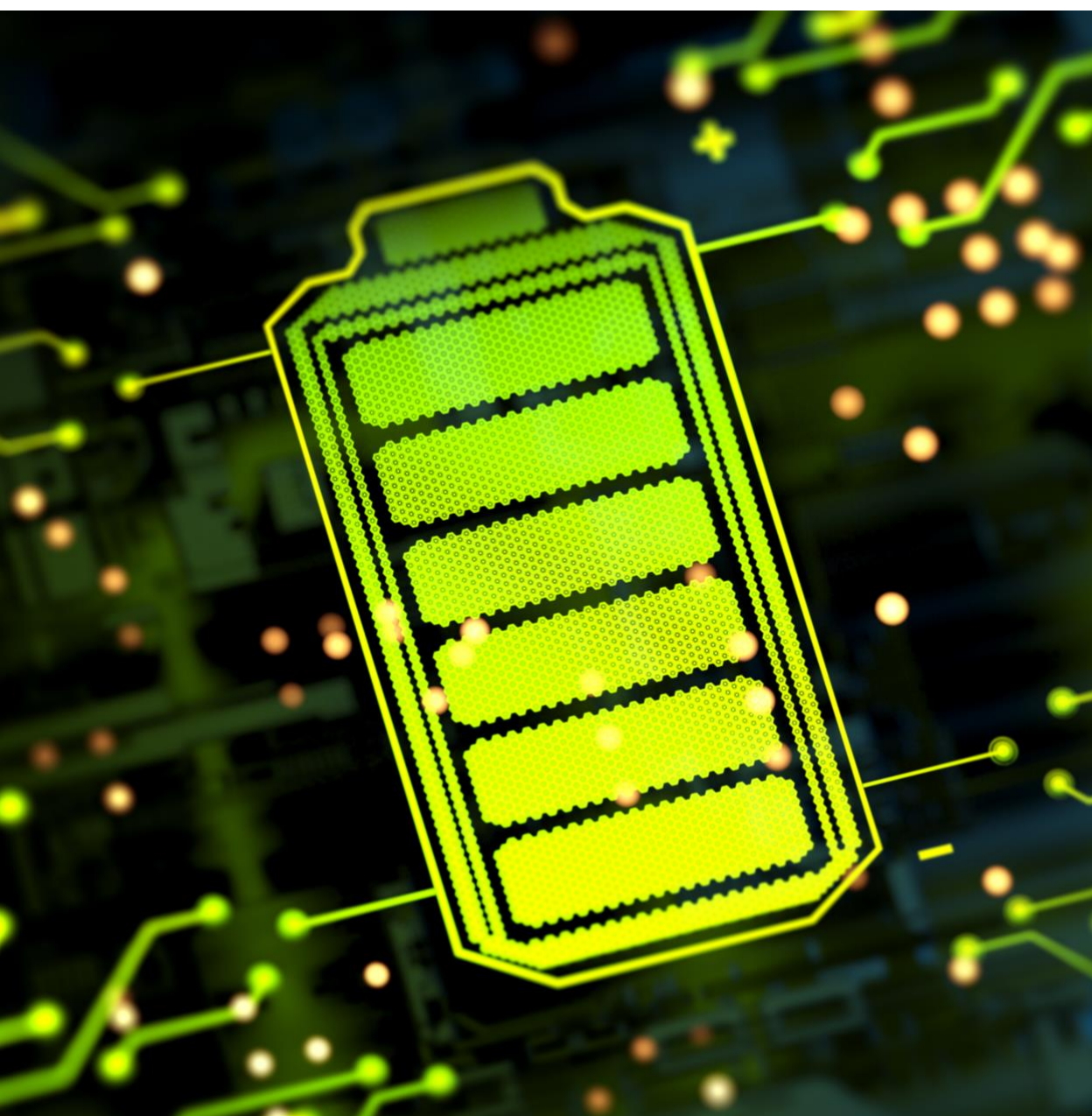


Energilager i massa- och pappersbruk för ökad flexibilitet på elmarknaden

RAPPORT 2026:1220



Energilager i massa- och pappersbruk för ökad flexibilitet på elmarknaden

Niklas Berglin, Anna von Schenck, Hilda Wallström, Maria Kolte,
Theodor Ingman
SWECO

ISBN 978-91-89917-63-7 | © Energiforsk oktober 2026
Energiforsk AB | Telefon: 08-677 25 30
E-post: kontakt@energiforsk.se | www.energiforsk.se

Innehållsförteckning

Förord	5
Sammanfattning	7
Summary	9
1. Introduktion	11
1.1 Bakgrund	11
1.2 Syfte och mål	12
1.3 Genomförande	12
Teknik	12
Marknad	12
Ekonomi	12
1.4 Metodik	13
2. Tekniska möjligheter för energilagring	14
2.1 Beskrivning av olika typer av energilager	14
2.1.1 Mekaniska energilager	14
2.1.2 Elektrokemiska energilager	14
2.1.3 Elektriska energilager	15
2.1.4 Kemiska energilager	15
2.1.5 Termiska energilager	16
2.1.6 Interna lager av mellanprodukter	18
2.2 Intervjuer med leverantörer	18
2.2.1 Energynest	18
2.2.2 Kyoto Group	19
2.2.3 Bosch	20
2.2.4 Spirax Sarco	21
2.2.5 Parat Halvorsen	23
3. El- och kraftmarknader för energilager	24
3.1 Elmarknader	24
3.1.1 Stora förändringar av marknadsdesign senaste åren	24
3.1.2 Nyttor som energilager kan skapa	25
3.2 Stödtjänstmarknader	26
3.2.1 Nyttor som energilager kan skapa	27
3.2.2 Framtida utveckling av stödtjänstmarknader	28
4. Screening	29
4.1 Kemiskt avsalubruk	29
4.2 Kemiskt integrerat bruk	30
4.3 Mekaniskt integrerat bruk	31
5. Lönsamhetsbedömning för två typiska fall	34
5.1 Definition av de två fallen	34
5.1.1 Batterilager – kemiskt integrerat kartongbruk	34
5.1.2 Termiskt energilager – mekaniskt integrerat bruk	34
5.2 Modelleringsinputs och antaganden	35
3 ENERGILAGER I MASSA- OCH PAPPERSBRUK FÖR ÖKAD FLEXIBILITET PÅ ELMARKNADEN	

5.3 Resultat av modellering.....	38
5.3.1 Batterilager – kemiskt integrerat bruk	38
5.3.2 Termiskt lager – mekaniskt integrerat bruk	41
6. Slutsatser	46
6.1 Bedömning av möjligheter till lönsamhet med energilager	46
6.2 Bedömning av möjligheter med olika typer av energilager	47
6.3 Fortsatt arbete	47
Referenser.....	49

Förord

Massa- och pappersindustrin använder mycket el och har sammanlänkade processer som gör det svårt att anpassa förbrukningen efter elpris och tillgång. Samtidigt kan industrins omfattning och kontinuerliga drift ge ett betydande bidrag till flexibiliteten i elsystemet och på stödtjänstmarknaderna.

Syftet med det här projektet har varit att undersöka hur olika typer av energilager kan användas i massa- och pappersbruk för att öka den operativa flexibiliteten, minska elkostnader och skapa nya intäktsmöjligheter på el- och stödtjänstmarknaderna.

Lönsamhetsanalysen har gjorts med historiska prisdata timupplöst över ett år. Viktigt att notera är att under 2025 var prissättningen av flera stödtjänster extremt höga. Orsaken till höga stödtjänster har inte analyserats i rapporten men det finns skäl att tro att övergång till 15-min och introduktionen av nya produkter på stödtjänstmarknaden begränsat utbudet och lett till höga priser.

Elområde (SE3) har använts i analysen och andra faktorer (annat elområde, annat regionnät, framtida prisutveckling) har behandlats i en känslighetsanalys.

Rapporten behandlar ett brett spektrum av energilager, inklusive batterilager, termiska energilager och interna lager av mellanprodukter i processen. Analysen visar att särskilt batterilager och termiska energilager framstår som relevanta alternativ för kort- till medellång flexibilitet i dagens marknadsdesign.

Projektet har utförts av Niklas Berglin, Anna von Schenck, Hilda Wallström, Maria Kolte och Theodor Ingman på SWECO på uppdrag av Skogsindustriella programmet på Energiforsk.

Här redovisas resultat och slutsatser från ett projekt inom ett forskningsprogram som drivs av Energiforsk. Det är rapportförfattaren/-författarna som ansvarar för innehållet.

Oktober 2026
Skogsindustriella programmet

Marie Kofod-Hansen
Programansvarig

Sammanfattning

Den snabba omställningen av elsystemet, med ökad andel väderberoende elproduktion och tilltagande elektrifiering av industri och transporter, har lett till ökad prisvolatilitet och ett växande behov av flexibilitet. Tillfälliga obalanser i elsystemet hanteras via marknader för stödtjänster som syftar till att upprätthålla och återställa frekvensen och innefattar flera tjänster med olika krav på kapacitet, responstid och uthållighet.

Massa- och pappersindustrin är en av de mest el- och energikrävande industrigrenarna i Sverige och har samtidigt processer som i många fall är starkt integrerade. Detta begränsar möjligheten att anpassa elanvändningen efter elpris och tillgänglighet i kraftsystemet. Samtidigt innebär industrins storlek och kontinuerliga drift att den har potential att bidra med betydande flexibilitetsresurser till el- och stödtjänstmarknaderna.

Syftet med denna studie är att undersöka hur olika typer av energilager kan användas i massa- och pappersbruk för att öka den operativa flexibiliteten, minska elkostnader och skapa nya intäktsmöjligheter på el- och stödtjänstmarknaderna. Studien omfattar en genomgång av tekniska lösningar för energilagring, en analys av relevanta marknader samt en kvalitativ screening av vilka kombinationer av lagringstekniker och fabrikstyper som bedöms mest lovande ur ett system- och bruksperspektiv.

Rapporten behandlar ett brett spektrum av energilager, inklusive batterilager, termiska energilager och interna lager av mellanprodukter i processen. Analysen visar att särskilt batterilager och termiska energilager framstår som relevanta alternativ för kort- till medellång flexibilitet i dagens marknadsdesign. Batterilager erbjuder kort responstid och lämpar sig väl för deltagande på stödtjänstmarknader, medan termiska energilager är särskilt intressanta i bruk där ång- och elbalanser är starkt kopplade, exempelvis bruk där pappersproduktionen är integrerad med mekanisk produktion av massa.

Utifrån den kvalitativa screeningen har två typfall valts ut för fördjupad analys:

- ett batterilager i ett kemiskt massabruk med integrerad kartongproduktion
- ett termiskt energilager i ett mekaniskt massabruk med integrerad pappersproduktion

Fallen representerar olika tekniska och marknadsmässiga förutsättningar samt olika sätt att skapa flexibilitet, antingen genom elektrisk energilagring eller genom frikoppling av el- och ångproduktion.

Lönsamhetsanalysen av de två typfallen inkluderar investering, kostnader för drift och underhåll, intäkter från energiförflyttning och deltagande på stödtjänstmarknader, samt bedömning av lönsamhet och känslighet för centrala antaganden. Den visar att:

- För kemiska integrerade bruk som är nettokonsumenter av el kan batterilager skapa betydande intäkter, främst genom deltagande på stödtjänstmarknader vilket baserat på historiska prisnivåer resulterar i god lönsamhet, men även genom lastförflyttning som bidrar till reducerade elhandelkostnader. Med justerade prisnivåer sjunker lönsamheten något, om än fortsatt på relativt höga nivåer.
- För mekaniska integrerade bruk möjliggör termiska energilager flexibilitet utan att massaproduktionen påverkas. Genom både lastförflyttning av elförbrukning och deltagande på stödtjänstmarknader skapas ökade intäkter, men lönsamheten är låg med de förutsättningar som antagits.

Sammantaget visar studien att energilager kan utgöra ett viktigt verktyg för att öka flexibiliteten i massa- och pappersindustrin och samtidigt bidra till ett mer robust och kostnadseffektivt elsystem. Förutsättningarna för lönsamhet varierar dock kraftigt mellan olika brukstyper, tekniska lösningar och marknadsförutsättningar, vilket understryker behovet av plats- och processspecifika analyser inför eventuella framtida investeringsbeslut.

Summary

The rapid transition of the electricity system, with a growing share of weather-dependent generation and increasing electrification of industry and transport, has led to greater price volatility and a rising need for flexibility. Temporary imbalances in the power system are managed through ancillary service markets aimed at maintaining and restoring frequency, and these include several services with different requirements for capacity, response time, and duration.

The pulp and paper industry is one of the most electricity- and energy-intensive industrial sectors in Sweden and, at the same time, consists of processes that are in many cases highly integrated. This limits the ability to adjust electricity use in response to electricity prices and availability in the power system. At the same time, the industry's size and continuous operation mean that it has the potential to contribute significant flexibility resources to the electricity and ancillary service markets.

The aim of this study is to investigate how different types of energy storage can be used in pulp and paper mills to increase operational flexibility, reduce electricity costs, and create new revenue opportunities in the electricity and ancillary service markets. The study includes a review of technical energy storage solutions, an analysis of relevant markets, and a qualitative screening of which combinations of storage technologies and mill types are considered most promising from a system and mill perspective.

The report addresses a broad range of energy storage options, including battery storage, thermal energy storage, and internal storage of intermediate products in the process. The analysis shows that battery storage and thermal energy storage in particular appear to be relevant options for short- to medium-term flexibility under today's market design. Battery storage offers fast response times and is well suited for participation in ancillary service markets, while thermal energy storage is especially interesting in mills where steam and electricity balances are closely linked, for example mills where paper production is integrated with mechanical pulp production.

Based on the qualitative screening, two representative cases were selected for in-depth analysis:

- a battery storage system in a chemical pulp mill with integrated board production
- a thermal energy storage system in a mechanical pulp mill with integrated paper production

These cases represent different technical and market conditions, as well as different ways of creating flexibility, either through electrical energy storage or through decoupling electricity and steam production.

The profitability analysis of the two representative cases includes investment, operation and maintenance costs, revenues from load shifting and participation

in ancillary service markets, as well as an assessment of profitability and sensitivity to key assumptions. It shows that:

- For chemical integrated mills that are net consumers of electricity, battery storage can generate significant revenues, mainly through participation in ancillary service markets, which based on historical price levels results in strong profitability, but also through load shifting that reduces electricity trading costs. With adjusted price levels, profitability decreases somewhat, though remains at relatively high levels.
- For mechanical integrated mills, thermal energy storage enables flexibility without affecting pulp production. Through both load shifting of electricity consumption and participation in ancillary service markets, increased revenues are created, but profitability is low under the assumptions used.

Overall, the study shows that energy storage can be an important tool for increasing flexibility in the pulp and paper industry while also contributing to a more robust and cost-effective electricity system. However, the conditions for profitability vary substantially between different mill types, technical solutions, and market conditions, which underlines the need for site- and process-specific analyses before any future investment decisions.

1. Introduktion

1.1 Bakgrund

Vi står inför en utbyggnad av elsystemet för att klara bland annat nya behov inom industrin och inom transportsektorn. Större andel vindkraft och solenergi innebär utmaningar i att balansera elsystemet vilket bland annat visar sig i kraftiga svängningar i elpriserna och ett ökat behov av nätkapacitet. En påtaglig effekt är att det sker snabb ökning av det vi med ett samlingsnamn brukar kalla ”efterfrågefleksibilitet” eller ”priskänslighet”. Särskilt påtaglig är den snabba ökningen av styrbar kundfleksibilitet. Drivkraften har, förutom elpriserna, varit utveckling på IT-området som möjliggör styrning och aggregering av flera anläggningar. Dessutom har det lanserats flera nya marknader för stödtjänster de senaste åren, vilket har skapat ökade ekonomiska incitament för flexibla resurser att erbjuda balanserande tjänster genom att buda in på dessa marknader. Stödtjänsterna syftar till att upprätthålla och återställa frekvensen i elsystemet och innefattar flera tjänster med olika krav på kapacitet, responstid och uthållighet.

Genom en mer flexibel förbrukning anpassad till tillgången på elproduktion och nätkapacitet skapas förutsättningar för ett billigare, mer leveranssäkert och miljövänligare elsystem. Energilager är en viktig resurs för att möjliggöra detta och kan leverera flera nyttor beroende på användningsområde, från besparingar av energikostnader, minskade effektoppar och nya intäktskällor, till ökad driftsäkerhet och ökad resiliens mot förändrade elpriser. Som exempel, så har de senaste årens prisutveckling på batterier gjort dem till en mer attraktiv lösning för storskalig energilagring och för att skapa flexibilitet i elsystemet. Termiska lager med hetvatten är vanliga både i fjärrvärmesystem och i industrin, men har hittills använts endast i begränsad omfattning för att leverera stödtjänster.

Några Energiforsk-projekt har undersökt möjligheterna¹²³, men då mest ur elnätsägarnas perspektiv. Massa- och pappersindustrin är en viktig aktör nationellt och regionalt med både stor elkonsumtion och elproduktion. Förutsättningarna skiljer sig dock mellan olika typer av bruk och i vilket elområde verksamheten bedrivs. Därför kan det finnas olika möjligheter för integrering av energilager med olika typer av nyttor för de olika bruken. Några fallstudier vid bruk har gjorts med fokus på stödtjänstmarknaderna^{4 5}.

