CHALMERS

Småskalig termisk och lägespotentiell lagring av elektrisk energi i urbana områden

Examensarbete inom högskoleingenjörsprogrammet Elektroteknik

RASMUS WESTERGREN

INSTITUTIONEN FÖR ELEKTROTEKNIK

CHALMERS TEKNISKA HÖGSKOLA
Göteborg, Sverige 2022
www.chalmers.se

Förord

Den här rapporten sammanställer ett examensarbete på högskoleingenjörsnivå (180 hp) inom programmet Elektroteknik och vid institutionen för Elektroteknik vid Chalmers tekniska högskola i Göteborg.

Examensarbetet utfördes på halvtid under en 20 veckors period på företaget Sweco AB i Göteborg, motsvarande 15 hp.

Handledare: Tomas Limmert, Sweco AB.
Handledare och examinator: Jimmy Ehnberg, Chalmers tekniska högskola.

Ett stort tack till Tomas Limmert som gav mig möjligheten att få göra det här arbetet på Sweco och som bistod med handledning med stort engagemang för projektet.

Vidare vill jag rikta ett tack till Pablo Martinez-Moore på North Ridge Pumps för upprätthållen konversation gällande tekniska data samt beviljad användning av foton och diagram i rapporten gällande produkter ur deras sortiment. Även ett tack till Håkan Bernlo på Tsurumi-Intec Pump AB för besvarade frågor kring pumpning av sand, samt till Grady Hillhouse för tillåtelse att använda hans drönarfoto i rapporten.

Tack till alla jag fått möta på Sweco för er mycket vänliga mottagande och trevliga atmosfär.

© Rasmus Westergren, 2022

Sammanfattning

Ökande intermittent produktion av elektricitet i kombination med tilltagande fokus på hållbarhetsfrågor inom stadsplanering bidrar till nya behov av elenergilagring i urbana områden. Utvecklingen av kemiska batterier går ständigt framåt, men en enda teknologi är sällan lösningen på ett tekniskt problem i alla sammanhang. Två andra lagringsmetoder för elektrisk energi, som baseras på mer mekaniska principer, är pumpkraft (PSH) och tryckluftslagring (CAES). I dagsläget förekommer dessa metoder huvudsakligen i stor skala och för att kunna appliceras i urban miljö behöver de därför anpassas för mindre dimensioner först.

I den här studien beräknas hur stora lagringskapaciteter och verkningsgrader som fås för PSH- och CAES-anläggningar som tar i anspråk ett 15×15×100 respektive 15×15×50 meter stort utrymme. Elektrotekniskt baseras dessa modeller på reversibla turbomaskiner. Prestandan hos PSH-modellen analyseras för förutom vatten även andra vätskor, varvid sirap visar sig medföra högre verkningsgrad än vatten om obehandlad betong används som konstruktionsmaterial för anläggningen i dess helhet. På liknande sätt jämförs för CAES luftens egenskaper med andra gasers, en analys som indikerar att luften är den gas som fungerar effektivast för att lagra energi.

I urbana miljöer installeras förslagsvis småskalig PSH inuti byggnadskärnan i höghus. Bullernivån som alstras av turbomaskinen i fråga är inte högre än att vara möjlig att dämpa med akustikpaneler för att bemöta riktlinjer för kontorsplatsers ljudnivå. Småskalig CAES indikerar potential att ge verkningsgrader och lagrings-kapaciteter likvärdiga studiens PSH-modell vid en markant mindre dimension än 15×15×50 meter. Därför anses CAES vara möjlig att installeras på många håll i den urbana miljön. Trögheten för varje enskild turbo-maskin är låg men om flera anläggningar förenas som en virtuell anläggning kan denna anslutas till stöd-tjänsterna FCR, FFR och RR för frekvensbalansering på elnätet. Varje enskild anläggning kan även anslutas till den dynamiska kategorin för balansering av dess spänningsnivåer.

Elpriserna i södra och mellersta Sverige (elområde SE3 och SE4) har förändrats de senaste åren på ett sådant sätt att småskalig PSH och CAES nu har blivit lönsam.

Nyckelord: *Pumpkraft (PSH, PHES), CAES, PAT, RPT, småskalighet, urban miljö, turbomaskin, lagringskapacitet, round-trip verkningsgrad, tröghet, FRR, FCR, FFR, RR, lönsamhet.*

Abstract

Increasing intermittent production of electricity, combined with raised interest in sustainable topics when developing cities, are leading to new needs for electric energy storages in urban areas. The development of chemical batteries continues; however, one single technology rarely is the solution for all cases of a technical problem. Two other methods of storing electric energy, based on rather mechanical principles, are pumped-storage hydroelectricity (PSH) and compressed air energy storages (CAES). Currently, these technologies mainly exist for large scale plants and to be able to apply those principles in urban areas, they have to be adjusted for smaller dimensions first.

In this study, the storage capacity as well as the round-trip efficiency for small-scaled PSH and CAES plants demanding spaces of 15×15×100 and 15×15×50 metres, respectively, are calculated. By electrotechnical terms, these models are based on reversible turbomachinery. The performance of the small-scale PSH model is analyzed for, except water, also other liquids. By this investigation, syrup is found as a viable option with higher round-trip efficiency than water in the case of untreated concrete being used as construction material. Similarly, air is compared with other gases as used in the small-scale CAES model; an analysis which results in an indication of that air is the most effective choice for the method.

In urban areas, small-scaled PSH is properly contained within the concrete building core of high-raised buildings and skyscrapers. The noise generated by the turbomachinery concerned is not higher than what is possible to damp to fulfil the guidelines for sound levels in office workplaces by absorption panels. CAES is indicating potentials of resulting in storage capacities and round-trip efficiencies similar to the levels of the PSH model but for much smaller dimensions than 15×15×50 metres. Therefore, CAES may have many appropriate locations within the urban area. The inertia per machine unit is very low, but if multiple plants are being connected to form a virtual plant, then the properties of such a virtual plant will have the opportunity of being connected to the frequency ancillary services FCR, FFR and RR. Each plant can be individually connected to the dynamic ancillary services for voltage balance of the power grid.

The spot prices of electricity in southern and central Sweden (grid zones SE3 and SE4) have changed over the past few years in a way that have made new conditions for small-scaled PSH and CAES to be profitable.

Keywords: *Pumped-storage hydroelectricity (PSH, PHES), compressed air energy storage (CAES), pump as turbine (PAT), reversible pump turbine (RPT), small-scale, urban areas, turbomachinery, storage capacity, round-trip efficiency, inertia, FRR, FCR, FFR, RR, profitability.*

Innehåll

1 Inledning **1**

1.1 Bakgrund 1

1.2 Syfte 2

1.3 Avgränsningar 2

1.4 Precisering av frågeställningar 2

2 Teori **3**

2.1 Pumpkraft (PSH) 3

2.1.1 Introduktion 3

2.1.2 Strömningsmekaniska beräkningar 4

2.1.2.1 Rent laminära flöden 7

2.1.2.2 Turbulenta och delvis turbulenta flöden 8

2.2 Gastryckslagring (CAES) 10

2.2.1 Introduktion 10

2.2.2 Kemitekniska beräkningar 12

2.3 Reversibla turbomaskiner 15

2.3.1 Introduktion 15

2.3.2 Reversibla pumpturbiner (RPT) och turbinpumpar (PAT) 15

2.3.3 Elektrotekniska beräkningar 16

2.4 Elkraftsstödtjänster 17

2.5 Ekonomisk hållbarhet 19

2.6 Konsekvensanalys 20

2.5.1 Hållfasthet 20

2.5.2 Buller 20

3 Beräkningsmodeller **22**

3.1 Pumpkraft (PSH) 22

3.2 Gastryckslagring (CAES) 24

4 Metod **25**

4.1 Pumpkraft (PSH) 25

4.2 Gastryckslagring (CAES) 26

4.3 Tröghet och stödtjänster 27
4.4 Buller 27

5 Resultat **28**
5.1 Pumpkraft (PSH) 28
5.2 Gastryckslagring (CAES) 33
5.3 Tröghet och stödtjänster 35
5.4 Buller 36

6 Diskussion **37**
6.1 Placering i den urbana miljön 37
6.2 Lagringskapacitet 37
6.3 Konstruktionsmaterialens inverkan 38
6.4 Fluidämnenas inverkan 38
6.5 Ekonomisk hållbarhet 40
6.6 Valet av reversibla pumpar 40
6.7 Applicerbara stödtjänstanslutningar 40
6.8 Fördelar gentemot andra lagringsmetoder 41
6.9 PSH i vattentorn 41
6.10 Granulära material 41

7 Slutsats **43**

8 Framtida studier **44**
8.1 Differentiering av modellerna 44
8.2 Byggnaders energikonsumtion 44
8.3 Åldrande av apparatur 44
8.4 Kombinerad PSH och CAES 45

Litteratur **46**

Appendix **54**
I. Tabellvärden för spotpriser
II. Grafer för lagringskapacitet och verkningsgrad (PSH)
III. Grafer för Reynoldstal (PSH)
IV. Sekundära vattensystem
V. Granulära material och AST

Beteckningar

Eftersom den här rapporten sträcker sig över flera vetenskapliga ämnesområden förekommer storheter som i normalfall betecknas med samma bokstav eller symbol. Följaktligen har vissa storheter justerade beteckningar i denna rapport och en rekommendation är därför att läsa nedanstående lista speciellt noga för att undvika missförståelse av ekvationer.

Enhet

[7]	Ampere	[52]	Kelvin	[23]	Sekund
[48]	Centipoise	[54]	Meter	[SEK]	Svensk krona
[dB]	Decibel	[47]	Newton	[USD]	Amerikansk dollar
[h]	Timme	[Pa]	Pascal	[V]	Volt
[8]	Joule	[rad]	Radian	[W]	Watt

Storhet		Vetenskapligt område	Alternativa beteckningar i litteraturen
A	area [m^2]	Geometri	
Â	ljudvågsamplitud	Fysik	
a	Van der Waals-konstant [Nm^4/mol^2]	Kemiteknik	
α	vinkel [°]	Geometri	
b	Van der Waals-konstant [m^3/mol]	Kemiteknik	
β	korrektionsfaktor för kinetisk energi [–]	Strömningsmekanik	α
c	specifik värmekapacitet [J/kg·K]	Kemiteknik	
c_v	specifik värmekapacitet vid konstant volym [J/kg·K]	Kemiteknik	
$\cos\varphi$	effektfaktor [–]	Elektroteknik	EF, pF
D	diameter [54]	Geometri	
E	energi (allmänt) [8]	Fysik	ε
E_P	lägespotentiell energi [kWh]	Elektroteknik	PE, ε_P, U
E_T	termisk energi [kWh]	Kemiteknik	T_e

Storhet		Vet. område	Alternativa beteckningar
ΔE_{mek}	mekanisk energiöverföring [J/kg]	Strömningsmekanik	e_{mek}
ε	grovhet [mm]	Strömningsmekanik	
f	Darcys friktionsfaktor [–]	Strömningsmekanik	λ
f_{vol}	volymsfraktion (0-1) [–]	Geometri	
H	tröghetskonstant [23]	Elektroteknik	
ΔH_m	smältentalpi [J/kg]	Kemiteknik	H
h	höjd [54]	Geometri	H
J	tröghet [kg·m^2]	Elektroteknik	
K_L	tryckförlustskonstant [–]	Strömningsmekanik	c, ξ, λ
L	tublängd [54]	Geometri	
ℓ	längd (allmänt) [54]	Geometri	L
λ	friktionsfaktor vid rörströmning [–]	Strömningsmekanik	
M	molmassa [kg/mol]	Kemiteknik	
m	massa [kg]	Fysik	M
n	substansmängd [mol]	Kemiteknik	
η	verkningsgrad [%]	Elektroteknik	
μ	dynamisk viskositet	Strömningsmekanik	
P	aktiv effekt [W]	Elektroteknik	
p	tryck [Pa]	Strömningsmekanik	P
ρ	densitet [kg/m^3]	Strömningsmekanik	
$\wp$	våt perimeter [54]	Strömningsmekanik	
Q	volymflöde [m^3/s]	Strömningsmekanik	ϕ_V
R	reservoarvolym [m^3]	Geometri	
Re	Reynoldstalet [–]	Strömningsmekanik	
r	radie [54]	Geometri	R

Storhet		Vet. område	Alternativa beteckningar
S	skenbar effekt [MVA]	Elektroteknik	T
T	temperatur [52]	Fysik	
t	tid [23]	Fysik	
V	volym [m^3]	Geometri	
v	hastighet [m/s]	Strömningsmekanik	
υ	kinematisk viskositet [m^2/s]	Strömningsmekanik	v
Ω	vinkelhastighet [rad/s]	Elektroteknik	ω
x_{spot}	spotpris vid konsumtion [SEK]	Ekonomi	
ξ	vätskeandel (0-1) [–]	Geometri	
y_{spot}	spotpris vid produktion [SEK]	Ekonomi	
¤	generell valuta [SEK, USD, m.fl.]	Ekonomi	kr

Konstanter		**Alternativa beteckningar**
Atmosfärstryck	1 atm = 101,3 kPa	
Ideala gaskonstanten	$\Re$ = 8,3145 J/(K·mol)	R
Substansmängd	1 mol = $6{,}022 \cdot 10^{23}$ st	
Tyngdacceleration	g = 9,82 m/s^2 (*geog.* Sverige)	g_e

Skrivsätt		**Alternativt skrivsätt**
$f^{(t)}$	tidsvariant funktion f	$f(t)$

Förkortningar

ACE	*eng.* **A**rea **c**ontrol **e**rror
aFRR	Automatisk frekvensåterställningsreserv (*eng.* **A**utomatic **f**requency **r**estoration **r**eserve)
AKI	**A**rbets**k**ostnads**i**ndex (*eng.* labour cost index, LCI)
CAES	Energilagringssystem baserat på tryckluftsteknik (*eng.* **C**ompressed-**a**ir **e**nergy **s**torage)
A-CAES	**A**diabatiskt **CAES**
D-CAES	**D**iabatiskt **CAES**
I-CAES	**I**sotermiskt **CAES**
FCR-D	Frekvenshållningsreserv vid störning (*eng.* **F**requency **c**ontainment **r**eserve – **d**isturbance)
FCR-N	Frekvenshållningsreserv vid normaldrift (*eng.* **F**requency **c**ontainment **r**eserve – **n**ormal)
FDD	Flödesdämpare (*eng.* **F**low **d**amping **d**evices)
FFR	Snabb frekvensreserv (*eng.* **F**ast **f**requency **r**eserve)
mFRR	Manuell frekvensåterställningsreserv (*eng.* **M**anual **f**requency **r**estoration **r**eserve)
PAT	Turbinpump (*eng.* **P**ump **a**s **t**urbine)
PSH	Pumpkraftverk (*eng.* **P**umped-**s**torage **h**ydroelectricity)
PVC	Polyvinylklorid (*eng.* **P**oly**v**inyl **c**hloride)
RPT	**R**eversibel **p**ump**t**urbin
RR	*eng.* **R**estoration **r**eserve
RTE	Round-trip verkningsgrad (*eng.* **R**ound-**t**rip **e**fficiency)
SE1-SE4	Sveriges elområden, numrerade från norr till söder
TES	Termisk energilagring (*eng.* **T**hermal **e**nergy **s**torage)
PCM	Latent värmelagring (*eng.* Latent heat storage using **p**hase **c**hange **m**aterials)
TCS	Termokemisk värmelagring (*eng.* **T**hermo-**c**hemical storage)
TSO	Transmissionsnätsoperatör (*eng.* **T**ransmission **s**ystem **o**perator)

eng.	**Eng**elsk översättning

1 Inledning

1.1 Bakgrund

Klimatförändringarna är ett faktum. Det är inte längre en fråga om mänsklighetens drastiskt ändrade samhällen och levnadssätt sedan 1800-talets industrialisering får och kommer fortsätta få konsekvenser på det ekosystem som vi är en del av. Därför lever vi i en speciell tid då viktiga ageranden och beslut behöver ske för att vända trenden och bromsa vårt destruktiva förhållande till jordens natur och miljö.

Jämfört med tiden före industrialismens början har Sveriges medeltemperatur redan stigit med 1,7 °C och på grund av trögheten i klimatsystemet har vi ännu inte sett konsekvenserna av dagens ageranden [1]. Det är en temperaturskillnad som kan upplevas liten, men som leder till stora förändringar i förutsättningarna för ekologin och kretsloppen. Växthuseffekten innebär att så länge koncentrationen av koldioxidekvivalenter är högre i atmosfären än naturligt (utan bidrag från mänskliga faktorer) kommer atmosfärens temperatur att öka. Detta sammanfattas i Agenda 2030 och de Globala målen av FN [2].

Sveriges elmix bestod år 2021 av 43 % vattenkraft, 31 % kärnkraft, 17 % vindkraft, 9 % värmekraft och 1 % solkraft [3]. Med andra ord bestod den totala elproduktionen av nästan en femtedel intermittent produktion. Sådan intermittent elproduktion ökar årligen och ställer stora krav på möjliggörande av lagring av elektrisk energi [4]. År 2009 stod vind- och vattenkraften dessutom för 13 % av Sveriges totala energitillförsel (det vill säga med värmeenergin och den importerade elenergin inräknad) [5]. När allt fler stadsdelar och hus ska bli elektriskt självförsörjande kommer behovet av elektrisk energilagring att uppstå även inom städerna. Ett annat argument för att placera lagringsanläggningar inom städer är att det inte innebär lika stor negativ påverkan på natur och ekosystem som när de anläggs i lantliga miljöer. Ett tredje är kortare krävda transmissionssträckor vilket med andra ord resulterar i smärre energiförluster.

Utöver kemiska batterier finns fler metoder för lagring av elektrisk energi. En sådan är så kallad pumpkraft, där tillfälliga energiöverskott konsumeras genom att driva en maskin som pumpar vätska från en lägre höjd till en högre, varvid den elektriska energin omvandlas till lägespotentiell energi [6]. Vätskan lagras på den högre höjden tills ett behov av elektrisk energi uppstår, då släpps vattnet ned igen via en turbin som åter alstrar elektrisk energi ur den då flödande vätskan. Pumpkraftverk återfinns i dag huvudsakligen i stor skala. Dock är de i stor skala komplicerade att upprätta eftersom de på grund av sin storskalighet kräver platser med geografiska och regelmässiga förutsättningar som är svåra att lokalisera.

Elektrisk energi kan även lagras i form av potentiell energi i gas som är försatt i ett högt tryck, vilket i sin tur leder till en hög temperatur och därmed lagring av termisk energi. I likhet med pumpkraftens koncept, nyttjas sedan en generator för att åter konvertera den lagrade termisk energin i fluiden till elektrisk energi när behovet av sådan åter finns.

I urban miljö skulle småskaliga lagringsmetoder som dessa kunna anläggas med olika avsikter. Dels kan syftet vara att, likt de storskaliga pumpkraftverken, konsumera och generera elektrisk energi för att jämna ut variationen av frekvensen eller spänningsnivån på elnätet [4]. Om de småskaliga kraftverken inryms i byggnader skulle likväl avsikten dels kunna vara att generera elenergin för den egna byggnadens räkning och enbart använda den lagrade energin i den mån att det matchar byggnadens energibehov.

1.2 Syfte

Målsättningen är att redogöra för om pumpkraft (PSH) respektive gastryckslagring (CAES) i liten skala är ekonomiskt hållbara samt om de är lämpliga för stadsplaneringsmässiga intressen.

1.3 Avgränsningar

- Enbart kraftverk i rent vertikala (PSH) eller rent horisontella (CAES) utföranden omfattas av analysen, till skillnad från att storskaliga pumpkraftverk ofta leder vattnet via en diagonal passage. Samtliga rör antas vara cylindriska och det omgivande lufttrycket i tankarna antas vara försumbar lågt.

- Konstellationer där lagringsmetoderna i fråga kombineras med andra metoder såsom kemiska batterier, eller med lokala elproduktionsanläggningar såsom solpaneler och vindturbiner, omfattas inte av studien. Följaktligen analyseras inte synergiska möjligheter.

- Enbart så kallade RPT- och PAT-maskiner, det vill säga hybrida turbomaskiner, analyseras. Skillnader mellan teknologierna multistage, end suction och double suction diskuteras ej. Studiens beräknings-modeller tar inte hänsyn till ventiler och engångsförluster härrörande dem.

- Studien avgränsas från isotermisk CAES (I-CAES) på grund av att teknologin förväntas nå marknaden först långt fram i tiden. Apropå A-CAES analyseras inte termokemisk TES, på grund av teknologins avancerade kemiteknik, utan enbart sensibel och latent TES.

- I studiens ekonomiska kalkyler är räntepåslag och eventuell moms ej inräknade. Konsekvenser på spot-priserna vid mångfaldig installation av de småskaliga lagringsanläggningarna tas heller ingen hänsyn till.

- Studien innefattar ej hållfasthetsberäkningar men hållfasthet diskuteras ytligt.

1.4 Precisering av frågeställningar

Rapporten avser att bemöta följande punkter.

1. Hur stor lagringskapacitet och hög verkningsgrad kan fås med lagringsteknikerna pumpkraft (PSH) respektive gastryckslagring (CAES) för olika kombinationer av fluidämnen, konstruktionsmaterial och små fluidvolymer.

2. Var i den urbana miljön kan metoderna tillämpas, vad kan dessa installationer leda till för samhälleliga konsekvenser, såsom ljudnivå, och hur hanteras de?

3. Vore småskaliga PSH- respektive CAES-anläggningar ekonomiskt hållbara i nu rådande ekonomiska läge?

2 Teori

2.1 Pumpkraft (PSH)

2.1.1 Introduktion

Storskaliga pumpkraftverk påminner mycket om traditionella vattenkraftverk där fördämningar av vatten töms via en turbin, som därmed försätter en generator i rörelse som då alstrar elektricitet. Konceptet är med andra ord följande steg av omvandling mellan olika energiformer: lägespotentiell energi → rörelseenergi → elektrisk energi. Om den här enkla principen emellertid omkonstrueras till att bli ett slutet system, det vill säga att vattnet som passerat nedför kraftverket sedan pumpas upp till fördämningen igen, vilket resulterar i att cykeln sedan kan upprepas om och om igen, fås det som kallas ett *pumpkraftverk* (PSH), se Fig. 1.

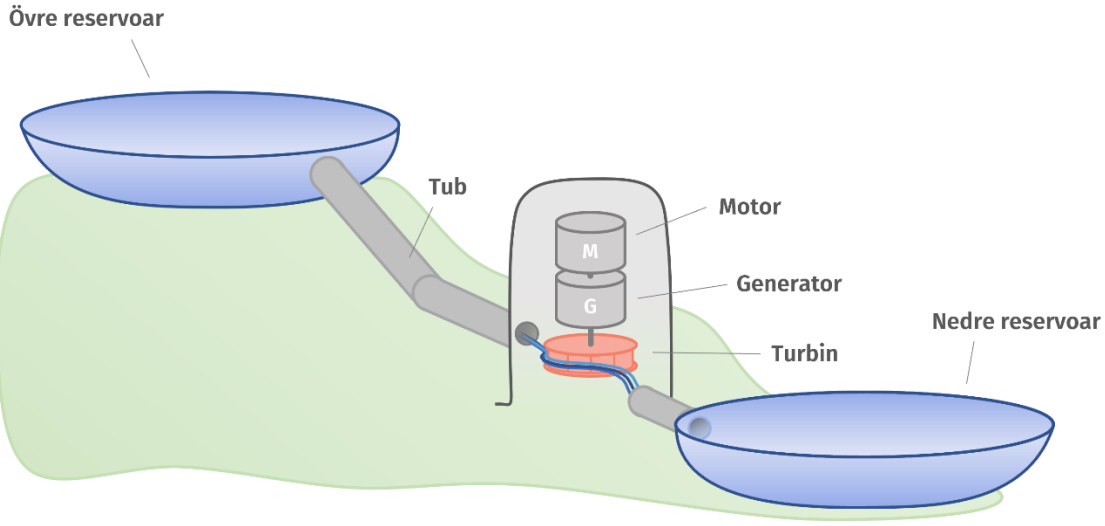

Fig. 1. Konceptuell visualisering av principen hos storskaliga pumpkraftverk och deras delar. Kombinationen av motor och generator på gemensam axel utgör grunden för tekniken bakom RPT. CC BY-NC-ND.

Pumpkraftverk är form av *lagringskraftverk*. Det innebär att huvudsyftet inte är att producera elektricitet utan att fungera likt ett stort batteri. Likt ett batteri kan pumpkraftverket laddas upp, dock genom att omvandla den elektriska energin till lägespotentiell energi snarare än i kemisk energi såsom i batteriet. Trots dess låga energi-volymdensitet är pumpkraft idag den lagringsmetod för elektrisk energi som står för den största andelen lagrad energi i världen [7], eftersom de storskaliga pumpkraftverken rymmer mycket stora vattenvolymer. Det finns många storskaliga pumpkraftverk i drift i världen i dagsläget [8].

På grund av att energidensiteten för vatten är så pass låg, är pumpkraftverk med avsiktligt mindre vattenvolymer mindre vanliga eftersom den totala lagringskapaciteten inte blir särskilt stor. Lägenhets-komplexet *The Goudemand Residence* i Pas-de-Calais, Frankrike, är än så länge den enda byggnaden i världen som har en pumpkraftsanläggning integrerad [7]. Med en 50 m^2 stor reservoar på marknivå och en 60 m^2 stor reservoar i form av en öppen bassäng på taket 30 meter ovan mark, kan den anläggningen lagra upp till omkring 3,5 kWh. Den lagrade energin var avsedd att täcka elkonsumtionen av byggnadens lokaltelefoni, belysning, brandvarnarsystem och hissar. Anläggningen lyckades bemöta alla dessa behov förutom hissarna, då hissarna medförde momentana alltför höga toppar i deras elkonsumtion. The Goudemand Residence byggdes år 1975 men lagringsanläggningen installerades först 37 år senare. Dess nedre reservoar består av ett stort antal sammankopplade plasttankar av små volymer och likaså är rörsystemet tillverkat av plast (PVC). Kostnaderna för byggnationen av PHS-anläggningen i The Goudemand Residence som var en efterkonstruktion, inkluderat reservoarer, pump, turbin, rör, elektronik samt övriga kostnader, uppgick i €38.000.

2.1.2 Strömningsmekaniska beräkningar

Om en rätblocksformad reservoar, vars botten definierar höjden Δh över nollnivån, fylls med en vätska till mängden motsvarande vätskehöjden $h_{ytnivå}$ inuti reservoaren får denna vätska den sammanlagda lägespotentiella energin E_P uttryckt som ekvation 1 [9]. I ekvationen är g tyngdaccelerationen och m är vätskans massa som i sin tur beräknas enligt ekvation 2.

$$E_P = m \cdot g \cdot \left(\Delta h + \frac{h_{ytnivå}}{2}\right) \quad (1)$$

$$m = \rho \cdot V \quad (2)$$

I den senare ekvationen betecknar ρ vätskans densitet och V är vätskans volym. Några olika vätskors densiteter presenteras i tabell 1.

Tabell 1.

Densitet, ρ, för vatten och ett urval andra vätskor med högre densitet än vatten, samt för luft och ett urval andra gaser med högre densitet än luft, vid p = 10^5 Pa och T = 0 °C för gaser respektive T = 20 °C och för vätskor. Från [10], [9].

