

State of the Art Projects in Denmark

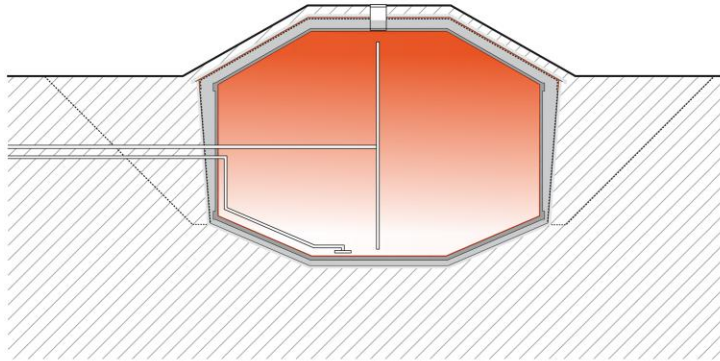
Optimierte Einbindung von
Großwärmespeichern in Wärmenetze



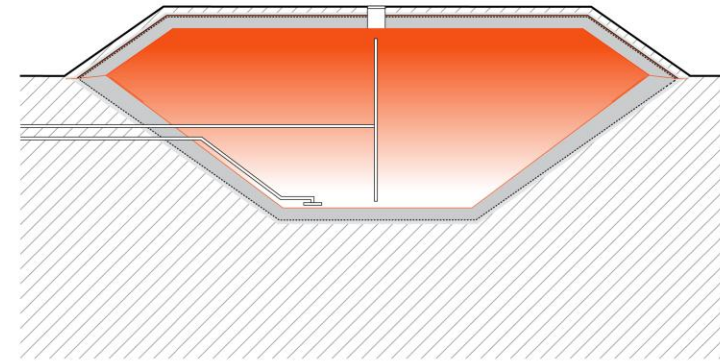
[Link](#)

4 verschiedene Grosswärmespeicher – Typen (LTES)

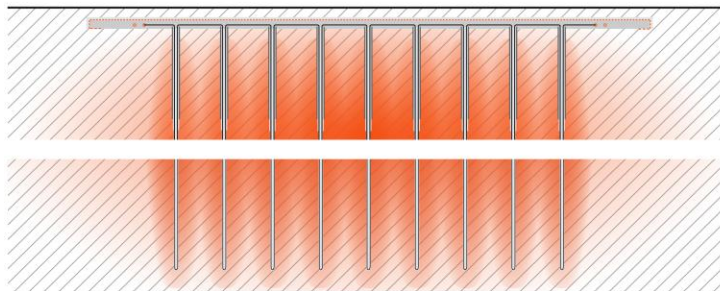
Tank thermal energy storage (TTES)
(60 to 80 kWh/m³)



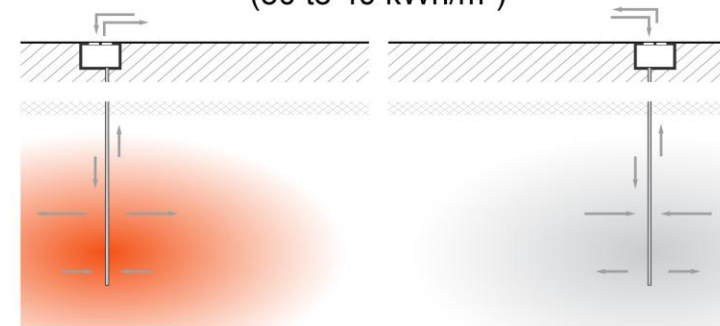
Pit thermal energy storage (PTES)
(30 to 80 kWh/m³)



Borehole thermal energy storage
(BTES)
(15 to 30 kWh/m³)



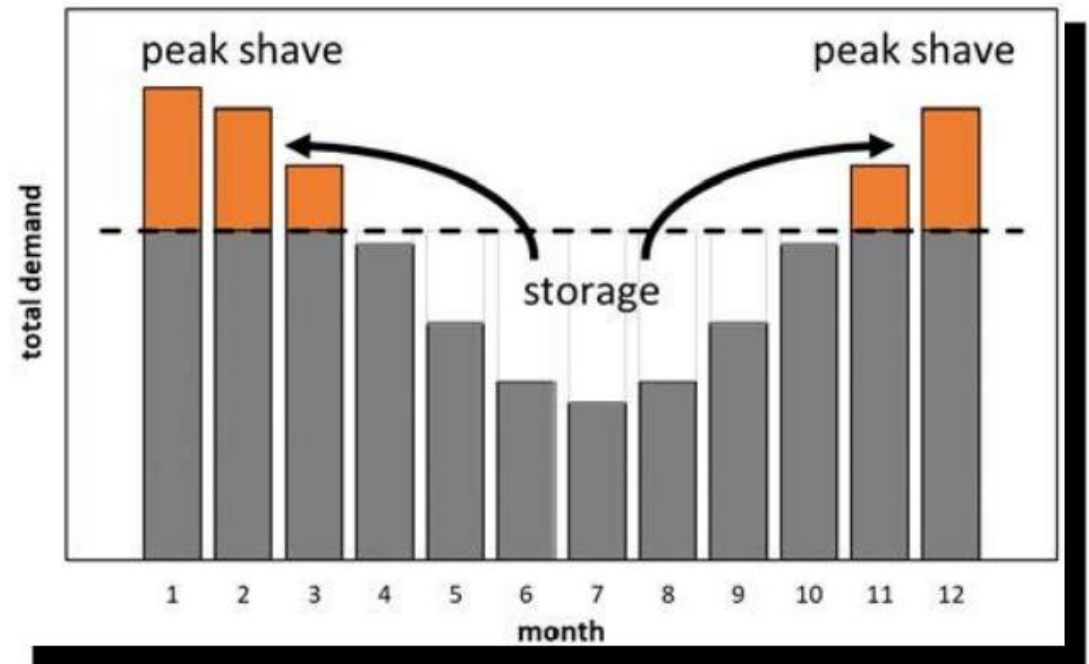
Aquifer thermal energy storage
(ATES)
(30 to 40 kWh/m³)