¹ Olsson, David och Lars Olsson, *Metodik för flexibilitet i elnäten*, rapport 2025:1088, Energiforsk, 2025.
<https://energiforsk.se/media/34120/2025-1088-metodik-for-flexibilitet-i-elneten.pdf>, hämtad 12 juni 2026.

² Energiforsk, *Baselinemetoder för flexibilitetsprodukter*, rapport 2021:826, Energiforsk, april 2022.
<https://energiforsk.se/media/31177/baselinemetoder-for-flexibilitetsprodukter-energiforskrapport-2021-826.pdf>, hämtad 12 juni 2026.

³ Amna Abdulrahim m.fl., *Batterilager och flexibilitet*, rapport 2025:1072, Energiforsk, 2025,
<https://energiforsk.se/media/34019/2025-1072-batterilager-och-flexibilitet.pdf>, hämtad 12 juni 2026.

⁴ Alice R. Thörnblom & Hilda Wallström, *Analys och utveckling av energinyckeltal för anpassning till elförbrukningsflexibilitet inom massa- och pappersindustrin*, 2024

⁵ David Öberg och Robin Rosendal, *Ekonomisk potential för energilagring med batterisystem inom massa- och pappersindustrin*, examensarbete, Linköpings universitet, 2025, <https://www.diva-portal.org/smash/get/diva2:1969199/FULLTEXT01.pdf>

1.2 Syfte och mål

Syftet med projektet har varit att fördjupa förståelsen och öka kunskapen om potentialen för användning av energilager inom massa- och pappersindustrin och vilka nyttor de kan skapa för olika typer av bruk via ökad flexibilitet på elmarknaden.

Studien har haft två mål:

- Ökad förståelse av olika möjligheter för massa- och pappersproducenter att integrera interna energilager och batterier.
- Bedömning av möjlig lönsamhet med energilager för typiska massa- och pappersbruk via ökad flexibilitet på elmarknaden.

Andra nyttor än flexibilitet på elmarknaden (t ex mot fjärrvärmenät) har inte undersökts i den här studien.

1.3 Genomförande

Studien har utrett möjligheterna för energilager inom massa- och pappersindustrin, med fokus på nyttor kopplade till elmarknaden. Analysen har genomförts dels som en kvalitativ studie för att ge en överblick av vilka nyttor som troligt kan uppnås, dels med att kvantifiera möjlig lönsamhet för några typiska fall. Studien har genomförts i tre huvudsakliga delar:

Teknik

- Genomgång av vilka teknologier som används för energilager idag (t ex, termiska lager, batterilager, interna lager av mellanprodukter, vätgas)
- Erfarenheter och hur utvecklingen kan se ut i ett tioårsperspektiv.

Marknad

- Redogörelse för olika kostnadskomponenter:
 - Investeringskostnader, driftkostnader, nätkostnader, etc.
- Redogörelse för olika nyttor och möjliga intäktskällor:
 - Elprisarbitrage, reservkraft, reducerade nätkostnader och obalanskostnader, m.m.
 - Stödtjänstmarknader, t ex snabb frekvensreglering (FFR, FCR) och reglerkraft (FRR)
 - Bedömning av möjliga framtida tjänster som diskuteras idag
- Screening av vilka av dessa nyttor som troligast kan nås med energilager i olika typer av bruk

Ekonomi

- Analys av möjlig lönsamhet för energilager för ett par kombinationer av typer av massa- och pappersbruk (se metodik nedan) och energilagringstekniker, baserat på de möjliga nyttor som identifierats i screeningstudien.

1.4 Metodik

Analysen har inkluderat tre olika typer av bruk med tydligt olika energibalanser:

- Kemiskt massabruk för avsalu, nettosäljare av el
- Kemiskt massabruk med integrerad produktion av kartong, nettoköpare av el
- Mekaniskt massabruk med integrerad produktion av papper, nettoköpare av el

Dessa typer av bruk är aktiva på elmarknaderna och till viss del på stödtjänstmarknaderna idag.

Screeningen har genomförts som en enkel SWOT-analys med syfte att lyfta fram styrkor och svagheter för energilager i olika typer av bruk och välja några nyttor att utvärdera kvantitativt i lönsamhetsanalysen.

Lönsamhetsanalysen har gjorts med historiska prisdata timupplöst över ett år. Vi har använt ett elområde (SE3) i analysen och diskuterat andra faktorer (annat elområde, annat regionnät, framtida prisutveckling) i en känslighetsanalys.

2. Tekniska möjligheter för energilagring

Tekniker för energilagring kan kategoriseras utifrån energins lagringsform. Detta resulterar i fem huvudkategorier, vilka framgår i Tabell 1.

Tabell 1. Kategorisering av tekniker för energilagring⁶

Mekanisk (MESS)	Elektrokemisk (ECESS)	Elektrisk (EESS)	Kemisk (CESS)	Termisk (TESS)
Pumpkraft	Batterier	Kondensatorer	Vätgas	Sensibel värmelagring
Tryckluft	Flödesbatterier	Superkondensatorer	Ammoniak	Latent värmelagring
Svänghjul		Supraledande magnetisk lagring	Biobränslen	Termokemisk lagring

2.1 Beskrivning av olika typer av energilager

2.1.1 Mekaniska energilager

Mekanisk energilagring innebär att energi lagras i form av rörelseenergi eller lägesenergi och omvandlas tillbaka till elektrisk energi vid behov⁷. Tekniken omfattar bland annat pumpkraftverk, tryckluftslagring (CAES) och svänghjul. Gemensamt för dessa lösningar är att de bygger på väl etablerade fysikaliska principer och ofta kännetecknas av lång livslängd och hög tillförlitlighet. Pumpkraftverk är den mest mogna och storskaliga formen av mekanisk energilagring och används främst för energibalans och effektutjämning i elsystemet. Tryckluftslagring lagrar energi genom att komprimera luft i underjordiska reservoarer, medan svänghjul lagrar energi som rotationsrörelse. Inom industrisektorn är tillämpbarheten för mekanisk energilagring ofta begränsad. Pumpkraftverk och tryckluftslagring kräver stora geografiska förutsättningar och omfattande investeringar, vilket gör dem svåra att integrera på eller i direkt anslutning till industriella anläggningar. Svänghjul kan i vissa fall användas för mycket snabba och kortvariga effektbehov, exempelvis för spännings- eller frekvensstabilisering, men lämpar sig generellt inte för lagring av större energimängder i industriella processer.

2.1.2 Elektrokemiska energilager

Inom elektrokemiska energilager lagras energi genom reversibla kemiska reaktioner, där kemikalier omvandlas till elektrisk energi och vice versa⁸. Denna lagringsteknik utgör grunden för olika typer av batterier. Det finns ett brett utbud av batterier, vilka lämpar sig till olika applikationer beroende på

⁶ A. K. Verma, S. K. Singh, R. K. Pachauri och A. K. Gupta, *A comprehensive review of energy storage systems and their applications*, Energy Storage Reports, vol. 6, 2024, artikel nr 101482, <https://doi.org/10.1016/j.esr.2024.101482>

⁷ Elsevier, *Mechanical Energy Storage*, ScienceDirect Topics, available at: <https://www.sciencedirect.com/topics/engineering/mechanical-energy-storage> (accessed 10 April 2026).

⁸ A. S. Aneke och M. Wang, *Energy storage technologies and real-life applications – A state of the art review*, Renewable and Sustainable Energy Reviews, vol. 67, 2017, s. 797–814, <https://doi.org/10.1016/j.rser.2016.11.102>

krav på energitäthet, effekt, livslängd och kostnad. Kategorisering görs vanligtvis baserat på de material som används i elektroderna där de elektrokemiska reaktionerna sker, samt typen av elektrolyt som separerar elektroderna och möjliggör jontransport mellan dem. Litiumjonbatterier är i dagsläget den dominerande tekniken för batteribaserade energilagringssystem (BESS).

Tabell 2. Batteritekniker för energilagring, indelade efter kategori

Litiumbaserade batterier	Natriumbaserade batterier	Metallbaserade batterier	Nickelbaserade batterier
Lithium-ion	Sodium-sulfur	Lead-acid	Nickel-cadmium
Lithium-oxygen (Li-air)	Sodium-nickel chloride	Aluminum-ion	Nickel-metal hydride
Lithium cobalt oxide	Sodium-ion	Copper-zinc	
Lithium manganese oxide		Lead-antimony liquid metal	
Lithium nickel manganese		Metal-air	
Lithium iron phosphate			
Lithium titanate			

2.1.3 Elektriska energilager

Elektriska energilager, såsom kondensatorer, superkondensatorer och supraledande magnetisk energilagring (SMES), lagrar energi i elektriska eller magnetiska fält. Den huvudsakliga tekniken inom denna kategori är superkondensatorer, vilka har hög effekttäthet och lång livslängd men relativt låg energitäthet jämfört med elektrokemiska lagringssystem såsom batterier. Energilagringsegenskaperna påverkas av de ingående komponenterna och deras fysikalisk-kemiska egenskaper, såsom typen av elektrodmaterial, porositet, yta, och ledningsförmåga⁹.

Elektriska energilager kännetecknas av mycket snabba laddnings- och urladdningsförlopp och lämpar sig därför särskilt väl för applikationer som kräver snabb respons, exempelvis utjämning av kortvariga effekttoppar, spänningsstabilisering och stöd vid transienter i elsystem. I system där stora energimängder behöver lagras över längre tidsperioder, så som i massa- och pappersbruk, är applicerbarheten däremot begränsad.

2.1.4 Kemiska energilager

Kemisk energilagring innebär att energi lagras i form av kemiska bindningar och kan frigöras genom kemiska reaktioner. Ofta sker lagringen genom att elektrisk energi omvandlas till kemisk energi och senare åter omvandlas till elektricitet, värme eller mekaniskt arbete genom förbränning eller elektrokemisk omvandling.

Tekniken möjliggör lagring av stora energimängder över långa tidsperioder och kan därför lämpa sig väl för industriella tillämpningar. Jämfört med termiska och elektriska energilager har kemiska energilager generellt hög energitäthet och bättre möjligheter till långtids- och säsongslagring, i och med att det inte sker några direkta förluster under lagringstiden. Kemiska energilager har däremot generellt låg systemverkningsgrad och hög systemkomplexitet.

⁹ Reece, R., Lekakou, C. & Smith, P.A., Past decade of supercapacitor research – Lessons learned for future directions, Journal of Energy Storage, vol. 70, 108062, 2023. <https://doi.org/10.1016/j.est.2023.108062>

Vätgas är en central energibärare inom kemisk energilagring och kan produceras genom elektrolys av vatten med hjälp av el. Den lagrade energin kan därefter återvinnas genom förbränning, i gasturbiner eller via bränsleceller. Vätgas har mycket hög energitäthet per massenhet, men låg volymetrisk energitäthet, vilket medför krav på kompression, nedkylning eller kemisk inbindning för effektiv lagring och transport. Förluster uppstår i samtliga steg i energikedjan, från elektrolys till slutanvändning, vilket resulterar i en relativt låg totalverkningsgrad. Vätgas kan lämpa sig för industriella tillämpningar där stora energimängder behöver lagras över längre tidsperioder eller där vätgasen kan användas direkt som råvara.

Ammoniak kan fungera som en indirekt form av vätgaslagring och produceras genom syntes av kväve och vätgas. Jämfört med vätgas har ammoniak högre volymetrisk energitäthet och är lättare att lagra och transportera, då den kan hanteras i flytande form vid måttliga tryck och temperaturer. Ammoniak kan användas som bränsle i förbränningsprocesser eller krackas tillbaka till vätgas vid användning. Nackdelar inkluderar energiförluster vid syntes och krackning, samt utmaningar kopplade till toxicitet och bildning av kväveoxider vid förbränning. Trots detta betraktas ammoniak som ett lovande alternativ för storskalig kemisk energilagring på längre sikt, särskilt i system där befintlig infrastruktur kan utnyttjas.

Biobränslen utgör en form av kemisk energilagring där solenergi lagras biologiskt genom fotosyntes och omvandlas till energirikare molekyler, såsom fast biomassa, biooljor eller biogas. Fördelen med biobränslen är att de kan lagras under långa tidsperioder och ofta kan användas i befintliga industriella anläggningar med begränsade tekniska anpassningar.

2.1.5 Termiska energilager

Termiska energilager lagrar energi i form av värme eller kyla. Lagringen kan ske på olika sätt beroende på vilken fysisk eller kemisk process som utnyttjas. Det finns tre typer av termiska energilager; sensibla lager, latent lager och termokemiska lager.

2.1.5.1 Sensibel energilagring

Termisk sensibel energilagring baseras på att energi lagras genom att temperaturen hos ett material höjs eller sänks, utan att materialet genomgår någon fasomvandling. Den lagrade energimängden bestäms av materialets massa, dess specifika värmekapacitet samt det temperaturintervall inom vilket systemet kan arbeta. Tekniken är därmed enkel till sin grundprincip och bygger på väletablerade värmeöverföringsmekanismer.

I ett sensibelt värmelager sker laddning genom att en värmebärare, exempelvis luft eller vätska, leds genom eller i kontakt med lagringsmaterialet.

Värmeenergin överförs från värmebäraren till materialet, vilket medför en temperaturökning. Vid urladdning används en kallare värmebärare som tar upp den lagrade värmen när materialet kyls ned. Den uttagna värmen kan därefter användas direkt i industriella processer eller integreras i energisystem för el- eller värmeproduktion.

Fasta material såsom betong har visat sig vara särskilt lämpade för sensibel värmelagring på grund av sin goda tillgång, låga kostnad och höga mekaniska hållfasthet. Dessa material uppvisar även stabila termiska egenskaper vid upprepade laddnings- och urladdningscykler, vilket är en viktig förutsättning

för lång livslängd och tillförlitlig drift. Tekniken lämpar sig särskilt väl för medel- till högtemperaturapplikationer, där kraven på robusthet och driftsäkerhet är höga.

En begränsning med termisk sensibel energilagring är den relativt låga energitätheten jämfört med lagringstekniker som utnyttjar latent värme eller termokemiska processer. Detta innebär att större lagringsvolym krävs för att uppnå samma energiinnehåll. Trots detta är tekniken attraktiv i storskaliga tillämpningar, där enkel konstruktion, låga materialkostnader och god tillgång till lagringsmaterial ofta väger tyngre än hög energitäthet.

2.1.5.2 Latent energilagring

Latent värmelagring innebär att termisk energi lagras genom att ett material genomgår en fasomvandling, vanligtvis mellan fast och flytande tillstånd. Till skillnad från sensibel värmelagring sker lagringen då vid i stort sett konstant temperatur, vilket gör tekniken särskilt lämpad för tillämpningar där en stabil temperaturnivå är önskvärd. Den lagrade energimängden beror främst på materialets latent smältvärme snarare än på en temperaturförändring.

I ett latent värmelagringssystem används så kallade fasomvandlingsmaterial. Under laddningsfasen tillförs värme till materialet, vilket gör att det smälter och absorberar energi. Vid urladdning sker den omvända processen, där materialet stelnar och avger den lagrade värmen till en kallare värmebärare.

Värmeöverföringen sker vanligtvis via värmeväxlare eller inbyggda värmeledande strukturer för att förbättra effektuttaget.

Latent värmelagring kännetecknas av högre energitäthet än sensibel värmelagring, eftersom stora mängder energi kan lagras inom ett smalt temperaturintervall. Samtidigt är värmeledningsförmågan hos många fasomvandlingsmaterial relativt låg, vilket kan begränsa laddnings- och urladdningshastigheten. För att hantera detta används ofta tillsatser eller konstruktionslösningar som ökar den effektiva värmeöverföringsytan. Tekniken kan tillämpas inom både låg- och medeltemperaturområden. Valet av fasomvandlingsmaterial styrs av önskad arbetstemperatur, kemisk stabilitet, cyklisk livslängd samt säkerhets- och miljöaspekter.

2.1.5.3 Termokemisk energilagring

Termokemisk energilagring innebär att värmeenergi lagras genom reversibla kemiska reaktioner, där energi binds i materialets kemiska struktur. Till skillnad från sensibel och latent värmelagring kan energin lagras utan kontinuerliga värmeförluster, eftersom lagringen inte är beroende av en temperaturgradient. Detta gör tekniken särskilt intressant för långtids- och säsongslagring av värme. I ett termokemiskt lagringssystem tillförs värme under laddningsfasen för att driva en endoterm reaktion, exempelvis sönderdelning eller dehydrering av ett material. Den kemiska energin lagras därefter i reaktionsprodukterna, som kan hållas åtskilda vid omgivningstemperatur. Vid urladdning initieras den omvända, exotermiska reaktionen genom tillförsel av exempelvis vattenånga eller genom återkoppling av reaktionskomponenterna, varvid den lagrade värmen frigörs och kan tas tillvara.

