

**VYSOKÉ UČENÍ
TECHNICKÉ
V BRNĚ**

Skladování elektrické energie

AMPER 2016

Autor: Ing. Lukáš Radil, Ph.D.
Ústav Elektroenergetiky

16. Března 2016

Obsah

1. Úvod
2. Momentální stav
3. Současné možnosti
4. Přehled metod
5. Současné použití akumulčních systémů
6. Závěr

1. Úvod

- Akumulace elektrické energie je nedílnou součástí dnešních sítí
- Z teoretické roviny se téma zcela adaptovalo do běžného života
- Velký rozvoj elektromobility

2. Momentální stav

Dvě současné premisy:

- Akumulace formou jiného prvku (chemické)
 - Vodík, metan a jiné
- Akumulace formou elektrického náboje (elektrochemické)
 - Elektrické akumulátory

Historické rozdělení soustav:

Na požadovaný výkon

- Okamžitý
- Záložní

Na akumulační kapacitu

- Malá
- Střední
- Velká

Fázi přeměny při akumulaci

- Homogenní
- Heterogenní

Na rychlost změny nabíjení x vybíjení

- Pomalá
- Rychlá

Mechanické

- Kinetická energie
- Potenciální energie
- Tlaková energie

Elektrochemickou přeměnu

- Akumulátory s elektrolyty
- Palivové články
- Průtokové baterie

Elektrické

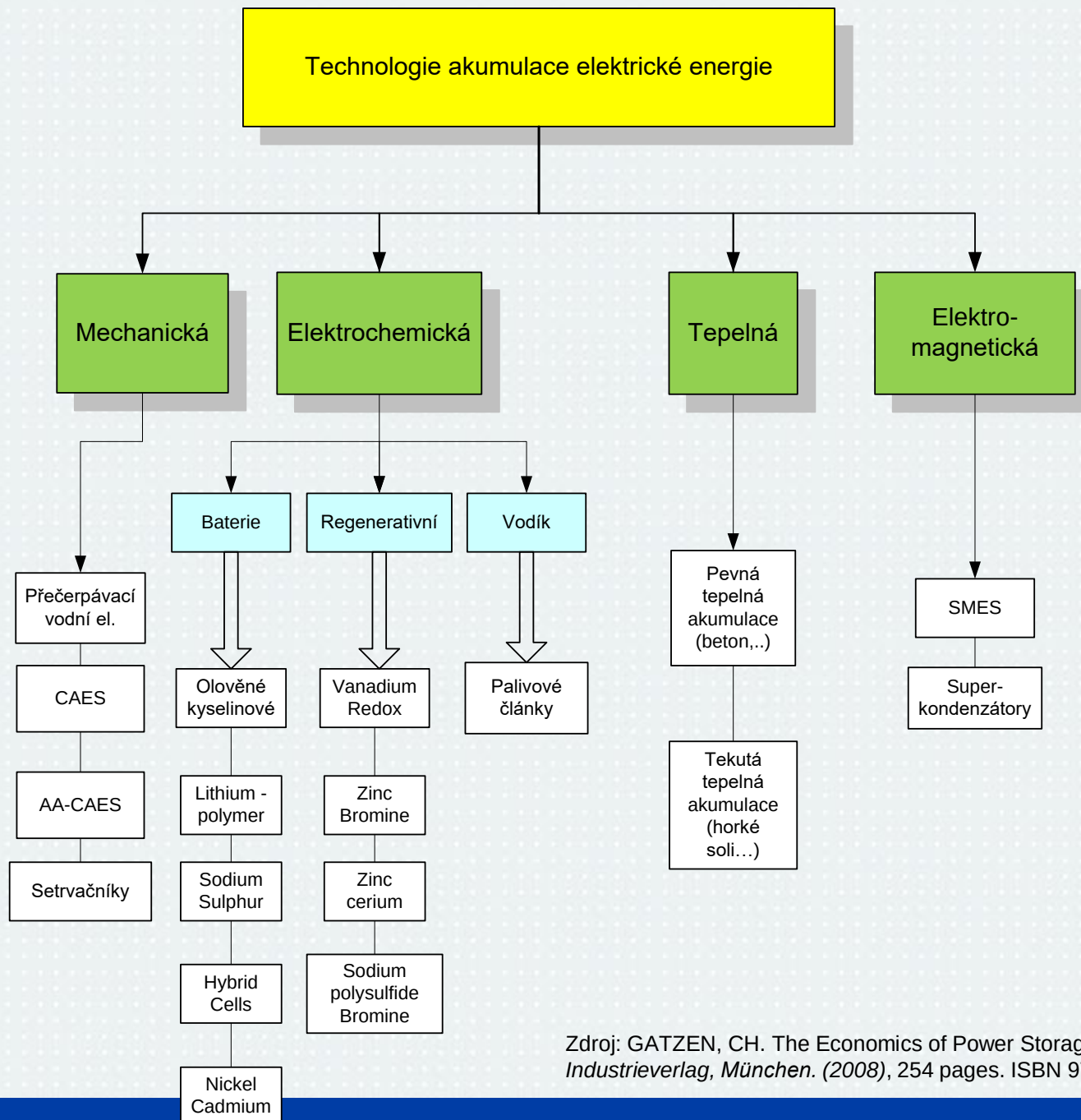
- Elektrostatické
- Elektromagnetické

Chemické

- Vodík
- Biopaliva
- Syntetické (syntézní) kapaliny a plyny

Tepelné

- Látky se změnou skupenství
- Přírodní materiály
- Metody Ruths a Marguire



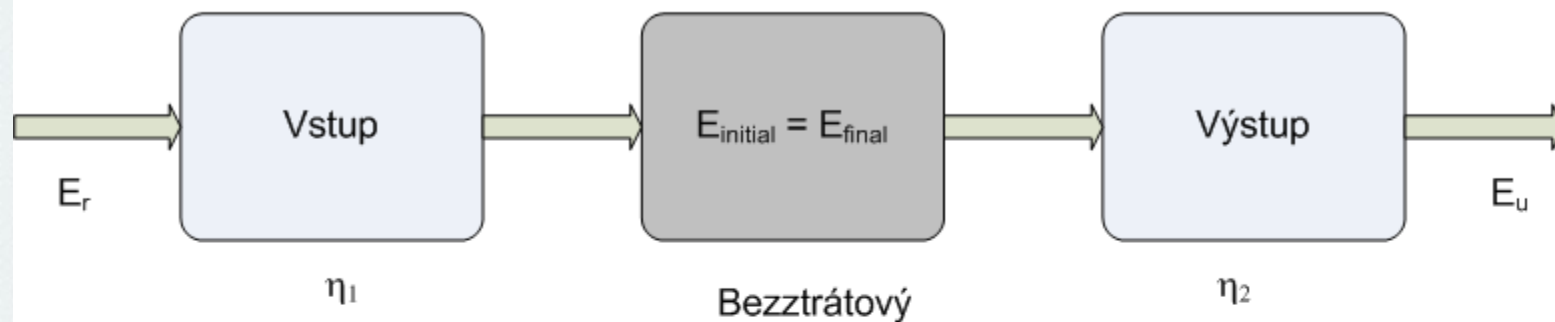
Zdroj: GATZEN, CH. The Economics of Power Storage. Oldenbourg
Industrieverlag, München. (2008), 254 pages. ISBN 978-3-8356-3138-0