Quelle: SOLITES

Vorteile durch LTES für das Energiesystem

- Flexibilitätsdienste für den Stromsektor
 - z.B. LTES (PTES) kann günstig erzeugbare Wärme speichern – und zur Verfügung stellen, wenn Wärmeerzeugung teuer ist (bspw. in KWK-Anlagen)
- Speicherung von überschüssiger Wärme aus der Industrie und der Müllverbrennung
- Speicherung von Solar-, Wind- und Erdwärme
- Riesige Kapazitäten können enorme Energiemengen zu relativ geringen Implementierungskosten speichern
- Reduzierung des Verbrauchs in Spitzenzeiten
- Reduzierung fossiler Brennstoffe im Energiesystem CO₂- & Kostenreduzierung
- 2-3 Mal günstiger als Stahltanks. 100 Mal günstiger als elektrische Batterien.

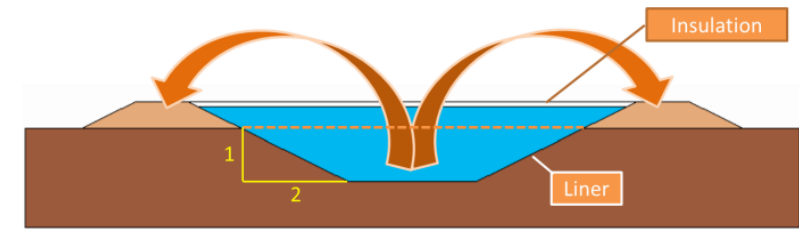


Typische Wärmebedarfskurve

Bildquelle: www.geothermal.org

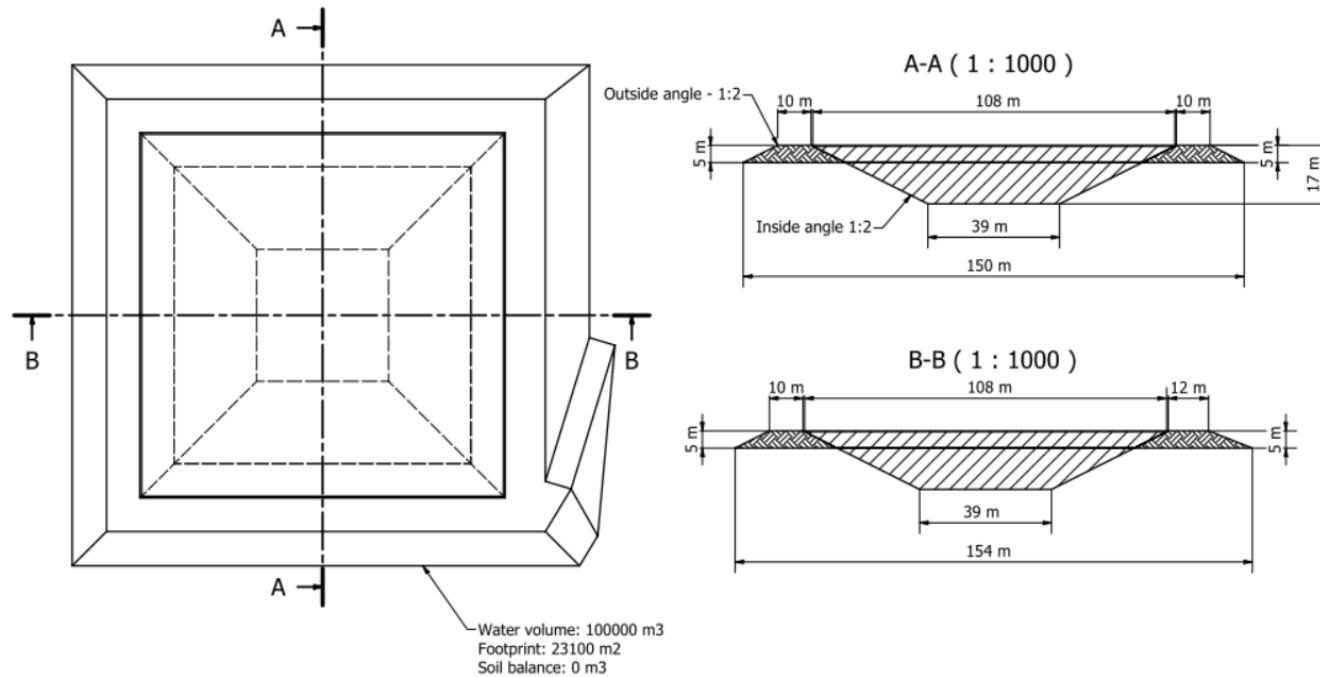
PTES - Beschreibung der Technologie & Planungskriterien