Material	Densitet [kg/m^3]
Vatten	998
Tungt vatten	1105,3
Glycerin	1260
Sirap	1300-1500
Kvicksilver	13540
Luft	1,2929
Syrgas	1,429
Kvävgas	1,250

Vätsketrycket på bottnen av den rätblocksformade reservoaren är $p_{vätska}$, se ekvation 3 [9].

$$p_{vätska} = \rho \cdot g \cdot h_{ytnivå} \quad (3)$$

Vätskan flödar i tuben med en hastighet som bestäms av pumpens rotationshastighet, både vid motor- (pump) och generatordrift (turbin). Därmed begränsas volymflödet (m^3/s) vid generatordriften av denna rotationshastighet och uppnår sedermera inte den hastighet som gravitationen hade orsakat vid fritt fall. Därför kan volymflödet ses som oberoende av gravitationskraften. Med andra ord blir det ingen friktionsmässig skillnad mellan motor- och generatordrift (energilagringsfas respektive elproduktionsfas); när vätskan flödar i kontakt med tubytan uppstår friktion men friktionens storlek är oberoende av åt vilket håll som vätskan flödar. Till följd av detta kommer återstoden av avsnitt 2.1.2 enbart behandla motordriften (pumpning), men förhållandena blir exakt desamma vid generatordrift.

För att förmå att förflytta vätska från den nedre reservoaren upp mot den övre krävs då ett sådant tryck vid pumpens mynning som resulterar i en uppåtriktad resulterande kraft på vätskan i tuben. Låt oss benämna detta tryck p_{krav}. Storleken på p_{krav} kan tudelas baserat på de två motarbetande krafter som kravet orsakas av – dels gravitationskraften, dels friktionskraften. Notera att samtliga tryck är funktioner av tiden på grund av att vätskedjupet i de olika utrymmena ändras. Se ekvation 4. Observera i likhet att höjderna i ekvation 1 är tidsberoende hos pumpkraftverk.

$$p_{krav}^{(t)} = p_{förlustfritt}^{(t)} + p_{förluster}^{(t)} \quad (4)$$

Tryckförlusterna i fråga härrör den rörelseenergi hos vätskan som omvandlas till värmeenergi på grund av friktion mot apparaturytor. Om bottnen hos den nedre reservoaren är i nivå med nollnivån ($h = 0$) och bottnen hos den övre reservoaren är i nivå med den relativa höjden $h = \Delta h$, kan det motarbetande vätsketrycket ovanför pumpen uttryckas enligt ekvation 5 såvida vätskan är homogent fördelad.

$$p_{vätska}^{(t)} = \rho \cdot g \cdot \left(\Delta h^{(t)} + h_{ytnivå:övre}^{(t)}\right) \tag{5}$$

Trycket $p_{vätska}^{(t)}$ härrör med andra ord den delmängd av vätskan som befinner sig över pumpen vid varje godtycklig tidpunkt och skulle bli lika med noll om hela övre reservoaren samt tuben tömdes. Hade inga förluster förekommit skulle det krävda pumptrycket ha blivit $p_{krav}^{(t)} > p_{vätska}^{(t)}$. Med hänsyn till förluster gäller följaktligen i stället att $p_{förlustfritt}^{(t)} \approx p_{vätska}^{(t)}$.

Emellertid är vätsketrycket vid pumpens inlopp inte lika med noll eftersom djupet hos det kvarvarande vätskeinnehållet i den nedre reservoaren bidrar till ett tryck in i pumpen, p_{in}, se Fig. 2. Därmed behöver inte pumpen tillföra hela det krävda trycket p_{krav} utan enbart den krävda tryckökningen $\Delta p_{krav} = p_{krav} - p_{in}$, se ekvation 6.

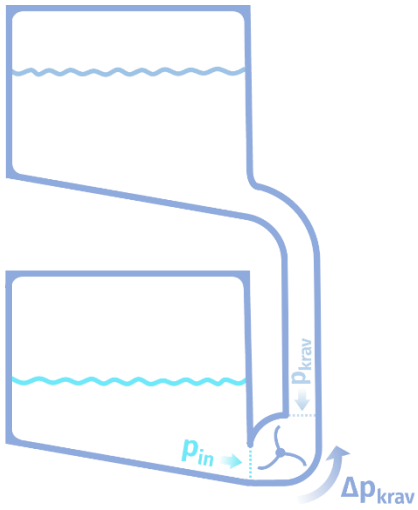

Fig. 2. Definitionen av p_{in}, p_{krav} och Δp_{krav} i en PSH-anläggning vid motordrift. Vid generatordrift orsakas Δp_{krav} av den vätska som pumpats upp och Δp_{krav} motsvarar då det tryck som p_{krav} behöver vara större än för att orka driva generatorn. CC BY-NC-ND.

$$p_{krav}^{(t)} = \Delta p_{krav}^{(t)} + p_{in}^{(t)} = p_{förlustfritt}^{(t)} + p_{förluster}^{(t)} \tag{6}$$

Den bidragande kraften på grund av p_{in} minskar med vattendjupet i den nedre reservoaren och skulle ha nått noll om reservoaren hade tömts helt. I praktiken töms dock aldrig reservoaren helt eftersom pumparna är konstruerade för att höja vätsketrycket med Δp_{krav} vilket förutsätter att det finns vätska på bägge sidor om pumpen. p_{in} beräknas enligt ekvation q29b, som påminner mycket om ekvation 7.

$$p_{in}^{(t)} = \rho \cdot g \cdot h_{ytnivå:nedre}^{(t)} \tag{7}$$

Den optimala dimensioneringen av reservoarerna är att låta den nedre reservoaren rymma lika mycket som den övre reservoaren och tuben tillsammans, eftersom en förutsättning är att pumpen alltid är i kontakt med vätskan. $h_{ytnivå:nedre}^{(t)}$ i ekvation 7 ovan som funktion av de två andra vätskedjupen behöver uttryckas för två

olika fall: dels när $h_{ytnivå:övre}^{(t)} > 0$, dels när $h_{ytnivå:övre}^{(t)} = 0$. Detta visas i ekvation 8, där V_{tot} är den konstanta totala vätskemängden i anläggningen, A_R är tvärsnittsarean för reservoarerna och A_{tub} är tvärsnittsarean för tuben. $\Delta h^{(t)}$ kan anta värden mellan maximalt Δh och minimalt den nedre reservoarens bottenhöjd.

$$h_{ytnivå:nedre}^{(t)} = \begin{cases} \frac{V_{tot} - A_{tub} \cdot \Delta h^{(t)}}{A_R} & ; \quad h_{ytnivå:övre}^{(t)} = 0 \\ \frac{V_{tot} - A_{tub} \cdot \Delta h}{A_R} - h_{ytnivå:övre}^{(t)} & ; \quad h_{ytnivå:övre}^{(t)} > 0 \end{cases} \tag{8}$$

Vidare blir även ekvation 1 mer avancerad och tudelad, se ekvation 9.

$$E_P^{(t)} / \rho \cdot g = \begin{cases} V_{tub}^{(t)} \cdot \frac{\Delta h^{(t)}}{2} + h_{ytnivå:nedre}^{(t)} \cdot A_R \cdot \frac{h_{ytnivå:nedre}^{(t)}}{2} & ; \quad h_{ytnivå:övre}^{(t)} = 0 \\ V_{tub} \cdot \frac{\Delta h}{2} + h_{ytnivå:nedre}^{(t)} \cdot A_R \cdot \frac{h_{ytnivå:nedre}^{(t)}}{2} + \cdots \\ + h_{ytnivå:övre}^{(t)} \cdot A_R \cdot \left(\Delta h + \frac{h_{ytnivå:övre}^{(t)}}{2} \right) & ; \quad h_{ytnivå:övre}^{(t)} > 0 \end{cases} \tag{9}$$

Tryckskillnader i rör beror även av hastighetsförändringen hos den vätska som passerar [11]. Detta samband beskrivs av *Bernoullis lag* som vid en godtycklig tidpunkt kan utryckas som ekvation 10. Lagen förutsätter att de två punkterna (1 och 2) förbinds med samma strömlinje och att ingen energi tillförs eller bortförs mellan dem.

$$\frac{p_1 - p_2}{\rho} + \frac{v_1^2 - v_2^2}{2} + g \cdot (h_1 - h_2) = 0 \tag{10}$$

Förlusterna i rörsystem beräknas med hjälp av rörens friktionsfaktor, λ [11]. För vätskor med hög viskositet, det vill säga med trögflytande karaktär, blir tryckförlusterna i ett rör större vid en viss friktionskoefficient än för mer lättflytande vätskor (låg viskositet) [12]. Storheten viskositet delas in i *dynamisk viskositet* (μ) och *kinematisk viskositet* (υ) [13]. Skillnaden mellan dem är att den kinematiska viskositeten anges relativt densitet, det vill säga att dess definition lyder som ekvation 11.

$$\upsilon = \frac{\mu}{\rho} \tag{11}$$

Enheten för den dynamiska viskositeten är Pa·s eller kg/s·m och för den kinematiska följaktligen m^2/s. Den dynamiska viskositeten hämtas sedermera ur tabellverk för olika ämnen, se tabell 2. Viskositeten för gaser ökar när temperaturen stiger, men sjunker för vätskor [10].

Tabell 2.

Dynamisk viskositet, μ, för fluiderna vid T = 273 K (0 °C) för gaser och T = 291 K (18 °C) för vätskor. Från [10], [14], [9]. Som omvandlingsfaktor används 1 cP (centipoise) = 0,001 Pa·s.

Material	Dynamisk viskositet [Pa·s]
Vatten	$1{,}04 \cdot 10^{-3}$
Tungt vatten	$1{,}04 \cdot 10^{-3}$
Glycerin	1,6
Sirap	0,36
Kvicksilver	$1{,}52 \cdot 10^{-3}$
Luft	$1{,}67 \cdot 10^{-5}$
Syrgas	$1{,}92 \cdot 10^{-5}$
Kvävgas	$1{,}65 \cdot 10^{-5}$

En generellt uttryck för friktionsfaktorn λ togs fram av Henry Darcy i samarbete med Julius Weisbach. Friktionsfaktorn benämns sedermera som *Darcys friktionsfaktor* i de fall då deras ekvation tillämpas. Darcys friktionsfaktor betecknas med f och genom approximationen att den generella ekvationen stämmer ansätts $\lambda = f$. Darcys friktionsfaktor beskriver strömningsförslusterna som en funktion av det så kallade *Reynolds-talet*, Re, som ämnar till att karakterisera olika grad av turbulens [15]. Förutsatt cylindriska rör gäller $Re \lesssim 2300$ för laminära flöden och vid $Re \gtrsim 4000$ råder fullt utvecklad turbulens [11]. Emellan dessa gränser råder det så kallade *övergångsområdet* (*eng.* transitional flow), det vill säga delvis utvecklad turbulens [16]. Reynoldstalet för rörströmning är definierat enligt ekvation 12 [17].

$$Re = \frac{\rho \cdot Q \cdot D_h}{\mu \cdot A_{rör}} \tag{12}$$

Här är Q vätskans volymflöde mätt i m^3/s, $A_{rör}$ är rörets tvärtsnittsarea i m^2 och D_h är rörets *hydrauliska diameter*. Den hydrauliska diametern kan ses som en representativ diameter för icke-cylindriska rör och beräknas som $D_h = 4 \cdot A_{rör}/\wp$ där $\wp$ är rörets *våta perimeter*, det vill säga den sträcka som vätskans kontaktyta mot rörets insida motsvaras av i tvärsnittet [18], [11]. För cylindriska rör är den hydrauliska diametern emellertid lika med rörets faktiska diameter, $D_h = D$. För sådana rör är arean definierad som ekvation 13.

$$A_{rör} = \pi \cdot D^2/4 \tag{13}$$

2.1.2.1 Rent laminära flöden

För rörströmningar utan inslag av turbulens eller med försumbart svag turbulens kan förlusttermen i ekvation q1 beskrivas som en funktion av den genomsnittliga vätskehastigheten i röret, v_{avg}, enligt ekvation 14 [11].

$$p_{förluster}^{(t)} \approx f^{(t)} \cdot \frac{1}{D_h} \cdot \frac{\rho \cdot v_{avg}^2}{2} \cdot \xi^{(t)} \cdot L \tag{14}$$

Här är ρ är vätskans densitet, L är tubens längd och ξ är andelen av röret som är vätskefyllt. Med andra ord motsvarar $\xi = 1$ att $h_{ytnivå:tub} = \Delta h$ och $h_{ytnivå:tub} = 0$ motsvaras av att $\xi = 0$. Ett approximativt uttryck för ξ antas följdevis som ekvation 15.

$$\xi^{(t)} = \frac{\Delta h^{(t)}}{L} \tag{15}$$

Den genomsnittliga vätskehastigheten i tuben v_{avg} kan beräknas som ekvation 16.

$$v_{avg} = \frac{Q}{A} = \frac{V/t_{drift}}{A} \tag{16}$$

Här betecknar Q volymflödestätheten i m^3/s och t_{drift} är tiden i sekunder som det tar för en delmängd av vätskan med volymen V mätt i m^3 att passera tubens tvärsnittsarea A i m^2.

För laminära flöden blir även Darcys friktionsfaktor enkel att räkna ut, se ekvation 17 [19]. Detta förhållande faller ur en mer avancerad ekvation som introduceras i nästa avsnitt.

$$f = \frac{64}{Re} \tag{17}$$

Sammantaget kan ekvation q1 vid rent laminära flöden i cylindriska rör utvecklas till ekvation 18.

$$p_{krav}^{(t)} = \rho \cdot g \cdot \left(\Delta h^{(t)} + h_{ytnivå:övre}^{(t)}\right) + 128 \cdot \frac{\mu \cdot Q}{\pi \cdot D^4} \cdot \xi^{(t)} \cdot L \tag{18}$$

Slutligen kan ekvation 6 vid laminära flöden i cylindriska rör approximativt utvecklas till ekvation 19.

$$\Delta p_{krav}^{(t)} = \rho \cdot g \cdot \left(\Delta h^{(t)} + h_{ytnivå:övre}^{(t)} - h_{ytnivå:nedre}^{(t)}\right) + 128 \cdot \frac{\mu \cdot Q}{\pi \cdot D^4} \cdot \xi^{(t)} \cdot L \tag{19}$$

2.1.2.2 Turbulenta och delvis turbulenta flöden

När turbulens förekommer gäller inte längre ekvationerna 14 och 17-19. Därmed kan Darcys friktionsfaktor inte längre approximativt ses som $^{64}/_{Re}$ (ekvation 17). Däremot kan f i stället beräknas iterativt med hjälp av den bakomliggande så kallade *Colebrook-ekvationen*, ekvation 20, där ε är rörets *grovhet* [11], [20]. Den här beräkningen behöver lösas för varje godtycklig tidpunkt enskilt.

$$\frac{1}{\sqrt{f}} = -2{,}0 \cdot \log\left(\frac{\varepsilon/D_h}{3.7} + \frac{2{,}51}{Re \cdot \sqrt{f}}\right) \tag{20}$$

Grovheten är ojämnheten i ytan hos det material som rör och reservoarer (kort. *apparaturen*) är konstruerade av. Ett urval vanliga ämnen som förekommer på marknaden och dessas grovheter presenteras i tabell 3.

Tabell 3.

Typvärden för grovheten, ε, hos ett urval olika material som förekommer i VVS-apparatur. Från [20].

Material	Grovhet [mm]
Glas, plast	$\gtrsim 0$
Betong	0,9–9
Koppar, mässing	0,0015
Förzinkat stål	0,15
Stål ("commercial steel")	0,045
Rostfritt stål	0,002

Vid turbulens bör även ytterligare en typ av förluster tas hänsyn till – en typ som orsakas av ökad friktion vid rördelar såsom böjar och mynningar [21]. En enkel metod för att tillgodoräkna dessa så kallade *engångs-förluster* (äv. ”mindre tryckförluster”) är att beräkna rördelarnas *ekvivalenta rakrörslängd*, se ekvation 21 [11].

Syftet med metoden är, som namnet antyder, att utreda hur långt ett oavbrutet rakt rör *utan* engångsförluster vore för att resultera i samma totala förluster som det faktiska röret *med* engångsförluster har.

$$L_{ekv} = L + \sum\left(\frac{K_L}{\lambda} \cdot D\right) = L + \frac{\sum K_L}{\lambda} \cdot D \qquad (21)$$

I uttrycket är K_L den enhetslösa tryckförlustskonstanten, vars värde ofta hämtas ur typvärdestabeller. Sådana typvärden överses i Fig. 3 och tillhörande tabell 4.

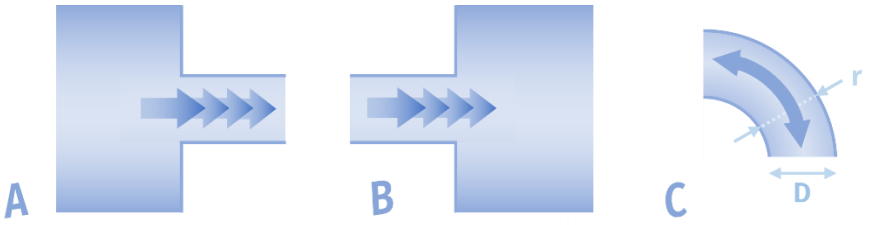

Fig. 3. Urval typer av rördelar vars typvärden för tryckförlustkonstanten för engångsförluster, K_L, anges i tabell 4. *A:* Skarpkantat rörinlopp. *B:* Skarpkantat rörutlopp. *C:* Rörböj 90°. CC BY-NC-ND.

Tabell 4.

Typvärden för tryckförlustkonstanten för engångsförluster, K_L, för de rördelar som illustreras i figur 3. Från [11]. För skarpkantade rörutlopp beskrivs K_L med den så kallade *korrektionsfaktorn för kinetisk energi*, β, som antar 2 vid rent laminära flöden och ungefär lika med 1,05 för fullt utvecklat turbulenta flöden.

Rördel		K_L [-]
A Skarpkantat rörutlopp		1,05-2,0
B Skarpkantat rörinlopp		0,50
C Rörböj 90°	$r > 4 \cdot D$	0,2
	$r = D$	0,4

För ortogonala rörböjar där $r \in (D, 4D]$ finns inga typvärden för K_L, i stället behöver engångsförlustkonstanten då räknas för varje enskilt fall enligt ekvation 22 [20]. Denna ekvation är för övrigt definitionen för K_L i alla sammanhang och kan användas för mer exakta beräkningar när typvärden inte anses tillräckligt noga, såvida tryckskillnaden före och efter rördelen, Δp_L, är känd.

$$K_L = 2 \cdot \frac{\Delta p_L}{\rho \cdot V^2} \qquad (22)$$

Sammanfattningsvis blir motsvarigheten till ekvation q3 för turbulenta flöden följande ekvation 23.

$$p_{förluster}^{(t)} \approx f^{(t)} \cdot \frac{1}{D_h} \cdot \frac{\rho \cdot v_{avg}^2}{2} \cdot \xi^{(t)} \cdot L_{ekv} \qquad (23)$$

Slutligen kan ekvation 6 vid turbulenta flöden i cylindriska rör approximativt utvecklas till ekvation 24.

$$\Delta p_{krav}^{(t)} = \rho \cdot g \cdot \left(\Delta h^{(t)} + h_{ytnivå:övre}^{(t)} - h_{ytnivå:nedre}^{(t)}\right) + f^{(t)} \cdot 8 \cdot \rho \cdot \frac{Q^2}{\pi^2 \cdot D^5} \cdot \xi^{(t)} \cdot L_{ekv} \qquad (24)$$

2.2 Gastryckslagring (CAES)

2.2.1 Introduktion

Den elektriska energilagringsmetod som återfinns installerad i näst högst lagringseffekt globalt, näst efter pumpkraft, är så kallade *energilagringssystem baserade på tryckluftsteknik* (CAES), kort *gastryckslagring* [22]. Metoden går ut på att överskottsenergi driver en motor som komprimerar luft eller annan gas. För att återfå elektrisk energi hettas sedan den komprimerade gasen upp, varvid den expanderar och leds via en turbin sammankopplad med en generator som alstrar elektricitet. Alternativt tillsätts naturgas till den trycksatta gasen för att möjliggöra förbränning av den i en förbränningsmotor som driver generatorn [23], [22].

I dagsläget finns två storskaliga CAES-anläggningar byggda i världen, *McIntosh* i USA och *Huntorf* i Tyskland [24]. Bägge använder före detta saltgruvor som kompressionslager. Emellertid är saltgruvor enbart en av fem underjordiska geologiskt förekommande utrymmen som anses ha potential att tillvaratas för CAES. De övriga är tömda olje- och naturgaskällor, stengrottor, så kallade *akvifer* (ansamling av grundvatten [25]) samt före detta gruvor av mineral och kol [24]. Saltgrottor är naturligt tätade vilket är en stor fördel gentemot de övriga underjordiska ihåligheterna vars eventuella sprickor behöver tätas, vilket är en kostsam åtgärd. CAES har även potential att anläggas under vatten samt ovan jord, där det sistnämnda avser artificiellt konstruerade lager.

McIntosh- och Huntorf-anläggningarna är båda av typen *diabatisk CAES* (D-CAES) som är den enda färdigutvecklade och kommersiellt förekommande CAES-tekniken [22]. Därtill finns så kallad *adiabatisk CAES* (A-CAES, ursprungligen AA-CAES [26]) under utveckling och testning i den tyska ADELE-anläggningen samt *isotermisk CAES* (I-CAES) [22], [27]. Termerna diabatisk och adiabatisk betyder att det sker, respektive inte sker, en värmeutveckling mellan systemet (anläggningen) och omgivningen (luften utanför anläggningen) [28]. För CAES innebär det i praktiken att det hos A-CAES finns ett kompletterande energilager som absorberar den värme som utvecklas vid kompressionen och att anläggningen sedan återanvänder denna värme i expansionsfasen, medan D-CAES läcker ut värmen vilket resulterar i stora energiförluster och en mycket låg verkningsgrad [22]. Hos D-CAES måste därför dessutom ny värme tillföras för att åstadkomma expansionssteget. I-CAES är i sin tur en vidareutveckling av A-CAES som komprimerar gasen lika sakta som TES:ens absorption av värmeutvecklingen sker [29]. På så vis stiger inte temperaturen i reservoaren, i enlighet med termen isotermisk som innebär att temperaturen är konstant [30]. Energilagren i fråga som tillämpas i A-CAES och I-CAES kallas för *termiska energilager* (TES) [24]. Fig. 4 åskådliggör konceptet bakom CAES.

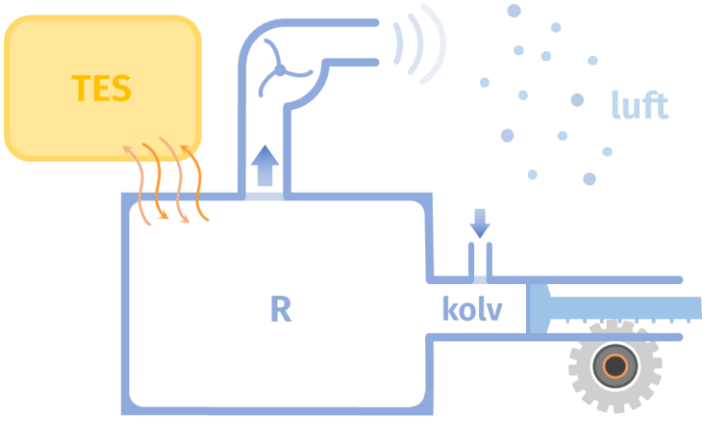

Fig. 4. Schematisk bild föreställande det allra mest grundläggande upplägget för A-CAES. I praktiken sprutas oftast gas in i tanken med en pump snarare än pressas in med en kolv. Notera att anläggningen kan vara ett öppet system eftersom vanlig luft tillvaratas som gas i detta upplägg. CC BY-NC-ND.

En cykel hos en A-CAES-anläggning med konstruktionen i Fig. 4 skulle ha motsvarats av följande steg:

(1) Reservoaren fylls med luft varpå kolven trycks in, vilket ökar trycket och temperaturen hos luften. Överskottsvärmen absorberas (med en viss tröghet) av en TES tills lufttemperaturen i reservoaren är densamma som temperaturen hos TES-ämnet. Värmeenergin i TES:en kommer dock vara mycket högre än den som kvarstår i luften, eftersom TES:en har en mycket högre massa än luften. Lufttrycket i reservoaren kommer nu ha sjunkit igen.

(2) Den elektriska energin har nu omvandlats till termisk energi som förblir lagrad i TES:en under en viss tidsperiod. Luften i reservoaren släpps ut via en turbin, men eftersom dess temperatur inte längre är så hög kommer tryckskillnaden gentemot omgivningen vara låg.

(3) Reservoaren fylls åter på luft av omgivningstemperatur och -tryck. Kolven trycks inte in men eftersom luften i reservoaren nu är kallare än TES-ämnet kommer omvänd absorption ske, tills temperaturen åter är utjämnad. Lufttrycket kommer då ha stigit. En ventil mellan reservoaren och turbinen öppnas varvid den trycksatta luften försätter generatorn i drift.

Temperaturerna som uppstår vid kompressionen i CAES kan bli mycket höga; nivåer så höga som 650 °C förekommer i de storskaliga anläggningarna [22]. Detta ställer stora krav på materialen som tuber och reservoaren är tillverkade av. Eftersom värmeövergången från luften till mediet i TES:en sker passivt men med en viss tröghet, kan den maximala genererade temperaturen i reservoaren sänkas till mindre påfrestande nivåer om kompressionen låts ske i flera steg. Då inleds kompressionen men pausas efter en stund, tills dess att temperaturskillnaden mellan luften och TES:en har utjämnats. Sedan återupptas kompressionen och proceduren upprepas. Flerstegskompression utvecklas i samband med A-CAES men tillämpas inte i dagens D-CAES-anläggningar.

TES kategoriseras som tre grupper: sensibel värmelagring (sensibel TES), latent värmelagring (PCM) och termokemisk värmelagring (TCS) [31]. Olika egenskaper väger för och emot att välja sensibel TES, PCM respektive TCS till småskalig CAES, vilket sammanfattas i tabell 5.

Tabell 5.

Jämförelse av egenskaper hos de olika kategorierna av TES. Från [31], [32], [33].
Som skalningsfaktor används €1 = 10 SEK.

TES	Termisk lagringskapacitet	Verkningsgrad	Aktiv effekt	Ekonomi	Lagringsperiod
Sensibel	10-50 kWh/ton	50-90 %	1 kW-10 MW	1-100 SEK/kWh	Timmar/ månader
Latent (PCM)	100 kWh/m^3	75-90 %	1 kW-1 MW	100-500 SEK/kWh	Timmar/ månader
Termokemisk (TCS)	250 kWh/ton	75~100 %	10 kW-1 MW	80-1000 SEK/kWh	Timmar/ dagar

Skillnaden mellan sensibel TES, PCM och TCS är på vilket sätt som TES:en absorberar överskottsvärmen kemiskt. I sensibel TES stiger temperaturen hos TES-ämnet när värmen absorberas [31]. I PCM hålls däremot temperaturen i TES:en relativt konstant. Det sistnämnda är möjligt då valet av dess TES-ämne styrs efter egenskapen att ämnets smältpunkt ska vara belägen nära ovanför omgivningstemperaturen. Den kemiska processen kan liknas vid smältningen av is vid värmetillförsel; när isen når 0 °C påbörjas smältningen men först när all is har smält börjar temperaturen hos smältvattnet stiga över 0 °C. Till PCM väljs ett material och en volym som medför att andelen av materialet som är smält varierar mellan 0 och < 100 % under lagringsprocessen. Den teoretiskt maximala lagringskapaciteten motsvaras att 100 % av volymen är smält. I TCS slutligen,

används kemiska reaktioner för att lagra värmeenergin [31]. Teknologin bakom TCS är jämfört med sensibel och latent TES kemitekniskt mer avancerad.

