

# **Tallinna Tehnikaülikool**

## **Energia lokaalse tootmise analüüs büroohoonele**

### **Osa II**

## **ENERGIASALVESTID JA SALVESTUSTEHNOLOOGIAD**

**Projektijuht:**

**Argo ROSIN (Vanemteadur)**

**Koostajad:**

**Argo Rosin, Siim Link, Imre Drovтар**

**Tallinn 2013**

## Sisukord

<b>1. SISSEJUHATUS .....</b>	<b>3</b>
<b>2. ENERGIASALVESTID JA TEHNOLOOGIAD .....</b>	<b>4</b>
2.1. ÜLDIST .....	4
2.1.1. <i>Energiasalvestite parameetrid</i> .....	5
2.1.2. <i>Koormuse juhtimine</i> .....	6
2.1.3. <i>Elutsükli kulud</i> .....	6
2.2. HÜDROAKUMULATSIOONIJAAM .....	7
2.3. MAA-ALUNE HÜDROAKUMULATSIOONIJAAM .....	9
2.4. SURUÕHK ENERGIASALVESTID.....	9
2.5. HOORATASENERGIASALVESTID.....	11
2.6. ÜLIKONDENSAATOR-ENERGIASALVESTID.....	13
2.7. ÜLIJUHTIVAD ENERGIASALVESTID .....	15
2.8. VESINIKENERGIASALVESTID .....	17
2.9. PATAREI ENERGIASALVESTID.....	19
2.9.1. <i>Pliiakud</i> .....	20
2.9.2. <i>Nikkel-kaadmium (NiCd) akud</i> .....	21
2.9.3. <i>Väävel-naatrium (NaS) akud</i> .....	22
2.9.4. <i>Läbivooluakud</i> .....	23
2.9.5. <i>Vanaadium-redoks (VR) akud</i> .....	23
2.9.6. <i>Polüsulfiid bromiid akud</i> .....	24
2.9.7. <i>Tsink bromiin akud</i> .....	25
2.10. ÜLEVAADE SOOJUSE SALVESTAMISE VÕIMALUSTEST.....	27
2.10.1. <i>Aktiivne salvestusviis</i> .....	28
2.10.2. <i>Passiivne salvestusviis</i> .....	28
2.10.3. <i>Faasimuutusega salvestamine</i> .....	28
2.10.4. <i>Faasimuutusega salvestamine</i> .....	32
2.10.5. <i>Keemiline salvestamine</i> .....	42
2.10.6. <i>Külma salvestamine</i> .....	45
2.10.7. <i>Soojussalvestite kokkuvõte</i> .....	49
2.11. SALVESTUSTEHNoloogiate ELU- JA KULUTSÜKLI KARAKTERISTIKUD .....	50
2.11.1. <i>Salvestite tasuvus</i> .....	54
<b>3. KASUTATUD KIRJANDUS .....</b>	<b>56</b>

## 1. Sissejuhatus

Käesolev aruanne on koostatud Tallinna Tehnikaülikooli ja Riigi Kinnisvara AS koostöölepingu nr LEP12154 "Energia lokaalse tootmise analüüs büroohoonele" raames.

Kirjeldatud lepingu raames koostatud aruanne on jaotatud kolme ossa, milledeks on:

- OSA 1: Taastuenergialahendused
- OSA 2: Energiasalvestid ja salvestustehnoloogiad
- OSA 3: Näidishoone

Käesolev aruanne annab põgusa ülevaate hoonetel rakendatavatest ja mitte rakendatavatest energiasalvestitest ning salvestustehnoloogiatest nagu:

- Elektromehaanilised energiasalvestid
- Elektrokeemilised energiasalvestid
- Soojuse salvestid ja materjalid

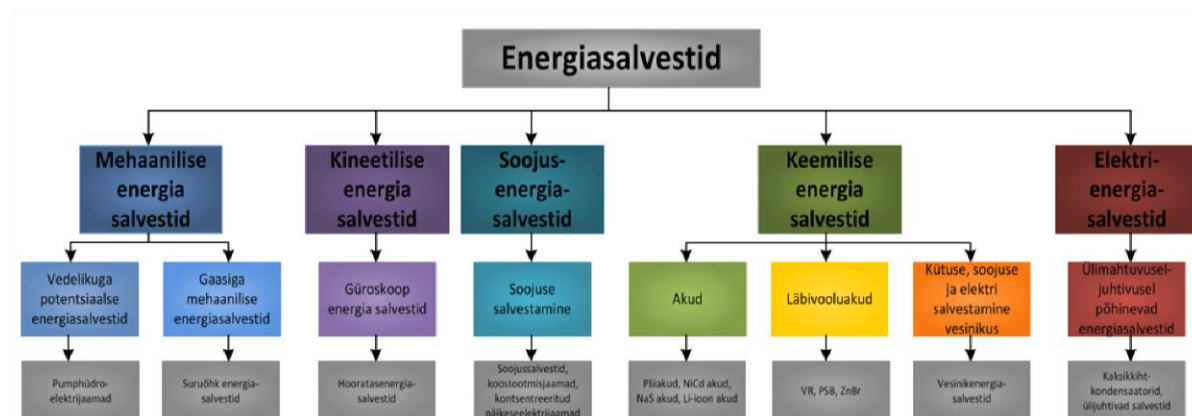
Lisaks eelnevale antakse ülevaade salvestustehnoloogiate elu- ja kulutsükli karakteristikutest ja lihttasuvusest elektri hinnaga spekulatsioonidel. Koostatud osas on salvestite maksumused esitatud vastavalt algandmetele dollarites ja eurodesse teisendamisel on kasutatud kurssi 1€=1,3\$. Aruandes esitatud hindasid tuleb võtta reservatsiooniga ja iga konkreetse juhtumi puhul teha vastav hinnapäring.

## 2. Energiasalvestid ja tehnoloogiad

### 2.1. Üldist

Elektrisüsteem toimib tarbimise ja tootmise tasakaalu põhimõttel, mida tuleb bilansis hoida reaajas. Õigesti valitud salvestustehnoloogia aitab siluda elektrisüsteemi koormusgraafikut ning optimeerida tootmiseseadmete tööd.

Salvestusseade töötamise põhimõte seisneb selles, et elektrivõrgust võetud elekter muundatakse mingisse teise energialiiki, mille salvestamine on lihtne. Vajamineval momendil võetakse salvestatud energia ning muundatakse tagasi elektriks, mis omakorda suunatakse tagasi võrku [DAV80]. Kuna salvestusseadme töötsükkel ei ole 100% tõhus, erineb võrku antud elektrienergia võrgust võetud energiast salvestussüsteemi kadude võrra. Energiasalvestid leiavad rakendust paljudes erinevates seadmetes ning protsessides, kuna erinevatel salvestitel on väljundvõimsuse ja salvestatud energia vahemik lai. Joonis 2.1 kirjeldab erinevat tüüpi energiasalvestite klassifikatsiooni nende salvestusmetoodika järgi.



**Joonis 2.1 Energiasalvestite liigitus**

Vaatamata sellele, et energiasalvestitel on sõltuvalt tüübist erinevad parameetrid ja tunnused, saab neid kirjeldada ka mõningate ühiste näitajate alusel. Kõige tähtsam neist on loomulikult mahtuvus – salvesti maksimaalne elektri salvestamise võimekus, ametlike mõõtühikutena kasutatakse megavatt-tunde (MWh) või kilovatt-tunde (kWh). Teine tähtis parameeter on seadme ühikvõimsus – maksimaalne kestev võimsus, mida salvesti suudab arendada; mõõtühikuteks megavatt (MW) ja kilovatt (kW). Kolmanda tähtsa parameetrina võiks mainida seadme kasutegurit, mida tuleb arvestada tasuvus- ja projektarvutustes. Kasutegur kajastab salvestusprotsessi tõhusust protsentides (kirjeldab väljundenergia suhet sisendenergiasse).

Teistest parameetritest on veel olulised elektrikvaliteedi näitajad, mis kirjeldavad salvesti võimekust suunata salvestatud elektrit võrku ilma pingele ja voolu harmoonilisteta, pingele

lohkude-muhkudeta ning muude häiringuteta. Reaktsiooni ajakonstant, mis kirjeldab seadme reageerimiseks kuluvat aega energia võrku tagasi andmiseks alates vastavasisulise käsu saamisest.

Tarbimise ja tootmise tasakaalustamisel eksisteerib kaks koormuse juhtimise põhimõtet. **Koormuse ühtlustamine** (i.k. *load levelling*): energiasalvestit laetakse tipuvälisel ajal ning kasutatakse seejärel tipuajal tipukoormuse vähendamiseks. Sellest tulenevalt muutub tootmiseseadmete kasutuskõver ühtlasemaks ning tippude jaoks tootvaid jaamu saab asendada baaskoormusjaamadega. Teine põhimõte hõlmab endas **koormuse järgimist** (i.k. *load following*), mille puhul salvesti järgib tarbimiskõverat. Kui tootmine ületab tarbimist, siis salvesti salvestab energiat ning kui tarbimine ületab tootmist, siis toimib see kui täiendavtootmiseseade [DAV09].

Osade salvestisüsteemide ülesehitus on suhteliselt keeruline, mistõttu tuleb arvestada et nende esialgne investeeringu- ja ehituskulu on kõrgem kui mõnel selle alternatiividest. Sellest tulenevalt tuleks esialgsete arvutuste tegemisel kasutada erinevate alternatiivide hindamiseks elutsüklikulu (i.k. *life cycle costing, LCC*) hindamise meetodikat, milles on arvesse võetud kõiki otseseid ja kaudseid kulusid mingi konkreetse ajaperioodi vältel. Ajaperioodiks võetakse üldjuhul 10 kuni 30 aastat, sõltuvalt seadme elueast. Saadud kulud diskonteeritakse nüüdisväärtusesse, et erinevad projektid oleksid omavahel võrreldavad.

### 2.1.1. Energiasalvestite parameetrid

- **Ühikvõimsus:** maksimaalne võimsus, mida seade on võimeline saavutama salvestatud energiat võrku tagasi andes. Mõõdetakse tavaliselt kilovattides (kW) ja megavattides (MW).
- **Energiamahutavus:** salvestusseadme summaarne elektrienergia kogus, mida on võimalik salvestada. Mõõdetakse tavaliselt kilovatt-tundides (kWh) ja megavatt-tundides (MWh).
- **Kasutegur:** näitab salvestusseadme maksimaalset võimalikku energiakogust, mida on võimalik seadmest kätte saada selle tühjaks laadimisel, suhtena algselt salvestatud energiasse.
- **Reageerimiskiirus:** aeg, mille jooksul seade hakkab energiat võrku tagasi andma. Seadme eelnev seisund on oote- või salvestusrežiim.
- **Töotsükli kogukasutegur:** näitab seadmest kättesaadavat elektri kogust suhtena seadmesse ühe tsükli jooksul salvestatud ja tühjaks laetud elektri kogusesse.
- **Elektrikvaliteet:** iseloomustab korralikult projekteeritud ja paigaldatud seadme võimet tagada kliendile pidevat ja katkestuseta elektrit ning tulla toime kvaliteedi probleemidega,

nagu harmoonikud ja moonutused.

Salvesteid on laias laastus võimalik jagada kolme kategooriasse: lühiajalised energiasalvestid (sekundid või minutit), pikaajalised energiasalvestid (minutid kuni tunnid) ning ülipikaajalised energiasalvestid (mitmed tunnid kuni päevad). Põhimõtteliselt kirjeldab selline jaotus salvesti energiamahutavust (MWh). Mõlemat parameetrit, nii tühjenemisaega kui ka ühikvõimsust, on võimalik varieerida selliselt, et projekteerida vajadustele sobiva mahutavusega energiasalvesti.

#### *A. Lühiaegsed energiasalvestid*

Sellesse gruppi kuuluvad tehnoloogiad, millel on suur võimsustihedus ( $MW/m^3$ ) ning mis on võimelised reageerima lühikeste ajaperioodide jooksul. Lühiaegseid salvesteid kasutatakse üldjuhul elektrienergiakvaliteedi parendamiseks elektrivõrgus: tagamaks pingestabiilsust siirdeprotsesside (lühiste või lülitamiste) ajal, mis kestavad sekundeid või äärmisel juhul kuni minut.

#### *B. Pikaajalised energiasalvestid*

Neid tehnoloogiaid kasutatakse üldiselt elektrivõrgus süsteemiteenusteks ning on võimelised salvestama ja võrku andma energiat minutitest kuni tundideni. Üldiselt kasutatakse neid juhtimistarneteks, sageduse reguleerimiseks ja avariireservideks.

#### *C. Ülipikaajalised energiasalvestid*

Nagu nimigi ütleb (päevad, nädalad või kuud) kasutatakse neid seadmeid üldjuhul koormus- ja tootmisgraafikute järgmiseks 24 tunni või pikemate ajaintervallide jooksul.

### **2.1.2. Koormuse juhtimine**

Eksisteerib kaks koormuse juhtimise põhimõtet:

1. **Koormuse ühtlustamine:** salvestit laetakse tipuvälisel ajal (odava elektriga) ning kasutatakse seejärel tarbija juures tipuajal võrgust tarbitava tipukoormuse (kalli elektri osakaalu) vähendamiseks. Sellest tulenevalt muutub tootmiseseadmete võrgust tarbitava energia kasutuskõver ühtlasemaks ning tippude jaoks tootvaid jaamu saab asendada baaskoormusjaamadega.
2. **Koormuse järgimine:** salvesti järgib tarbimiskõverat. Kui tootmine ületab tarbimist, siis salvesti salvestab energiat ning kui tarbimine ületab tootmist, siis toimib see kui täiendav tootmiseade.

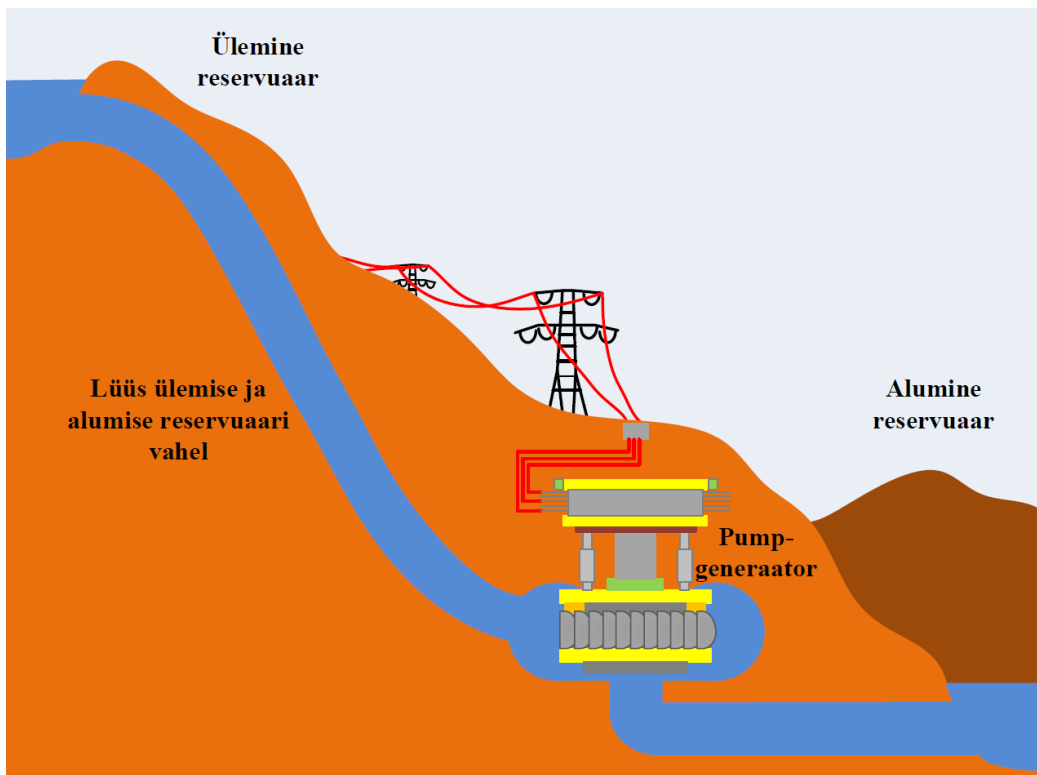
### **2.1.3. Elutsükli kulud**

Investeeringu tasuvuse hindamiseks tuleb kasutada elutsüklikulu hindamise meetodikat, milles arvestatakse erinevate alternatiivide kõikvõimalike muutuv- ja püsikuludega, mis tekivad teatud ajaperioodi jooksul (tavaliselt 10 või 30 aasta jooksul). Saadud tulemused

diskonteeritakse nüüdisväärtusesse, et neid oleks võimalik omavahel otseselt võrrelda. Elutsükli maksumuse hindamine on oluline, kuna üldjuhul on salvestustehnoloogiatesse tehtavad investeeringud võrdlemisi suured. Seega sellise meetodika kasutamine annab hea võimaluse hinnata investeeringu tasuvust teiste alternatiivsete lahendustega.

## 2.2. Hüdroadumulatsioonijaam

Hüdroadumulatsioonijaam või pumphüdrolektrijaam (PHAJ) (*Pumped Hydroelectric Energy Storage, PHES*), PHAJ koos konventsionaalse hüdrolektrijaamaga on kõige enam arenenud ja tänapäeval kasutuses olev energiasalvestus ja/või tootmise juhtimise viis (Joonis 2.2). Ühtlasi on PHAJ tänapäeval kõige laialdasemalt kasutuselolev suuremahuline energiasalvestusviis.



Joonis 2.2 Hüdroadumulatsioonijaam

Tööpõhimõte on lihtne: energiat salvestatakse potentsiaalse energiana, pumbates selleks vett maapinnast kõrgemal asuvasse reservuaari. Energia taaskasutamiseks tuleb ülemisse reservuaari pumbatud vesi lasta läbi hüdroturbiinide alumisse veehoidlasse tagasi.

Pumpamiseks kuluv energia arvutatakse alloleva järgneva valemi alusel:

$$E_1 = \frac{\rho \cdot g \cdot h \cdot V}{3600 \cdot \eta_P} \text{ (MWh)},$$

kus  $V$  tähistab pumbatava vee mahtu,  $h$  kõrgust millele vesi pumbatakse,  $\eta_p$  pumpade kasutegurit,  $\rho$  vee tihedust  $\text{kgm}^{-3}$  ning  $g$  vabalangemise kiirendust  $\text{ms}^{-2}$ .

Reservuaarist võrku tagasi antav energia on arvatav aga järgmise valemi järgi, kus  $\eta_G$  tähistab hüdroturbiinide kasutegurit:

$$E_2 = \frac{\rho \cdot g \cdot h \cdot V \cdot \eta_G}{3600} \text{ (MWh)}.$$

Näiteks,  $E_2 = 10\,000$  MWh,  $h = 300$  m,  $\rho = 1000$   $\text{kgm}^{-3}$  ja  $\eta_G = 0.87$ , kumbki kasutuseloleva reservuaari mahtuvus on 14 miljonit  $\text{m}^3$  võis siis pindalaga 1  $\text{km}^2$ , millest veetaseme kõrgus võib muutuda 14 m ulatuses. Tavaliselt on protsessi üleüldine kasutegur  $E_2/E_1 = \eta_G/\eta_p$  vahemikus 70...80%. Kõnealuse salvestustehnoloogia rakendamine sõltub eelkõige piirkonna geograafilistest omadustest, kuna selle rajamise eelduseks on teatud maastikulised omadused (kõrguste vahe). Üldjuhul leiab selliseid asukohti piirkondades, millel on ka kohalikule elanikkonnale tähtis visuaalne tähendus, mistõttu võib sellise salvesti ehitamine kohata suurt vastupanu. Suurte ehitusmahtude ning visuaalsete muutuste tõttu tuleb selliste projektide puhul rõhku panna keskkonnamõjude hindamisele [BAN09].

### **Kasutusala**

Lisaks suurele salvestusmahutavusele on PHAJ ka kiire reageerimiskiirusega, mistõttu on see ideaalne koormuste ühtlustamiseks. Jaamade reageerimisaeg võib olla kuni 10 minutit täielikust seisakust täisvõimsuse saavutamiseni mõlemas töörežiimis. Ooterežiimilt on võimalik saavutada täisvõimsus 10 kuni 30 sekundi jooksul.

Tänu kaasaegsetele muutuvkiirusega ajamitele on PHAJ võimalik kasutada ka sageduse reguleerimiseks nii pump- kui tootmisrežiimis (siamaani on sagedust võimalik olnud juhtida ainult tootmisrežiimis). See võimaldab PHAJ-del tarbida elektrit palju kulutõhusamalt, mis lisaks kasulikkusele suurendab ühtlasi ka jaama kasutegurit (kuni 3% võrra) ning pikendab selle eluiga.

PHAJ on võimalik kasutada tiputootmiseseadmetena ning elektrisüsteemi kustunust olekust taaskäivitamiseks, kuna on suure ühikvõimsusega ja piisavalt pika tühjenemisajaga. Lisaks pakub PHAJ koormust baaselektriijaamadele tipuvälistel aegadel, mis võimaldab neid kasutada optimaalses töörežiimis, pikendades nende eluiga ning suurendades kasutegurit.

### **Investeeringukulud**

Ühikvõimsuse maksumus jääb vahemikku 600 \$/kW kuni 2 000 \$/kW (462...1538 €/kW), sõltudes paljudest asjaoludest nagu suurus, asukoht ja liitumispunkt elektrivõrguga [BOY08].

### **Omadused**

Eelised: suur energiamahutavus ning ühikvõimsus; mõõdukas reageerimiskiirus; pikk eluiga.

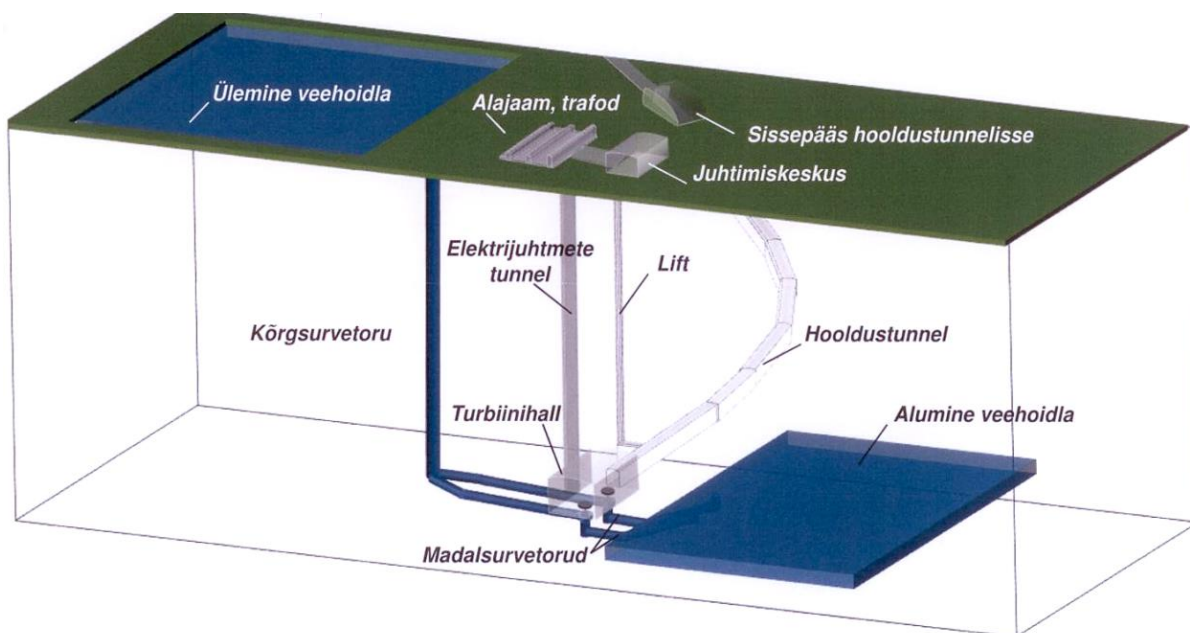


Puudused: erinõuded asukohale ja selle füüsilistele omadustele; laiaulatuslik mõju keskkonnale; mõõdukas kasutegur.

