, kde se jedná o výrobu a distribuci pitné vody, může cíl znít jako „dosažení dobré kvality pitné vody pro občany“, pak je nutné analyzovat a optimalizovat celý proces výroby pitné vody. Díky digitalizaci, je tak možné dosáhnout následujících úspor, a to až:

- 20 % nákladů na údržbu
- 15 % nákladů na energie
- 35 % hydraulické výkonosti, resp. únikům pitné vody v potrubí (tzv. non-revenue water)

Konkrétně v Gandii přinesla digitalizace až 200 případů detekce a identifikace úniků vody v potrubí za měsíc. A díky vyčítání informací o spotřebě, snížila i počet registrovaných stížností zákazníků o 60 %, čímž se snížila administrativní zátěž.

Tak, jako v příkladě úpraven vod výše, i v čističkách odpadních vod jde o minimalizaci provozních nákladů, je však nutné dosahovat těchto úspor za podmínky splnění limitů hodnot dané legislativou, a to nařízením vlády č. 401/2015 Sb. (viz tabulka níže), pokud se jedná o vypouštění odpadní vody do vod povrchových, resp. nařízením

Tabulka 4-3 Přípustné znečištění povrchových vod

Kategorie ČOV (EO) nebo velikost aglomerace	CHSK _{Cr}		BSK ₅		NL		N-NH ₄ ⁺		N _{celk}		P _{celk}	
	p	m	p	m	p	m	průměr	m	průměr	m	průměr	m
<500	150	220	40	80	50	80	-	-	-	-	-	-
500 - 2 000	125	180	30	60	40	70	20	40	-	-	-	-
2 001 - 10 000	120	170	25	50	30	60	15	30	-	-	3	8
10 001 - 100 000	90	130	20	40	25	50	-	-	15	30	2	6
>100 000	75	125	15	30	20	40	-	-	10	20	1	3

Zdroj: vlastní zpracování, TZB-INFO

¹³⁹ SMART WATER MAGAZINE, 2022. *How does digital transformation reduce costs in the water industry* [online].

vlády č. 57/2016 Sb. jsou-li odpadní vody vypouštěny do vod podzemních. Sledují se hodnoty $CHSK_{Cr}$ (chemická spotřeba kyslíku), BSK_5 (biochemická spotřeba kyslíku), NL (nerozpuštěné látky sušené při 105 °C, odpovídají usaditelnému podílu odpadních vod), $N-NH_4^+$ (obsah amoniakálního dusíku v odpadních vodách), N_{celk} (celkový obsah dusíkatých látek v odpadní vodě) a P_{celk} (celkový obsah chemických forem fosforu v odpadních vodách). Přehled zobrazuje Tabulka 4-3.

Potenciál optimalizace procesů probíhajících na čistírně nalézt např. v procesu SRT (solid retention time), aeračním poměru (aeration rate) a průtoku vnitřního recyklátu (internal recycle flow rate). Optimalizační metody využitelné v digitální dvojčeti se neobejdou bez matematického modelování, dvě základní složky modelů jsou biologické reaktory a hydraulická složka (objemy nádrží a chování průtoků). Používají se modely vyvinuté institucí International Water Association (IWA), jak o ASM1, ASM2, ASM2d a ASM3.¹⁴⁰

SRT je v článku vybrán z důvodu možných úspor při:

- Aeraci (dmychadla)
- Čerpání
- Dávkování chemikálií

Provoz kalové linky s sebou nese náklady na:

- energii potřebnou k odvodnění kalu
- Chemikálie
- Náklady na likvidaci kalu

Zároveň je zmíněna nepřímá úměra: při zvýšení času SRT v rámci čistící linky roste potřeba kyslíku na provzdušnění, klesá množství kalu přicházejícího do kalové linky, a tedy klesají i náklady na provoz kalové linky, a naopak. Je tedy důležité najít určité optimum. Přehled sledovaných veličin viz Tabulka 4-4

Autoři v článku definovali parametry nákladů na aeraci v rámci SRT, které pro inspiraci uvádím v tabulce níže. Nicméně do SRT nezahrnují náklady na provoz čerpadel, které nejsou, dle autorů, na SRT závislé. Nalezené úspory činily 44 165 EUR/rok v létě a 93 110 EUR/rok¹⁴¹ v zimě.

¹⁴⁰ MUOIO, Roberta, Laura PALLI, Iacopo DUCCI, Ester COPPINI, Elena BETTAZZI, Daniele DADDI, Donatella FIBBI a Riccardo GORI, 2019. *Optimization of a large industrial wastewater treatment plant using a modeling approach: A case study* [online].

¹⁴¹ tamtéž

Tabulka 4-4 Tabulka sledovaných veličin ve studii Muia

Parametr	Jednotka
Cena Energii	EUR/ kWh
Cena polyelectrolytů	EUR/kg
Dávka polyelectrolytů	g/KgSS
Cena metanu	EUR/Nm ³
Spotřeba metanu	Nm ³ /kgSS
Náklady na odpad (popel)	EUR/kg

Zdroj: vlastní zpracování, Muio (2019)

Procesem aerace se zabývá i studie Stentofta et al. nazvaná *Prioritize effluent quality, operational costs or global warming? – Using predictive control of wastewater aeration for flexible management of objectives in WRRF* se zaměřením na modelování čtyř modelových scénářů: minimalizace koncentrace látek v odpadní vodě, spotřeby energie, celkových provozních nákladů (případně včetně daně z vypouštění odpadních látek) a dopad na životní prostředí, resp. vypouštění skleníkových plynů (přímé a nepřímé emise oxidu dusného N₂O a nepřímo z produkce elektrické energie). Využívají k tomu algoritmu modelu prediktivního řízení (MPC)¹⁴². Studie mj. uvádí že aerace spotřebovává až 50 % celkové spotřeby elektrické energie čistící stanice.

Z výše uvedených příkladů a odborné literatury, je patrné, že procesy v čistírnách odpadních vod jsou velmi komplexní a je potřeba využít sofistikovaného matematického modelování. Je potřeba vydefinovat klíčové proměnné, které může DT ovlivnit, resp. podle kterých je možné hodnotit efektivitu digitálního dvojčete. Hlavní tzv. KPI (key performance indicators) lze definovat takto:

- Spotřeba elektrické energie kWh/rok
- Cena elektrické energie Kč /rok
- Náklady na chemikálie / množství chemikálie Kč/rok
- Náklady na údržbu / úspory při využívání prediktivní údržby Kč /rok
- Pokuty ze strany legislativních orgánů Kč/rok
- Kvalita vyčištěné vody (dle výše uvedených parametrů)

¹⁴² STENTOFT, P.A., T. MUNK-NIELSEN, J.K. MØLLER, H. MADSEN, B. VALVERDE-PÉREZ, P.S. MIKKELSEN, a L. VEZZARO, 2021. *Prioritize effluent quality, operational costs or global warming? – Using predictive control of wastewater aeration for flexible management of objectives in WRRFs* [online].

- Objem vyčištěné vody m³/rok

Z ekonomického pohledu bude vlastníka nebo provozovatele zajímat, za jak dlouho se mu investice (payback period, *PBP*) do digitálního dvojčete vrátí, a jestli vůbec má investice smysl, či návratnost investice (*ROI*).

Ukazatel *ROI* je pro svůj jednoduchý výpočet oblíbený a zobrazuje poměr mezi čistým ziskem k investovanému kapitálu. Používá se pro rychlé vyhodnocení či porovnání investice. Jeho nevýhodou však je, že nezohledňuje časovou hodnotu peněz a také délku investice, případně další proměnné vstupující do průběhu investice, jako údržbu, konzultace, nastavení, zaškolení údržby a podobně. Obecně se vypočítá se jako poměr zisku z investice k vynaložené investici:

$$ROI = \frac{Zisk - investice}{Investice} * 100 \quad (1)$$

V tomto případě, lze použít poměr úspory nákladů k výši investice. Důležité je určit, pro který rok je *ROI* počítán, protože v prvním roce by byl výdaj nejvyšší a s dalšími roky provozu by byly placeny poplatky za datové přenosy, licence atd. Ve vzorci je rok je znázorněn indexem *t*. Pro výpočty v této studii se však *ROI* nejeví jako vhodný ukazatel.

$$ROI(t) = \frac{Úspora\ nákladů}{Investice} * 100 \quad (2)$$

Dobu, za kterou se investice do technologie vrátí je definovaná jako doba návratnosti investice (payback period, *PBP*), a často se počítá v letech. Je používána investory pro rychlé vyhodnocení investice. Jakmile je investice splacena dochází k bodu zlomu. Čím je doba návratnosti kratší, tím je investice zajímavější. Nezahrnuje výhody plynoucí po uplynuté době a neměří ziskovost. Zároveň nezohledňuje měnící se hodnotu peněz v čase. Většina ostatních metrik, jako NPV (Net Present Value – současná čistá hodnota), IRR (Internal Rate of Return – vnitřní míra návratnosti) a diskontované cash flow, časovou hodnotu peněz zohledňují. Počítá se jako náklad na investici podělený průměrnému ročnímu cash flow. V tomto případě budou náklady na investici děleny ročními úsporami, které díky digitálnímu dvojčeti je možno uspořit.

$$PBP = \frac{Náklad\ na\ investici}{Průměrná\ roční\ úspora\ díky\ DT} \quad (3)$$

Tento základní ukazatel bude použit k zhodnocení doby návratnosti investice do digitálního dvojčete. Náklad na investici lze v tuto chvíli pouze odhadnout a bude se

v každém jednotlivém projektu lišit. Aspekty vstupující do cenotvorby DT jsou popsány výše.

4.6 Praktický výpočet potenciálně dosažitelných úspor na dané infrastruktuře

Pro výpočet potenciálně dosažených úspor bude potřeba náklady odhadnout. V tuto chvíli společnosti, které toto řešení nabízí, zatím získávají zpětnou vazbu z trhu z prvních realizací a obchodní modely vznikají. Odhadované náklady se tedy mohou lišit. Je nutné upozornit, že se jedná pouze o odhad: v tuto chvíli nejsou výše cen veřejné a ani není možno je šířit. Bylo testováno několik scénářů odhadů cen, viz Tabulka 4-5 níže.

Tabulka 4-5 Scénáře odhadovaných nákladů, vlastní zpracování

Položka	Odhadované náklady Scénář 1.	Odhadované náklady Scénář 2.	Odhadované náklady Scénář 3.	Jednotky
Digitalizace infrastruktury	12	15	20	mil. Kč
Implementace SW nástrojů a jejich kalibrace	5	50	100	mil. Kč
Tvorba uživatelského rozhraní	0,85	0,85	0,9	mil. Kč
Zprovoznění/zaškolení	0,65	0,8	0,8	mil. Kč
SME poplatky ¹⁴³ / Datové přenosy	0,35	0,5	0,6	mil. Kč/ročně
Celkem	18,85	67,15	122,3	mil. Kč

Zdroj: vlastní zpracování, Muio (2019)

Vzhledem k tomu, že aktuální projekty jsou teprve ve fázi vyhodnocování, využijí dostupných literárních zdrojů a modelují použití DT na reálných datech čističky odpadních vod. Bude potřeba vycházet ze zmiňované studie Stentofta et al. z roku 2021, viz. výše. Z této studie je možné alespoň orientačně odhadnout úspory při použití modelu

¹⁴³ Small and medium enterprise poplatky za využití software – roční předplatná – například: SIEMENS. *Insights Hub IIoT Data Package S* [online].

prediktivního řízení¹⁴⁴. Studie byla vypracována na ČOV Nørre Snede (Dánsko) a zmiňuje zajímavé informace i z globálního pohledu: Odhadem 2-3 % světové spotřeby elektrické energie spotřebuje výroba pitné vody a nakládání s vodou odpadní. A může znamenat 1-18 % dle různých obydlých regionů. Čističky odpadních vod spotřebují až 1 % elektrické energie každé země. Například v Kalifornii se čističky podílejí ročně na produkci 372 kg CO₂ na hlavu, což odpovídá 4 % celkové produkce emisí na hlavu.¹⁴⁵

Studie se zaměřuje na optimalizaci a řízení aeračního procesu díky modelu prediktivního řízení (MPC) založený na reálných datech, který vyžaduje až 50 % spotřeby energie čističky, a který se také významně podílí na její celkové uhlíkové stopě. Proto pro snížení nákladů na provoz čističky se mj. klade důraz na snížení odběru elektrické energie ve špičce. Pro maximalizování účinnosti aeračního procesu je nutno brát v potaz, kromě nákladů na elektrickou energii, také dodržení legislativních limitů odpadních vod. Snížení spotřeby elektrické energie však ještě neznamená snížení provozních nákladů, a to z toho důvodu, že ceny elektrické energie se liší mimo tzv. energetickou špičku a ve špičce. Monitoring emisí CO₂ by mohl být potřeba, pokud by v budoucnu zavedena emisní daň. V tomto příkladu však výpočty emisí CO₂ nebudou součástí studie.