- Umgekehrte Pyramidenstumpf mit Erdmassenbilanz
 - Volumen Aushub = Volumen umlaufender Dammaufbau
- Hangneigung in Abhängigkeit der lokalen Bodenwerte
 - meistens ca. 1:2 ohne zusätzliche Maßnahmen
- Abstand zwischen Beckensohle und Grundwasser
 - um Wärmeverluste ins GW zu vermeiden, sowie eine GW-Haltung
- Vorzugsweise in kurzer Entfernung zur Netzintegration
 - um Anbindekosten zu verringern
- Vorschlag unterschiedlicher Volumen und Formen / Geometrien, um eine Vorstellung über die Situation an einem bestimmten Standort zu erhalten

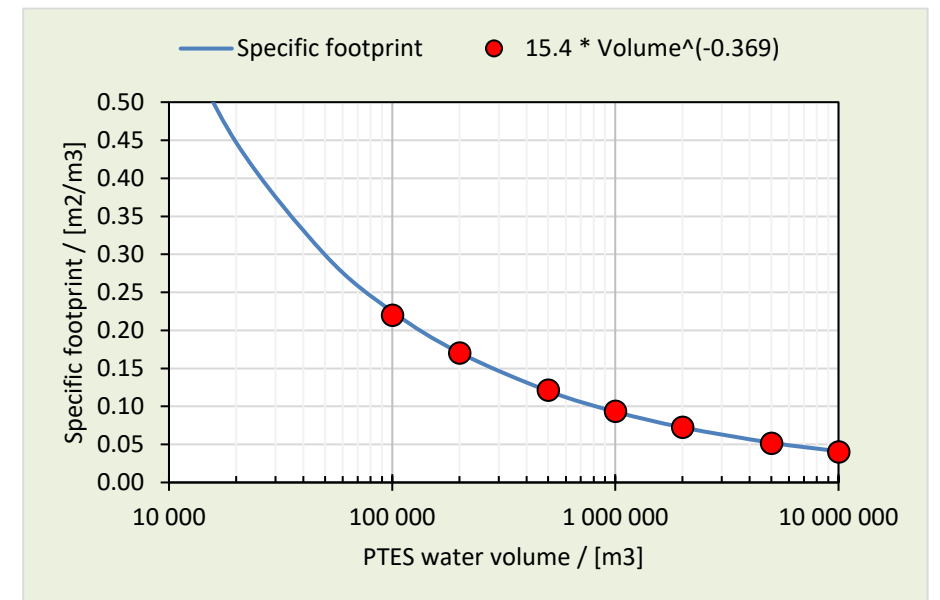


PTES "Fußabdruck"

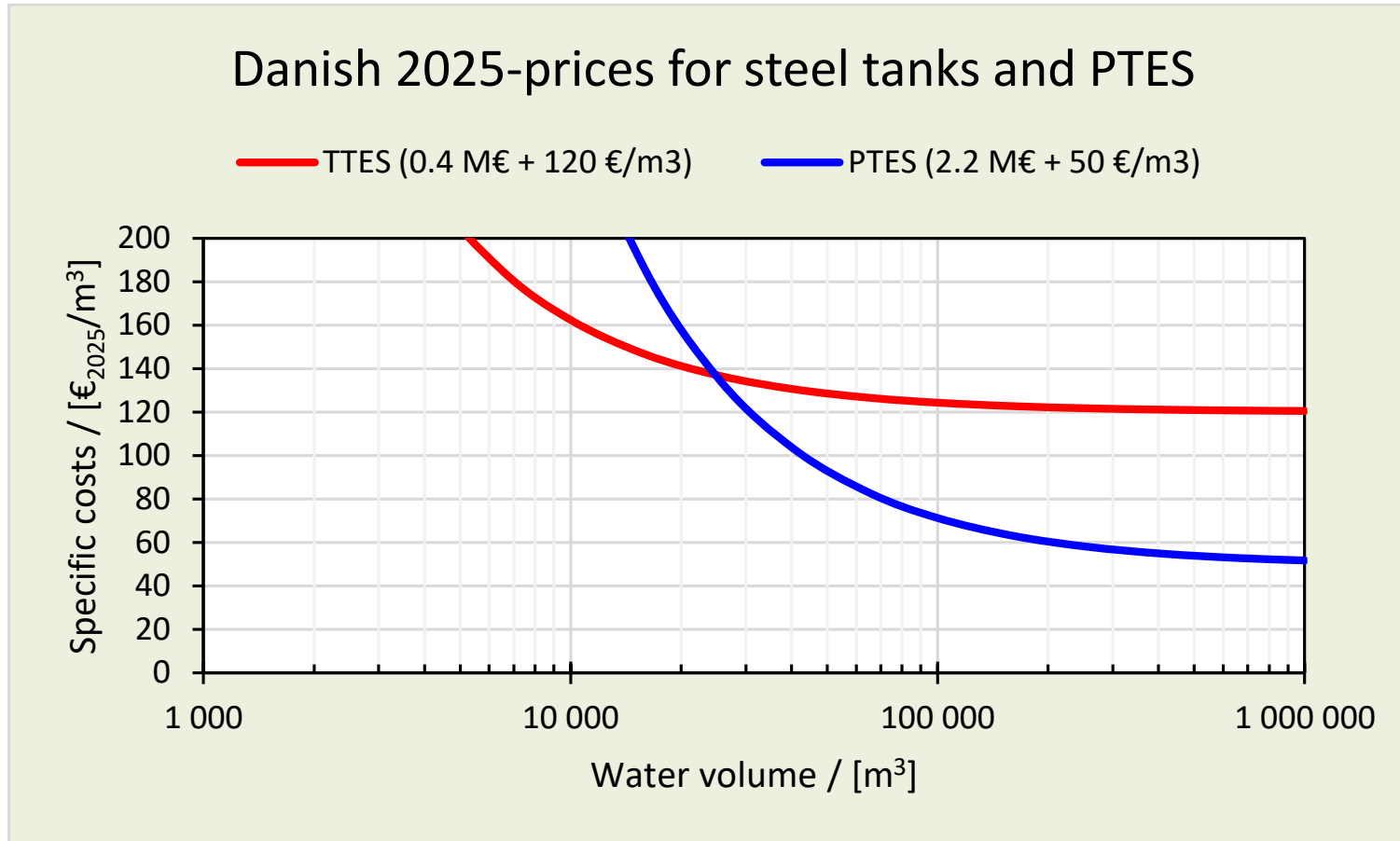
- Visualisierung eines 100.000m³ PTES in ebenem Gelände und vorteilhaften Bodenkennwerten
 - Hinweis: ohne Darstellung von Ein-/Auslässen