Hüdroakumulatsioonijaama

### 2.3. Maa-alune hüdroakumulatsioonijaam

Maa-alune PHAJ (*Underground Pumped Hydroelectric Energy Storage, UPHES*) tööpõhimõte on täpselt sama nagu tavalisel PHAJ-l: kahe reservuaari vahel on kõrguste vahe. Erinevuse tingib reservuaaride asukoht, nagu juba nimigi viitab asub kõnealuse PHAJ üks reservuaaridest maa all, vastupidiselt eelnevale, kus reservuaar asus maapinnast kõrgemal. Tavaliste PHAJ rajamisel kasutatakse ära geograafilisi maastiku eripärasid. Samas on maa-aluseid PHAJ teoreetiliselt võimalik rajada ka nendesse piirkondadesse, kus puuduvad sellised geoloogilised eeldused, viies teise reservuaari maa alla, näiteks vanadesse kaevandustesse. Vajalik sügavus sõltub täpsemalt juba jaama parameetritest ning vajalikust kõrguste vahest kahe reservuaari vahel (Joonis 2.3).



**Joonis 2.3** Maardusse rajatav PHAJ ehituslik põhimõte (Allikas: energiasalv.ee)

Maaalune hüdroakumulatsioonijaam pole kontorihoonete puhul majandulikult otstarbekas ja on tehniliselt raskesti teostatav.

### 2.4. Suruõhk energiasalvestid

Suruõhkenergiasalvestid (SÕES) (*Compressed Air Energy Storage, CAES*) on juba kasutusel olnud alates 1970. aastatest. Energiasalvestus toimub õhu mehaanilisel kokkusurumisel kompressoritega, mis suunatakse looduslikku gaasitihedasse maa-alusesse kambrisse (nt vanad soolakambrid, poorsed kivimid, jne.). Õhu vabastamisel rõhu alt

juhatakse see läbi generaatorajamite, mille kaudu suunatakse elekter tagasi võrku. Juhul kui õhu kokkusurumisel tekkinud soojus salvestatakse, siis mehaaniline protsess oleks teoreetiliselt 100% efektiivne. Tegelikuses on aga kogu tsükli kasutegur, muundamisel tekkivate kadude tõttu, suhteliselt madal. Lisaks on süsteemi keskmise reageerimiskiirusega ning salvestile on raske leida geoloogiliselt sobivaid asukohta [RUF06][LOM09].

Arvutustes eeldatakse, et õhk on ideaalne gaas, millel on konstantne erisoojus. Ideaalse gaasi teooriast on tuntud temperatuuri ( $T$ ), rõhu ( $P$ ) ja ruumala ( $V$ ) vaheline seos:  $PV = nRT$ , kus  $n$  tähistab moolide arvu ja  $R$  on *universaalne gaasikonstant*. Õhu kokkusurumiseks tehtav töö polütroopses protsessis avaldub sellisel juhul järgnevalt:

$$W = \frac{\gamma}{\gamma - 1} \cdot P_1 \cdot V_1 \cdot \left[ \left( \frac{P_2}{P_1} \right)^{\frac{\gamma}{\gamma - 1}} - 1 \right],$$

Kus  $P_1$ ,  $P_2$  ja  $V_1$ ,  $V_2$  tähistavad atmosfäärilises ja kokkusurutud olekus oleva gaasi rõhkusid ja ruumalaid. Kuna võimsus on ajaühikus tehtav töö ja õhuvool ( $Q$ ) ruumiühiku õhu liikumine ajaühikus ( $Q=V/t$ ), siis kokkusurumiseks kuluv võimsus ( $P_c$ ) avaldub järgnevalt:

$$P_c = \frac{\gamma}{\gamma - 1} \cdot P_1 \cdot Q \cdot \left[ \left( \frac{P_2}{P_1} \right)^{\frac{\gamma}{\gamma - 1}} - 1 \right],$$

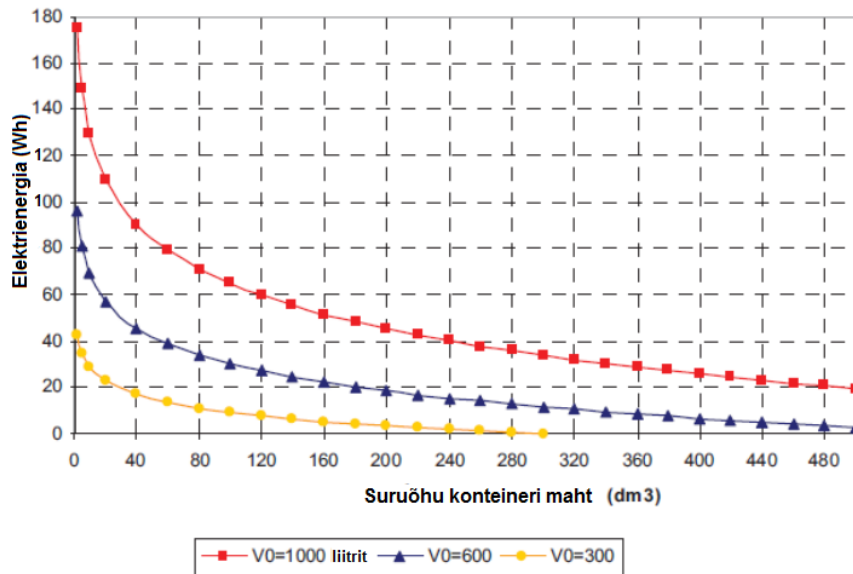
kus  $\gamma$  tähistab erisoojuste suhet,  $\gamma = C_p/C_v$  ning  $(P_2/P_1)$  on kokkusurutuse aste [VON09].

Alljärgnev joonis kirjeldab salvestatud potentsiaalse energia hulka, kui 300, 600 või 1000 liitrit õhku on aeglaselt kokkusurutud muutuva suurusega rõhuanumasse isotermilistes tingimustes (Joonis 2.4). Võrdluseks: täis laetud 12 V pliiakusse (mahtuvusega 40 Ah), on salvestatud 480 Wh energiat [PAL09].

## Rakendused

SÕES on teine ainuke suuremahuline energiasalvesti lisaks PHAJ-le. SÕES-I on suhteliselt kiire reageerimisaeg: seisakust 100% võimsuse saavutamiseks kulub vähem kui kümme minutit, 10% täisvõimsuse saavutamiseks kulub umbes 4 minutit ja 50%-lt täisvõimsuse saavutamiseks kulub ligikaudu 15 sekundit. Sellest tulenevalt on SÕES ideaalne salvesti tasakaalustamiseks suuri muutusi koormuses ja tootmises, lisaks on jaam võimeline taluma tihedaid sisse-välja lülitamistsükleid.

SÕES-e saab kasutada elektrivõrgule süsteemiteenuste pakkumiseks, näiteks sageduse reguleerimiseks, koormuse järgimiseks ning pinge reguleerimiseks. Seetõttu on SÕES-id muutunud eriti atraktiivseks energiasalvestusmeetodiks tuuleparkidega integreerimiseks. Praeguseks hetkeks on käivitatud mitmeid uuringuid, mille eesmärgiks on välja selgitada SÕES kasutamise perspektiivikus silumaks tuuleparkide muutlikku tootmist.



**Joonis 2.4 Salvestatud potentsiaalne energia sõltuvalt salvesti mahust**

### **Investeeringukulud**

SÕES investeeringukulu jääb 425...450 \$/kW (327...346 €/kW) juurde. Samas tuleb arvestada ka hoolduskuludega, mis jäävad orienteeruvalt 3...10 \$/kWh (2,3...7,7 €/kW) vahele. Kulud sõltuvad põhiliselt õhku salvestava reservuaari ehitusest [DAV09].

### **Omadused**

Eelised: väga suur energiamahutavus ja ühikvõimsus; pikk eluiga.

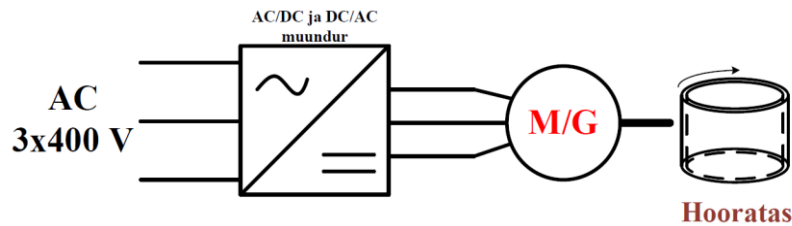
Puudused: madal kasutegur; laiaulatuslik keskkonnamõju; spetsiifilised asukohanõuded [BOY08].

## **2.5. Hooratasenergiasalvestid**

Viimaste aastate arengud jõuelektronika, kergekaaluliste, kuid tugevate, komposiitmaterjalide ning magnetlaagrite valdkonnas on hooratasenergiasalvestid (*Flywheel Energy Storage, FES*) muutunud üsnagi perspektiivikaks tehnoloogiaks, mida uuritakse ning arendatakse laialdaselt. Hooratasenergiasalvesti kujutab endast süsteemi, mis koosneb kolmest osast (Joonis 2.5):

- hooratas,
- mootor/generaator,
- muundur.

Elektrit salvestatakse hooratta pöörlevas massis kineetilise energiana (mootorrežiimis) ning muundatakse mehaaniliselt seejärel tagasi elektriks (generaatorrežiimis). Kaasaegsed kiirekäigulised hoorattad erinevad oma eelkäijatest selle poolest, et nad on kergemad ning pöörlemiskiirus on palju suurem.



### Joonis 2.5 Hooratas-energiasalvesti tööpõhimõte

Tänapäevased süsteemid töötavad enamasti, kas atmosfäärilistel rõhkude (100 kPa) ja vaakumilähedase rõhu (0,1 Pa) vahel, kusjuures suuremad kiirused on saavutatavad just madalamatel rõhkudel. Samas on aeglasekäigulised hooratassüsteemid suuremad, kuid neid võib kasutada ka atmosfäärilistel rõhkudel, ilma et kaod muutuksid liiga suureks [SIO08][ZHA04].

Pöörlev energia, mis salvestatakse hoorattas, defineeritakse järgmiselt:

$$E = \frac{1}{2} \cdot I \cdot \omega^2,$$

kus  $I$  on inertsmoment, mis on otseselt proportsionaalne hooratta massiga ja võtab arvesse selle kuju, ning  $\omega$  on nurkkiirus. Näiteks silindrilises hooratta inertsimoment avaldub järgmise valemiga:

$$I = \frac{1}{2} \cdot \pi \cdot h \cdot \rho \cdot (r_0^4 - r_i^4),$$

Kus  $r_0$  tähistab välist diameetrit ning  $r_i$  sisemist diameetrit.  $h$  tähistab silindri kõrgust ning  $\rho$  massitihedust.

Sellest tulenevalt on silindrikujulises hoorattas salvestatav energia arvutatav järgneva valemiga:

$$E = \frac{1}{4} \cdot \pi \cdot h \cdot \rho \cdot \omega^2 \cdot (r_0^4 - r_i^4)$$

Energia on võrdeline  $\omega^2$ -ga, mis tähendab et mida kiiremini hooratas pöörleb, seda rohkem energiat on see võimeline salvestama. Vaatamata sellele, eelistatakse väiksemaid ja kergemaid hooratassüsteeme, kuna nad on võimelised töötama ka rasketes tingimustes[WEN10]

### **Rakendused**

Hooratstel on ülikiire dünaamiline reageerimiskiirus, pikk eluiga, madal hooldusvajadus ning nad on keskkonnasõbralikud. Eeldatav eluiga on orienteeruvalt 20 aastat või kümned tuhanded töötükkid. Kuna salvestusseadmena kasutatakse mehaanilist keha, siis on seadet võimalik korduvalt täis ja tühjaks laadida, ilma et selle omadused halveneksid. Sellest tulenevalt kasutatakse hoorattaid elektri kvaliteedi parendamise rakendustes, nagu näiteks katkematud toiteallikad (*Uninterruptable Power Supply, UPS*), salvestamiseks elektrisõidukites muidu soojuseks muunduvat pidurdamisel tekkivat energiat või summutamiseks elektri-

süsteemis sageduskõikumisi. Eelpoolmainitud rakendustest tulenevalt sobivad hoorattad ideaalselt ka kompenseerimaks varieeruvat tuulikute toodangut.

### **Investeeringukulud**

Käesoleval hetkel jäävad aeglasekäiguliste hooratasenergiasalvestite investeeringukulud vahemikku 200 .... 300 \$/kWh (154...231 €/kW) ning kiirekäiguliste hooratasenergiasalvestitel 25 000 \$/kWh (19230 €/kW) juurde. Kiirekäiguliste hooratasenergiasalvestite kõrged investeeringukulud on tingitud selle tehnoloogia arendusstaadiumist. Akusüsteemidega võrrelduna on hooratas-energiasalvestitele kõige tugevamaks konkurendiks pliiakud. Pliiakudel on sarnased omadused nagu hooratstelgi, kuid maksavad umbes 33% vähem. Samas jällegi on hooratstel pikem eluiga, nad vajavad vähem hooldust, laadimiseks/tühjenemiseks kulub vähem aega, nad võtavad vähem ruumi ning on vähem keskkonnaohtlikud [DAV09].

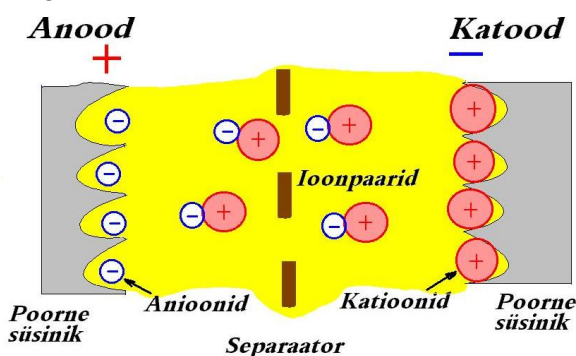
### **Omadused**

Eelised: suur ühikvõimsus; lühike reageerimisaeg; pikk eluiga; nõuavad vähe hooldust; kõrge kasuteguriga; väikesed keskkonnamõjud.

Puudused: madal energiatihedus [BOY08].

## **2.6. Ülikondensaator-energiasalvestid**

Kaksikihtkondensaatorid (ülikondensaatorid, superkondensaatorid, inglise keeles ka *Electrical Double-Layer Capacitors, EDLC*) on valmistatud süsinikust, millel on ülisuur aktiivpind, millega on võimalik saavutada mahtuvusi, mis ulatuvad faraditest kuni tuhandete faraditeni. Ülikondensaatorite (*Supercapacitor Energy Storage, SCES*) tööpõhimõte ei seisne elektrokeemilistes protsessides, vaid elektrilaengute absorbeerimisel või desorbeerimisel laadimis- ja tühjenemistsüklite ajal (Joonis 2.6). Ülikondensaatoreid iseloomustavad kõrged laadimis- ja tühjendamisvoolud, madal hooldusvajadus ning pikk eluiga. Samal ajal on kondensaatoril väikesed lekkevoolud, mis võimaldab energiat salvestada pika aja vältel ning kasutegur ületab 95%.



**Joonis 2.6 Ülikondensaatori tööpõhimõte**

Ülikondensaatoris, mahtuvusega  $C_T$  ja pingega  $U_{Tmax}$  on maksimaalselt salvestatav energia  $W_{Scmax}$  arvutatav järgmise valemiga:

$$W_{Scmax} = \frac{1}{2} \cdot C_T \cdot U_{Tmax}^2.$$

Ülikondensaatoris aset leidvate kadude ning konverterliidese minimaalne pinge  $U_{Tmin}$  ei võimalda salvestatud energiat 100% tagastada. Tühjenemistegur  $d$  on avaldatav järgmiselt:

$$d = \frac{U_{Tmin}}{U_{Tmax}} \cdot 100.$$

Sellest tulenevalt avaldub maksimaalne mahtuvus  $C_T$  järgmiselt:

$$C_T = \frac{2 \cdot P_{Lmax}}{\eta_{cd} \cdot U_{Tmax}^2 \cdot \left[ 1 - \left( \frac{d}{100} \right)^2 \right]},$$

kus  $P_{Lmax}$  tähistab koormust. Tühjenemisprotsessi kogukasutegur  $\eta_d$  ja maksimaalselt kasulik energia avaldub järgmise valemi alusel [LEM06]:

$$W_{u max} = \frac{1}{2} \cdot \eta_d \cdot C_T \cdot U_{Tmax}^2 \left[ 1 - \left( \frac{d}{100} \right)^2 \right].$$

### **Rakendused**

Ülikondensaatori peamiseks atraktiivsuseks on selle kiire laadimis- ja tühjenemistsükkel ning ülipikk eluiga, mis küündib ligikaudu  $1 \times 10^6$  tsüklini. Seetõttu on nendega võimalik asendada väiksemaid (<250 kW) elektri kvaliteedi tagamise tehnoloogiad. Võrreldes konventsionaalsete patareidega on ülikondensaatoritel pikem eluiga, puudub nn mälu efekt, omavad minimaalselt degradatsiooni täiesti tühjaks laadimisel, töötamisel ei kuumene ning ühtlasi ei tekita ka keskkonnale ohtlikke jäätmeid. Vaatamata madalale energiatihedusele, on ülikondensaatorid atraktiivsed ning perspektiivikad kasutamaks neid hübriidsõidukites, mobiiltelefonides ning koormuse ühtlustamise ülesannetes. Ülikondensaatoreid kasutatakse eelkõige rakendustes, kus on tarvis suuri võimsusi ainult lühikeste ajaperioodide (kuni üks minut), pärast mida võtavad edasise töö üle juba konventsionaalsed seadmed.

### **Investeeringukulud**

Investeeringukulud jäävad vahemikku 12 960...28 000 \$/kWh (9969...21538 €/kWh)), mistõttu ei ole ülikondensaatorite kasutamine suurtes rakendustes majanduslikult otstarbekas.

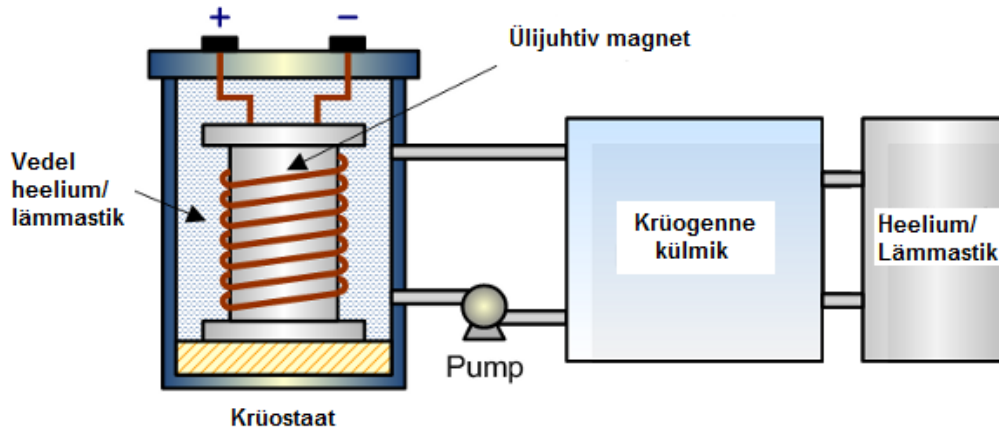
### **Omadused**

Eelised: kõrge kasutegur; pikk eluiga.

Puudused: madal energiatihedus; üksikud rakendused elektrivõrgu jaoks [BOY08].

## 2.7. Ülijuhtivad energiasalvestid

Ülijuhtivad energiasalvestid (*Superconducting Magnetic Energy Storage, SMES*) koosnevad ülijuhtivast mähisest (poolist), toitesüsteemist ning jahutist ja vaakumseadmest, millede eesmärgiks on hoida mähist ülimaldatel temperatuuridel.



Joonis 2.7 Ülijuhtiva energiasalvesti lihtsustatud ehitus<sup>1</sup>

Energia salvestamine toimub magnetväljas, mille tekitab alalisvool pooli mähises (Joonis 2.7). Tavaliselt hajub vooluga juhis osa energiasoojusena juhi oomilise takistuse tõttu. Juhul kui juht on tehtud ülijuhtivast materjalist, nagu plii, elavhõbe või vanaadium, siis selle oomiline takistus läheneb teatud tingimustel nullile, mistõttu on võimalik energiat salvestada peaaegu olematute kadudega. Ülijuhtiva oleku saavutamiseks tuleb juhti hoida seevastu väga madalatel temperatuuridel.

Ülijuhid võib tinglikult jagada kahte kategooriasse: madalatemperatuurilised ülijuhid, mida tuleb jahutada 0 K kuni 7,2 K-ni, ja kõrgetemperatuurilised ülijuhid, mida tuleb hoida vahemikus 10 K ja 150 K. Viimast tüüpi ülijuhtide temperatuurid jäävad üldjuhul 100±10 K piiridesse. Mähisesse salvestatud energia  $E_C$  (džaulides), on arvatav järgmise valemi alusel:

$$E_C = \frac{1}{2} \cdot L \cdot I^2,$$

kus  $L$  tähistab mähise induktiivsust ja  $I$  mähist läbivat voolu.

Energiaühused, mis on saavutatavad magnetväljas (näiteks 2 T tugevuse magnetvoo tiheduse korral jääb energiatihedus vahemikku 1...6 MJ/m<sup>3</sup>), on suurusjärgu võrra suuremad, kui need, mis saavutatakse elektriväljas[BAN09].

Ülijuhtivate energiasalvestite korral on kõige määravama tähtsusega selle materjali omadused, kuna selliste energiasalvestite disaini puhul on kesksel kohal selle

<sup>1</sup> <http://www.intechopen.com/books/dynamic-modelling/dynamic-modelling-and-control-design-of-advanced-energy-storage-for-power-system-applications>

töötemperatuur, magnetväli ja voolutihedus. Ülijuhtivate energiasalvestite üleüldine kasutegur jääb 90% ja 99% vahemikku. Salvestit iseloomustab väga kiire tühjenemisaeg: tavaliselt kestab salvesti täielik tühjaks laadimine alla ühe minuti. Täielik tühjaks laadimine on võimalik ka millisekundite jooksul, kuid seda peab võimaldama salvesti juhtimis- ja toitesüsteem.

Ülijuhtivate salvestite võimsus võib ulatuda kuni 2 MW-ni, kuid peamiseks tõmbenumbriks on selle täis- ja tühjaks laadimise tsükli kiirused. Seadmed võivad töötada tuhandeid laadimis-tühjenemistsükleid, ilma et mähis degradeeruks selle käigus. Viimane faktor võimaldab neid seadmeid kasutada enam kui 20 aastat.

### ***Rakendused***

Tänu suurele ühikvõimsusele ja silmapilksule tühjenemisajale, kasutatakse neid eelkõige tööstuslikult energiakvaliteedi tagamiseks. Salvesti kaitseb seadmeid järskude pingelohkude eest ning tasandab igasuguseid siirdeprotsesse (järsud koormuse muutused, seadmete kommutatsioonid või äikesest tingitud pinge probleemid) üle terve elektrivõrgu. Sellest tulenevalt peetakse ülijuhtivaid energiasalvesteid kasulikeks võrgu stabiilsust tagavateks seadmeteks, mis võivad tõsta võrgu läbilaskevõimet kuni 15%. Vaatamata eelpool loetletud headele omadustele, ei ole kõnealused salvestid väga perspektiivikad pikemaajalisteks tasandamisrakendusteks nagu tippude tasandamine, taastuenergiaga kombineerimiseks ning koormuste ja võimsuste nihutamisteks, kuna jahutussüsteem on liiga suure energiatarbega.