4. Přehled metod

Aktuální možnosti skladování energie:

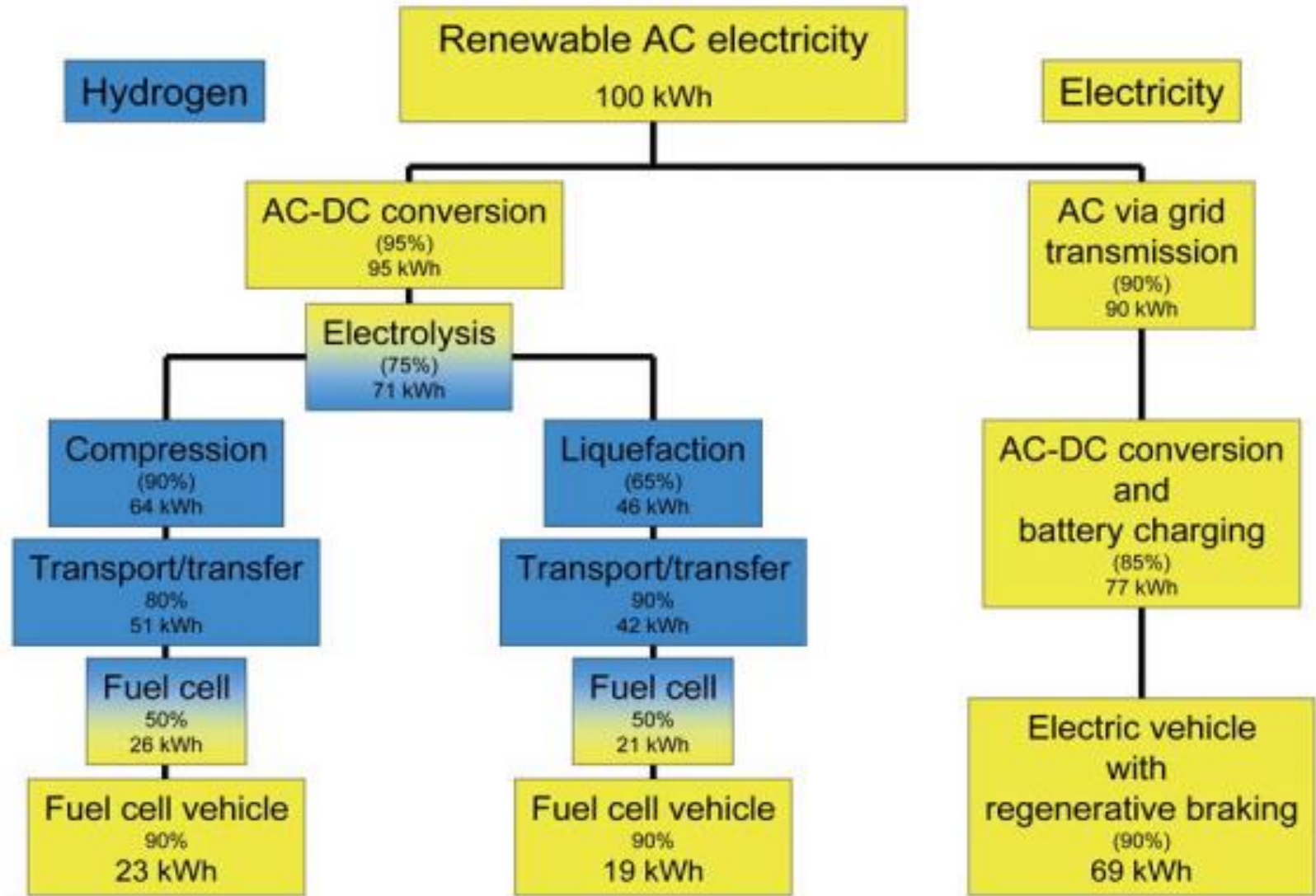
- **Metoda Ruths a Marguerre**
 - Metody založené na uskladnění energie ve formě tepla do tepelné kapacity látek
- **Metody CAES a AA-CAES**
 - Metody založené na uskladnění do plynného média (591\$/kW)
- **Přečerpávací vodní elektrárny**
 - Využívá potenciální tlakové energie
- **Palivový článek založený na vodíko-kyslíkové konverzi**
 - Metoda založená na vodíkovém hospodářství
- **Superkapacitory**
 - Uskladnění energie prostřednictvím elektrostatického pole (hustota energie až 10 Wh/kg)
- **Setrvačníky (Flywheel)**
 - Metoda založená na energii setrvačných hmot
- **Redox baterie**
 - Metoda založená na redukčně-oxidační vlastnosti prvků
- **Baterie Sodium – Sulfur (NaS)**
 - Baterie založená na reaktivitě sodíku
- **Lithiové baterie**
 - Baterie založená na reaktivitě Lithia
- **Superconducting magnetic energy storage (SMES)**
 - Energie uchovaná ve formě magnetického pole

Akumulace energie - účinnost přenosu



Metoda akumulace	Vstup	Výstup	Celková účinnost
	$V \approx$	$V \approx$	
Ultrakapacitory	0.95	0.95	0.90
Lithium-ion baterie	0.93	0.93	0.86
Setrvačníky	0.90	0.90	0.81
Olověné baterie	0.85	0.90	0.77
Přečerpávací vod. el.	0.85	0.85	0.72
Stlačený vzduch	0.75	0.85	0.64
Plynný vodík	0.70	0.45	0.32
Kapalný vodík	0.50	0.45	0.25
Horká voda	0.95	0.95	0.90