2.2.2 Kemitekniska beräkningar

Den termiska energin E_T uttryckt i joule som kan lagras i en CAES-anläggning vid en omgivande utomhustemperatur T_{omg} och med en sensibel TES med volymfraktionen f_{vol} av den totala anläggningsvolymen V_{CAES} anvisas i ekvation 25. T_{max} är den maximala tillåtna temperaturen hos TES-ämnet och den specifika värmekapaciteten uttryckt för ämnet i J/(kg·K) betecknas med c. Temperaturer anges i Kelvin.

$$E_T = \rho \cdot f_{vol} \cdot V_{CAES} \cdot c \cdot \left(T_{max} - T_{omg}\right) \tag{25}$$

I sensibel TES används vatten i princip standardmässigt som TES-ämne [31]. Följaktligen kan flera ingående parametrar i ekvation 25 anses avse vatten vilket medför parametervärden. En särskiljande och begränsande egenskap, jämfört med andra ämnen, är att temperaturen hos vatten enbart kan stiga till i sammanhanget låga 100 °C på grund av dess låga kokpunkt. Med andra ord blir T_{max} i ekvation 25 lika med 373 K ≈ 100 °C. När vattnet når kokpunkten börjar trycket i reservoaren öka vilket resulterar i större påfrestningar på apparaturen. Vidare är den specifika värmekapaciteten för vatten vid kokpunkten lika med $4{,}19 \cdot 10^3$ J/(kg·K) [10].

Den termiska energin E_T som kan lagras i en CAES-anläggning med PCM med volymfraktionen f_{vol} av den totala anläggningsvolymen V_{CAES} kan på motsvarande vis beskrivas som ekvation 26. Omgivningstemperaturen är här utom påverkan. Den tillsatta energi E_T som krävs för att ett kilogram av ämnet ska övergå från fast till flytande form kallas *smältentalpi*, ΔH_m, som anges i J/kg [34], [25].

$$E_T = \rho \cdot f_{vol} \cdot V_{CAES} \cdot \Delta H_m \tag{26}$$

I PCM används ofta saltet natriumnitrat ($NaNO_3$) som TES-ämne [35]. Natriumnitrat smälter då det når 579 K ≈ 306 °C och vid denna temperatur har ämnet densiteten 1908 kg/m^3 [34]. Smältentalpin ΔH_m för ämnet är $178 \cdot 10^3$ J/kg.

Sverige är indelat i fyra geografiska elområden (se Fig. 5) och apropå deras geografiska kategorisering skiljer utomhustemperaturen mellan dem, vilket påverkar den termiska lagringskapaciteten för sensibel TES enligt ekvation 25.

Fig. 5. Den geografiska gränsdragningen för de Sveriges fyra elområden. Från [36]. Återgiven med tillstånd.

Medelvärden för utomhustemperaturen i de olika elområdena, $T_{medelSE}$, presenteras och härleds i tabell 6. Eftersom dessa har inverkan på beräkningarna för sensibel TES ansätts $T_{omg} = T_{medelSE}$ i ekvation 26.

Tabell 6.

Årsmedeltemperatur för året 2021 vid mätstationer tillhörande SMHI i Sveriges fyra elområden. Från [37], [38]. Mätstationerna är dem med lägst respektive högst årsmedeltemperatur i fråga inom varje område. Medelvärdena för respektive område har baserats på de två ovanstående temperaturerna därifrån.

Elområde	Mätstation	Årsmedeltemp. [°C]
SE1	Piteå	-1,7
	Naimakka	0,0
	Medelvärde	*-0,85*
SE2	Gävle	+0,8
	Ljusnedal	+6,2
	Medelvärde	*+3,5*
SE3	Särna	+1,9
	Göteborg	+9,0
	Medelvärde	*+5,45*
SE4	Ljungby	+7,1
	Falsterbo	+9,6
	Medelvärde	*+8,35*

Sambandet mellan temperatur (T), tryck (p) och volym (V) hos ideala gaser beskrivs av den ideala gaslagen, ekvation 27, där för övrigt n är gasens substansmängd räknad i mol och gaskonstanten $\Re$ är lika med 8,3145 J/(K·mol) [9].

$$p \cdot V = n \cdot \Re \cdot T \tag{27}$$

Den ideala gaslagen förutsätter att gasens molekyler har försumbart små volymer. För icke-ideala gaser (det vill säga alla faktiskt förekommande gaser) såsom luft används i stället en mer utförlig version den ideala gaslagen benämnd *Van der Waals-ekvationen*, se ekvation 28 [39].

$$\left(p + \frac{n^2 \cdot a}{V^2}\right) \cdot (V - n \cdot b) = n \cdot \Re \cdot T \tag{28}$$

Ekvationen inkluderar två konstanter a och b, så kallade Van der Waals-konstanterna, där b är den styckvisa volymen hos molekylerna. Jämfört med den ideala gaslagen har alltså ett mer precist volymsuttryck applicerats vars enhet överensstämmer med den föregående i och med att n är antalet molekyler uttryckt i mol [st]. När värdena för p, V och T är kända vid ursprungsläget, det vill säga före kompressionen, kan n beräknas *numeriskt*, det vill säga genom att ta fram nollstället till funktionen 29.

$$f^{(n)} = \left(p_0 + \frac{n^2 \cdot a}{V_0^2}\right) \cdot (V_0 - n \cdot b) - n \cdot \Re \cdot T_{omg} \tag{29}$$

Genom dess utökade term för tryck tar Van der Waals-ekvationen även hänsyn till att attraktion råder mellan molekylerna, vilket leder till trycksänkningar då dem kolliderar. Värden för klassificeringskonstanterna, a och b, hämtas från tabellverk, se tabell 7. Konstanternas värden för mer komplext sammansatta gaser kan även beräknas som det viktade medelvärdet av beståndsämnenas tabellvärden.

Tabell 7.

Van der Waals-konstanter, specifika värmekapaciteter vid konstant volym, samt molmassor för ett urval gaser. Från [40], [25], [41], [42]. Som skalningsfaktor användes 1 atm = 101,3 kN/m^2.

Material	a [Nm^4/mol^2]	b [m^3/mol]	C_v [J/(kg·K)]	M [kg/mol]	C_v [J/(mol·K)]
Helium, He	$0{,}3446 \cdot 10^{-2}$	$0{,}2370 \cdot 10^{-4}$	$3{,}12 \cdot 10^{3}$	$4{,}0026 \cdot 10^{-3}$	12,5
Vätgas, H_2	$0{,}2468 \cdot 10^{-1}$	$0{,}2631 \cdot 10^{-4}$	$10{,}16 \cdot 10^{3}$	$2{,}016 \cdot 10^{-3}$	20,48
Syrgas, O_2	0,1374	$0{,}3183 \cdot 10^{-4}$	$0{,}659 \cdot 10^{3}$	$15{,}998 \cdot 10^{-3}$	10,5
Luft	0,14	$0{,}320 \cdot 10^{-4}$	$0{,}72 \cdot 10^{3}$	$29 \cdot 10^{-3}$	28
Kvävgas, N_2	0,1404	$0{,}3913 \cdot 10^{-4}$	$0{,}743 \cdot 10^{3}$	$28{,}014 \cdot 10^{-3}$	20,8

Ekvation 28 är en så kallad *tillståndsekvation*, exempelvis kan en temperaturändring ΔT endast beräknas om både motsvarande Δp och ΔV är kända. Är enbart Δp eller ΔV känd behöver ekvationen kompletteras med en *förändringsekvation* vilken i det här fallet utgörs av ekvation 30 [43].

$$\left(p + \frac{n^2 \cdot a}{V^2}\right) \cdot (V - n \cdot b)^{\left(\frac{\Re}{C_v}+1\right)} = k_0 \tag{30}$$

C_v är den specifika värmekapaciteten för en gas vid konstant volym V och k_0 är en konstant. Ekvation 30 förutsätter att inget värmeläckage sker ut genom apparaturen [43]. Eftersom vänsterledet är lika med en konstant gäller vidare att k_0 kan beräknas genom detsamma uttrycket vid tiden $t = 0$, det vill säga vid ansatta begynnelsevilkor. Se ekvation 31.

$$k_0 = \left(p_0 + \frac{n^2 \cdot a}{V_0^2}\right) \cdot (V_0 - n \cdot b)^{\left(\frac{\Re}{C_v}+1\right)} \tag{31}$$

Om T eftersöks och p är okänd kan således p som funktion av V lösas ut ur ekvation 30 vilket ger uttrycket i ekvation 32.

$$p(V) = k_0 \cdot (V - n \cdot b)^{-\left(\frac{\Re}{C_v}+1\right)} - \frac{n^2 \cdot a}{V^2} \tag{32}$$

Därefter kan T beräknas enligt ekvation 33 som är baserad på ekvation 28.

$$T = \frac{\left(p(V) + \frac{n^2 \cdot a}{V^2}\right) \cdot (V - n \cdot b)}{n \cdot \Re} \tag{33}$$

I omvända scenariot att T eftersöks och V är okänd, kan T på motsvarande sätt beräknas om V som en funktion av p först löses ut ur ekvation 40.

Ökningen av luftens termiska energi inuti reservoaren då kompressionen sker, ΔE_{press}, beräknas vidare enligt ekvation 34 [43].

$$\Delta E_{press} = -\int_{V_{före}}^{V_{efter}} p(V)\, dV \tag{34}$$

När integralen i ekvation 34 löses för det uttryck för $p(V)$ som härleddes till ekvation 32 fås följande samband för ΔE_{press}, ekvation 35 [44].

$$\Delta E_{press} = -\left[-k_0 \cdot C_v \cdot \frac{(V - n \cdot b)^{-\frac{\Re}{C_v}}}{\Re} + \frac{n^2 \cdot a}{V}\right]_{V_{före}}^{V_{efter}} \tag{35}$$

Installationskostnader per kW för en CAES-anläggning, baserat på McIntosh-anläggningen i USA som byggdes år 1991, som tillvaratar en nedlagd saltgruva och ger en effekt på 110 MW presenteras i tabell 8 [45].

Tabell 8.

Allmänna installationskostnader per kW för CAES-anläggningar nyttjande geologiska lagringsutrymmen. Från [45]. Baserat på den medelstora CAES-anläggningen i McIntosh, USA. Kostnader i USD vid byggnationen år 1991, justerat för indexökningen i USD till och med år 2020, samt motsvarighet i SEK med skalningsfaktorn 1 USD = 9,94 SEK.

Upphov till kostnad	USD/kW (1991)	USD/kW (2020)	SEK/kW (2020)
Utrustning, maskiner	468	520	5170
Byggnation	291	323	3210
Administration	218	242	2410
Lagring i geologiskt utrymme	101	112	1110

2.3 Reversibla turbomaskiner

2.3.1 Introduktion

Baserat på pumphjulens utformning delas vätskepumpar in i tre huvudsakliga kategorier: *centrifugalpumpar* (även kallade radialpumpar), *propellerpumpar* (även axialpumpar) och *förträngningspumpar* [46]. Den sistnämnda används i synnerhet för medier med särskilt hög viskositet och kan bestå av exempelvis en tryckkolv som pressar mediet framåt eller två kugghjul, se Fig. 6. Hos centrifugalpumpar sugs mediet ortogonalt in till pumpens mitt där den sedan pressas ut mot pumpens hölje på grund av pumpens rotation (utnyttjande den oegentliga centrifugalkraften), varvid mediet sedan lämnar pumpen tangentiellt.

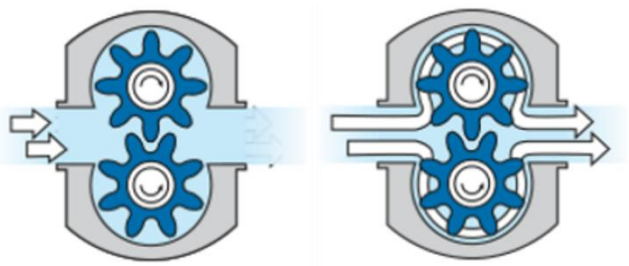

Fig. 6. Principen hos kugghjulspumpar; en form av förträngningspump. Från [47]. Återgiven med tillstånd.

2.3.2 Reversibla pumpturbiner (RPT) och turbinpumpar (PAT)

En grundprincip hos lagringskraftverk är den växelvisa procedur där energi omvandlas mellan olika former, till skillnad från produktionskraftverk som enbart omvandlar energin från ena formen till den andra. Följaktligen krävs inte enbart en generator (för produktion) utan även en motor (för lagring). Detta kan åstadkommas genom att antingen ha två sådana elektriska maskiner i bruk eller genom att installera en så kallad *reversibel pumpturbin* (RPT), vilket är en hybridmaskin som både kan sättas i motor- och generatordrift [48]. RPT-maskiner är vanliga i storskaliga pumpkraftverk, såsom exempelvis den irländska anläggningen vid Turlough Hill [49] som räknas som en medelstort PSH-anläggning med dess 2,3 miljoner m^3 vatten i volymkapacitet [50].

Alstom Power, Andritz Hydro och Voith Hydro är de tre största tillverkningsföretagen inom vattenkraftindustrin i världen och representerar över 80 % av generator- och turbinmarknaden [51]. Av dessa dominerar i synnerhet Voith Hydro bland produkterna för småskaliga RPT-applikationer. De minsta RPT-maskiner som Voith Hydro har byggt är emellertid fortfarande markant större än vad som vore utav intresse

vid interiöra tillämpningar [52]. Med andra ord är utbudet av RPT-maskiner av småskalighet lämpande urbana applikationer mycket begränsat. Dock finns en mycket snarlik turbomaskin som tvärtemot har utvecklats för sådana användningsområden. Den förväxlande likt kallade *turbinpumpen* (PAT) konstruerades till en början syftade till att ersätta sådana bromsventiler som kan installeras i rörsystem inom VVS för att sänka vätskeflödet vid behov. Till skillnad från de traditionella ventilerna tog PAT-maskinen tillvara på rörelseenergin i flödet och omvandlade denna till elektrisk energi. Dessförinnan hade ventilerna energimässigt enbart resulterat i värmeförluster. Till antalet förekommer PAT i mycket större utsträckning än RPT, med flera tusen olika PAT-produkter på den internationella marknaden [53]. En del av orsaken till det är att PAT på senare tid även har vidareutvecklats för bruk av både turbin- och pumpfunktionen, det vill säga för att kunna användas som pumpkraftverk i mindre skala än de minsta RPT-anläggningarna. En tillverkare av synkrona PAT-maskiner för sådana installationer är det Nottingham-baserade företaget *North Ridge Pumps*, se Fig. 7 [54].

Fig. 7. Exempel på utförande och storlek (jämför med exempelvis låsnyckelns storlek på bilden) av PAT-maskiner från North Ridge Pumps. Pumpen på bilden är av vertikalt utförande. Från den här tillverkaren konstrueras den här designen för flöden mellan 100 och 1800 m^3/h. Från [54]. Återgiven med tillstånd.

North Ridge Pumps har utvecklat en rad PAT med pumpkapaciteter inom intervallet 30-4000 m^3/h och effekter upp till 1 MW för tryckhöjder (*eng.* head) mellan 10 och 200 meter, det vill säga den höjd som pumptrycket förmår att pumpa upp vatten till vid den rördiameter som respektive pump är konstruerad för [55]. De anger en allmän verkningsgrad vid motordrift på upp till 85 % och verkningsgraden vid generatordrift medges vara 3-5 % lägre än den vid motordriften, med andra ord maximalt 82,45 % [54]. Pumparnas driftsvolym (ljudnivå) anges aldrig överstiga 85 dB inom avståndet av upp till 1 meter [56]. Uppstartstiden från stillastående till märkvarvtal för PAT-maskiner är i allmänhet omkring 10 sekunder [57].

2.3.4 Elektrotekniska beräkningar

Avseende de flesta generatorapplikationer är maximal aktiv uteffekt P_{ut} en eftertraktad egenskap. Sådant är emellertid inte fallet när det gäller lagringskraftverk. En alltför hög aktivt effekt medför nämligen, i enlighet med ekvation 36, att en viss lagrad energimängd E nyttjas över en alltför kort tid t.

$$P\,\{W\} = E\,\{Wh\}/\,t\,\{h\} \tag{36}$$

Vid motor- respektive generatordrift, fås verkningsgraden hos PSH som produkten av dess strömnings-mekaniska och elektrotekniska verkningsgrad och för CAES, som produkten av dess kemitekniska och elektrotekniska verkningsgrad. För att ta både lagrings- och produktionsläget i anspråk beräknas sedan anläggningarnas *round-trip verkningsgrad* (RTE) som produkten av motor- och generatordriftens verknings-grader, enligt ekvation 37. Med hjälp av RTE kan olika lagringsteknologiers verkningsgrader jämföras rättvist [58].

$$\eta_{totRTE} = \eta_{tot_mot} \cdot \eta_{tot_gen} \quad (37)$$

Sambandet mellan det av motorn genererade trycket och dess dåvarande aktiva effekt kan anges i motorns produktblad men kan i dem fall då det inte gör det beräknas med hjälp av ekvation 38. Ekvationen syftar på den maximala mekaniska energiöverföringen i ideala pumpar och skillnaden mot den reella utrustningen motsvaras av det elektrotekniska verkningsgraden för pumpen i fråga, uttryckt i J/kg.

$$\Delta E_{mek}^{(t)} = \frac{p_{ut}^{(t)} - p_{in}^{(t)}}{\rho} + \frac{\left(v_{ut}^{(t)}\right)^2 - \left(v_{in}^{(t)}\right)^2}{2} + g \cdot \left(h_{ut}^{(t)} - h_{in}^{(t)}\right) \quad (38)$$

Vidare är $p_{ut} - p_{in}$ detsamma som vad vi kallat Δp_{krav}. Notera att ekvation 38 är en utveckling av Bernoullis ekvation som tar hänsyn till energitillförsel eller -bortförsel mellan in- och utpunkterna. I Bernoullis ekvation gäller att $\Delta E_{mek}^{(t)} = 0$. När $v_{in} \approx v_{ut}$ och $h_{in} \approx h_{ut}$ faller ekvation 39 ur ekvation 38.

$$\Delta E_{mek}^{(t)} = \frac{\Delta p_{krav}^{(t)}}{\rho} \quad (39)$$

I dessa scenarion blir sambandet mellan den nyttiga och den krävda aktiva effekten försumbart proportionellt och därmed resulterar ekvation q15 i ekvation 40.

$$\eta_{mek}^{(t)} = \frac{P_{nytta}^{(t)}}{P_{krav}^{(t)}} = \frac{p_{fluid}^{(t)}}{\Delta p_{krav}^{(t)}} \quad (40)$$

Det samband som beskriver relationen mellan resulterat volymflöde av en viss elektrisk effekt hos motorn anges i ekvation 41.

$$P_{mot}^{(t)} = \frac{P_{nytta}^{(t)}}{\eta_{mot}} = \frac{Q \cdot \Delta p_{krav}^{(t)}}{\eta_{mot}} \quad (41)$$

2.4 Elkraftsstödtjänster

På elnätet förbinds elkonsumenter med elproducenter, vilket resulterar till att en viss frekvens råder. Elnätsfrekvensen ska hållas konstant i största möjliga mån [59]. Rotorn hos synkrona maskiner roterar synkront med elnätets frekvens och är därmed det huvudsakliga bidraget till tröghet i elsystemet (*eng.* inertia), vilket innebär motståndskraftighet mot varianser i frekvensen. Produktionen och konsumtionen av el varierar nämligen ständigt med tiden, vilket leder till ett balanseringsbehov av frekvensen på elnätet [60]. Denna balansering realiseras med hjälp av så kallade *stödtjänster*. När konsumtionen blir större än produktionen av el sjunker nätfrekvensen under 50 Hz och när produktionen blir störst stiger nätfrekvensen på motsvarande vis. Ökad konsumtion kompenseras följaktligen av ökad produktion i form av stödtjänster och vice versa.

Det finns flera olika former av stödtjänster som lämpar sig olika bra att ansluta en elkonsumtions- eller elproduktionsanläggning till, beroende på hur fort anläggningen kan aktiveras och stoppas. I Sverige finns i dagsläget fem stödtjänstformer för nätfrekvensbalansering: *frekvenshållningsreserv vid normaldrift* (FCR-N) respektive *vid störning* (FCR-D), *automatisk frekvensåterställningsreserv* (aFRR), *manuell frekvens-återställningsreserv* (mFRR) och tröghet, se tabell 9 [59], [61], [62], [63], [64] och [65]. Därtill planeras ytterligare tre stödtjänster för framtiden: *snabb frekvensreserv* (FFR), *effektreserv stödjande FRR* (RR) samt ett nytt balanseringskoncept där frekvensbalansen åsyftas att upprätthållas riktat mot mindre geografiska zoner separat (ACE) [66].

Tabell 9.

Stödtjänster för nätfrekvensbalansering som upphandlas, eller i framtiden planeras att upphandlas (blåstilta tjänster), av Svenska Kraftnät. Från [67]. *Transmissionsnätsoperatören*, i det här fallet Svenska Kraftnät, förkortas TSO.

	Tröghet	FFR	FCR-D	FCR-N	aFRR	mFRR	RR
Styrs av:	–	Frekvens	Frekvens	Frekvens	ACE	TSO	TSO
Aktiveringstid:	Momentan	≤ 1 sekund	Sekunder	1 minut	Minuter	12-15 minuter	> 15 minuter

Den *tröghetskonstant*, H, som en synkronmaskin bidrar med beräknas enligt ekvation 42. J betecknar *trögheten* (*eng.* inertia) som anges i kg·m^2, Ω är mekanisk vinkelhastighet i radianer per sekund och S är maskinens skenbara effekt mätt i MVA. Index n avser märkdata (*eng.* nominell). Tröghetskonstanten uttrycks i sekunder.

$$H = \frac{J \cdot \Omega_n^2}{2 \cdot S_n} \tag{42}$$

Den skenbara märkeffekten beräknas vidare enligt ekvation 43, där den aktiva effekten P_{max} är uttryckt i watt och effektfaktorn $\cos\varphi$ kan antas vara lika med 0,9 [68].

$$S_n = \frac{P_{max}}{\cos\varphi} \tag{43}$$

De cirka 2000 vattenkraftverk som finns i Sverige har en total effekt P_{max} som är ungefär lika med 16,2 GW, vilket ger en medeleffekt på 8,1 MW per kraftverk [69]. Typiska värden för tröghetskonstanten hos turbomaskinerna i vattenkrafts- respektive vindkraftsanläggningar presenteras i tabell 10.

Tabell 10.

Typiska intervall för tröghetskonstanten hos vatten- respektive vindkraftverk, uttryckt per maskinenhet. Från [70].

Produktionstyp	H per maskin [s]
Vattenturbin	2-4
Vindturbin	2,4-6

Räknat i underkant (med lägsta typvärdet för tröghetskonstanten) bistår alltså den svenska vattenkraften elnätet med en tröghet J på i medel 365 kg·m^2 per kraftverk, eller 7,3·10^5 kg·m^2 totalt [69].

Trögheten hos synkrona PAT-maskiner med olika aktiva märkeffekter listas i tabell 11.

Tabell 11.

Typvärden för trögheten, J, för fyrpoliga synkrona PAT-maskiner med olika märkeffekt P_n. Från [71].

Märkeffekt [kW]	Tröghet [kg·m^2]
4	0,05
10	0,09
20	0,28
30	0,40

På liknande vis råder även spänningsnivåer på elnätet som bör upprätthållas [72]. För höga spänningsnivåer å ena sidan riskerar att orsaka skada och olyckor, för låga spänningar resulterar å andra sidan i större transmissionsförluster [73]. Stödtjänsterna för spänningsbalansering upphandlas av Svenska kraftnät och tjänsterna kan delas in i fyra steg baserat på aktiveringshastighet [74], [75]. De *kortvariga* (*eng.* transient)

aktiveras på under 10 ms. De *dynamiska* aktiveras på mellan 10 ms och en halv minut. De *metastabila* (*eng.* quasi steady state) aktiveras på mellan 50 sekunder och 5 minuter och de stabila tjänsterna (*eng.* steady state) aktiveras på mer än 5 minuter, upp till 15 minuter.

Förr i tiden var strävansmålet att motverka för låga spänningsnivåer och att förse elnätet med tillräcklig mängd reaktiv effekt [72]. Numera är situationen tvärtom; spänningsnivåerna tenderar att bli för höga och elnätet tenderar att förses med för mycket reaktiv effekt. Förändringen i reaktiv effekt på elnätet har orsakats av att generatorer (producenter) traditionellt sett försett elnätet med reaktiv effekt och motorer (konsumenter) absorberat reaktiv effekt, men numera används i stor skala hemelektronik såsom TV och laptops vilka tvärtemot traditionella motorer *producerar* små mängder reaktiv effekt [76]. Dessa förändringar har resulterat i att TSO numera allmänt strävar efter att hålla nere både spänningsnivåerna och mängden reaktiv effekt på elnätet.

2.5 Ekonomisk hållbarhet

I ekonomisk kalkylterminologi används begreppet *utgifter* för priset på en tjänst eller produkt summerat över hela den tid som tjänsten eller produkten tas emot eller används. Om utgiften divideras med eller fördelas över denna tid benämns resultatet i stället som *kostnad*. Detta metod kallas för att *periodisera*; kostnader är periodiserade utgifter. På motsvarande vis betecknar en *intäkt* en periodiserad *inkomst*.

Den ekonomiska principen bakom energilagringsanläggningar är att konsumera el när elpriset är förhållandevis lågt och producera el när elpriset är högre, prisskillnaden blir därmed vinsten. Elen säljs vanligen per kilowattimme (SEK/kWh) och dess prisutveckling avspeglas i elbörsen. I norra Europa går elbörsen under *Nord Pool*. Nord Pool tillhandahåller en så kallad *spotmarknad*, en marknadsplats för försäljning av el tänkt att konsumeras inom det korta tidsspannet 24 timmar. Priserna för elen på spotmarknaden kallas följaktligen *spotpriser*. Genom att aktivt följa spotmarknaden och därmed konsumera respektive producera el under de mest gynnsamma av förhållanden, kan en energilagringsanläggning maximera sin vinst.