### ***Investeeringukulud***

Investeeringukulud jäävad vahemikku 300...509 \$/kW (230...392 €/kW). Kindlasti tuleks arvestada sellega, et salvestamis- ja kasutamise eripäradest tulenevalt on ülijuhtivate energiasalvestite investeeringukuludid raske võrrelda teiste energiasalvestustehnoloogiatega. Seda tüüpi salvesteid tuleks pigem võrrelda alternatiivsete võrgutugevdusmeetoditega. Võrreldes selle kulusid alternatiividega, võivad nad osutada konkurentsivõimelisteks või isegi odavamaks. Mahukate teadusuuringute ja materjaliarenduste tõttu eeldatakse, et ülijuhtivate energiasalvestite hinnad langevad tulevikus kuni 30%, mis muudab nad veelgi atraktiivsemaks [DAV09][BOY08].

### ***Omadused***

Eelised: suured ühikvõimsused, lühike reageerimisaeg, pikk eluiga ja kõrge kasutegur.

Puudused: madal energiatihedus, kõrge valmistamiskulu, võimalik laiaulatuslik mõju tervisele.

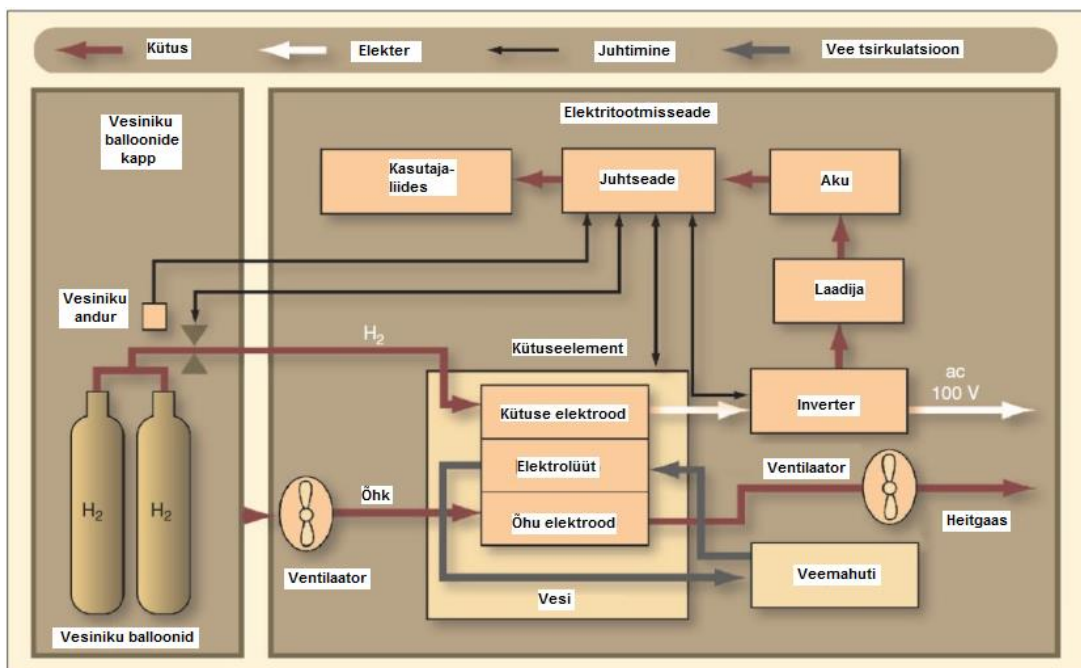


## 2.8. Vesinikenergiasalvestid

Vesinikenergiasalvesti (*Hydrogen Energy Storage, HESS*) on üks hilisemaid tehnoloogiaid energiasalvestite seas, kuid samas on see ka üks kõige perspektiivikamaid ja paljulubavamaid tehnoloogiaid. Energiasalvestina on vesiniksüsteemid üheks põhiliseks sillaks kolme suurima energiasüsteemi sektori vahel: elektri-, soojus- ja transpordisektor. See on ainuke energiasalvestussüsteem, mis võimaldab nii laialdast ühildamist erinevate sektorite vahel. Seetõttu on see muutumas äärmiselt atraktiivseks tehnoloogiaks, mida on võimalik integreerida laiaulatuslikult arendatavate taastuvenergiaprojektidega [KUS05][NAK00].

Vesiniksüsteemidel on kolm astet (Joonis 2.8):

1. Vesiniku tootmine
2. Vesiniku salvestamine
3. Vesiniku kasutamine (vajalikuks rakenduseks)



**Joonis 2.8 Vesiniksüsteemi ehitus**

Vesinikku iseloomustab väga kõrge kütteväärtus on 142 MJ/kg, mis on ca 3 korda kõrgem kui bensiinil. Seetõttu on vesinikku kui energiakandjat põhjalikult uuritud ning arvatakse tulevikus olevat tõsine konkurent fossiilsetele kütustele. Kirjanduses viidatakse viiele põhilisele meetodile, kuidas vesinikku salvestada: rõhu all kokkusurutult, jahutatult veeldatud olekus, süsinikus füüsilise adsorptsiooni teel, metallhüdriidides ning teistes keemilistes ühendites. Metallhüdriidid ja keemilised ühendid on võimelised salvestama sama mahu juures rohkem vesinikku, kui teised meetodid, kuid tänu kõrgetele protsessitemperatuuridele, mis tekivad salvestamisel ja tühjaks laadimisel, ei ole see väga perspektiivikas

energiasüsteemides rakendamiseks. Kasutamaks vesinikku energiasüsteemides, on kõige perspektiivikamad salvestusmeetoditeks veeldatud ja rõhu all olev vesinik. Samas tuleb arvestada sellega, et vedela vesiniku saamiseks tuleb kasutada kallist tehnoloogiat ning madalaid temperatuure.

Vesiniku kasutamisel elektri salvestamiseks esinevad mõningased ebaefektiivsused, mis puudutavad salvestamist ja elektri tagasi muundamist. Ebaefektiivsused, sõltuvalt salvestustehnoloogiast, on koondatud järgnevasse tabelisse (Tabel 2.1). Tabelist nähtub, et vesiniku rõhu all salvestamiseks kulub vähem energiat, mistõttu on sellel viisil ka kõrgem muundamis-kasutegur. Aktiivsöe kasutamine on ka tõhusam, kuid protsessi läbiviimiseks on tarvis väga madalaid temperatuure. Salvestamisel tuleb arvestada ka vesiniku mõningase lekkimisega, mis see kuulub süsteemi dünaamilise kasuteguri hulka. Rõhu all salvestamisel on vesiniku lekkimine kõige väiksem, võrreldes alternatiividega. Arvestamata kadudega töötamise käigus, on gaassalvestuse põhikaoks permeatsioon<sup>2</sup>. Fick'i esimene seadus difusiooni kohta annab seose plaadi (mahuti sein) pealse vesiniku voo  $J$  ja kontsentratsiooni gradiendi vahel. Sieverti seadus määrab, et kontsentratsioon  $C$  on proportsionaalne ruutjuurega rõhust. Kombineerides need kaks seaduspärasust püsiseisundile, saame võrrandi, millega saab iseloomustada vesiniku permeatsiooni difusiooni kaudu:

$$J = D \cdot \frac{\Delta C}{l} = \frac{DS \cdot \sqrt{P}}{l},$$

kus  $J$  on permeatsiooni kiirus ( $\text{mol H}_2 \cdot \text{s}^{-1} \cdot \text{m}^{-2}$ ),  $D$  kirjeldab vesiniku difusiooni läbi mahuti seina materjali ja  $S$  on vesiniku lahustuvus mahuti seina materjalis (teada ka kui Sievert'i parameeter),  $DS$  konstandi leiab vastavatest tabelitest ning  $l$  tähistab mahuti seina paksust. Järgnevat valemit saab kasutada, et projekteerida silinder mahuti seina paksusega  $l$ . Silindermahuti, mis on kaetud ülevalt kahe poolkeraga on antud järgmise valemiga:

$$l = \frac{\Delta p \cdot d}{2 \cdot \sigma_v + \Delta p},$$

kus  $d$  on silindri välisdiameeter,  $\Delta p$  on ülerõhk ja  $\sigma_v$  on materjali purunemistugevus.

**Tabel 2.1 Erinevatesse olekutesse salvestamiseks kuluv energia ja kasutegur**

Salvestusviis		Energiatihedus (MJ/kg)	Kasutegur	Lekkimine (/päevas)
Rõhu all	300 bar	0,915	0,915	0,000024%
	700 bar	0,905	0,905	0,000033%
Veeldatult	21 K	28-45	0,625-0,77	1%
Aktiivsöes	77K	8-10	0,917-0,933	0,2%
Hüdroiidides	<100 °C	0,9-0,933	0,79-0,83	-
	>300 °C	0,79-0,83	0,79-0,83	-

0 K=-273,15 °C

<sup>2</sup> materjali omadus, mille korral on nii auru, gaasi, vedeliku kui ka tahke aine molekulidel võimalus liikuda vabalt läbi materjali

Sellest tulenevalt saab 1 kg vesinikust toota kuskil 120 MJ = 33.3 kWh energia. 1 kg vesinikku rõhul 35 MPa võtab enda alla 44 l mahtu [WEI99][SHU09].

### **Rakendused**

Vesiniku kasutamisel transpordis ja energia tootmises on oodata kiiret läbimurret, kohe kui elektrolüüs, salvestusmetoodikad ja kütuseelemendid muutuvad laiemalt kättesaadavamaks. Vesinikutööstuse arengut nii transpordi kui ka jaotusinfrastruktuuri vallas juhivad autotööstused. Autotööstused on alustanud vesiniku kui transpordisektori kütuse strateegia loomisega, mille käigus on juba üksikprototüüpidest jõudnud autopargi demonstratsioonprojektideni. Vesinik on oma mitmekülguse tõttu tõsine pretendent saamaks tulevikus põhiliseks energiasalvestuse tehnoloogiaks. Kohe kui vesiniku tootmine muutub tõhusaks, on seda võimalikult kasutada praktiliselt igaks otstarbeks. Praegusel hetkel on vesiniku tootmiseks kõige perspektiivikam valik kombineerida elektrolüüsimine taastuenergiaga.

### **Investeeringukulud**

Elektritootmiskulud elektrolüüsi teel varieeruvad väga laiades piirides, kõige madalam hinnangud jäävad 300 \$/kW (230 €/kW) ringi, kuid kõige kallimad 1 100 \$/kW (846 €/kW) juurde. *ITM Power* Suurbritannias väidab, et on võimeline tootma elektrolüüsereid, mis koostöös taastuenergiaga on võimeline tootma vesinikku investeeringukuluga 164 \$/kW (126 €/kW). Elektrolüüsereite hoolduskulud peaksid moodustama 3% kapitalikulust. Kütuseelementide investeeringukulud jäävad vahemikku 500 €/kW (650 \$/kW) ja 8 000 €/kW (10400 \$/kW). Tehnoloogia arengu ja masstootmisesse jõudmisel on oodata hindade langemist [DAV80][DAV09].

### **Omadused**

Eelised: vähene hooldusvajadus, madalad emissioonid ja vaikne.

Puudused: kallis tehnoloogia.

## **2.9. Patarei energiasalvestid**

Suurevõimsuselised patareidel põhinevad energiasalvestuse süsteemid (*Battery Energy Storage, BES*) saab jagada kolme alamrühma:

1. Pliiakud (*Lead-Acid battery, LA*)
2. Nikkel-Kaadmium akud (*NiCd*)
3. Väävel-naatrium akud (*NaS*)

Tööpõhimõte on täpselt sama nagu sama tüüpi tavalistel akudel, ainukese vahega, et neid saab kasutada suurematel võimsustel ning suuremate mahutavusega: kaks elektroodi on sukeldatud elektrolüüti, mis võimaldab voolu tekitaval keemilisel reaktsioonil toimuda.

### 2.9.1. Pliiakud

Pliiakud on tänapäeval kõige enam kasutust leidnud energiasalvestusseade. Oma edukuse võlgneb kõnealune tehnoloogia orienteeruvalt 140 aastat kestnud arendustööle, mis on ta muutnud küpseks, suhteliselt odavaks, pika elueaga, kiire reageerimisajaga ja madala isetühjenemismääraga seadmeks. Pliiakusid on võimalik kasutada nii lühiajalistes (sekundid) kui ka pikaajalistes protsessides (kuni ja üle 8 tunni).

Pliiakud võib jagada kahte rühma: uputatud pliiakudeks (*flooded lead-acid, FLA*) ja ventiilireguleeritavateks pliiakudeks (*valve-regulated lead-acid, VRLA*). Uputatud pliiakud koosnevad kahest, pliist valmistatud elektrodidist, mis on sukeldatud vee (65%) ja väävelhappe (35%) lahusesse. Ventiilireguleeritud pliiakud töötavad samal põhimõttel nagu uputatud pliiakud, ainukese erinevusega, et nad on suletud rõhku reguleerivate ventiilidega, mis ei lase õhul pääseda akumulaatorisse ja samas ei lase vesinikul väljuda akumulaatorist. Ventiilireguleeritud pliiakud nõuavad vähem hooldamist, on kergemad ja võtavad vähem ruumi. Küll aga tuleb arvestada, et võrreldes tavapärase pliiakudega on neil kõrgem alginvesteering ja lühem eluiga.

Pliiakud on võimelised reageerima ja saavutama täisvõimsust millisekundite jooksul. Keskmine pliiaku kogukasutegur jääb tavatingimustel vahemikku 75% kuni 85% ning elueaks võib lugeda 5 aastat või 250-1000 laadimis/tühjenemistsükli, sõltudes eelkõige tühjaks laetuse sügavusest (*depth of discharge, DOD*).

#### **Rakendused**

Pliiakudel on kaks põhilist kasutusala:

1. sise põlemismootoriga autode käivitamiseks vajaliku energia salvestamine ja starteri abil auto käivitamine (lühiajaliselt nõutavad suured võimsused);
2. suure tühjaks laadimise sügavusega rakendustes või katkematu toiteallikana ja tagavaratoiteallikana seadmetes, mis vajavad pika aja jooksul väikest kuid stabiilset võimsust.

Ventiilireguleeritud pliiakud on seevastu väga populaarsed just tagavara- või katkematu toiteallikana näiteks telekommunikatsiooni või puhvertoiteallikasüsteemides (UPS), rakendustes kuhu ei sobi vedela elektrolüüdiga pliiakud.

#### **Investeeringukulud**

Investeeringukulud üldjuhul algavad vahemikus 200...300 \$/kW (154...231 €/kW) ning lõppevad kuskil 580 \$/kW (446 €/kW) juures.

#### **Omadused**

Eelised: suur ühikvõimsus, madal energiatihedus ruumala ühiku kohta, madal kapitalikulu ja pikk eluiga.

Puudused: keskmine kasutegur, võimalik laiaulatuslik mõju keskkonnale [BOY08].

## 2.9.2. Nikkel-kaadmium (NiCd) akud

NiCd aku koosneb positiivsest elektroodist, mis koosneb nikkeloksiid-hüdroksiidist, ja negatiivsest elektroodist, mis koosneb metalliliselt kaadmiumist. Elektroodid on üksteisest eraldatud nailonist vaheseinaga. Elektrolüüdina on kasutusel kaaliumhüdroksiidi vesilahus, mille omadused ei muutu elektrokeemilise protsessi käigus märgataval määral. Tühjenemise käigus reageerib nikkeloksiid-hüdroksiid veega ja moodustab nikkelhüdroksiidi ja hüdroksiid iooni, negatiivsel elektroodil moodustub samal ajal kaadmiumhüdroksiid. Elektrokeemiline protsess on pööratav, kuid laadimise käigus moodustub positiivsel elektroodil hapnik ja negatiivsel elektroodil vesinik. Seetõttu on vaja akumulaatorit õhutada ja aegajalt vett lisada (üldjuhul vähem kui pliiakude puhul). NiCd akude kogukasutegur jääb üldjuhul tavatingimustel vahemikku 60%-70%, kuid madalat kasutegurit kompenseerib suhteliselt pikk eluiga, mis sõltuvalt rakendusest võib ulatuda 10-15 aastani. „Taskutüüpi“ elektroodidega NiCd akudel on elueaks 1000 laadimis/tühjenemistsüklit ja pulbrist valmistatud elektroodidega akudel kuni 3500 laadimis/tühjenemistsüklit. Samasel pliiakudega, on ka NiCd akud võimelised saavutama täisvõimsust millisekundite vältel.

### **Rakendused**

Suletud NiCd akud on tavaliselt kasutusel elektroonikaseadmetes, nagu näiteks kaugjuhtimispuldid, kus väike kaal, kompaktsus ja korduvalt kasutatavus on oluline. Ventileeritud NiCd akud leiavad seevastu kasutust lennuki- ja diiselmootorite starterite toiteallikana, kus suur energiatihedus massi- ja ruumalaühiku kohta on oluline. NiCd akud on ideaalsed tagamaks kaitset pingelohkude vastu ning toite katkematust ka eriti keerulistes oludes. Viimastel aastatel on hakatud NiCd akusid üha rohkem kasutama päikeseenergia salvestamiseks, kuna nad on vastupidavad kõrgetele temperatuuridele. Sellegi poolest ei ole neid võimalik kasutada näiteks tippude silumiseks ja seetõttu välditakse neid enamasti rakendustes, mida on vaja koormuste juhtimiseks.

### **Investeeringukulud**

NiCd akud on üldiselt kallimad kui standardsed pliiakud ja kulud jäävad 600 \$/kW (460 €/kW) kanti. Vaatamata kõrgele alginvesteeringule on NiCd akude hoolduskulud väiksemad, kuna neid on ilma täiendava hoolduseta võimalik kasutada erinevates keskkonnatingimustes.

### **Omadused**

Eelised: kiire reageerimisaeg, kõrge energiatihedus ja kõrge kasutegur.

Puudused: ohutuse tagamiseks vajalik juhtimissüsteem, võimalikud keskkonnamõjud [BOY08].

### 2.9.3. Väävel-naatrium (NaS) akud

NaS akude energiatihedus on kolm korda suurem kui pliiakudel, samuti on neil pikem eluiga ning väiksem hooldusvajadus. Akud koosnevad silindrilistest elektrokeemilistest elementidest, mille negatiivne elektrood koosneb veeldatud naatriumist ja positiivne elektrood veeldatud väävlis (Joonis 2.9). Elektrolüüdina on kasutusel tahke B-alumiiniumoksiid. Tühjenemise käigus liiguvad naatriumi ionid läbi elektrolüüdi positiivsesse elektroodi, kus nad reageerivad väävliga ning moodustub polüväävel-naatrium (vt. Joonis 2.9). Laadimise käigus protsess pöördub ja positiivse elektroodi peal moodustub naatriumi ionidest kiht. Selleks, et väävel ja naatrium püsiks vedelas olekus ning et elektrolüüt oleks piisavalt juhtiv, tuleb akut hoida isoleeritud kestad üle 270 °C. Tavaliselt hoitakse akus temperatuuri vahemikus 320°C kuni 340°C. Tüüpiline NaS moodul on võimsusega 50 kW ja energiamahutavusega 360 kWh või võimsusega 50 kW ja energiamahutavusega 430 kWh. Keskmise täis-tühjaks laadimise tsükkel on kasuteguriga 86% kuni 89%.

#### **Rakendused**

Üks kõige paremaid NaS akude omadusi on selle võime arendada püsivat väljundvõimsust või püsivast nimivõimsusest kuni viis korda kõrgemat impulssvõimsust. Aku on võimeline impulssvõimsust arendama ka pikaajalise tühjaks laadimise protsessi käigus. Seetõttu on NaS akud äärmiselt perspektiivikad energia kvaliteedi tagamiseks ning koormuste juhtimiseks. NaS akud on leidnud kasutust ka elektrivõrkudes.

#### **Investeeringukulud**

Praeguseks hetkeks jääb NaS akude investeeringukulu 810 \$/kW (623 €/kW) juurde, kuid tehnoloogia on reaalsesse rakendustesse jõudnud alles hiljuti. Tootmismahude suurenedes ennustatakse kulude vähenemist isegi üle 33%.



Joonis 2.9 Väävel-naatrium aku ehitus ja akujaam<sup>34</sup>

<sup>3</sup> [http://www.daviddarling.info/encyclopedia/N/AE\\_NAS\\_battery.html](http://www.daviddarling.info/encyclopedia/N/AE_NAS_battery.html)

### **Omadused**

Eelised: väga suur energiamahutavus ja ühikvõimsus, kõrge energiatihedus, kõrge kasutegur ja pikk eluiga.

Puudused: kallid, ohutuse tagamiseks on vaja erimeetmeid [BOY08].

### **2.9.4. Läbivooluakud**

Eksisteerib kolm põhitüüpi läbivooluakusid (*Flow Battery Energy Storage, FBES*):

1. Vanaadium-redoks akud (*Vanadium Redox Flow Battery, VR*)
2. Polüsulfiid bromiid akud (*Polysulphide Bromide, PSB*)
3. Tsink bromiid akud (*Zinc Bromine, ZnBr*)

Kõikide sellist tüüpi akude tööpõhimõte on sama: kaks elektrolüüti pumbatakse akuelementide kogumikku, kus toimub keemiline reaktsioon, mis võimaldab akust energiat ammutada.

### **2.9.5. Vanaadium-redoks (VR) akud**

VR akud koosnevad akuelementidest, elektrolüüdi mahutisüsteemist, juhtimis- ning muundurisüsteemist (*Power Conversion System, PCS*). Energiasalvestamine toimub elektrodidel kahte erinevat tüüpi vanaadiumioonide omavahelisel reageerimisel väävelhappe elektrolüüdis. Akuelementide arv määrab ära akuseadme võimsuse (kW) ning elektrolüüdi mahuti suurus energiamahutavuse (kWh).

Aku tühjenemisel voolavad kaks elektrolüüti erinevatest mahutitest kokku akuelementidesse, kus siis elektrolüüdid vahetavad läbi membraani vesinikioone. Protsess kutsus lahuses esile ise eraldumise, mistõttu muutub vanaadiumi ionide olek ning potentsiaalne energia muundatakse elektriks. Laadimise käigus protsess pöörduv.

VR akude kasutegur normaaltöitingimustes ulatub kuni 85%-ni. Kuna nii laadimise kui tühjenemise käigus toimub sama keemiline protsess, siis elektrolüütide vahetamine jääb pärast igat tsüklit samaks (1:1). Töotsüklite täituses, tuleb välja vahetada ainult akuelementide osa, kuna elektrolüüdil on piiramatu eluiga ja seda on võimalik seetõttu korduvalt uuesti kasutada. VR akudel on kiire reageerimisaeg: laadimine on võimalik ümber lülitada tühjenemiseks 0,001 sekundi jooksul. Akut on võimalik ülekoormata, osade allikate väitel on akut võimalik üle koormata mitme minuti vältel kahekordse nimivõimsusega. VR akude töötsüklite arv ulatub 10 000 täis-tühjaks laadimistsüklini, mis aastatesse arvatuna või ulatuda 7-15 aastani. VR akusid on võimalik erinevalt traditsioonilistest akudest täiesti tühjaks laadida, ilma et nende jõudlus väheneks selle tõttu. VR akud tarnitakse valmismoodulitena, et neid saaks koha peal kokku panna.

<sup>4</sup> <http://www.h2fc-fair.com/hm13/exhibitors/ngk.html>

### **Rakendused**

Kuna akude võimsus ja energiamahutavus ei ole omavahel otseses sõltuvuses, on neid tüüpi akusid võimalik kasutada mitmetes energiasalvestuse rakendustes, nt. nii katkematute toiteallikatena, koormuste silumiseks, tippude lõikamiseks, elektrivõrkudes ja taastuenergia integreerimiseks. Vaatamata VR akude mitmekülgsele, on igas kasutusvaldkonnas sellele tõsiseid alternatiive, millede sooritused on nendes konkreetsetes rakendustes paremad kui VR akudel. Sellest tulenevalt kaalutakse VR akude kasutamist ainult olukordades, kus mitmekülgne kasutamine on äärmisel oluline, eelkõige siis taastuenergia integreerimiseks.