Termokemiska lager kännetecknas av mycket hög energitäthet jämfört med både sensibla och latent värmelager. Samtidigt är tekniken mer komplex, då den ställer höga krav på materialens kemiska stabilitet, reaktionskinetik och systemdesign. Förluster kan uppstå genom ofullständiga reaktioner, degradering

av material vid upprepade cykler samt genom begränsad värme- och masstransport i reaktorn. Trots att tekniken fortfarande befinner sig på forsknings- och demonstrationsnivå, visar flera studier att termokemiska lager har stor potential att möjliggöra effektiv och långvarig lagring av värme vid både medel- och högtemperaturförhållanden.

2.1.6 Interna lager av mellanprodukter

Inom massa- och pappersbruk kan det även finnas goda möjligheter till flexibel elanvändning genom att frikoppla olika processteg och därmed utnyttja interna lager och buffertar som indirekt energilagring.

Lager av fasta biobränslen, så som flis och bark, möjliggör en utjämning mellan råvarutillförsel, energiproduktion och processbehov. Barklagret har i detta sammanhang goda möjligheter, då barken innehåller lagrad kemisk energi som kan utnyttjas flexibelt i pannsystemet beroende på rådande el- och bränslepriser samt efterfrågan av processånga. På motsvarande sätt kan lager av svartlut och andra lutar betraktas som energilager.

Massalager ger möjlighet att separera massaproduktionen från efterföljande processer såsom torkning, pappers- eller kartongproduktion. Detta innebär att energiintensiva processteg kan förläggas till perioder med gynnsamma elpriser, samtidigt som produktionen mot kund upprätthålls. Även ångsystemet kan bidra till flexibilitet genom intern buffring, exempelvis via ångackumulatorer.

2.2 Intervjuer med leverantörer

I syfte att inhämta mer konkret information om t ex utvecklingsstatus och tekniska prestanda intervjuades några leverantörer av tekniker för termisk energilagring, inklusive traditionella ångackumulatorer. Ambitionen var inte att göra någon heltäckande leverantörsstudie utan mer att förstå vilka gemensamma utmaningar och huvudsakliga tillämpningar som leverantörerna riktar in sig på.

2.2.1 Energynest

Energynest är ett norskt energiteknikföretag med huvudkontor i Oslo. Företaget utvecklar och levererar storskaliga lösningar för elektrifiering och lagring av industriell värme, med fokus på processindustrier med kontinuerligt värmebehov, såsom kemi, livsmedel samt massa- och pappersindustri.

Energynest har sedan tidigare haft dialog och genomfört studier kopplade till massa- och pappersindustrin, bland annat i Tyskland, och har även kommersiella projekt i drift. Ett referensprojekt i kemiindustrin är anläggningen hos Yara i Norge, där tekniken används för ångbalansering och har varit i kommersiell drift sedan januari 2023.

Energynests lagringsteknik ”*Thermal Battery*”, är ett system för sensibel termisk energilagring baserat på ett egenutvecklat värmelagringsmaterial av betong. Energin lagras som värme i fasta block och överförs via ett slutet kretslopp med värmeöverföringsmedium, i första hand silikonbaserad termisk olja. Systemet är utformat för integration med befintliga industriella ång-, hetlufts- eller termooljesystem. Lagret laddas med el (via elpanna), ånga eller spillvärme och leverera värme i form av ånga, termisk olja eller varm luft. En

utmaning för laddning med ånga är att det krävs en temperaturdifferens på minst 60 grader, vilket begränsar möjligheten att ladda lagret med restvärme. Flexibilitet mot elmarknaden uppnås genom att ladda lagret vid låga priser och utnyttja den lagrade energin när priserna är högre. Tekniken kan dimensioneras från cirka 4 MWh upp till >1 000 MWh, med termiska effekter från 1 MW till över 100 MW. Utloppstemperaturer kan uppnås upp till och över 300 °C och ångtryck upp till cirka 60 bar. Systemet är modulärt uppbyggt, där varje block typiskt motsvarar cirka 2 MWh lagringskapacitet, beroende på vald temperaturnivå. Modulerna är containerbaserade (20-fotsformat) och kan staplas, upp till fyra enheter i höjd, vilket underlättar skalbarhet och platsanpassning.

Tekniken har hög verkningsgrad, med en cykelverkningsgrad över 95 %, och värmeförluster på cirka 2 % per 24 timmar vid full laddning. Systemet uppges inte ha någon degradering över livslängden. Konstruktionen är av fast material, vilket innebär liten eller ingen prestandaförsämring eller degradering över tid. Den tekniska livslängden anges till 25–30 år. Investeringskostnaden (CAPEX) beror i hög grad på vald temperaturnivå, då högre temperaturer kräver mer lagringsmaterial. För större anläggningar (>10 MW) angavs en totalkostnad för investeringen i intervallet 130 000–150 000 €/MWh, inkluderande lagring, värmeväxlare, pumpar och integration. Drift- och underhållskostnaderna är låga, uppskattningsvis cirka 0,5 % av CAPEX per år och systemet är i huvudsak obemannat. Den största användaren av el i systemet är cirkulationspumparna; någon kontinuerlig värmetillförsel för att bibehålla laddningsnivå krävs inte utöver att hantera värmeförlusterna.

Systemet har snabb dynamik: full urladdningseffekt kan uppnås inom sekunder (exempelvis ~20 s), och ett block om cirka 2 MWh kan laddas på omkring 5 minuter vid tillräcklig tillförd effekt. Detta möjliggör deltagande i vissa stödtjänster, såsom aFRR, medan symmetrisk FCR inte bedöms möjlig på grund av kraven på kortare responstid. Vidare uppges att tekniken är robust och redundans kan byggas in på modulnivå, exempelvis genom att enskilda rörslingor kan tas ur drift utan att hela modulen förlorar funktion. Spillvärme kan användas för laddning vid temperaturer över cirka 200 °C, med ett rekommenderat temperaturspann (ΔT) om minst 60 °C för kostnadseffektiv drift. Ånga kan användas som värmeöverföringsmedium, men detta ger lägre temperaturdifferens och därmed högre kostnad jämfört med termisk olja.

2.2.2 Kyoto Group

Kyoto Group är ett energiteknikföretag som utvecklar och levererar storskaliga lösningar för elektrifiering och lagring av industriell värme, med särskilt fokus på ångproduktion för processindustri. Företaget riktar sig mot industrier med kontinuerligt värme- och ångbehov och positionerar sin teknik som ett alternativ till fossil ångproduktion baserat på el och termisk energilagring. Kyotos system ”*Heatcube*” är en lösning för sensibel termisk energilagring baserat på smälta salter, en teknik som är etablerad och betraktas som driftsäker för höga temperaturer enligt leverantören. Systemet består av tre huvudsakliga komponenter: en elektrisk värmare, en eller flera lagringstankar med smält salt samt en ånggenerator. Dessa komponenter är modulärt uppbyggda, vilket möjliggör skalning efter effekt- och energibehov. Den elektriska värmaren finns

i typiska storlekar om 10, 15 eller 20 MW och laddar systemet med el. Lagringstankarna har en kapacitet på cirka 13 MWh per tank, med en total systemkapacitet på upp till omkring 104 MWh. Ånggeneratoren levererar ånga vid temperaturer i intervallet cirka 150–300 °C.

Som lagringsmedium används ett ternärt nitratsalt. Vid uppvärmning smälter saltet och når låg viskositet vid höga temperaturer. Det varma saltet håller upp till cirka 415 °C, medan det kalla saltet typiskt ligger runt 190 °C. Saltet fungerar både som värmelagringsmedium och värmeöverföringsmedium, vilket innebär att systemet är slutet och inte kräver att vatten cirkulerar i lagringskretsen. Vid urladdning värmeväxlas det varma saltet mot en ånggenerator som producerar processånga.

I systemet finns möjlighet att ladda och urladda samtidigt. Detta är särskilt relevant för industrier med ångbehov dygnet runt, där ånga kan produceras kontinuerligt samtidigt som lagret laddas under perioder med låga elpriser. Tekniken är därmed primärt avsedd för optimering och dekarbonisering av industriella värme- och ångproduktion snarare än för direkt elenergilagring. Eventuell flexibilitet mot elsystemet uppstår indirekt genom tidsförskjutning och styrning av det elektriska effektuttaget i värmaren.

Systemets cykelverkningsgrad anges till cirka 93 %, med uppmätta värden i drift närmare 96 %. Energiförlusterna uppgår till ungefär 1–4 % per dygn, vilket främst beror på att saltet måste hållas över cirka 130 °C för att bibehålla önskade materialegenskaper. Ramtiden är mycket snabb: vid varm drift kan full effekt nås inom cirka 3 sekunder, medan kallstart tar upp till cirka 4 minuter.

Leverantören kan ta totalansvar för lösningen, inklusive projektering, investering och drift. Anläggningarna är avsedda att vara i huvudsak självgående och kan fjärrövervakas och fjärrstyras efter idrifttagning. I vissa projekt används affärsmodeller där kunden inte äger anläggningen utan köper värme på kontrakt. Ett exempel är ett projekt i Ungern där systemet laddas med cirka 10 MW el, har en lagringskapacitet på omkring 56 MWh och levererar cirka 7 MW termisk effekt. Där används systemet för att ladda under ungefär 30 % av dygnets timmar, medan resterande tid täcks av avtalad värmeleverans. Utöver detta finns en pilotanläggning i Aalborg kopplad till fjärrvärme. Investeringskostnaden är starkt beroende av applikation, temperaturkrav, effekt- och energibehov samt lokala förutsättningar. En typisk anläggning har ett uppskattat ytbehov på omkring 1 000 m². Den tekniska livslängden anges till cirka 25 år, och efter avslutad livslängd kan det använda saltet enligt leverantören tas ut och potentiellt återanvändas, exempelvis som gödningsmedel.

2.2.3 Bosch

Bosch Industrial levererar industriella ång- och värmesystem och har erfarenhet av leveranser till processindustri, inklusive massa- och pappersindustrin. Inom detta segment erbjuder Bosch så kallade ångackumulatorer (Steam Accumulator Modules, SAM), vilka används för att utjämna variationer i ångbehov och stabilisera trycknivåer i ångsystem.

En ångackumulator är i grunden ett trycksatt kärl avsett för korttidslagring av ånga i form av termisk energi i vatten. Ackumulatoren fylls normalt till cirka 50–

60 % med behandlat vatten, varefter ånga tillförs under laddningsfasen. När ångan kondenserar i vattnet höjs temperatur och tryck i tanken gradvis till önskad laddningsnivå. Vid urladdning sker en kontrollerad trycksänkning, varvid en del av vattnet återförångas och ånga kan levereras till processen. Systemet arbetar cykliskt och kräver pauser för laddning mellan urladdningsfaserna. Ackumulatorerna är främst avsedda för att utjämna kortvariga variationer i ångbehov, exempelvis vid lasttoppar i pappersmaskiner, snarare än för storskalig energilagring. Tekniken är inte optimal för långvarig lagring av stora energimängder, då energitätheten är relativt låg och värmeförlusterna ökar med lagringstid. Ångackumulatorer är särskilt lämpade för låg- till medeltrycksånga, medan högtrycksånga ger högre energiinnehåll men också mer krävande och kostsam konstruktion. Ackumulatorerna dimensioneras utifrån skillnaden mellan laddnings- och urladdningstryck. En typisk och tekniskt optimal tryckdifferens är 3–4 bar, exempelvis med laddning vid cirka 11 bar och urladdning vid 7–8 bar. Urladdningstryck kring 10 bar är vanligt, men även lägre trycknivåer, såsom 3–5 bar, är möjliga. Ju högre tillåtet tryck i tanken, desto mer energi kan lagras, men detta påverkar även kostnad, säkerhetskrav och dimensionering. Ett exempel från Danmark visar hur en ackumulator används parallellmatad för att jämna ut trycket vid toppbelastningar snarare än för energilagring i egentlig mening. I detta fall var ackumulatorn laddad till cirka 11 bar och urladdad vid cirka 7,5 bar. Vid ett laddat tillstånd motsvarande cirka 60 % fyllnadsgrad, en temperatur på cirka 188 °C och en tankvolym om cirka 170 m³, uppgick det lagrade energiinnehållet till omkring 70 MWh, med kontinuerliga värmeförluster i storleksordningen tiotals kilowatt. De dominerande värmeförlusterna sker genom värmestrålning, med viss värmeledning, och tankarna förses därför med omfattande isolering. Ångackumulatorer är fysiskt stora komponenter, vilket innebär ett betydande yt- och volymbehov i förhållande till lagrad energi. Stora enheter kan exempelvis ha en diameter på omkring 4 meter, och både tillverkning och transport bidrar väsentligt till investeringskostnaden. Leverantören erbjuder standardiserade storlekar, men kostnaden ökar snabbt vid avsteg från standardutföranden. Modulära lösningar är tekniskt möjliga men innebär ytterligare konstruktionsarbete. Tillverkningen sker i södra Tyskland. Den tekniska livslängden för anges till minst 10 år, men i praktisk drift bedöms livslängden ofta vara längre. Investeringskostnaden beror på storlek och utförande. För de största standardstorlekarna anges ungefärliga budgetpriser på: 115 000 €–155 000 €

Sammanfattningsvis är ångackumulatorer en beprövad lösning för tryckutjämning och korttidsbuffring av ånga i industriella processer. Tekniken lämpar sig väl för att hantera snabba variationer i ångbehov men är mindre lämpad för storskalig eller långvarig energilagring, där andra termiska lagringstekniker generellt erbjuder högre energitäthet och lägre relativa förluster.

2.2.4 Spirax Sarco

Spirax Sarco är en global leverantör av lösningar för ång- och kondensatsystem och har lång erfarenhet av energieffektivisering inom processindustri. Företaget

har under lång tid arbetat med ångackumulatorer för att reducera toppbelastningar i pannsystem och stabilisera ångförsörjningen, men har på senare år vidareutvecklat tekniken till vad som benämns *Steam Battery*, vilket är en lösning som kombinerar termisk energilagring och ånggenerering i samma system.

Steam Battery är avsedd att möjliggöra elektrifiering och dekarbonisering av ångsystem samtidigt som befintlig ånginfrastruktur kan behållas. Systemet använder elektricitet för att ladda ett termiskt lager och frigör därefter energin i form av ånga när processen kräver det. På så sätt frikopplas tillförsel av el från efterfrågan på ånga, vilket möjliggör flexibilitet i både energiinköp och drift. Tekniskt är lagret ett trycksatt kärl där energi lagras i form av hett vatten och ånga. Systemet kan fungera som en fristående lösning, som komplement till befintlig ångpanna eller som en decentraliserad lösning vid större industrianläggningar med flera ångbehovspunkter. Som komplement till pannor kan systemet bidra till jämnare ångleverans, minska pannornas effektbehov och hantera lasttoppar.

Systemen är i huvudsak skräddarsydda och dimensioneras utifrån kundens specifika ång-, tryck- och energibehov. Drifttryck upp till cirka 32 bar är möjliga, vilket ger höga vattentemperaturer och därmed ökat energiinnehåll. Den elektriska värmaren är placerad i botten av tanken och har mycket snabb responstid, med möjlighet att nå full effekt inom cirka en sekund. Installerad elvärmareffekt ligger typiskt i intervallet 125–500 kW, och systemen dimensioneras ofta med överkapacitet för snabb laddning. Den lagrade energin används lokalt på anläggningen, exempelvis för processånga eller varmvatten. Urladdning sker genom trycksänkning, varvid vatten förångas och ånga bildas. Den typiska urladdningseffekten ligger i intervallet 1,5–6 MW, även om systemen i praktiken oftast används för att stötta och jämna ut ångproduktionen snarare än för full urladdning på kort tid.

Den största anläggning som Spirax Sarco hittills har levererat finns i England och har en lagringskapacitet på cirka 3,5 MWh. Företaget har ännu inte levererat något motsvarande system i Sverige. Produktionen sker i England, men systemen byggs ofta delvis på plats hos kund. Ur ett prestanda- och livscykelperspektiv positioneras systemet som ett alternativ till både elpannor, kemiska batterier och traditionella ångackumulatorer. Systemeffektiviteten anges till cirka 90 %, vilket är högre än för jämförbara elektriska batterilösningar. Tekniken uppges ha cirka 60 % högre energitäthet än alternativa lösningar inom samma segment och kan laddas och urladdas upprepade gånger utan kapacitetsförlust. Den förväntade livslängden anges till 20–30 år, vilket är avsevärt längre än för kemiska batterier, och lagringsmediet är vatten, vilket är ett säkert, billigt och allmänt tillgängligt material. Investeringskostnaden anges vara relativt hög. Mindre system uppskattas kosta i storleksordningen 1–2 miljoner kronor, medan lösningar för större industrier, såsom pappersbruk, blir betydligt mer kostsamma. Samtidigt bedöms tekniken vara billigare än kemiska batterier för motsvarande energitillämpningar. Systemens livslängd och låga slitage, i kombination med små värmeförluster och möjlighet till lång lagringstid (upp till en månad), bidrar till en långsiktig ekonomisk hållbarhet.

Sammanfattningsvis erbjuder systemet en lösning för utjämning av ångbehov, elektrifiering av ångsystem och kort- till medellång termisk energilagring.