I Sverige och de flesta andra länder sker ständig inflation vilket medför att valutan blir mindre värd samtidigt som priset för tjänster och produkter stiger. För att analysera inflationen används olika slags så kallade index. Index beskriver värdeutvecklingen hos valuta relativt en referenstidpunkt, vars index sätts lika med 100. Om inflationen har ökat med 5 % mellan första kvartalet i år och första kvartalet i fjol, skulle nuvarande index ha varit 105 relativt den tidpunkten i fjol. Arbetskostnadsindex (AKI) är ett index som är lämpligt att använda vid analys av företags produkter och tjänster [77]. Med år 2016 som referensår var konstruktionsindustrins genomsnittliga AKI för EU:s medlemsländer 115,5 i det fjärde kvartalet av 2021. Med år 2008 som referensår var tjänsteindustrin inom privat sektors AKI i Sverige 109,6 vid tredje kvartalet av 2012 och estimeras preliminärt vara 146,8 i det tredje kvartalet av 2022 [78]. Ett belopp vid tidpunkten t_1 omräknas till motsvarande antal kronor vid en senare tidpunkt t_2 med hjälp av AKI enligt ekvation 44 [77]. ¤ betecknar valuta, här i SEK.

$$¤_{t_2} = ¤_{t_1} \cdot \frac{AKI_{t_2}}{AKI_{t_1}} \tag{44}$$

Under dagtid när mycket elektricitet konsumeras i samhället stiger elpriset jämfört med prisnivån nattetid [79]. För energilagringsanläggningar är det därför eftersträvansvärt att konsumera el på nätterna och producera el om dagarna. Anläggningens *omsättning* kan beskrivas som ekvation 45, exempelvis på dygnsbasis. När $Omsättning > 0$ är anläggningen ekonomiskt hållbar.

$$\underbrace{Omsättning}_{[SEK]} = \underbrace{elproduktion}_{[kWh]} \cdot \underbrace{spotpris\ vid\ produktion}_{[SEK/kWh]} - \underbrace{elkonsumtion}_{[kWh]} \cdot \underbrace{spotpris\ vid\ konsumtion}_{[SEK/kWh]} \quad (45)$$

I termer av anläggningens lagrade energi $E_{P:lagrad}$ samt verkningsgraderna η_{tot_mot} och η_{tot_gen} kan ekvation 45 sedermera skrivas som ekvation 46, där x_{spot} betecknar spotpriset per kWh vid konsumtion och y_{spot} spotpriset per kWh vid produktion.

$$Omsättning = E_{P:lagrad} \cdot \left(y_{spot} \cdot \eta_{tot_gen} - \frac{x_{spot}}{\eta_{tot_{mot}}} \right) \quad (46)$$

Enligt tidigare studier har småskalig CAES inte varit lönsam på grund av den ekonomiska besparing som blir av att lagra billig el har varit mindre än skillnaden mellan x_{spot} och y_{spot} (Sverige, 2018), på grund av lagringsteknikens låga verkningsgrad [24]. Med andra ord har det ekonomiska läget inneburit att elpriset har fluktuerat för lite för att göra småskalig CAES ekonomiskt hållbar. Detsamma har konstaterats för småskalig PSH (Norge, 2014) [80].

2.6 Konsekvensanalys

2.6.1 Hållfasthet

I flertalet seismologiskt aktiva områden, såsom Taiwan och västra USA, pågår utveckling och byggnation av höghus som förses med vattenreservoarer för att öka husens stabilitet vid jordskalv [81], [82], [83]. Sådana kallas *flödesdämpare* (FDD) [84] och indikerar att implementation av vattenreservoarer inte inskränker på byggnaders hållfasthet utan tvärtom stabiliserar dem, under förutsättning att reservoarerna placeras rakt över byggnadens masscentrum eller symmetriskt [85].

2.6.2 Buller

Ljudtryck är en logaritmisk storhet som mäts i enheten decibel (dB) [86]. Med andra ord beskriver denna storhet inte den faktiska ljudnivån utan *förändringen* i ljudnivå. Fördelen blir att ljudnivån, som beror av avståndet från ljudkällan, med enkelhet kan beräknas önskat avstånd från källan så länge ljudnivån vid *något* avstånd är känt. I specifikationer för utrustning anges därför ljudnivån i dB vid ett visst avstånd från maskinen, oftast är avståndet 1 meter [87]. Denna beräkning åstadkoms via ekvation 47, där $d\hat{A}$ betecknar förändringen ljudvågens amplitud (det vill säga ljudtrycket) i dB och $\ell_{\triangleleft}$ respektive $\ell_{\triangleright}$ är längden mellan ljudkällan och två åhörarpunkter $\triangleleft$ och $\triangleright$ [88].

$$d\hat{A} = A_{\triangleright} - A_{\triangleleft} = 10 \cdot \log_{10}\left(\frac{\ell_{\triangleright}}{\ell_{\triangleleft}}\right)^2 = 20 \cdot \log_{10}\left(\frac{\ell_{\triangleright}}{\ell_{\triangleleft}}\right) \quad (47)$$

Genom att ansätta $\ell_b = 2 \cdot \ell_a$ fås att $dA = 6$. Med andra ord sjunker ljudnivån med 6 dB om åhöraravståndet från ljudkällan ökar till det dubbla [87].

Buller är benämningen på allt oönskat ljud [89]. Även svaga ihållande buller kan bli till störningsmoment som leder till ohälsa såsom stress, trötthet och sänkt koncentration [90]. Enligt Arbetsmiljöverkets riktlinjer bör inte ihållande buller på arbetsplatser såsom kontor överstiga 35 dB. Temporära hörselskador riskeras vid ihållande ljudnivå på 75 dB och vid 85 dB riskeras sådana permanenta, det vill säga att hörselförmågan inte återgår till det normala när ljudnivån sänks [91]. Hörselskadade personer löper även högre risk för ohälsa till följd av buller än personer utan hörselskada. Ljudkällor såsom kompressorer och ventilationsfläktar framkallar buller i det lägre spannet av för människan hörbara frekvenser, 20-200 Hz [92]. Jämfört med trafikbuller, som motsvarar högre frekvenser av ljud, har endast få undersökningar genomförts gällande hälsoeffekter av sådana lågfrekventa buller [93]. Källorna till buller från turbomaskiner är främst flödespulseringar och flödes-

variationer med tiden, lokal förångning till följd av icke-homogent fluidtryck (så kallad kavitation) samt turbulens [94], [46].

För att avskärma buller från elektriska maskiner krävs ljudisolering. Enligt en studie från 2017 absorberar akustikpaneler av ovävt tyg med densiteten 680 g/cm^2 cirka 95 % av inkommande ljudnivåer [95]. Betong däremot har en starkt bristfällig ljudisolerande förmåga [96].

3 Beräkningsmodeller

I det här kapitlet introduceras de småskaliga modeller som utformades till grund för studiens beräkningar.

3.1 Pumpkraft (PSH)

Den småskaliga PHS-modellen bestod av två reservoarer förbundna med en tub via en PAT-pump belägen på samma nivå som den nedre reservoarens bottennivå. De yttermått som reservoarerna spänner upp hölls konstanta medan reservoarvolymen kunde varieras i termer av den övre reservoarens bottennivå och den nedre reservoarens taknivå enligt Fig. 8.

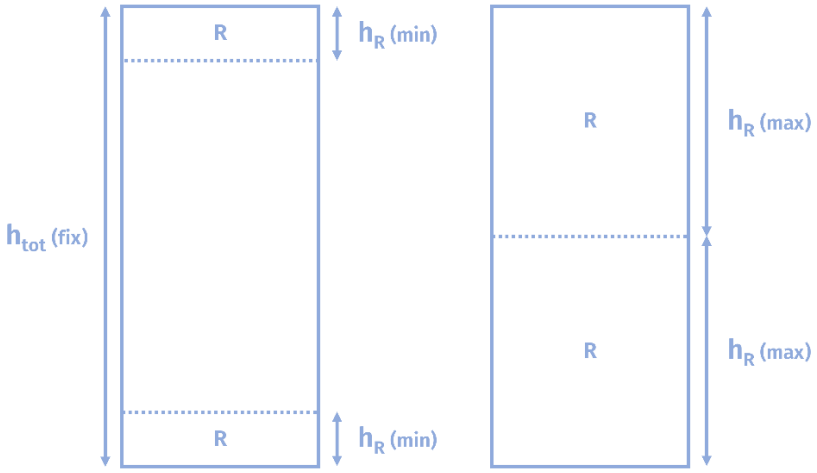

Fig. 8. Tvärsnitt av reservoarerna och deras uppspända volym i modellen, åskådliggörande metoden för volym-variation i beräkningarna. Reservoarernas bottenarea syns inte i figuren men hölls konstant. CC BY-NC-ND.

Modellen visas i Fig. 9 och är den är den enklast möjliga utformningen för en sådan PSH-anläggning som har de två reservoarerna placerade rakt ovanför varandra. Tubens anslutning till respektive reservoar behöver vara belägen i höjd med reservoarens bottnen om de reservoaren ska gå att tömma maximalt. Bottnarna behöver vara försatta i lutning så att vätskan alltid rinner ned till tubmynningarna. Denna vinkel kan dock vara mycket liten och i beräkningarna försummas den, det vill säga $\alpha_R \cong 0$ i Fig. 9. Följaktligen antas att friktionen som uppstår på grund av de (egentligen) sluttande planen är försumbar. Trycket i tomma delar av tub och reservoarer antas vara vakuumtryck, p_0.

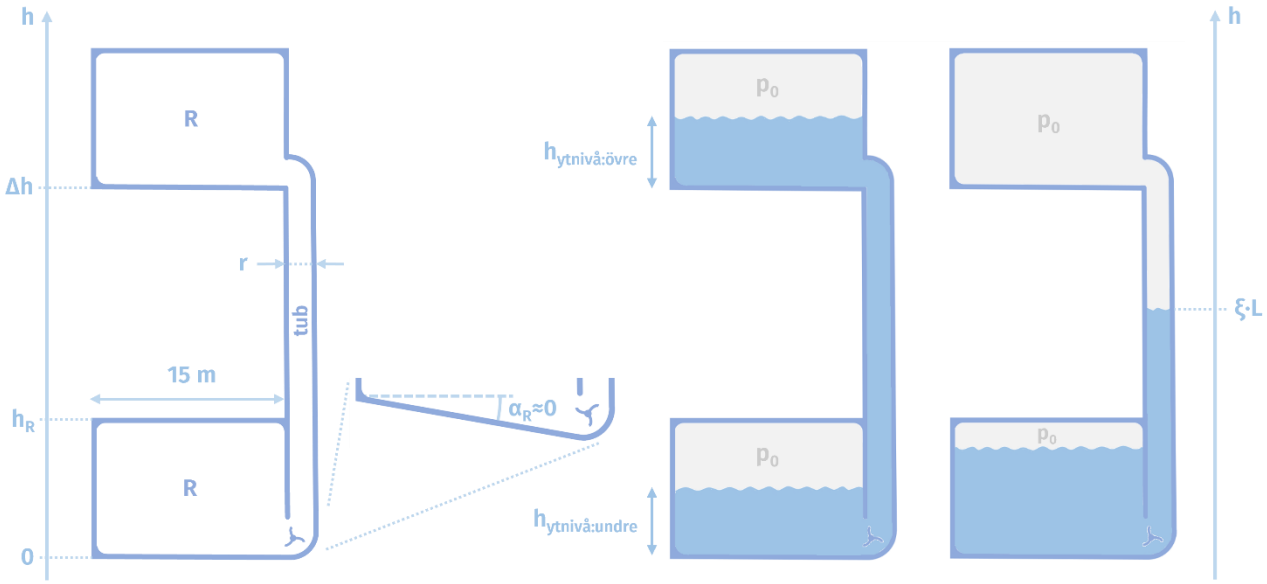

Fig. 9. Genomskärning av den småskaliga PSH-modellen. Reservoarerna har volymen R och kvadratisk bottenarea med sidan 15 meter. Vakuumtryck p_0. *Vänster:* Apparaturmått. *Höger:* Vätskedjup. CC BY-NC-ND.

Optimal dimensionering för en hög energilagringskapacitet per reservoarvolym R fås då $h_R \ll \Delta h$. Vid generatordrift kommer vidare tryckskillnaden utjämnas och flödet avstanna när vattennivån i röret nått ned i nivå med nedre reservoarens tak, det vill säga där $h = h_R$. Slutsatsen blir att de markerade regionerna i Fig. 10 förblir vätskefyllda i alla tidpunkter.

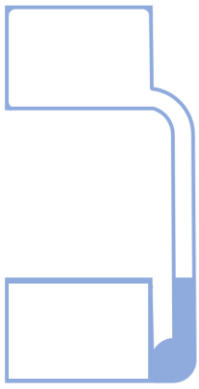

Fig. 10. De ständigt vätskefyllda utrymmena i beräkningsmodellen. CC BY-NC-ND.

Modellens totalhöjd och sidorna hos bottenarean antogs vara 100

Sidan hos reservoarernas bottenarea antogs vara 15 meter på grund av att detta är yttermåtten för betongkärnan inuti skyskrapan Karlatornet i Göteborg som är under byggnation i skrivande stund [97]. Orsaken till denna parallell var att inte modellens dimensionering skulle riskera att bli den fällande faktor som hindrar modellen från att bli applicerbar inuti höghus (vilket var en hypotes för modellen) utifall att övriga resultat skulle visa sig indikera att en sådan applikation vore möjlig. Vidare valdes modellens totalhöjd som 100 meter grundat i att detta är en ordentlig men numera inte särskilt sällsynt byggnadshöjd i svenska städer; i nuläget är fler än tio byggnader som kommer att bli 100 meter eller högre under uppbyggnad i Göteborg [98].

3.2 Gastryckslagring (CAES)

Den småskaliga CAES-modellen som antogs är en artificiell A-CAES-anläggning bestående av en rektangulär reservoar med kvadratiskt tvärsnitt, omgärdad av en TES undantaget på reservoarens kortsidor, se Fig. 11. Den sammanlagda volymen av reservoaren och TES:en gavs samma dimensioner som PSH-modellens maximala reservoarer *R*, det vill säga 15×15×50 meter. Med andra ord antas dess längd vara lika med den maximala reservoarhöjden i PSH-modellen. TES:en antogs beständig för temperaturer upp till 400 °C [31].

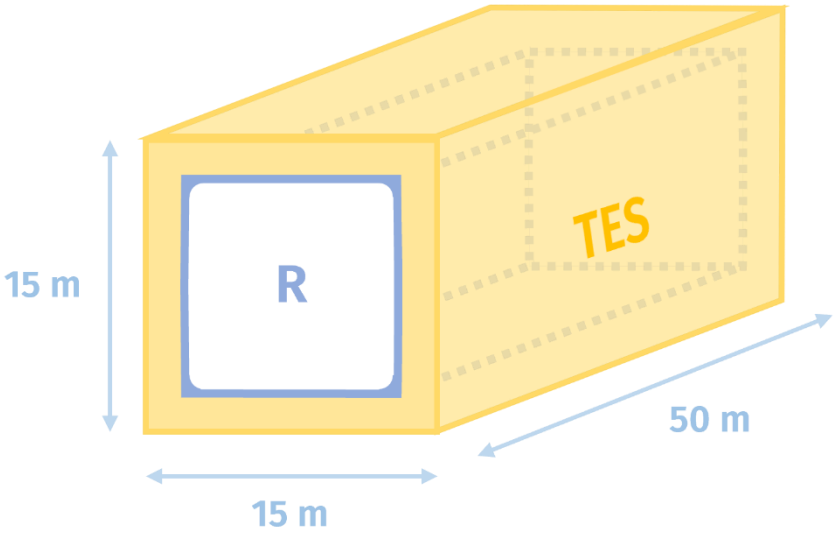

Fig. 11. Småskaliga CAES-modellen bestående av en rektangulär reservoar *R* omsluten av en TES. CC BY-NC-ND.

I likhet med PSH-modellen möjliggjordes variation av reservoarvolymen trots konstanta ytterdimensioner för anläggningen. I CAES-modellen åstadkoms detta genom att TES:ens fraktionsvolym varierades, det vill säga hur stor andel av den sammanlagda TES- och reservoarvolymen som TES:en stod för. Volymsfraktionen påverkar reservoarens tvärsnittsarea utan att förändra dess kvadratiska form eller reservoarens centrerade position.

Kompressionen och expansionen hos modellen antas ske stegvis på följande sätt:

Kompression: Reservoaren fylls med gas i normalt atmosfärstryck (kräver ingen tillförd energi) och därefter minskas reservoarvolymen genom att en kolv för ena kortsidan inåt. Gastemperaturen ökar då varvid TES:en absorberar denna överskottsvärme. Beräkningsmässigt antas denna absorption ske när kompressionen har slutförts. När temperaturen blivit densamma hos gasen som hos TES-ämnet avstannar absorptionen. Då släpps gasen ut ur reservoaren, dock ej via en turbin utan via en vanlig ventil, eftersom denna gas inte längre är försatt i övertryck. Därefter upprepas kompressionsproceduren så länge elpriset är lågt eller tills TES:ens maximala lagringskapacitet är nådd.

Expansion: Reservoaren fylls med gas i normalt atmosfärstryck och omgivningstemperatur, som därefter absorberar värmeenergi från TES:en varvid gasens tryck ökar. Den trycksatta gasen släpps ut från reservoaren via en turbin. Därefter upprepas expansionsproceduren så länge elpriset är dyrt, elbehov råder eller tills ingen lagrad energi återstår.

4 Metod

Även om storskalig PSH och CAES är lönsamma och återfinns i kommersiell drift, innebär detta inte att nedskalade versioner av lagringsanläggningarna med säkerhet kan antas vara vinstdrivande. På grund av att småskaliga anläggningar av dessa typer är sällsynta är forskningsområdet därtill endast försett med knapphändig data för huruvida lönsamhet råder eller inte. Mot denna grund inkluderar studien en jämförelse mellan de fluider som traditionellt sett används i de storskaliga kraftverken (vatten i PHS respektive luft i CAES) och andra ämnen med likartade egenskaper. Detta för att redogöra för om någon av dessa ämnen resulterar i hög eller till och med högre prestanda än vatten respektive luft, samt för att undersöka i vilken utsträckning som vattnet och luften är ämnen värda att utveckla nya småskaliga PSH- och CAES-anläggningar för.

Samtliga beräkningar i studien utfördes i Matlab R2021b.

4.1 Pumpkraft (PSH)

Medieämnena som studerades för PSH är samtliga i vätskeform vid normal utomhustemperatur (vatten, tungt vatten, glycerin, sirap och kvicksilver). För reservoarerna och tuben varierades konstruktionsmaterialet för att studera dess påverkan på friktionsförlusterna (glas, plast, betong, koppar, mässing, förzinkat stål, "commercial steel" och rostfritt stål).

Den storhet som avsågs att beräknas för att analysera prestandan för den småskaliga PSH-modellen var den *effektiva lagringskapaciteten*, här definierad som produkten mellan modellens lagringskapacitet och round-trip verkningsgrad. Därför beräknades först modellens lagringskapacitet i lägespotentiell energi för de olika medievätskorna under variation av reservoarvolym enligt beskrivningen ovan, med hjälp av ekvationerna 8 och 9. Sedan beräknades Reynoldstalet för att avgöra vilka ekvationer som gällde för beräkningen av modellens round-trip verkningsgrad. Reynoldstalet beräknades som funktion av reservoarhöjden h_R, för de olika medievätskorna med avseende på deras dynamiska viskositeter, vid en driftstid på 8 timmar för motordrift liksom generatordrift och en tubdiameter om 25 cm. Den aktiva effekten för modellens pumpturbin antogs sedermera vara 40 kW för att matcha sortimentet från North Ridge Pumps [54] samt de volymflöden som krävs resulterande av den åtta timmar långa driftstiden. Baserat på huruvida Reynoldstalen påvisade turbulens eller ej i systemet beräknades därpå round-trip verkningsgraden för anläggningen med lämplig metod, som funktion av reservoarhöjden h_R och olika apparaturmaterials skrovligheter. Detta gjordes för de olika medievätskorna. Colebrook-ekvationen, ekvation 20, löstes med hjälp av ett särskilt Matlab-program [99]. Därefter kunde den effektiva lagringskapaciteten analyseras som funktion av reservoarhöjden h_R och de olika apparaturmaterialens skrovligheter.

Slutligen undersöktes modellens ekonomiska hållbarhet med avseende på två aspekter:

(1) Dels huruvida lagringsmetoden går med vinst på dygnsbasis under i skrivande stund rådande ekonomiska läge, detta som funktion av lagringskapaciteten och för de fyra områdena. Att omsättningen dygnsvis är intressant beror på att de småskaliga lagringskraftverken syftas till att konsumera elektrisk energi nattetid och producera elektricitet dagtid. Omsättningen beräknades för två dygn, den 28 februari – 1 mars 2022 och den 15 – 16 maj 2022, baserat på elprisdata från Nord Pool vilka är bifogade i appendix [100]. Valet av dessa datum grundades i att dygnet 15-16 maj var de nyaste data som fanns vid beräkningstillfället, medan dygnet vid månadsskiftet februari/mars var godtyckligt men konstaterades följa trenden för elprisernas utveckling under årets första två kvartal. Vatten studerades men även sirap, då sirap är den mest skonsamma vätska med de mest olika egenskaperna gentemot vattnet inom urvalet vätskor. Vidare jämfördes apparaturmaterialen "commercial steel" (på grund av dess låga grovhet och vanliga förekomst)

och betong (som i en byggnad skulle kunna medföra besparingar i och med att byggnadskärnan ursprungligen består av betong som därmed enbart skulle behöva gröpas ur).

(2) Dels beräknades anläggningens kortast möjliga avbetalningstid, det vill säga om alla vinster avsätts för att bekosta installationskostnaderna. Kalkylen baserades på AKI [78], installationskostnader vid The Goudemand Residence [7] (med omvandlingsfaktorn €1 = 10,48 SEK), samt de omsättningar som tagits fram i föregående steg. I denna ekonomiska kalkyl antogs endast vatten som medieämne, då kostnadsdata för teknik hanterande de andra vätskorna inte finns tillgängliga eftersom sådana anläggningar aldrig har byggts. Vidare valdes det konstruktionsmaterial med lägst grovhet för att analysen skulle representera de ekonomiskt mest gynnsamma förhållandena, samt för betong eftersom det är den mest obehandlade konstruktionen vid tillämpning inom byggnader.

4.2 Gastryckslagring (CAES)

Som TES-ämne i samtliga CAES-beräkningar användes vatten för sensibel TES och natriumnitrat för PCM. Vidare undersöktes utöver luft gaserna helium, vätgas, syrgas och kvävgas. Den aktiva effekten för den reversibla maskinen antogs vara 40 kW för att undvika tendentiösa jämförelser mellan resultaten för PSH och CAES. Konstruktionsmaterialet hos apparaturen varierades inte hos CAES-modellen eftersom materialets inverkan på förlustutvecklingen ansågs skilja sig försumbart lite mellan de olika gaserna eftersom densiteten i princip är densamma för dem. Vidare är friktionen generellt mycket låg analogt med att densiteten för gaser är generellt mycket låg.

Först beräknades modellens lagringskapacitet i termisk energi för att möjliggöra jämförelse i kapacitet mellan PSH och CAES. Lagringskapaciteten beräknades för de olika mediegaserna med avseende på deras densiteter och de fyra elområdena, samt för dels den sensibla TES-teknologin, dels den latenta (PCM). Sedan beräknades den termiska energiökningen per kompression för sensibel TES respektive PCM, som funktion av volymsfraktion, i de fyra elområdena och för de olika gaserna. Eftersom modellen antogs utföra kompressionscykeln repetitivt, enligt avsnitt 3.2, beskriver denna energiökning per kompression hur många cykler som krävs för att uppnå maximal lagrad energimängd och med andra ord hur effektiva de olika gaserna är att använda som kompressionsämne. Därefter beräknades anläggningens round-trip verkningsgrad för sensibel respektive latent TES, för jämförelse med PSH-modellen. Den är oberoende av lagringskapaciteten i CAES-modellen.

Slutligen undersöktes modellens ekonomiska hållbarhet med avseende på två aspekter:

(1) Dels huruvida lagringsmetoden gick med vinst på dygnsbasis under i skrivande stund rådande ekonomiska läge, detta som funktion av lagringskapaciteten och för de fyra områdena. Omsättningen beräknades för två dygn, den 28 februari – 1 mars 2022 och den 15 – 16 maj 2022, baserat på elprisdata från Nord Pool vilka är bifogade i appendix [100].

(2) Dels beräknades anläggningens kortast möjliga avbetalningstid. Kalkylen baserades på AKI, installationskostnader för ett CAES-kraftverk [45] vid effekten 40 kW exklusive lagringskostnader härrörande saltgruvorna eftersom de småskaliga reservoarerna byggs artificiellt, samt de omsättningar som beräknats i föregående steg.

I ekonomiska beräkningarna antogs endast luft som medieämne eftersom kostnadsdata för teknik hanterande andra gaser inte finns tillgängliga.

4.3 Tröghet och stödtjänster

Genom jämförelse mellan uppstartstiden för typiska PAT-maskiner och villkoren för de olika stödtjänsterna, redogjordes för vilka stödtjänster som är möjliga för de småskaliga modellerna. Vidare analyserades tjänsterna med hänsyn till modellernas tröghet, effekt och tillgänglighet vid olika tider på dygnet.

4.4 Buller

Bullernivån för modellernas PAT-maskin jämfördes med riktlinjerna för ljudnivåer på kontor, till grund för beräkning av hur riktlinjerna kan bemötas genom ljudabsorberande material, enligt ekvation 47.

5 Resultat

5.1 Pumpkraft (PSH)

Lagringskapaciteten i lägesenergi, E_P, för den småskaliga PSH-modellen som introducerades i avsnitt 3.1 är markant högre för kvicksilver som vätskeämne än för övriga ämnen. Samtliga vätskor påvisar en kapacitet vars beroende av reservoarhöjden avtar i synnerhet för stora höjder. Den maximala kapaciteten, vilken infinner sig vid maximal reservoarhöjd det vill säga 50 meter, är ca 1550 kWh för vatten, 1700 kWh för tungt vatten, 1950 kWh för glycerin, 2150 kWh för sirap och 21 MWh för kvicksilver. Med andra ord ökar lagrings-kapaciteten med sjunkande vätskedensitet.

Apropå turbulens i anläggningens tub ter sig Reynoldstalet mycket likartat för de olika vätskeämnena vid avseende på reservoarvolymen, om än i olika storleksordningar. Angående samtliga vätskor leder en ökad reservoarhöjd till starkast ökning i Reynoldstalet för de lägsta höjderna. Glycerin utmärker sig som den enda vätska som flödar helt laminärt för samtliga reservoarhöjder mellan 0 och 50 meter. Med sirap som vätska är flödet laminärt för reservoarhöjder upp till cirka 15 meter, delvis turbulent mellan 15 och 26 meter ($Re \in (2300, 4000)$) och helt turbulent för h_R större än 26 meter. För resterande ämnen råder fullt utvecklad turbulens vid samtliga undersökta dimensioner.

Modellens round-trip verkningsgrader, hänsynstagande av både flödesmekanik och elektroteknik, är för samtliga vätskeämnen optimal när h_R är så låg som möjligt, det vill säga i teorin när $h_R = 0$ m. Verknings-graden är sedermera knappt lägre än optimalt för reservoarhöjder upp till omkring 10 meter varpå den sedan sjunker, undantaget glycerin för vilken verkningsgraden sjunker relativt konstant men aningen mer brant för de lägsta reservoarhöjderna. För alla vätskor förutom glycerin blir verkningsgraden särskiljande låg om apparaturen är tillverkad av betong. Vid användande av glycerin har apparaturmaterialet ingen märkbar på-verkan på verkningsgraden.