### **Investeeringukulud**

VR akudel on kaks erinevat kuluartiklit: üks on seotud võimsusega (kW) ja teine energiamahutavusega (kWh), mis ei ole omavahel seotud. VR akude hind võimsusühiku kohta on 1 828 \$/kW ning energiamahutavuse kohta jääb sõltuvalt süsteemi disainist vahemikku 300...1 000 \$/kWh (230...770 €/kWh).

### **Omadused**

Eelised: unikaalne mitmekülgne kasutatavus erinevates rakendustes, suur ühikvõimsuse ja energiamahutavuse potentsiaal.

Puudused: madal võimsustihedus, palju akuelemente, võrreldes tavapärase tehnoloogiatega keeruline ehitus.

## **2.9.6. Polüsulfiid bromiid akud**

Polüsulfiid bromiid akud (*Polysulphide Bromide, PSB*) akude tööpõhimõte ja ülesehitus on väga sarnane VR akudele (vt. Joonis 2.10). Elektrolüütidenä on kasutusel positiivsel poolel naatriumbromiid ja negatiivsel poolel naatrium polüsulfiid. Tühjenemise käigus voolavad elektrolüüdid akuelementi, kus siis membraanil, mis laseb naatriumi ioonid läbi, toimub reaktsioon. Nagu VR akudeski, toimub ka selle protsessi käigus iseeraldumine ning laadimiseks tuleb protsess lihtsalt reverseerida.

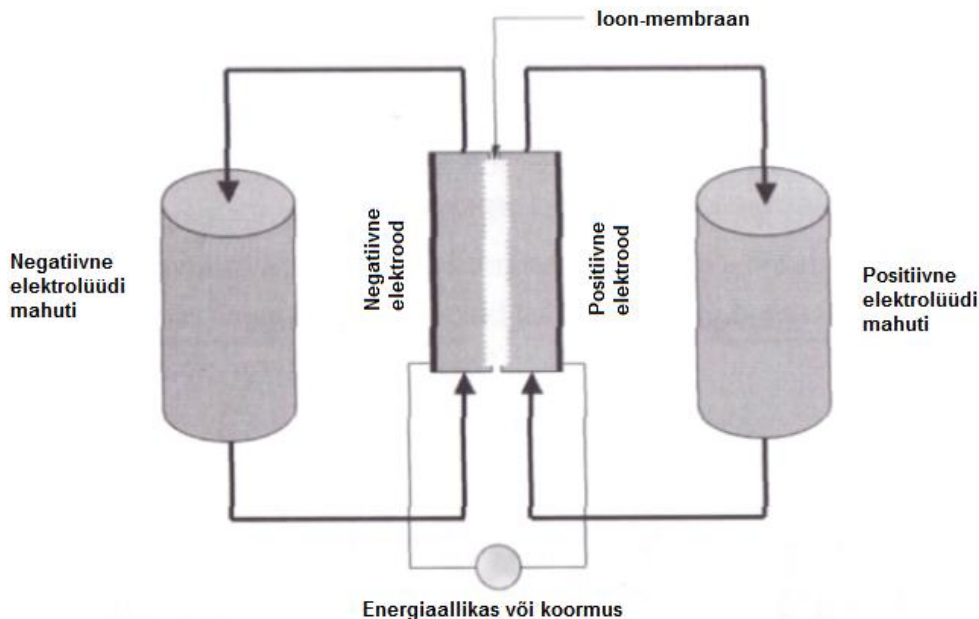
PSB akud töötavad üldjuhul 20°C ja 40°C temperatuurivahemikus, laiem temperatuurivahemik on võimalik saavutada kasutades jahutamiseks täiendavaid soojusvaheteid. Üksikelemendi pinge jääb 1,5 V piiresse.

PSB akude kasutegur jääb 75% juurde. Sarnaselt VR akudele on nii laadimisel kui tühjenemisel keemiline protsess täpselt sama, mis tähendab et elektrolüütide vahetamine jääb pärast igat tsüklit samaks. Elueaks eeldatakse 2 000 tsüklit, kui sõltub äärmiselt palju rakendusest, mille jaoks akusid kasutatakse. Akude ühikvõimsus ja energiamahutavus ei ole omavahel sõltuvad.



### Rakendused

PSB akusid on võimalik kasutada kõikides energiasalvestus rakendustes, k.a. koormuse tasandamiseks, tippude lõikamiseks ning taastuvenergiaallikate integreerimiseks. PSB akudel on samuti kiire reageerimisaeg, nimivõimsus on võimalik saavutada täis laetud akude puhul 20 millisekundi jooksul. Tavatingimustes on võimalik PSB akusid täis- või tühjaks laadida 0,1 sekundi vältel, mistõttu on neid võimalik kasutada ka sageduse- või pinge reguleerimiseks.



Joonis 2.10 Polüsulfiid-bromiid aku tööpõhimõte

### Investeeringukulu

PSB akude kulu võimsusühiku kohta on 1 094 \$/kW (842 €/kW) ja energiamahutavuse puhul 185 \$/kWh (142€/kWh).

### Omadused

Eelised: suur ühikvõimsus ning pikk eluiga.

Puudused: madal energiatihedus ja kasutegur.

### 2.9.7. Tsink bromiin akud

Kõnealused akud (*Zinc Bromine, ZnBr*) erinevad mõnevõrra nii PSB kui ka VR akudest. Kuigi ülesehituselt on nad sarnased eelmistega, siis tööpõhimõte on neil mõnevõrra teine. Laadimise käigus voolavad nii tsingi kui ka bromiiniioonide elektrolüüdid akuelementidesse. Elektrolüüte eraldab mikropooridega membraan.

Erinevalt VR ja PSB akudest, on elektroodidel käesolevas elektri-keemilises protsessis keskne roll, kuna osalevad selles protsessis. Laadimise käigus galvaniseeritakse tsink negatiivsele elektroodile ning positiivselt elektroodilt eraldub bromiini. Seega on ZnBr akude

tööpõhimõtte mõnevõrra sarnane konventsionaalsete akude tööpõhimõttele. Elektrolüüti lisatakse lisaaineid, mis pärsib puhta bromiini reageerimist, tänu millele väheneb elemendi isetühjenemine ning suureneb süsteemi turvalisus. Tühjenemise käigus protsess reverseerub, tsink lahustub negatiivselt elektrodilt ning positiivsele elektrodile ladestub bromiin.

ZnBr akud töötavad temperatuurivahemikus 20°C kuni 50°C. Üleliigne soojus tuleb vajadusel täiendava soojusvahetiga eemaldada. Kuna elektrolüüti otseselt protsessi käigus ei kulu, siis teoreetiliselt on selle eluiga määramatu, mis võimaldab seda korduvalt kasutada. Aku-elementides kasutatav membraan seevastu degradeerub protsessi käigus, mis limiteeribki elemendi eluea umbes 2 000 laadimis-tühjenemis tsüklile.

ZnBr akut võimalik ilma igasuguste kahjustavate efektideta täiesti tühjaks laadida, samuti ei esine seda tüüpi akul mälu efekti. Süsteemi kasutegur jääb 75% ja 80% piiresse.

ZnBr akul on kõikidest läbivooluakudest kõige kõrgem energiatihedus ning ühikelemendi pinge on 1.8 V.

### **Rakendused**

ZnBr akud valmistatakse üldjuhul 25 kW (energiamahutavusega 50 kWh) moodulitena. Iga moodul koosneb kolmest paralleelselt ühendatud 60-ühikelemendilisest akust. Igal ühikelemendil on aktiivset tööpinda üle 2500 m<sup>2</sup>.

ZnBr akude energiatihedus jääb vahemikku 75 Wh/kg kuni 85 Wh/kg, mistõttu on seda tüüpi akud võrreldes teiste akutehnoloogiatega suhteliselt väikesed ja kerged. ZnBr akude puhul on oodata läbimurret eelkõige taastuenergia balansseerimise rakendustes, kuna on võimeline ühtlustama tavapäraselt varieeruva väljundvõimsusega tuule- ja päikeseelektrijaamade toodangut [HAN09] ning samal ajal pakkuma ka sagedusereguleerimise funktsiooni.

ZnBr akud on käesolevaks hetkeks leidnud rakendust nii katkematu toiteallika rakendustes, koormuse juhtimise rakendustes, päikeseelektrijaamades, alajaamades ning ka ülekande- ja jaotusvõrkudes.

### **Investeeringukulud**

Investeeringukulu võimsusühiku kohta on umbes 639 \$/kW (491 €/kW) ja energiamahutavuse kohta 400 \$/kWh (307 €/kWh).

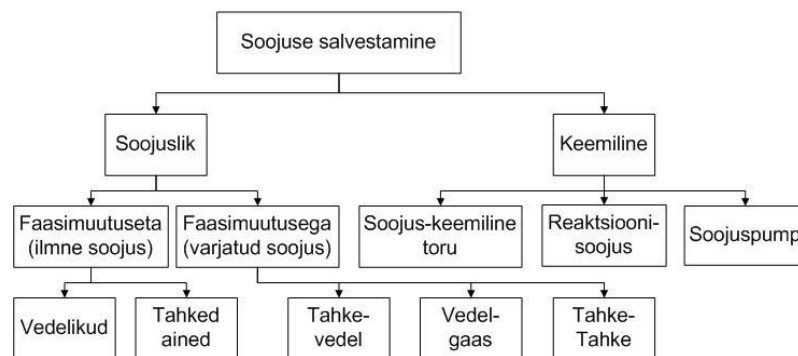
### **Omadused**

Eelised: suur ühikvõimsus ja pikk eluiga.

Puudused: madala energiatihedus ning kasutegur [DAV09].

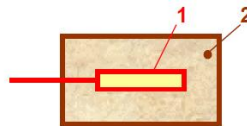
## 2.10. Ülevaade soojuste salvestamise võimalustest

Energia salvestamine kui selline on üldiselt energia salvestamine mingil kujul (nt soojusena, elektrina), mida on hiljem võimalik kasutada energiavajaduse katmiseks mingil perioodil. Salvestamine aitab teatud olukordades kasutada efektiivsemalt energiatootmise seadmeid ja tasakaalustada võimalikku tarbimise ja tootmise erinevusi. Energiasalvestamine baseerub kolmel põhitegevusel: salvestisse energia juurdeandmine (täislaadimine), salvestamine ja salvestist energia ärajuhtimine (tühjaks laadimine). Soojuse salvestamine hõlmab endas väga erinevaid meetodeid, võimalusi ja rakendusi, vt nt Joonis 2.11.



**Joonis 2.11 Päikeselt saadava energia salvestamise võimalused soojusena<sup>5</sup>**

Soojuste salvestamisel juhitakse soojust salvestavale ainele ning soojuse kasutamisel salvestist eemaldatakse soojust salvestavalt ainelt soojust. Joonis 2.12 kujutab lihtsaimat soojussalvesti ehituspõhimõtet.<sup>6</sup>



1 elektriline vm küttekeha, 2 salvestusaine

**Joonis 2.12 Soojussalvesti põhimõte**

Madalatemperatuuriline soojuse salvestamine on temperatuuridel kuni 200 °C. Seda on laialdaselt uuritud ning see leiab kasutust ka hoonete kütte- ja jahutussüsteemides. Kõrgetemperatuuriline soojuse salvestamine on üle 200 °C ning see leiab rakendust nt tööstuses, elektrijaamades (sh päikeseelektrijaamad).

Soojuste salvestamist võib klassifitseerida salvestuse kontseptsiooni järgi (aktiivne, passiivne) või salvestusmehhanismi järgi (faasimuutuseta, faasimuutusega ja keemiline).<sup>7</sup>

<sup>5</sup> A. Sharma, V.V. Tyagi, C.R. Chen, D. Buddhi. Review on thermal energy storage with phase change materials and applications. Renewable and Sustainable Energy Reviews 13 (2009) 318–345.

<sup>6</sup> E. Risthein. Sissejuhatus energiatehnikasse. Tallinn, 2007.

<sup>7</sup> Survey of thermal storage for parabolic trough power plants. Pilkington Solar International GmbH. 2000.

### 2.10.1. Aktiivne salvestusviis

Aktiivse salvestusviisi korral kasutatakse soojuse ülekandmiseks salvestatavale ainele sundkonvektsiooni, st soojust salvestatav aine on ise sundringluses.

### 2.10.2. Passiivne salvestusviis

Passiivsete süsteemide korral kasutatakse soojuse ülekandmiseks soojust salvestavale ainele soojuskandjat. Soojust salvestav aine ise on nõ paigal ja soojust salvestavaks aineks võib olla nt tahke aine, vedelik, faasimuutusega materjal või mõni muu aine keemiliseks soojuse salvestamiseks.

Faasimuutuseta salvestamise korral on sellise süsteemi miinuseks, et temperatuurierinevus vahesoojuskandja ja soojust salvestava aine vahel väheneb nii soojuse salvestamise kui eemaldamise protsessi käigus salvestist. Temperatuuride vahe vähenemine vähendab ülekantava soojuse kogust aine sama vooluhulga juures. Selliste süsteemide juures on oluliseks teguriks soojust salvestava aine soojusjuhtivustegur.

### 2.10.3. Faasimuutuseta salvestamine

Faasimuutuseta salvestamine põhineb mingi tahke keha või vedeliku temperatuuri tõstmisega ehk siseenergia suurenemisega. Faasimuutuseta (nn ilmse soojuse salvestamine) salvestussüsteemid on üldjuhul lihtsamad ja odavamad kui teised soojuse salvestamise viisid. Kui rääkida aastaajalisest soojuse salvestamisest, siis faasimuutusega ja keemiline salvestamine ei ole tänapäevani leidnud hoonete korral laialdast kommertsrakendust ja vajavad veel arendamist, et need oleksid võrreldes faasimuutuseta salvestamisega tehnilis-majanduslikult võrreldavad.

Salvestatav soojushulk avaldub valemiga:

$$W = m c (\vartheta_2 - \vartheta_1)$$

$W$	salvestatud soojus J
$m$	salvestusaine mass kg
$c$	salvestusaine erisoojus J / (kg K)
$\vartheta_2$	kuumutustemperatuur °C
$\vartheta_1$	alg- või mahajahtumistemperatuur °C

Erisalvestusvõime on seega

$$w = W / m = c (\vartheta_2 - \vartheta_1) .$$

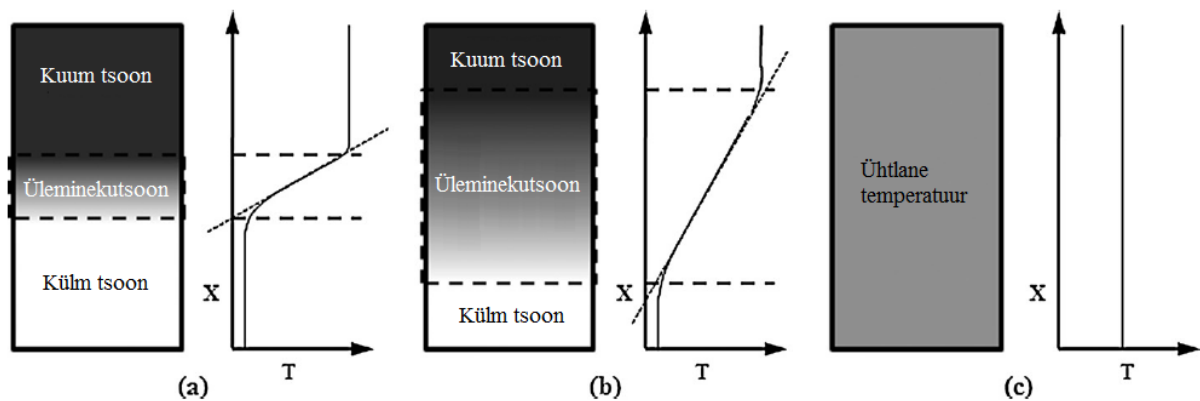
Faasimuutuseta salvestamise korral tuleb tähelepanu pöörata järgmistele aspektidele:

- mahu või massi kohta salvestatav soojuse kogus – soojusmahtuvus,
- töötamise temperatuurivahemik,
- soojust transportiva aine omadused (toksilisus, korrodeerivad omadused, erisoojus)
- ajutine soojuse kihistumine,
- energia vajadus soojuse juhtimiseks ja eemaldamiseks salvestist,

- salvestusaine koguseline vajadus,
- jahtumiskaad,
- kulud.

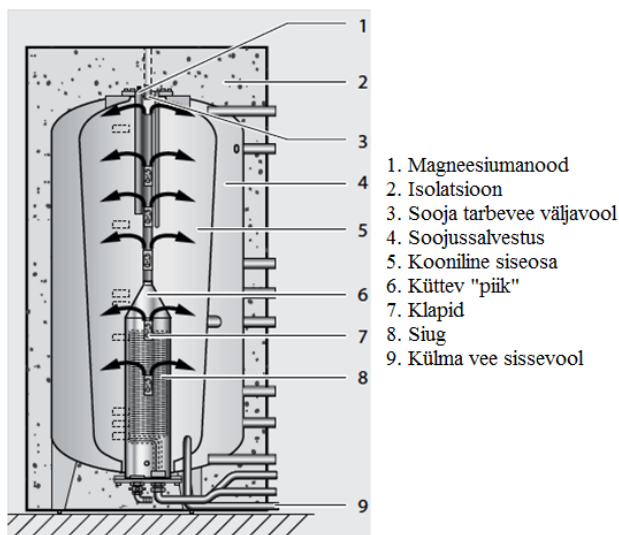
Faasimuutuseta salvestamise korral on jahtumiskaad sõltuvad temperatuurivahest väliskeskkonnaga.

Faasimuutuseta salvestamisel on üheks oluliseks aspektiks nn soojuse kihistumine (vt ka Joonis 2.13). Kihistumine aitab tõsta nn energia kvaliteeti (eksergiat). Eksergiat võib vaadelda kui kasuliku töö potentsiaali. Kihistumine suurendab salvestist kasutatavat energiat võrreldes kihistumata olukorraga, mis tuleneb soojusülekandeks vajalikust temperatuuride vahe erinevustest, vt ka Joonis 2.13.



**Joonis 2.13 Kihistumise erinevad tasemed: a) hästi kihistunud, b) keskmiselt kihistunud c) segatud (mittekihistunud)<sup>8</sup>**

Joonis 2.14 illustreerib ühte võimalikku kihilise salvesti konstruktsiooni.



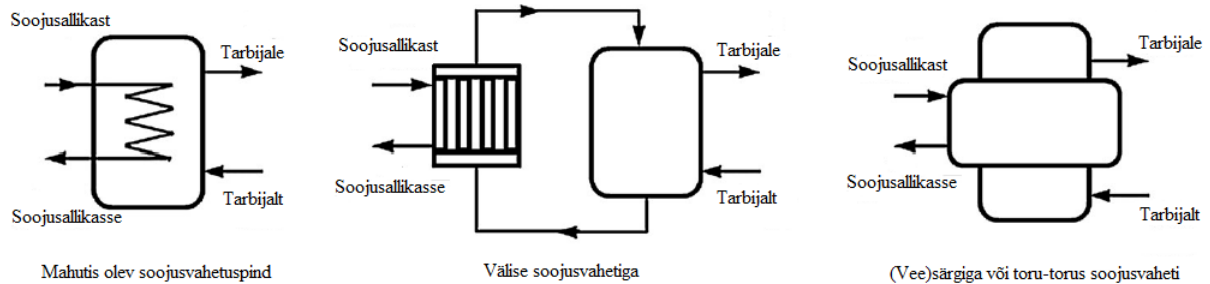
**Joonis 2.14 Kihilise salvesti üks konstruktsioone<sup>9</sup>**

<sup>8</sup> C.A. Cruickshank. Evaluation of a stratified multi-tank thermal storage for solar heating applications. PhD Thesis. Queen's University, 2009.

### 2.10.3.1 Vesi

Vesi on sobilik soojuste salvestamiseks vahemikus 20-80 °C ning veel on suhteliselt kõrge erisoojus (4,19 kJ/(kgK)) ja ta on odav.

Vee kasutamiseks on vaja mahuteid, mis võivad olla tehtud metallist, betoonis või olla looduslikud õõnsused. Soojuste transportimiseks mahutisse võib kasutada mahutis olevat vett, mis on ka salvestatavaks aineks (aktiivne süsteem) või mingit muud vedelikku, mis läbib mahutisse paigaldatud soojusvahetit (passiivne süsteem), vt ka Joonis 2.15.

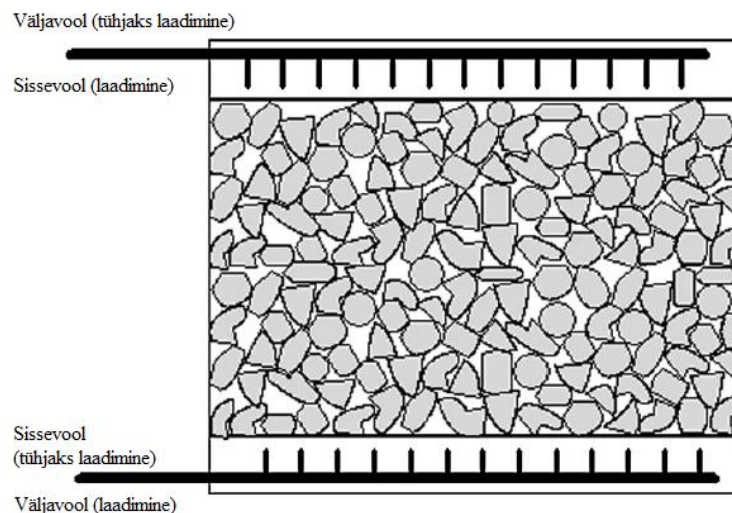


**Joonis 2.15 Soojuste salvestusmahutisse transportimise põhi viisid<sup>10</sup>**

Veega salvestamise korral on uuritud ka nt põhjavee ärakasutamist ja nn päikesetiike.<sup>11</sup>

### 2.10.3.2 Kivi

Siinkohal ei vaatle me traditsioonilist kaljupinnasesse soojuste salvestamist, vaid soojuste salvestamiseks valmistatud kivikihti. Kivikihti salvestamisel (vt ka Joonis 2.16) läbib kivikihti soojuskandjana kas nt vesi või õhk.



**Joonis 2.16 Kivikihti salvestamise põhimõte**

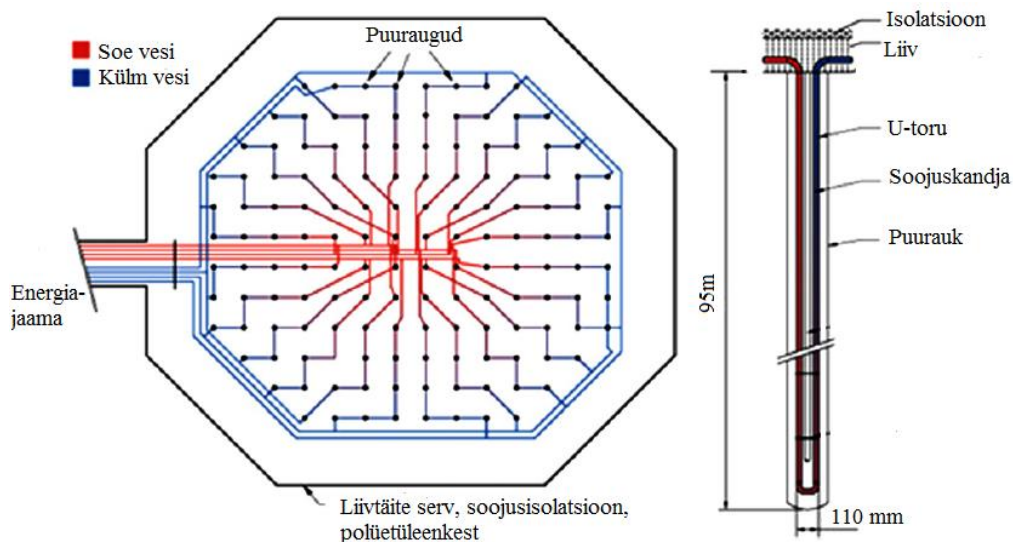
<sup>9</sup> Buderus.