Model prediktivního řízení ve dánském případě vyhodnocuje a porovnává čtyři scénáře minimalizace koncentrace dusíkatých látek při odtoku z čističky, spotřeby elektrické energie, celkových provozních nákladů a dopad na globální oteplování (viz. výše). Model byl testován v provozu 51 dní a pracuje s dvaceti čtyřhodinovou predikcí cen energií, skleníkových plynů (včetně CO₂) a koncentrací dusíkatých látek na výstupu ČOV.

Studie uvádí, že model prediktivního řízení pro optimalizování nákladů z ČOV dokáže snížit celkové náklady o 9,2 % oproti současně používanému modelu rule based control (RBC) - řízení založeném na pravidlech. Dále autoři porovnávají způsob řízení MPC zaměřeného na optimalizaci nákladů s výstupy řízení zaměřené na optimalizující dopad na životní prostředí a řízení optimalizující koncentraci dusíkatých látek na odtoku čističky. Jednotlivé porovnání úspor zobrazuje Tabulka 4-6 níže (vždy se jedná a vyjádření „o kolik by způsob řízení zaměřený na optimalizaci nákladů levnější než ...“).

¹⁴⁴ STENTOFT, P.A., T. MUNK-NIELSEN, J.K. MØLLER, H. MADSEN, B. VALVERDE-PÉREZ, P.S. MIKKELSEN, a L. VEZZARO, 2021. *Prioritize effluent quality, operational costs or global warming? – Using predictive control of wastewater aeration for flexible management of objectives in WRRFs* [online].

¹⁴⁵ Tamtéž.

Tabulka 4-6 Porovnání různých scénářů ze studie Stentofta

	Řízení optimalizující potenciál dopadu na globální oteplení	Řízení optimalizující koncentrace dusíkatých látek	Současný způsob řízení RBC
Řízení optimalizující náklady	19,20%	29,60%	9,20%

Zdroj: vlastní zpracování, Stentoft (2021)

Pro účel této práce budou využity uvedené údaje a bude vyhodnoceno, jaká je úspora a návratnost, pokud by bylo dosaženo této výše úspor nákladů.

Studie však již neuvádí, co vše do provozních nákladů zahrnuje, do úvahy jsou pro účel této práce zahrnuty následující položky, u kterých existuje předpoklad, že úsporu ovlivní – materiál (chemikálie, ostatní materiál), energie (elektrická energie, ostatní energie) a provozní náklady, vše shrnuto v Tabulka 4-7.

Tabulka 4-7 Skutečné náklady z údaj anonymizované vodohospodářské společnosti

Skutečné náklady pro výpočet stočného (r. 2019)	Měrná jednotka
Materiál	2,95 mil. Kč
Energie	5,50 mil. Kč
Provozní náklady	23,80 mil. Kč
Celkem	32,25 mil. Kč

Zdroj: vlastní zpracování, výpočet stočného anonymizované společnosti (2019)

4.7 Návratnost investice v různých časových horizontech

Ve scénáři 1. (investice ve výši 18,85 mil Kč) bude činit roční úspora 9,2 % po propočítání tedy 2,97 mil. Kč. Výše optimalizovaných celkových nákladů podle vzorce výše tedy bude 29,28 milionů korun. Tyto údaje dosadím do obou vzorců (pro návratnost investice uvažuji první rok):

$$ROI(1) = \frac{2,97}{18,85} * 100 = 15,76 \quad (4)$$

$$PBP = \frac{18,85}{2,97} = 6,23 \text{ let} \quad (5)$$

Z toho vyplývá, že ukazatel návratnosti *ROI*, je pro tento příklad nevyhovující, resp. nicneříkající. Pro scénář 2 (investice ve výši 67,15 mil. Kč) a scénář 3. (investice ve výši

122,3 mil. Kč) bude orientační doba návratnosti investice 22,6 let, resp. 41,18 let (viz výpočty níže).

$$PBP(\text{scénář 2}) = \frac{67,15}{2,97} = 22,6 \text{ let} \quad (6)$$

$$PBP(\text{scénář 3}) = \frac{122,3}{2,97} = 41,18 \text{ let} \quad (7)$$

Při výši úspor 9,2 % ročně se doba návratnosti 6 a čtvrt roku při výši investice 18,85 mil. Kč jeví, jako velmi dobrá. Je-li uvažována výše investice 67,15 mil. Kč, bude při stejné procentuální výši úspor doba návratnosti investice 22 a půl roku. Technologie ve vodohospodářství se do vodárenství a vodohospodářství pořizuje s vizí životnosti v dlouhodobém období (10-20 let), zde by bylo důležité zvážit, zda investice dává smysl. Pravděpodobně však během období životního cyklu dvojčete bude docházet k optimalizaci a aktualizaci softwarových nástrojů, s čímž je potřeba počítat, a lze očekávat, že s postupem technologie budou výsledky úspor příznivější. S aktualizací softwarů lze očekávat vícenáklady na digitální dvojče. Doba návratnosti investice podle třetího scénáře se jeví jako příliš vysoká. Tak vysoká investice by pravděpodobně byla vhodnější pro ČOV o větší kapacitě, kde lze očekávat vyšší úspory.

Vzorec výpočtu doby návratnosti investice je nutno doplnit o vliv nákladů na licence a SME poplatky. Tento výpočet nebude zohledňovat růst nákladů v budoucnu, ale měl by poskytovat přesnější přehled o době návratnosti investice a brát v úvahu platby za licence a poplatky. Vycházet bude z klasického vzorce:

$$PBP = \frac{\text{Náklad na investici}}{\text{Průměrná roční úspora díky DT}} \quad (8)$$

Náklad na investici bude dosazen bez poplatků licencí SME a bude odečten od průměrné roční úspory, protože s každým rokem bude provozovatel muset poplatky pravidelně hradit. Vzorec nyní bude mít tvar:

$$PBP = \frac{\text{Náklad na investici bez SME}}{\text{Průměrná roční úspora – poplatky SME}} \quad (9)$$

Upravený vzorec bude použit pro první scénář, a tedy s následujícími údaji: výše investice bez SME poplatků bude činit 18,5 mil. Kč, výše poplatků 0,35 mil. Kč, provozní náklady ČOV ve výši 32,25 a uvažovaná úspora 9,2 %.

$$PBP \frac{18,5}{32,25 * 0,09 - 0,35} = 7 \text{ let} \quad (10)$$

Nyní lze přesnější propoččet použít i na další dva uvedené scénáře, představující rozdílné hodnoty vstupů – položek rozpočtu dvojčete:

$$t(\text{scénář 2}) = \frac{66,65}{32,25 * 0,09 - 0,5} = 27,7 \text{ let} \quad (11)$$

$$t(\text{scénář 3}) = \frac{121,7}{32,25 * 0,09 - 0,6} = 51,4 \text{ let} \quad (12)$$

Čím je investice vyšší, tím se logicky prodlužuje se i doba návratnosti investice. Díky aktualizovanému vzorci lze efektivněji počítat různé varianty.

Jak by vypadala doba návratnosti investice, pokud by se výše úspor povedla zvýšit na 15 %, pokud uvažována investice do digitálního dvojčete ve výši 55 mil. Kč při stejné výši nákladů, zatímco poplatky a licence by se zvýšily na 1 mil. Kč?

$$PBP = \frac{55}{32,25 * 0,15 - 1} = 14,33 \text{ let} \quad (13)$$

Vypočtený doba návratnosti činí 14 a čtvrt roku.

Vzorec lze samozřejmě použít i reverzně při zvažování ostatních proměnných. Například: jak vysoká investice do DT čistírny, při dané výši nákladů, bude splacena po 10 letech?

Vytknutím proměnné *Náklad na investici bez SME* je vzorce získán tvar rovnice:

$$\begin{aligned} \text{Náklad na inv. bez SME} &= PBP * (\text{Prům. roční úspora} - \text{SME}) \\ &= 26,17 \text{ mil. Kč} \end{aligned} \quad (14)$$

Výsledek tedy bude činit 26, 17 mil. Kč a do této sumy nejsou započítány poplatky v následujících letech za softwarové licence a SME.

Nevýhody statistických ukazatelů jsou zmíněny výše. Protože s běžícími léty investice se budou lišit náklady na provoz, ceny vstupů (množství, inflace) a zároveň bude vlastníkov/provozovateli běžet roční paušální platby za poplatky z datových přenosů, či licencí, pomocí predikce vývoje nákladů a na základě dat bude vytvořena alternativa k výpočtu PBP. Přestože jsou k dispozici data pouze k roku 2019, bude vypočten trend z vývoje nákladů vodohospodářské společnosti, která vybranou ČOV provozuje a poměrově odhadnut vývoj nákladů vybrané ČOV. K dispozici jsou data z výročních zpráv společnosti za tři období. K vytvoření věrnější predikce trendu by bylo zapotřebí mít k dispozici údaje za dlouhodobější období, zde bude nutné si vystačit se třemi obdobími, alespoň pro orientační propoččet.

Celkové náklady vodohospodářské společnosti za období zobrazuje Tabulka 4-8.

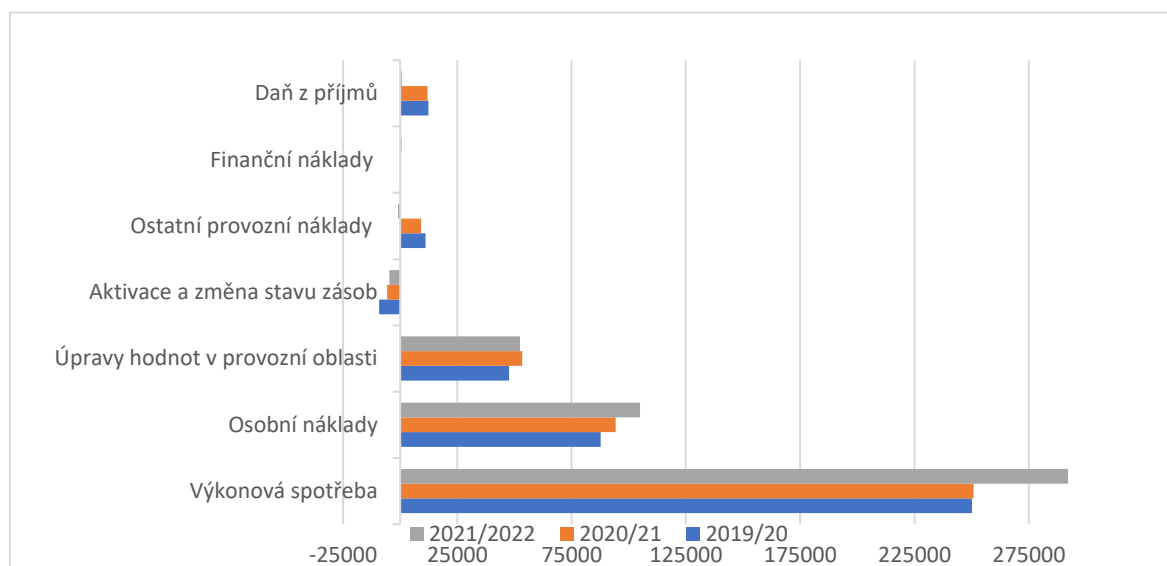
Tabulka 4-8 Skutečné náklady vodohospodářské společnosti, zaokrouhleno

Náklady v tis. Kč	2019/20	2020/21	2021/2022
Výkonová spotřeba	250099	250863	292162
Osobní náklady	87727	94286	104931
Úpravy hodnot v provozní oblasti	47665	53356	52413
Aktivace a změna stavu zásob	-9150	-5778	-4682
Ostatní provozní náklady	11085	9108	-1004
Finanční náklady	348	260	615
Daň z příjmů	12344	11899	741
Náklady celkem	400108	416994	455176
Procentuální nárůst výkonové spotřeby	-	0,305%	16,463%

Zdroj: vlastní zpracování, výroční zprávy anonymizované společnosti

Pro zpřehlednění je zobrazena struktura nákladů vodohospodářské společnosti v přehledném grafu (Graf 4-1), ze kterého je patrné, že největší podíl na nákladech tvoří výkonová spotřeba, a to zhruba od 60-64 % v období 2020-2022. Výkonová spotřeba zahrnuje náklady na spotřebu materiálu, energie a ostatních neskladovatelných dodávek a spotřebované dodávky výrobků, výkonů a služeb externích dodavatelů¹⁴⁶.