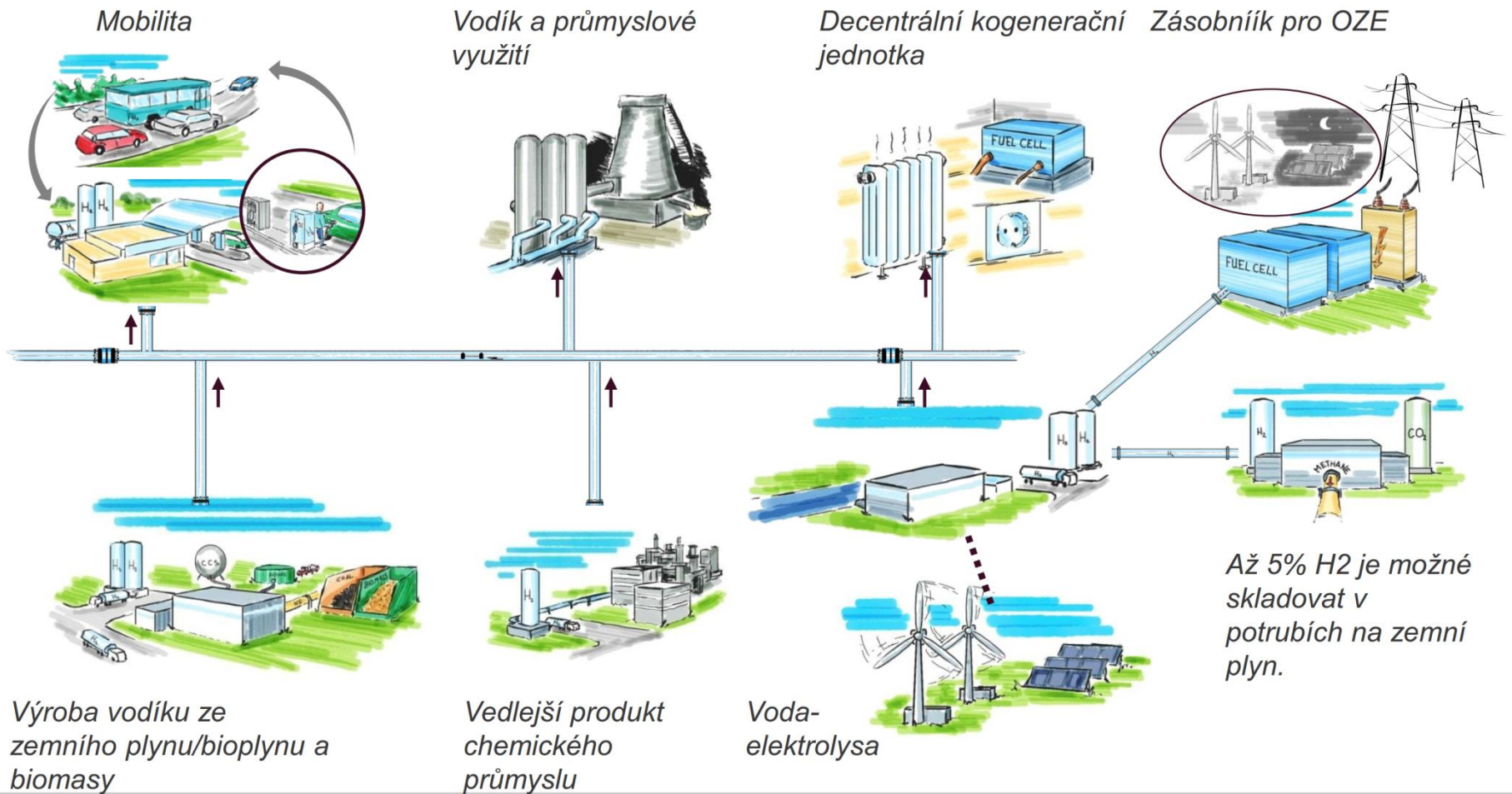
Zdroj: GATZEN, CH. The Economics of Power Storage. Oldenbourg Industrieverlag, München. (2008), 254 pages. ISBN 978-3-8356-3138-0



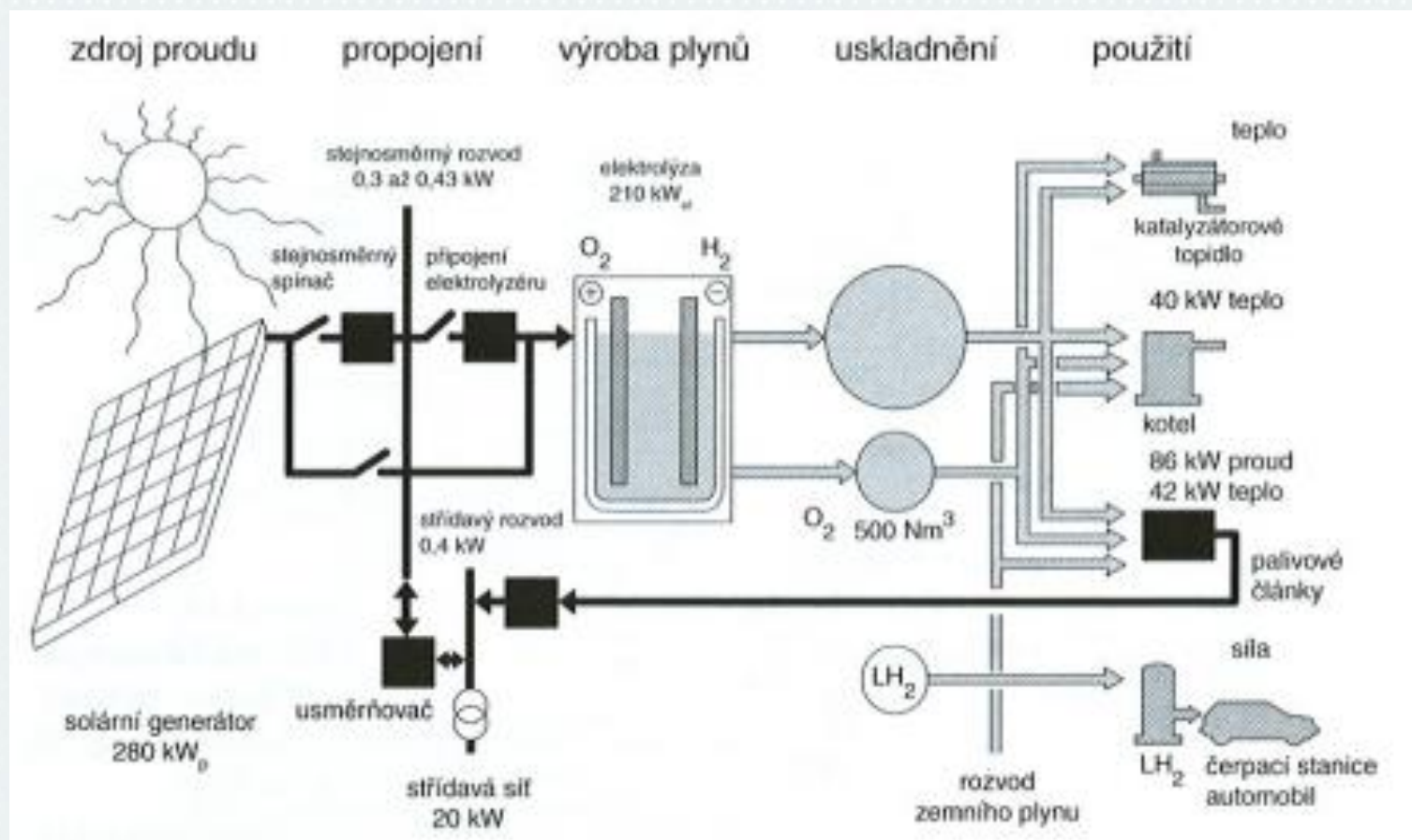
Bossel, U. (2006). Does a Hydrogen Economy Make Sense?

Proceedings of the IEEE, 94(10), 1826–1837. doi:10.1109/JPROC.2006.883715

Princip Energiewende?