<sup>10</sup> Y.M. Han, R.Z. Wang, Y.J. Dai. Thermal stratification within the water tank. Renewable and Sustainable Energy Reviews 13 (2009) 1014-1026.

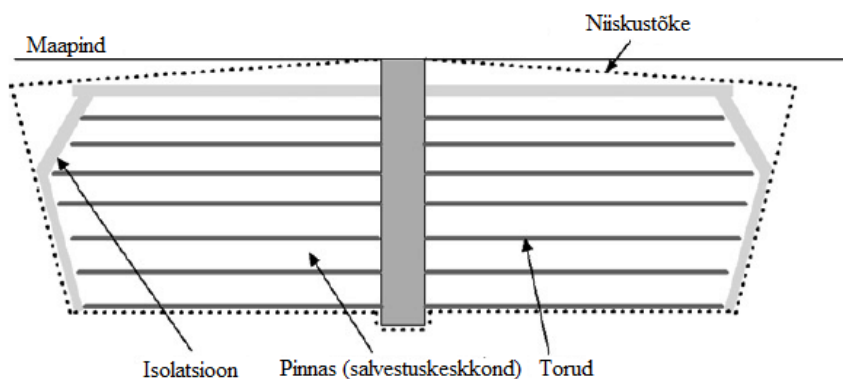
<sup>11</sup> I. Dincer, M.A. Rosen. Thermal energy storage – systems and applications. New York, John Wiley & Son, 2002.

### 2.10.3.3 Pinnas

Pinnasesse salvestamise (sh kivi) korral on pinnas sisuliselt tasuta allikas, kuid seejuures tuleb arvestada süsteemide paigaldamise kuluga (pinnase eemaldamine tagasitõitmine, puurimine jne). Kasutatakse nii vertikaalseid puurauke (vt ka Joonis 2.17) kui ka horisontaalseid torusid (vt ka Joonis 2.18).



Joonis 2.17 Drake Landing Solar Community hooajaline sojussalvesti<sup>12</sup>



Joonis 2.18 Vaulruz süsteem<sup>13</sup>

Selliste süsteemide maksumus varieerub vahemikus 0,4-1,35 MEur.

### 2.10.3.4 Muud ained

Õlisid kasutatakse samuti soojust salvestava aienena. Õli on kallim kui vesi ja kasutatakse, kui soovitakse kõrgemaid temperatuure.

<sup>12</sup> Drake Landing Solar Community. Borehole thermal energy storage (BTES). <http://www.dlsc.ca/borehole.htm>.

<sup>13</sup> P. Chuard, D. Chuard, J. Van Gilst, J.C. Hadorn, C. Mercier. IEA Task VII Swiss project in Vaulruz – design and first experiences. In: International conference on subsurface heat storage in theory and practise, 1983.

Igasuguseid plokk, plaate jne, mis on tehtud erinevatest materjalidest nagu betoon, grafiit; raua ja rauaoksiidist tehtud pelleteid, palle jne saab samuti kasutada faasimuutuseta soojuse salvestamisel soojust salvestava keskkonnana. Samas on sellised lahendused kallimad võrreldes kivi, pinnase või vee kasutamisega soojust salvestava keskkonnana. Teisest küljest võimaldavad nad rakendada kõrgemaid temperatuure.

Hoone konstruktsioonibetooni saab kasutada lühiajalisel soojuse salvestamisel, aga mitte pikemaajalisel hooajalisel salvestamisel.

#### 2.10.4. Faasimuutuseta salvestamine

Faasimuutuseta salvestamine põhineb mingi aine faasimuutusel, st salvestamisel muutub aine agregaatolek nt tahkest vedelaks ning salvestatud soojuse eemaldamisel toimub vastupidine protsess. Näiteks vedelas oleks sulatatud sool sisaldab rohkem soojust massi kohta kui tahkes olekus sool. Sellisel juhul avaldub salvestatud soojus valemiga:

$$W = m [c_t (\vartheta_s - \vartheta_1) + C + c_s (\vartheta_2 - \vartheta_s)]$$

**W** salvestatud energia J  
**m** salvestusaine mass kg  
**c<sub>t</sub>** erisoojus tahkes olekus J / (kg K)  
**c<sub>s</sub>** erisoojus sulas olekus J / (kg K)  
**C** sulamissoojus J/kg  
**ϑ<sub>1</sub>** algtemperatuur °C  
**ϑ<sub>s</sub>** sulamistäpp °C  
**ϑ<sub>2</sub>** kuumutustemperatuur °C

Faasimuutuseta salvestamist peetakse paremaks kui faasimuutuseta salvestamise viisi tänu suuremale salvestusvõimele sama massi/mahu ühiku kohta<sup>14</sup> ehk suuremale energiatihedusele.<sup>15</sup> Võrreldes tavaliste faasimuutuseta soojussalvestamise viisidega, vajavad faasimuutuseta salvestussüsteemid sama energiahulga salvestamiseks väiksemat mahtu ja massi. Uuringud on näidanud, et näiteks võrreldes kaljupinnasega vajab Parafiin 116 Wax (P116-Wax) seitse korda väiksemat salvestusmassi, meditsiiniline parafiin viis korda ja Na<sub>2</sub>SO<sub>4</sub>·10H<sub>2</sub>O kaheksa korda.<sup>16,17</sup>

Faasimuutuseta salvestamise korral on võimalik soojust salvestada konstantsel või ligikaudu konstantsel temperatuuril, mis vastab materjali faasimuutuse temperatuurile. Faasimuutuseta materjalide üheks puuduseks on madal soojusjuhtivustegur, mille tõttu on soojuse salvestamise kui ka salvestatud soojuse tarbimise protsess suhteliselt aeglane.

<sup>14</sup> A. A. Al-Abidi, S.B. Mat, K. Sopian, M.Y. Sulaiman, C.H. Lim, A. Th. Review of thermal energy storage for air conditioning systems. Renewable and Sustainable Energy Reviews 16 (2012) 5801-5819.

<sup>15</sup> F. Agyenim, N. Hewitt, P. Eames, M. Smyth. A review of materials, heat transfer and phase change problem formulation for latent heat thermal energy storage systems (LHTESS). Renewable and Sustainable Energy Reviews 14 (2010) 615-628.

<sup>16</sup> A.-K. Morrison, Effects of phase-change energy storage systems using salt-hydrates at heat recovery stage. Solar Energy 20 (1978) 57-67.

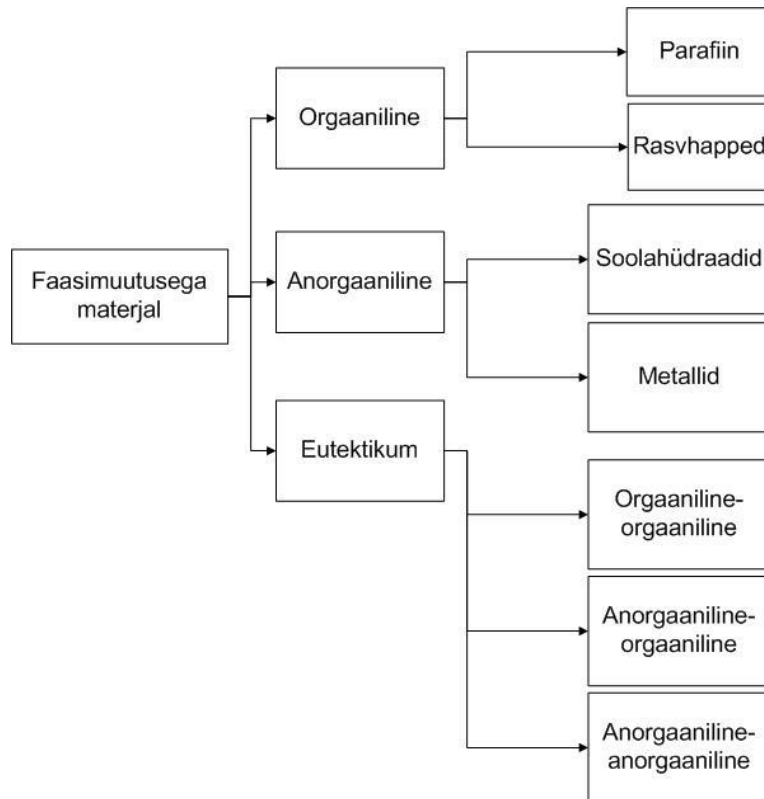
<sup>17</sup> A.A. Ghoneim. Comparison of theoretical models of phase-change and sensible heat storage for air and water-based solar heating systems. Solar Energy 42 (1989) 318-345



Parafiini vahadel on soojusjuhtivustegur näiteks 0,2 W/(mK) ning soolahüdraatidele ja eutektikumidel<sup>18</sup> 0,5 W/(mK).

#### 2.10.4.1 Faasimuutusega salvestamise materjalid

Faasimuutusega materjale jaotatakse kolme gruppi: orgaanilised, anorgaaniliseks ja eutektikumid (Joonis 2.19). Tänapäeval uuritakse materjale mikro- ja nanoosakeste tasemel, et parendada soojusülekannet ja koos sellega salvestamise süsteemi efektiivsust.



**Joonis 2.19 Faasimuutusega materjalide klassifikatsioon<sup>19</sup>**

**Parafiinid** on vahataoline aine, mis koosneb mitmest hargnemata ahelas (linearahelas) olevast  $n$ -arvust alkaanist:  $\text{CH}_3\text{-(CH}_2\text{)-CH}_3$ .  $\text{(CH}_3\text{)}$ -ahela kristalliseerumisel eraldub nn varjatud soojust ehk latentset soojust ehk faasimuutuse soojust. Arvestades maksumusi, siis ainult tehnoloogilised parafiinid on praktikas kasutatavad soojuse salvestamiseks.<sup>20</sup>

**Rasvhapete** sulamis ja tahkestumistemperatuurid on kõrgemad võrreldes parafiinidega. Üldine rasvhappe valem on  $\text{CH}_3\text{(CH}_2\text{)}_{2n}\text{-COOH}$ . Rasvhapete suurimaks puuduseks on nende maksumus, st nad on 2-2,5 korda kallimad võrreldes tööstuslike parafiinidega.

<sup>18</sup> Olekudiaagrammil vastab eutektikumile eutektiline punkt, milles vedel eutektikum on tasakaalus tahkete faasidega

<sup>19</sup> D. Zhou, C.Y. Zhao, Y. Tian. Review on thermal energy storage with phase change materials (PCMs) in building applications. Applied Energy 98 (2012) 593-605.

<sup>20</sup> A. Sharma, V.V. Tyagi, C.R. Chen, D. Buddhi. Review on thermal energy storage with phase change materials and applications. Renewable and Sustainable Energy Reviews 13 (2009) 318-345.

**Soolahüdraate** võib vaadelda kui soola ja vee sulameid, mis moodustavad kristallilise tahke aine. Üldine soolahüdraate iseloomustav keemiline valem on  $AB \cdot nH_2O$ . Soolahüdraatide peamiseks probleemiks on inkongruentne sulamine<sup>21</sup> ja vajadus täiendava jahutuse järele tahkestumise tagamiseks.

**Metallide** korral kasutatakse madala sulamistemperatuuriga metalle ja metallieutektikume. Metallide eeliseks võrreldes teiste faasimuutusega materjalidega on kõrge soojusjuhtivus, kuid tänu suhteliselt suurele massile ja sellest tulenevale kasutusvõimaluste piiratusele ei ole neid tõsiselt uuritud.

**Eutektikumid** on kahest või rohkemast komponendist koosnev aine, mille iga komponent sulab ja tahkestub kongruentselt<sup>22</sup> moodustades kristalliseerumisel komponentide kristallide segu.

Faasimuutusega materjalide valiku põhilised kriteeriumid on järgmised:

- omab sulamistemperatuuri soovitud töötemperatuuri vahemikus,
- omab massiühiku kohta kõrget faasimuutuse soojushulka, et väiksema materjalikogusega oleks võimalik salvestada võimalikult palju soojust,
- kõrge materjali erisoojus, et lisaks faasimuutusega salvestamisele oleks võimalik salvestada soojust otse nn ilmse soojusena,
- kõrge soojusjuhtivus, et temperatuurigradient salvestamisel ning salvestatud soojuse kasutamisel oleks minimaalne,
- vähene mahumuutus faasimuutusel, et oleks võimalik kasutada lihtsa konfiguratsiooniga seadmeid,
- omab vähest vajadust lisajahutuse järele jahtumiseks või jahutusvajadus puudub üldse,
- on keemiliselt stabiilne, ei lagune ja ei mõju materjalidele korrodeeruvalt,
- ei sisalda mürgiseid, põlevaid ega plahvatusohtlikke ühendeid,
- on saadaval madala hinnaga ja piisavalt suurtes kogustes.

Enim kasutatavate faasimuutusega materjalide soojusfüüsikalised omadusi illustreerib Tabel 2.2. Tabelist on näha, et enamik materjale omab faasimuutust vahemikus 0-65 °C, mis on sobilik sooja tarbevee ja jahutuse rakendustest soojuse ja külma salvestamiseks. Tabel 2.3 annab ülevaate mõningatest kommertskasutuses olevatest materjalidest.

<sup>21</sup> Inkongruentne sulamine on sulamine, mille käigus tekkinud vedeliku koostis erineb algse tahke aine koostisest.

<sup>22</sup> Tavalise ehk kongruentse sulamise korral muutub tahke aine sama koostisega vedelikuks ja vastupidi.

**Tabel 2.2** Faasimuutusega materjalide soojusfüüsikalisi omadusi.<sup>23</sup>

Ühend	Sulamistemperatuur, $T_s$ (°C)	Sulamissoojus, C (kJ/kg)	Erisoojus, $c_p$ (kJ/(kgK))	Soojusjuhtivus, $\lambda$ (W/(mK))	Tihedus, $\rho$ (kg/m <sup>3</sup> )
Vesi-jää	0	335	4,2(vedel) 2,05(tahke)	0,55(vedel) 2,2(tahke),	1000(vedel) 917(tahke)
RT25-RT30	26,6	232,0	1,80(vedel) 1,41(tahke)	0,18(vedel) 0,19(tahke)	749(vedel) 785(tahke)
n-oktadekaan	27,7	243,5	2,66(vedel) 2,14(tahke)	0,148(vedel) 0,190(tahke)	785(vedel) 865(tahke)
CaCl <sub>2</sub> ·6H <sub>2</sub> O	29,9	187	2,2(vedel) 1,4(tahke)	0,53(vedel) 1,09(tahke)	1530(vedel) 1710(tahke)
Parafiinivaha	32-32,1	251	3,26(vedel) 1,92(tahke)	0,224(vedel) 0,514(tahke)	830
Polüetüleenglükool 900 (PEG 900)	34	150,5	2,26(vedel) 2,26(tahke)	0,188(vedel) 0,188(tahke)	1100(vedel) 1200(tahke)
Laurhape	41-43	211,6	2,27(vedel) 1,76(tahke)	1,6	862(vedel) 1007(tahke)
Meditiiniline parafiin	40-44	146	2,3(vedel) 2,2(tahke)	2,1(vedel) 0,5(tahke)	830
P116-vaha	46,7-50	209	2,89(vedel) 2,89(tahke)	0,277(vedel) 0,140(tahke)	786
Parafiin RT60/RT58	55-60	214,4-232	0,9	0,2	775(vedel) 850(tahke)
RT100	99	168	2,4(vedel) 1,8(tahke)	0,2(vedel) 0,2(tahke)	770(vedel) 940(tahke)
MgCl <sub>2</sub> ·6H <sub>2</sub> O	116,7	168,6	2,61(vedel) 2,25(tahke)	0,570(vedel) 0,704(tahke)	1450(vedel) 1570(tahke)
Erütritool	117,7	339,8	2,61(vedel) 2,25(tahke)	0,326(vedel) 0,733(tahke)	1300(vedel) 1480(tahke)
NaNO <sub>3</sub>	310	172	1,82	0,5	2260
KNO <sub>3</sub>	330	266	1,22	0,5	2110
NaOH	318	165	2,08	0,92	2100
KOH	380	149,7	1,47	0,5	2044
ZnCl <sub>2</sub>	280	75	0,74	0,5	2907

<sup>23</sup> F. Agyenim, N. Hewitt, P. Eames, M. Smyth. A review of materials, heat transfer and phase change problem formulation for latent heat thermal energy storage systems (LHTESS). Renewable and Sustainable Energy Reviews 14 (2010) 615-628.

**Tabel 2.3 Kommertskasutuses olevad faasimuutusega materjalid.<sup>24</sup>**

Materjal	Sulamistemperatuur, $T_s$ (°C)	Sulamissoojus, C (kJ/kg)	Erisoojus, $c_p$ (kJ/(kgK))	Soojusjuhtivus, $\lambda$ (W/(mK))	Tootja
RT 20	22	172	-	-	Rubitherm GmbH
RT 25	25	147	2,9(tahke) 2,1(vedel)	1,02(tahke) 0,56(vedel)	Rubitherm GmbH
RT27	26-28	179	1,8(vedel) 2,4(tahke)	0,2	Rubitherm GmbH
STL 27	27	213	-	-	Mitsubishi Chemicals
Climsel C23	23	148	-	-	Climator
Climsel C24	24	216	-	-	Climator
S27	27	190	1,5(tahke) 2,22(vedel)	0,79(tahke) 0,48(vedel)	Cristopia
TH 29	29	188	-	-	TEAP
SP 22 A 17	22	150	-	0,6	Rubitherm GmbH
SP 25 A 8	25	180	2,5	0,6	Rubitherm GmbH
SP 29	29	157	-	0,6	Rubitherm GmbH

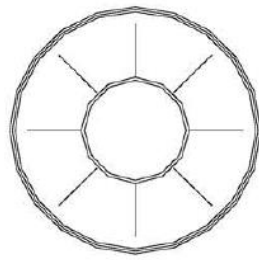
#### 2.10.4.2 Faasimuutusega materjalide soojusülekanne parendamine

Selleks, et kiirendada faasimuutusega materjalide soojuse ülekandmise protsessi, kasutatakse erinevaid lahendusi soojusjuhtivuse parendamiseks:

- ribitatud pindade kasutamine,
- erinevatest materjalidest (grafiit, ränikarbiid (SiC), nikliga pinnatud vasekerad) mikrokapslite lisamine,
- terases või roostevabast terasest valmistatud metallstruktuurid,
- kõrge soojusjuhtivusega materjalide (vask, hõbe, alumiinium) osakeste dispergeerimine,
- kõrge soojusjuhtivusega ja madala tihedusega materjalide kasutamine (süsinikkiudude ja parafiini komposiitmaterjal),
- kõrge soojusjuhtivusega poorsete materjalide impregneerimine (grafiit).

Joonis 2.20 annab ülevaate mõningatest viisidest, mida on uuritud faasimuutusega salvestamisel soojusülekanne parendamiseks.

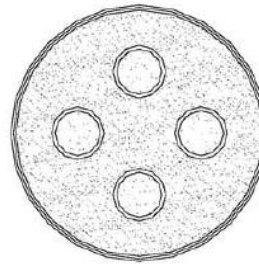
<sup>24</sup> D. Zhou, C.Y. Zhao, Y. Tian. Review on thermal energy storage with phase change materials (PCMs) in building applications. Applied Energy 98 (2012) 593-605.



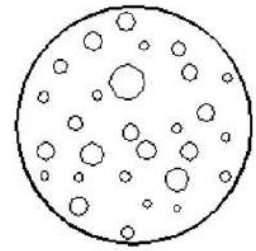
(i) Pikisuunalised või aksiaalribid



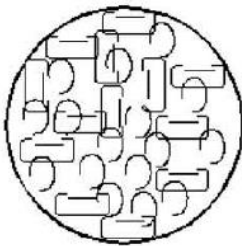
(ii) Ümarribid



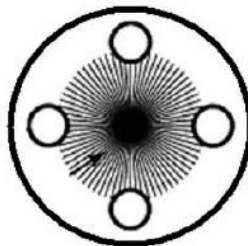
(iii) Mitmetoruline



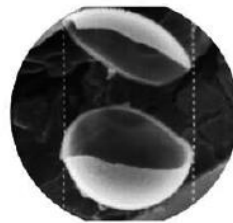
(iv) Mullidega segamine



(v) Metallrõngad



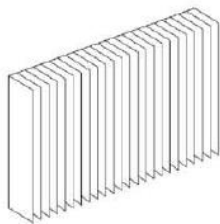
(vi) Süsinikharjakestega mitmetorusüsteem



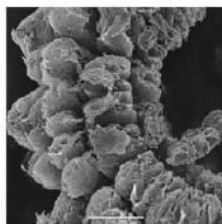
(vii) Kapslid



(ix) Metallmaatriks



(x) Ribitatud ristkülikukujuline konteiner



(xi) Grafiidihelbed



(xii) Terasest pallikujulised kapslid



(xiv) Polüolefiinist sfäärilised pallid



(xv) Polüpropüleenist tasapinnalised plaadid



(xvi) Moodulad



(xvii) Faasimuutusega grafiit



(xviii) Tasapinnaline kompaktpaneel

**Joonis 2.20 Faasimuutusega materjalide soojusülekanne intensiivistamise meetodid<sup>25,26</sup>**

<sup>25</sup> F. Agyenim, N. Hewitt, P. Eames, M. Smyth. A review of materials, heat transfer and phase change problem formulation for latent heat thermal energy storage systems (LHTESS). Renewable and Sustainable Energy Reviews 14 (2010) 615-628.

<sup>26</sup> D. Fernandes, F. Pitié, G. Cáceres, J. Baeyens. Thermal energy storage: „How previous findings determine current research priorities“. Energy 39 (2012) 246-257.

### 2.10.4.3 Kasutamine

Ehitiste korral uuritakse erinevaid võimalusi faasimuutusega soojussalvestite integreerimiseks hoone konstruktsiooni ja ehitusmaterjalidega.

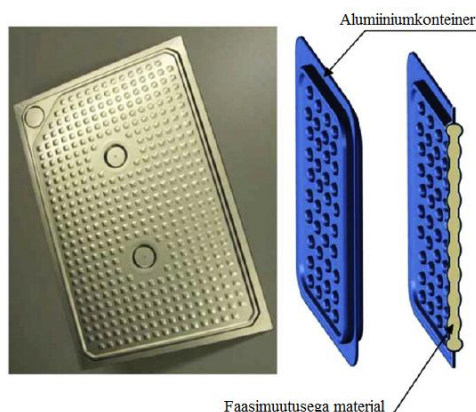
Kolm kõige lootustandvamat tehnoloogiat on faasimuutusega materjali otsene kokkusegamine konstruktsioonimaterjaliga, immersioon (sukeldamine) või kapseldamine.<sup>27</sup>

Faasimuutusega salvestamist ei kasutata hoonete korral mitte ainult soojuse salvestamiseks vaid ka külma salvestamiseks, nt öisel ajal salvestatakse külma, mida on võimalik päevasel ajal kasutada hoone jahutamiseks jahutustippude silumiseks.

**Otsene kokkusegamine** on kõige lihtsam meetod, kus faasimuutusega materjal lisatakse ehitusmaterjali selle tootmise käigus, nt kipsi, betooni, krohvi. Sellise meetodi puuduseks on lekkeoht ja faasimuutusega materjali mitesobivus konstruktsioonimaterjaliga pikemaajalisel ekspluatatsioonil.