I Fig. 12 presenteras modellens effektiva lagringskapacitet, det vill säga produkten av dess lagringskapaciteter och dess verkningsgrader.

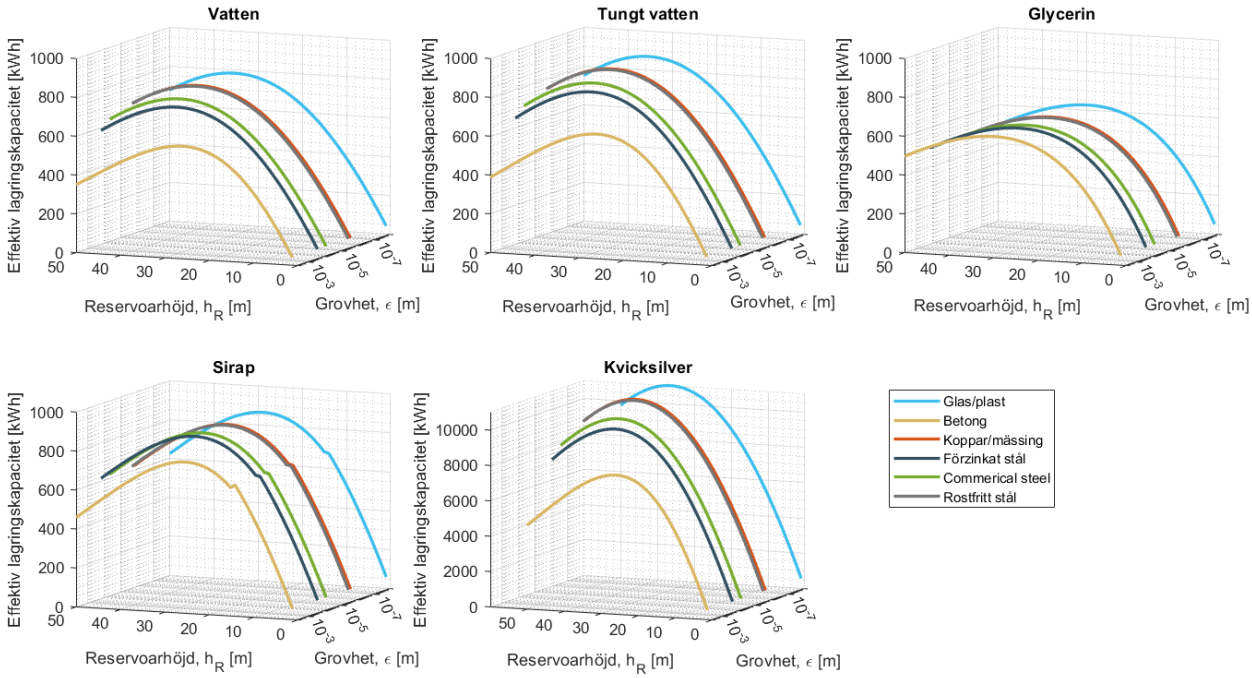

Fig. 12. Effektiv lagringskapacitet för PSH-modellen vid olika apparaturmaterial samt för reservoarhöjder mellan 0 och 50 meter. Observera att skalan på z-axeln skiljer sig markant hos kvicksilver jämfört med övriga vätskeämnens.

Eftersom lagringskapaciteten ökar med h_R men verkningsgraden minskar med ökande h_R, gör den effektiva lagringskapaciteten uttryck för ett optimeringsproblem, vilket bekräftas av grafernas konkava utseenden i Fig. 12. Notera att om sirap antas som vätska blir anläggningens verkningsgrad omkring lika hög för en apparatur i betong som den blir för vatten i en apparatur i stål eller annan metall. Undantaget glycerin är den optimala reservoarhöjden cirka 20 meter för betong och 30 meter för övriga konstruktionsmaterial. För glycerin är den motsvarande siffran cirka 30 meter för samtliga material.

Vid dessa optimala reservoarhöjder fås verkningsgrader och faktiska lagringskapaciteter enligt tabell 12. Resultat innefattande samtliga verkningsgrader och lagringskapaciteter är bifogade i appendix.

Tabell 12.

Optimala reservoarhöjder (1) för de olika kombinationerna av vätskeämne och konstruktionsmaterial, samt den lagringskapacitet (2) och round-trip verkningsgrad (3) som respektive kombination resulterar i vid dessa optimala höjder. Motsvarande vätskevolym (4) då reservoarernas bottenarea är 15×15 meter stor.

		Vätskeämne				
Apparaturmaterial		Vatten	Tungt vatten	Glycerin	Sirap	Kvicksilver
Glas/plast	(1)	35 m	33 m	30 m	29 m	36 m
	(2)	1,39 MWh	1,50 MWh	1,62 MWh	1,79 MWh	19,1 MWh
	(3)	56 %	56 %	39 %	49 %	58 %
	(4)	7875 m^3	7425 m^3	6750 m^3	6525 m^3	8100 m^3
Betong	(1)	26 m	26 m	30 m	25 m	26 m
	(2)	1,18 MWh	1,30 MWh	1,62 MWh	1,61 MWh	16,0 MWh
	(3)	49 %	49 %	39 %	48 %	49 %
	(4)	5850 m^3	5850 m^3	6750 m^3	5625 m^3	5850 m^3
Koppar/mässing	(1)	35 m	33 m	30 m	29 m	36 m
	(2)	1,39 MWh	1,50 MWh	1,62 MWh	1,79 MWh	19,1 MWh
	(3)	56 %	56 %	39 %	49 %	57 %
	(4)	7875 m^3	7425 m^3	6750 m^3	6525 m^3	8100 m^3
Förzinkat stål	(1)	33 m	33 m	30 m	29 m	33 m
	(2)	1,35 MWh	1,50 MWh	1,62 MWh	1,79 MWh	18,4 MWh
	(3)	54 %	54 %	39 %	49 %	54 %
	(4)	7425 m^3	7425 m^3	6750 m^3	6525 m^3	7425 m^3
"Commercial steel"	(1)	34 m	34 m	30 m	29 m	34 m
	(2)	1,37 MWh	1,52 MWh	1,62 MWh	1,79 MWh	18,6 MWh
	(3)	55 %	55 %	39 %	49 %	55 %
	(4)	7650 m^3	7650 m^3	6750 m^3	6525 m^3	7650 m^3
Rostfritt stål	(1)	35 m	33 m	30 m	29 m	36 m
	(2)	1,39 MWh	1,50 MWh	1,62 MWh	1,79 MWh	19,1 MWh
	(3)	56 %	56 %	39 %	49 %	57 %
	(4)	7875 m^3	7425 m^3	6750 m^3	6525 m^3	8100 m^3

Ur tabell 12 framgår att de optimala höjderna varierar mellan 25 och 36 meter, vilket motsvarar att den anläggningens två reservoarer totalt upptar mellan 50 % och 72 % av anläggningens uppspännande volym. För dessa volymer varierar lagringskapaciteten mellan 1,18 och 1,79 MWh, undantaget kvicksilver. Vatten och tungt vatten har identiska verkningsgrader och gemensamma optimala reservoarhöjder, men lagrings-kapaciteten blir högre för tungt vatten eftersom det har högre densitet än normalt vatten. Resultatet för glycerin är oberoende av val av apparaturmaterial och dess verkningsgrad är låg. Verkningsgraden för sirap är inte lika låg, men heller inte riktigt i nivå med vattnets och kvicksilvrets. Kvicksilver får markant högre lagrings-kapacitet än övriga vätskeämnen eftersom den vätskan har en mycket hög densitet. Dess verkningsgrad är dock i samma storleksordning som för vatten. Undantaget kvicksilver fås den högsta verkningsgraden, 56 %, vid kombination av vatten eller tungt vatten och glas/plast, koppar/mässing liksom rostfritt stål. Undantaget kvicksilver blir den effektiva lagringskapaciteten som högst för sirap i samtliga apparaturer förutom sådana konstruerade i betong, och som lägst för vatten i betongapparatur.

I Fig. 13-15 presenteras modellens dygnsomsättningar alternativt -förluster vid kombination av vatten respektive sirap som vätska och stål respektive betong som konstruktionsmaterial, utifall att anläggningen

hypotetiskt skulle ha funnits i drift på dygnsbasis i de fyra olika elområdena vid månadsskiftet februari/mars samt i maj år 2022, baserat på dåvarande spotpriser.

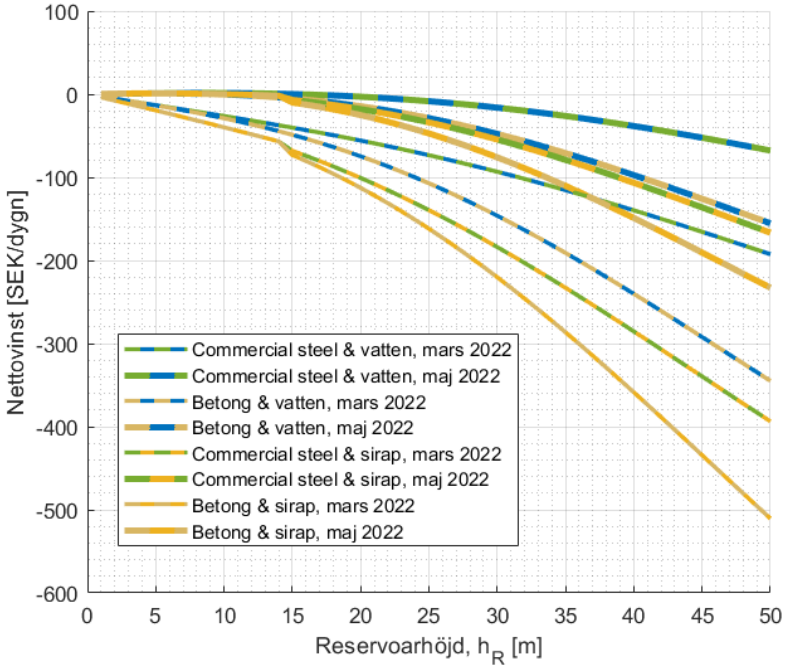

Fig. 13. Omsättning i Sveriges nordligaste elområden SE1 och SE2 som funktion av modellens reservoarhöjd, om anläggningen skulle ha konsumerat el för motordrift mellan klockan 23:00 och 07:00 och därefter producerat el genom generatordrift från klockan 08:00 till 16:00 den 28 februari-1 mars år 2022 respektive den 15-16 maj samma år. Vätskeämnet är vatten respektive sirap, apparaturen är gjord av betong respektive stål ("commercial steel"). Spotpriserna i SE1 och SE2 var identiska. Negativ omsättning indikerar förluster.

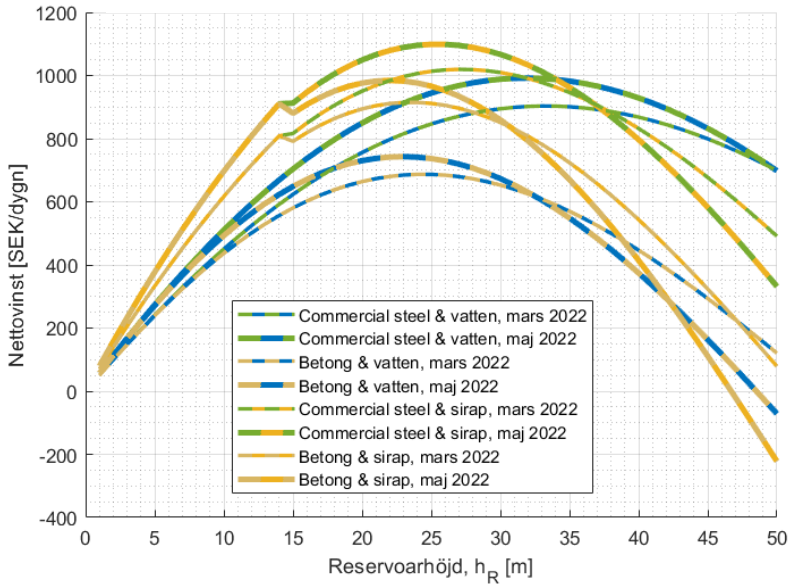

Fig. 14. Omsättning i Sveriges elområde SE3 som funktion av modellens reservoarhöjd, om anläggningen skulle ha konsumerat el mellan klockan 23:00 och 07:00 och därefter producerat el från klockan 08:00 till 16:00 den 28 februari-1 mars år 2022 respektive den 15-16 maj samma år. Vätskeämnet är vatten respektive sirap, apparaturen är gjord av betong respektive stål ("commercial steel"). Negativ omsättning indikerar förluster.

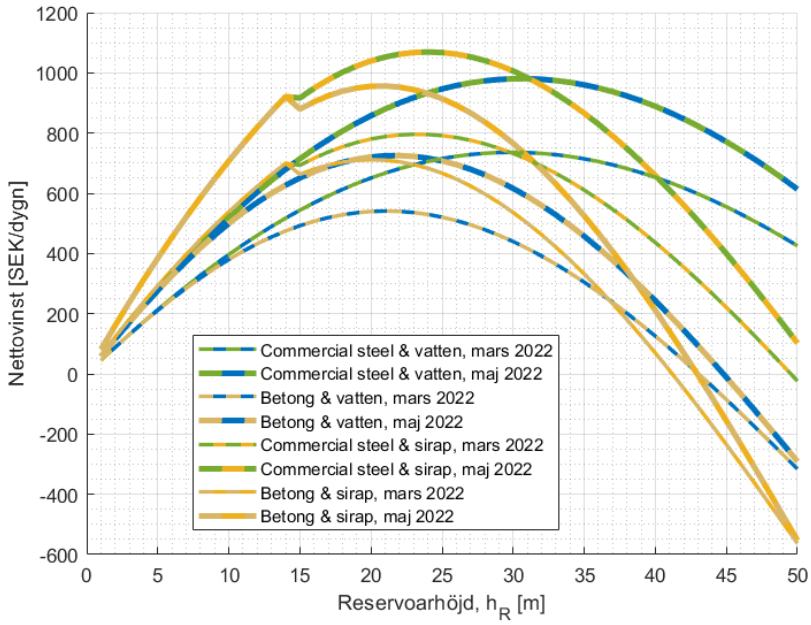

Fig. 15. Omsättning i Sveriges sydligaste elområde SE4 som funktion av modellens reservoarhöjd, om anläggningen skulle ha konsumerat el mellan klockan 23:00 och 07:00 och därefter producerat el från klockan 08:00 till 16:00 den 28 februari-1 mars år 2022 respektive den 15-16 maj samma år. Vätskeämnet är vatten respektive sirap, apparaturen är gjord av betong respektive stål ("commercial steel"). Negativ omsättning indikerar förluster.

Enligt Fig. 13-15 vore den småskaliga PSH-modellen lönsam under rådande ekonomiska förutsättningar i de två sydligare elområdena, men däremot inte i de två nordligare. Omsättningarna i SE3 och SE4 hade ökat liksom förlusterna i SE1 och SE2 minskat i maj månad jämfört med i mars. I de lönsamma områdena tyder Fig. 14-15 även på att maximal vinst inte fås vid maximal reservoarhöjd utan vid ett visst lägre värde. Med en optimal vinst för vatten och "commercial steel" på mellan cirka 900 och 1000 SEK/dygn i elområde SE3 och mellan cirka 740 och 1000 SEK/dygn i område SE4, skulle anläggningen bekostat dess investering inom de tidsperioder som presenteras i tabell 13. På motsvarande sätt för vatten och betong, med en optimal vinst på cirka 700-750 SEK/dygn i SE3 och 550-700 SEK/dygn i SE4, skulle avbetalningstiderna bli enligt tabellen.

Tabell 13.

Kortast möjliga återbetalningstid för den småskaliga PSH-modellen, baserat på kostnader från installationen vid The Goudemand Residence år 2012, omräknade enligt preliminärt AKI i svensk privat tjänstesektor för 2022.

		Avbetalningstid [dygn]	
Elområde	**Vinst enligt datum**	**Vatten/"commercial steel"**	**Vatten/betong**
SE3	28 feb – 1 mar 2022	593 (1 år 7 mån)	762 (2 år 1 mån)
	15 – 16 maj 2022	534 (1 år 6 mån)	711 (1 år 11 mån)
SE4	28 feb – 1 mar 2022	721 (2 år)	970 (2 år 8 mån)
	15 – 16 maj 2022	534 (1 år 5 mån)	762 (2 år 1 mån)

5.2 Gastryckslagring (CAES)

Den termiska lagringskapaciteten för CAES-modellen som introducerades i avsnitt 3.2 presenteras i Fig. 16, jämförelsevis motsvarande Fig. 20 (appendix II) för modellen för PSH.

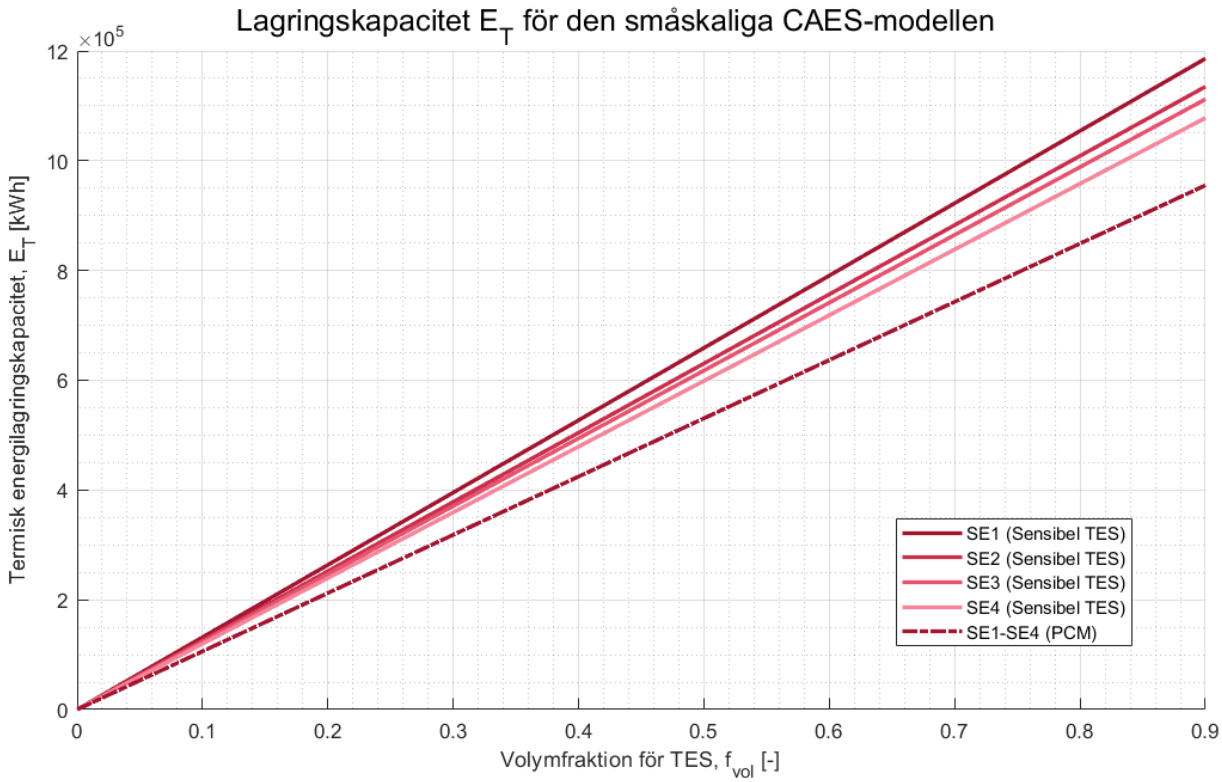

Fig. 16. Lagringskapacitet i form av termisk energi uttryckt i kWh för den småskaliga CAES-modellen med sensibel TES respektive PCM. Kapaciteten beror på omgivningstemperaturen då sensibel TES tillämpas, men oberoende av denna temperatur vid PCM vilket resulterar i att samtliga elområden kan representeras med en allmän graf för PCM.

För att uppnå maximal lagrad kapacitet i TES:en krävs åtskilliga kompressionscykler, enligt avsnitt 3.2. Den mängd termisk energi som tillförs vid varje kompression presenteras i Fig. 17.

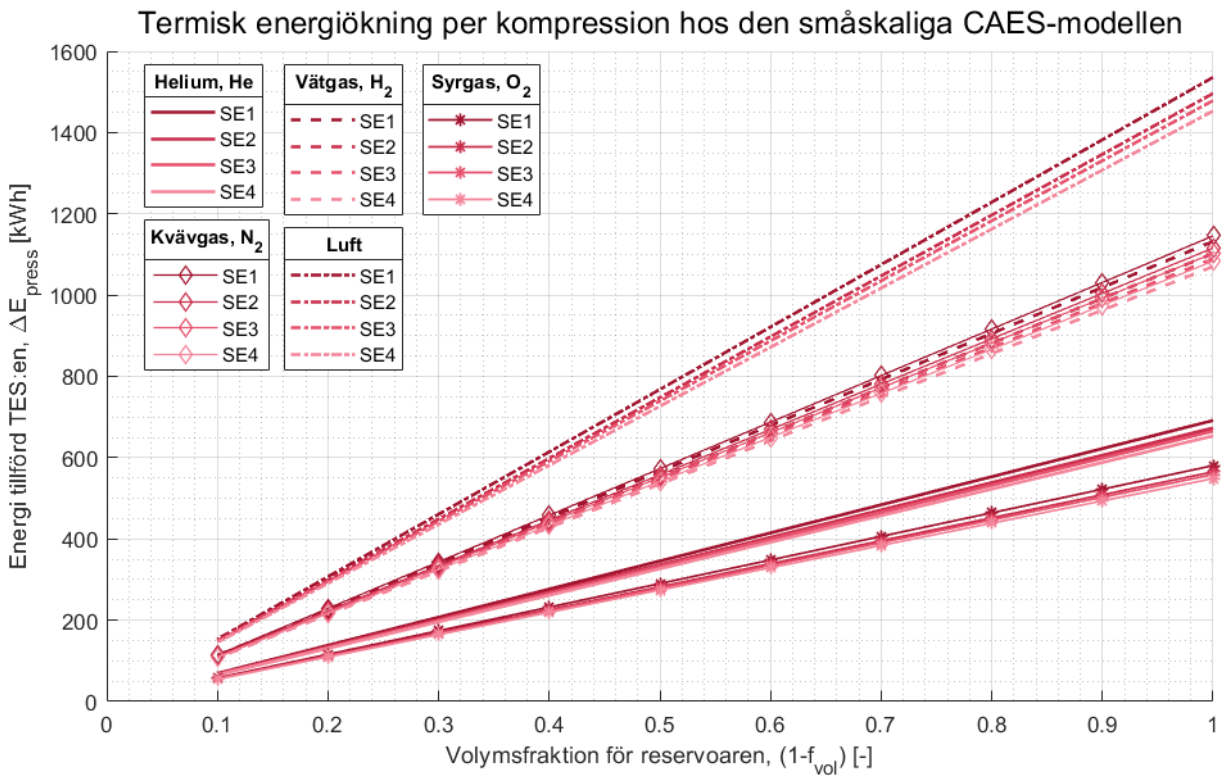

Fig. 17. Mängd termisk energi i kWh som absorberas av TES:en hos den småskaliga modellen vid varje kompression.

I Fig. 17 framträder de olika gasämnena som grupperingar av grafer med inbördes likartade beroenden av volymsfraktionen, vilket tyder på att fraktionen har större inverkan än omgivningstemperaturen. Luften är den gas som på färst kompressionscykler uppnår den maximala lagrade kapaciteten i TES:en. Ju lägre omgivningstemperaturen är desto mer effektiv blir kompressionen. Ur figuren framgår att luft gav högst tillförd energimängd per kompression. Luft resulterar i den omsättning som presenteras i Fig. 18.

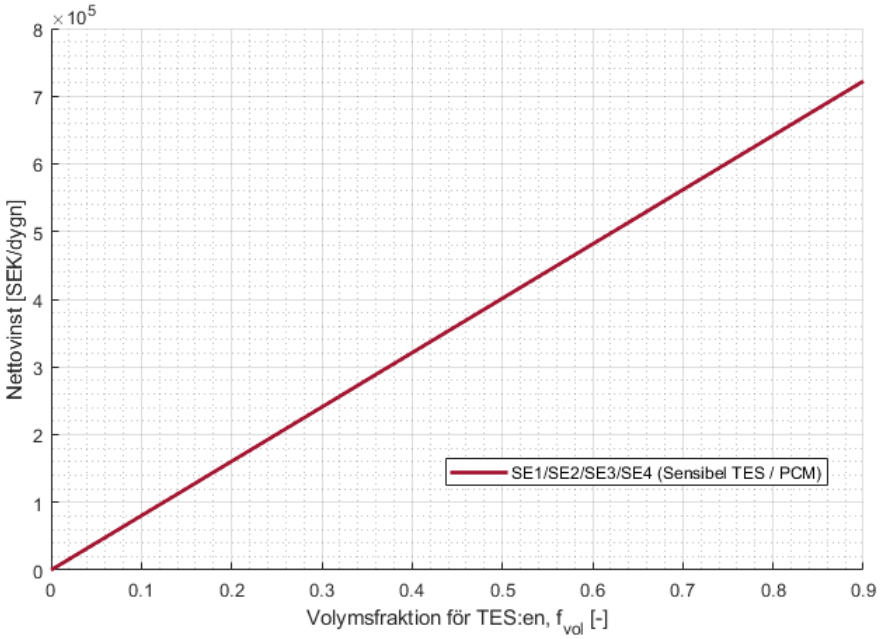

Fig. 18. Omsättning i Sveriges fyra elområden SE1-SE4 som funktion av modellens volymsfraktion för TES:en, vid användande av luft som gas.

Eftersom omsättningen för CAES-modellen inte beror på omgivningstemperaturen blir den samma oavsett geografisk placering. Vinsten beror i stället enbart på verkningsgraden hos kraftverket, vilket är ett konstant tal och därmed blir dess förhållande till volymen proportionellt. Då både CAES med en sensibel TES liksom med PCM har samma maximala verkningsgrad, 90 % enligt tabell 5, blir verkningsgraden även densamma för båda teknologierna, vilket förklarar att Fig. 18 endast innehåller 1 graf.

Återbetalningstiden under samma förutsättningar som i Fig. 18 visas i Fig. 19.

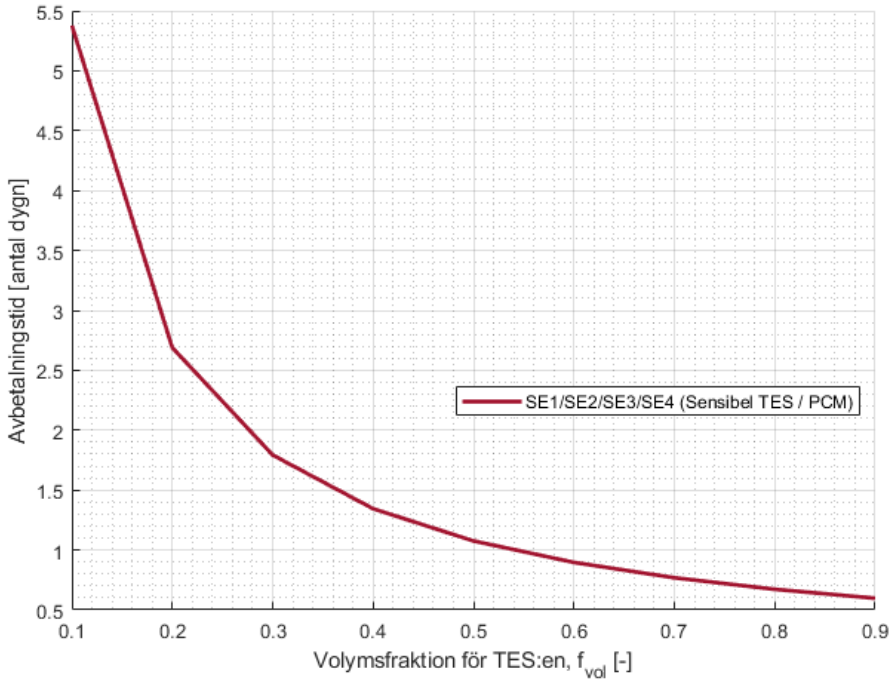

Fig. 19. Återbetalningstid för modellen i Sveriges fyra elområden SE1-SE4 som funktion av TES:ens volymsfraktion, vid användande av luft som gas.