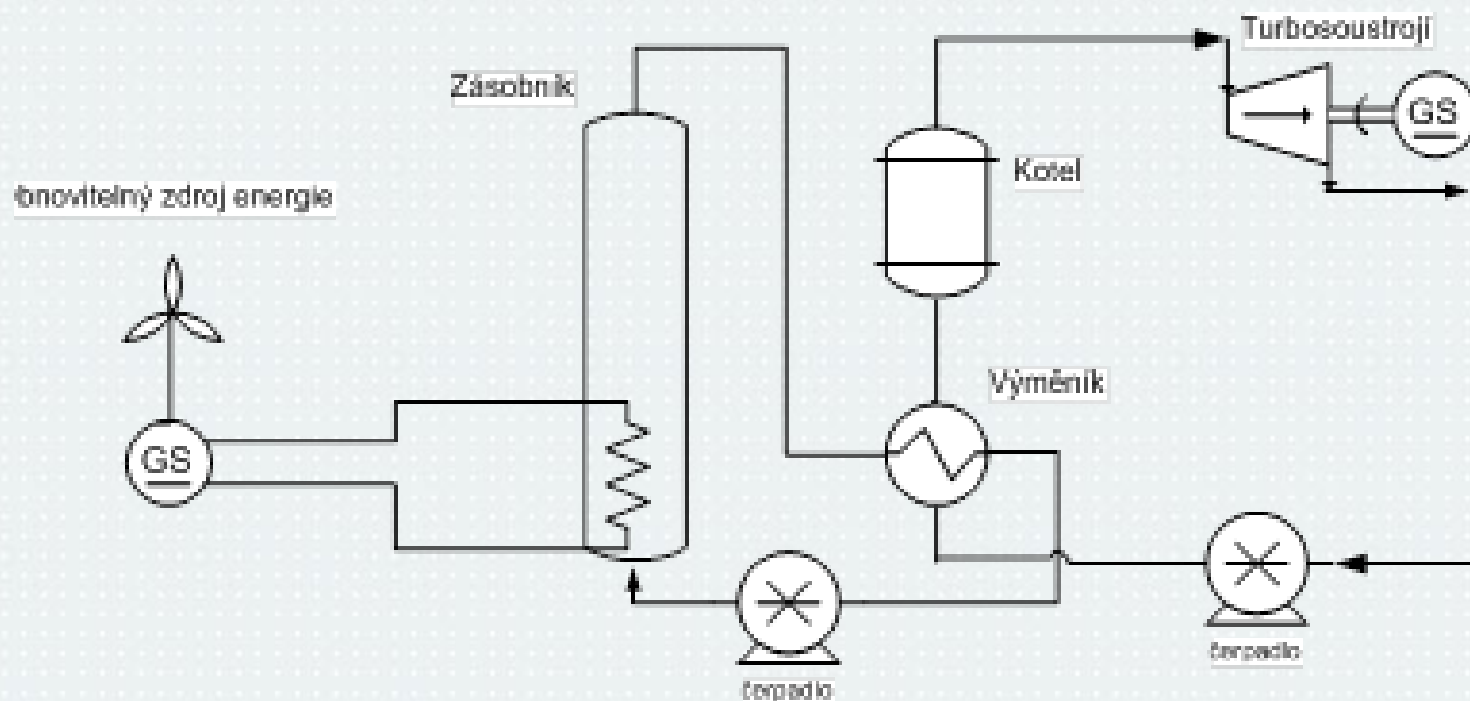
Zdroj: Dipl. Ing. Tadeáš Rusnok: Na cestě k udržitelné mobilitě s vodíkem a palivovými články. Malé zdroje elektrické energie a tepla v širokých souvislostech 1.12.2015

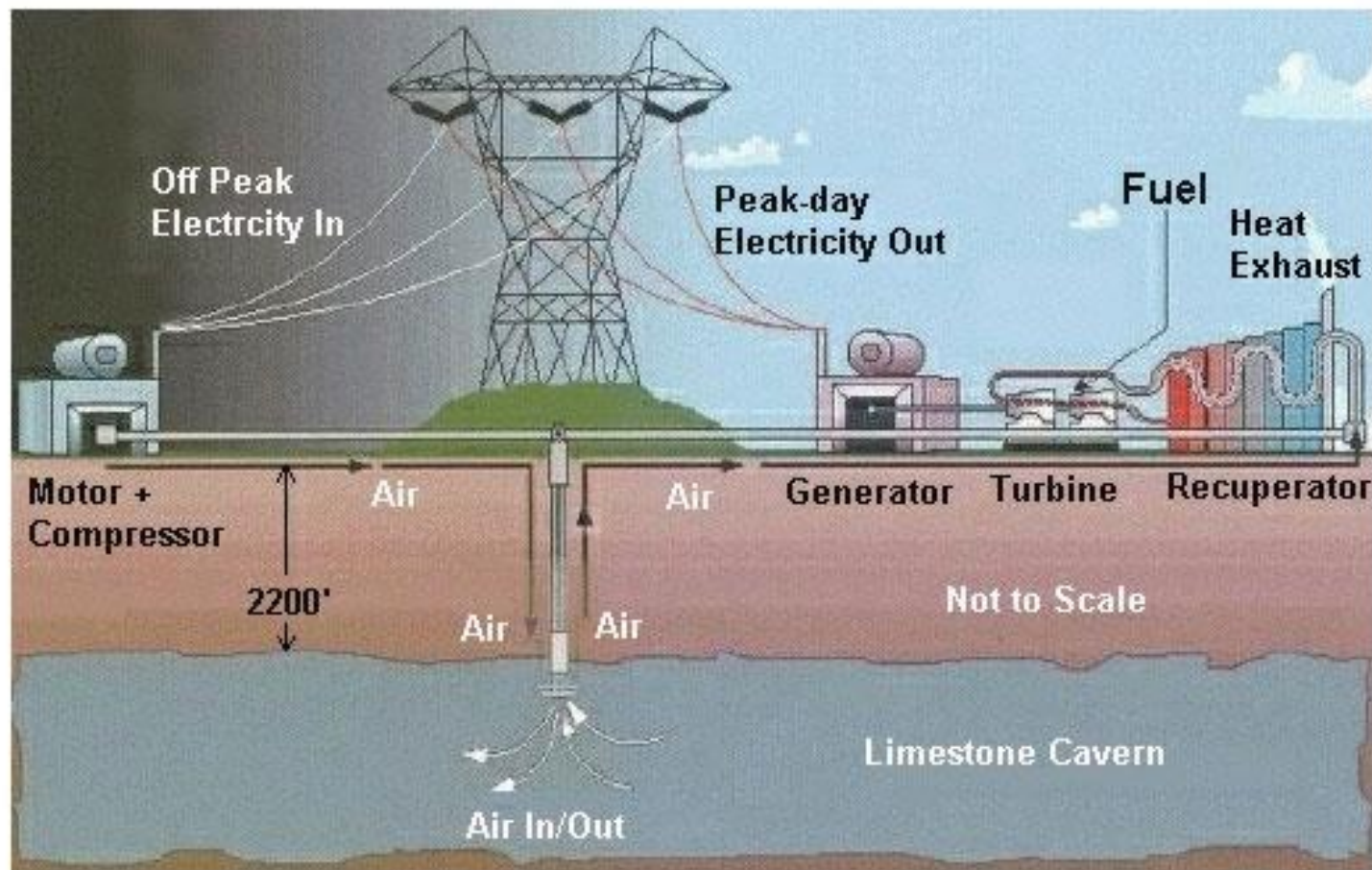


Porovnání spalného tepla (20 °C a 101,325 kPa)

- Vodík: 141 900 kJ.kg⁻¹ / 12 760 kJ.m⁻³
- Metan: 55 530 kJ.kg⁻¹ / 37 520 kJ.m⁻³
- Benzín: 47 300 kJ.kg⁻¹ / 33 580 kJ.l⁻¹
- Nafta: 44 800 kJ.kg⁻¹ / 38 100 kJ.l⁻¹