Tekniken är särskilt lämpad för industrier som vill behålla befintlig ånginfrastruktur och samtidigt öka flexibiliteten i energianvändningen, men den begränsade lagringskapaciteten per enhet gör att lösningen främst lämpar sig som komplement snarare än som huvudlösning för storskalig energilagring.

2.2.5 Parat Halvorsen

Parat är ett norskt företag med huvudkontor i Flekkefjord som tillverkar elektriska pann- och värmesystem för industri, marin och offshore-sektorn. Företaget är idag en del av Babcock Wanson-gruppen och erbjuder kundanpassade lösningar från design och tillverkning till driftsättning och service. Parat har levererat anläggningar globalt, med referensprojekt i bland annat Europa, Brasilien och Nya Zeeland, och har även levererat till svensk industri.

Parats huvudsakliga erbjudande inom elektrifiering av värme och ånga är elektrodpannor för ånga och hetvatten, vilka kan levereras som fristående enheter eller integrerade i befintliga energisystem. Effekterna sträcker sig från mindre enheter till större system med upp till 75 MW per panna.

Elektrodpannorna bygger på en teknik där uppvärmningen sker genom att ström leds direkt genom vattnet, där effekten styrs via vattnets konduktivitet. Detta ger hög verkningsgrad, enkel konstruktion och relativt lågt underhållsbehov. Systemet kan arbeta vid drifttryck upp till 85 bar, även om standardutföranden ofta ligger runt 20 bar, vilket möjliggör både låg- och högtrycksånga för processindustri.

En central egenskap hos leverantörens lösningar är den så kallade Zero-load-funktionen, som innebär att pannan kan hållas inkopplad mot elnätet utan att behöva bryta huvudströmmen, även vid nollast. Detta möjliggör mycket snabb laständring och gör systemen väl lämpade för deltagande på stödtjänst- och balansmarknader, såsom mFRR, aFRR och FFR. Från minimilast till full effekt kan systemet rampas upp på cirka 30 sekunder och responstiden kan i vissa fall anpassas för ännu snabbare tjänster. Pannorna kräver inte separat transformator utan kan anslutas direkt mot elnätet. Leverantören positionerar sig som en komplett partner snarare än enbart en komponentleverantör. Företaget utvecklar inte egna ångackumulatorer. I praktiken är det dock företagets hetvattensystem kopplade till fjärrvärme som har haft störst kommersiell spridning, även om ånglösningar för industriella processer också förekommer.

Investeringskostnaden beror på effekt, trycknivå och systemutformning. Som riktvärde anges cirka 15 MSEK för en 40 MW hetvattenpanna, inklusive driftsättning. Systemen är ofta stegvis uppbyggda där tryckkärl och skal kan levereras upp till cirka 15 MW per enhet och därefter byggas vidare mot högre effekter, upp till cirka 30 MW och mer, med anpassning av pumpar och kringutrustning. Underhållsbehovet bedöms som relativt lågt. En årlig inspektion rekommenderas, och de keramiska isolatorerna runt elektroderna behöver normalt bytas ungefär vart femte år. Detta kräver att pannan töms helt och tar i storleksordningen 2–3 dagar. Den tekniska livslängden anges till omkring 30 år, vilket är i linje med traditionella pannsystem. En mellanstor panna på cirka 40 MW har ungefärliga dimensioner på 3 m i diameter och 8 m i höjd, vilket gör lösningen relativt kompakt i förhållande till levererad effekt.

3. El- och kraftmarknader för energilager

3.1 Elmarknader

Idag finns en rad olika energi- och kraftmarknader som elkonsumenter och elproducenter kan agera på. Majoriteten av elhandeln som sker i Sverige görs på dagen-före-marknaden där ett marknadspris per kvart (15 minuter) sätts av tillgång och efterfrågan på el för just denna kvart. På intradag-marknaden kan aktörer köpa/sälja energi efter att dagen-före-marknaden stängt och kan genom denna handla sig i balans närmare driftskvarten. Det finns även kraftmarknader i form av stödtjänstmarknaderna. Dessa kan delas upp i olika produkter (FCR-D, FCR-N, FFR, aFRR och mFRR) som nyttjas för att stabilisera frekvensen på elnätet.

Historiska ökningen via intermittent produktion och ändrade konsumtionsmönster i takt med ökad elektrifiering av flera sektorer har skapat nya mönster och ändrat balansen i kraftsystemet.

3.1.1 Stora förändringar av marknadsdesign senaste åren

Det har skett flera stora designförändringar av marknaden de senaste åren som har fått stor påverkan dels på hur marknadens aktörer agerar, dels på elprisets utveckling.

- Under oktober 2024 infördes flödesbaserad kapacitetsberäkning på dagen före-marknaden. Tidigare har den statiska metoden net transfer capacity (NTC) använts för att beräkna överföringskapaciteten i nätets olika delar. Den flödesbaserade metoden innebär en mer noggrann beräkning och allokering av tillgänglig överföringskapacitet i nätet, och medför därmed ett mer effektivt utnyttjande av elnätets befintliga kapacitet för handel på dagen före-marknaden. En konsekvens av införandet är att den tillgängliga överföringskapaciteten på dagen före-marknaden har ökat, vilket medfört en lägre tillgänglig överföring för handel på intradagsmarknaden och balansmarknaderna, med minskade handelsvolymmer på intradagsmarknaden och mer lokal balansering som följd. För aktörer på marknaden har det inneburit försämrade möjligheter att handla sig i balans på intradagsmarknaden, och därmed ett ökat beroende av balansmarknaderna (stödtjänstmarknader) och obalanspriset för att i stället betala för eventuella obalanser.
- Under mars 2025 övergick balansmarknaden till 15 minuters avräkning och handel i och med införandet av mFRR EAM (energiaktiveringsmarknad), med en automatiserad budväljare och 15 minuters tidsenhet. Samtidigt övergick

handel på intradagsmarknaden till 15 minuter. I samband med att balansavräkning på 15 minuter introducerades, ändrades metoden för att beräkna systemets obalanser, som tidigare har gjorts utifrån frekvensen i nätet – som därmed varit samma i alla de fyra svenska prisområdena – till att nu beräknas utifrån uppkomna obalanser i respektive elprisområde. Konsekvenserna av dessa förändringar blev ökning av obalanser i systemet och en kraftig ökad volatilitet av obalanspriset med tidvis extrema obalanspriser.

- Under oktober 2025 övergick även dagen före-marknaden till 15 minuters upplösning.

Konsekvensen av dessa förändringar av marknadens utformning är en ökad komplexitet och ett större behov och incitament för marknadens aktörer att vara aktiva i sin roll som elhandlare, dels för att bidra till ett mer resurseffektivt system, dels för att kunna dra nytta av de mer varierade priserna på elmarknaden och för att undvika stora kostnader till följd av obalanser.

3.1.2 Nyttor som energilager kan skapa

Med energilager skapas nya förutsättningar för industriens elhandel där förbrukningen och produktionen kan ske mer flexibelt utifrån marknadens prissignaler.

- Elprisarbitrage: Genom att nyttja elprisets variationer kan energi handlas när elpriset är lågt, för att sedan säljas vid timmar av högre elpris. Då det idag finns signifikant volatilitet i elpriset under dagen finns det goda möjligheter att kapitalisera på dessa fluktuationer.
- Lastförflyttning: Genom ett energilager är det möjligt att flytta sin egen energikonsumtion till timmar med lägre elpris genom att ladda ur energilagret vid högt elpris och därefter ladda upp det vid lågt elpris. Detta är likt agerandet för elprisarbitrage men görs på egen konsumtionslast.
- Kapning av effekttoppar: En större energikonsument betalar vanligtvis en effektaggift till elnätsägaren för att kunna nyttja den önskade konsumtionskapaciteten från elnätet. Effektaggiften sätts oftast av maxkonsumtionen baserat på en eller ett fåtal timmar under månaden eller året. Detta är ofta en stor kostnad för aktören som kan minskas genom att kapa topparna i energikonsumtion genom ett energilager. Då energikonsumtionsprofilen vanligtvis inte är helt platt, alltså att anläggningen konsumerar exakt lika mycket el varje timme på dygnet, är det möjligt att ladda ur energilagret under tider med hög energikonsumtion och sedan ladda upp energilagret under timmar med lägre energikonsumtion. Genom detta beteende kan energikonsumtionsprofilen plattas ut och ta bort de värsta topparna i energikonsumtion. Genom att minska dessa toppar kommer en kostnadsbesparing åstadkommas genom minskning av effektaggiften.

- Obalanshantering: Övergången till 15 minuters obalansavräkning och prissättning på mFRR energiaktiveringsmarknaden resulterade i ökade obalanser i systemet och kraftigt högre uppmätta obalanspriser. Att använda energilager, specifikt batterilager, för att reducera obalanser och relaterade obalanskostnader har undersökts för ett termomekaniskt massabruk med resultat som påvisade att obalanserna minskade men med ett svagt ekonomiskt resultat. Resultaten från studien påvisade att både de relaterade kostnaderna och intäkterna från obalanserna reducerades, vilket ledde till ett lågt netto-resultat.¹⁰

3.2 Stödtjänstmarknader

Stödtjänstmarknaderna syftar till att säkerställa driftsäkerhet, balans och stabilitet i elsystemet genom att aktörer tillhandahåller effekt eller energi med kort varsel. I takt med en ökande andel variabel elproduktion och minskad synkron produktion har behovet av stödtjänster ökat, vilket skapar nya möjligheter för flexibla resurser såsom energilager, elpannor och industriella processer.

Stödtjänster upphandlas för olika tidsskalor och funktioner, beroende på vilken typ av obalans eller störning som ska hanteras. De flesta tjänsterna är kopplade till frekvenshållning och frekvensåterställning, där resurser aktiveras för att snabbt motverka skillnader mellan elproduktion och elanvändning.

Frekvenshållningsreserver (FCR) används för att stabilisera systemfrekvensen kring nominellt värde vid kontinuerliga, mindre obalanser. Dessa reserver aktiveras automatiskt och proportionellt vid frekvensavvikelser, vilket innebär att resurserna måste kunna reagera mycket snabbt och på ett tillförlitligt sätt. FCR aktiveras på tidsskalor från sekunder till några minuter och ställer höga krav på responstid, tillgänglighet och kontinuerlig reglerbarhet. På grund av dessa krav är FCR främst lämpad för resurser med snabb dynamik, såsom batterier eller andra snabbrampande elbaserade system.

Automatisk frekvensåterställningsreserv (aFRR) används för att återföra frekvensen till normal nivå efter en initial avvikelse och för att avlasta FCR-reserverna. Till skillnad från FCR sker aktiveringen inte direkt via frekvensavvikelsen, utan genom automatiska styrsignaler från systemoperatören. aFRR verkar på något längre tidsskalor än FCR, från tiotals sekunder till flera minuter, och kräver att resurserna kan reglera sin effekt kontinuerligt uppåt eller nedåt. Detta gör aFRR lämplig för energilager och processflexibilitet som kombinerar relativt snabb responstid med viss uthållighet.

Manuell frekvensåterställningsreserv (mFRR) används för att hantera större och mer långvariga obalanser i elsystemet. Aktivering sker manuellt efter order från systemoperatören, och resurserna måste kunna leverera eller reducera effekt inom angivna tidsramar, vanligtvis på minut- till timnivå. mFRR ställer lägre krav på responstid jämfört med FCR och aFRR, men högre krav på uthållighet. Därmed är mFRR särskilt relevant för termiska energilager, elpannor och industriella processer som kan anpassa sin elanvändning över längre tidsperioder.

¹⁰ Rosendal & Öberg (2025) <https://www.diva-portal.org/smash/get/diva2:1969199/FULLTEXT01.pdf>

Utöver dessa tjänster finns även snabb frekvensreserv (FFR), som har införts för att hantera snabba frekvensfall i elsystem med låg rotationsenergi. FFR aktiveras vid kraftiga och snabba frekvensavvikelse och verkar på mycket korta tidsskalor, på mindre än en sekund. Kraven på responstid är mycket höga, medan varaktigheten är begränsad. Detta gör att endast ett fåtal tekniker, främst batterilager och andra mycket snabbrampande resurser, är lämpade för denna marknad.

3.2.1 Nyttor som energilager kan skapa

I och med att stödtjänstmarknaderna skiljer sig åt vad gäller responstid, aktiveringsprincip och varaktighet, har olika typer av energilager olika förutsättningar att delta. Snabbrampande resurser är väl lämpade för frekvensnära tjänster, medan energilager med större energikapacitet och längre uthållighet är mer relevanta för återställande och balanserande tjänster. För industriella aktörer kan deltagande på stödtjänstmarknaderna därför utgöra ett sätt att öka nyttan av befintliga eller planerade energilager och samtidigt bidra till ett mer robust och flexibelt elsystem.

Massa- och pappersbruk kan i teorin delta på flera marknader. I praktiken är det mFRR-marknaderna som står för de största volymerna. Detta beror främst på att mFRR har längre tidshorisonter och lägre krav på responstid jämfört med frekvensnära tjänster. Aktivering sker manuellt och ger större möjlighet att planera åtgärderna i processen, vilket är avgörande i kontinuerlig industriell drift. Flexibiliteten kan därmed realiseras utan att störa produktkvalitet eller skapa oacceptabla driftstörningar.

Tabell 3: Förkvalificerade volymer på de svenska stödtjänstmarknaderna, per 1 januari 2026.¹¹

Marknad	Flexibel förbrukning [MW]	Energilager [MW]
FFR	30	830
FCR-N	<10	460
FCR-D upp	410	1250
FCR-D ned	90	1180
aFRR upp	0	10
aFRR ned	0	10
mFRR upp	820	1190
mFRR ned	460	1130

Frekvenshållningstjänster såsom FCR och aFRR ställer högre krav på snabb och automatiserad reglering, vilket kan medföra vissa utmaningar, bland annat kopplat till styrsystem, redundans och tillgänglighet. Energilager kan i detta sammanhang spela en viktig roll genom att öka flexibiliteten och bredda marknadsdeltagandet. Genom att frikoppla elförbrukning från processbehov kan energilager möjliggöra snabbare och mer förutsägbar reglering, vilket gör det lättare för industrin att uppfylla kraven även på mer krävande stödtjänstmarknader. Samtidigt kan lagren användas för att minska påverkan på den ordinarie produktionen.

¹¹ Svenska kraftnät, *Utbud på marknaderna för reserver*, (2026)

3.2.2 Framtida utveckling av stödtjänstmarknader

Under början av 2025 skedde stora regulatoriska förändringar på balansmarknaderna där bland annat tidsperioden för balansering övergick från att avräknas var 60 minut till var 15 minut och en ny marknad introducerades (mFRR energiaktiveringsmarknad). Det resulterade i ett kraftigt ökat behov av resurser på mFRR marknaden, som reflekterades i en förhöjd prisnivå och ökad volatilitet med tillfälligt extremt höga priser. Under andra halvan av 2025 och inledningen av 2026 har marknaden börjat stabiliseras och prisnivåerna börjat återgå till liknande nivåer som tidigare år, främst till följd av ett ökat utbud av resurser som deltar på marknaderna.

Svenska kraftnät redovisar ett förväntat ökat behov av resurser på aFRR och mFRR marknaderna framöver i en uppdaterad rapport över marknadsutsikterna för de nordiska balansmarknaderna.¹² Utvecklingen är framför allt driven av en förändrad modell för balansering av systemet med större fokus på lokala resurser, och av den planerade anslutning till europeiska plattformar för handel av balansenergi som förväntas ske under 2027 och 2028.

¹² Nordic balancing market outlook 2030, updated data 2025. (2026), Svenska Kraftnät.

4. Screening

I det här kapitlet diskuteras möjliga kombinationer av olika typer av energilager och typer av massa- och pappersbruk. En kvalitativ analys görs för att sortera fram vilka kombinationer som mest troligt kan ge ekonomisk nytta för bruket via ökad flexibilitet på elmarknaden och stödtjänstmarknaden. Syftet är att identifiera ett par fall att göra noggrannare lönsamhetskalkyler för.

4.1 Kemiskt avsalubruk

Ett kemiskt massabruk har ett integrerat processsystem där fiberlinjen, kemikalieåtervinningen och energisystemet är tätt sammankopplade. Råvaran utgörs normalt av rundved som först avbarkas och därefter flisas till en homogen flisfraktion. Flisen mellanlagras i ett flisupplag innan den matas in i kokaren där den impregneras och kokas med vitlut. I kokningssteget löses ligninet ut och fibrerna friläggs, vilket ger massa och svartlut. Om bruket producerar blekt massa följer därefter ett blekningssteg, där massans ljushet höjs med hjälp av kemiska reagens och ytterligare processteg. Den färdiga massan kan sedan antingen torkas och säljas som avsalumassa eller, i ett integrerat bruk, matas vidare till pappersmaskinen för vidare förädling till papper eller kartong.