Graf 4-1 Struktura nákladů celé vodohospodářské společnosti

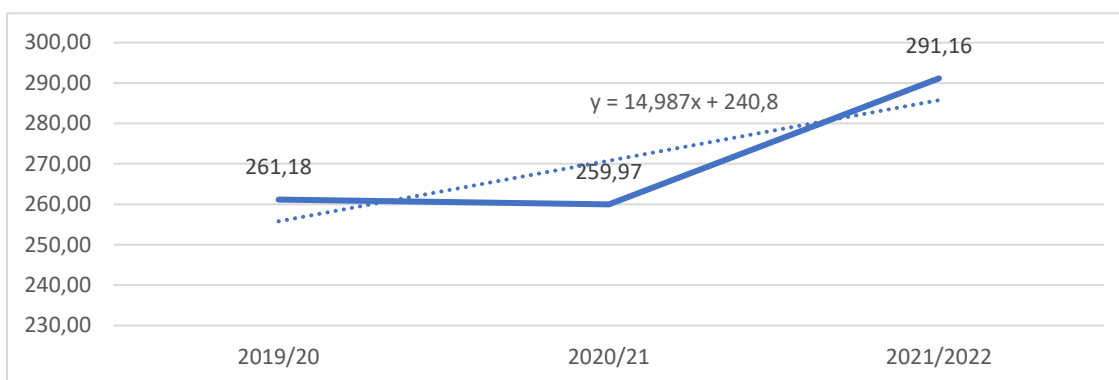


Zdroj: vlastní zpracování, výroční zprávy anonymizované společnosti

¹⁴⁶ ČESKÝ STATISTICKÝ ÚŘAD. *Metodické vysvětlivky* [online].

Výše nákladů pro následující období pro danou ČOV je dispozici pouze z roku 2019. Z výročních zpráv společnosti (které však zahrnují veškerou vodohospodářskou infrastrukturu– vodovodní a kanalizační síť, úpravny vody, kanalizační čerpací stanice, vodojemy a v neposlední řadě také více čistíren odpadních vod) jsou vypočteny nejprve celkové provozní náklady (výkonová spotřeba + ostatní provozní náklady) celé vodohospodářské společnosti. Z údajů z období 2019/2020–2021/2022 pak lze odhadnout trendovou funkci (viz Graf 4-2) celkových provozních nákladů.

Graf 4-2 Trendová funkce vývoje nákladů vodohospodářské společnosti



Zdroj: vlastní zpracování, výroční zprávy anonymizované společnosti

Trendová funkce vyplývající z grafu celkových provozních nákladů bude mít tvar:

$$y = 14,987 * x + 240,8 \quad (15)$$

Pomocí trendové funkce je dále možné predikovat vývoj celkových provozních nákladů pro další období (propočten znázorňuje Tabulka 4-9). Výpočet nezohledňuje inflaci cen vstupů (elektrická energie, chemikálie, atd), či investice do infrastruktury, optimalizaci infrastruktury apod. Z předchozího roku a roku následujícího je v následujícím kroku vypočten procentuální rozdíl celkových provozních nákladů a tento rozdíl aplikován na data pro konkrétní ČOV. Orientační propočten viz Tabulka 4-10 a Tabulka 4-11.

Scénář, který v literatuře zohledňuje řízení ČOV dle modelu prediktivního řízení, počítá s 9,2 % úsporou oproti standardnímu řízení. Po výpočtu této výše úspory jsou kumulativně dopočteny úspory i v následujících letech a zahrnuté do tzv. „čisté úspor bez poplatků“, která zohledňuje úsporu očištěnou o poplatky za licence SME. V prvním roce investice nejsou odečteny náklady na poplatky, ale jsou zahrnuty do celkové výše investice. Je-li uvažována investice ve výši 18,85 mil. Kč., pak při úspoře 9,2 % je bod zlomu přibližně 7 let, což zhruba odpovídá vypočtené hodnotě doby návratnosti investice

(payback period) vypočtené za použití výpočtu PBP. Od tohoto bodu již digitální dvojče a model prediktivního řešení generuje úspory vlastníkově či provozovateli čističky odpadních vod.

Tabulka 4-9 Odhad nákladů vodohospodářské společnosti a ČOV pro období 2019/20-2030/31

Náklady v mil. Kč	2019 /20	2020 /21	2021 /22	2022 /23	2023 /24	2024 /25
Období - x	1	2	3	4	5	6
Provozní náklady celkem (Vodohosp. Společnost)	261,18	259,97	291,16	300,75	315,73	330,719
Procentuální rozdíl	-	-0,46%	12,00%	3,29%	4,98%	4,75%
Odhadované provozní náklady konkrétní ČOV	32,25	32,10	35,95	37,13	38,99	40,84
Náklady v mil. Kč	2025 /26	2026 /27	2027 /28	2028 /29	2029 /30	2030 /31
Období - x	7	8	9	10	11	12
Provozní náklady celkem (Vodohosp. Společnost)	345,71	360,69	375,68	390,67	405,65	420,64
Procentuální rozdíl	4,53%	4,34%	4,16%	3,99%	3,84%	3,70%
Provozní náklady konkrétní ČOV	42,69	44,54	46,39	48,24	50,09	51,94

Zdroj: vlastní zpracování

Tabulka 4-10 Odhad úspor ČOV při využití MPC v digitálním dvojčeti, období 2019/20-2024/25 vlastní zpracování

Náklady v mil. Kč	2019/2 0	2020/2 1	2021/2 2	2022/2 3	2023/2 4	2024/2 5
Období - x	1	2	3	4	5	6
Provozní náklady konkrétní ČOV	32,25	32,10	35,95	37,13	38,99	40,84
Hrubá úspora při MPC - scénář kontrola nákladů 9,2%	2,97	2,95	3,31	3,42	3,59	3,76
Roční poplatky SME/datový přenos (fixní)	0	0,35	0,35	0,35	0,35	0,35
Čistá úspora při MPC (bez poplatků)	2,97	2,60	2,96	3,07	3,24	3,41
Čistá úspora při 9,2 % kumulativně (bez poplatků)	2,97	5,57	8,53	11,59	14,83	18,24

Zdroj: vlastní zpracování

Tabulka 4-11 Odhad úspor ČOV při využití MPC v digitálním dvojčeti, období 2025/26-2030/31

Náklady v mil. Kč	2025 /26	2026 /27	2027 /28	2028 /29	2029 /30	2030 /31
Období - x	7	8	9	10	11	12
Provozní náklady konkrétní ČOV	42,69	44,54	46,39	48,24	50,09	51,94
Hrubá úspora při MPC - scénář kontrola nákladů 9,2%	3,93	4,10	4,27	4,44	4,61	4,78
Roční poplatky SME/datový přenos (fixní)	0,35	0,35	0,35	0,35	0,35	0,35
Čistá úspora při MPC (bez poplatků)	3,58	3,75	3,92	4,09	4,26	4,43
Čistá úspora při 9,2 % kumulativně (bez poplatků)	21,81	25,56	29,48	33,57	37,83	42,25

Zdroj: vlastní zpracování

4.8 Tabulka návratností investice dle výše potenciální úspor

Díky upravenému vzorci PBP (doby návratnosti investice) je možné vytvořit orientační tabulku návratností při různém časovém horizontu návratnosti investice (viz Tabulka 4-12). Maximální doba investice je pro účel práce zvolena 15 let a uvažuje se úhrada pouze z úspor digitálního dvojčete. Je možné vzít v úvahu, že digitální dvojče je softwarové řešení, které se v průběhu času bude dále vyvíjet a vývoj bude postupovat mílovými kroky vpřed. Dá se očekávat, že v průběhu životního cyklu může dojít k různým aktualizacím, které budou mít pozitivní vliv na úsporu dvojčete, avšak budou pravděpodobně vyžadovat další náklady s nimi spojené.

Pro účel této práce byla výše úspor odhadnuta dle provozních nákladů čističky odpadních vod. Celkové provozní náklady činily 32,25 mil. Kč. Odhad výše úspory při nasazení modelového prediktivního řízení byl převzat z dánské studie, která zjistila na dánské aplikaci úsporu 9,2 % v provozních nákladech oproti stávajícímu způsobu řešení. Licenční poplatky byly odhadnuty na 350 tis. Kč / ročně.

Byly vypočteny varianty pro výši úspory 9,2 %, 15 % a 20 %, pokud by použitím digitálního dvojčete došlo k vyšší úspoře energií, nákladů na údržbu díky prediktivní údržbě, chemikálie atp. Příklad ze španělské úpravný pitné vody ilustrovaný v textu výše uvádí úsporu až 15 % na energiích a 20 % na údržbě.

Do výpočtu nejsou zahrnuty různé variace např. dle velikosti čističky odpadních vod, či použité technologie čištění apod.

Tabulka 4-12 Tabulka scénářů investičních nákladů a doby návratnosti investice

PBP= počet let	Výše úspory po nasazení Digitálního dvojčete v mil. Kč a letech při výši poplatků za licence 350 tis. a provozních nákladech 32,25 mil. Kč		
	9,2 %	15 %	20 %
1	2,62	4,49	6,10
2	5,23	8,98	12,20
3	7,85	13,46	18,30
4	10,47	17,95	24,40
5	13,09	22,44	30,50
6	15,70	26,93	36,60
7	18,32	31,41	42,70
8	20,94	35,90	48,80
9	23,55	40,39	54,90
10	26,17	44,88	61,00
11	28,79	49,36	67,10
12	31,40	53,85	73,20
13	34,02	58,34	79,30
14	36,64	62,83	85,40
15	39,26	67,31	91,50

Zdroj: vlastní zpracování

5 Výsledky a diskuse

Celkový potenciál globálního trhu digitálních dvojčat do roku 2026 je odhadován na 48 miliard amerických dolarů¹⁴⁷, není překvapením, že již nyní je celá řada softwarů od předních hráčů nabízející funkcionalitu digitálních dvojčat. Konkrétně digitálním dvojčatům ve vodohospodářství a na čistících stanicích odpadních vod se otvírá trh. V jiných odvětvích průmyslu, jako je např. automotive, je jejich využití již stále běžnější záležitostí. Ačkoli je vodohospodářství konzervativní obor, i zde vznikají zajímavé projekty aplikace této technologie. Mezi prvními projekty nasazení digitálních dvojčat jsou převážně úpravny vod, které upravují vodu pro běžné použití i konzumaci. Tyto aplikace jsou převážně jednoduché a proces digitalizace je tak snadnější než u komplexních procesů probíhajících na čističkách odpadních vod, což je výzvou. Nicméně i v oblasti čistíren odpadních vod již pilotní projekty vznikají a Česká republika není výjimkou. U nás probíhají aktuálně tři projekty, které jsou v tuto chvíli ve fázi testování a přibližně za rok by mohly být k dispozici první výstupy. Na projektech pracují akademičtí pracovníci spolu se soukromými společnostmi, kteří aplikace vyvíjejí. V budoucnu budou dvojčata komercializována a zařazena do portfolií společností nabízející softwarová řešení.