**Immersioon** on meetod, kus ehituskonstruktsiooni osa (kips, tellis, betoon) kastetakse sulatatud faasimuutusega materjali sisse ning nad absorbeerivad vedelat faasimuutusega materjali enda sisse. Selle meetodi miinuseks on samuti lekkeprobleem pikemaajalisel ekspluatatsioonil.

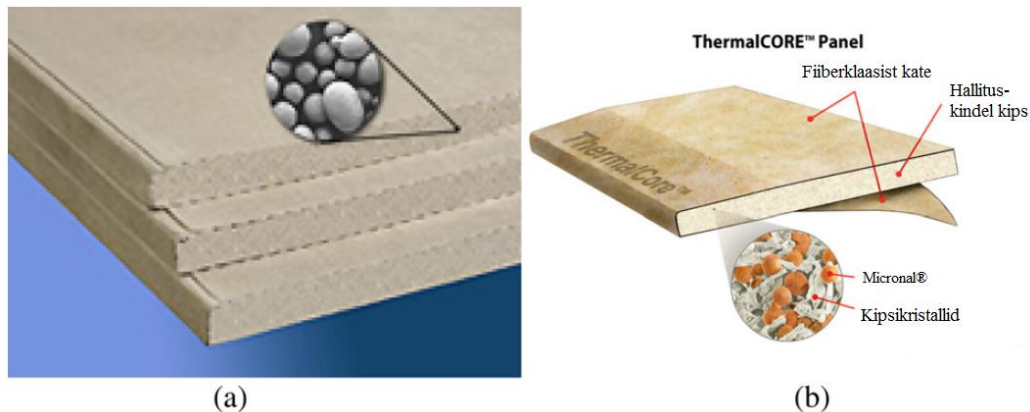
**Makrokapseldamine** on meetod, kus faasimuutusega materjal on paigutatud kapseldatud konteinerisse (torud, kerad, paneelid). RUBITHERM® toodab paneele, mida nimetatakse CSM mooduliteks (vt ka Joonis 2.21). Need on tehtud alumiiniumist ja korrosioonivastase pindega ning nad sobivad enamike faasimuutusega materjalidega. Makrokapseldusega tehnoloogia korral on võimalik vältida lekkeprobleeme ja ehitusmaterjalid on faasimuutusega materjali poolt vähem mõjutatud. Samas on puuduseks suhteliselt madal soojusjuhtivus, tendents tahkestumisele servades (faasimuutust ei toimu) ning keerukas integreerimine ehitusmaterjalidega.



Joonis 2.21 CSM paneel, mis sisaldab faasimuutusega materjali<sup>28</sup>

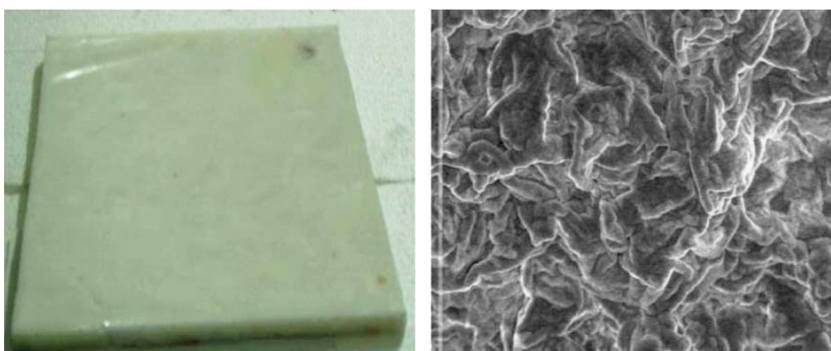
<sup>27</sup> D.W. Hawes, D. Feldman, D. Banu. Latent heat storage in building materials. Energy & Buildings 20 (1993) 77-86.

**Mikrokapseldamine** on meetod, kus faasimuutusega materjal suletakse õhukesse, hermeetilisse, suure molaarmassiga polümeersesse kilesse, mis säilitab oma kuju ja väldib faasimuutusega materjali leket. Mikrokapselduse tehnoloogia abil on faasimuutusega materjale ehitusmaterjalidega liita lihtsamalt ja ökonoomsemalt. Siiski on oht, et selline meetod vähendab ehitusmaterjali tugevusomadusi. Samuti vajab täiendavat uurimist tuleohutus. BASF on välja arendanud faasimuutusega materjali Micronal<sup>®</sup>, mida pakutakse kasutamiseks ehitusmaterjalides, vt Joonis 2.22.



**Joonis 2.22 Micronal<sup>®</sup> faasimuutusega materjali sisaldav kipsplaat (BASF) b) thermalCORE faasimuutusega kipsplaat (National Gypsum)<sup>29,30</sup>**

**Stabiilse kujuga faasimuutusega** materjali tehnoloogia põhineb printsiibil, mille korral faasimuutusega soojust salvestava aine pihustatakse toetava materjali sisse (nt suure tiheduse polüetüleen) ning moodustub stabiilne komposiitmaterjal, vt Joonis 2.23. Sellele tehnoloogiale pööratakse tähelepanu ning testid on näidanud nende materjalide vastupidavust mitmetele tsüklitele.



**Joonis 2.23 Stabiilse kujuga faasimuutusega soojust salvestava komposiitmaterjali plaat<sup>31</sup>**

<sup>28</sup> A. Castell, I. Martorell, M. Medrano, G. Perez, L.F. Cabeza. Experimental study of using PCM in brick constructive solutions for passive cooling. Energy & Buildings 42 (2010) 534-540.

<sup>29</sup> [http://www.micronal.de/portal/load/fid443847/BASF\\_Micronal\\_PCM\\_Brochure%202009\\_English.pdf](http://www.micronal.de/portal/load/fid443847/BASF_Micronal_PCM_Brochure%202009_English.pdf)

<sup>30</sup> <http://www.thermalcore.info/>

#### 2.10.4.4 Praktilisi näiteid

##### **Seinaplaadid**

Faasimuutusega materjalid on lihtsam viis asendamaks olemasolevad nn termilist massi soojust salvestavaga, et salvestada hoonesse tulevat energiat päikeselt.

##### **Seinad**

Faasimuutusega materjale on võimalik liita ehitusmaterjalide koostisse ehituse käigus, nt betooni.

##### **Põrandad**

On uuritud stabiilse kujuga faasimuutusega materjali sisaldavat komposiitplaatide kasutamist põrandamaterjaliga päikeselt tuleva soojuse salvestamiseks. Sulamissoojuse kogus peaks sellisel juhul olema suurem kui 120 kJ/kg ja soojusjuhtivus 0,5 W/(mK). Plaadi paksus ei tohiks olla paksem kui 20 mm.<sup>32</sup>

Ceron et al<sup>33</sup> on välja töötanud ja patenteerinud faasimuutusega soojuse salvestamisel põhinevad plaadid, vt ka Joonis 2.24. Plaadid absorbeerivad soojust päikeselt päevasel ajal ja vajadusel kütavad maja öisel ajal. Teisest küljest toimib see ka siseõhutemperatuuri alandajana päikesepaistelisel ajal.



**Joonis 2.24 Faasimuutusega soojust salvestavad plaadid**

##### **Laed**

Kondo ja Iwamoto<sup>34</sup> on konstrueerinud (vt ka Joonis 2.25) kontorihoonetele kivivillast laeplaadid, mille sisse on kapseldatud faasimuutusega soojust salvestav materjal. Öösel, kui elekter on odavam, juhitakse külma välisõhku laeplaatide taga olevasse kambrisse. Baasjahutuskoormuse ajal jahutatakse ruumi jahutussüsteemiga. Jahutuskoormuse tipu ajal

<sup>31</sup> Y.P. Zhang, K.P. Lin, R. Yang, H.F. Di, Y.Jiang. Preparation, thermal performance and application of shape-stabilized PCM in energy efficient buildings. *Energy and Buildings* 28 (2006) 1262-1269.

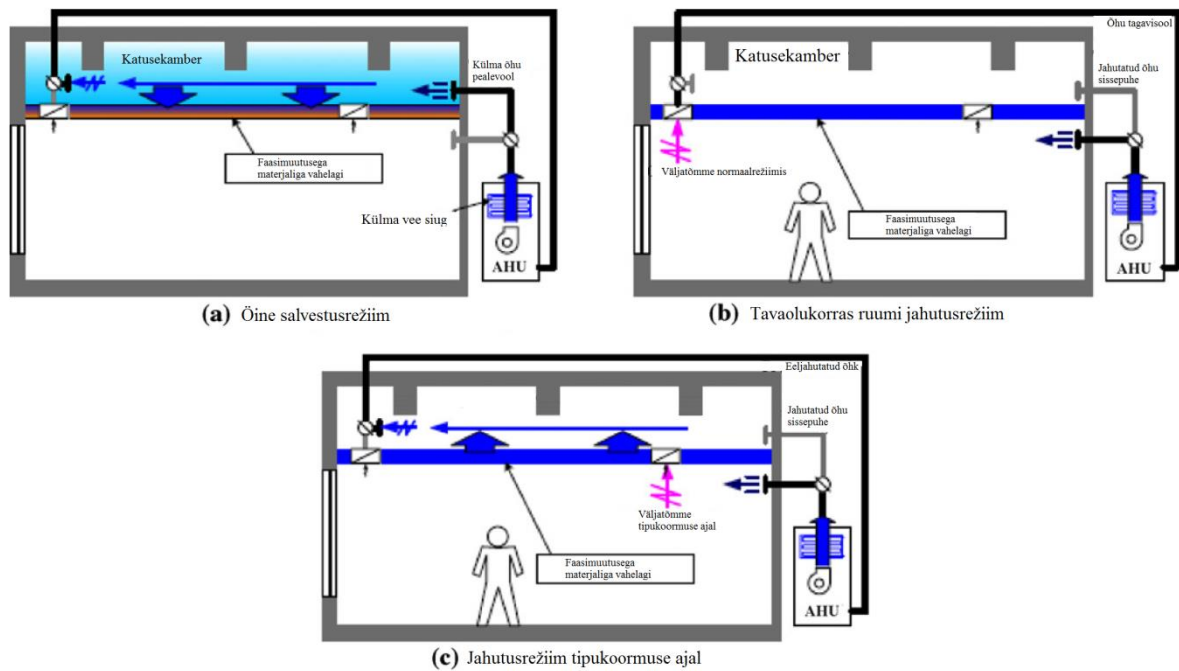
<sup>32</sup> X. Xu, Y.P. Zhang, K.P. Lin, H.F. Di, R. Yang. Modelling and simulation on the thermal performance of shape-stabilized phase change material floor used in passive solar buildings. *Energy and Buildings* 37 (2005) 1084-1091.

<sup>33</sup> I. Ceron, J. Neila, M. Khayet. Experimental tile with phase change materials (PCM) for building use. *Energy and Buildings* 40 (2008) 937-944.

<sup>34</sup> T. Kondo, T Iwamoto. Research on using the PCM for ceiling board. IEA ECESIA, Annex 17, 3<sup>rd</sup> workshop, Tokyo, Japan, 2002.



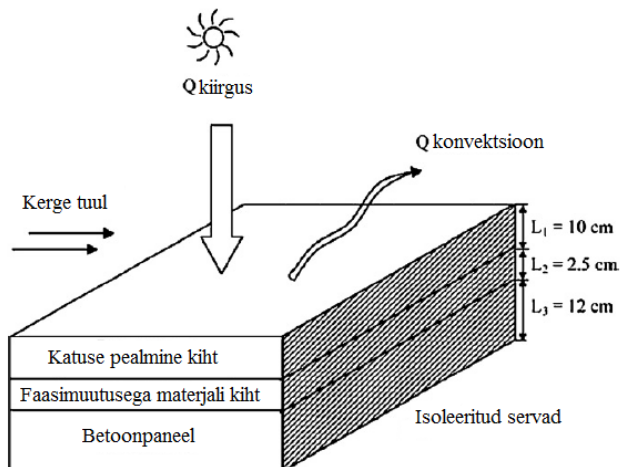
juhatakse ruumiõhk laeplaatide taga olevasse kambrisse ning kasutatakse ära sinna salvestatud külma.



**Joonis 2.25 Laepaneelide süsteem**

### ***Katused***

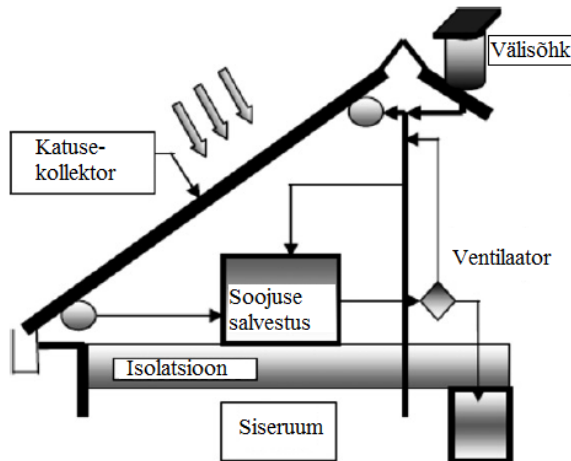
Faasimuutusega paneelide kasutamist on uuritud ka katuste korral, vt ka Joonis 2.26. Katsetulemused näitasid, et ruumitemperatuuri kõikumised olid väiksemad ning ei olnud nii suuri erinevusi eri aastaegadel võrreldes traditsioonilise konstruktsiooniga.<sup>35</sup>



**Joonis 2.26 Mitmekihiline katusekonstruktsioon faasimuutusega soojuste salvestamisega**

<sup>35</sup> A. Pasupathy, R. Velraj, Effect of double layer phase change material in building roof for year around thermal management, Energy and Buildings 42 (2010) 1361-1368.

Lõuna-Austraalia Ülikool on töötanud välja katusepaneelidega õhkküttesüsteemi. Päikeselt tuleva energia absorbeerijana kasutatakse tavalist gofreeritud katuseplekki, mille all on faasimuutusega sojussalvesti. Ventilatoritega puhutakse õhku läbi ruumi ja õhuga kantakse soojust edasi teistesse ruumidesse. Päeval toimub soojuse akumulatsioon ning öisel või pilvisel ajal kasutatakse salvestatud soojust kütmiseks.



**Joonis 2.27 Päikeselt tuleneva soojuse salvestamisega õhkküttesüsteem<sup>36</sup>**

### ***Ribikardinad***

Mehling<sup>37</sup> tõi oma uurimuses välja, et ribikardinatega varjestuse tõttu (vt ka Joonis 2.28) maksimaalne ruumitemperatuur nihkub kolme tunni võrra edasi ja alaneb kahe kraadi võrra.



**Joonis 2.28 Faasimuutusega soojust salvestavat materjali sisaldavad ribikardinad**

### **2.10.5. Keemiline salvestamine**

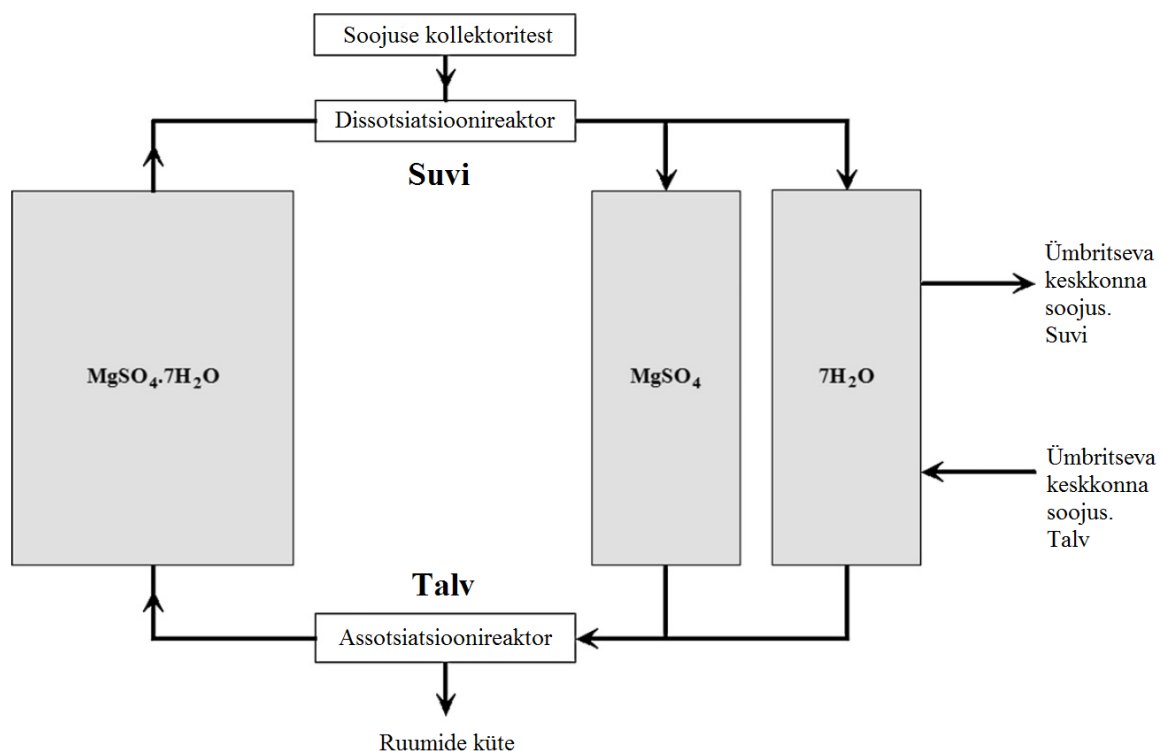
Keemilise salvestamise võib jagada keemilistel reaktsioonidel põhinevaks ja termo-keemiliseks (sorptsioon<sup>38</sup>) protsessideks.<sup>39</sup>

<sup>36</sup> W.Y. Saman, M. Belusko. Roof integrated unglazed transpired solar air heater. In: T. Lee editor. Proceedings of the 1997 Australian and New Zealand Solar Energy Society. Paper 66, Canberra, Australia, 1997.

<sup>37</sup> H.Mehling. Strategic project „Innovative PCM-Technology“ – results and future perspectives, 8th expert meeting and work shop, Kizkalesi, Turkey, April 18-24, 2004.

### 2.10.5.1 Keemilised reaktsioonid

Keemiline salvestamine eeldab, et salvestamise eelduseks olevad keemilised reaktsioonid on täielikult pöörduvad. Salvestamisel antakse salvestisse soojust, mille tagajärjel toimuvad endotermilised<sup>40</sup> reaktsioonid. Kui reaktsioon on täielikult pöörduv, siis eksotermilise<sup>41</sup> reaktsiooni käigus vabaneb soojust. Enamasti vajatakse viimaste protsesside läbiviimiseks katalüsaatorit<sup>42</sup>. Katalüsaatori kasutamine on kasulik ka protsessi kontrollimise eesmärgil. Joonis 2.29 illustreerib ühte võimalikku keemilise salvestuse võimalust. Keemiline reaktsioon, mida kasutatakse on järgmine:



**Joonis 2.29 Keemilise salvestamise prototüüp<sup>43</sup>**

Keemiliselt soojust salvestamiseks võimalikest viisidest annab ülevaate Tabel 2.4.

<sup>38</sup> Sorptsioon (ka sorbeerumine, sorbeerimine) on gaasi, vedeliku või mõne nende komponendi neeldumine vedelikus või tahkes aines või kogunemine tahke aine pinnale

<sup>39</sup> C. Bales, P. Gantenbein, D. Jaenig, H. Kerskes, K. Vissher. Final report of subtask B – chemical and sorption storage. Report B7-IEA SHC Task 32. International Energy Association, 2008.

<sup>40</sup> Keemilised reaktsioonid, mis vajavad kulgemiseks soojust väljastpoolt juurde.

<sup>41</sup> Keemilised reaktsioonid, mille esinemisel eraldub protsessi käigus soojust.

<sup>42</sup> Katalüsaator on aine, mis kiirendab/aitab läbi viia mingit keemilist reaktsiooni, kuid pärast reaktsiooni vabaneb endises koguses.

<sup>43</sup> C. Bales, P. Gantenbein, D. Jaenig, R. Weber. Laboratory prototypes of thermo-chemical and sorption storage units. Report B3-IEA SHC Task 32. International Energy Association, 2007.

**Tabel 2.4 Võimalikud keemilise salvestamise võimalused<sup>44</sup>**

Materjal	Dissotsiatsioonireaktsioon	Salvestustihedus (GJ/m <sup>3</sup> )	Muundumistemperatuur (°C)
Magneesiumsulfaat	$\text{MgSO}_4 \cdot 7\text{H}_2\text{O} \rightarrow \text{MgSO}_4(\text{t}) + 7\text{H}_2\text{O}$	2,8	122
Ränioksiid	$\text{SiO}_2 \rightarrow \text{Si} + \text{O}_2$	37,9	150
Raudkarbonaat	$\text{FeCO}_3 \rightarrow \text{FeO} + \text{CO}_2$	2,6	180
Raudhüdroksiid	$\text{Fe}(\text{OH})_2 \rightarrow \text{FeO} + \text{H}_2\text{O}$	2,2	150
Kaltsiumsulfaat	$\text{CaSO}_4 \cdot 2\text{H}_2\text{O} \rightarrow \text{CaSO}_4 + 2\text{H}_2\text{O}$	1,4	89

### 2.10.5.2 Termokeemilised protsessid

Termokeemiline protsess põhineb soojuse salvestamisel mingi aines veesidemete lõhkumisel soojusega (desorptsioon<sup>45</sup>), ühe produkti aurustamises ja kondenseerumises hilisemaks kasutamiseks. Soojus tagastatakse kui kondenseerunud aine taas aurustatakse ja seotakse uuesti (sorptsioon) teise ainega. Osad molekulid (sorbent) on vee (sorbaat) suhtes kõrge afiinsusega<sup>46</sup> moodustades veega tugeva sideme. Selle sideme lõhkumine (desorptsioon) ja järgnev aurustamine on endotermiline reaktsioon. Vastupidine reaktsioon (sorptsioon) on eksotermiline reaktsioon.

**Tabel 2.5 Võimalikud sorptsioonivõimalused<sup>47</sup>**

Absorptsioon	Adsorptsioon	Tahke-gaas rekatsioon
$\text{NH}_3\text{-H}_2\text{O}$ (0,40 GJ/kg)	$\text{H}_2\text{O}$ -zeoliit 4A (0,08 GJ/kg)	$\text{H}_2\text{O-Na}_2\text{S}$ (1,27 GJ/kg)
$\text{H}_2\text{O-NaOH}$ (1,00 GJ/kg)	$\text{H}_2\text{O}$ – ränigeel (0,14 GJ/kg)	$\text{H}_2\text{O-MgCl}_2$ (0,84 GJ/kg)
		$\text{H}_2\text{O-CaCl}_2$ (0,98 GJ/kg)
		$\text{H}_2\text{O-LiCl}$ (0,71 GJ/kg)

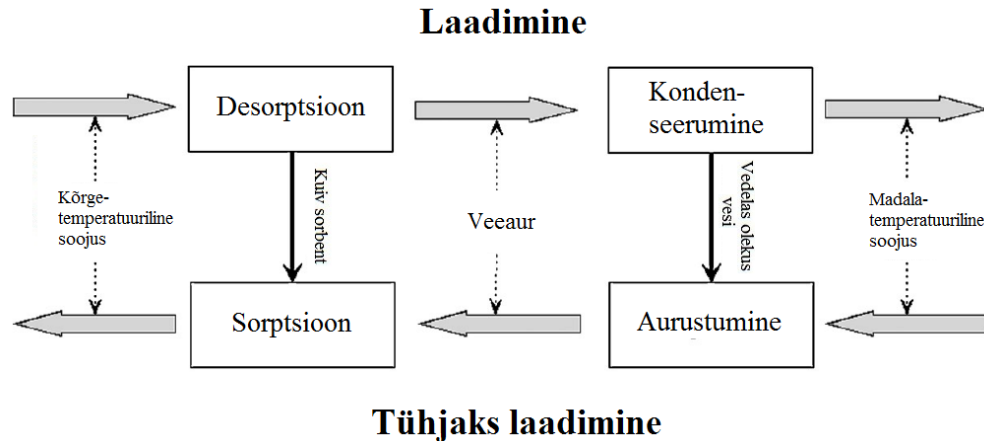
Suletud ringiga sorptsiooni põhimõttel soojuse salvestamisel (vt ka Joonis 2.30) toimub väliskeskkonnaga soojusvahetus, mille tulemusena laadimise faasis sorbaat (vesi) kondenseeritakse. Tühjaks laadimise faasis aga aurustatakse. Aurustumisprotsess vajab madalatemperatuurilist soojust ( $\geq 5$  °C), et tühjaks laadimise faasis vesi aurustada. Selline madalatemperatuuriline soojus on võimalik saada hoone jahutamisel, välisõhust või mujalt „tasuta“ allikalt. Eksotermiline protsessi käigus eraldunud soojust saab kasutada hoone kütmiseks. Seega saab ka seda soojuse salvestamise viisi kasutada nii kütmiseks kui jahutamiseks.