Svartluten som genereras i kokningen utgör ett centralt flöde i bruket och leds till indunstningsanläggningen, där den koncentreras och förs till sodapannan, som utgör brukets huvudsakliga enhet för energi- och kemikalieåtervinning. I sodapannan förbränns den organiska substansen i svartluten, vilket genererar högtrycksånga som förs till en mottrycksturbin för elproduktion. Ånga som behövs för processen tas ut efter turbinen och om det finns ett ångöverskott så finns det ofta också en kondensurbin installerad för att generera ytterligare el. De oorganiska kemikalierna hamnar i smältan, vilken löses upp till grönlut. Grönluten förs vidare till kausticeringsanläggningen, där den reagerar med bränd kalk för regenerering av kokkemikalierna och bildar vitlut, som därefter återförs till kokaren. Den bildade mesan förbränns i en mesaugn och återbildar kalciumoxid.

Ett kemiskt avsalubruk är vanligtvis nettosäljare av el, eftersom bruket producerar stora mängder ånga i sin kemikalieåtervinning samtidigt som den egna elförbrukningen är relativt begränsad. Den viktigaste orsaken är att svartluten innehåller en betydande mängd kemiskt bunden energi. När den förbränns i sodapannan frigörs denna energi och högtrycksånga genereras. Ångan kan därefter användas i en ångturbin för elproduktion, samtidigt som den även täcker brukets interna behov av processånga. Eftersom ett avsalubruk saknar den stora ånglast som en integrerad pappersmaskin medför är den interna ångförbrukningen ofta lägre än den ånga som produceras i sodapannan. Detta gör att en del av ångan kan nyttjas för elproduktion.

Ur ett flexibilitetsperspektiv är bruket uppbyggt kring ett antal processer med olika grad av reglerbarhet. Kokning, sodapanna, kausticering och mesaugn är processer som är tröga och starkt kopplade till varandra genom både kemikalie- och energibalansen. En förändring i en delprocess påverkar därför inte endast det omedelbara el- eller ångbehovet, utan även tillgången på vitlut, svartlut, ånga, kondensat och återvunna kemikalier, vilket begränsar möjligheten till

flexibilitet. Processerna inom vedgård och pannhus har däremot identifierats som processer där det finns potential till flexibilitet utan att ha alltför stor påverkan på massaproduktionen.

Möjligheterna att vara flexibel i råvattenrening och biologisk rening av avloppet utreddes i dialog med experter på dessa processavsnitt. Slutsatsen är att det är svårt att reglera ner lufttillförseln utan att det kan få stora konsekvenser för reningen, även om det sker under kortare tid. En liten möjlighet är att tillfälligt lagra avloppsvatten före bioreningen, men det blir snabbt mycket stora volymer och är inte realistiskt för mer än kanske en halvtimme, vilket endast ger små möjligheter för energi-arbitrage. Även vad gäller råvattenreningen så är det orealistiskt stora volymer som skulle behöva lagras. Nedan följer en sammanställning av screening av möjligheter och potentiella nyttor inom ett kemiskt avsalubruk.

	Batterilager	Termiskt energilager	Internt lager
Förutsättningar	- Överskott av ånga från barkpanna och sodapanna resulterar i nettoexport av el. - Investeringskostnad ca. 1,53 MSEK/MWh.	- Ånga genereras i ångpannan och sodapannan. - Tillgänglig ånga används antingen till processer eller elproduktion. - Begränsad möjlighet med flexibilitet i sodapannan. - Investeringskostnad 1,31,5 MSEK/MWh.	- Inom råvattenhantering och rening finns viss lagringskapacitet. Möjlighet till flexibilitet begränsas av komplexiteten i processerna. - Inom rensrikt, biobränslepanna/turbin finns viss lagringskapacitet och därmed möjlighet till flexibilitet. - Kräver kapacitet för att kunna köra ikapp. - Troligen låga investeringskostnader.
Potentiella nyttor - flexibilitet	Minskning av obalanskostnader: Hög potential tack vare snabb responstid. Nyttan bedöms begränsad, risk att det slår fel och även minskar intäkter från obalanser. Energiarbitrage: Begränsad nytta i och med att bruket är nettoexportör av el. Lokala flexmarknader: Hög potential. Batterier har snabb respons och urladdningstid och lämpar sig för flera olika tillämpningar inom flexibilitet. Energiförflyttning: Viss potential. Endast korttidsutjämning (sek-tim), ej lämpad för längre produktionsanpassningar. Effektoppskapning: Begränsad potential. Elförbrukningen är relativt jämn och effektoppar är ovanliga. Svårighet att prognostisera effektoppar.	Minskning av obalanskostnader: Låg potential. Nyttan bedöms begränsad, risk att det slår fel och även minskar intäkter från obalanser. Energiarbitrage: Begränsad potential. Ångproduktionen är starkt integrerad med kontinuerlig drift i sodapannan. Lokala flexmarknader: Begränsad potential. Responstid gör deltagande i snabba flexmarknaders svårt. Energiförflyttning: Måttlig potential. Möjliggör utjämning av ångbehov över minuter till timmar. Effektoppskapning: Begränsad potential. Elförbrukningen är relativt jämn och effektoppar är ovanliga. Svårighet att prognostisera effektoppar.	Minskning av obalanskostnader: Måttlig potential. Möjliggör justering av pump och fläktlast. Nyttan bedöms begränsad, risk att det slår fel och även minskar intäkter från obalanser. Energiarbitrage: God potential. Last kan flyttas från höga till låga elpristimmar. Lokala flexmarknader: Viss potential. Beror på responstid i processerna. Energiförflyttning: God potential. Buffertvolymer möjliggör lastförflyttning över timmar. Effektoppskapning: Måttlig potential. Elförbrukningen är relativt jämn och effektoppar är ovanliga. Svårighet att prognostisera effektoppar.
Potentiella nyttor - stödtjänster	- Snabb respons och urladdningstid medför möjlighet att delta på samtliga stödtjänstmarknader mot Svk (FFR, FCR-D upp & ner, FCR-N, aFRR upp & ner, mFRR CM upp & ner). - Kan leverera stödtjänster utan påverkan på produktionsprocesser.	- Ramptid beror på val av teknik, möjligt med vissa stödtjänsterna mer begränsat än batteri. - Möjligt med aFRR upp/ned och mFRR upp/ned.	Eventuellt möjligt beroende på ramptid och uthållighet i processerna.
Sweco view	Kopplingen till brukets el och ångbalans bedöms svag. Som nettoproducent är de ekonomiska nyttorna av energi-arbitrage begränsade, eftersom pris för försäljning av el är lägre än pris för inköp.	Ånga produceras som restprodukt, i och med kontinuerlig drift i sodapannan och nettoöverskott av ånga har lagrad ånga lågt alternativvärde.	Det finns potential till flexibilitet i rensrikt genom internt lager av massa och flis. Interna lager möjliggör flexibilitet till låga investeringskostnader.

4.2 Kemiskt integrerat bruk

I ett kemiskt integrerat bruk matas den färdiga massan från kokaren vidare till pappersmaskinen för vidare förädling till papper eller kartong.

Om bruket är integrerat med pappersproduktion utgör pappersmaskinen en ytterligare stor energianvändare. Massan matas till virapartier, där den avvattas initialt genom gravitation och vakuum. Därefter följer presspartiet,

där ytterligare vatten avlägsnas mekaniskt, och torkpartiet, där kvarvarande fukt drivs av med hjälp av ånga och värme. Sedan sker sluthantering, där produkten efterbehandlas och görs färdig för leverans. Särskilt torkpartiet har ett betydande ångbehov och är därmed centralt ur energisynpunkt. Den komplexa och starkt integrerade processtrukturen innebär att intern flexibilitet är svår att uppnå utan att påverka driftstabilitet och produktkvalitet, även i kemiskt integrerade bruk. Nedan följer en sammanställning av screening av möjligheter och potentiella nyttor inom ett kemiskt integrerat bruk.

	Batterilager	Termiskt energilager	Internt lager
Förutsättningar	• Nettoimportör avel. • Störst elbehov i pappersmaskiner, där möjligheterna till flexibilitet är begränsade till följd av oberäknliga uppstartsprocesser. • Investeringskostnad ca. 1,53 MSEK/MWh.	• Högt och varierande ångbehov. • Ånga genereras i ångpannan och sodapannan. • Tillgänglig ånga används till processer. • Svårt att vara flexibel med sodapannan. • Investeringskostnad 1,31,5 MSEK/MWh.	• Inom råvattenhantering och rening finns viss lagringskapacitet. Möjlighet till flexibilitet begränsas av komplexiteten i processerna. • Inom renseriet, biobränslepanna/turbin finns viss lagringskapacitet och därmed möjlighet till flexibilitet. • Krävs kapacitet för att kunna köra ikapp. • Troligen låga investeringskostnader.
Potentiella nyttor - flexibilitet	• Minskning av obalanskostnader: Hög potential tack vare snabb responstid. Nyttan bedöms begränsad, risk att det slår fel och även minskar intäkter från obalanser. • Energiarbitrage: Måttlig potential. Som nettoimportör av el finns möjlighet att lagra el vid låga priser och använda vid höga priser, främst på tidskala. • Lokala flexmarknader: Hög potential. Batterier har snabb respons och urladdningstid och lämpar sig för flera olika tillämpningar inom flexibilitet. • Energiförflyttning: Viss potential. Endast korttidsutjämning (sek-tim), ej lämpad för längre produktionsanpassningar. • Effekttoppskapning: Måttlig potential. Kan reducera effekttoppar vid störningar, men elförbrukningen är relativt jämn och effekttoppar är ovanliga. Svårighet att prognostisera effekttoppar.	• Minskning av obalanskostnader: Låg potential. Responstider och koppling till ångsystemet begränsar möjligheten att hantera obalanser. • Energiarbitrage: Låg till måttlig potential. Möjliggör viss förskjutning av ångproduktion, men är starkt begränsat av sodapannans drift. • Lokala flexmarknader: Begränsad potential. Responstid gör deltagande i snabba flexmarknaders svårt. • Energiförflyttning: God potential. Kan utjämna variationer i ångbehov mellan massaprocess och pappersmaskiner över minuter till timmar. • Effekttoppskapning: Begränsad potential. Elförbrukningen är relativt jämn och effekttoppar är ovanliga. Svårighet att prognostisera effekttoppar.	• Minskning av obalanskostnader: Måttlig potential. Justering av pumpar, fläktar och reningssteg kan användas för att minska obalanser på 10-60 min sikt. • Energiarbitrage: God potential. Elintensiva delprocesser kan flyttas till timmar med lägre elpris. • Lokala flexmarknader: Viss potential. Bero på responstid i processerna. • Energiförflyttning: God potential. Buffertvolymer möjliggör lastförflyttning över timmar. • Effekttoppskapning: Måttlig potential. Elförbrukningen är relativt jämn och effekttoppar är ovanliga. Svårighet att prognostisera effekttoppar.
Potentiella nyttor - stödtjänster	• Snabb respons- och urladdningstid medför möjlighet att delta på samtliga stödtjänstmarknader mot Svk (FFR, FCR-D upp & ner, FCR-N, aFRR upp & ner, mFRR CM upp & ner). • Kan leverera stödtjänster utan påverkan på produktionsprocesser.	• Ramtid beror på val av teknik – möjligt med vissa stödtjänster men mer begränsat än batteri. • Ev. möjligt med aFRR upp/ned och mFRR upp/ned.	• Ev. möjligt beroende på ramtid och uthållighet i processerna.
Sweco view	• Case att studera vidare. Stort elbehov, vilket delvis täcks av internt elproduktion, men nettoimport krävs. Batterier kan därmed göra stor nytta för flexibilitet i elkonsument.	• Begränsade möjligheter till flexibilitet i ångproduktion minskar möjligheterna.	• Finns potential men nyttorna med ett batterilager bedöms varastörre.

4.3 Mekaniskt integrerat bruk

Inom ett integrerat mekmassapappersbruk finns en stark koppling mellan el- och ångflöden. I bruk som baseras på termomekanisk massa (TMP) är el den dominerande primära energibäraren, framför allt i raffinörerna som står för den största delen av energianvändningen. I raffinörerna mals trä till fibrer och en stor del av den tillförda elenergin frigörs som värme och ånga, vilken återvinns och används vidare i processerna. Ångsystemet är därmed centralt för brukets energibalans. Ånga används bland annat i pappersmaskinernas torksektioner och behovet är relativt konstant över tid. Samtidigt är ångproduktionen i hög grad beroende av driftförhållandena i massaprocessen, vilket innebär att massa- och pappersprocesserna ofta måste köras synkront för att upprätthålla balans i

energisystemet. Denna täta integration ger hög energieffektivitet men begränsar den operativa flexibiliteten och möjligheten att anpassa elanvändningen efter variationer i elpris.

Temporära stopp eller effektreducering av raffinörerna ger en snabb och kraftig minskning av elbehovet, men medför samtidigt bortfall av ångproduktion.

Kortare obalanser hanteras vanligtvis idag genom massalager motsvarande cirka 6–8 timmars produktion, i kombination med ångackumulator, vilket möjliggör fortsatt drift av pappersproduktionen under begränsad tid. Denna flexibilitet är dock otillräcklig för att hantera längre sammanhängande perioder med höga elpriser.

Genom implementering av ett termiskt energilager kan ångproduktionen frikopplas från raffinörsdriften. Termisk energilagring (TES) lämpar sig därmed särskilt väl i ett mekaniskt integrerat bruk. Genom att lagra värme under perioder med låga elpriser och använda den lagrade energin för ångproduktion vid högre elpriser kan bruket reducera effektuttaget utan att störa den kontinuerliga pappersproduktionen. Sensibel värmelagring i fasta material, såsom betong eller keramik, är lämplig för pappersbruk. Tekniken har hög verkningsgrad (>90 %), är kommersiellt mogen (TRL 8–9) och anpassad till de temperatur- och effektnivåer som krävs inom bruket. Vidare är tekniken skalbar till de energimängder som är aktuella i pappersbruk, typiskt 300–500 MWh med en termisk effekt upp till cirka 80 MW, vilket motsvarar flera timmars ångbehov för en pappersmaskin. Nedan följer en sammanställning av screening av möjligheter och potentiella nyttor inom ett mekaniskt integrerat bruk.

	Batterilager	Termiskt energilager	Internt lager
Förutsättningar	• Nettoimportör avel. • Störst elbehov i raffinörer och pappersmaskiner. • Investeringskostnad ca. 1,5-3 MSEK/MWh.	• Ångåtervinning sker från raffinörerna. • Finns potential att frikoppla massaproduktion från pappersproduktion genom lagring av ånga och massa. • Investeringskostnad 1,3-1,5 MSEK/MWh.	• Interna lager inom flisning medför möjlighet till flexibilitet. • Krävs kapacitet för att kunna köra i kapp. • Troligen låga investeringskostnader.
Potentiella nyttor - flexibilitet	• Minskning av obalanskostnader: Hög potential. Snabb respons gör det möjligt att hantera prognosavvikelser. Nyttan bedöms begränsad, risk att det slår fel och även minskar intäkter från obalanser. • Energiarbitrage: Måttlig potential. Som nettoimportör av el finns möjlighet att ladda vid låga priser och använda vid höga priser, främst på tidskala. • Lokala flexmarknader: Hög potential. Batterier har snabb respons och urladdningstid och lämpar sig för flera olika tillämpningar inom flexibilitet. • Energiförflyttning: Viss potential. Endast korttidsförskjutning (sek-tim), ej lämpad för längre produktionsutjämning. • Effektoppskapning: Begränsad potential. Elförbrukningen är relativt jämn och effektoppar är ovanliga. Svårighet att prognostisera effektoppar.	• Minskning av obalanskostnader: Måttlig potential. Responstider och koppling till ångsystemet begränsar möjligheten att hantera obalanser. • Energiarbitrage: God potential. Termiskt lager som laddas med el möjliggör omvandling av billig el till värme/ånga vid höga elpriser. • Lokala flexmarknader: Begränsad potential. Responstid gör deltagande i snabba flexmarknader svårt. • Energiförflyttning: God potential. Lagring av ånga möjliggör frikoppling mellan massaproduktion och pappersmaskin över timmar. Massalager är en förutsättning. • Effektoppskapning: Måttlig potential. Kan bidra till att reducera effektoppar vid störningar, men elförbrukningen är relativt jämn och effektoppar är ovanliga. Svårighet att prognostisera effektoppar.	• Minskning av obalanskostnader: Måttlig potential. Justering av pumpar, fläktar och reningssteg kan användas för att minska obalanser på 10-60 min sikt. Innebär däremot små volymer. • Energiarbitrage: God potential. Elintensiva delprocesser kan flyttas till timmar med lägre elpris. • Lokala flexmarknader: Viss potential. Beror på responstid i processerna. • Energiförflyttning: God potential. Buffertvolymer möjliggör lastförflyttning över timmar. • Effektoppskapning: Måttlig potential. Elförbrukningen är relativt jämn och effektoppar är ovanliga. Svårighet att prognostisera effektoppar.
Potentiella nyttor - stödtjänster	• Snabb respons- och urladdningstid medför möjlighet att delta på samtliga stödtjänstmarknader mot SVK (FFR, FCR-D upp & ner, FCR-N, aFRR upp & ner, mFRR CM upp & ner). • Kan leverera stödtjänster utan påverkan på produktionsprocesser.	• Ramtid beror på val av teknik, möjligt med vissa stödtjänster men mer begränsat än batteri. • Möjligt med aFRR upp/ned och mFRR upp/ned.	• Ev. möjligt beroende på ramtid och uthållighet i processerna.
Sweco view	• Finns potential till flexibilitet med hjälp av batterier men ett termiskt energilager bedöms mer intressant att studera vidare.	• Case att studera vidare: Lagring av ånga med hjälp av ett termiskt energilager. Ett termiskt energilager kan skapa flexibilitet i ångbalansen och därmed frikoppla pappersproduktionen från massaproduktionen.	• Finns potential men nyttorna med ett termiskt lager bedöms vara större.