Med modellens stora TES-volym blir återbetalningstiden mycket kort, ett fåtal dygn, eftersom omsättningen blir mycket hög, i storleksnivån kring antal 100 000 SEK per dygn.

5.3 Tröghet och stödtjänster

Bland de PAT-maskiner vars tröghet finns angivna i form av typvärden, är maskinen med märkeffekten 30 kW mest snarlik den i PSH- och CAES-modellernas antagna turbomaskin på 40 kW (tabell 11). Baserat på typvärde har en 40 kW PAT-maskin en tröghetskonstant H på 0,6 sekunder enligt ekvation 42.

Eftersom typiska PAT-maskiner kräver cirka 10 sekunder från aktivering till uppnådd avsedd varvtalsstorlek är de mest lämpade för frekvensstödtjänsterna FCR-D och FCR-N, som har en aktiveringstid på sekunder-minuter enligt tabell 9. Modellerna är även applicerbara på övriga frekvensstödtjänster undantaget FFR, eftersom FFR kräver en uppstartstid på mindre än 1 sekund. Av samma tidsorsak är aktiveringstiden för modellerna för lång för att bemöta kraven för kortvariga spänningsstödtjänster, för kort för att vara lämplig för metastabila spänningsstödtjänster, men applicerbar som dynamiska spänningsstödtjänster.

5.4 Buller

För att sänka hybridmaskinen från North Ridge Pumps maximala bullernivå om 85 dB till riktlinjen om 35 dB behöver ljudnivån sänkas med 50 dB. Varje lager av akustikpanelen av ovävt tyg med densiteten 680 g/cm^2 resulterar i en dämpning med 26 dB, vilket betyder att två lager av en sådan panel räcker för att bemöta riktlinjerna.

6 Diskussion

6.1 Placering i den urbana miljön

En viktig faktor för verkningsgraden hos PSH är att totalhöjden ska vara distinkt större än reservoarhöjden, även om reservoarvolymen i sig styr hur stora ekonomiska vinster som kan genereras. Därför står valet mellan en anläggning vars totalhöjd är tillräckligt stor för att ansenliga reservoarvolymer ska gå att innefatta utan att verkningsgraden blir för låg, eller en anläggning med stor bottenarea. Eftersom stora tomma markytor är en bristvara i urbana miljöer blir det förstnämnda alternativet mest realistiskt. För att undvika att behöva bygga helt nya konstruktioner avseende energilagringen är en rimlig placering att inrymma sådan småskalig PSH i höga byggnader. Studien tar avstamp i dimensionerna för en byggnadskärna men i praktiken kan lagrings-anläggningen inte ha samma dimension. Kärnan i byggnader kan sedan innan hysa mycket andra förbindelser såsom kabeldragningar, ventilation och hisschakt, vilket inskränker på den tillämpningsbara volymen för reservoarer. Därför får dimensionerna i beräkningsmodellen ses som approximativa och syftade till att begrunda analysen i rätt storleksordningar för designen. Med tanke på att Karlatornet i fråga kommer stå färdigt som Nordens högsta byggnad lär den dessutom ha en vidare byggnadskärna än lägre höghus. Eftersom CAES däremot inte har något behov av vertikal orientering ses ingen anledning att begränsa sådana till installation inuti byggnader. Isotermisk CAES är ännu i ett tidigt utvecklingsstadie men längre fram i tiden skulle sådan kunna medföra nya belägg bakom att installera CAES i byggnader och på annat sätt i närheten av allmänna urbana platser, eftersom temperaturrisken med upphettade tankar uteblir.

6.2 Lagringskapacitet

Sett till lagringskapaciteten är det inte givande att bygga PSH-anläggningar vars reservoarer utgör alltför stor andel av den totala volym som reservoarerna spänner upp, enligt Fig. 20 (appendix II). Den optimala reservoarhöjden för en 100 meter hög anläggning är ungefär 30 ± 5 meter enligt tabell 12. Att en 30 meter hög reservoar motsvarar ca 12 våningar i ett hus bringar klarhet i att detta är en mycket stor volym sett till denna urbana tillämpning. Med tvärsnittsarean dimensionerad till 15×15 meter blir reservoarvolymen 6750 m^3. I jämförelse anlades den övre reservoaren vid The Goudemand Residence genom att en 60 m^2 stor del av taket gjordes om till reservoar, vilket lär ha inneburit en reservoarhöjd lägre än två meter, vilket endast ger en volym i storleksordningen kring 100 m^3. Dock är studiens PSH-modell markant småskalig eftersom lagrings-kraftverket vid Turlough Hill, som räknas som en medelstor PSH-anläggning, har reservoarvolymen 2,3 miljoner kubikmeter.

Lagringskapaciteten per volym är omkring tre tiopotenser högre för CAES än för PSH. Eftersom den krävda tiden att lagra den maximala kapaciteten hos CAES riskerar att bli mycket längre än 8 timmar, enligt föregående resonemang och på grund av värmeabsorptionens tröghet, finns potential i att bygga CAES med mycket mindre volym så att hela volymen tas i anspråk under den kortare driftstiden. CAES-anläggningar i beräkningsmodellens storlek lämpar sig bättre för längre driftstider. Slutsatsen blir att trots att den småskaliga CAES-modellen inte var större än den småskaliga PSH-modellen, så var CAES-modellen mycket stor i artificiella CAES-anläggningars mått. Detta framgår som tydligast av storskaligheten i Fig. 18. Den högsta volymen av TES-ämne, 15×15×50 m, vilket hos en sensibel TES motsvarar mer än 1 GWh om hela vattenvolymen når kokpunkten. Det faktum att vatten som TES-medium börjar koka vid höga temperaturer är en nackdel med sensibel TES eftersom den temperaturen leder till ett högt tryck inuti TES:en som den måste tolerera. Sådana problem kringgås genom att använda latent CAES. Vid alltför stora CAES-volymer blir även absorptionstiden alltför lång, vilket bör iakttas som den möjligtvis mest begränsande faktor som inte analyserats inom denna studie. CAES har sammanfattningsvis potential att bli för sammanhanget fortsatt mycket användbar avseende lagringskapacitet och verkningsgrad för markant mindre volymer än PSH-modellen, vilket därmed gör CAES till en mycket lämplig urban lagringsmetod. Däremot är PSH bättre på att

bevara lagrad energi under lång period än CAES, eftersom läckage ur den mycket varma TES:en är svår att eliminera. I PSH förekommer i princip inget vätskeläckage alls eftersom flödet styrs huvudsakligen av turbinen och inte huvudsakligen av ventiler, såsom i CAES.

6.3 Konstruktionsmaterialens inverkan

Gällande de olika konstruktionsmaterialen av apparaturen hos PSH blir verkningsgraden föga förvånande lägre ju grövre materialet är. Dock var det i synnerhet för betong som grovheten fick stor påverkan, enligt Fig. 12. Prestandan med övriga material var ömsesidigt likvärdig. De småskaliga modellerna för PSH och CAES har gemensamt att tjocklekarna för apparaturmaterialen har försummats, eftersom summan av fluid- och TES-volymer antagits uppta hela anläggningsvolymen. Sett till elektroteknisk prestanda är denna försummelse befogad, men sett till hållfastheten är materialtjockleken hos apparaturen centralt avgörande. Eftersom den här studien inte har inkluderat beräkningar anseende hållfasthet blir den verkliga prestandan något lägre än studiens resultat, då apparaturväggarna behöver konstrueras tjocka nog för att upprätthålla hållfastheten vilket inskränker på nyttovolymen. Att byggnader i sig klarar av att bära upp sådana reservoarer bedöms inte vara en osäkerhet eftersom likartade tekniker redan förekommer syftade till ökad byggnadsstabilitet i en del jordskalvsdrabbade områden. Hållfastheten för CAES diskuterades inte i den här studien men den beror av hur högt trycket blir i tankarna baserat på den temperatur som alstras vid kompression. Likt PSH behöver därefter apparaturväggarna utformas tillräckligt tjocka för att motstå dessa tryck.

Anledningen till att kompressionen i CAES blir termiskt mest effektiv när omgivningstemperaturen är låg, enligt Fig. 17, är att kompressionscykeln för modellen definierades sådan att reservoaren enbart har en maxtemperatur för hur mycket den tål och inte även en maximal temperaturskillnad. Om kompressionen och således värmeutvecklingen sker hastigt kan även en stor temperaturskillnad, såsom när omgivnings-temperaturen är särskilt låg, leda till påfrestningar och ökade krav på apparaturen.

6.4 Fluidämnenas inverkan

Det faktum att förkortningen för pumpkraft, PSH, härrör den engelska översättningen ***P**umped-**s**torage **h**ydroelectricity*, innebär att benämningen är begränsande i dess betydelse då den indikerar att endast vatten kan användas som medium. I den här studien innefattades analysen av PSH ett flertal nytänkande alternativa vätskeämnen varav samtliga initialt sågs som enbart experimentella och inte praktiskt realiserbara (sirap, glycerin, tungt vatten och kvicksilver). Experimentella på så vis att de utreder vätskedensitetens inverkan och därmed ifrågasätter om vatten med dess egenskaper är värd att avsätta forskning och utveckling åt att konstruera småskaliga lagringsanläggningar för. Resultaten bekräftar emellertid att vatten är en lämplig vätska för energilagring, även i mer småskaliga versioner. Detta grundas i det faktum att vatten är, förutom den vätska som planeten har störst tillgång på, ett ämne med en mycket utmärkande egenskap: det är i flytande form vid normal utomhustemperatur trots dess höga densitet. De flesta andra ämnen med snarlik eller högre densitet är i fast form vid dessa temperaturer. Undantaget är kvicksilver, som skulle ha resulterat i en remarkabel hög lagringskapacitet på grund av dess höga densitet. Anledningen till att kvicksilver får ses som ett rent experimentellt vätskealternativ är givetvis att det är mycket giftigt och dyrt. Vidare är tungt vatten radioaktivt och därför inte heller realiserbart.

Vid första anseendet må också sirap och glycerin (sammantaget sockerlösningar i vatten) ses som rentav fåniga att fylla reservoarer och pumpkraftverk med. Men resultaten av den här studien indikerar dock flera positiva egenskaper, i synnerhet vad gäller sirap. Enligt ovanstående resonemang utmärker sig betong som ett särskilt ofördelaktigt apparaturmaterial vad gäller verkningsgrad och följaktligen effektiv lagringskapacitet. Men detta visar sig emellertid inte vara fallet om sirap appliceras som medieämne, då blir den effektiva lagrings-kapaciteten enbart nämnvärt lägre än för övriga konstruktionsmaterial. En hypotes var att sirapens höga

viskositet skulle resultera i låg effektiv verkningsgrad i och med höga friktionsförluster, men sådant var inte fallet eftersom detta mer än kompenserades av den högre densitetens resulterande lagringskapacitet. Dessutom blev verkningsgraden inte mer än runt 5 procentenheter lägre för sirap än vatten. För glycerin däremot blev verkningsgraden låg vilket beror på dess särskilt höga viskositet och avspeglades i den effektiva lagrings-kapaciteten. Sammantaget blev den effektiva lagringskapaciteten med sirap till och med högre vid samtliga apparaturmaterial än med vatten vid desamma respektive, resulterar kombinationen av sirap och betong omkring lika hög effektiv lagringskapacitet som kombinationen av vatten och "commercial steel". Om den småskaliga PSH-anläggningen inryms i betongkärnan hos ett höghus medför detta att anläggnings-konstruktionen blir billigare eftersom reservoarerna kan åstadkommas genom att enkelt nog göra betongkärnan segmentvis ihålig. Exempelvis behöver interiörytorna av betongstommen då inte täckas med plast genom lining, eller förses med reservoarer och rör på motsvarande sätt för de resterande apparaturmaterialen. Eftersom grunden till studiens ekonomiska analys saknar apparaturkostnader som särskiljer de olika materialen, i det här fallet betong och "commercial steel", kommer besparingar vid fallet av betong gentemot de andra materialen tillkomma vilket justerar grafernas utseenden i Fig. 13-15 samt avbetalningstiderna i tabell 13.

Även om sockerlösningarna å ena sidan är bifogade med nackdelar såsom att de är både mer komplicerade att införskaffa och hantera än vatten, så är de å andra sidan både ofarliga och ekologiskt hållbara vilket talar för dem som alternativa medium. Både sirap och glycerin förekommer exempelvis som bekant i livsmedel. Om denna inriktning skulle forskas kring vidare kan resultatet också anses indikera att sockerlösningar i mer allmänna termer vara alternativ som ger lovande prestanda. Möjligtvis kan restprodukter från tillverkningen av sirap och glycerin också fungera, såsom melass.

Eftersom turbulens är en av huvudkällorna till buller i vätskepumpar leder dessutom glycerin och för vissa dimensioner även sirap till lägre ljudvolymer, då dessa utmärker sig som laminära i och med deras höga viskositet. Detta kan bespara den mängd ljudisolerande material som krävs för att upprätthålla rekommenderad ljudnivå i byggnaden, förutsatt att anläggningen placeras i en byggnad. Emellertid tyder analysen på att den ljudnivå som PAT-maskiner genererar inte är svårbemästrad att dämpa till lagom nivå. Även om två lager akustikpaneler av ovävd textil enligt [95] är tillräckligt för att bemöta bullerriktlinjerna bör visserligen fler lager förespråkas för att minimera störandemomentet. Kostnader för sådana beslut är dock utom ramen för denna rapport.

Anledningen till att inte fler vätskor med högre densitet än vatten innefattats av studien är att sådana, med tydligt annorlunda karakteristik, helt enkelt inte finns i normal utomhustemperatur. Återstoden vätskor som förekommer i vårt samhälle är i huvudsak antingen vattenbaserade eller kol-/fettbaserade såsom oljor. Oljor har tydligt lägre densitet än vatten och därför inte aktuella. Vattenbaserade vätskor såsom drycker har enbart marginellt högre densitet än vatten eftersom de består främst av just vatten, men de medför å andra sidan ett mer komplicerat tillhandahållande och bruk. Därför visade sig sirap representera en sådan kategori vatten-baserade vätskor som utmärker sig genom att ge likartad eller förbättrad prestanda för PSH.

För CAES framgick ur Fig. 17 att luft är den av studerade gaser som effektivast tillför termisk energi till TES:en. Detta är vidare fördelaktigt då anläggningen då kan bestå av ett öppet system. Hade någon av de andra gaserna använts skulle de ha behövt förvaras i en annan tank vid sidan om i de faser då gaserna inte hyses i reservoaren. Eftersom utrymmestillgången är en av de huvudsakliga begränsande faktorerna i urbana miljöer hade detta varit problematiskt. Emellertid har den här studien inte tagit i anspråk om absorptionstiden av värmen mellan gasen och TES:en varierar för olika gaser och i så fall på vilket sätt. Därför kan inte antalet krävda cykler säkerställt översättas till den tidsperiod som krävs för att uppnå maximal lagringskapacitet i TES:en. Därför hade en bättre metodutformning för studien varit att utgå från att bägge modellerna (PSH och CAES) skulle ha den volym som hinns med att lagras till maximal kapacitet under den föreslagna driftstiden 8 timmar, eller att volymen skulle ha varit densamma men att märkeffekten för PAT-maskinen skulle ha

dimensionerats för att bemöta lagringsvolymen sådant att driftstiden 8 timmar räcker för att lagra maximal kapacitet.

6.5 Ekonomisk hållbarhet

Det som i slutskedet avgör om anläggningen är värd att realisera är emellertid om den är ekonomiskt lönsam eller ej. I rådande ekonomiska läge är den det oavsett reservoarhöjd, enligt Fig. Yq, såvida anläggningen byggs i något av de två elområdena i södra Sverige. I områdena SE1 och SE2 går anläggningen med förlust oavsett dimensioner och därmed är den inte realiserbar i dessa områden utan subventioner. Omsättningen går hand i hand med den effektiva lagringskapaciteten, vilket bekräftas av att graferna i både Fig. 12 och Yq är parabler vars maximipunkter infaller vid samma reservoarhöjder. Modellen för CAES är också lönsam. Det faktum att bägge lagringsmetoderna alltså visar på lönsamhet indikerar en viktig utveckling eftersom sådant inte har varit fallet tidigare. Det förändrade ekonomiska läget med mer fluktuerande spotpriset [101] tenderar alltså att möjliggöra sådana lagringsmetoder som har beprövats förut och i dem lägena förkastats i och med att de inte varit lönsamma.

Som tidigare nämnt kan det primära syftet med småskaliga lagringsanläggningar i urban miljö vara två olika tjänster: antingen är målet att sälja energi när elpriset är högt och därmed gå med vinst, eller att konsumera energin för egen del och på så vis göra en besparing. Storleken av denna vinst respektive besparing är densamma och därför kan studiens resultat användas till båda dessa syften.

Den ekonomiska kalkylen för återbetalningstiden för de småskaliga modellerna tog inte hänsyn till räntor på det lån som rimligtvis tas för att bekosta installationen av anläggningarna. Räntorna antas förlänga återbetalningstiden märkbart men inte till oansenliga perioder, vilket i synnerhet skulle motsvaras av perioder längre än anläggningarnas livstid.

6.6 Valet av reversibla pumpar

I studien behandlas endast PAT- och RPT-pumpar och den elektrotekniska verkningsgraden hämtades från sådana produkter. Valet av PAT förmodades vara fördelaktigt i urbana miljöer med rådande utrymmesbrist gentemot att använda en traditionell motor och generator separat. Emellertid är det inte bekräftat att reversibla maskiner är mindre skrymmande än totalvolymen av en motor och en generator. Studien redogjorde heller inte för om reversibla maskiner är dyrare än summan av en motor och en generator med i övrigt samma prestanda. I en CAES-anläggning kan det bli rent praktiskt problematiskt att använda en reversibel pump eftersom inloppspumpen och utloppsturbinen inte nödvändigtvis är placerade intill varandra. Om sådant är fallet skulle det kunna lösas med exempelvis förbindande axlar, men det kan också vara en mer rimlig och kostnadseffektiv lösning att använda en separata motorer och generatorer. Till system med viskösa sockerlösningar som medium vore vidare förträngningspumpar ett mer lämpat val än vanlig impellrar såsom de som används i PAT-pumparna från North Ridge Pumps (se Fig. 6).

6.7 Applicerbara stödtjänstanslutningar

Driften för PSH och CAES kan inte startas upp ögonblickligen men ändå relativt omgående, inom några sekunder. Baserat på detta är de applicerbara för de frekvensreglerande stödtjänsterna FCR-N, FCR-D (både upp och ned), aFRR och mFRR, men inte FFR som kräver en alltför snabb aktiveringstid. Emellertid har turbomaskinerna i anläggningarna i fråga lägre effekter än vad som är utav intresse, omkring 40 kW per maskinenhet. Därför är det snarare i form av så kallade virtuella stödtjänstenheter, alltså ett flertal anläggningar som gemensamt räknas som en enhet, som dessa småskaliga lagringskraftverk har potential att upphandlas som frekvensstödtjänster. Därtill är anläggningarna inte alltid tillgängliga, det vill säga, de kan exempelvis inte

aktiveras för att producera el om allt vatten befinner sig i den nedre reservoaren. Utifall att intresset för att använda anläggningarna som stödtjänster är stort kan de hållas konstant tillgängliga genom att begränsa lagren från att helt tömmas eller fyllas. Om anläggningarna inte längre då blir ekonomiskt hållbara styrs valet av om Svenska Kraftnät är beredda att betala för omkostnaderna eller om anläggningar som dessa skulle komma att subventioneras.

En intressant aspekt är den att den reaktiva effekten numera finns i överskott på elnätet. Apropå detta är lagringskraftverk speciellt angelägna eftersom de med den ingående motorn kan absorbera reaktiv effekt vid behov. För övrigt är de småskaliga PSH- och CAES-modellerna lämpliga att ansluta till den dynamiska formen av spänningsnivåbalanserande stödtjänster. Om beslutsfattandet om att installera småskaliga lagringskraft-anläggningar sker i tidigt stadie för nyproduktion av exempelvis kontorshus men även bostäder, ökar potentialen för i synnerhet PSH att installeras i ett stort antal hus eller ett helt kvarter. Installationsprocessen blir då både enklare och förmodat billigare eftersom byggnaderna är *avsedda* för att ha sådana installationer, en stor skillnad gentemot efterkonstruktionen i The Goudemand Residence.

6.8 Fördelar gentemot andra lagringsmetoder

Gentemot kemiska batterier som lagringsmetod har PSH och CAES fördelen att deras elektronik inte består av metaller såsom kobolt och dylikt, vilket batterier gör och vilkas utbrytning sker i främst fattiga länder under arbetsförhållanden som sedan en tid tillbaka har fått stark kritik från omvärlden. PSH- och CAES-anläggningar har även långa livstider eftersom de främst består av mekaniska komponenter som slits långsamt och eftersom den elektroniska utrustningen är lättillgänglig för service. Genom att hysa anläggningarna vid eller inuti urbana konstruktioner förstör de heller inte naturen såsom exempelvis traditionella vattenkraftverk.

6.9 PSH i vattentorn

I staden San Antonio, USA, finns ett sekundärt vattensystem anlagt som med hjälp av egna vattentorn (se Fig. 23, appendix IV) och egna rör tillvaratar och distribuerar återvunnet vatten, det vill säga använt vatten som inte har renats tillräckligt för att bli drickbart men som är tillräckligt rent för att kunna nyttjas vid exempelvis bevattning och kylning inom industri [102]. På liknande vis hade ett eller flera vattentorn kunnat byggas exklusivt för energilagring, förbundna med en underjordisk vattenreservoar. Eftersom även vanliga vattentorn använder pumpar för att lagra vattnet är steget inte långt från en väletablerad teknik. Om den urbana miljön i fråga inte hyser underjordiskt oanvänt utrymme för att anlägga en ny reservoar skulle nya vattentorn avsedda för energilagring möjligtvis kunna anslutas till befintliga dricksvattensystemet och nyttja dess vatten-försörjning. Den stora skillnaden mellan de två former av vattentorn som i sådana fall är anslutna till samma rörsystem är att vattentrycket härrörande energilagringstornen inte bidrar till den vidare distributionen av vattnet till dess konsument såsom exempelvis hushåll, utan likställs med trycknivån i röret vid lagringstornets anslutning efter att ha passerat en turbin.

6.10 Granulära material

En tänkbar möjlighet vore att utveckla ett lagringskraftverk påminnande om PSH men avsett för solida granulära material (pulverform) såsom sand och jord i stället för vätskor såsom vatten. Solida materials höga densitet (se exempel i tabell 16, appendix V) och därmed höga energidensitet enligt ekvation 1 talar för detta, eftersom mindre volymer av dessa krävs för att lagra samma mängd energi. Prototyper för sådana sandlagringskraftverk har tagits fram av ingenjörer i Kina och Indien, dock enbart i miniatyrstorlek [103], [104]. Dessa prototyper använder så kallade *skophissar* (*eng.* bucket elevator) i stället för pumpar för att lyfta sanden. Sanden lagras sedan i en övre reservoar tills den släpps ned via en separat turbin.

Skophissar innefattar flera rörliga och lösa delar vilket ger upphov till friktionsbildning. Därför skulle den så kallade *arkimedesskruven* vara ett bättre alternativ till skophissen, eftersom arkimedesskruven saknar lösa delar och består av ett enda roterande stycke (se Fig. 24, appendix V). Principen bakom arkimedesskruven, en innovation som härstammar från de sista 400 åren f.Kr [105] vilket gör den till en av de äldsta maskinerna som fortfarande är i bruk [106], är att när en spiralformad skruv nedsänkt i en vätska eller pulver sätts i axial rotation medför detta att ämnet samlas in vid skruvens nedre ände och sedan förs uppåt till motsatt ände [107]. En nackdel med arkimedesskruven är att den enbart kan orienteras i maximalt 45° vinkel. Med andra ord är den sämre lämpad i byggnader och kan inte appliceras på samma sätt som PSH inuti ett betongsjakt. Sett till den här egenskapen är skophissen fördelaktig, som kan installeras vertikalt. Arkimedesskruven återfinns hos vattenkraftverk på diverse platser runtom i världen, så kallade *arkimedesskruvturbinkraftverk* (AST), se Fig. 25 (appendix V). Vid AST leds vattnet motriktat, ovanifrån och ned. På så vis utvinns rörelseenergi vid mindre fördämningar genom att vattnet sätter en sluttande arkimedesskruv i rotation [108].

Det skulle även kunna gå att förflytta sanden med pumpar snarlikt dem i pumpkraftverken för vatten. Dock krävs en annan turbintyp för att undvika oönskad ansamling av mediet, så kallade *slampumpar* är inte tillräckliga då de kräver en andel torrsubstans mindre än eller maximalt lika med 25 % [109], [110].

7 Slutsats

Småskalig PSH lämpar sig för att inrymmas i betongkärnan av höghus, medan reservoarernas höga temperatur hos CAES kan inskränka på säkerheten för allmänheten om de installeras i sådan direkt närhet till människors vistelseområden. För CAES är verkningsgraden volymsoberoende och lagringskapaciteten får ses begränsad av den anläggningsstorlek som är möjlig att hysa samt av hur lång lagringstid som är aktuell.

Vatten men även sirap resulterar i bra prestanda i småskalig PSH. Fördelen med sirap är att energiförlusterna förblir låga även om anläggningens reservoarer och rör konstrueras i enbart obehandlad betong, vilket samtidigt besparar konstruktionskostnaderna. Till vatten bör betong som konstruktionsmaterial undvikas eftersom det ger anläggningen låg verkningsgrad. Nackdelarna med sirap är en mer komplicerad införskaffning och hantering av ämnet än för vatten, samt att pumpar för sirap inte finns utvecklade i dagsläget. Till CAES är luft en mycket effektiv gas eftersom den tillför TES:en mycket termisk energi per kompression.

Småskalig PSH och CAES vore under rådande ekonomiska läge lönsamt i elområdena SE3 och SE4. För PSH bekostas dess installation inom omkring 2 år. För CAES bör mindre volymer än de i studien undersökas för att fastslå ändamålsenliga återbetalningstider och vinster. CAES indikerar fortsatt hög lagringskapacitet och ekonomisk lönsamhet vid *mycket små* volymer och är därför särskilt lämplig för områden där disponibla utrymmen är en bristvara.