Tepelné soustavy





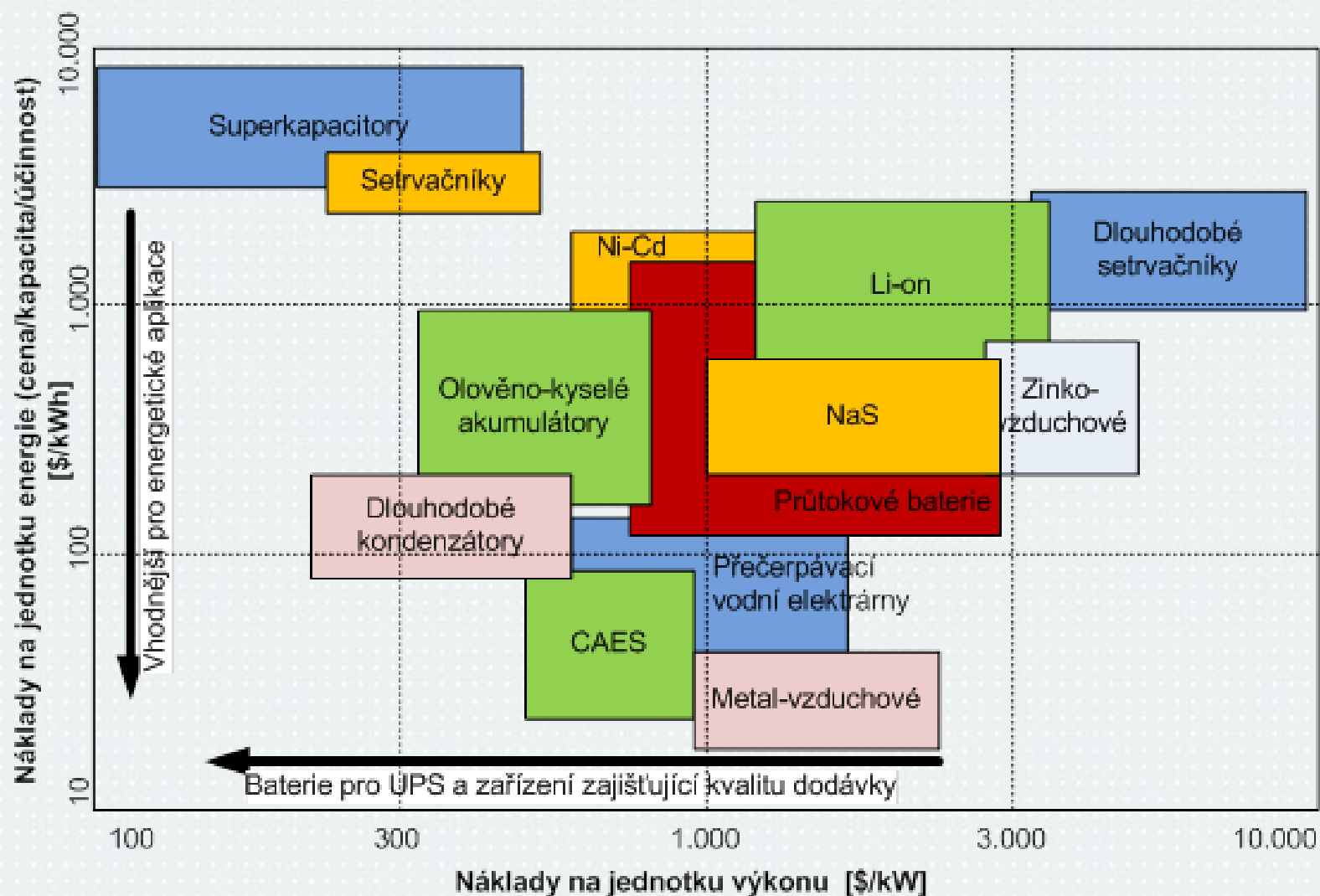
4. Přehled metod

Battery		NAS (Base)	Lead-Acid (Current)	Lithium Ion	Ni-H
Item					
Continuous Discharge Duration with rated output		6 hours	2 hours	3 hours	2 hours
Expected Lifetime (at standard conditions)		15 years	3 to 5 years	10 years	7 years
Size	MWh(1MW × 6h)	1	3 times	2 times	3 times
Weight	MWh(1MW × 6h)	1	6 times	2 times	6 times
Price	MWh × 15years	1	3 to 5 times	8 times	6 times
Notes	Self Discharge	No	Yes	Yes	Yes
	Memory Effect	No	No	No	Yes

NAS Baterie zatím vhodné převážně do DS, později i domovních aplikací

Technologie	Hlavní výhody	Nevýhody	Výkonová aplikace	Energetická aplikace
Přečerp. el.	Vysoká kapacita, nízká cena	Speciální místní podmínky		
CAES	Vysoká kapacita, nízká cena	Speciální místní podmínky, nutnost zemního plynu		
Průtokové baterie (VRB, ZnBr)	Vysoká kapacita, nezávislý dodávka	Nízká energetická hustota		
Metal - air	Vysoká energetická hustota	Elektrické nabíjení je rozdílné		
NaS	Výsoký výkon, energetická hustota, vysoká účinnost	Produkční náklady, bezpečnost		
Li-ion	Výsoký výkon, energetická hustota, vysoká účinnost	Vysoké náklady, speciální nabíjecí cykly		
Ni-Cd	Výsoký výkon, energetická hustota, účinnost			
Olověné baterie	Nízká cena	Malá životnost při hlubokém vybití		
Setrvačníky	Vysoký výkon	Nízká energetická hustota		
SMES	Vysoký výkon	Nízká energetická hustota, vysoká cena		
Ultrakapacitory	Vysoká účinnost, mnoho cyklů	Nízká energetická hustota		

Zdroj: ESA (2009), dostupné z URL: <http://www.electricitystorage.org/ESA/technologies/>, datum citace: 18.3.2010, datum aktualizace 4/2009



Dle ESA (2009), dostupné z URL: <http://www.electricitystorage.org/ESA/technologies/>, datum citace: 18.3.2010, datum aktualizace 4/2009 upraveno autorem