5. Lönsamhetsbedömning för två typiska fall

I syfte att illustrera den möjliga ekonomiska nyttan av energilager för ökad flexibilitet på elmarknaden så definierades två enkla fall baserade på kombinationer av olika typer av energilager och olika typer av massa- och pappersbruk.

5.1 Definition av de två fallen

5.1.1 Batterilager – kemiskt integrerat kartongbruk

Det ena fallet som analyseras är kombinationen av ett batterilager vid ett kemiskt integrerat bruk. För detta fall gäller att:

- Bruket är en nettokonsument av el. I detta fall antas bruket endast vara konsument av el, det vill säga utan abonnemang för inmatning till nätet. Den el som genereras i brukets turbiner bidrar till brukets totala elbehov men täcker det inte.
- En timprofil för elkonsumtion för ett typisk kemiskt bruk används som lastprofil.
- Batterilagret används dels för lastförflyttning av brukets elkonsumtion utifrån elpris (historiska elpriser för 2025 har använts för modelleringen), dels för att balansera elnätet genom att vara aktiva på de svenska stödtjänstmarknaderna. Batteriet antas kunna förkvalificeras för alla marknader (FCR-D upp & ned, FCR-N, FFR, aFRR upp & ned, mFRR upp & ned) och historiska priser från 2025 används i modelleringen. Analys görs även med ett antagande om framtida utveckling av elpris och stödtjänstpriser.
- Batteriet antas vara ett litium-jon-batteri, mer specifikt av typen litium-järnfosfat (LFP) vilket är en kommersiellt utbredd batterikemi för stationära batterilager.

5.1.2 Termiskt energilager – mekaniskt integrerat bruk

Det andra fallet som analyseras vidare är det mekaniska integrerade bruket där termiskt energilager undersöks. För detta fall gäller att:

- Bruket är nettokonsument av el. Konsumtionsprofilen antas vara konstant över året och dygnet, likt ett referensfall som använts i en tidigare studie av mekaniska massabruk.¹³

¹³ Herre, Tomasini et. Al. (2020)

- Det termiska energilagret som modelleras är ett sensibelt TES (thermal energy storage) av fast material. Systemet fungerar genom att lagringsmaterialet värms upp med hjälp av el, vilket kan anpassas till när elpriset är lågt. Materialet lagrar energin och när energin sedan behövs frigörs den lagrade värmen som het ånga som värmeväxlas med ångsystemet. Det termiska energilagret kan således skapa flexibilitet i ångbalansen och frikoppla pappersproduktionen från massaproduktionen
- Intäkter genereras genom att vid höga elpriser reducera effekten i raffinörerna, medan massalager samt det termiska energilagret säkerställer fortsatt tillförsel av massa och ånga till pappersmaskinerna, vilket medför att pappersproduktionen kan fortsätta utan avbrott. Bruket antas ha överkapacitet i raffinörerna, vilket möjliggör att den massaproduktion som går förlorad kan köras i kapp vid senare tillfälle när elpriset är lägre. På så vis uppstår inga intäktsbortfall till följd av produktionsbortfall.
- Det termiska energilagret går att kvalificera mot stödtjänstmarknaderna aFRR upp/ned samt mFRR upp/ned.

5.2 Modelleringsinputs och antaganden

Dimensioneringen av de två typerna av energilager för lönsamhetsanalysen är gjord genom en analys av konsumtionsmönster och effektbehov, vilka presenteras i Tabell 4 nedan.

Tabell 4. Tekniska inputs till modellering av lönsamhet för de två fallen.

Tekniska inputs	BESS – kemiskt integrerat bruk	TES – mekaniskt integrerat bruk
Installerad effekt [MW]	40	80
Lagringskapacitet [MWh]	160	400
Uthållighet [timmar]	4	5
RTE* [%]	90	95
Nätanslutning uttag [MW]	130	200
Nätanslutning inmatning [MW]	0	0
Genomsnittlig konsumtionslast [MW]	50	160

*RTE -Round-trip efficiency, dvs cykelverkningsgrad för laddning och urladdning

För det kemiska bruket med en genomsnittlig konsumtionslast på ca 50 MW och ett maximalt effektuttag på 130 MW har ett batterilager om 40 MW med 4 timmars uthållighet valts för analysen. Batteriets elektiska effekt har då möjlighet att nyttja en stor del av den genomsnittliga tillgängligheten i nätanslutningen. För batterilager finns flera möjliga uthålligheter, vanligast från 1 timme upp till 6 timmar, med olika fördelar. För tillämpningar där effekt efterfrågas och då batterilagrets kapacitet nyttjas för exempelvis kapacitetsmarknader är kortare uthålligheter att föredra, medan handel på energimarknader och energifokuserade tillämpningar visar bättre lönsamhet för längre uthållighet.

För det mekaniska bruket har en tidigare Energiforsk-studie använts som referens för ett svenskt bruk med ett termiskt effektbehov om 80 MW och med 300–500 MWh lagringsbehov.¹⁴

De ekonomiska indata som används i modelleringen för de två fallen redovisas i Tabell 5 nedan och är baserade på Swecos referenser från tidigare projekt och uppgifter från intervjuer med leverantörer av lösningar för energilagring.

Tabell 5. Ekonomiska indata för modellering av lönsamhet för de två fallen.

Ekonomiska inputs	BESS – kemiskt integrerat bruk	TES – mekaniskt integrerat bruk
CAPEX [kEUR/MWh]	130	130
OPEX [% av CAPEX/år]	3,0	0,5
Ekonomisk livslängd [år]	20	25
WACC [%]	7	7

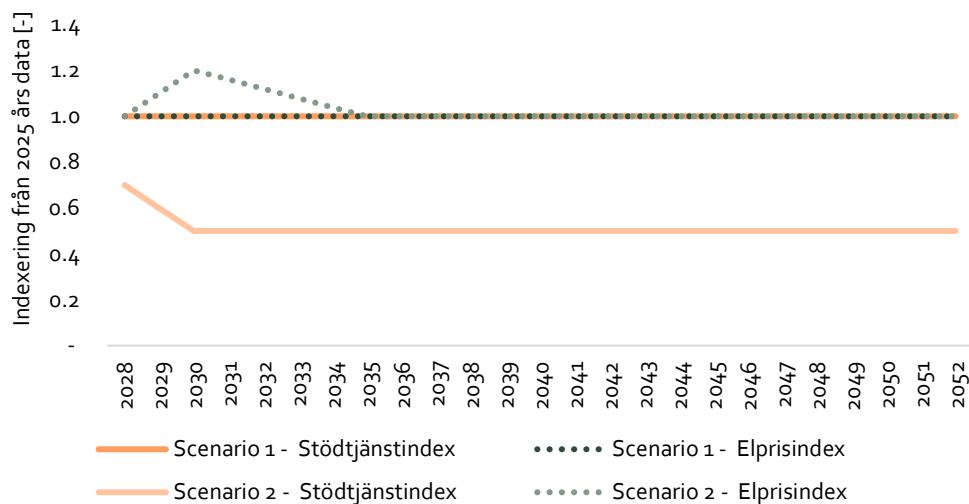
Utöver de fasta ekonomiska indata används 2025 års elpriser och stödtjänstpriser för att simulera kostnader och intäkter under ett år.

För att ta hänsyn till denna förändring av prisbilden under 2025, och för att bättre reflektera den förväntade utvecklingen av marknaderna framåt, har resultaten för framtida år indexerats utifrån två olika framtida prisantaganden. Dessa illustreras nedan i Figur 1 utifrån följande uppbyggnad:

- Scenario 1: Fast indexering med 2025 års priser för alla framtida år.
- Scenario 2: Justerad indexering för elpriser med 20% högre prisnivå till 2030, som sedan gradvis återgår till 2025 års nivå från år 2035 och framåt. Justerad indexering för den samlade prisbilden på stödtjänstmarknaderna med reduktion till 70% av 2025 års nivåer det första året (2027), och ytterligare reducering till 50% från 2030 och framåt.

Sweco antar att de olika stödtjänstmarknaderna kommer minska i pris i olika utsträckning. De historiska priserna för mFRR från 2025 antas minska substantiellt framöver, medan priserna för FCR-D och FCR-N sannolikt endast minskar i mindre utsträckning. Anledningen är att FCR-marknaderna bedöms ligga närmare en långsiktigt balanserad prisnivå, medan mFRR-priserna under 2025 var ovanligt höga till följd av förändringar i marknadsdesignen.

¹⁴ Jenny Wilson m.fl., *High Temperature Storage for Steam Production: Ökad flexibilitet mot elmarknaden genom högtemperaturlager för ångproduktion* (2025).



Figur 1. Indexering av elpris och stödtjänstpriser för framtida år.

Elnätskostnader är antagna utifrån Vattenfalls regionnätstariff enligt Tabell 6 nedan, omvandlade till EUR med växelkurs 11 SEK/EUR. Höglasttid definieras enligt tariffen som helgfria vardagar mellan kl. 06-22 under november till och med mars.

Tabell 6. Vattenfalls regionnätstariff för konsumtion för år 2025 och för Södra Sverige, tariffnivå L2¹⁵.

Nätstariff	
Fast avgift [EUR/år]	4 500
Effektavgift [EUR/MW/år]	36 200
Effektavgift höglasttid [EUR/MW/år]	7 100
Överföringsavgift [EUR/MWh]	2,2

¹⁵ Vattenfall regionnätstariff 2025 <https://www.vattenfalleldistribution.se/globalassets/2.-foretag/abonnemang-och-avgifter/avtal-och-elnavsavgift/regionnatstariffer-2025.pdf>

5.3 Resultat av modellering

5.3.1 Batterilager – kemiskt integrerat bruk

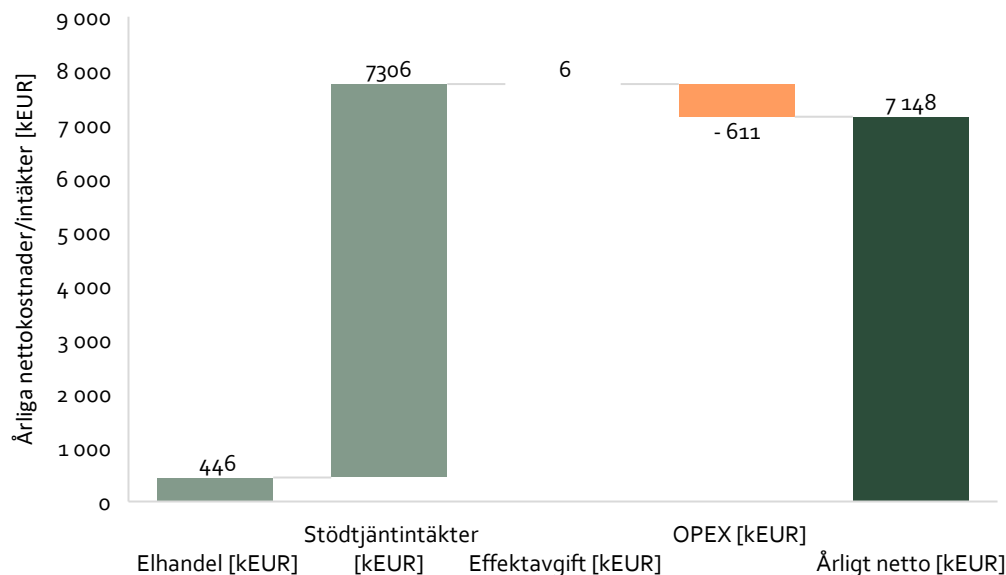
Resultaten av modelleringen visar för det kemiska bruket att investering i ett batterilager kan ge goda möjligheter till lönsamhet för båda prisscenarierna. För scenario 1 med 2025 års prisnivå är lönsamheten tydligt större än för scenario 2 med det justerade prisindexet, vilket är förväntat med nedjusterade prisnivåer.

Tabell 7. Finansiella nyckeltal för batterilager vid kemiskt bruk

Finansiella nyckeltal	Scenario 1	Scenario 2
NPV [kEUR]	51 700	17 700
IRR [%]	35	18

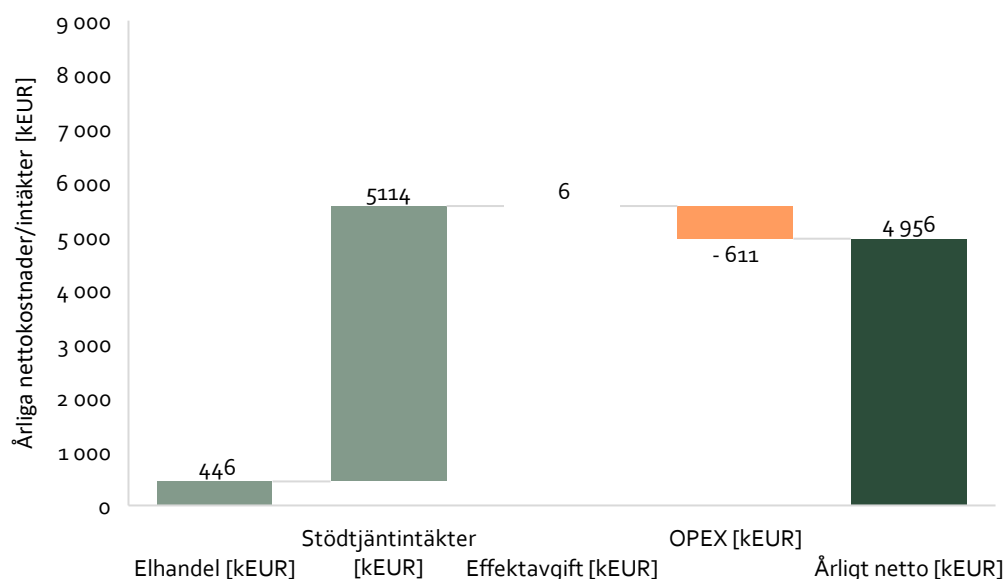
I förhållande till den totala investeringskostnaden om drygt 20 MEUR är återbetalningstiden för investeringen ca 4 år och 7 år för det fasta respektive det justerade prisscenariot. Resultaten visar på betydligt kortare återbetalningstider än vad som i dagsläget anses vara förväntat i praktiken för investeringar i batterilager. Detta beror till stor del på de kraftiga svängningarna som skett på stödtjänstmarknaderna under 2025. Dessa förväntas inte vara ihållande framöver med en mer mättad och stabiliserad marknad, vilket till stor del reflekteras i det lägre resultatet för det justerade scenariot. Trots detta visar resultaten fortsatt att det finns stor potential för lönsamma investeringar i batterilager vid kemiska bruk, vilka skapar nya intäktströmmar.

Den främsta bidragande faktorn till det positiva resultatet är de årliga intäkterna på stödtjänstmarknaderna som för prisscenario 1 uppgår till drygt 7 MEUR per år, medan besparingen från elhandeln (motsvarande lastförflyttning till timmar med lägre elpris) resulterar i intäkter om ca 450 kEUR årligen, enligt Figur 2 nedan. Med batterilagret förändras brukets konsumtionsmönster gentemot elnätet, med en mer varierande profil till följd av lastförflyttning, vilket kan leda till högre effekttoppar och därmed ha en negativ inverkan på den effektbaserade delen av nättariffen. Dock visar resultaten av modelleringen att profilen inte märkbart påverkar effektagiften, med en svag besparing till följd av förflyttning av toppar från höglasttid.



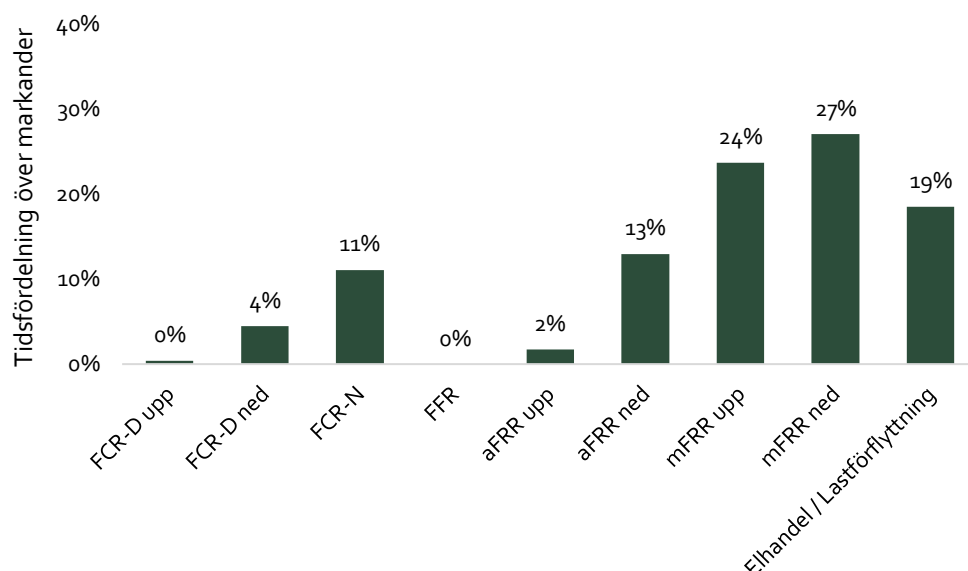
Figur 2. Fördelning av årliga intäkter och kostnader för batterilagret för ett exempelår för prisscenario 1 (elhandel och effektavgift redovisar besparing till följd av lastförflyttning).