- Spezifischer "Fußabdruck" eines PTES als Funktion des Wasservolumens, basierend auf den im linken Bild gezeigten Annahmen
 - Abweichung bei PTES > 100 000 m³ weniger als 2%



Kosten in Abhängigkeit des Wasservolumens (TTES & PTES)



Kostenvergleich eines Stahltanks und eines Erdbeckenwärmespeichers (PTES) im Verhältnis des Wasservolumens

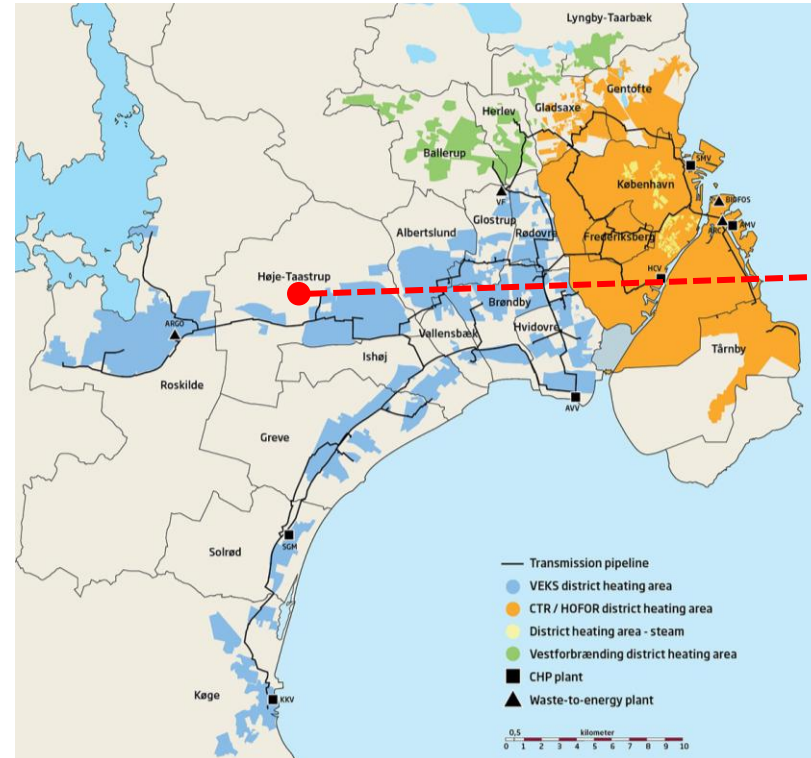
Verschiedene PTES Daten im Vergleich

- Übersicht von durch dänische FW-Betreiber umgesetzt PTES .
- Kosten stellen reale Projektkosten im jeweiligen Jahr dar
inkl.
 - Erdarbeiten
 - Abdichtungssystem und Deckel
 - Ein-/Auslässe (Rohre, Diffusoren)
 - Pumpen und Wärmetauscher auf der Speicherseite.
 exkl.
 - Grundstück, Wasser, Planung
- Quelle: [Danish Energy Agency. Technology catalogue for energy storages, chapter 140, Seasonal heat storage.](#)