<sup>44</sup> C. Bales, P. Gantenbein, A. Hauer, H.-M. Henning, D. Jaenig, H. Kerskes, et al. Thermal properties of materials for thermo-chemical storage of solar heat. Report B2-IEA SHC Task 32. International Energy Association, 2005.

<sup>45</sup> Desorptsioon on adsorptsiooni vastupidine protsess. **Adsorptsioon** on aatomite, ionide, biomolekulide, gaasiliste, vedelate ning lahustunud molekulide adhesioon pinnale.

<sup>46</sup> Afiiinsus keemias iseloomustab aine või funktsionaalrühma võimet reageerida mingi teise ainega.

<sup>47</sup> C. Bales, P. Gantenbein, A. Hauer, H.-M. Henning, D. Jaenig, H. Kerskes, et al. Thermal properties of materials for thermo-chemical storage of solar heat. Report B2-IEA SHC Task 32. International Energy Association, 2005.



**Joonis 2.30 Suletud ringiga sorptsioonipõhine salvestamine<sup>48</sup>**

### 2.10.6. Külma salvestamine

Külma salvestatakse tavaliselt jääna, jahutatud veena või eutektikumide lahuseks öisel ajal ning kasutatakse päevasel ajal. On oluline märkida, et külma salvestamine on odavam kui salvestada elektrit tootmaks jahutuse tipukoormuse ajal külma.<sup>49</sup> Öise elektri kasutamine on odavam kui päevase elektri kasutamine ning öine välisõhutemperatuur on madalam võrreldes päevase temperatuuriga, mis omakorda muudab külmaseadme töö efektiivsemaks. Külma salvestamine jahutatud veena ja jääna on tänapäeval otstarbekamad rakendada kui kasutada eutektikume. Tabel 2.6 annab ülevaate erinevate jahutusviiside võrdlusest.

**Tabel 2.6 Jahutussüsteemide võrdlus<sup>50</sup>**

Parameeter	Jahutatud vesi	Jääna salvestamine	Eutektiline sool
Erisoojus (kJ/(kgK))	4,19	2,04	-
Varjatud soojus sulamisel	-	334	80-250
Jahutav keskkond	Vesi	Madalatemperatuuriline sekundaarne jahutusagenss	Vesi
Jahuti maksumus (\$/kW)	57-85	57-142	57-85
Mahuti suurus (m <sup>3</sup> /kWh)	0,089-0,169	0,019-0,023	0,048
Salvesti maksumus (\$/kWh)	8,5-28	14-20	28-43
Laadimistemperatuur (°C)	4-6	-6 kuni -3	4-6
Jahuti laadimiseefektiivsus (Jahutustegur)	5,0-6,0	2,7-4,0	5,0-6,0
Tühjakslaadimise temperatuur (°C)	1-4	1-3	9-10
Mahuti	Avatud	Suletud	Avatud
Hooldusvajadus	Kõrge	Keskmine	Keskmine

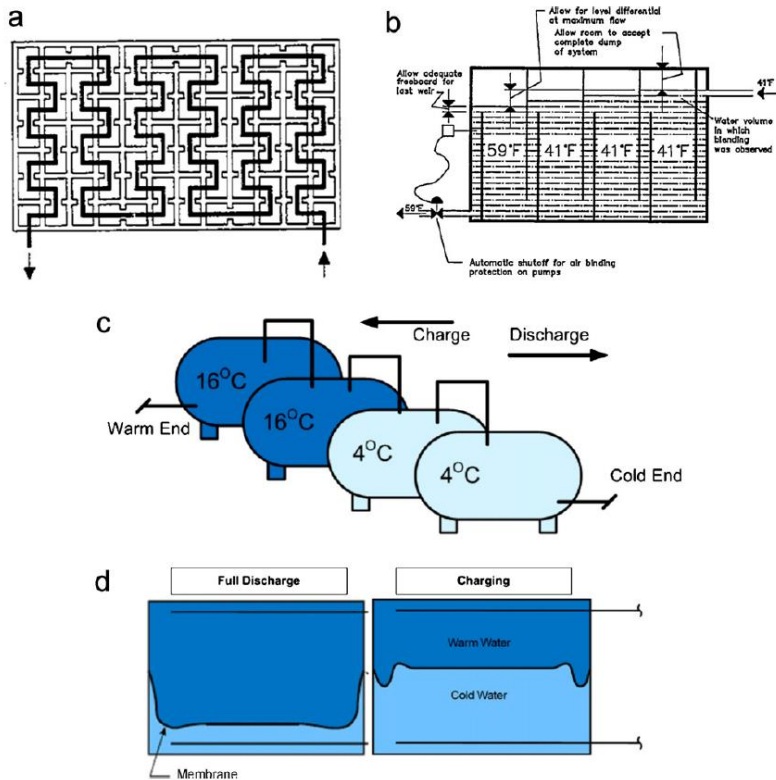
<sup>48</sup> C. Bales, P. Gantenbein, D. Jaenig, R. Weber. Laboratory prototypes of thermo-chemical and sorption storage units. Report B3-IEA SHC Task 32. International Energy Association, 2007.

<sup>49</sup> M. MacCracken. Energy storage providing for a low-carbon future. ASHRAE Journal 2 (2010) 8–36. September.

<sup>50</sup> S.M. Hasnain. Review on sustainable thermal energy storage technologies. Part II: cool thermal storage. J Energy Convers Manage 39 (1998) 1139–1153.

### 2.10.6.1 Jahutatud veena salvestamine

Jahutatu vee mahuti konstruktsioon peab olema selline, et oleks välditud jahutatud vee ja jahutisse tuleva soojema vee otsene segunemine. Selleks on üldjuhul vaja tavapärasest keerukamaid mahutikonstruktsioone või torusüsteemi. Viimased on aga kallid ja suhteliselt tülikad ekspuaterida. Jahutatud vee mahutite konstruktsioonidest annab ülevaate Joonis 2.31.



Joonis 2.31 Jahutatud vee mahutite konstruktsioone: a) labürintmahuti, b) sektioneeritud mahuti,<sup>51</sup> c) järjestikühendusega, d) membraaniga<sup>52</sup>

### 2.10.6.2 Salvestamine jääna

Külma salvestamise korral jääna on erinevaid võimalusi jää tootmiseks. Külma salvestamist jääna võib jää tootmise viiside järgi jaotada:

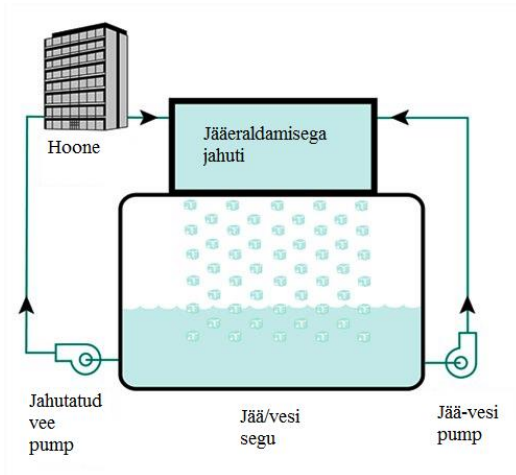
- jääeraldamisega
- jäälobri
- jääkapslite kasutamine
- jää tekitamine toru pinnal

Jääeraldamisega salvesti korral (vt ka Joonis 2.32) on tegemist isoleeritud mahutiga, mille üleval osas on vertikaalne plaatpind. Laadimise tsüklis tekib jää plaadi aurusti pinnal. Aurusti

<sup>51</sup> E.I. Mackie, G. Reeves. Stratified chilled water storage tank design guide. Palo Alto, CA, Electric Power Research Institute, 1988.

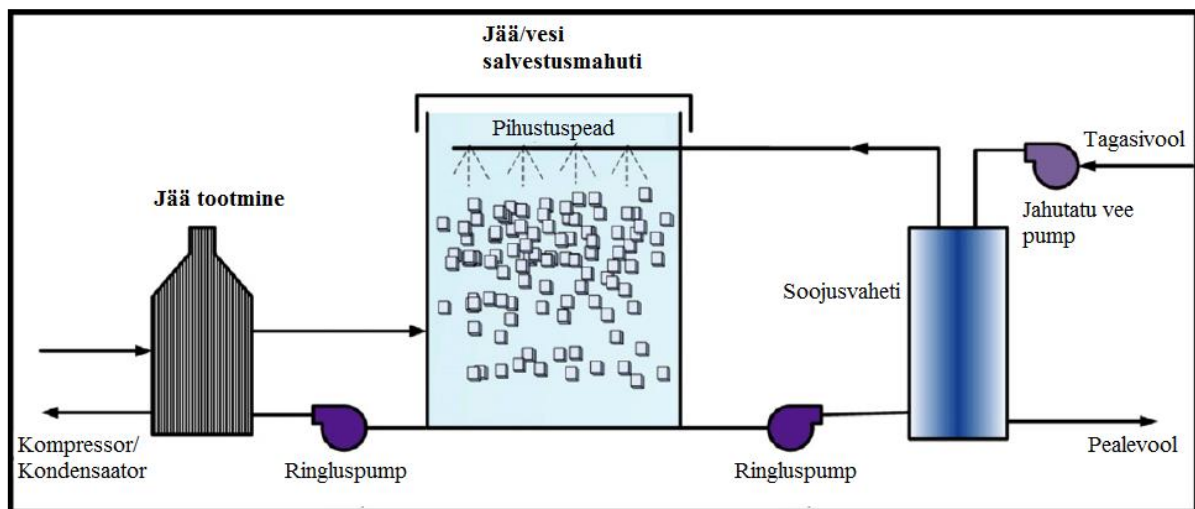
<sup>52</sup> Cool storage technology guide. Palo Alto, CA, EPRI, 2000 (TR-111874).

välispinnale juhatakse 0 °C vesi ja teisel pool ringleb külmaaine. Jää eraldatakse juhtides kuuma gaasi aurustisse ja see tõstab aurusti välispinna temperatuuri 5 °C-ni ning jää sulab aurusti välispinna küljest lahti ja kukub alla mahutisse.



**Joonis 2.32 Jääeraldamisega salvesti (ice harvester) põhimõtteskeem<sup>53</sup>**

Jäälobri tekitamiseks on lahja vesi/glükool lahuse torustik asetatud külmaaine sisse. Külmaaine jahutab lahust, mille tulemusena tekib jääkristallide suspensioon, vt ka Joonis 2.33.



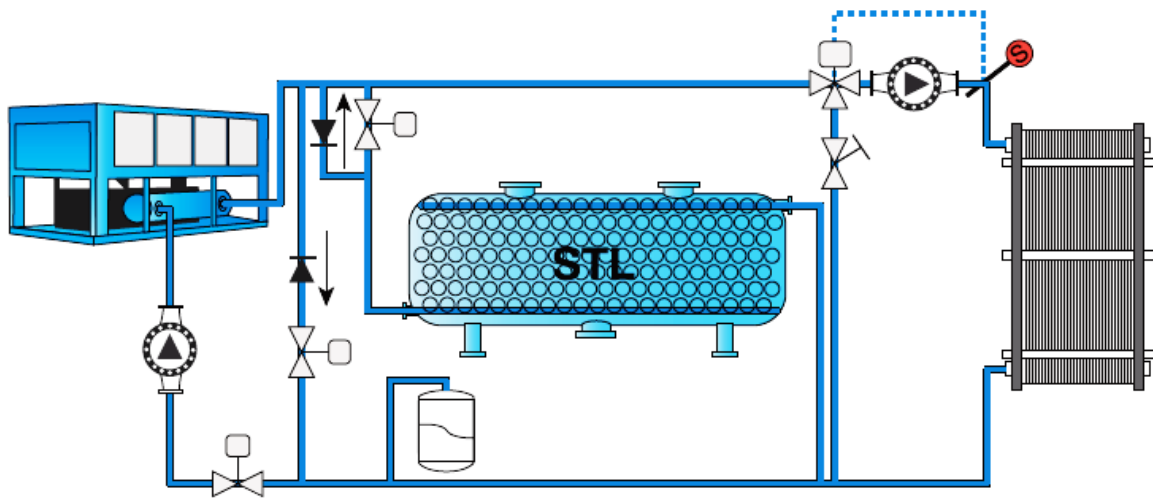
**Joonis 2.33 Jäälobri põhimõttel salvesti põhimõtteskeem<sup>54</sup>**

Jääkapslitega külma jääna salvestamise meetodi korral kasutatakse erineva kujuga veega täidetud kapsleid, mis asuvad nt etüleenglükooliga täidetud mahutis. Laadimise faasis ringleb mahutis madalatemperatuuriline (-6 kuni -3 °C) lahus, mis külmutab kapslites oleva vee.

<sup>53</sup> <http://www.energydesignresources.com/resources/e-news/e-news-67-cool-thermal-energy-storage.aspx>

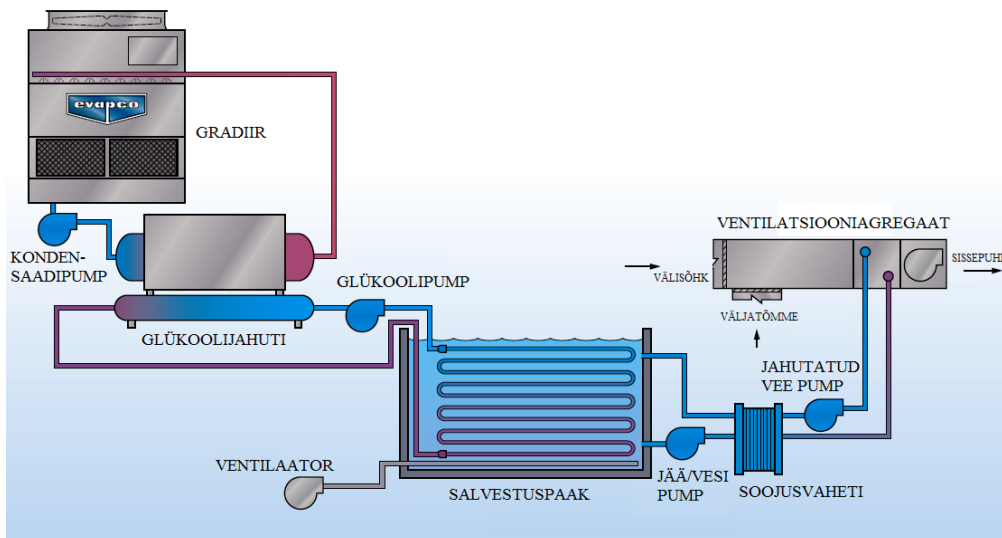
<sup>54</sup> Y.H. Yau, B. Rismanchi. A review on cool thermal storage Technologies and operating strategies.

Salvestatud külma kasutamise perioodil kantakse soojusvaheti kaudu jahutussüsteemiga tarbija juures eemaldatav soojus külmamahuti lahusele, vt ka Joonis 2.34.



**Joonis 2.34 Jääkapslitega salvesti põhimõtteskeem<sup>55</sup>**

Jää tekitamisel toru pinnale on mingi torukimp asetatud ümbritseva veemahuti sisse, vt ka Joonis 2.35. Torudes voolab külmaaine, mis jahutab vett ning toru välispinnale tekib jääkiht. Salvestatud külma kasutamise perioodil kantakse soojusvaheti kaudu jahutussüsteemiga tarbija juures eemaldatav soojus külmamahuti veele.



**Joonis 2.35 Toru pinnale jää tekitamisega külmasalvesti<sup>56</sup>**

<sup>55</sup> Cristopia.

<sup>56</sup> [http://www.evapco.eu/sites/evapco.eu/files/imce/thermal\\_storage\\_schematic.png](http://www.evapco.eu/sites/evapco.eu/files/imce/thermal_storage_schematic.png)



## 2.10.7. Soojussalvestite kokkuvõte

- Soojuse salvestamiseks on erinevaid viise.
- Soojuse salvestamisel tuleb tähelepanu pöörata ainete erinevatele omadustele.
- Soojus salvestamise planeerimisel on oluline valida salvestusviis vastavalt vajalikule temperatuurivahemikule.
- Soojuse salvestamine ja selle optimeerimine vajab põhjalikku tehnilis-majanduslikku analüüsi.
- Soojuse salvestusviisi valikul on soovitatav lähtuda kommertskasutuses olevatest viisidest.
- Uute hoonete korral on võimalus konstruktsioonelementidesse erinevaid faasimuutusega soojuse salvestamise põhimõtteid lihtsamalt integreerida.
- Arendamisjärgus olevad materjalid ja meetodid võivad kaasa tuua hilisemaid komplikatsioone hoone eksploatatsioonis, nt lekked.
- Soojuse salvestamisel on oluline silmas pidada temperatuuride erinevusi ja termodünaamikat.
- Faasimuutusega soojust salvestavate materjalide integreerimine ehitusmaterjalidega annab võimaluse reguleerida ka siseõhutemperatuuri ning siluda temperatuurikõikumisi. Samuti vähendada vajadust kütte- ja jahutussüsteemide kasutamise järele, mis kasutavad elektrienergiaid- ja masinaid.
- Keemiline soojuse salvestamine ei ole tänapäeval leidnud kasutust praktilistel eesmärkidel, kuna nii tehniline kui majanduslik pool vajab veel lahendamist. Samuti on kasutatavad ained suhteliselt kõrge maksumusega.
- Külma salvestamisel on enim kasutatavad jääna salvestamise süsteemid.
- Õine külma salvestamine on üldjuhul soodsam, kui salvestada nn õist elektrit päevasel ajal külma tootmiseks.

## 2.11. Salvestustehnoloogiate elu- ja kulutsükli karakteristikud

Loetletud valikust on kõige parema salvestustehnoloogia valimine üpriski keeruline. Üksikult on iga tehnoloogia parim mingiks konkreetseks rakenduseks, aga täiuslikku tehnoloogiat, mida saaks kasutada kõikides rakendustes, pole. Suur ühikvõimsuste ja installatsiooni vahemik, muudab valiku tegemise veelgi keerulisemaks.

Kui jätta arvestamata sellised tegurid nagu energiatihedus, kasutegur või keskkonnamõjud ning langetada valik ainult ühikvõimsuse maksumuse järgi, siis eluea järgi on kõige paremaks valikuks pumphüdrolektri jaam või suruõhkenergiasalvesti. Sellegi poolest tuleb arvestada, et nendel tehnoloogiatel on sellised puudused nagu erinõuded asukohale, laiaulatuslik keskkonnamõju ja mõõdukas kasutegur. Sama olukord ka vesinikenergiasalvestiga, mis on odav tehnoloogia kasutamaks mõnedes niširakendustes. Allpool on toodud tabelid, mis kirjeldavad iga salvestitüübi põhiomadusi ning sobivust kasutamaks neid erinevates rakendustes. Tabel 2.7 aitab hinnata iga salvestigrupi tasuvust ja omadusi ühikvõimsuste järgi. Kuna suurevõimsuselised (>50 MW) ja suure energiamahutavusega (>100 MWh) salvestid sobivad ilmselt ainult tööstuslikul tasemel kasutamiseks. Seetõttu pole neid mõtet vaadata kodumajapidamistes või kommertsskaalal kasutamiseks, mille ühikvõimsused jäävad 10 kW ja 50 kW vahele. Isetühjenemise parameeter kirjeldab iga salvestustehnoloogia energiakadu ühe päeva jooksul, juhul kui salvesti on täis laetud ning seda ei kasutata. Erienergia muutuja kirjeldab salvesti energia suhet massiühiku kohta, samas kui energiatihedus kirjeldab energia suhet mahuühikusse. Erivõimsus kirjeldab ühikvõimsuse suhet massi ning võimsustiheduse kombineerib omavahel energiatiheduse ning tühjaks laadimise kiiruse. Energiasalvesti süsteemikulud kirjeldavad konkreetse salvestustehnoloogia kapitalikuluseid ning võib jagada kahte ossa, ühikvõimsusehind [\$/kW] ning energiamahutavuse hind [\$/kWh]. kWh kulu puhul on arvestatud energiamahutavuseks, ühikvõimsuse arendamistundides [JAC09] [KYL10].

**Süsteemikulude** (*Power Conversion System Costs, PCS*) alla arvestatakse kõik süsteemiosad, mis jäävad võrgu ja salvesti vahele, k.a. toitesüsteemi ning juhtimissüsteemi osad, elektrilised ühendused, muundurid, ohuandurid jmt.

**Ehituskulude** (*Balance of Plant Costs, BOP*) alla arvestatakse kõik kulud, mis on seotud ehitamisega, k.a. materjalid, projekteerimine, maa-ala valik, ehitusload, keskkonnamõjude hindamised, juurdesõiduteed jmt kulud.

**Käidu- ja hoolduskulud** (*Operation and Maintenance, O&M*) kirjeldavad aastast püsikulu, millega tuleb arvestada salvesti eksploatatsiooni käigus (ühik kirjeldab ühe installeeritud võimsusühiku hoolduskulu ühes aastas) [KYL10].

**Süsteemi kogukapitalikulu  $K_{kogu}$  [\$]** saab arvutada korrutades süsteemi koguvõimsuse üksikute võimsuspõhiste kuludega ning liites sellele süsteemi energiamahutavusekulud alljärgneva valemi alusel.

$$K_{kogu} = P_{max} \cdot (K_{ehitus} + K_{süsteem} + K_{võimsus} + K_{hooldus}) + E_{max} \cdot K_{energia},$$

millest  $K_{ehitus}$  ehituskulu võimsusühiku kohta (\$/kW),  $K_{süsteem}$  süsteemikulud võimsusühiku kohta (\$/kW),  $K_{võimsus}$  ühikvõimsuse maksumus (\$/kW),  $K_{hooldus}$  salvesti diskonteeritud koguhoolduskulu võimsusühiku kohta eeldatava eluea jooksul (\$/kW),  $K_{energia}$  energiamahutavuse kulu (\$/kWh),  $P_{max}$  süsteemi võimsus (kW) ja  $E_{max}$  süsteemi energiamahutavus (kWh).