V teoretické části byla technologie digitálních dvojčat nejprve zařazena do širšího kontextu vodohospodářství a popsány procesy, které ve vodohospodářství probíhají. Dále byl představen koncept Smart Water, popsán sběr dat, shrnuta legislativa a v neposlední řadě také popsána technologie digitálních dvojčat a její náležitosti. Literárních zdrojů zatím není mnoho, nicméně s postupem a rozvojem technologie nové stále přibývají. Samotná definice digitálního dvojčete není jednotná, a v mnoha člancích se shoduje mnoho autorů na tomto faktu. Nicméně pro účely této práce lze digitální dvojče chápat jako digitální reprezentaci reálného světa, která využívá algoritmy a predikce k modelování různých "scénářů" na základě sbíraných dat. Tato digitální reprezentace umožňuje operátorům poskytovat informace pro informovaná rozhodnutí, školit pracovníky, plánovat odstávky technologií pro účely údržby, optimalizovat procesy za účelem snížení spotřeby elektrické energie v čistírnách a podobně.

S ohledem na očekávaný růst populace, trend urbanizace, a rostoucí tlak na ekologicky šetrný provoz vodohospodářských zařízení, lze očekávat rostoucí potřebu

¹⁴⁷ SARTORIUS, 2021. *Opportunities for Digital Twins in Bioprocess Development* [online].

digitálních dvojčat v tomto období. Na vodohospodářství, jakožto kritickou infrastrukturu bude mít vliv i nově vstupující směrnice EU NIS2, která nastavuje rámec pro IT bezpečnost v důležitých sektorech, a CRA, která sjednocuje požadavky na výrobce digitálních produktů. Je potřeba klást důraz na kybernetickou bezpečnost, definovat procesy a pravidla směřující k maximálně zabezpečenému prostředí, a to vzhledem k faktu, že se jedná o kritickou infrastrukturu. Je nezbytné sledovat právní normy, které tuto oblast upravují.

Praktické části práce byl zaměřena na zhodnocení návratnosti využití digitálních dvojčat na úrovni případové studie. Aktuálně probíhá prvotní testování dvojčat v České republice a výsledky budou k dispozici až po plánované obhajobě této práce. Aktuální data tedy nejsou k dispozici, navíc jsou tajná (know-how společnosti). Práce je tedy postavena na studii využití modelu prediktivního řízení na dánské čističce, které byla komparována s daty konkrétní místní ČOV. Dánský příklad uvádí několik scénářů s různými sledovanými klíčovými ukazateli, které vykazovaly vysoké úspory i nefinanční povahy. Například snížení skleníkových plynů – to však ale neznamenalo nutně úsporu nákladů. Pro výpočet byl použit ukazatel celkových provozních nákladů (vykazoval úsporu 9,2 %). Úspora byla modelována na ekonomických datech vybrané ČOV. Tato data byla získána z výročních zpráv a předpisů pro výpočet vodného a stočného. Náklady na pořízení digitálního dvojčete čističky byly pro účel práce odhadnuty (pro výpočet návratnosti, doby návratnosti a předpokládaných úspor v časovém horizontu několik let dopředu). V práci byly uvažovány tři varianty cenových hladin digitálního dvojčete, a to 18,85 mil. Kč, 67,15 mil. Kč a 122,3 mil. Kč. Pro, které byla vypočítána doba návratnosti za použití standardního vzorce s výsledky PBP (payback period) 7 let, 22,6 let a 41,2 let. Výpočet dále rozšířen o vliv paušálních ročních poplatků za SW licence s výsledky 7 let, 27,7 let a 51,4 let, které budou samozřejmě nákladem i po splacení investice a jejich výše se vlivem inflace může měnit, nicméně alespoň jako orientační propočtení. Po době splacení investice budou poplatky hrazeny z úspory z využití digitálního dvojčete (výši poplatků odhadujeme a 350 tis. až 1 milion Kč ročně). Zde je důležité, aby očekávaná roční úspora byla vyšší než cena paušálních poplatků.

V dalších krocích práce byla vypočtena doba návratnosti investice, za předpokladu, že nasazená technologie uspoří 15 % provozních nákladů, výše poplatků za SW licence bude 1 mil. Kč a k dispozici bude mít provozovatel/vlastník infrastruktury na investici 55 mil. Kč, výsledkem propočtu byla doba splacení 14 a čtvrt roku. Vzhledem

k dlouhodobosti investic ve vodohospodářském sektoru (předpokládají-li se požadavky co nejvyšší životnost technologie – 10-20 i více let), lze očekávat, že je tato investice reálná. Z výročních zpráv společnosti z let 2017/2018-2021/2022 lze vyčíst investice do ČOV spadajících do vlastnictví vodohospodářské infrastruktury běžné roční investice v hodnotě 12-16 mil. Kč na rekonstrukce infrastruktury, obnovu apod. Celkové investice Vodohospodářské společnosti v rámci celé vodohospodářské sítě činily v průběhu sledovaného období částky 60 až 77 mil. Kč ročně. Investice do digitálního dvojčete a modelu prediktivního řízení by po splacení navíc přinesla společnosti úsporu na nákladech (v tomto případě 15 %). V tuto chvíli nelze odhadnout, jakou rychlostí se budou technologie v budoucnu měnit a jaké budou požadavky na aktualizace a zdali lze očekávat spolu s aktualizacemi také vícenáklady (resp. v jaké výši).

V závěrečné části práce byla komparována výše úspor, resp. doba návratnosti investice, při výši celkových provozních nákladů 32,25 mil. Kč., poplatků za licence ve výši 350 tisíc Kč a pro kategorie potenciálních úspor při nasazení digitálního dvojčete při 9,2 %, 15 % a 20 % úspory provozních nákladů v horizontu 1 až 15 let, pro orientační přehled při rozhodování o investici. V horizontu pěti let tak při úspoře 9,2 %, 15 % a 20 %, tak může vlastník očekávat přibližnou návratnost investice ve výši 13 mil. Kč, 22,44 mil. Kč nebo 30,5 mil. Kč. Pokud očekává návratnost 10 let, může do technologie vložit 26,17 mil. Kč, 44,88 mil Kč, popř. až 61 mil. Kč. A pokud chce investici na 15 let, je možné při zmíněných parametrech investovat 39,26 mil. Kč, 67,31 mil. Kč, ev. 91,50 mil. Kč. Po těchto časových horizontech se investice promítne do úspory provozních nákladů ČOV.

Výpočty byly provedeny na odhadu provozních nákladů reálné ČOV a je nutné je brát jako orientační.

6 Závěr

Cílem této práce bylo analyzovat potenciál digitálních dvojčat ve vodohospodářství a vodních dílech v krajině. Samotná technologie digitálních dvojčat v tak specifickém oboru, jako je vodohospodářství, je ve fázi prvotních projektů, ve kterých spolupracují často jak soukromý, tak akademický sektor. Několik takovýchto projektů je již realizováno např. v Dánsku, Singapuru, a také v České republice. Literárních zdrojů zatím není k dispozici mnoho, přesto studie probíhají, a kromě nově vydávaných knižních publikací vznikají i vědecké články věnující se tématu, ze kterých bylo čerpáno. Čističky odpadních vod jsou specifická oblast vodohospodářství, kde probíhá řada složitých chemickobiologických procesů, které jsou výzvou pro modelování. Dílčím cílem práce bylo vytvoření přehledu odborné literatury, kterou lze nalézt v literárních zdrojích v kapitole 7. Na základě těchto zdrojů byla vypracována teoretická část práce, ve které byly definovány pojmy důležité pro uvedení do problematiky. Dále je popsán obor vodohospodářství včetně procesů, a to od úpravy vody přes čištění, včetně nejdůležitější legislativy, která se k oboru váže, a trendy v oboru. Kapitola 3.1.4 se věnuje také chystaným směrnici NIS2 a CRA, které přinesou požadavky na kybernetickou bezpečnost a síťovou bezpečnost kritické infrastruktury a „digitálních“ komponent. Je popsán koncept Smart water, který využívá moderní technologie ke sběru dat z přístrojů a jejich vizualizaci. Následně se práce vysvětluje pojem a jeho definici. Součástí teoretické práce je i přehled příkladů aktuálně nasazených digitálních dvojčat u nás i ve světě.

V praktické části byla provedena orientační případová studie a ekonomické zhodnocení technologie na reálných výstupech z reálné aplikace formou komparace s výsledky ze zahraniční studie. V době psaní práce ještě nebyly dostupné výstupy z aplikací v ČR k dispozici, docházelo k jejich testování a výsledky by bylo možné očekávat nejdříve na konci roku 2024. Data budou navíc předmětem obchodního tajemství a tedy nepublikovatelná. Celkově se jedná o tak novou technologii, že k dispozici nyní nejsou ani pořizovací náklady na dvojče snadno vyčíslitelné a ceny nejsou dostupné. Každý projekt tak unikátní, že společnosti, které digitální dvojčata nabízejí nemají „katalogové“ ceny. Projekt je vždy je posuzován zvlášť a do cenotvorby vstupuje několik faktorů, například stav infrastruktury, její velikost, vybrané softwarové řešení. Vlastník či provozovat, by měl nejdříve definovat, co od digitálního dvojčete očekává. Má šetřit

náklady na elektřinu, na chemikálie, případně bude využíváno k proškolení údržby? Bude potřeba sledovat stavy zařízení pro prediktivní údržbu?

Praktická stránka práce tedy spočívá ve využití dánské studie, která využívala model prediktivního řízení pro výpočet úspor provozních nákladů, která byl přenesen na podmínky a data konkrétní ČOV v České republice. Z provozních zpráv vodohospodářské společnosti a kanalizačního řádu byly odhadnuty provozní náklady vybrané reálné ČOV (v roce 2019 činily provozní náklady 32,25 mil. Kč) a možnou výši úspor modelu prediktivního řízení (MPC). Ze studie vyplývala úspora oproti standardnímu způsobu řízení při využití MPC výše 9,2 %. Dále byly odhadnuty tři scénáře pořizovací ceny aplikace digitálního dvojčete (teoretický odhad činil 18,85 mil. Kč, 67,15 mil. Kč a 122,3 mil. Kč) a provedlen výpočet návratností investic a doby návratnosti investice (PBP), ukazatel ROI (návratnost investice) se ukázal jako nevhodný. Doby návratností investic za použití standardního vzorce PBP činily pro jednotlivé náklady na pořízení 7 let, 22,6 let a 41,2 let. Předmětem zkoumání bylo dále ověření výpočtu doby návratnosti pomocí trendové funkce vývoje nákladů ČOV z provozních nákladů celé vodohospodářské společnosti. Výpočet byl proveden pro dobu návratnosti při 9,2 % úspory, výše investice 18,82 mil. Kč a licenčních poplatcích 350 tis. Kč. s výsledkem přibližně 7 let. Výše nákladů, resp. úspory byla predikovaná do období 2030/31 podle vývoje celkových provozních nákladů společnosti za tři období, ke kterým byla k dispozici data procentuálním poměrem k výši provozních nákladů ČOV. Celkové provozní náklady totiž zahrnují veškeré provozní náklady společnosti, která spravuje celou vodohospodářskou síť, včetně úpraven vod, čerpacích stanic, kanalizace atd. Tento krok byl proveden v přehledné tabulce. Uvažované náklady na licence byly v dalším kroku zahrnuty do vzorce pro výpočet doby návratnosti investice. Na takto upraveném vzorci byl proveden propočten výše uvedených scénářů (s výsledky PBP 7 let, 27,7 let a 51,4 let) a také byla vytvořena orientační sumarizační tabulka s různou výši úspory za předpokladu použití modelu prediktivního řízení digitálního dvojčete v různých časových horizontech, která by mohla sloužit jako podklad pro rozhodování o době a výše investice. Tato tabulka počítá s předpokladem, že lze použitím modelu ušetřit 9,2 %, 15 % a 20 % provozních nákladů v horizontu 15 let a lze díky ní odhadnout výši investice a dobu její návratnosti. Například uvažuje-li investor dobu návratnosti investice 10 let, při výše uvedených variantách očekávaných úspor a stálých provozních nákladech může investovat 26,17 mil. Kč, 44,88 mil. Kč a 61 mil. Kč. Jedná se však v tuto chvíli o hrubý odhad, protože výpočet

nezohledňuje měnící se náklady dalších období, inflaci, a skutečnou výši úspor, která se může v různých obdobích lišit.