Småskalig PSH och CAES befogar endast liten tröghet och har låg aktiv effekt per anläggning, men om flertalet anläggningar installeras inom samma urbana område kan de utgöra en virtuell anläggning som är möjlig att ansluta som stödtjänst för FCR-N, FCR-D, aFRR och mFRR (för frekvensreglering). Anläggningsvis kan de även anslutas till den dynamiska sektorn för spänningsreglering lokalt.

PAT-maskiners ljudvolym är låg nog att kunna dämpas till hållbara inomhusnivåer med hjälp av akustikplattor. Enbart betong fungerar däremot inte som en tillräcklig ljudabsorbent.

8 Framtida studier

8.1 Differentiering av modellerna

Den publika tillgången på tekniska data gällande RPT- och PAT-maskiner är mycket knapphändig i och med att produkternas tillverkare anser sådant som företagshemligheter såvida den potentiella kunden inte väljer att beställa faktiska beräkningar av verkningsgrader och data från specifika pumpar för specifika förutsättningar. Därför vore en sådan beställning ett rimligt nästa steg, såvida en sådan ekonomisk budget finns.

Den här studien berör inte de ventiler, alternativt pumplås, som används i PSH och CAES för att säkra att lagrad fluid inte läcker tillbaka. Syftet med sådana ventiler och pumplås är att minimera fluidläckage. Pumplås fungerar sådant att de förhindrar turbinen att rotera utom drift och kan behövas i och med PAT-maskinens låga tröghet. Ventiler bidrar med ytterligare K_L-värden som ger en något ökad friktionsfaktor hos apparaturen.

I enlighet med studiens slutsats bör en volymmässigt mindre CAES-modell studeras. Exempelvis vore ett rimligt nästa steg att beräkna vid vilken skrymmandevolym och volymsfraktion som CAES får samma lagringskapaciteter som de som PSH-modellen fick.

8.2 Byggnaders energikonsumtion

Om syftet är specifikt att avse den lagrade energin för egen konsumtion, är ett nästa steg att undersöka hur stor konsumtionen av elektricitet hos olika system i kontorshusen eller alternativa byggnader är. Exempel på sådana system är inomhusklimatsystem (ventilation, temperatur, luftfuktighet, med mera).

8.3 Åldrande av apparatur

När ett rör åldras påverkas dess friktionskoefficient, i och med att skrovligheten hos rörets inneryta förändras. Denna åldrandefaktor beskrivs med den så kallade *ekvivalenta sandråheten* (alt. *sandskrovlighet*) som uttrycks i meter, se ekvation 48 [19]. Ekvationen är ett linjärt samband som i huvudsak bestäms med hjälp av tester och mätdata.

$$k_e(t) = k_e(0) + \delta \cdot t \tag{48}$$

Tiden t mäts i år räknat från när röret togs i bruk och δ är sandråhetsökningen per år, vilken ofta anges i rörens specifikationer och vars värde hämtas ur tabellblad. Några typvärden för begynnelsesandråheten $k_e(0)$ presenteras i tabell 14.

Tabell 14.

Typiska värden för $k_e(0)$ för ett urval olika rörmaterial. Från [111].
(1) Rördiameter D < 0,2 m. (2) Rördiameter D > 0,2 m.

Material	$k_e(0)$ [54]
Stål	0,0001-0,0002
Koppar	0,00001 (1)
Betong	0,0002
PVC	0,00001 (1)
	0,00005 (2)

De konsekvenser för flödet (Q) som den ökande ekvivalenta sandråheten får beskrivs av den så kallade *Prandtl-Nikuradse-Colebrooks* formeln (PNC), ekvation 49 [112].

$$Q_{PNC} = \frac{\pi \cdot \sqrt{2 \cdot g \cdot D \cdot ı}}{2} \cdot \log_{10}\left(\frac{k_e}{c_{NPC} \cdot D} + \frac{2{,}51 \cdot \upsilon}{\sqrt{2 \cdot g \cdot D^3 \cdot ı}}\right) \tag{49}$$

Q_{PNC} beror även av den *empiriska konstanten* c_{NPC} (beskrivande rörets korrugering, typiskt 3,93) och det *hydrotekniska fallet* ı motsvarande lutningen hos flödets strömlinje.

8.4 Kombinerad PSH och CAES

Nyligen patenterade det amerikanska startup-företaget *Quidnet Energy* en nytänkande lagringsmetod som kombinerar tekniker från storskalig PSH, storskalig CAES och så kallad fracking [113]. Den allmänna kännedomen för metoden ökade i samband med att Bill Gates investerade i teknologin våren 2022 [114]. Quidnet Energy avser metoden för mycket storskaliga anläggningar men vidare studier i ämnet skulle kunna utreda huruvida tekniken även skulle kunna ha potential till att tillämpas i urbana miljöer.

Litteratur

[1] J. Gode et al., ”Klimatförändringarnas inverkan på energisystemet,” Energiforsk, Stockholm, Sverige, Klimatförändringarnas konsekvenser 2021:738, 2021. [Online]. Tillgänglig: https://energiforsk.se/media/29521/klimatforandringarnas-inverkan-pa-energisystemet-energiforskrapport-2021-738.pdf, Hämtad: 2022-05-09.

[2] Förenta nationerna (FN), The Hunger Project, ”Agenda 2030 och de Globala målen.” [Online]. Tillgänglig: https://thehungerproject.se/agenda-2030 (hämtad: 2022-05-09).

[3] Statistikmyndigheten (SCB), ”Snabba fakta: Elproduktion och förbrukning i Sverige,” 2022. [Online]. Tillgänglig: https://www.scb.se/hitta-statistik/sverige-i-siffror/miljo/elektricitet-i-sverige/ (hämtad: 2022-05-09).

[4] K. Byman, ”Elproduktion: Tekniker för produktion av el,” Kungl. Ingenjörsvetenskapsakademien (IVA), Stockholm, IVA-projektet Vägval el: IVA-R 483, 2015.

[5] F. Gröndahl och M. Svanström, ”Tekniska lösningar visar stora möjligheter,” i *Hållbar utveckling: en introduktion för ingenjörer och andra problemlösare*, Stockholm, Sverige: Liber AB, 2010, kap. 8, s. 236.

[6] ”Hydroelectric power,” i *Britannica*. [Online]. Tillgänglig: https://www.britannica.com/science/hydroelectric-power, Hämtad: 2022-06-12.

[7] G. O. e Silva och P. Hendrick, ”Pumped hydro energy storage in buildings,” Université Libre de Bruxelles, Bryssel, Belgien, Applied Energy 179, 2016. [Online]. Tillgänglig: https://doi.org/10.1016/j.apenergy.2016.07.046, Hämtad: 2022-01-31.

[8] *Pumped storage machines: Reversible pump turbines, Ternary sets and Motor-generators*, Heidendeim, Tyskland: Voith Hydro Holding GmbH & Co. KG, u.d. [Online]. Tillgänglig: https://www.voith.com/cn/7_06_Broschuere-Pumped-storage.pdf, Hämtad: 2022-02-21.

[9] P. U. Ekholm, L. Frænkel, och S. Hörbeck, *Formler & tabeller i fysik, matematik & kemi: för gymnasieskolan*. 8. uppl., Göteborg, Sverige: Konvergenta HB, 2010.

[10] C. Nordling och J. Österman, ”Fluids – Mechanical and Thermal Properties,” i *Physics Handbook: for Science and Engineering*. 7. uppl., Lund, Sverige: Studentlitteratur, 2004, ss. 35-39.

[11] B.A. Gustafson, ”Vätskeströmning,” i *Pumphandboken 2010: Svensk pumpmarknad: Vätskor - pumpning - pumpar - leverantörer*, M. Björkner. Lidköping, Sverige: Thelin Läromedel, 2010, kap. 11, ss. 259-294.

[12] C. T. Crowe, D. F. Elger, B. C. Williams och J. A. Roberson, “Fluid properties,” i *Engineering Fluid Mechanics*, 9. uppl., New Jersey, USA: John Wiley & Sons, 2010, kap. 2, ss. 18-20.

[13] A. Andersson, B.A. Gustafson, G. Nilsson, ”Vätskors egenskaper,” i *Pumphandboken 2010: Svensk pumpmarknad: Vätskor - pumpning - pumpar - leverantörer*, M. Björkner. Lidköping, Sverige: Thelin Läromedel, 2010, kap. 10, ss. 214-258.

[14] *Viscosity Chart*, Chestertown, USA: Dixon Valve, u.d. [Online]. Tillgänglig: www.dixonvalve.com/sites/default/files/product/files/brochures-literature/viscosity%20chart.pdf, Hämtad: 2022-05-11.

[15] ”Reynoldstal,” i *Nationalencyklopedin*. [Online]. Tillgänglig: https://www.ne.se/uppslagsverk/encyklopedi/lång/reynoldstal, Hämtad: 2022-05-26.

[16] Engineering ToolBox, ”Laminar, transitional and turbulent flow,” 2004. [Online]. Tillgänglig: https://www.engineeringtoolbox.com/laminar-transitional-turbulent-flow-d_577.html (hämtad: 2022-05-26).

[17] C. T. Crowe, D. F. Elger, B. C. Williams och J. A. Roberson, “Flow in conduits,” i *Engineering Fluid Mechanics*, 9. uppl., New Jersey, USA: John Wiley & Sons, 2010, kap. 10, s. 317.

[18] ”Wetted perimeter,” i *Oxford Reference*. [Online]. Tillgänglig: https://www.oxfordreference.com/view/10.1093/oi/authority.20110803121929678 (hämtad: 2022-05-09).

[19] B. Appelqvist och N. Frössling, ”Strömning i rör,” i *Grundläggande strömningslära*, Göteborg, Sverige: Chalmers tekniska högskola, 1977, kap. 5, s. 6.

[20] Y. A. Çengel och J. M. Cimbala, ”Internal flow,” i *Fluid mechanics: Fundamentals and applications*, 3. uppl., New York, USA: McGraw-Hill, 2014, kap. 8, ss. 367-368, 374.

[21] C. Norberg, ”MMV025/211 Strömningslära, Laboration 2a: Strömning i rörsystem,” laborationsbeskrivning, Institutionen för Energivetenskaper, Lunds tekniska högskola, Lund, Sverige, 2010. [Online]. Tillgänglig: https://www.lth.se/fileadmin/ht/Kurser/MMV025/Lab2a-PM.pdf.

[22] A. Nordling, R. Englund, A. Hembjer, och A. Mannberg, ”Energilagring: Teknik för lagring av el,” Kungl. Ingenjörsvetenskapsakademien (IVA), Stockholm, IVA-projektet Vägval el: IVA-R 482, 2015. [Online]. Tillgänglig: https://www.iva.se/globalassets/info-trycksaker/vagval-el/vagval-el-lagring.pdf, Hämtad: 2022-03-01.

[23] M. King, A. Jain, R. Bhakar, J. Mathur, och J. Wang, ”Overview of current compressed air energy storage projects and analysis of the potential underground storage capacity in India and the UK,” *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, vol. 139, Apr. 2021. [Online]. Tillgänglig: https://doi.org/10.1016/j.rser.2021.110705, Hämtad: 2022-03-03.

[24] E. Steen och M. Torestam, ”Compressed air energy storage: Process review and case study of small scale compressed air energy storage aimed at residential buildings,” examensarbete på högskole-ingenjörsnivå, Kungliga tekniska högskolan, Stockholm, Sverige, 2018. [Online]. Tillgänglig: http://kth.diva-portal.org/smash/record.jsf?pid=diva2%3A1209644&dswid=-3007, hämtad: 2022-03-28.

[25] ”Akvifer,” i *Nationalencyklopedin*. [Online]. Tillgänglig: https://www.ne.se/uppslagsverk/encyklopedi/lång/akvifer, hämtad: 2022-04-01.

[26] *Adiabatic compressed air energy storage: Mechanical energy storage*, Bryssel, Belgien: European Association for Storage of Energy (EASE), u.d. [Online]. Tillgänglig: https://ease-storage.eu/wp-content/uploads/2016/03/EASE_TD_ACAES.pdf, Hämtad: 2022-05-26.

[27] Sino Voltaics, ”Isothermal CAES,” u.d. [Online]. Tillgänglig: https://sinovoltaics.com/learning-center/storage/isothermal-caes/ (hämtad: 2022-05-26).

[28] ”Adiabatisk,” i *Nationalencyklopedin*. [Online]. Tillgänglig: https://www.ne.se/uppslagsverk/encyklopedi/lång/adiabatisk, hämtad: 2022-05-04.

[29] Energy Storage Association, ”Mechanical energy storage,” u.d. [Online]. Tillgänglig: https://energystorage.org/why-energy-storage/technologies/mechanical-energy-storage, Hämtad: 2022 -02-28.

[30] ”Isotermisk,” i *Nationalencyklopedin*. [Online]. Tillgänglig: https://www.ne.se/uppslagsverk/encyklopedi/lång/isotermisk, Hämtad: 2022-05-26.

[31] A. Hauer, ”Thermal energy storage,” IEA-ETSAP, Paris, Frankrike, och IRENA, Masdar City, Förenade Arabemiraten, E17, 2013. [Online]. Tillgänglig: https://iea-etsap.org/E-TechDS/PDF/E17IR%20ThEnergy%20Stor_AH_Jan2013_final_GSOK.pdf, Hämtad: 2022-03-16.

[32] A. Westerlund, ”Termisk energilagring som uppvärmningsmetod i byggnader: en metaanalys av forskningen,” examensarbete på högskoleingenjörsnivå, Programmet för distribuerade energisystem, Yrkeshögskolan Arcada, Helsingfors, Finland, 2018. [Online]. Tillgänglig: https://www.theseus.fi/bitstream/handle/10024/159400/Westerlund_Anders.pdf.

[33] L.F. Cabeza, ”Introduction to thermal energy storage (TES) systems,” i *Advances in Thermal Energy Storage Systems: Methods and Applications*. Cambridge, Storbritannien: Woodhead Publishing, 2015, kap. 1, s. 13.

[34] L.F. Cabeza, ”Using solid-liquid phase change materials (PCMs) in thermal energy storage systems,” i *Advances in Thermal Energy Storage Systems: Methods and Applications*. Cambridge, Storbritannien: Woodhead Publishing, 2015, kap. 9, s. 235.

[35] Markus Eck et al., ”High temperature PCM storage for DSG solar thermal power plants tested in various operating modes of water/steam flow,” German Aerospace Center (DLR), Köln, Tyskland, opublicerad.

[36] Lumo Energi, ”Elområden karta,” u.d. [Elektronisk bild]. Tillgänglig: https://www.lumoenergi.se/el/elomrade-sverige/, Hämtad: 2022-06-15.

[37] *Året 2021 - Lufttemperatur*, Norrköping, Sverige: 2022. [Online]. Tillgänglig: https://www.smhi.se/pd/klimat/pdf_stats/year/SMHI_vov_temperature_21.pdf, https://www.smhi.se/klimat/klimatet-da-och-nu/manadens-vader-och-vatten-sverige/manadens-vader-i-sverige/ars-och-manadsstatistik, Hämtad: 2022-05-09.

[38] Sveriges meteorologiska och hydrologiska institut (SMHI), ”Senaste observationerna: Alla stationer.” [Online]. Tillgänglig: https://www.smhi.se/vader/observationer/observationer#ws=wpt-a,proxy=wpt-a,tab=all (hämtad: 2022-05-09).

[39] Isaac Physics, ”Non ideal gases,” u.d. [Online], CC-BY. Tillgänglig: https://isaacphysics.org/concepts/cc_non_ideal_gases, Hämtad: 2022-02-28.

[40] C. Nordling och J. Österman, ”Van der Waals Constants,” i *Physics Handbook: for Science and Engineering*. 7. uppl., Lund, Sverige: Studentlitteratur, 2004, s. 41.

[41] M. Dayah, *Ptable*. [Online]. Tillgänglig: https://ptable.com/, hämtad: 2022-05-16.

[42] A.-M. Pendrill, ”Lufttryck, temperatur och ideala gaslagen,” Skolverket, Solna, Sverige, 2018. [Online]. Tillgänglig: https://larportalen.skolverket.se/LarportalenAPI/api-v2/document/path/larportalen/material/inriktningar/2-natur/Gymnasieskola/514-Vader-och-klimat/del_03/Material/Flik/Del_03_MomentA/Artiklar/NT5_GY_03A_02_lufttryck.docx, Hämtad 2022-05-16.

[43] K. S. Kumar, A. P. Babu och M. Ponmurugan, ”Van der Waal’s gas equation for an adiabatic process and its Carnot engine efficiency,” Central University of Tamilnadu, Tamilnadu, Indien, 2017. [Online]. Tillgänglig: https://arxiv.org/pdf/1802.01474.pdf, Hämtad: 2022-05-12.

[44] L. Råde och B. Westergren, ”Integral Calculus: Tables of Indefinite Integrals,” i *Mathematics Handbook: for Science and Engineering*. 5. uppl., Lund, Sverige: Studentlitteratur, 2014, kap. 7.4, s. 153, nr. 4-5.

[45] K. Mongrid et al., ”2020 Grid energy storage technology cost and performance assessment,” Pacific Northwest National Laboratory, Richland, WA och Mustang Prairie Energy, Boston, MA, USA, DOE/PA-0204, 2020. [Online]. Tillgänglig: https://www.pnnl.gov/sites/default/files/media/file/CAES_Methodology.pdf, Hämtad: 2022-05-17.

[46] I. Andersson, I. Eriksson, B. A. Gustafson, A. Jonsson och O. Wikner, ”Pumpar,” i *Pumphandboken 2010: Svensk pumpmarknad: Vätskor – pumpning – pumpar – leverantörer*, M. Björkner. Lidköping, Sverige: Thelin Läromedel, 2010, kap. 3, ss. 18-19, 29, 42, 53-54.

[47] Telfa AB, ”Kugghjulspumpar Magnetkopplade och Tätade: Så här fungerar en Kugghjulspump.” [Elektronisk bild]. Tillgänglig: https://www.telfa.se/produkter/kugghjulspumpar, Hämtad: 2022-02-21.

[48] “Turbine selection on the basis of specific speed,” i *Britannica*. [Online]. Tillgänglig: https://www.britannica.com/technology/turbine/Turbine-selection-on-the-basis-of-specific-speed, Hämtad: 2022-05-26.

[49] Real Engineering, ”The truth about pumped hydro,” *YouTube*, Feb. 20, 2021. [Video]. Tillgänglig: https://www.youtube.com/watch?v=JSgd-QhLHRI (hämtad: 2021-12-27).

[50] Power technology, ”Turlough Hill,” 2021. [Online]. Tillgänglig: https://www.power-technology.com/marketdata/turlough-hill-ireland/ (hämtad: 2022-06-15).

[51] NRGExpert, “Manufacturers in the Hydroelectric Power Industry,” NRG Smarts Limited, Storbritannien, 2012. [Online]. Tillgänglig: eds.p.ebscohost.com/eds/pdfviewer/pdfviewer?vid=0&sid=c8818e50-3351-4a76-b375-5daaa0ebe1ed%40redis, Hämtad: 2022-02-02.

[52] Voith GmbH & Co. KGaA, “Turbines & shut-off valves: Reliable solutions for every condition,” u.d. [Online]. Tillgänglig: https://voith.com/corp-en/products-services/hydropower-components/turbines.html (hämtad: 2022-02-21).

[53] D. Novara och A. McNabola, ”Design and Year-Long Performance Evaluation of a Pump as Turbine (PAT) Pico-Hydropower Energy Recovery Device in a Water Network,” *Water*, vol. 13, nr. 3014, Okt. 2021. [Online]. Tillgänglig: https://www.mdpi.com/2073-4441/13/21/3014, Hämtad: 2022-02-20.

[54] *North Ridge Pump as Turbine: Product Specification Sheet*, Nottinghamshire, Storbritannien: X-Cel House, u.d. [Online]. Tillgänglig: https://www.northridgepumps.com/upload/pdfs/North-Ridge-Pump-as-Turbine-English.pdf, Hämtad: 2021-02-21.

[55] C. T. Crowe, D. F. Elger, B. C. Williams och J. A. Roberson, “The energy equation,” i *Engineering Fluid Mechanics*, 9. uppl., New Jersey, USA: John Wiley & Sons, 2010, kap. 7, s. 225.

[56] P. Martinez-Moore, *North Ridge Pumps*, privat kommunikation, Feb.-Maj. 2022.

[57] Y.L. Zhang och Y.J. Zhao, ”The atypical startup characteristics of a pump as turbine,” *Energy Science & Engineering*, vol. 6, nr. 3, Nov. 2021, doi: 10.1002/ese3.1014.

[58] P. Östberg, “Vätgas som energilager: Om vätgasens potential som energibärare i termiska kraftverk,” examensarbete på civilingenjörsnivå, Institutionen för Energivetenskaper, Lunds tekniska högskola och Lunds universitet, Lund, Sverige, 2017. [Online]. Tillgänglig: https://lup.lub.lu.se/luur/download?func=downloadFile&recordOId=8907926&fileOId=8908328, hämtad: 2022-03-31.

[59] Svenska Kraftnät, ”Information om stödtjänster,” 2022. [Online]. Tillgänglig: https://www.svk.se/aktorsportalen/systemdrift-elmarknad/information-om-stodtjanster/ (hämtad: 2022-05-03).

[60] Svenska Kraftnät, ”Balansering av kraftsystemet,” 2021. [Online]. Tillgänglig: https://www.svk.se/om-kraftsystemet/om-systemansvaret/balansering-av-kraftsystemet/ (hämtad: 2022-05-11).

[61] Svenska Kraftnät, ”Frekvenshållningsreserv normaldrift (FCR-N),” 2021. [Online]. Tillgänglig: https://www.svk.se/aktorsportalen/systemdrift-elmarknad/information-om-stodtjanster/fcr-n/ (hämtad: 2022-05-03).

[62] Svenska Kraftnät, ”Frekvenshållningsreserv störning uppreglering (FCR-D upp),” 2021. [Online]. Tillgänglig: https://www.svk.se/aktorsportalen/systemdrift-elmarknad/information-om-stodtjanster/fcr-d-upp/ (hämtad: 2022-05-03).

[63] Svenska Kraftnät, ”Frekvenshållningsreserv störning nedreglering (FCR-D ned),” 2021. [Online]. Tillgänglig: https://www.svk.se/aktorsportalen/systemdrift-elmarknad/information-om-stodtjanster/fcr-d-ned/ (hämtad: 2022-05-03).

[64] Svenska Kraftnät, ”Automatisk frekvensåterställningsreserv (aFRR),” 2022. [Online]. Tillgänglig: https://www.svk.se/aktorsportalen/systemdrift-elmarknad/information-om-stodtjanster/afrr/ (hämtad: 2022-05-03).

[65] Svenska Kraftnät, ”Manuell frekvensåterställningsreserv (mFRR),” 2021. [Online]. Tillgänglig: https://www.svk.se/aktorsportalen/systemdrift-elmarknad/information-om-stodtjanster/mfrr/ (hämtad: 2022-05-03).

[66] European Commission, ”Regulations: Establishing a guideline on electricity transmission system operation,” *Official Journal of the European Union*, Aug. 2017. [Online]. Tillgänglig: https://eur-lex.europa.eu/legal-content/EN/TXT/PDF/?uri=CELEX:32017R1485&from=PL.

[67] ”System development plan 2018-2027: Towards a flexible power system in a changing world,” Svenska Kraftnät, Sundbyberg, Sverige, Nov. 2017. [Online]. https://www.svk.se/siteassets/omoss/rapporter/2018/svenska-kraftnat-system-development-plan-2018-2027.pdf, Hämtad: 2022-05-11.

[68] Engineering ToolBox, “Three-phase electrtical motors – power factor vs. inductive load: Typical motor power factors,” 2004. [Online]. Tillgänglig: https://www.engineeringtoolbox.com/power-factor-electrical-motor-d_654.html (hämtad: 2022-06-14).

[69] K. Lindholm, ”Vattenkraftsproduktion,” *Energiföretagen*, [Online], Apr. 2022. Tillgänglig: https://www.energiforetagen.se/energifakta/elsystemet/produktion/vattenkraft/vattenkraftsproduktion/ (hämtad: 2022-05-27).

[70] P. Chen, “Session 2A: Inertial response and frequency containment process: System need & requirement,” Nov. 2021. [Online]. Tillgänglig: https://chalmers.instructure.com/courses/15942.

[71] “Appendix F: Inertia of rotating elements of PATs and machinery,” i *Humanity Development Library 2.0*. [Online]. Tillgänglig: http://www.nzdl.org/cgi-bin/library, hämtad: 2022-05-04.

[72] Drax, “Keeping the electricity system’s voltage stable.” [Online]. Tillgänglig: https://www.drax.com/power-generation/keeping-electricity-systems-voltage-stable/ (hämtad: 2022-05-12).

[73] Svenska Kraftnät, ”Spänningsstabilitet,” Mar. 2021. [Online]. Tillgänglig: https://www.svk.se/om-kraftsystemet/om-systemansvaret/kraftsystemstabilitet/spanningsstabilitet/ (hämtad: 2022-06-14).

[74] K. Lindholm, Energiforsk, ”Välkommen rapport om stödtjänster från Svenska kraftnät,” 2021. [Online]. Tillgänglig: https://www.energiforetagen.se/medlemsnyheter/2021/oktober/valkommen-rapport-om-stodtjanster-fran-svenska-kraftnat/ (hämtad: 2022-06-14).

[75] P. Chen, ”Session 5A: Voltage regulation by generator excitation,” Dec. 2021. [Online]. Tillgänglig: https://chalmers.instructure.com/courses/15942.

[76] Drax, “The silent force that moves electricity,” 2017. [Online]. Tillgänglig: https://www.drax.com/power-generation/silent-force-moves-electricity/ (hämtad: 2022-05-12).

[77] Statistisk sentralbyrå (Statistics Norway), “Index of labour costs,” *Selected tables and figures from this statistics, Table 1*, Feb. 2022. [Online]. Tillgänglig: https://www.ssb.no/en/arbeid-og-lonn/lonn-og-arbeidskraftkostnader/statistikk/arbeidskraftkostnadsindeks, Hämtad: 2022-04-25.

[78] Statistikmyndigheten (SCB), “Arbetskostnadsindex för tjänstemän, privat sektor (AKI) efter näringsgren SNI 2007. Månad 2008M01-2022M02,” *Arbetskostnadsindex för tjänstemän (preliminärt), privat sektor (AKI), 2008M01=100 efter månad: 2012M03 2022M02*, 2022. [Online]. Tillgänglig: https://www.statistikdatabasen.scb.se/pxweb/sv/ssd/START__AM__AM0301__AM0301A/AKITM07/table/tableViewLayout1/ (hämtad: 2022-05-18).

[79] E.ON Energilösningar, ”Vad är timpris el?,” 2022. [Online]. Tillgänglig: https://www.eon.se/el/elpriser/timpris (hämtad 2022-05-17).

[80] E. Ingebretsen och T. H. Glimsdal Johansen, ”The profitability of pumped hydro storage in Norway,” examensarbete på civilingenjörsnivå, Institutionen för Energi, Naturresurser och Klimat, Norges Handelshøyskole, Bergen, Norge, 2014. [Online]. Tillgänglig: https://openaccess.nhh.no/nhhxmlui/bitstream/handle/11250/221533/Masterthesis.pdf, Hämtad: 2022-05-27.