**Tabel 2.7 Erinevate energiasalvestite põhiparameetrid ja investeeringukulud**

	Parameeter	PHES	CAES	FES	SCES	SMES	NaS	LA	NiCd	Li-Ion	ZnBr	PSB	VR
Tehniline parameeter	Kogukasutegur [%]	70-85	57-85	70-95	90-98	90-98	70-90	70-82	60-70	85-98	60-75	57-75	60-85
	Isetühjenemise määr [%/päevas]	≈0	≈0	1.3-100	20-40	10-15	0.05-20	0.033-0.3	0.067-0.6	0.1-0.3	0.24	≈0	0.2
	Eluiga [tsükli]	N/A	N/A	20k <sup>57</sup> -100k	10k-100k	100k	2.5k	100-2k	800-3.5k	1k-11k	2k	2k	12k-14k
	Eeldatav eluiga [aastates]	30-60	20-40	15-20	20	20-30	5-15	3-20	5-20	5-15	5-10	10-15	5-15
	Erienergia [Wh/kg]	0.5-1.5	30-60	10-30	2.5-15	0.5-5	150-240	30-50	50-75	75-200	30-50	10-50	10-30
	Eri võimsus [W/kg]	0	0	400-1.5k	500-5k	500-2k	150-230	75-300	150-300	150-315	0	0	0
	Energiatihedus [Wh/L]	0.5-1.5	3-6	20-80	0	0.2-2.5	150-250	50-80	60-150	200-500	30-60	16-60	16-33
	Võimsustihedus [W/L]	0	0.5-2	1k-2k	100k	1k-4k	0	10-400	0	0	0	0	0
Kulud	Kulu ühikvõimsuse kohta [\$ /kW]	600-2k	400-800	250-400	100-360	200-350	150-3000	175-600	150-1500	175-4000	175-2500	330-2500	175-1500
	Kulu energiamahutavuse kohta [\$ /kWh]	0-23	2-140	230-150k	300-94k	1k-83k	250-500	150-400	600-1500	500-2500	150-1000	120-1000	150-1000
	Ehituskulud [\$ /kW]	270-580	270-580	110-600	180-580	140-650	120-600	120-600	120-600	120-600	120-600	120-600	120-610
	Süsteemikulud [\$ /kW]	0-4.8	46-190	0-1200	50-12k	60-12k	0-120	58-180	58-180	0	0-120	60-120	36-120
	Käidu- ja hoolduskulud [\$ /kW-aastas]	3-4.4	1.6-29	6-22	6-16	9.2-30	23-61	1.8-52	6-32	12-30	15-47	18-96	24-65

<sup>57</sup> k tähendab, et esitatud väärtus tuleb korrutada läbi tuhandega

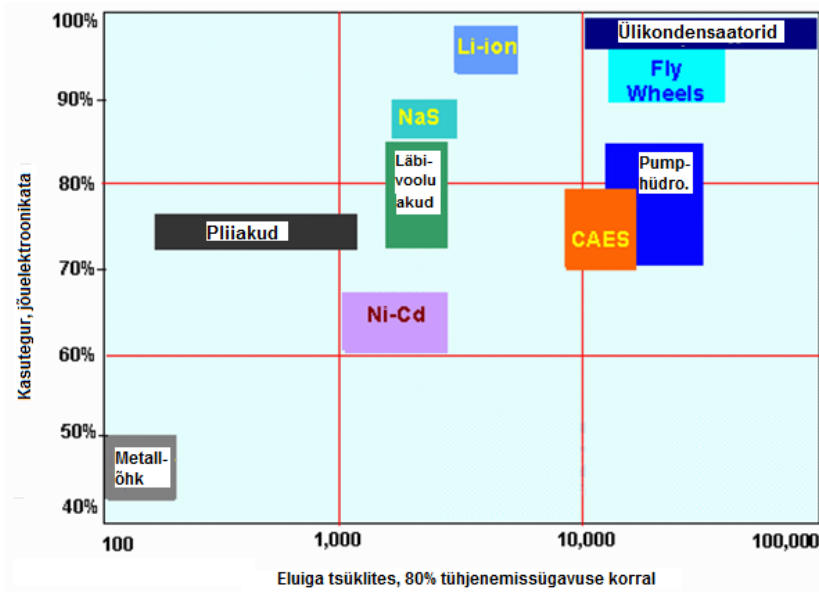
Suurevõimsuselisi seadmeid ei ole kajastatud tasuvustabelis, kuna nende ehitamine on võimalik ainult spetsiifilistes asukohtades. Ülijuhtivusel põhinevate ning ülikondensaator energiasalvestitel on madal energiatihedus, mistõttu ei ole nad väga perspektiivikad väikerakendustes ning seetõttu ei tooda neid ka eraldi tasuvusarvutustes välja. Hooratasenergia-salvesteid ei ole omakorda eraldi välja toodud nende suure tühjakslaadimise tsüklite arvu tõttu [MCD01] (Tabel 2.8).

**Tabel 2.8 Erinevate salvestustehnoloogiate põhilised kulukarakteristikud [JON03, WES20, MIC09, SUS99]**

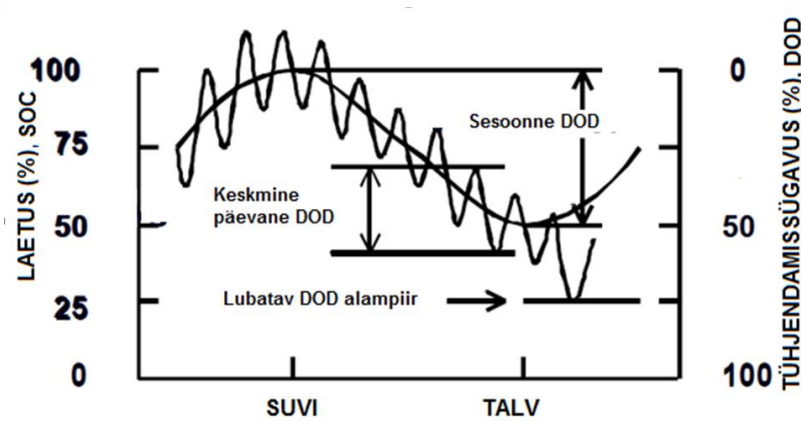
Energiasalvesti	\$/kWh	Eluiga
Pumphüdroelektrijaam (PHAJ)	12-125	30 aastat
Suruõhk energiasalvesti (SÕES)	3-12	30 aastat
Hooratasenergiasalvesti (FES)	aeglasekäigulised: 200-300, kiirekäigulised: kuni 25000	20+ aastat või 1 000+ tsüklit
Ülikondensaator energiasalvesti (SCES)	12000-28000	1 x 10 <sup>6</sup> tsüklit
Ülijuhtivad energiasalvestid (SMES)	500 - 2000	20+ aastat või 1 000+ tsüklit
Vesinik energiasalvestid (HESS)	10 - 20	20 aastat
Pliiakud (LA)	100 -200	5+ aastat või 250-1 000 tsüklit
Nikkel-kaadmium (NiCd) akud	250-500	15+ aastat või 3 500 tsüklit
Väävel-naatrium (NaS) akud	350-500	15+ aastat või 2 500 tsüklit
Vanaadium-redoks (VR) akud	300-1800	7-15 aastat või 10 000 tsüklit
Polüsulfiid bromiid (PSB) akud	185 -1100	2000 tsüklit
Tsink bromiin (ZnBr) akud	150-250	4000 tsüklit

Salvestitena kasutatakse hoonetes peamiselt elektrokeemilisi akusid, nagu tavalised pliiakud ja VRLA-akud. VRLA-akud (*valve-regulated lead-acid battery*) jagunevad AGM- ja geel-akudeks. Need akud ei vaja pidevat hooldust nagu tavalised pliiakud. Akude eluiga kõigub sõltuvalt laadimis- ja tühjendamistsüklite arvust, tühjendamistsüklite sügavusest ja temperatuurist vahemikus 3...5 aastat. Tüüpiline isetühjenemine pliiakudel temperatuuril 25°C on 10% kuus. VRLA akude korduvlaadimise kestus on pikem kui tavalistel pliiakudel. VRLA-akud on tundlikumad ülelaadimisele ja neil on mõnevõrra lühem eluiga. Kasutatakse harva NiCd or NiMH akusid, kuna on kallid ja madalama kasuteguriga (vt. Joonis 2.36). Akude mahutavuse määramisel on eriti oluline arvestada aastaaegadest tingitud tarbimise ja tootmise kõikumist. Eriti oluline on see OFF-grid lahenduste puhul, kus tuleb pöörata erilist tähelepanu akude laetusele sh vältima ülelaadimist, ning tühjendamissügavusele (vt. Joonis 2.37). Mõlemast parameetrist sõltub otseselt akude eluiga. Energiasalvestite maksumusi ja käidukulusi on põhjalikult kirjeldatud Sandia National Laboratories aruannetes ja teistes väljaannetes<sup>58,59,60</sup>. Ülevaatic koond salvestite hindadest on esitatud järgneval joonisel (vt. Joonis 2.38).

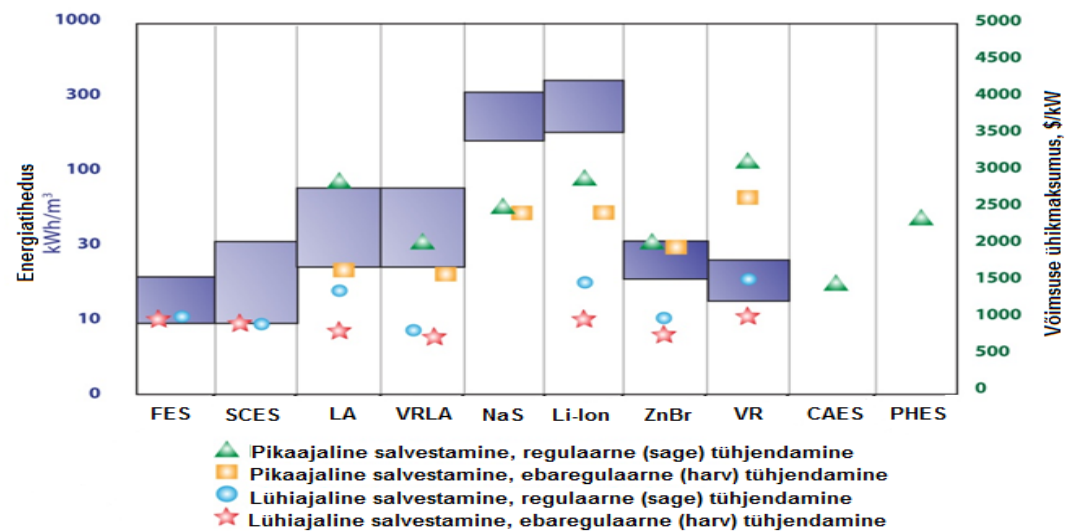
<sup>58</sup> <http://prod.sandia.gov/techlib/access-control.cgi/2008/080978.pdf>



Joonis 2.36 Akude kasutegur ja eluiga 80% tühjenemissügavuse korral [ESA12]



Joonis 2.37 Akude laetus ja tühjenemissügavus aastaajati [JAM97]



<sup>59</sup> <http://prod.sandia.gov/techlib/access-control.cgi/2011/112730.pdf>

<sup>60</sup> [http://energy.gov/sites/prod/files/oeprod/DocumentsandMedia/Utility\\_12-30-10\\_FINAL\\_lowres.pdf](http://energy.gov/sites/prod/files/oeprod/DocumentsandMedia/Utility_12-30-10_FINAL_lowres.pdf)

## Joonis 2.38 Energiasalvestite energiatihedus ja hind [ESA12]

### 2.11.1. Salvestite tasuvus

Selleks, et salvestid muutuksid tasuvaks, peavad nad tootma iga laadimis- ja tühjendamistsükliga kasumit ja aitama vältida pingekatkestusest põhjustatud kahjumit. Esimesel juhul laetakse salvestid täis odava elektri perioodil ja tühjendatakse kalli elektri perioodil. Teisel juhul välditakse või vähendatakse näiteks tootmises pingekatkestuse tõttu tuhandetesse eurodesse küündivat kahjumit ehk saamata jäänud tulu. Samuti kasutatakse salvesteid OFF-grid lahendustes juhusliku elektritootmise ja –tarbimise balansseerimiseks.

Tootmises pingekatkestuse korral tuleb teada võimalike pingekatkestuste sagedus ja pikkusi ning tootmise keskmiselt teenitav tulu, mille alusel on võimalik välja arvutada konkreetse salvesti tasuvus. Kuna tööstusharude tulud on erinevad, niisamuti ka teenindussektoris, ning sedalaadi arvutusega saab keskmine spetsialist hakkama iseseisvalt. OFF-grid lahenduste puhul tuleb võrrelda kulutusi võrguühenduse ning lokaalse elektritootmise rajamisele. Ka viimasel juhul on tasuvuste võrdlus lihtne. Piisab vastavate hinnapakumiste võtmisest ja nende võrdlusest, et saada esmane ülevaade milline lahendus on tasuv ja millise perioodi jooksul. Oluliselt keerulisem on hinnata salvestussüsteemide tasuvust elektribörsihinnast muutustest tulenevalt. Kui ajavahemikus 5.04.2010 – 4.04.2011 keskmine päevane turuhinna vahe  $p$  oli 25,83 €/MWh (33,54 \$/MWh), siis päevane keskmine maksimaalne bilansienergia ostu-müügi vahe oli 49 €/MWh (63,7 \$/MWh). Bilansienergia ostu-müügi hinnavahe mood (kõige sagedamini esinev hinnavahe – so 20 korda aastas, ca 6% päevadest) on seejuures 71 €/MWh (92,3 \$/MWh). Seega on keskmine maksimaalne turuhinna vahe bilansienergiast 2 korda väiksem. Lähtuvalt sellest on otstarbekam manipuleerida bilansienergia ostu-müügiga. Samas on bilansiturul osalemiseks vaja täita teatud tingimused, mille me alljärgnevatel arvutustes jätame arvestamata. Vaatamata allolevatele arvutustele, tuleb igat juhtu vaadelda eraldi ja aluseks võtta tegelikud salvestava elektri jaama ehitamise (sh kulud ühikvõimsuse ja energiamahutavuse kohta), süsteemi, käidu- ja hoolduskulud. Samuti tuleb arvestada pikemaajalise elektribörsi hinnakõikumistega. Allolevad arvutused on tehtud järgmistel eeldustel:

1. Projekteeritud nimivõimsus on 100kW ja energiamahutavused vastavalt 100 ja 2400 kWh
2. Ehituskulud, süsteemikulud, käidu- ja hoolduskulud ning kulu ühikvõimsuse ja energiamahutavuse kohta on valitud vähimad (Tabel 2.7).
3. Laadimis- ja tühjendamistsükkel ehk täistsükkel toimub päeva jooksul ning isetühjenemine on minimaalne.

**Tabel 2.9 Elektrokeemiliste salvestite tasuvus**

Parameeter	NaS	VRLA	NiCd	Li-Ion	ZnBr	PSB	VR
Tühjendamissügavus, DoD	90%	30%	80%	80%	100%	100%	100%
Laadimis- ja tühjendamistsükli summaarne ehk täistsükli kasutegur	85%	80%	70%	95%	70%	70%	75%
Eluiga tsüklites	5000	2000	3500	8000	2000	2000	10000
Nimivõimsus = 100kW, Energiamahutavus = 2400kWh							
Tasuvus täistsüklites, p=71 €/MWh	3713	7441	11877	7310	2522	2198	2381
Tasuvus täistsüklites, p=49 €/MWh	5381	10782	17210	10592	3654	3185	3449
Tasuvus täistsüklites, p=25,83 €/MWh	10219	20477	32686	20117	6939	6048	6551
Nimivõimsus = 100kW, Energiamahutavus = 100kWh							
Tasuvus täistsüklites, p=71 €/MWh	7690	22842	18070	11504	7120	10029	7295
Tasuvus täistsüklites, p=49 €/MWh	11143	33098	26183	16669	10316	14532	10570
Tasuvus täistsüklites, p=25,83 €/MWh	21163	62860	49727	31659	19593	27600	20076

**Tabel 2.10 Elektromehaanilised jm salvestite tasuvus**

Parameeter	PHES	CAES	FES	SCES	SMES
Laadimis- ja tühjendamistsükli summaarne ehk täistsükli kasutegur	80%	80%	85%	90%	90%
Isetühjenemine [%/päev]	0	0	20%	20%	10%
Eeldatav eluiga, aastad	30-60	20-40	15-20	20	20-30
Nimivõimsus = 100kW, Energiamahutavus = 2400kWh					
Tasuvus aastates, p=71 €/MWh	1	1	11	13	37
Tasuvus aastates, p=49 €/MWh	2	2	16	19	54
Tasuvus aastates, p=25,83 €/MWh	4	3	29	36	103
Nimivõimsus = 100kW, Energiamahutavus = 100kWh					
Tasuvus aastates, p=71 €/MWh	32	27	26	26	52
Tasuvus aastates, p=49 €/MWh	47	39	38	38	75
Tasuvus aastates, p=25,83 €/MWh	89	73	72	72	142

Elektrokeemilistest salvestitest võib enim perspektiivikateks lugeda NaS, Li-Ion ja VR akusid. Elektromehaanilistest ja muudest salvestitest perspektiivseimad on pumphüdroelektrijaam (eeldusel, et loodulikud veereservuaarid on olemas), suruõhk energiasalvestid, hooratasenergiasalvestid ja ülikondensaatorenergiasalvestid.

Soojussalvestite tasuvuse arvutust antud aruandes ei käsitleta kuna on sõltuvuses väga paljudest erinevatest tehnilistest ja majanduslikest näitajatest, sh tarbimismustritest, energia tootmismustritest jne.

### 3. Kasutatud kirjandus

- [BAN09] Banerjee, K.; Hong Li; Chuan Xu; , "Prospects of carbon nanomaterials in VLSI for interconnections and energy storage," *EOS/ESD Symposium, 2009 31st* , vol., no., pp.1-10, Aug. 30 2009-Sept. 4 2009
- [BOY08] Bo Yang; Makarov, Y.; Desteese, J.; Viswanathan, V.; Nyeng, P.; McManus, B.; Pease, J., "On the use of energy storage technologies for regulation services in electric power systems with significant penetration of wind energy", *Electricity Market, 2008. EEM 2008. 5th International Conference*, Publication Year: 2008 , Page(s): 1 – 6.
- [DAV09] David Connolly, "A Review of Energy Storage Technologies v3", University of Limerick 17 August 2009, Page(s) 1 – 56. <http://www.dconnolly.net/files/David%20Connolly,%20UL,%20Energy%20Storage%20Techniques,%20V3.pdf>
- [DAV80] Davidson, B.J.; Glendenning, I.; Harman, R.D.; Hart, A.B.; Maddock, B.J.; Moffitt, R.D.; Newman, V.G., „Large-scale electrical energy storage „, *Physical Science, Measurement and Instrumentation, Management and Education - Reviews*, IEE Proceedings A Publication Year: 1980 , Page(s): 345 – 385.
- [HAN09] Hanley, C.; Peek, G.; Boyes, J.; Klise, G.; Stein, J.; Dan Ton; Tien Duong, "Technology development needs for integrated grid-connected PV systems and electric energy storage", *Photovoltaic Specialists Conference (PVSC), 2009 34th IEEE*, Publication Year: 2009 , Page(s): 001832 – 001837.
- [JAC09] Jacobi, Jere; Wilson, Scott, "Fast Response Energy Storage Devices", *Technology descriptions and overview*, ScottMaden Inc. Publication Year: 2009.
- [JON03] Jonah G. Levine; "PUMPED HYDROELECTRIC ENERGY STORAGE AND SPATIAL DIVERSITY OF WIND RESOURCES AS METHODS OF IMPROVING UTILIZATION OF RENEWABLE ENERGY SOURCES", B.S., Michigan Technological University, 2003.
- [KUS05] Kusko, A.; DeDad, J., "Short-term, long-term, energy storage methods for standby electric power systems", *Industry Applications Conference, 2005. Fourtieth IAS Annual Meeting. Conference Record of the 2005*, Volume: 4, Publication Year: 2005 , Page(s): 2672 - 2678 Vol. 4.
- [KYL10] Kyle Bradbury, "Energy Storage Technology Review", Publication Year: August 22, 2010.
- [LEM06] Lemofouet, S.; Rufer, A., "A Hybrid Energy Storage System Based on Compressed Air and Supercapacitors With Maximum Efficiency Point Tracking (MEPT)", *Industrial Electronics, IEEE Transactions on* Volume: 53 , Issue: 4, Publication Year: 2006 , Page(s): 1105 – 1115.
- [LOM09] Lombardi, P.; Vasquez, P.; Styczynski, Z.A., "Optimised autonomous power system", *Integration of Wide-Scale Renewable Resources Into the Power Delivery System, 2009 CIGRE/IEEE PES Joint Symposium*, Publication Year: 2009 , Page(s): 1 – 13.
- [MCD01] McDowall, J., "Battery life considerations in energy storage applications and their effect on life cycle costing", *Power Engineering Society Summer Meeting, 2001. IEEE*, Publication Year: 2001 , Page(s): 452 - 455 vol.1.



- [MIC09] Michael Stadler, Chris Marnay, Afzal Siddiqui, Judy Lai, Brian Coffey, and Hirohisa Aki, "Effect of Heat and Electricity Storage and Reliability on Microgrid Viability: A Study of Commercial Buildings in California and New York States", Environmental Energy Technologies Division ERNEST ORLANDO LAWRENCE BERKELEY NATIONAL LABORATORY, March 2009
- [NAK00] Y. Nakamoto, N. Kato, T. Hasegawa, T. Aoki, S. Muroyama, "4.5kW Fuel Cell System Based on PEFCs", INTELEC '00, pp 406-410.
- [PAL09] Paloheimo, H.; Omidiora, M., "A feasibility study on Compressed Air Energy Storage system for portable electrical and electronic devices", Clean Electrical Power, 2009 International Conference, Publication Year: 2009 , Page(s): 355 – 362.
- [RUF06] Rufer, Alfred; Lemofouet, Sylvain, "Efficiency Considerations and Measurements of a Hybrid Energy Storage System based on Compressed Air and Super Capacitors, Power Electronics and Motion Control Conference, 2006. EPE-PEMC 2006. 12th International, Publication Year: 2006 , Page(s): 2077 – 2081.
- [SHU09] Shuang Yu; Mays, T.J.; Dunn, R.W., "A new methodology for designing hydrogen energy storage in wind power systems to balance generation and demand", Sustainable Power Generation and Supply, 2009. SUPERGEN '09. International Conference, Publication Year:2009 , Pages: 1 – 6.
- [SIO08] Siostrzonek, T.; Pirog, S.; Baszynski, M., "Energy storage systems the flywheel energy storage", Power Electronics and Motion Control Conference, 2008, Publication Year: 2008 , Page(s): 1779 – 1783.
- [SUS99] Susan M. Schoenung, "Hydrogen Energy Storage Comparison", UNITED STATES DEPARTMENT OF ENERGY March 1999.
- [ZHA04] Zhang, C.; Tseng, K.J.; Zhou, J., "A compact and efficient flywheel energy storage system with integrated magnetic bearings", "Power Electronics and Motion Control Conference, 2004. IPEMC 2004. The 4th International", Publication Year: 2004 , Page(s): 294 - 299 Vol.1.
- [WEI99] Weinmann, O., "Hydrogen-the flexible storage for electrical energy", Power Engineering Journal, Publication Year: 1999 , Page(s): 164 – 170.
- [WEN10] Wencong Su; Tao Jin; Shaohui Wang, "Modeling and simulation of short-term energy storage: Flywheel", Advances in Energy Engineering (ICAEE), 2010 International Conference, Publication Year: 2010 , Page(s): 9 – 12.
- [WES20] Wesley Henderson, "Engineering Challenges at the Energy Frontier", Lecture 20: Grid Storage & Batteries, Department of Chemical & Biomolecular Engineering NC State University.
- [VON09] Vongmanee, V., "The renewable energy applications for uninterruptible power supply based on compressed air energy storage system", Industrial Electronics & Applications, 2009. ISIEA 2009. IEEE Symposium, Publication Year: 2009 , Page(s): 827 – 830.
- [JAM97] James P. Dunlop, P.E. Batteries and Charge Control in Stand-Alone Photovoltaic Systems. *Fundamentals and Application*. Sandia National Laboratories. January 15, 1997.  
<http://www.localenergy.org/pdfs/Document%20Library/Fundamentals%20of%200batteries%20and%20charge%20control.pdf>

[ESA12] Electricity Storage Association homepage  
[http://www.electricitystorage.org/technology/storage\\_technologies/cost\\_considerations/](http://www.electricitystorage.org/technology/storage_technologies/cost_considerations/)