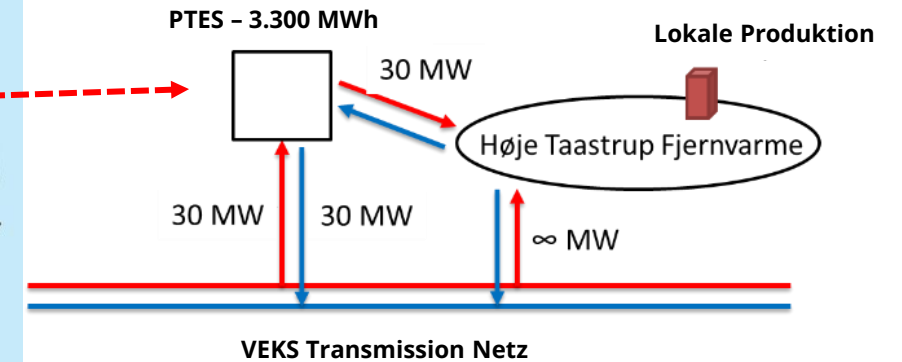
PTES	Ottrup-gård	SUN-STORE 2 Marstal	SUN-STORE 3 Dronning lund	SUN-STORE 4 Marstal	Vojens	Gram	Toftlund	Høje Taastrup
Year of construction	1993-95	2003	2013	2011-12	2014-15	2014-15	2016-17	2020-22
Size, m ³ (water volume)	1,500	10,000	60,000	75,000	210,000	125,000	85,000	70,000
Price, million €	0.23	0.67	2.3	2.7	5.0	4.3	4.1	6.0
Price, €/m ³	150	67	38	36	24	34.5	48	86
Price, €/kWh	5.2	1.0	0.43	0.45	0.41	0.36	0.59	1.83
Temperature range, °C	35-60	35-90	10-89	17-88	40-90	20-90	20-90	45-90
Capacity, MWh	43.5	638	5,400	6,000	12,180	12,125	6,885	3,300
Charging and discharging cap., MW	0.39	6.51	26.1	10.5	38.5	30.0	22.0	30.0
Calc. heat loss, total, MWh/y	85	402	1,602	2,475	5,500	4,024	1,900	1,577
Measured heat loss, MWh/y [#]	70		1,175	2,927				

Wöchentlicher PTES in Høje Taastrup, Copenhagen Capital Area

- **Wärmelieferanten des PTES'**
- 4 KWK Anlagen
Gesamtkapazität $2.050\text{MW}_{\text{heat}}$
- 3 Müllverbrennungsanlagen
Gesamtkapazität $400\text{MW}_{\text{heat}}$
- Reserve- und Spitzenlastkraftwerke
Gesamtkapazität $1.900\text{MW}_{\text{heat}}$
- 2 Wärmespeicher
Gesamtkapazität $660\text{MW}_{\text{heat}}$
- Keine Solarthermie



Modellierung des PTES als Teil des gesamten Heizungssystems



Der PTES erhält Wärme aus dem Transmission Netz ($\sim 95\text{-}110\text{ }^\circ\text{C}$)

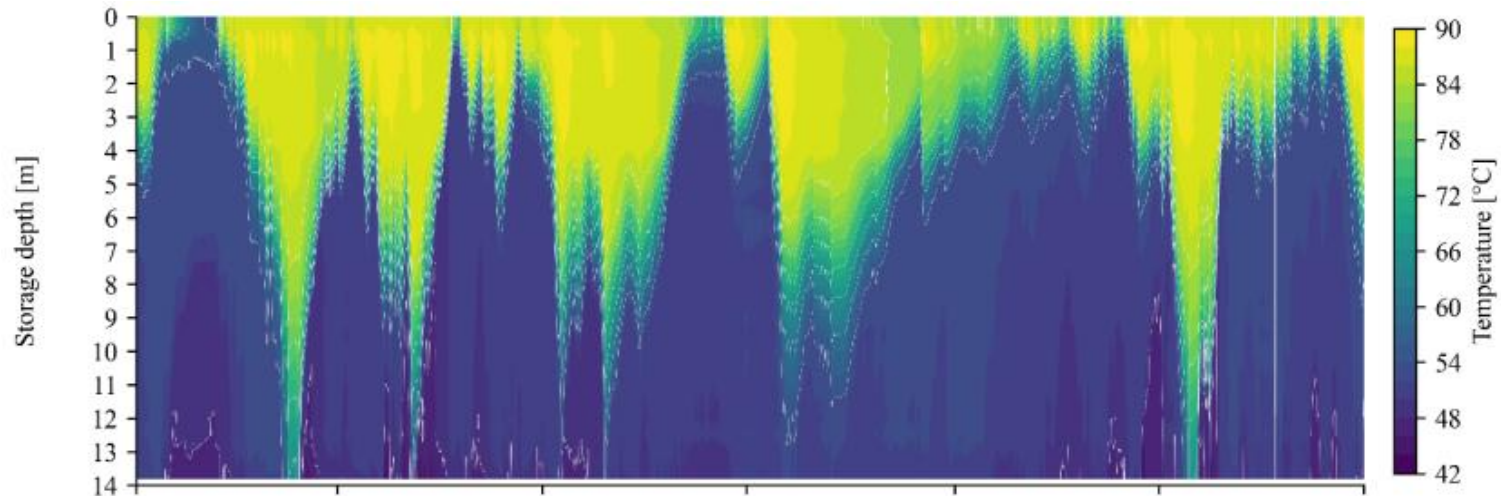
Der PTES gibt Wärme in das Verteilungsnetz in Høje Taastrup ($\sim 75\text{ }^\circ\text{C}$)