7 Seznam použitých zdrojů

Internetové zdroje:

ABB, 2021. *ABB and DHI Group join forces to create smarter, more sustainable water management solutions* [online]. [cit. 2023-10-23]. Dostupné z: <https://new.abb.com/news/detail/84125/abb-and-dhi-group-join-forces-to-create-smarter-more-sustainable-water-management-solutions>

ABB. *ABB Ability™ Smart Solution for Wastewater* [online]. [cit. 2023-10-23]. Dostupné z: <https://new.abb.com/water/abb-ability-wastewater>

ALAHÍ, Md Eshrat E. Alahi a Subhas Chandra MUKHOPADHYAY, 2019. *Smart Nitrate Sensor: Internet of Things Enabled Real-Time Water Quality Monitoring* [online]. Switzerland: Springer Nature Switzerland [cit. 2022-05-18]. ISBN 978-3-030-20095-4. Dostupné z: <https://ebookcentral.proquest.com/lib/czup/detail.action?docID=5771556>

AUTIOSALO, Juuso, Jari VEPSÄLÄINEN, Raine VIITALA a Kari TAMMI, 2020. *A Feature-Based Framework for Structuring Industrial Digital Twins* [online]. IEEE Access, 1193-1208 [cit. 2023-10-22]. Dostupné z: <https://ieeexplore.ieee.org/document/8887161> doi:10.1109/ACCESS.2019.2950507

AVEVA GROUP. *Harnessing digital twin technology benefits for new water plant designs* [online]. [cit. 2024-03-17]. Dostupné z: https://www.aveva.com/content/dam/aveva/documents/articles/Article_AVEVA_HarnessingDTWaterPlant_22-10.pdf

BENTLEY. *Digital Twins Connect The Physical And Virtual World* [online]. [cit. 2023-10-23]. Dostupné z: <https://www.bentley.com/software/digital-twins/>

BOYLES, Ryan, 2019. *How do you supply clean water to a city beneath the sea?* [online]. [cit. 2023-10-23]. Dostupné z: <https://www.ibm.com/blog/ibm-maximo-amsterdam/>

BRITTANICA. *Groundwaters* [online]. [cit. 2023-10-21]. Dostupné z: <https://www.britannica.com/science/hydrosphere/Groundwaters>

BRUNNER, Vincent, Manuel SIEGL, Dominik GEIER a Thomas BECKER, 2021. *Challenges in the Development of Soft Sensors for Bioprocesses: A Critical Review. Frontiers in Bioengineering and Biotechnology* [online]. [cit. 2023-10-22]. ISSN 2296-4185. Dostupné z: <https://www.frontiersin.org/articles/10.3389/fbioe.2021.722202/full> doi:10.3389/fbioe.2021.722202

BŘEZINOVÁ, Hana, 2013. *ESG a veřejný sektor* [online]. [cit. 2024-03-29]. Dostupné z: <https://www.dauc.cz/clanky/11877/esg-a-verejny-sektor>

CKLUB S.R.O. *Göteborg: průvodce* [online]. [cit. 2023-10-23]. Dostupné z: <https://www.cklub.cz/pruvodce/svedsko/goteborg>

CVEK, Boris, 2023. *Inflace od roku 2019 je 40 procent – a co se stalo s příjmy a výdaji státu* [online]. [cit. 2024-02-18]. Dostupné z: <https://blisty.cz/art/116289-inflace-od-roku-2019-je-40-procent-a-co-se-stalo-s-prijmy-a-vydaji-statu.html>

ČERMÁK, Jan, 2014. *Voda a průmysl* [online]. Univerzita J. E. Purkyně v Ústí n. Labem, Fakulta životního prostředí [cit. 2023-10-22]. ISBN 978-80-7414-880-4. Dostupné z: http://envimod.fzp.ujep.cz/sites/default/files/skripta/62e_final_tisk.pdf

ČESKÉ VYSOKÉ UČENÍ TECHNICKÉ V PRAZE, Fakulta stavební. *Zásobování vodou* [online]. 2007-05-24 [cit. 2023-10-22]. Dostupné z: http://hydraulika.fsv.cvut.cz/Vin/ke_stazeni/Vodarenstvi.pdf

ČESKÝ STATISTICKÝ ÚŘAD. *Metodické vysvětlivky* [online]. [cit. 2024-02-18]. Dostupné z: https://www.czso.cz/csu/czso/9004-07-v_letech_2000_az_2005-metodicke_vysvetlivky#

ČISTÁVODA S.R.O. *Úprava vody* [online]. [cit. 2023-10-22]. Dostupné z: <https://www.cistavoda.cz/uprava-vody/>

DE SOUZA, Althea, 2018. *Digital Twin-Looking Behind the Buzzwords* [online]. NAFEMS [cit. 2023-10-23]. Dostupné z: https://www.nafems.org/publications/resource_center/bm_apr_18_3/

DERRICK, Maya, 2023. *Top 10: Digital twin technologies available to data centres* [online]. [cit. 2023-10-23]. Dostupné z: <https://datacentremagazine.com/top10/top-10-digital-twin-technologies-available-to-data-centres>

DEUTSCHE GESELLSCHAFT FÜR INTERNATIONALE ZUSAMMENARBEIT (GIZ) GMBH. *Water in agriculture* [online]. [cit. 2023-10-22]. Dostupné z: <https://www.giz.de/expertise/html/60133.html>

DEY, Arin, 2020. *A Primer on Edge Computing* [online]. [cit. 2023-10-22]. Dostupné z: <https://medium.com/dataseries/a-primer-on-edge-computing-3ef550c3d84e>

DHI GROUP. *The Gothenburg region is ready for the storm* [online]. [cit. 2024-03-17]. Dostupné z: <https://www.dhigroup.com/projects/the-gothenburg-region-is-ready-for-the-storm>

DHI. *Digital Twins in the water sector: what are they and how do we get there?* [online]. [cit. 2023-10-23]. Dostupné z: <https://blog.dhigroup.com/digital-twins-in-the-water-sector-what-are-they-and-how-do-we-get-there/>

DHI. *Future City Flow* [online]. [cit. 2023-10-23]. Dostupné z: <https://www.swedenwaterresearch.se/en/projekt/future-city-flow-3/>

DHI. *TwinPlant: Save energy, cut costs and reduce your WWTP's carbon footprint* [online]. [cit. 2023-10-23]. Dostupné z: <https://www.dhigroup.com/technologies/twinplant>

DHI. *Urban Water Intelligence* [online]. [cit. 2023-10-23]. Dostupné z: <https://www.futurecityflow.com/Start>

ELEKTRO ČASOPIS PRO ELEKTROTECHNIKU, 2021. „Nice to have“? Spiš otázka ekonomicky a ekologicky zdravého rozumu [online]. [cit. 2023-10-21]. Dostupné z: <http://www.odbornecasopisy.cz/elektro/casopis/tema/energeticky-usporne-elektricke-pohony--17739>

ELLIOT, Teresa, 2021. *Digital advancements in water* [online]. [cit. 2024-03-29]. Dostupné z: <https://smartwatermagazine.com/news/bentley-systems/digital-advancements-water>

EMERSON. *Digital Twin Solutions Improve performance and safeguard operations with digital twin solutions that enable operator training and advanced testing of equipment and processes through dynamic simulation.* [online]. [cit. 2023-10-23]. Dostupné z: <https://www.emerson.com/en-us/automation/operations-business-management/dynamic-simulation/digital-twin-solutions>

ENDRLOVÁ, Radka, 2020. *Malý a velký koloběh vody. Líšnický zpravodaj* [online]. [cit. 2023-10-22]. Dostupné z: <https://www.lisnickyzpravodaj.eu/maly-a-velky-kolobeh-vody/>

EP ENERGY TRADING, A.S., 2021. *Vodní energie: Princip fungování, využití a největší producenti* [online]. [cit. 2023-10-22]. Dostupné z: <https://www.epet.cz/vodni-energie-princip-fungovani-vyuziti-a-nejvetsi-producenti/>

EUROCLEAN S. R. O., 2016. *Brakická voda a její odsolování* [online]. [cit. 2023-10-22]. Dostupné z: <https://euroclean.cz/slovník/brakicka-voda-jeji-odsolovani/>

EUROPEAN COMMISSION. *Directive on measures for a high common level of cybersecurity across the Union (NIS2 Directive)* [online]. [cit. 2024-03-30]. Dostupné z: <https://digital-strategy.ec.europa.eu/en/policies/nis2-directive>

EUROPEAN COMMISSION. *EU Cyber Resilience Act* [online]. [cit. 2024-03-17]. Dostupné z: <https://digital-strategy.ec.europa.eu/en/policies/cyber-resilience-act>

EUROPEAN COMMISSION, 2018. *A definition of Artificial Intelligence: main capabilities and scientific disciplines* [online]. [cit. 2023-10-23]. Dostupné z: <https://digital-strategy.ec.europa.eu/en/library/definition-artificial-intelligence-main-capabilities-and-scientific-disciplines>

EUROSTAT: STATISTICS EXPLAINED, 2014. *Water use in industry* [online]. [cit. 2023-10-22]. Dostupné z: https://ec.europa.eu/eurostat/statistics-explained/index.php?title=Archive:Water_use_in_industry

FIRSTSTYLE MAGAZINE. *Která odvětví průmyslu jsou nejnáročnější na vodu?* [online]. [cit. 2023-10-22]. Dostupné z: <https://www.firststyle.cz/ktera-odvetvi-prumyslu-jsou-nejnarocnejsi-vodu/>

GRIEVES, Michael a John VICKERS, 2016. *Excerpted based on: Trans-Disciplinary Perspectives on System Complexity – All rights reserved Digital Twin: Mitigating Unpredictable, Undesirable Emergent Behavior in Complex Systems* [online]. [cit. 2023-10-22]. Dostupné z: https://www.researchgate.net/publication/307509727_Origins_of_the_Digital_Twin_Concept doi:10.13140/RG.2.2.26367.61609

GUIDA, Samuela, 2021. *DTHub: Future City Flow in Gothenburg, Sweden* [online]. [cit. 2023-10-23]. Dostupné z: <https://iwa-network.org/dthub-future-city-flow-in-gothenburg/>

HÁNKOVÁ, D., 2005. *Kanalizační stoky* [online]. [cit. 2023-10-23]. Dostupné z: <http://people.fsv.cvut.cz/www/hanekpav/K154/PDF/Stokovani.pdf>. Zpracováno pro projekt CTU0513011. České vysoké učení technické v Praze.