Även för scenario 2 med justerade prisnivåer bidrar stödtjänstintäkterna till den största delen av de årliga intäkterna, men på en något lägre nivå om ca 5 MEUR, vilket resulterar i ett lägre nettoresultat på strax under 5 MEUR årligen enligt Figur 3 nedan.



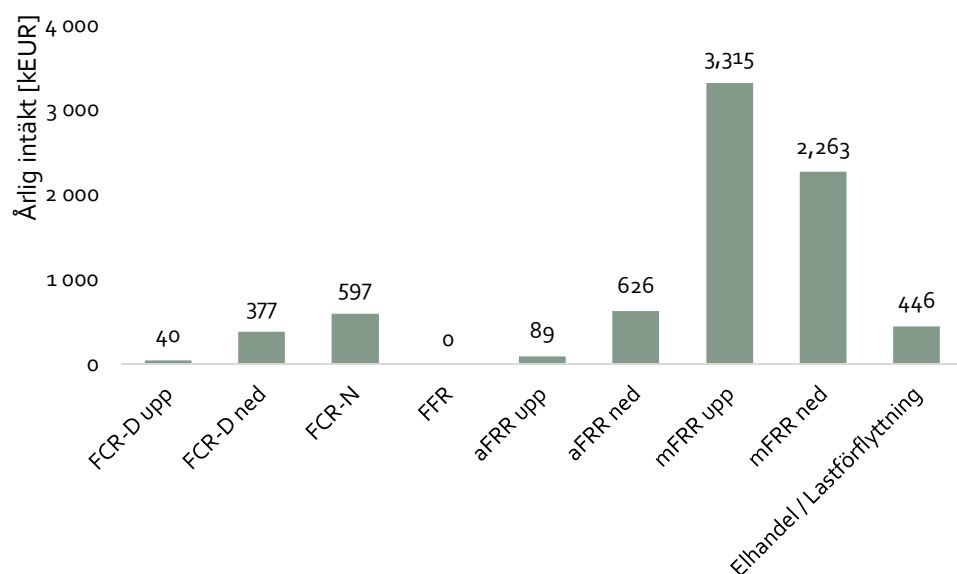
Figur 3. Fördelning av årliga intäkter och kostnader för batterilagret för år 2035 för prisscenario 2 (elhandel och effektavgift redovisar besparing till följd av lastförflyttning).

När det kommer till stödtjänstmarknaderna är det mFRR som är den främsta marknaden, både sett till marknadsdeltagande och intäkter. Totalt budar batterilagret ut kapacitet mot mFRR upp och mFRR ned marknaderna 51 % av årets timmar. Därefter kommer elhandel och lastförflyttning med 19 % av årets timmar.



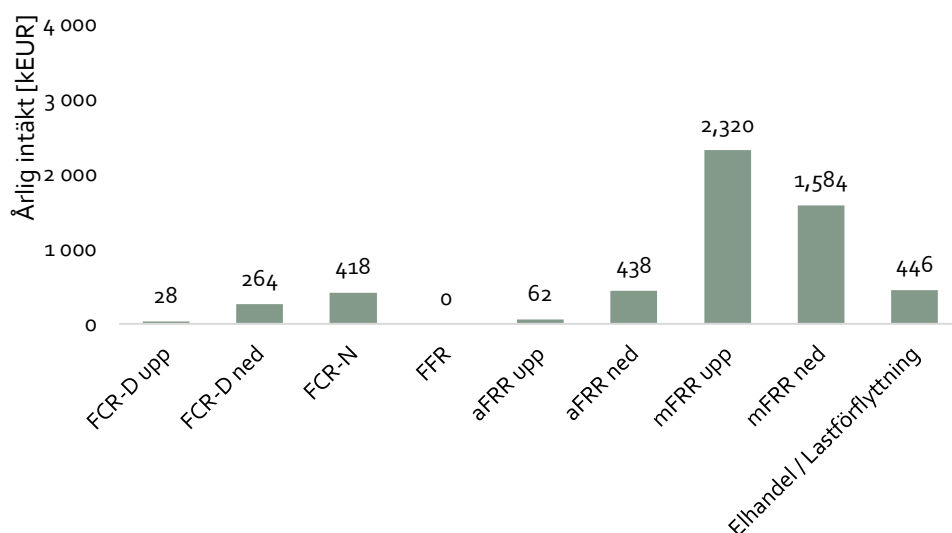
Figur 4. Distribution av batterilagrets årliga timmar mot de olika marknaderna.

Sett till intäkterna för de olika marknaderna är det även här mFRR-marknaderna som är dominerande med ca 5,6 MEUR totalt för upp- och nedreglering tillsammans för prisscenario 1, motsvarande drygt 70% av de totala intäkterna, enligt Figur 5. Intäkterna från elhandeln och lastförflyttningen är klart mindre i förhållande till tiden som används för det, motsvarande ca 6% av de totala intäkterna.



Figur 5. Fördelning av batterilagrets årliga intäkter per marknad för ett exempelår för prisscenario 1.

För prisscenario 2 är intäkterna från de olika stödtjänstmarknaderna något lägre och mFRR marknadens totala intäkt (upp och ned-reglering) summerar till ca 3,9 MEUR vilket fortfarande motsvarar precis 70% av de totala intäkterna. Lastförflyttningens bidrag till de totala årliga intäkterna är något större med ca 8% för det justerade prisscenariot.



Figur 6. Fördelning av batterilagrets årliga intäkter per marknad för år 2035 för prisscenario 2.

5.3.2 Termiskt lager – mekaniskt integrerat bruk

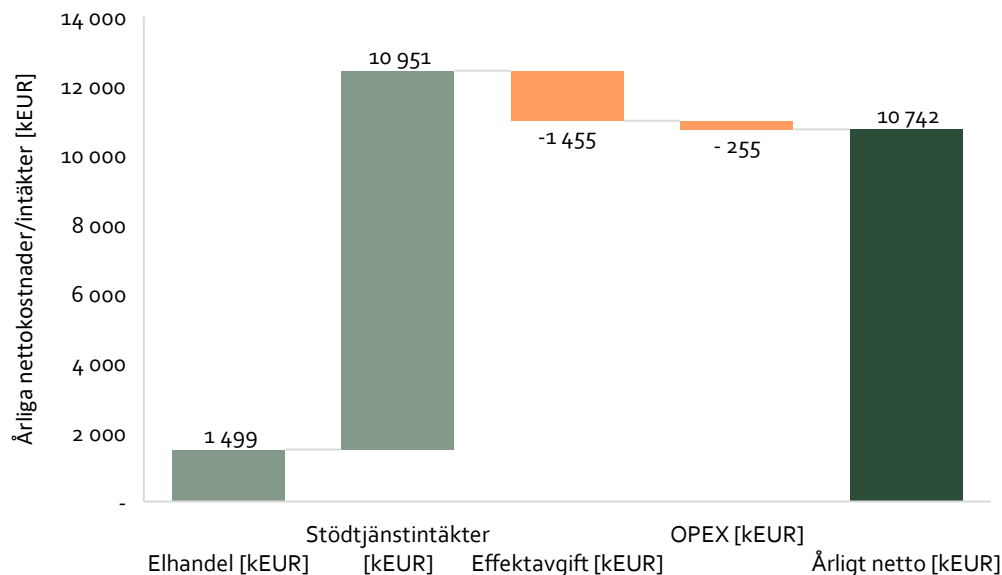
För det mekaniska bruket visar resultatet från modelleringen att en investering i ett termiskt lager skulle ge lönsamhet i prisscenariot med 2025 års nivåer, men inte för det justerade scenariot vilket ger ett svagt negativt resultat och en IRR på 6%, vilket redovisas nedan i Tabell 8.

Tabell 8. Finansiella nyckeltal för termiskt energilager vid mekaniskt bruk

Finansiellt nyckeltal	Scenario 1	Scenario 2
NPV [kEUR]	74 300	-2 800
IRR [%]	21	6

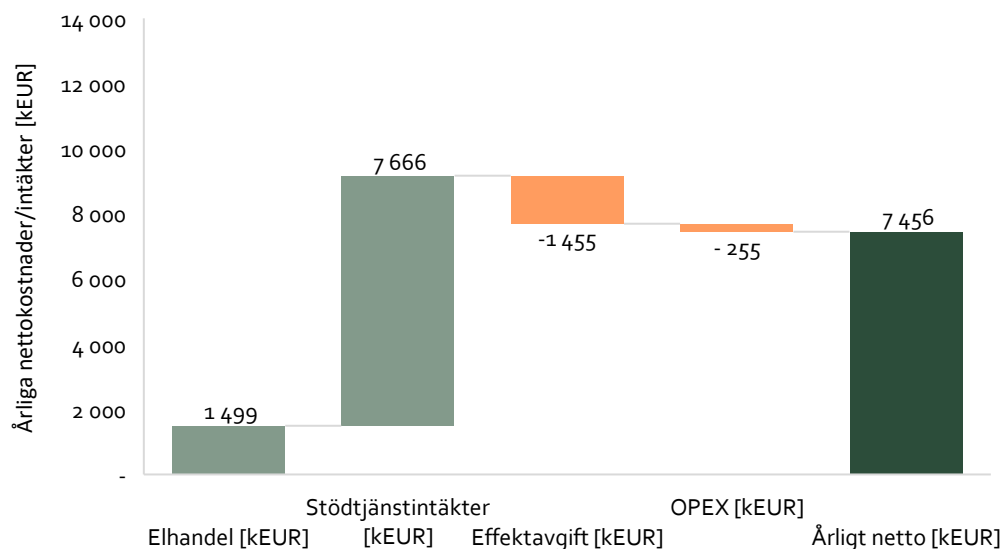
Lönsamheten för investeringen i det termiska lagret är alltså känsligt för framtida antaganden om prisnivåer, vilket reducerar främst intäkterna från stödtjänstmarknaderna.

Nedan i Figur 7 visas resultat för prisscenario 1, och det är tydligt att intäkterna från stödtjänstmarknader som uppgår till nästan 11 MEUR är den främsta faktorn som driver det positiva årliga nettoresultatet om ca 10,7 MEUR. På kostnadssidan är det den ökade kostnaden för effektagiften som är den största komponenten av de årliga kostnaderna. Det är till följd av den förändrade profilen för elkonsumtion gentemot elnätet, med mer varierad profil och högre effekttoppar, vilket driver upp kostnaden för effektagiften.



Figur 7. Fördelning av årliga intäkter och kostnader för det termiska lagret för ett exempelår för prisscenario 1 (elhandel och effektagift redovisar besparing/ökad kostnad till följd av lastförflyttning).

För prisscenario 2 med justerad indexering av 2025 års priser är intäkterna för stødtjänstmarknaderna fortsatt den främsta intäktströmmen för det termiska energilagret, om ändå något lägre på ca 7,7 MEUR för exempelåret 2035 enligt Figur 8 nedan. De övriga intäkt- och kostnadskomponenterna är de samma för scenario 2 vilket resulterar i nettoresultatet på cirka 7,5 MEUR.



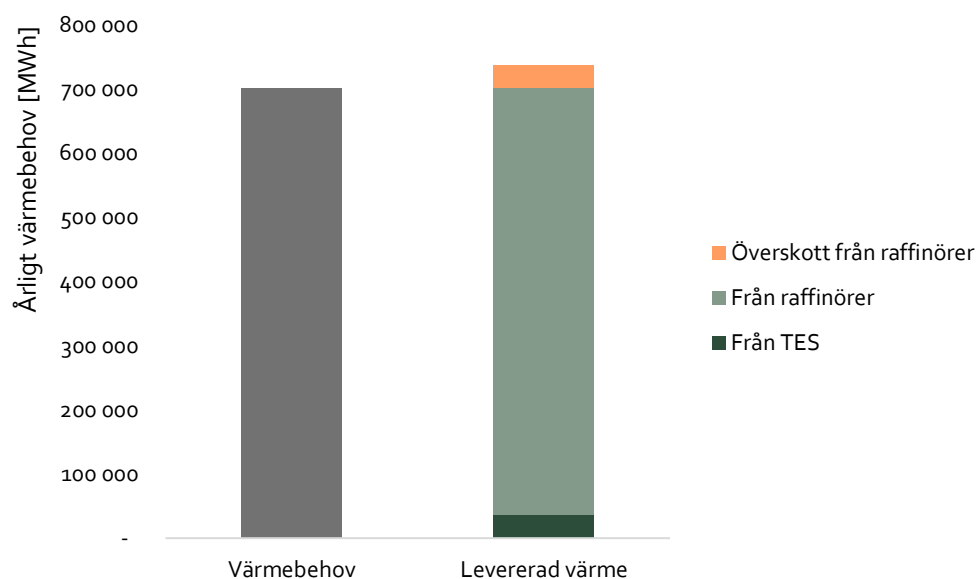
Figur 8. Fördelning av årliga intäkter och kostnader för det termiska lagret för år 2035 för prisscenario 2 (elhandel och effektagift redovisar besparing till följd av lastförflyttning).

Energilagret möjliggör lastförflyttning av raffinörens elkonsumtion till timmar av lägre elpris, men orsakar i och med det högre toppeffekter när raffinörens last sammanfaller med uppladdningen av det termiska lagret. Dessutom innebär lastförflyttningen att raffinörens effekt begränsas under perioder med högre

elpriser då värmebehovet kan fås från det termiska lagret, vilket i sin tur resulterar i att raffinören behöver drivas på högre effekt under vissa timmar för att kompensera för den förlorade massaproduktionen under timmar då effekten reglerats ned och därmed förhindra att lagret av massa tar slut.

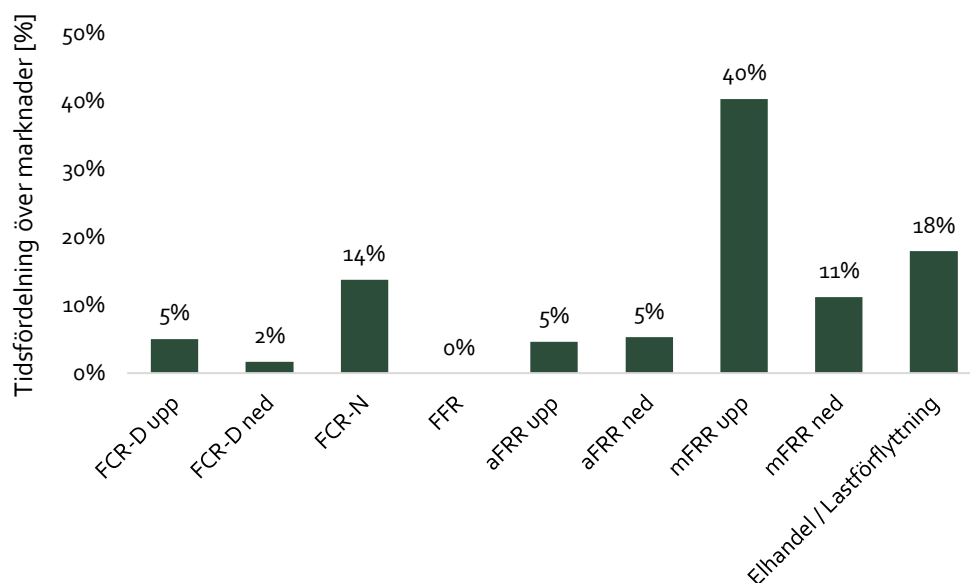
En ytterligare konsekvens av detta är den adderade värmeförseln då raffinören körs på högre effekt än normal last för att ta i kapp produktionsbortfall från när den reglerats ned. Eftersom värme tillgodoses från energilagret under de timmar raffinörens effekt regleras ned, innebär det att ett överskott av värme från raffinören levereras samt att den totala elkonsumtionen ökar över ett år då både raffinören och det termiska lagrets elbehov adderas. Dock visar resultaten att elhandelkostnaderna trots detta är lägre med det termiska energilagret, till följd av att konsumtionen förflyttas i tid till timmar med lägre elpriser.

Värmeöverskottet som levereras från raffinörerna utgör ca 5 % av det årliga totala värmebehovet, vilket visas i Figur 9 nedan. Denna överskottsvärme kan ha flera potentiella nyttor, exempelvis kan den levereras till fjärrvärmenätet för bruk som är integrerade i nätet, eller uppgraderas till högre värme i en värmepump. Dock kan värmeöverskottet också innebära eventuella ökade kostnader i form av installationer av kylanordning och fläktar, om värmen inte kan nyttjas i bruket eller till kringliggande system.