Nutzen und Vorteile des wöchentlichen PTES im Cph FW-Netzwerk

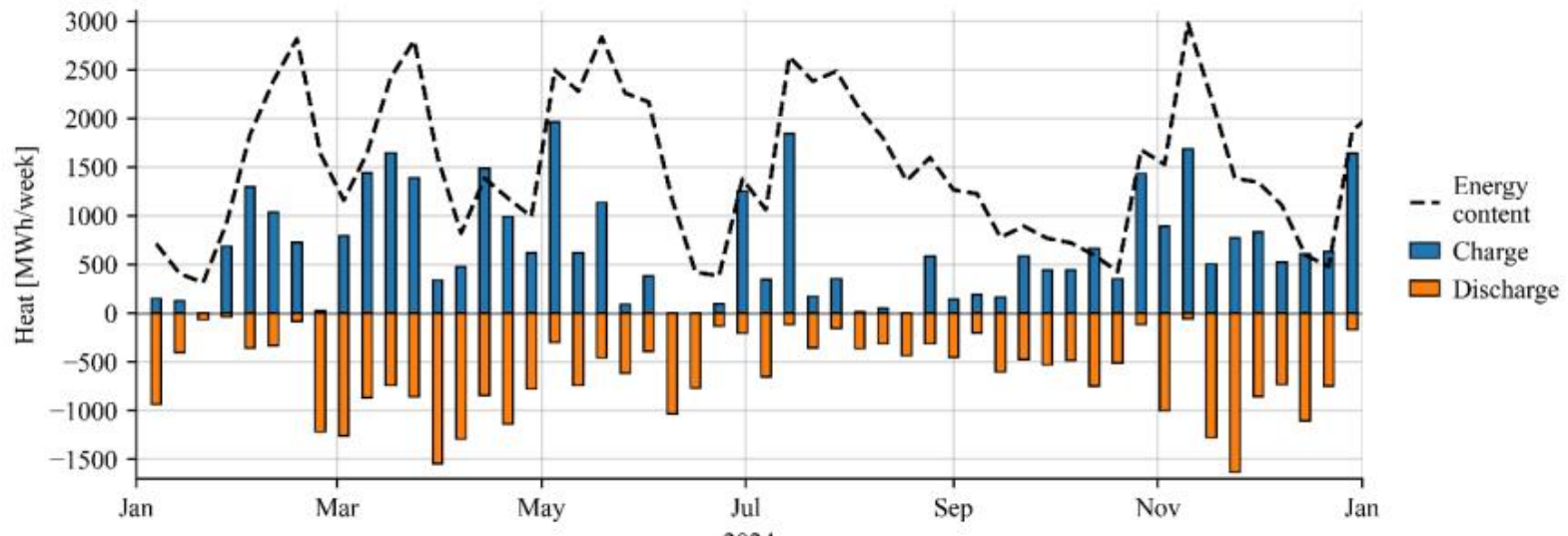
- Die Gesamtinvestition belief sich auf 12,04 Mio. € ohne Fördermittel.
- Der betriebliche Nutzen wird auf 1,05 Mio. € pro Jahr berechnet, die Betriebskosten werden auf 0,16 Mio. € pro Jahr geschätzt.
- Der PTES Høje Taastrup spart jährlich 6.200 Tonnen CO₂ ein,
 - davon 3.000 Tonnen vor allem durch die Einsparung von fossilem Gas.
 - Eine Reduzierung des CO₂-Fußabdrucks um 3.200 Tonnen ergibt sich aus dem Stromsektor aufgrund optimierter Stromerzeugungsmöglichkeiten.
- Der Wert (Betriebsnutzen) entsteht durch:
 - Zusätzliche Produktion der effizientesten verfügbaren KWK-Anlagen und Müllverbrennungsanlagen
 - Einsparung von Spitzenlast- und Bypass-Betrieb; insbesondere im Winter
 - Optimierung der Kraft-Wärme-Kopplungsanlagen im Hinblick auf den Strompreis

Reale Messdaten PTES Høje Taastrup, 2. Betriebsjahr

Wasser-
temperaturen
Von oben(0m) nach
unten (14m)



Energiegehalt
Wöchentliche Be- und
Entladung



Quelle: Sifnaios, I et al. Høje Taastrup Pit Thermal Energy Storage
2024 Measurement Report

Speichereffizienz PTES Høje Taastrup, 2. Betriebsjahr

Table 4: Monthly charged and discharged energy, internal energy change, heat loss, and efficiency for 2024.