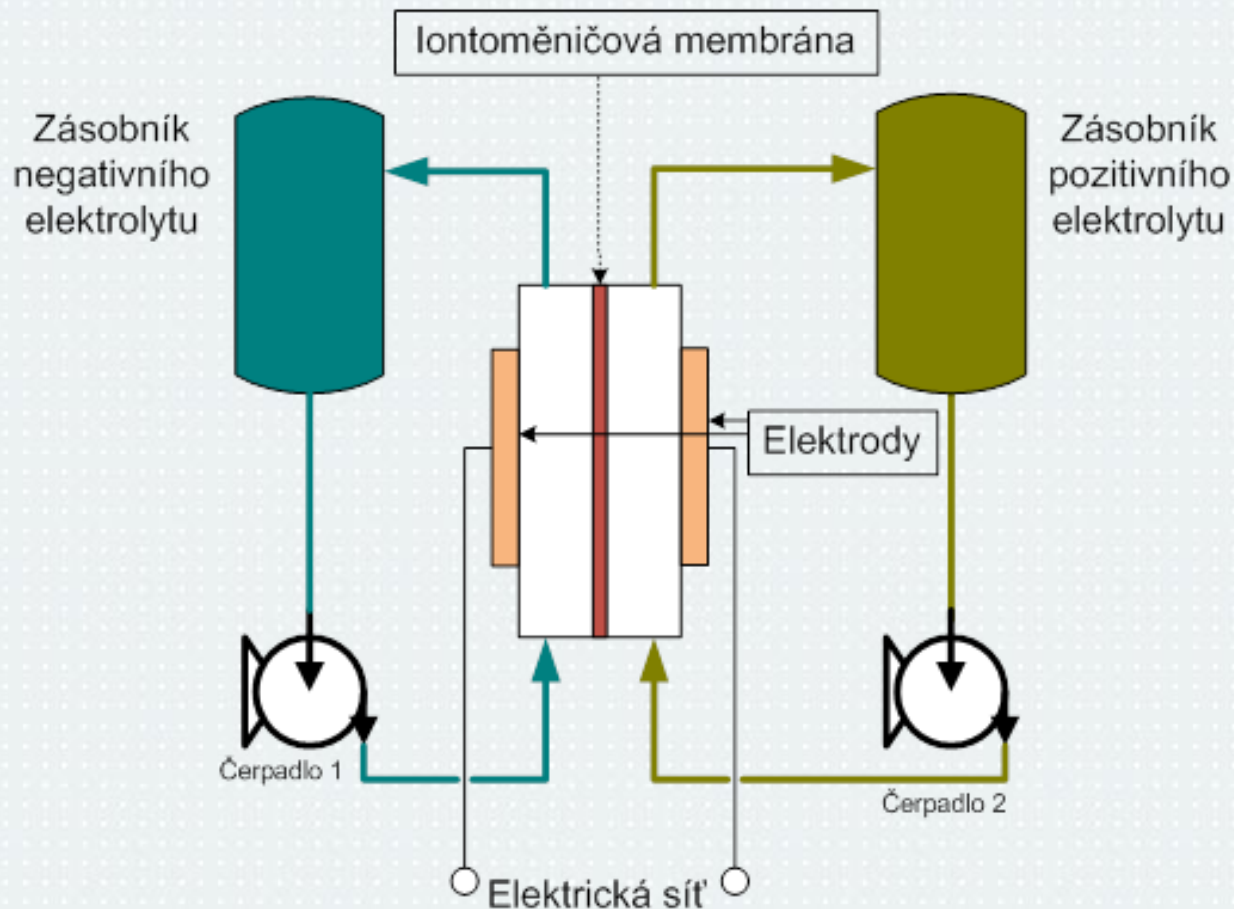
Setrvačník

$$E = \frac{1}{2} J \omega^2$$



Beacon POWER Corporation

VRFB-Akumulátor



VRFB baterie, příliš drahé ($P_{inst} = 5 \text{ kW}$, $E = 20 \text{ kWh}$, $N_{celk} \sim 1.000.000 \text{ Kč}$)





Technologie	Napětí naprázdno [V]	Napětí v uzavřeném obvodu [V]	Teoretická specifická kapacity [Ah/kg]	Teoretická specifická energie [Wh/kg]	Rozsah teplot [°C]	Doba znovunabití [h]	Samovybitení při 20°C [%/měsíc]
Oloveno-kyselinové	2,1	1,98	120	252	-20 - +50	8-24	3
Nikl-kadmiové	1,35	1,2	181	244	-40 - +60	1-16	10
Nikl-metalhydrid	1,35	1,2	178	240	-30 - +65	1-2	30
Nikl-železo	1,4	1,2	224	314	-10 - +60	5	25
Nikl-vodík	1,5	1,2	178	240	-10 - +30	1-24	60
Nikl-Zinek	1,73	1,6	215	372	-20 - +50	8	15
Zinek/oxid stříbra	1,85	1,55	283	524	-20 +60	8-18	5
Zinek/bromid	1,83	1,6	238	429	+10 - +50	-	12-15
Znec/vzduch	1,6	1,1	825	1320	0 - +45	-	-
Hliník/vzduch	2,73	1,4	2980	8135	+10 - +60	-	-
Železo/vzduch	1,3	1	960	1250	-20 - +45	-	15
Zinek/vzduch	1,6	1,1	825	1320	0 - +40	-	-
Regenesys (PSB, Zn/Br)	1,5	1,2	27	41	+10 - +50	8-12	5-10
Vanad Redox	1,4	1,25	21	29	+10 - +50	6-10	5-10
Sodíko-sírové (NaS)	2,08	2	375	755	+300 - +350	5-6	-
Sodík/niklchlorid	2,58	2,47	305	787	+250 - +350	3-6	-
Li-C/LiCoO ₂	3-4	3-4	100	360	-20 - +60	-	-
Li-C/LiNi _{1-x} Co _x O ₂	3-4	3-4	-	-	-20 - +45	2,5	<3,5
Li-C/LiMn ₂ O ₄ (polymerní elektrolyt)	3-4	3-4	105	400	-20 - +60	3	<2,5

Zdroj: LINDEN, D., REDDY, B.T. Handbook of batteries, *The McGraw-Hill Companies, Inc.* (2002), 1506 pages. ISBN 0-07-135977-1

Technologie	počet cyklů	konfigurace	Specifická energie [Wh/kg]	Energetická hustota [Wh/l]	Specifický výkon [W/kg]	Aplikace	Výhody/ nevýhody
Oloveno-kyselinové	800	článek	35	80	200	Elektrické/hybridní automobily, malé zásobníky pro domácnosti	Komerčně dostupné, bezúdržbové / nízká specifická energie
Nikl-kadmiové	1000	článek	35	80	260	Elektrické/hybridní automobily, vesmírné aplikace, domácnosti	Komerčně dostupné / relativně vyšší cena, nízká energie
Nikl-metalhydrid	900	článek	65	220	850	Elektrické/hybridní automobily, vesmírné aplikace, domácnosti	Vysoká specifická energie / relativně drahé
Nikl-železo	1000	článek	30	60	100	Průmyslové	Komerčně dostupné / velká údržba, možnost tvorby vodíku
Nikl-vodík	2000	článek	55	60	100	Armáda, vesmírné tech.	Dlouhá životnost / velice drahé, vysoké samovybití
Zinek/oxid stříbra	40-50	článek	90	180	500	Armáda, vesmírné tech.	Vysoká specifická energie a výkon / vysoká cena, velice krátká životnost
Zinek/bromid	1250	baterie	65	60	90		Nízká cena / nízká energetická hustota
Zinek/vzduch	n/a	baterie	150	160	95	Průmyslové	Specifická energie / krátká životnost, nízký specifický výkon
Regenesys (PSB, Zn/Br)	2000	baterie	20	20	--	Energetický zásobník	Velice velká velikost
Vanad Redox	3000	baterie	10	10	--	Energetický zásobník	Velice velká velikost
Sodíko-sírové (NaS)	1500	článek	170	345	250	Energetický zásobník	Vysoká specifická energie a energetická hustota / vysoká teplota
	1000	baterie	115	170	240		Vysoká specifická energie a energetická hustota / vysoká teplota
Li-C/LiCoO ₂	600	článek	155	410	--	Elektrické/hybridní automobily, domácnosti	Vysoká specifická energie / cena
Li-C/LiNi _{1-x} Co _x O ₂	400	článek	150	400	--	Elektrické/hybridní automobily, domácnosti	Vysoká specifická energie
Li-C/LiMn ₂ O ₄ (polymerní elektrolyt)	600	článek	140	300	--	Elektrické/hybridní automobily, domácnosti	Vysoká specifická energie / vyšší cena
Li/MnO ₂ (tekutý elektrolyt)	300	článek	120	265	--	Domácnosti	Vysoká specifická energie / nutný další vývoj

Zdroj: LINDEN, D., REDDY, B.T. Handbook of batteries, *The McGraw-Hill Companies, Inc.*(2002), 1506 pages. ISBN 0-07-135978-8