HAUSER, Šimon, 2022. *Co ovlivňuje současné ceny energií? Důvody a příčiny přehledně*. Greenpeace [online]. [cit. 2024-02-18]. Dostupné z: <https://www.greenpeace.org/czech/clanek/17585/co-ovlivnuje-soucasne-ceny-energi-duvody-a-priciny-prehledne/>

HERWIG, Christoph, ed., 2021. *Digital Twins: Applications to the Design and Optimization of Bioprocesses* [online]. Švýcarsko: Springer International Publishing [cit. 2023-10-22]. ISBN 978-3-030-71656-1. Dostupné z: <https://ebookcentral.proquest.com/lib/czup/detail.action?docID=6568327#>
doi:10.1007/978-3-030-71656-1

HERWIG, Christoph, ed., 2021. *Digital Twins: Tools and Concepts for Smart Biomanufacturing* [online]. Švýcarsko: Springer Nature Switzerland [cit. 2023-10-22]. ISBN 978-3-030-71660-8. Dostupné z: <https://ebookcentral.proquest.com/lib/czup/detail.action?docID=6568330#>
doi:10.1007/978-3-030-71660-8

Hlavní evropské rozvodí [online], 2020. [cit. 2023-10-22]. Dostupné z: <https://vodnistrazci.cz/voda-v-prirode/hlavni-evropske-rozvodí>

HONEYWELL. *Honeywell Process Digital Twin* [online]. [cit. 2023-10-23]. Dostupné z: <https://www.honeywellforge.ai/us/en/products/industrial-operations/honeywell-process-digital-twin>

HONEYWELL. *Honeywell Process Digital Twin* [online]. [cit. 2024-02-18]. Dostupné z: <https://www.honeywellforge.ai/us/en/products/industrial-operations/honeywell-process-digital-twin>

CHARANIYA, Salim, Wei-Shou HU a George KARYPIS, 2008. *Mining bioprocess data: opportunities and challenges* [online]. Elsevier, 10 [cit. 2023-10-22]. Dostupné z: <https://www.academia.edu/download/42489017/biopdm08tb.pdf>
doi:10.1016/j.tibtech.2008.09.003

CHAUDHARY, Gopal, Manju KHARI a Mohamed ELHOSENY, ed., 2021. *Digital Twin Technology* [online]. 6 October 2021. Boca Raton: CRC Press [cit. 2022-05-18]. ISBN 9781003132868. Dostupné z: <https://ebookcentral.proquest.com/lib/czup/detail.action?docID=6688902>

CHOU, David C., David C. YEN, Binshan LIN a Philip HONG-LAM CHENG, 1999. *Cyberspace security management. Industrial Management & Data Systems* [online]. 1999-12-01, 99(8), 353-361 [cit. 2024-03-30]. ISSN 0263-5577. Dostupné z: doi:10.1108/02635579910301793

- JACOBS, 2020. *Jacobs Creating First Digital Twin of PUB's Changi Water Reclamation Plant in Singapore* [online]. [cit. 2023-10-23]. Dostupné z: <https://www.jacobs.com/newsroom/press-release/jacobs-creating-first-digital-twin-pubs-changi-water-reclamation-plant>
- JEŽKOVÁ, Alena, 2020. *Zemědělství 4.0 - revoluce i živočišné výrobě* [online]. [cit. 2023-10-21]. Dostupné z: <https://naschov.cz/co-je-zemedelstvi-4-0/>
- KADLAS BLÜMELOVÁ, Kristina, 2023. *Digitální dvojčata zajistí vyšší efektivitu vodního hospodářství. Technický týdeník* [online]. [cit. 2023-10-23]. Dostupné z: https://www.technickytydenik.cz/rubriky/archiv/digitalni-dvojcata-zajisti-vyssi-efektivitu-vodniho-hospodarstvi_57860.html
- KOST, Edward, 2023. *What is Inherent Risk? You Could Be at Risk of a Data Breach* [online]. [cit. 2023-10-22]. Dostupné z: <https://www.upguard.com/blog/what-is-inherent-risk>
- KŘÍŽ, Jan. *Odpadní vody jako zdroj energie pro města* [online]. 2020-08-19 [cit. 2023-10-22]. Dostupné z: <https://www.vscht.cz/popularizace/media/tiskove-zpravy/2020/odpadni-vody-jako-zdroj-energie-pro-mesta>
- KŘÍŽ, Lukáš, 2021. *Digitální dvojčata závisí na kvalitě dat. Hospodářské noviny* [online]. [cit. 2023-10-22]. Dostupné z: <https://archiv.hn.cz/c1-66996990-digitalni-dvojcata-zavisi-na-kvalite-dat>
- KURRER, Christian a Nicoleta LIPCANEANU, 2023. *Ochrana vody a vodní hospodářství* [online]. [cit. 2023-10-22]. Dostupné z: <https://www.europarl.europa.eu/factsheets/cs/sheet/74/ochrana-vody-a-vodni-hospodarstvi>
- LANE, Alexander, Michael NORTON a Sandra RYAN, 2017. *Water Resources: A New Water Architecture* [online]. New York, USA: John Wiley & Sons. [cit. 2022-05-18]. ISBN 9781118794074. Dostupné z: <https://ebookcentral.proquest.com/lib/czup/reader.action?docID=4917501&ppg=1>
- LAŠTOVKOVÁ, Lucie, 2021. *Edge computing versus cloud computing* [online]. [cit. 2023-10-22]. Dostupné z: <https://procomputing.cz/edge-computing-versus-cloud-computing/>
- LAWTON, John R., Frances A. MARTINEZ a Christian BURKS, 1989. *Overview of the LiMB database. In: Nucleic acids research* [online]. s. 5885-99 [cit. 2023-10-22]. Dostupné z: https://www.researchgate.net/publication/20383881_Overview_of_the_LiMB_database doi:10.1093/nar/17.15.5885
- MAGAZÍN PLUS+. *Lednice, která vám vytvoří nákupní lístek. A nejen to! Co všechno umí tahle chytrá chladnička?* [online]. [cit. 2023-10-21]. Dostupné z: <https://m.magazinplus.cz/bydleni/39-lednice-ktera-vam-vytvori-nakupni-listek-a-nejen-to-co-vsechno-umi-tahle-chytra-chladnicka.html>

MÁLEK, Antonín. *Legislativa ve vodním hospodářství* [online]. s. 30 [cit. 2023-10-22]. Dostupné z: https://storm.fsv.cvut.cz/data/files/p%C5%99edm%C4%9Bty/VK2/VK2_leg01.pdf

MICROSOFT AZURE. *Azure Digital Twins: Create live, digital models of the physical world*. [online]. [cit. 2023-10-23]. Dostupné z: <https://azure.microsoft.com/en-us/products/digital-twins>

MICROSOFT AZURE. *Co jsou veřejné, privátní a hybridní cloudy?* [online]. [cit. 2023-10-22]. Dostupné z: <https://azure.microsoft.com/cs-cz/resources/cloud-computing-dictionary/what-are-private-public-hybrid-clouds>

MIGRATION DATA PORTAL. *Urbanization and Migration* [online]. 2022-06-10 [cit. 2023-10-22]. Dostupné z: <https://www.migrationdataportal.org/themes/urbanization-and-migration>

MINISTERSTVO PRŮMYSLU A OBCHODU, 2008. *Vodní hospodářství* [online]. [cit. 2023-10-22]. Dostupné z: <https://www.mpo.cz/cz/prumysl/prumysl-a-zivotni-prostredi/vodni-hospodarstvi--5088/>

MINISTERSTVO ZEMĚDĚLSTVÍ. *Technické normy* [online]. [cit. 2023-10-22]. Dostupné z: <https://eagri.cz/public/portal/mze/voda/legislativa/technicke-normy>

MISKINIS, Carlos, 2019. *The history and creation of the digital twin concept* [online]. [cit. 2023-10-22]. Dostupné z: <https://www.challenge.org/insights/digital-twin-history/>

MUOIO, Roberta, Laura PALLI, Iacopo DUCCI, Ester COPPINI, Elena BETTAZZI, Daniele DADDI, Donatella FIBBI a Riccardo GORI, 2019. *Optimization of a large industrial wastewater treatment plant using a modeling approach: A case study* [online]. (249) [cit. 2024-02-18]. Dostupné z: <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0301479719311545> doi: <https://doi.org/10.1016/j.jenvman.2019.109436>

NABE, Cedric. *Impact of COVID-19 on Cybersecurity* [online]. [cit. 2023-10-22]. Dostupné z: <https://www2.deloitte.com/ch/en/pages/risk/articles/impact-covid-cybersecurity.html>

NADEL, Jeremy, 2023. *Melbourne Water predicting recycled water quality two days in advance* [online]. [cit. 2023-10-23]. Dostupné z: <https://www.itnews.com.au/news/melbourne-water-predicting-recycled-water-quality-two-days-in-advance-599827>

NÁRODNÍ ÚŘAD PRO KYBERNETICKOU A INFORMAČNÍ BEZPEČNOST, 2022. *Informace o institutu základní služby: Shrnutí způsobu určení provozovatele základní služby a informačního systému základní služby* [online]. Brno [cit. 2023-10-22]. Dostupné z: https://www.nukib.cz/download/publikace/podpurne_materialy/Informace-o-institutu-zakladni-sluzby_v1.5.pdf

NÁRODNÍ ÚŘAD PRO KYBERNETICKOU A INFORMAČNÍ BEZPEČNOST. *Nová směrnice EU o kybernetické bezpečnosti „NIS2“ a návrh nového zákona o kybernetické*

bezpečnosti, plánovaná platnost změn v kybernetické bezpečnosti od 2024 [online]. [cit. 2023-10-22]. Dostupné z: <https://osveta.nukib.cz/course/view.php?id=145>

NIETSCHEOVÁ, Jaroslava a Michal KRÁTKÝ. *Vodní právo na území České republiky. Historie a současnost 1. část. Historie – od římského vodního práva po rakouské vodní zákony*. Vodní hospodářství [online]. [cit. 2023-10-22]. Dostupné z: <https://vodnihospodarstvi.cz/vodni-pravo-na-uzemi-ceske-republiky-historie-a%E2%80%AFsoucasnost-1-cast-historie-od-rimskeho-vodniho-prava-po-rakouske-vodni-zakony/>

OECD. *BioTrack Product Database* [online]. [cit. 2023-10-22]. Dostupné z: <https://biotrackproductdatabase.oecd.org/>

OMOTAYO, Alabi Micheal, Arnesh TELUKDARIE a Nickey Janse van RENSBURG, 2019. *Water 4.0: An Integrated Business Model from an Industry 4.0 Approach* [online]. [cit. 2023-10-22]. Dostupné z: https://www.researchgate.net/publication/339021634_Water_40_An_Integrated_Business_Model_from_an_Industry_40_Approach doi:10.1109/IEEM44572.2019.8978859

ONEINDUSTRY. *PLM - Product Lifecycle Management - Řízení životního cyklu výrobku* [online]. [cit. 2023-10-22]. Dostupné z: <https://www.oneindustry.cz/lexikon/plm-product-lifecycle-management-rizeni-zivotniho-cyklu-vyrobku/>

OPTIXS, S. R. O. *Spektroskopie* [online]. [cit. 2023-10-22]. Dostupné z: <https://www.optixs.cz/aplikace-53/spektroskopie-145>

OWEN, David A. Lloyd, TABERHAM, Justin, ed., 2018. *Smart Water Technologies and Techniques: Data Capture and Analysis For Sustainable Water Management* [online]. New York, USA: John Wiley & Sons. [cit. 2022-05-18]. ISBN 978-1-118-79390-9. Dostupné z: <https://ebookcentral.proquest.com/lib/czup/reader.action?docID=5296145&ppg=6>

PEDERSEN, Agnete N., Morten BORUP, Annette BRINK-KJÆR, Lasse E. CHRISTIANSEN a Peter S. MIKKELSEN, 2021. *Living and Prototyping Digital Twins for Urban Water Systems: Towards Multi-Purpose Value Creation Using Models and Sensors* [online]. [cit. 2023-10-22]. Dostupné z: <https://www.mdpi.com/2073-4441/13/5/592/htm> doi:10.3390/w13050592

PECHÁČEK, Jiří. *Čištění odpadních vod* [online]. [cit. 2023-09-26]. Dostupné z: https://kke.zcu.cz/export/sites/kke/about/projekty/enazp/projekty/16_Chemie-aekologie_43-44/44_MMP/081_cistení-odpadních-vod---Pechacek.pdf

PLEYER, Olga. *Využití chemometrie při analýze paliv* [online]. 2019-07-30 [cit. 2023-10-22]. Dostupné z: <https://www.vscht.cz/popularizace/doktorandi-pisou/2019/vyuziti-chemometrie-pri-analyze-paliv>