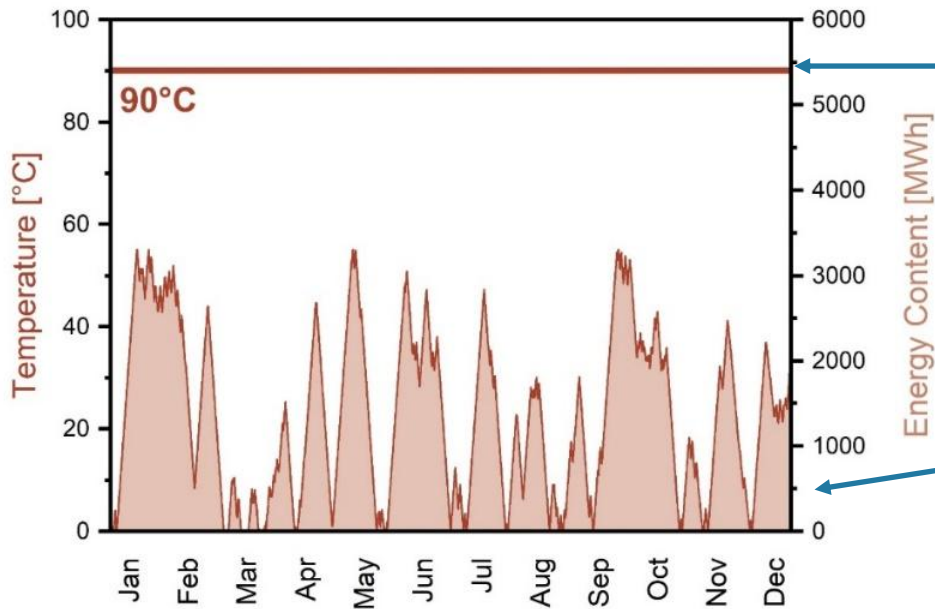
Period [2024]	E_{charged} [MWh]	$E_{\text{discharged}}$ [MWh]	$\Delta E_{\text{internal}}$ [MWh]	$E_{\text{loss, total}}$ [MWh]	$E_{\text{loss, lid}}$ [MWh]	$E_{\text{loss, ground}}$ [MWh]	Efficiency [%]
January	1396	1629	-434	202	90	112	89
February	2961	2297	215	449	99	350	84
March	4993	4307	268	418	105	313	91
April	3793	3901	-322	214	95	119	95
May	3613	2161	994	457	88	369	83
June	1362	2112	-894	144	79	65	94
July	2660	1299	960	401	88	313	76
August	768	1534	-980	214	85	129	88
September	1388	1870	-641	159	86	73	92
October	2962	2154	595	214	98	116	91
November	4421	3766	231	424	105	319	90
December	3727	2887	537	302	106	196	90
Total	34044	29917	529	3598	1124	2474	89

Quelle: [Sifnaios, I et al. Høje Taastrup Pit Thermal Energy Storage 2024 Measurement Report](#)