Srovnání nejpoužívanějších typů průmyslových baterií:

Typ Člátku	Ni-Cd	Ni-MH	Li-ion	Olověný
Hustota energie (Wh/kg)	45-80	60-120	90-120	30-50
Počet cyklů (při 80% hloubce vybití)	1500	300-500	>1500	400-500
Projektovaná životnost	5 let +	3-4 roky	10 let+	10 let+
Doba nabíjení	1-2h	2-4h	½-4h	8-16h
Samovybíjení/měsíc (při cca 20°C)	20%	30%	5-10%	5%
Nominální napětí článku	1.2V	1.2V	3.3V	2V
Provozní teploty (pro vybíjení)	-40~60°C	-20 ~ 60°C	-20 ~60°C	-20 ~60°C
Požadavky na servis	30-60 dnů	60-90 dnů	6 měsíců	6 měsíců
Přibližné náklady (EUR/Wh)	0.33	0.65	0.33	0.11

<http://www.fg-forte.cz/cz/kategorie/lithiove--lithium-ion-baterie.aspx>

Systémový identifikátor	Třída 1	Třída 2	Třída 3	Třída 4
Solární frakce	100%	70-90%	okolo 50%	<50%
Akumulační velikost/dny	3->10	3.5	1.3	okolo 1
Důležité vlastnosti baterií				
Počet cyklů	nízká (<300)			vysoká (>1200)
Schopnost odolat dlouhou dobu v hlubokém vybití	Důležité	↔		Méně důležité
Nízké samovybíjení	Důležité (méně než <1% za měsíc)	↔		Méně důležité (5% za měsíc)
Opatření proti kyselému vrstvení	Důležité	↔		Méně důležité
Odpor vůči korozi	Důležité	↔		Méně důležité

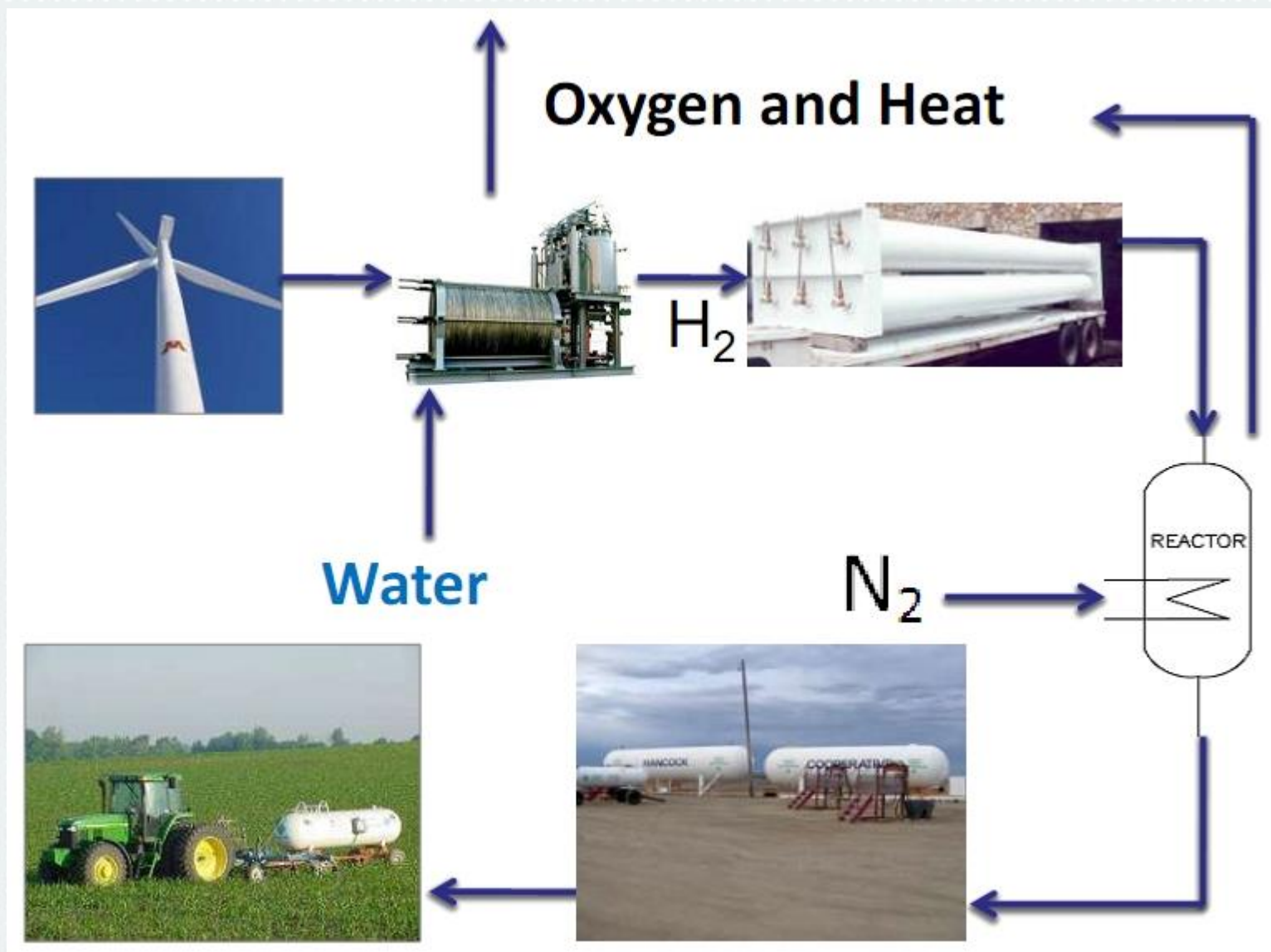
Zdroj: LUGUE, A., HEGEDUS, S. Handbook of Photovoltaic Science and Engineering. ISBN: 0-471-49196-9, John Wiley & Sons, 2010

Alternativní metody

Syntetický metan

- Obrovská akumulční schopnost v plynovodech
- Příklad: Německo má schopnost uložit až 200 TWh v plynovodech