POVODÍ MORAVY, S.P. *Vodohospodářský slovník: Recipient* [online]. [cit. 2023-10-22]. Dostupné z: <http://www.pmo.cz/cz/uzitecne/vodohospodarsky-slovník/recipient/>

PRAŽSKÉ VODOVODY A KANALIZACE, A.S. *Odpadní voda* [online]. [cit. 2023-10-22]. Dostupné z: <https://www.pvk.cz/vse-o-vode/odpadni-voda/>

PRAŽSKÉ VODOVODY A KANALIZACE, A.S. *Ústřední čistírna odpadních vod* [online]. [cit. 2024-03-17]. Dostupné z: <https://www.pvk.cz/media/fotogalerie/ucov/>

PSE ENTERPRISE. *Next-generation modelling tools across the process lifecycle* [online]. [cit. 2023-10-21]. Dostupné z: <https://www.psenterprise.com/products/gproms>

RAGHUNATHAN, Vijay, 2019. *Digital Twins, Digital Threads, Digital Ghosts and Digital Shadows* [online]. [cit. 2024-03-29]. Dostupné z: <https://medium.com/@vijay./digital-twins-digital-threads-digital-ghosts-and-digital-shadows-5d21793699fc>

RESNICK, Craig, 2023. *The AVEVA Acquisition by Schneider Electric Is Complete* [online]. [cit. 2023-10-23]. Dostupné z: <https://www.arcweb.com/blog/aveva-acquisition-schneider-electric-complete>

SACHDEVA, Nikita, 2023. *How Will Digital Twins Evolve in the Future? Predictions and Emerging Trends* [online]. [cit. 2023-10-23]. Dostupné z: <https://insights.daffodilsw.com/blog/the-future-of-digital-twins>

SAMOILI, Sofia, Montserrat LOPEZ COBO, Emilia GOMEZ GUTIERREZ, Giuditta DE PRATO a Fernando MARTINEZ-PLUMED, 2020. AI WATCH. *Defining Artificial Intelligence* [online]. Publications Office of the European Union [cit. 2023-10-23]. ISSN 1831-9424. Dostupné z: <https://publications.jrc.ec.europa.eu/repository/handle/JRC118163>
doi:10.2760/382730

SARTORIUS, 2021. *Opportunities for Digital Twins in Bioprocess Development* [online]. [cit. 2023-10-23]. Dostupné z: <https://www.sartorius.com/en/knowledge/science-snippets/opportunities-for-digital-twins-in-bioprocess-development-947590>

SCD SLOVENSKO, S.R.O. *Co se děje při čištění vody v ČOV* [online]. [cit. 2023-10-22]. Dostupné z: <https://www.probioticky.cz/clanky/co-se-deje-pri-cisteni-vody-v-cov/>

SHAFTO, Mike, Mike CONROY, Rich DOYLE, Ed GLAESSGEN, Chris KEMP, Jacqueline LEMOIGNE a Lui WANG, 2010. *DRAFT Modeling, Simulation, Information Technology and Processing Roadmap* [online]. [cit. 2023-10-22]. Dostupné z: <https://www.emacromall.com/reference/NASA-Modeling-Simulation-IT-Processing-Roadmap.pdf>

SCHNEIDER ELECTRIC, 2022. *Water, wastewater and district energy utilities to increase decarbonization and operational efficiency, with upgraded digital twin tools from Schneider Electric* [online]. [cit. 2023-10-23]. Dostupné z: <https://www.se.com/ww/en/about-us/newsroom/news/press-releases/water-wastewater-and-district-energy-utilities-to-increase-decarbonization-and-operational-efficiency-with-upgraded-digital-twin-tools-from-schneider-electric-6385b4cb0e5be3e4990b4662>

SCHNEIDER ELECTRIC, 2023. *EcoStruxure Water Advisor – Water Simulation* [online]. [cit. 2023-10-23]. Dostupné z: <https://www.se.com/ww/en/download/document/EcoStruxureWaterSimulation/?ssr=true>

SIEMENS, 2022. *With AI and Digital Twin to a sustainable water management* [online]. [cit. 2023-10-23]. Dostupné z: <https://press.siemens.com/global/en/pressrelease/ai-and-digital-twin-sustainable-water-management>

SIEMENS. *Condition Monitoring* [online]. [cit. 2023-10-22]. Dostupné z: <https://www.siemensportal.cz/s/condition>

SIEMENS. *Insights Hub* [online]. [cit. 2023-10-23]. Dostupné z: <https://plm.sw.siemens.com/en-US/insights-hub/>

SIEMENS. *Insights Hub IIoT Data Package S* [online]. [cit. 2024-02-18]. Dostupné z: https://www.dex.siemens.com/industrial-iiot/step-3-choose-the-right-size/insights-hub-iiot-data-package-s?cclcl=en_US

SIEMENS. *Manufacturing Simulation* [online]. [cit. 2023-10-22]. Dostupné z: <https://www.plm.automation.siemens.com/global/en/our-story/glossary/manufacturing-simulation/27068>

SIEMENS. *Simulation & Test for Process Industry Applications* [online]. [cit. 2023-10-22]. Dostupné z: <https://www.plm.automation.siemens.com/global/en/industries/energy-utilities/energy-equipment-manufacturing/simulation-test-process-industry-applications.html>

SIEMENS. *Digitalize your low-voltage motor* [online]. [cit. 2024-03-17]. Dostupné z: <https://www.siemens.com/global/en/products/drives/digitalization-in-drive-technology/data-analytics/digitalize-low-voltage-motors.html>

SIEMENS. *Umělá inteligence pomáhá ve vodárenství*, 2022. Visions [online]. [cit. 2023-10-22]. Dostupné z: <https://www.visionsmag.cz/umela-inteligence-pomaha-ve-vodarenstvi>

SMART WATER MAGAZINE, 2022. *ABB launches digital solution to reduce energy use and optimize operations in wastewater* [online]. [cit. 2023-10-23]. Dostupné z: <https://smartwatermagazine.com/news/abb/abb-launches-digital-solution-reduce-energy-use-and-optimize-operations-wastewater>

SMART WATER MAGAZINE, 2022. *How does digital transformation reduce costs in the water industry* [online]. [cit. 2024-02-18]. Dostupné z: <https://smartwatermagazine.com/news/idrica/how-does-digital-transformation-reduce-costs-water-industry>

SMOLOVÁ, Bára, 2018. *Big Data - charakteristika a zpracování nestrukturovaných dat* [online]. Liberec [cit. 2023-10-22]. Dostupné z: https://dspace.tul.cz/bitstream/handle/15240/152797/Smolova_Bara_Big_Data_charakteristika_a_zpracovani_nestrukturovanych_dat.pdf?sequence=1&isAllowed=y. Diplomová práce. Technická univerzita v Liberci. Vedoucí práce Ing. Dana Nejedlová, Ph.D.

STENTOFT, P.A., T. MUNK-NIELSEN, J.K. MØLLER, H. MADSEN, B. VALVERDE-PÉREZ, P.S. MIKKELSEN, a L. VEZZARO, 2021. *Prioritize effluent quality, operational costs or global warming? – Using predictive control of wastewater aeration for flexible management of objectives in WRRFs* [online]. (196) [cit. 2024-02-18]. ISSN 0043-1354.

Dostupné z: <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0043135421001585> doi: <https://doi.org/10.1016/j.watres.2021.116960>

SVAZ PRŮMYSLU A DOPRAVY ČR. *Jak je tvořena cena vodného a stočného v ČR* [online]. [cit. 2024-02-18]. Dostupné z: <https://www.spcr.cz/muze-vas-zajimat/z-clenske-zakladny/15884-jak-je-tvorena-cena-vodneho-a-stocneho-v-cr>

The Art of Science: díl 804. 1998. *The Chedd-Angier Production Company*. Dostupné také z: http://www.chedd-angier.com/frontiers/transcripts/Season8_804.pdf

THE PUBLIC-PRIVATE INFRASTRUCTURE ADVISORY FACILITY. *Non-revenue water (NRW)* [online]. [cit. 2023-10-22]. Dostupné z: <https://www.ppiaf.org/sectors/non-revenue-water>

TORFS, Elena; NICOLAÏ, Niels; DANESHGAR, Saba; HAIMI, Henri; IKUMI, David et al. *The transition of WRRF models to digital twin applications*. [online]. Water Science and Technology. 2022, roč. 85, č. 10, s. 2840-2853. ISSN 02731223. Dostupné z: <https://doi.org/10.2166/wst.2022.107>. [cit. 2024-02-18].

TRIMBLE. *Trimble NIS: Manage utility network assets with a digital twin* [online]. [cit. 2023-10-23]. Dostupné z: <https://upa.trimble.com/en-eu/products/trimble-nis>

TRIMBLE. *Water Solutions* [online]. [cit. 2023-10-23]. Dostupné z: <https://utilities.trimble.com/en-us/industries/water>

TUHOVČÁK, Ladislav. *Quo vadis, české vodárenství? Vodní hospodářství* [online]. [cit. 2023-10-22]. Dostupné z: <https://vodnihospodarstvi.cz/quo-vadis-ceske-vodarenstvi/>

TWI GLOBAL. *Simulation vs Digital twin (What is the difference between them?)* [online]. [cit. 2023-10-22]. Dostupné z: <https://www.twi-global.com/technical-knowledge/faqs/simulation-vs-digital-twin>

TZB-INFO. *Nariadení č. 401/2015 Sb. 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* [online]. [cit. 2024-03-30]. Dostupné z: <https://www.tzb-info.cz/pravni-predpisy/narizeni-c-401-2015-sb-o-ukazatelich-a-hodnotach-pripustneho-znecisteni-povrchovych-vod-a-odpadnich-vod>

UNITED NATIONS DEPARTMENT OF ECONOMIC AND SOCIAL AFFAIRS, Population Division, 2022. *World Population Prospects 2022: Summary of Results* [online]. New York: United Nations Publication [cit. 2023-10-22]. ISBN 978-92-1-148373-4. Dostupné z: https://www.un.org/development/desa/pd/sites/www.un.org.development.desa.pd/files/wpp2022_summary_of_results.pdf doi:UN DESA/POP/2022/TR/NO. 3

VALVERDE-PÉREZ, Borja, Bruce JOHNSON, Christoffer WÄRFF, Douglas LUMLEY, Elena TORFS, Ingmar NOPENS a Lloyd TOWNLEY, 2021. *Digital Water: Operational digital twins in the urban water sector* [online]. INTERNATIONAL WATER ASSOCIATION [cit. 2023-10-23]. Dostupné z: <https://iwa-network.org/publications/operational-digital-twins-in-the-urban-water-sector-case-studies/>

VDT TECHNOLOGY. *VDT Technology představuje digitální dvojče úpravny vody v Železné rudě. Inovativní monitorování a simulace provozu* [online]. [cit. 2024-02-20] Dostupné z: <https://www.vdttechnology.com/vdt-technology-predstavuje-digitalni-dvojce-upravny-vody-v-zelezne-rude-inovativni-monitorovani-a-simulace-provozu/?lang=en>

VODOHOSPODÁŘSKÁ SPOLEČNOST BENEŠOV A.S., 2021. *Koloběh vody* [online]. [cit. 2023-10-22]. Dostupné z: <https://www.vhsbenesov.cz/cs/co-vedet-o-vode/nejen-proskoly/kolobeh-vody.html>

WEST, Timothy D. a Mark BLACKBURN. *Is Digital Thread/Digital Twin Affordable? A Systemic Assessment of the Cost of DoD's Latest Manhattan Project* [online]. [cit. 2023-10-23]. Procedia Computer Science. ISSN 1877-0509. Dostupné z: <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S1877050917317970>
doi:10.1016/j.procs.2017.09.003

WILSON, Mary, Greg THOMPSON a Patrick KEANEY, 2021. *Innovyze Introduces Dynamic Digital Twins to the Water Industry with Info360 on AWS* [online]. [cit. 2023-10-23]. Dostupné z: <https://aws.amazon.com/blogs/industries/innovyze-introduces-dynamic-digital-twins-to-the-water-industry-with-info360-on-aws/>