[81] eVolo, “Water damper tower concept to balance out seismic forces in Taiwan,” 2013. [Online]. Tillgänglig: https://www.evolo.us/water-damper-tower-concept-to-balance-out-seismic-forces-in-taiwan/ (hämtad: 2022-05-25).

[82] M-J-Z Architecture Communication Research, “Water damper towers,” 2013. [Online]. Tillgänglig: https://m-j-z.com/project/waterdampertowers (hämtad: 2022-05-25).

[83] J. Lahey, M. Wolf, R. Klemencic och O. Johansson, “A tale of two cities: Collaborative innovations for sustainable towers,” i *CTBUH 2008 8th World Congress*, Dubai, Förenade Arabemiraten, 2008. [Online]. Tillgänglig: https://global.ctbuh.org/resources/papers/download/1302-a-tale-of-two-cities-collaborative-innovations-for-sustainable-towers.pdf, Hämtad: 2022-05-25.

[84] T. Konar och A. (D.) Ghosh, “Flow dampening devices in tuned liquid damper for structural vibration control: A review,” *Archives of Computational Methods in Engineering*, 28:2195-2207, Jun. 2020, doi: 10.1007/s11831-020-09450-0.

[85] I. Syazwan Ishak, N. Abdul Hamid och N. Mohd Amin, ”Numerical study on various position of multiple water tanks toward earthquake on high-rise building,” i *IOP Conference Series: Materials Science and Engineering*, 2021, doi: 10.1088/1757-899X/1062/1/012033.

[86] “Decibel,” i *Nationalencyklopedin.* [Online]. Tillgänglig: https://www.ne.se/uppslagsverk/encyklopedi/lång/decibel, hämtad: 2022-05-03.

[87] ACS Nordic AB, ”Ljudets dämpning i dB beroende på avståndet,” 2017. [Online]. Tillgänglig: https://www.acsnordic.se/sidor/fakta-om-larmdon/ljudets-dampning-i-db-beroende-pa-avstandet, (hämtad 2022-05-03).

[88] Engineering ToolBox, ”Sound propagation – the inverse square law,” 2005. [Online]. Tillgänglig: https://www.engineeringtoolbox.com/inverse-square-law-d_890.html (hämtad: 2022-05-06).

[89] Arbetsmiljöverket, ”Ljud och akustik,” 2021. [Online]. Tillgänglig: https://www.av.se/inomhusmiljo/ljud-och-akustik/ (hämtad: 2022-05-25).

[90] AllAkustik, ”Så får du bukt med störande ljud från ventilationen,” 2021. [Online]. Tillgänglig: https://www.allakustik.se/kunskapsbank/storande-ljud-fran-ventilationen/ (hämtad: 2022-05-25).

[91] T. Kullberg, ”Ljudmiljön i skolan: om hur lärare kan påverka sin arbetsmiljö,” kandidatuppsats, Institutionen för Utbildningsvetenskap, Södertörns högskola, Stockholm, Sverige, 2008. [Online]. Tillgänglig: http://www.diva-portal.se/smash/get/diva2:15818/FULLTEXT01.pdf.

[92] Folkhälsomyndigheten, ”Hälsoeffekter av buller och höga ljudnivåer,” art.nr. 18070-1, Maj. 2019. [Online]. Tillgänglig: https://www.folkhalsomyndigheten.se/publicerat-material/publikationsarkiv/h/halsoeffekter-av-buller-och-hoga-ljudnivaer/?pub=60532#60536.

[93] K. Persson Waye, M. Smith och M. Ögren, ”Hälsopåverkan av lågfrekvent buller inomhus,” Medicinska institutionen, Göteborgs Universitet; Sahlgrenska Akademin, Göteborg, Sverige, 3:2017, 2017. [Online]. Tillgänglig: https://gupea.ub.gu.se/bitstream/handle/2077/53428/gupea_2077_53428_1.pdf, Hämtad: 2022-05-25.

[94] Q. Si, A. Ali, J. Yuan, I. Fall och F. M. Yasin, ”Flow-induced noises in a centrifugal pump: A review,” *Science of Advanced Materials*, vol. 11, nr. 7:909-924, Jul. 2019, doi: 10.1166/sam.2019.3617.

[95] S. Amares, E. Sujatmika, T. W. Hong, R. Durairaj och H. S. H. B. Hamid, ”A review: Characteristics of noise absorption material,” *Journal of Physics: Conference Series*, nr. 908, 2017, doi: 10.1088/1742-6596/908/1/012005.

[96] Soundproof Cow, ”How soundproof are concrete walls?,” 2021. [Online]. Tillgänglig: https://www.soundproofcow.com/soundproof-concrete-walls/ (hämtad: 2022-05-26).

[97] ”Lundby strand: Göteborg | Bebyggelse.” © Lantmäteriet. [Online]. Tillgänglig: https://minkarta.lantmateriet.se/, Hämtad: 2022-02-17.

[98] “Lista över Göteborgs högsta byggnader: Pågående projekt,” i *Wikipedia*. [Online]. Tillgänglig: https://sv.wikipedia.org/wiki/Lista_över_Göteborgs_högsta_byggnader, Hämtad: 2022-03-01.

[99] I. Santos-Ruiz, ”Moody chart,” i *MathWorks File Exchange*, 2019. [Online]. Tillgänglig: https://se.mathworks.com/matlabcentral/fileexchange/72248-moody-chart, hämtad: 2022-03-27.

[100] Nord Pool Group, ”Day-ahead prices; Table; Hourly,” 2022. [Online]. Tillgänglig: https://www.nordpoolgroup.com/en/Market-data1/Dayahead/Area-Prices/SE/Hourly/ (hämtad: 2022-05-17).

[101] Energiforsk, ”Höga elpriser diskuteras i Ekonomibyrån,” 2021. [Online]. Tillgänglig: https://energiforsk.se/nyhetsarkiv/hoga-elpriser-diskuteras-i-ekonomibyran/ (hämtad: 2022-06-15).

[102] G. Hillhouse, Practical Engineering, ”The most mindblowing infrastructure in my city,” *YouTube*, 25 mar. 2022. [Video]. Tillgänglig: https://www.youtube.com/watch?v=Y_729CQdG50.

[103] C.R. Rasi, B.N. Meghana, N. Likhitha och K. Rajesh, ”Generation of electricity using sand,” *International Journal of Engineering Research and Advanced Technology (IJERAT)*, vol. 4, nr. 9, ss. 37-41, Sep. 2018, doi: 10.31695/IJERAT.2018.3324.

[104] Sand power electricity generation device, av S. Songquan, Z. Xinliang och F. Rufeng (2014, pausad). CN103498772A [Online]. Tillgänglig: https://patents.google.com/patent/CN103498772A/en.

[105] S. A. Paipetis och M. Ceccarelli, *The Genius of Archimedes – 23 Centuries of Influence on Mathematics, Science and Engineering: Proceedings of an International Conference held at Syracuse, Italy, June 8-10, 2010*, History of mechanism and machine science, vol. 11, H. Kerle, K. Mauersberger, Red., Dordrecht, Nederländerna; Hiedelberg, Tyskland; London, Storbritannien; New York, USA: Springer Science+Business Media, 2010, kap. 2, ss. 163-176. [Online]. Tillgänglig: https://link-springer-com.proxy.lib.chalmers.se/content/pdf/10.1007%2F978-90-481-9091-1.pdf, Hämtad: 2022-02-10.

[106] C. Rorres, ”The turn of the screw: Optimal design of an Archimedes screw,” *Journal of hydraulic engineering*, Jan. 2000. [Online]. Tillgänglig: https://www.cs.drexel.edu/~crorres/screw/screw.pdf, hämtad: 2022-05-06.

[107] ”Arkimedesskruv”, i *Nationalencyklopedin*. [Online]. Tillgänglig: https://www.ne.se/uppslagsverk/encyklopedi/lång/arkimedesskruv, Hämtad: 2022-02-10.

[108] O. Andersson, ”Utvärdering av småskaligt vattenkraftverk baserat på principen om Arkimedes skruv,” examensarbete på högskoleingenjörsnivå, Institutionen för naturvetenskap och teknik, Örebro universitet, Örebro, Sverige, 2020. [Online]. Tillgänglig: http://www.diva-portal.org/smash/get/diva2:1479285/FULLTEXT01.pdf.

[109] Tsurumi Pump, ”Sandtagspumpar & slurrypumpar,” 2022. [Online]. Tillgänglig: https://www.tsurumi.eu/sv-SE/entreprenadpumpar/sandtagspumpar-slurrypumpar-514 (hämtad: 2022-02-04).

[110] H. Bernlo, *Tsurumi-Intec Pump AB*, privat kommunikation, Feb. 8, 2022.

[111] J. Persson, K. Fridell, E.-L. Gustafsson, och J.-E. Englund, “Att räkna på vatten: en formelsamling för landskapsingenjörer,” Sveriges lantbruksuniversitet (SLU), Alnarp, Sverige, Landskapsarkitektur: Trädgård Växtproduktionsvetenskap, nr. 17, 2014. [Online]. Tillgänglig: https://pub.epsilon.slu.se/11781/11/persson_j_etal_150203.pdf, Hämtad: 2022-03-23.

[112] ”Prantdl-Nikuradse-Colebrooks formel,” i *Wikipedia*. [Online]. Tillgänglig: https://sv.wikipedia.org/wiki/Prandtl-Nikuradse-Colebrooks_formel, Hämtad: 2022-04-03.

[113] M. Hutson, ”The renewable-energy revolution will need renewable storage: Can gravity, pressure, and other elemental forces save us from becoming a battery-powered civilization?,” *The New Yorker*, Apr. 18, 2022. [Online]. Tillgänglig: https://www.newyorker.com/magazine/2022/04/25/the-renewable-energy-revolution-will-need-renewable-storage, Hämtad: 2022-05-06.

[114] M. Beeck, ”Bill Gates backar ny sorts vattenkraft,” *Dagens PS*, Apr. 26, 2022. [Online]. Tillgänglig: https://www.dagensps.se/hallbarhet/bill-gates-backar-ny-sorts-vattenkraft/, Hämtad: 2022-05-06.

[115] Molnsätra Gård, ”Vanliga frågor.” [Online]. Tillgänglig: https://molnsatra.se/vanliga_fragor (hämtad: 2022-02-07).

[116] R. Jones, ”Monmouth New Hydro Scheme,” 2009. [Elektronisk bild]. Tillgänglig: https://www.geograph.org.uk/photo/1538784, Hämtad: 2022-02-10.

Figurerna 1, 2, 3, 4, 8, 9, 10, 11 och 24 samt omslagsbilden är skapade av författaren och licensierade enligt Creative Commons BY-NC-ND-licens.

För att se en kopia av licensen, besök http://creativecommons.org/licenses/by-nc-nd/2.5/se eller skicka ett brev till Creative Commons, PO Box 1866, Mountain View, CA 94042, USA.

Appendix

I. Tabellvärden för spotpriser

De ekonomiska kalkylerna baserades på den spotprisstatistik från Nord Pool som presenteras i tabell 15.

Tabell 15.

Elpriset per megawattimme i de svenska elområdena SE1-SE4 klockan 23:00-07:00 och 08:00-16:00 de två dygnen 28 februari-1 mars 2022 och 15-16 maj 2022. Från [100].

		Elpris [SEK/MWh]			
Datum	**Klockslag**	**SE1**	**SE2**	**SE3**	**SE4**
28 feb – 1 mar 2022	23:00	146,42	146,42	146,42	746,29
	00:00	145,03	145,03	145,03	145,03
	01:00	143,54	143,54	143,54	143,54
	02:00	142,16	142,16	142,16	142,16
	03:00	141,63	141,63	141,63	141,63
	04:00	143,65	143,65	143,65	143,65
	05:00	143,22	143,22	358,01	358,01
	06:00	145,98	145,98	1072,96	1805,22
	08:00	149,59	149,59	1662,21	2643,66
	09:00	150,87	150,87	1606,37	1606,37
	10:00	151,93	151,93	1539,05	1539,05
	11:00	152,99	152,99	1303,57	1303,57
	12:00	153,10	153,10	1257,81	1257,81
	13:00	152,67	152,67	1257,81	1257,81
	14:00	151,51	151,51	1322,15	1322,15
	15:00	148,21	148,21	1420,57	1420,57
15 – 16 maj 2022	23:00	74,45	74,45	734,16	734,16
	00:00	76,87	76,87	76,87	76,87
	01:00	71,10	71,10	71,10	71,10
	02:00	64,70	64,70	64,70	64,70
	03:00	68,48	68,48	68,48	68,48
	04:00	76,55	76,55	76,55	76,55
	05:00	89,14	89,14	838,92	838,92
	06:00	78,23	78,23	1459,82	2353,48
	08:00	121,01	121,01	1928,26	2569,82
	09:00	119,86	119,86	1921,86	2365,02
	10:00	111,16	111,16	1922,91	1922,91
	11:00	117,66	117,66	1924,48	1924,48
	12:00	106,44	106,44	1887,15	1896,90
	13:00	109,37	109,37	1505,44	1505,44
	14:00	107,91	107,91	1420,81	1420,81
	15:00	105,39	105,39	1527,04	1906,34

II. Grafer för lagringskapacitet och verkningsgrad (PSH)

I Fig. 20 presenteras lagringskapaciteten för den modell som introducerades i avsnitt 3.1.

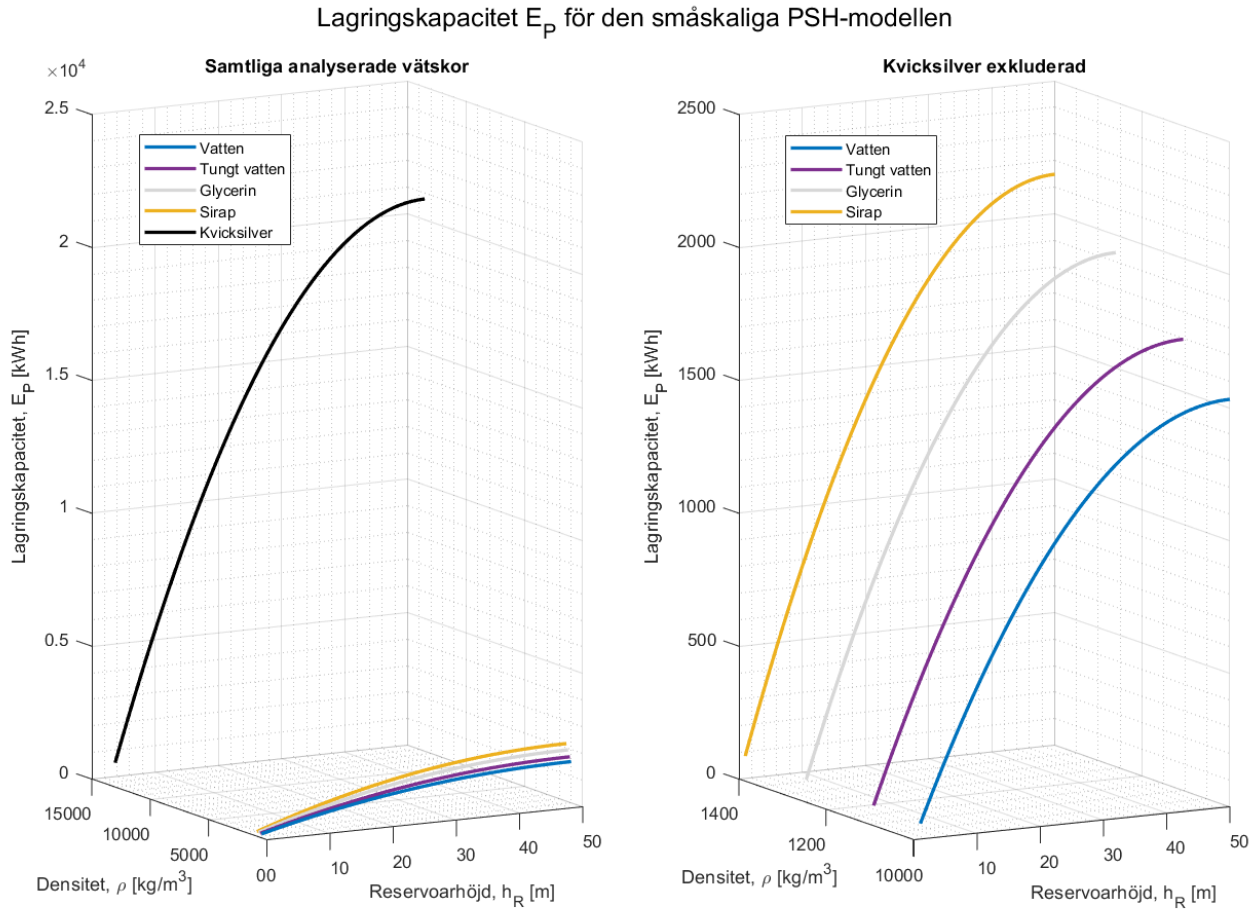

Fig. 20. Lagringskapacitet i form av potentiell energi uttryckt i kWh hos den småskaliga pumpkraftsmodellen, för de fem studerade vätskeämnena och för reservoarhöjder mellan 0 och 50 meter. Eftersom grafen för kvicksilver är markant olikartad övriga grafer visas även ett diagram med kvicksilvret uteslutet, för att göra förhållandet emellan de resterande ämnena urskiljbart.

Modellens round-trip verkningsgrader presenteras i Fig. 21.

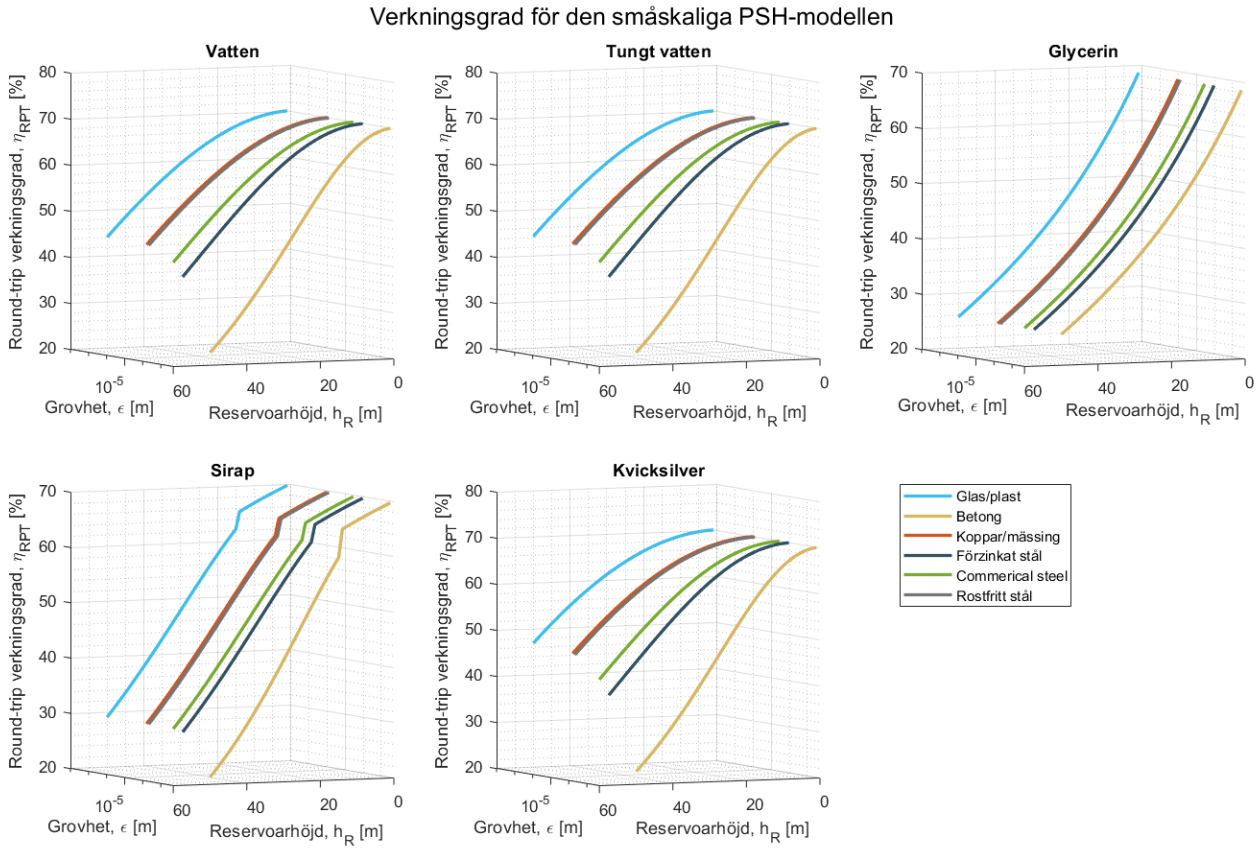

Fig. 21. Round-trip verkningsgrad för PSH-modellen vid olika val av apparaturmaterial samt för reservoarhöjder mellan 0 och 50 meter.

III. Grafer för Reynoldstal (PSH)

I vilken utsträckning som turbulenta flöden uppstår i modellen redogörs i Fig. 22.

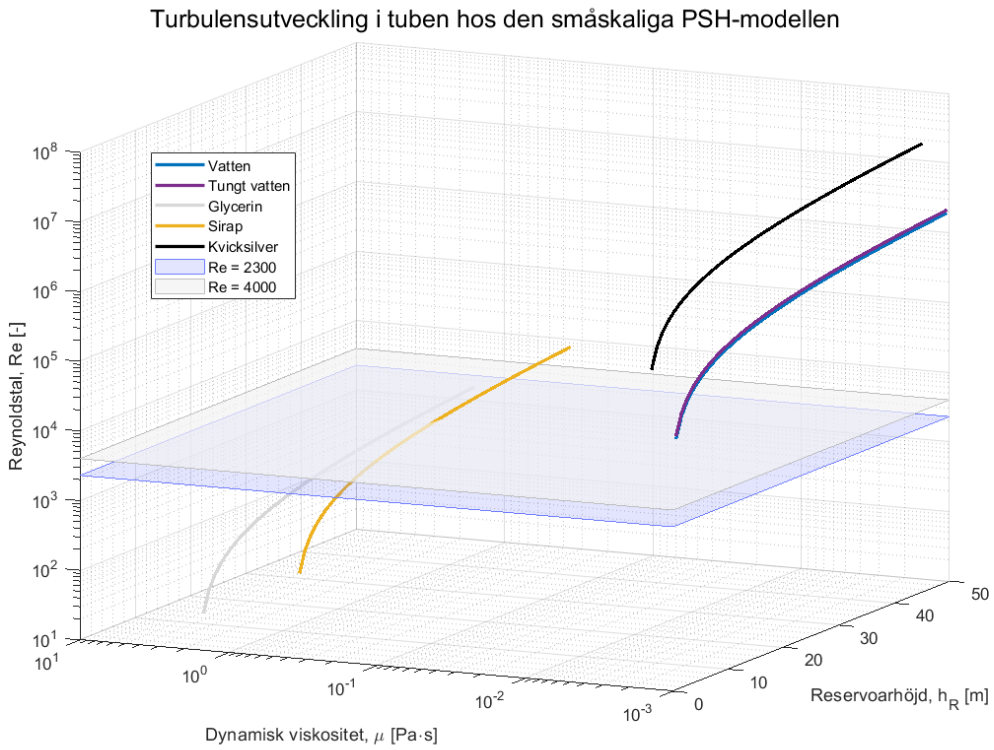

Fig. 22. Reynoldstal i PSH-modellens tub vid tillämpande av de olika medieämnena för reservoarshöjder mellan 0 och 50 meter, samt plan markerande gränsen för laminärt respektive fullt utvecklat turbulent flöde.

IV. Sekundära vattensystem

Vattentorn tillhörande dricksvattendistributionen respektive återvunnet vatten i San Antonio, USA, ses nedan i Fig. 23.

Fig. 23. Tvillingvattentorn vid Östra Hildebrand-avenyn i San Antonio, USA. Tornen tillhör olika distributionssystem, dels för dricksvatten, dels för återvunnet vatten. Från [102]. Återgiven med tillstånd.

V. Granulära material och AST

I tabell 16 finns densiteterna för två granulära material angivna.

Tabell 16.
Genomsnittlig densitet för två granulära material. Från [115].

Material	Densitet [kg/dm³]
Sand	1,6
Jord	1,2

Arkimedesskruvens princip illustreras i Fig. 24.

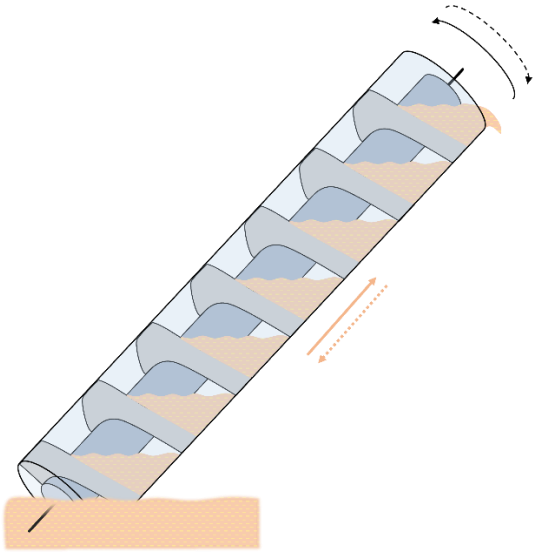

Fig. 24. Arkimedesskruvens princip. Figuren visar det utförande vars vinkel mot sandytan är den trubbigaste möjliga, 45°, eftersom sanden inuti skruven glider rakt genom hela skruven vid större vinklar. CC BY-NC-ND.

Ett exempel på en befintlig AST-anläggning visas i Fig. 25 .

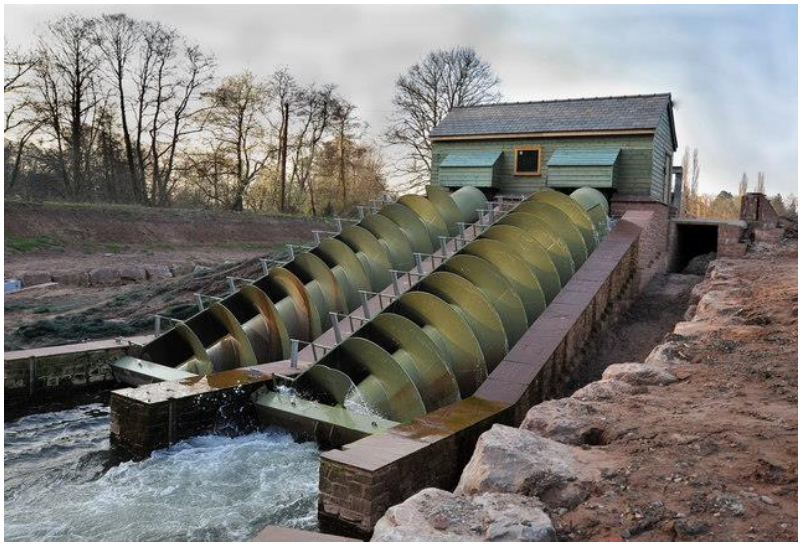

Fig. 25. Befintlig dubbel AST utanför Monmouth, Wales, producerande 150 kW vid dess låga rotationshastighet 20 rpm. Från [116], CC BY-SA.

INSTITUTIONEN FÖR ELEKTROTEKNIK
CHALMERS TEKNISKA HÖGSKOLA
Göteborg, Sverige 2022
www.chalmers.se

CHALMERS