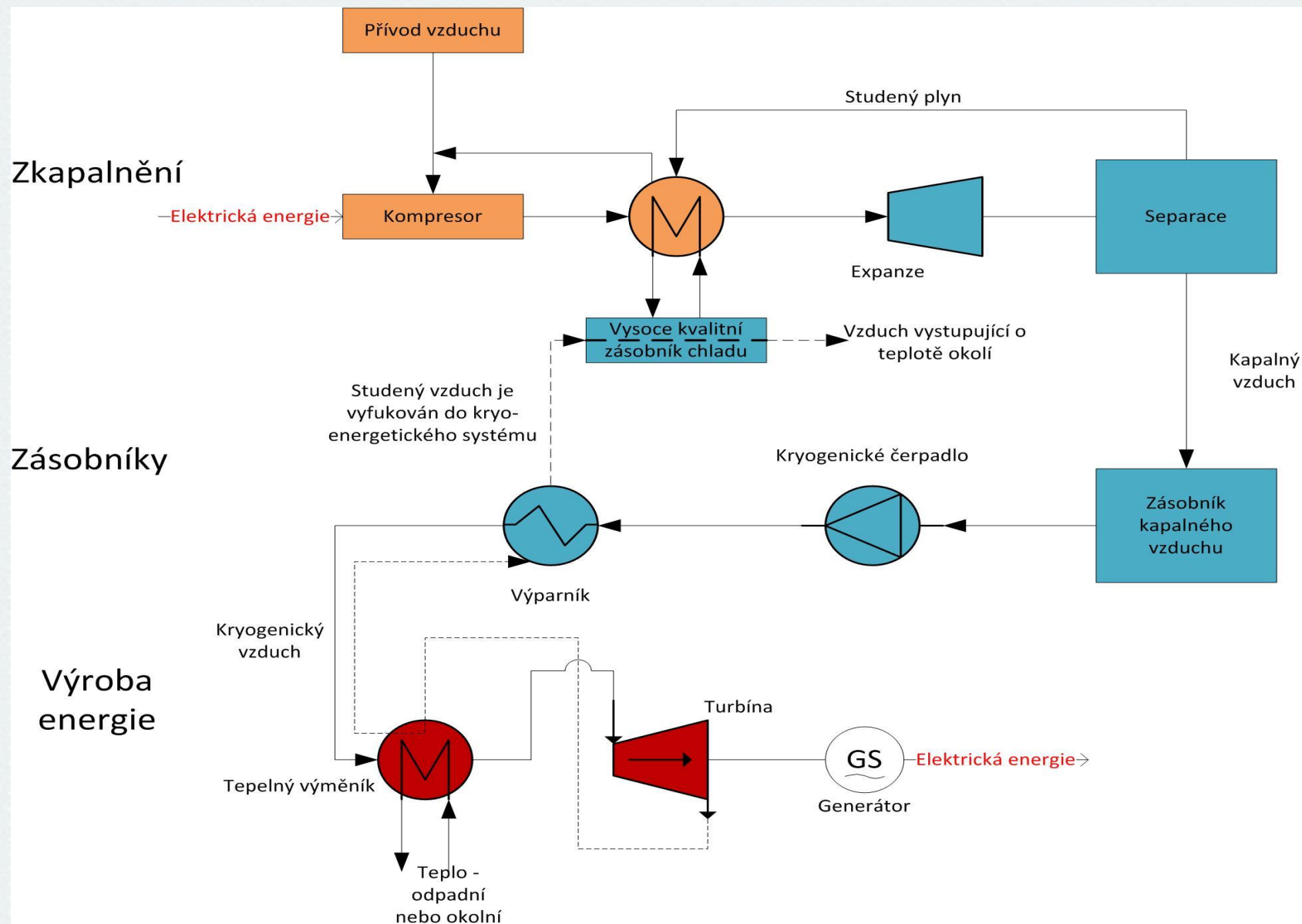
Výroba umělých hnojiv – NH_3



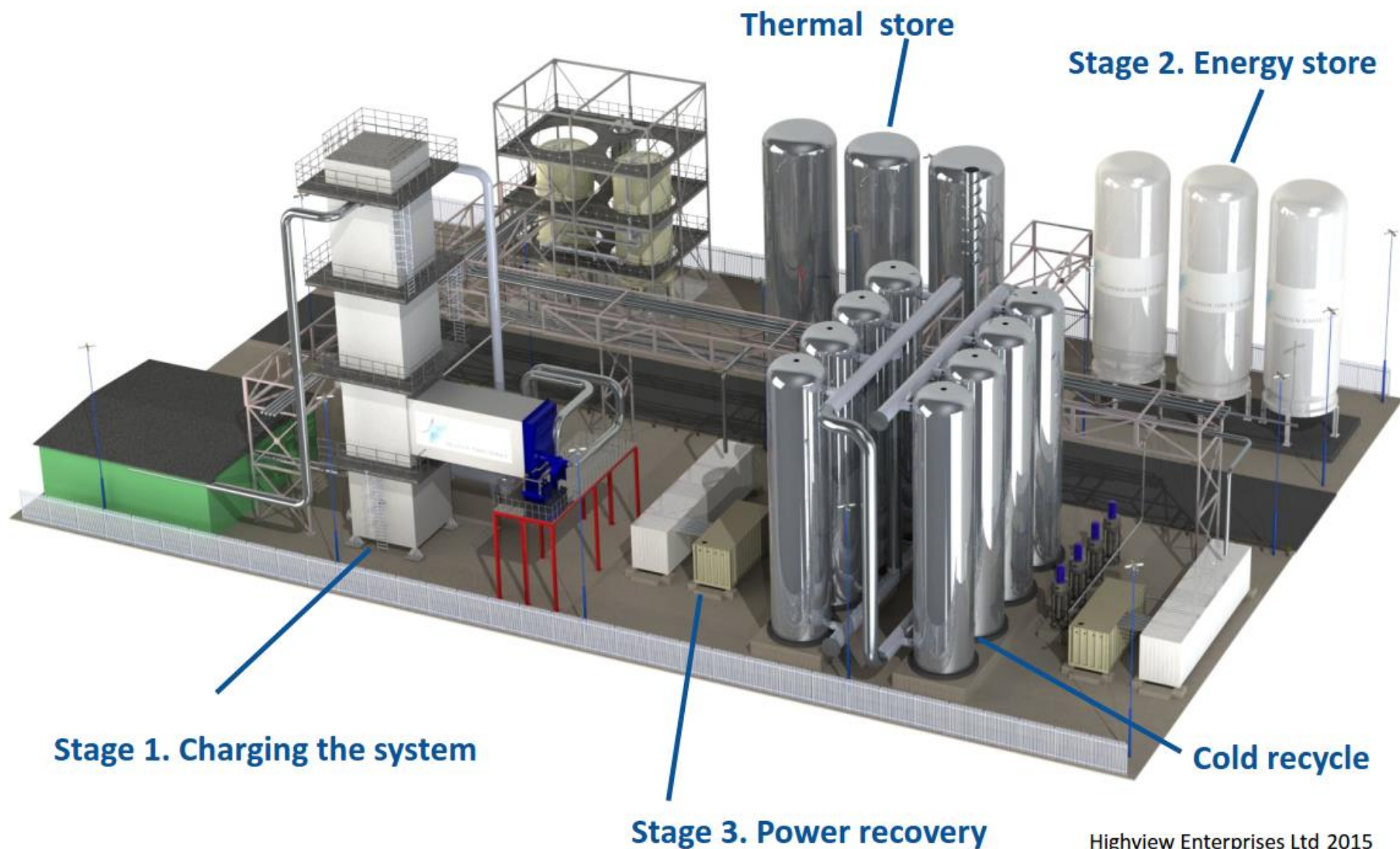
<http://newenergyandfuel.com/wp-content/uploads/2010/06/Wind-Driven-NH3-Process-Block-Diagram.jpg>

Akumulace v kapalném vzduchu

- Velice efektivní
- Poměrně levná technologie – 110\$/kWh
- Účinnost do 70%
- Celkem cyklů: > 13.000



Zdroj: Highview Power



Highview Enterprises Ltd 2015

Podmořské balóny – stlačený vzduch



Zdroj: <http://www.hydrostor.ca/>

HE3DA

- Lithiový akumulátor
- Měrná kapacita bateriového systému 520 Wh.l⁻¹, 125 Wh.kg⁻¹
- Doba nabití 70% za 15 min., 90% za 30 min



Zdroj: <http://www.he3da.cz/#!aplikace/c5en>





**děkuji Vám
za pozornost**

www.ueen.feec.vutbr.cz