WOLFEWICZ, Arne, 2023. *Deep Learning vs. Machine Learning – What's The Difference?* [online]. [cit. 2023-10-23]. Dostupné z: <https://levity.ai/blog/difference-machine-learning-deep-learning>

WORLD WATER COUNCIL, William J. COSGROVE a Frank R. RIJSBERMAN, 2000. *World Water Vision: Making Water Everybody's Business* [online]. London: Thanet Press [cit. 2023-10-22]. ISBN 1 85383 730 X. Dostupné z: <https://www.worldwatercouncil.org/fileadmin/wwc/Library/WWVision/Chapter2.pdf>

WRIGHT, Louise a Stuart DAVIDSON, 2020. *How to tell the difference between a model and a digital twin* [online]. [cit. 2023-10-23]. Dostupné z: <https://amses-journal.springeropen.com/articles/10.1186/s40323-020-00147-4> doi:10.1186/s40323-020-00147-4

WSP. *Fast Digital Twin of Water Systems for City of Toronto and York Region* [online]. [cit. 2023-10-23]. Dostupné z: <https://www.wsp.com/en-ca/projects/fast-digital-twin-of-water-systems-for-city-of-toronto-and-york-region>

Youtube. *Čistírna odpadních vod (princip fungování)* [online]. 2020 [cit. 2024-03-17]. Dostupné z: <https://www.youtube.com/watch?v=-sYXY5yIsIs>

Zákon č. 181/2014 Sb. *Zákon o kybernetické bezpečnosti a o změně souvisejících zákonů (zákon o kybernetické bezpečnosti)* [online]. [cit. 2023-10-22]. Dostupné z: <https://www.zakonyprolidi.cz/cs/2014-181>

Zákon č. 254/2001 Sb. *Zákon o vodách a o změně některých zákonů (vodní zákon)* [online]. [cit. 2023-10-22]. Dostupné z: <https://www.zakonyprolidi.cz/cs/2001-254>

7.1 Seznam obrázků

Obrázek 1 Schéma procesu čištění odpadní vody v čističce odpadních vod.....	20
Obrázek 2 Ústřední čistírna odpadních vod Praha.....	22
Obrázek 3 Schéma vyčítání provozních stavů z motorů pomocí cloudové aplikace v procesu čištění odpadních vod.....	25
Obrázek 4 Rozšíření produktu o virtuální model.....	33
Obrázek 5 Základní schéma digitálního dvojčete čistírny odpadních vod.....	34
Obrázek 6 Prvky digitálního dvojčete	36
Obrázek 7 Rozdíl AI, ML, DL.....	39
Obrázek 8 Předpověď srážek využívající deset různých meteorologických modelů, míru nejistoty zobrazuje zelené pásmo	44
Obrázek 9 Future City Flow online aktivně upravující chod čerpacích stanic.....	46
Obrázek 10 Projekt v prostředí nástroje COMOS společnosti Siemens umožňuje logické třídění komponentů v databázi, zobrazování schémat a fotografií komponentu	48
Obrázek 11 Technologické schéma matematického modelu ČOV	49
Obrázek 12 Software SIMIT.....	52
Obrázek 13 Návrhový software AVEVA využívá technologie digitálních dvojčat.....	53
Obrázek 14 Digitální dvojče infrastruktury v prostředí Innovyze Info360 Insight.....	55
Obrázek 15 Nástroj COMOS společnosti Siemens	57
Obrázek 16 Ukázka prostředí digitálního dvojčete společnosti DHI TwinPlant.....	58
Obrázek 17 Schéma digitálního dvojčete	59

7.2 Seznam tabulek

Tabulka 3-1 Proměnné v bioprocesech a příklady měřících technik.....	30
Tabulka 4-1 Položky pro výpočet stočného z roku 2019.....	61
Tabulka 4-2 Jednotlivé položky cenotvorby digitálního dvojčete, odhadované náklady....	63
Tabulka 4-3 Přípustné znečištění povrchových vod.....	64
Tabulka 4-4 Tabulka sledovaných veličin ve studii Muia.....	66
Tabulka 4-5 Scénáře odhadovaných nákladů, vlastní zpracování	68
Tabulka 4-6 Porovnání různých scénářů ze studie Stentofta.....	70
Tabulka 4-7 Skutečné náklady z údaj anonymizované vodohospodářské společnosti.....	70
Tabulka 4-8 Skutečné náklady vodohospodářské společnosti, zaokrouhleno.....	73
Tabulka 4-9 Odhad nákladů vodohospodářské společnosti a ČOV pro období 2019/20-2030/31	75
Tabulka 4-10 Odhad úspor ČOV při využití MPC v digitálním dvojčeti, období 2019/20-2024/25 vlastní zpracování	75
Tabulka 4-11 Odhad úspor ČOV při využití MPC v digitálním dvojčeti, období 2025/26-2030/31	76
Tabulka 4-12 Tabulka scénářů investičních nákladů a doby návratnosti investice.....	77

7.3 Seznam grafů

Graf 4-1 Struktura nákladů celé vodohospodářské společnosti.....	73
Graf 4-2 Trendová funkce vývoje nákladů vodohospodářské společnosti.....	74

7.4 Seznam použitých zkratek

AI	Artificial Intelligence
ANN	Artificial Neural Networks
API	Application Programming Interface
AR	Augmented Reality
ASM	Activated Sludge Modules
CAD	Computer Aided Design
CAE	Computer Aided Engineering
CIS	Customer Information System
CPS	Cyber-physical Security
CRA	Cyber Resilience Act
CRM	Customer Relationship Management System
CSO	Combined Sewer Overflow
ČOV	Čistírna odpadních vod
DNS	Domain Name Server
DOI	Digital Object Identifier
DT	Digital Twin
EAM	Enterprise Asset Management
EK	Evropská Komise
ESG	Environment, Social, Governance program
EO	Ekvivalentní obyvatel
GE	General Electric
GIS	Geografic Information System
GIT	Deutsche Gesellschaft für Internationale Zusammenarbeit GmbH
GPS	Global Positioning System
HLEG	High Level Expert Group
ICT	Informační a komunikační technologie
IoT	Internet of Things
IIoT	Industrial Internet of Things
IWA	International Water Association
JCS	Java Caching System
KPI	Key Performance Indicator
LAN	Local Area Network
MQTT	Message Queuing Telemetry Transport
ML	Machine Learning
MPC	Model Predictive Control
NIS	Network Internet Security
NRW	Non-revenue water
OPC	Open Platform Communications
O-MI	Open Messaging Interface
PLC	Programmable Logic Controller
PLM	Product Lifecycle Management
REST	Representational State Transfer
RFID	Radio-frequency Identification
SaaS	Software as a Service
SCADA	Supervisory Control And Data Acquisition
SMS	Short Message Service
SOAP	Simple Object Access Protocol

SNR	Signal-to-noise
SQL	Structured Query Language
SVM	Support vector machines
SWAN	Smart Water Networks Forum
TWI	The Welding Institute
UA	Unified Architecture
URI	Uniform Resource Identifier
URL	Uniform Resource Locator
ÚV	Úpravna vody
WRRF	Water Resource Recovery Facility

Přílohy

Příloha č. 1: Cyber Resilience Act

Příloha č. 2: NIS2 Directive

Příloha č. 1: Cyber Resilience Act

[EU Cyber Resilience Act](https://digital-strategy.ec.europa.eu/en/policies/cyber-resilience-act) **(<https://digital-strategy.ec.europa.eu/en/policies/cyber-resilience-act>)**

New EU cybersecurity rules ensure safer hardware and software.



© European Union

From baby-monitors to smart-watches, products and software that contain a digital component are omnipresent in our daily lives. Less apparent to many users is the security risk such products and software may present.

The [Cyber Resilience Act \(CRA\)](https://digital-strategy.ec.europa.eu/en/news-redirect/756860) (<https://digital-strategy.ec.europa.eu/en/news-redirect/756860>) aims to safeguard consumers and businesses buying or using products or software with a digital component. The Act would see inadequate security features become a thing of the past with the introduction of mandatory cybersecurity requirements for manufacturers and retailers of such products, with this protection extending throughout the product lifecycle.

The problem addressed by the Regulation is two-fold.

First is the inadequate level of cybersecurity inherent in many products, or inadequate security updates to such products and software.

Second is the inability of consumers and businesses to currently determine which products are cybersecure, or to set them up in a way that ensures their cybersecurity is protected.

The Cyber Resilience Act will guarantee:

- harmonised rules when bringing to market products or software with a digital component;

- a framework of cybersecurity requirements governing the planning, design, development and maintenance of such products, with obligations to be met at every stage of the value chain;
- an obligation to provide duty of care for the entire lifecycle of such products.

When the Regulation enters into force, software and products connected to the internet would bear the CE marking to indicate they comply with the new standards. Requiring manufacturers and retailers to prioritise cybersecurity, customers and businesses would be empowered to make better-informed choices, confident of the cybersecurity credentials of CE-marked products.

The Regulation was announced in the [2020 EU Cybersecurity Strategy](https://digital-strategy.ec.europa.eu/en/library/eus-cybersecurity-strategy-digital-decade-01) (<https://digital-strategy.ec.europa.eu/en/library/eus-cybersecurity-strategy-digital-decade-01>), and complements other legislation in this area, specifically the [NIS2 Framework](https://digital-strategy.ec.europa.eu/en/policies/nis-directive) (<https://digital-strategy.ec.europa.eu/en/policies/nis-directive>).

It will apply to all products connected directly or indirectly to another device or network except for specified exclusions such as open-source software or services that are already covered by existing rules, which is the case for medical devices, aviation and cars.

The Regulation is expected to enter into force in early 2024. Manufacturers will have to apply the rules 36 months after their entry into force. The Commission will then periodically review the Act and report on its functioning.

Quick links

[Questions and Answers - Cyber Resilience Act](#)

Zdroj: EUROPEAN COMMISSION. *EU Cyber Resilience Act* [online]

[Directive on measures for a high common level of cybersecurity across the Union \(NIS2 Directive\)](https://digital-strategy.ec.europa.eu/en/policies/nis2-directive)
[\(https://digital-strategy.ec.europa.eu/en/policies/nis2-directive\)](https://digital-strategy.ec.europa.eu/en/policies/nis2-directive)

The NIS2 Directive is the EU-wide legislation on cybersecurity. It provides legal measures to boost the overall level of cybersecurity in the EU.



© iStock by Getty Images -1169999045 aismagilov

The EU cybersecurity rules introduced in 2016 were updated by the NIS2 Directive that came into force in 2023. It modernised the existing legal framework to keep up with increased digitisation and an evolving cybersecurity threat landscape. By expanding the scope of the cybersecurity rules to new sectors and entities, it further improves the resilience and incident response capacities of public and private entities, competent authorities and the EU as a whole.

The Directive on measures for a high common level of cybersecurity across the Union (the NIS2 Directive) provides legal measures to boost the overall level of cybersecurity in the EU by ensuring:

- Member States' preparedness, by requiring them to be appropriately equipped. For example, with a Computer Security Incident Response Team (CSIRT) and a competent national network and information systems (NIS) authority,
- cooperation among all the Member States, by setting up a [Cooperation Group](#)

<https://digital-strategy.ec.europa.eu/en/policies/nis-cooperation-group>) to support and facilitate strategic cooperation and the exchange of information among Member States.

- a culture of security across sectors that are vital for our economy and society and that rely heavily on ICTs, such as energy, transport, water, banking, financial market infrastructures, healthcare and digital infrastructure.

Businesses identified by the Member States as operators of essential services in the above sectors will have to take appropriate security measures and notify relevant national authorities of serious incidents. Key digital service providers, such as search engines, cloud computing services and online marketplaces, will have to comply with the security and notification requirements under the Directive.

[NIS 2 Directive \(Directive \(EU\) 2022/2555\)](#)

Zdroj: EUROPEAN COMMISSION. *Directive on measures for a high common level of cybersecurity across the Union (NIS2 Directive)* [online].