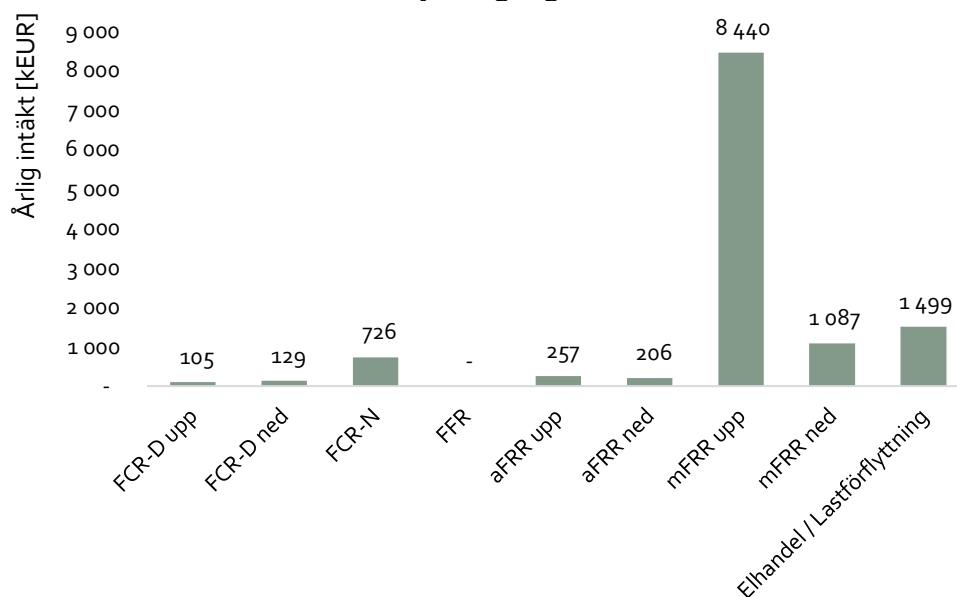
Figur 9. Årligt värmebehov och fördelning av levererad värme.

Det termiska lagret möjliggör för att buda ut raffinörens effekt på stödtjänstmarknader, vilket görs för majoriteten av årets timmar, med enbart 18% av tiden som går till lastförflyttning med hjälp av energilagret enligt Figur 10. Tydligt från figuren är att mFRR upp är den huvudsakliga marknaden med 40% av årets timmar. Uppreglering innebär för en konsumtionsanläggning att förbrukningen reduceras, vilket generellt sett är möjligt i större utsträckning än att öka förbrukningen, vilket syns på marknadsdistributionen.



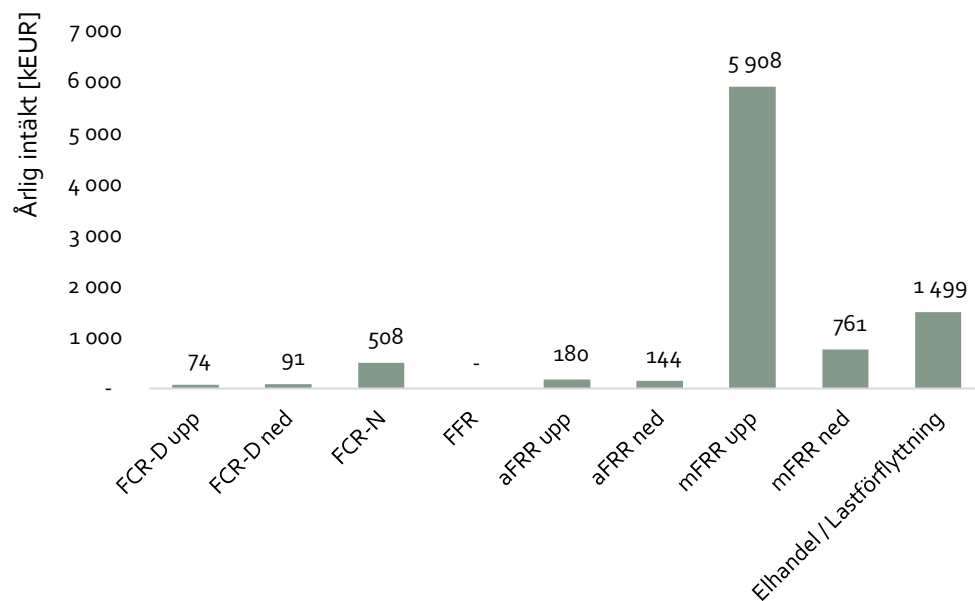
Figur 10. Distribution av det termiska lagrets årliga timmar mot de olika marknaderna.

När det kommer till intäktsfördelningen är det tydligt att mFRR upp även där är den dominerande marknaden vilket syns tydligt nedan i Figur 11. För mFRR upp marknaden uppgår intäkterna till drygt 8 MEUR årligen för prisscenario 1, motsvarande nästan 70% av de totala årliga intäkterna. Besparingen av elhandelskostnaderna vid lastförflyttning utgör ca 12% av intäkterna.



Figur 11. Fördelning av det termiska lagrets årliga intäkter per marknad för ett exempelår för prisscenario 1.

För prisscenario 2 är mFRR upp fortsatt den främsta intäktsdrivande marknaden med en årlig intäkt om knappt 6 MEUR för exempelåret 2035, enligt Figur 12 nedan. Med något lägre prisnivåer för scenario 2 uppnår enbart mFRR upp-intäkterna till drygt 60% av de totala årliga totala intäkterna, och tillsammans med mFRR ned står mFRR marknaden i stort för lite drygt 70% av intäkterna. Lastförflyttning bidrar till en mindre besparing motsvarande 16% av intäkterna.



Figur 12. Fördelning av det termiska lagrets årliga intäkter per marknad för år 2035 för prisscenario 2.

Av de årliga stödtjänstintäkterna kommer 19% från timmar då raffinören körs på högre effekt för att ta i kapp produktion och säkerställa att massalagret inte tar slut. Dessa timmar är den budbara kapaciteten för uppreglering större, eftersom det finns högre effektförbrukning att reducera. Alltså bidrar ikappkörningen av raffinörerna på högre effekt även till ökade intäkter från stödtjänstmarknaderna, utöver att de driver något ökade kostnader för elkonsumtion och eventuellt tilläggskostnader för att ta hand om restvärmen.

6. Slutsatser

Syftet med projektet har varit att fördjupa förståelsen för hur energilager kan användas inom massa- och pappersindustrin för att öka flexibiliteten på elmarknaden, samt att bedöma vilka nyttor och vilken möjlig lönsamhet som kan uppstå för olika typer av bruk. Studien visar att energilager kan skapa betydande flexibilitet, men att potentialen är starkt beroende av brukets processutformning, energibalans, nätförutsättningar och möjligheter att delta på olika el- och stödtjänstmarknader.

En övergripande slutsats är att energilager framför allt är intressanta för bruk som är nettokonsumenter av el och där lagret kan användas för att minska exponeringen mot höga elpriser, flytta elanvändning i tid och skapa nya intäkter genom stödtjänster. För bruk som redan är nettosäljare av el, exempelvis många kemiska avsalubruk, är nyttan mer anläggningsspecifik och beror bland annat på möjligheten att öka värdet av den egna elproduktionen eller att skapa ytterligare reglerbarhet utan att påverka process- och kemikaliebalanser. Studien visar också att det är svårt att ge generella rekommendationer för massa- och pappersindustrin som helhet. Bruken skiljer sig avsevärt åt vad gäller produktionsprocesser, energisystem, ångbalanser, intern elproduktion, nätanslutning och befintlig flexibilitet. Därför krävs bruksspecifika analyser för att bedöma den faktiska potentialen för energilager, både tekniskt och ekonomiskt.

6.1 Bedömning av möjligheter till lönsamhet med energilager

För integrerade bruk som är nettokonsumenter av el framstår batterilager som en särskilt relevant lösning. Batterilager har kort responstid, hög styrbarhet och goda förutsättningar att delta på flera stödtjänstmarknader. Den kvantitativa analysen visar att ett batterilager vid ett kartongbruk integrerat med kemisk massaproduktion kan ge god lönsamhet, framför allt genom intäkter från stödtjänstmarknaderna. Lastförflyttning och reducerade elhandelskostnader bidrar också positivt, men utgör en mindre del av den totala nyttan. Resultaten är dock känsliga för framtida prisnivåer på stödtjänstmarknaderna. Med justerade prisantaganden minskar lönsamheten, men investeringen visar fortsatt positivt ekonomiskt resultat i det analyserade fallet.

För integrerade bruk med mekanisk massaproduktion visar studien att termiska energilager kan skapa viktig processflexibilitet genom att delvis frikoppla ångbehovet i pappersproduktionen från elförbrukningen i raffinörerna. Detta möjliggör reducerad elanvändning under perioder med höga elpriser utan att pappersproduktionen behöver avbrytas. Det termiska lagret kan även skapa förutsättningar för deltagande på stödtjänstmarknader, särskilt mFRR. Den ekonomiska analysen visar dock att lönsamheten är mer osäker än för batterilagret. I scenariot med 2025 års prisnivåer uppnås god lönsamhet, medan det justerade prisscenariot ger ett svagare resultat. Detta visar att termiska lager har stor teknisk potential, men att investeringskostnad, prisutveckling på stödtjänstmarknaderna och hantering av överskottsvärme är avgörande för om det skall vara ekonomiskt attraktivt.

En viktig slutsats är att stödtjänstmarknaderna i dagsläget är den dominerande intäktskällan för båda de analyserade typfallen. I både batterifallet och det

termiska lagret står mFRR-marknaderna för en stor del av intäkterna. Detta innebär samtidigt att lönsamheten är känslig för förändringar i marknadsdesign, prisnivåer, konkurrens och förkvalificeringskrav. De höga prisnivåer som observerats under delar av 2025 bör tolkas med försiktighet vid investeringsbeslut. En mer mogen och konkurrensutsatt stödtjänstmarknad kan ge lägre intäkter än de historiska nivåerna.

6.2 Bedömning av möjligheter med olika typer av energilager

Batterilager bedöms ha bäst förutsättningar på kort sikt, framför allt eftersom tekniken är kommersiellt etablerad och väl anpassad till dagens stödtjänstmarknader. Batterier kan dessutom installeras utan omfattande ingrepp i processsystemen, vilket minskar den tekniska integrationsrisken. Samtidigt är batterilager förknippade med betydande investeringskostnader och intäkterna är starkt beroende av fortsatt möjlighet att kombinera flera marknader.

Termiska energilager bedöms ha stor potential i bruk där ång- och elbalanser är starkt kopplade, särskilt integrerade bruk med mekanisk massaproduktion.

Tekniken kan bidra till att öka flexibiliteten utan att direkt påverka produktionsprocessen. För att termiska lager ska bli mer attraktiva krävs dock antingen lägre investeringskostnader, bättre möjligheter att värdera processnyttor eller kompletterande intäkter, exempelvis genom nyttiggörande av överskottsvärme i fjärrvärmenät eller andra industriella värmesystem. Interna lager av mellanprodukter, såsom massa- eller flislager, kan bidra med viss flexibilitet men är sällan tillräckliga som fristående flexibilitetsresurs. De kräver ofta överkapacitet i processutrustning för att produktionen ska kunna köras ikapp efter en nedreglering. Detta kan medföra försämrade energieffektivitet, ökad belastning på utrustning och potentiella konsekvenser för driftstabilitet och produktkvalitet. Interna lager bör därför främst ses som en möjliggörare i kombination med andra flexibilitetslösningar, snarare än som ett fullständigt alternativ till energi- eller effektlager.

Sammantaget visar studien att energilager kan bli ett viktigt verktyg för att öka flexibiliteten i massa- och pappersindustrin och samtidigt bidra till ett mer robust elsystem. Den största ekonomiska potentialen finns i nuläget i kombinationen av energilager och aktivt deltagande på stödtjänstmarknaderna. För att realisera denna potential krävs dock detaljerade analyser av varje enskilt bruk, där tekniska begränsningar, produktionsrisker, nätkostnader, marknadsaccess och framtida prisutveckling vägs samman.

6.3 Fortsatt arbete

Fortsatta analyser bör särskilt fokusera på:

- bruksspecifika fallstudier där verkliga processdata, nätabonnemang och driftbegränsningar inkluderas,
- jämförelser mellan batterilager och termiska lager för mekaniskt integrerade bruk,
- möjligheten att kombinera energilager med aggregatorer och optimeringstjänster,

- påverkan av framtida marknadsdesign och förändrade stödtjänstpriser,
- potentialen för att skapa ytterligare värde genom koppling till fjärrvärmenät eller andra externa värmebehov,
- hur interna lager och överkapacitet i processutrustning kan samverka med energilager för att skapa större flexibilitet utan att försämra produktionens effektivitet eller stabilitet.

Den övergripande bedömningen är att energilager inte är en generell standardlösning för alla massa- och pappersbruk, men att de i rätt process- och marknadskontext kan skapa betydande tekniska och ekonomiska nyttor. Batterilager är närmast kommersiell implementering i de fall där stödtjänstintäkter kan säkras, medan termiska lager har en mer processnära potential som kan bli särskilt värdefull i takt med ökade krav på flexibilitet i elsystemet.

Referenser

- A. K. Verma, S. K. Singh, R. K. Pachauri och A. K. Gupta, *A comprehensive review of energy storage systems and their applications*, Energy Storage Reports, vol. 6, 2024, artikel nr 101482, <https://doi.org/10.1016/j.esr.2024.101482>
- Alice R. Thörnblom & Hilda Wallström, *Analys och utveckling av energinyckeltal för anpassning till elförbrukningsflexibilitet inom massa- och pappersindustrin*, 2024
- Amna Abdulrahim m.fl., *Batterilager och flexibilitet*, rapport 2025:1072, Energiforsk, 2025, <https://energiforsk.se/media/34019/2025-1072-batterilager-och-flexibilitet.pdf>
- A. S. Aneke och M. Wang, *Energy storage technologies and real-life applications – A state of the art review*, Renewable and Sustainable Energy Reviews, vol. 67, 2017, s. 797–814, <https://doi.org/10.1016/j.rser.2016.11.102>
- Herre, Tomasini et. Al. (2020) Elsevier, *Mechanical Energy Storage*, ScienceDirect Topics, available at: <https://www.sciencedirect.com/topics/engineering/mechanical-energy-storage>
- Energiforsk, *Baselinemetoder för flexibilitetsprodukter*, rapport 2021:826, Energiforsk, april 2022. <https://energiforsk.se/media/31177/baselinemetoder-for-flexibilitetsprodukter-energiforskrapport-2021-826.pdf>
- Jenny Wilson m.fl., *High Temperature Storage for Steam Production: Ökad flexibilitet mot elmarknaden genom högttemperaturlager för ångproduktion* (2025). [2025-1149-high-temperature-storage-for-steam-production.pdf](https://energiforsk.se/media/34120/2025-1149-high-temperature-storage-for-steam-production.pdf)
- Nordic balancing market outlook 2030, updated data 2025.
- Olsson, David och Lars Olsson, *Metodik för flexibilitet i elnäten*, rapport 2025:1088, Energiforsk, 2025. <https://energiforsk.se/media/34120/2025-1088-metodik-for-flexibilitet-i-elnatet.pdf>
- Reece, R., Lekakou, C. & Smith, P.A., Past decade of supercapacitor research – Lessons learned for future directions, Journal of Energy Storage, vol. 70, 108062, 2023. <https://doi.org/10.1016/j.est.2023.108062>
- Rosendal & Öberg. (2025). *Ekonomisk potential för energilagring med batterisystem inom massa- och pappersindustrin*. <https://www.diva-portal.org/smash/get/diva2:1969199/FULLTEXT01.pdf>
- Svenska kraftnät. *Utbud på marknaderna för reserver*. (2026). <https://www.svk.se/aktorsportalen/bidra-med-reserver/behov-av-reserver-nu-och-i-framtiden/utbud-pa-marknaderna-for-reserver/>
- Vattenfall regionnätstariff 2025 <https://www.vattenfalleldistribution.se/globalassets/2.-foretag/abonnemang-och-avgifter/avtal-och-elnavgift/regionnatstariffer-2025.pdf>

Energilager i massa- och pappersbruk för ökad flexibilitet på elmarknaden

Ett elsystem med ökande andel väderberoende produktion ställer högre krav på flexibilitet. Massa- och pappersindustrin är en stor elanvändare men har samtidigt begränsade möjligheter att snabbt anpassa sin drift. Denna rapport undersöker hur olika typer av energilager kan användas i massa- och pappersbruk för att öka flexibiliteten, minska elkostnader och möjliggöra deltagande på el- och stödtjänstmarknader. Studien omfattar en genomgång av relevanta lagringstekniker, marknadsförutsättningar och fördjupade analyser av utvalda typfall.



Forskningsföretaget Energiforsk initierar, samordnar och bedriver forskning och analys inom energiområdet samt sprider kunskap för att bidra till ett robust, hållbart och konkurrenskraftigt energisystem. Energiforsk är ett politiskt neutralt och icke vinstutdelande aktiebolag som ägs av branschorganisationerna Energiföretagen Sverige och Energigas Sverige, det statliga affärsverket Svenska kraftnät, samt gas- och energiföretaget Nordion Energi. Läs mer på www.energiforsk.se.