In comparison: **87%** in the 1st year

Vergleich eines wöchentlichen und eines saisonalen PTES-Betriebs

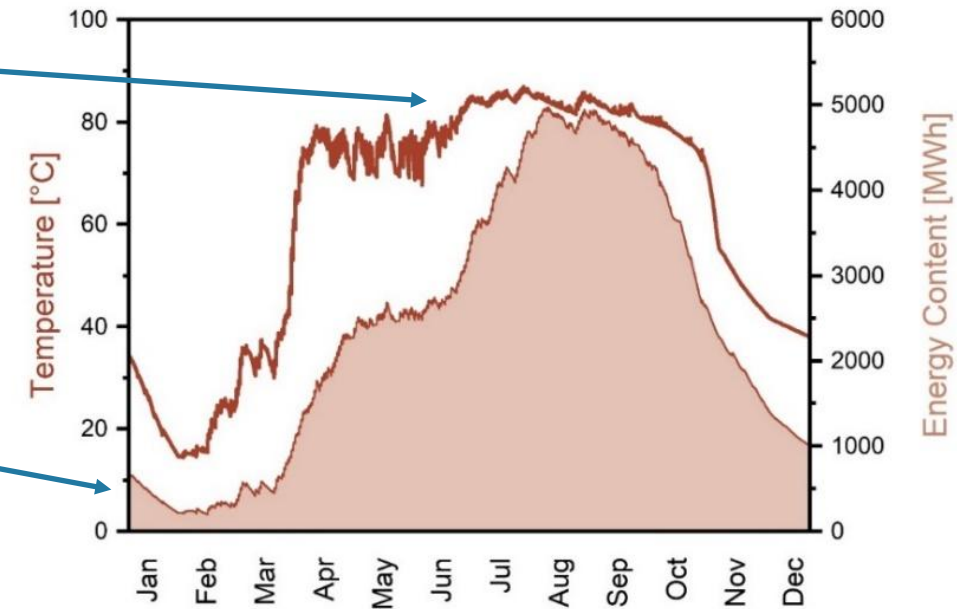
Høje Taastrup, Ausblick 2025



buffer PTES - Forecast 2025

Kurz - Zeit - PTES:
Strommarkt
orientierte Fahrweise

Dronninglund, Messdaten 2019



seasonal PTES - Measurements 2019

Lang - Zeit - PTES:
Beladung im Sommer
Entladung im Winter

Wassertemperaturen in der obersten Wasserschicht

Energiegehalt



Unterschiedliche Anforderungen an die Kunststoffabdichtung

Wirtschaftlichkeit im direkten Vergleich / Preis gespeicherter Wärme

Høje Taastrup

Dronninglund

	Høje Taastrup	Dronninglund
Water Volume	70.000 m ³	60.000 m ³
CAPEX of PTES (year)	6.0 Mio. € (2022)	2.3 Mio. € (2013)
Heat Capacity QCAP	3.300 MWh at ΔT from 90 °C to 48 °C	5.400 MWh at ΔT from 90 °C to 10 °C
calculated Heat loss Qloss	ca. 1.577 MWh / yr	ca. 1.602 MWh / yr
Operation Costs	ca. 43.000 € / yr	ca. 21.100 € / yr
Electricity consumption	4.500 € / cycle	[incl. in operation costs]
Financing costs from CAPEX	ca. 135 %	ca. 135 %
Capital Costs / yr	6.0 Mio. € x 1.35 / 20 yr + 43.000 € / yr + 4.500 € / cycle = 448.000 € / yr + 4.500 € / cycle	2.3 Mio. € x 1.35 / 20 yr + 21.100 € / yr = 176.350 € / yr
Costs / MWh	$(448.000 \text{ € / yr} + 4.500 \text{ € / cycle} \times \text{No. of cycles}) / (\text{No. of cycles / yr} \times 3.300 \text{ MWh / yr} - 1.577 \text{ MWh / yr})$	$(176.350 \text{ € / yr}) / (\text{No. of cycles / yr} \times 5.400 \text{ MWh / yr} - 1.602 \text{ MWh / yr})$
1 cycle / yr	$((452.000 \text{ € / yr})) / 1.723 \text{ MWh / yr} = \mathbf{262,60 \text{ € / MWh}}$	$((176.350 \text{ € / yr})) / 3.798 \text{ MWh / yr} = \mathbf{46,40 \text{ € / MWh}}$
2 cycles / yr	$((457.000 \text{ € / yr})) / 5.023 \text{ MWh / yr} = \mathbf{91 \text{ € / MWh}}$	$((176.350 \text{ € / yr})) / 9.198 \text{ MWh / yr} = \mathbf{19,20 \text{ € / MWh}}$
10 cycles / yr	$((493.000 \text{ € / yr})) / 31.423 \text{ MWh / yr} = \mathbf{15,70 \text{ € / MWh}}$	
25 cycles / yr	$((560.500 \text{ € / yr})) / 80.923 \text{ MWh / yr} = \mathbf{6,90 \text{ € / MWh}}$	

Geschäftsmodelle für PTES

- Ein gutes Geschäftsmodell gewährleistet:
 - Dass Finanzmittel für den Bau von Energiespeichern bereitgestellt werden können, die die Kosten für die Erzeugung und Bereitstellung von Fernwärme senken.
 - Sicherheit für Investoren
 - Eine verwaltungstechnisch einfache und effiziente Lösung
 - Die Möglichkeit eines reibungslosen technischen Betriebs und einer guten Wartung der Anlage
- Vor Høje Taastrup befanden sich Wärmespeicheranlagen in Dänemark im Besitz und unter dem Betrieb eines einzigen Wärmeversorgungsunternehmens oder eines einzigen Wärmeerzeugers, typischerweise um Solarwärme zu integrieren oder den Betrieb der eigenen Kraft-Wärme-Kopplungsanlagen zu optimieren und die gespeicherte Wärme für eigene Verbraucher zu nutzen
- Notwendigkeit, das Geschäftsmodell zu überdenken, um maximalen Nutzen in Systemen mit mehreren Erzeugern und Akteuren zu gewährleisten

3 Geschäftsmodelle sind denkbar

- a) Kommerzielles Modell (Eigentumsanteile Dritter):
PTES kauft und verkauft Fernwärme. Die Preisdifferenz zwischen Einkauf und Verkauf sowie die Vergütung für Regelungs- und Spitzenlastdienste bilden die wirtschaftliche Grundlage.

- b) Infrastrukturmodell ("Varmelast" → Høje Taastrup):
Fernwärmeunternehmen oder Varmelast.dk errichten und betreiben den Wärmespeicher.
Der Wärmespeicher wird zu offenen und objektiven Bedingungen in die Lastverteilung einbezogen.

- c) Fernwärmeunternehmen- oder Erzeugermodell:
Das Fernwärmeunternehmen oder der Erzeuger errichtet und betreibt den Wärmespeicher. Der Betrieb optimiert die Finanzen für die Einkäufe des Unternehmens für Verbraucher oder die Erzeugung aus eigenen Anlagen..

Kombination aus b) and c)

Die Lösung für den PTES in Høje Taastrup

Das Infrastrukturmodell wurde für den PTES in Høje Taastrup gewählt.

- Høje Taastrup Fjernvarme und VEKS zahlen für die Errichtung und den Betrieb der Anlage, und stellen den PTES zugunsten der Erzeuger zur Verfügung
- Alle Parteien, die vom Speicher finanziell profitieren sind in die Finanzierung involviert, im Gegenzug dafür, dass VEKS zusichert den Speicher für die tägliche Lastverschiebung zur Verfügung zu stellen,
- VEKS hat mit allen KWK Produzenten, Müllverbrennungsanlagen und CTR Vereinbarungen getroffen, die für diese Verfügbarkeit eine feste jährliche Zahlung für 20 Jahre leisten (entsprechend dem berechneten betrieblichen Nutzen).

Baufortschritt, Erdarbeiten und Abdichtungssystem



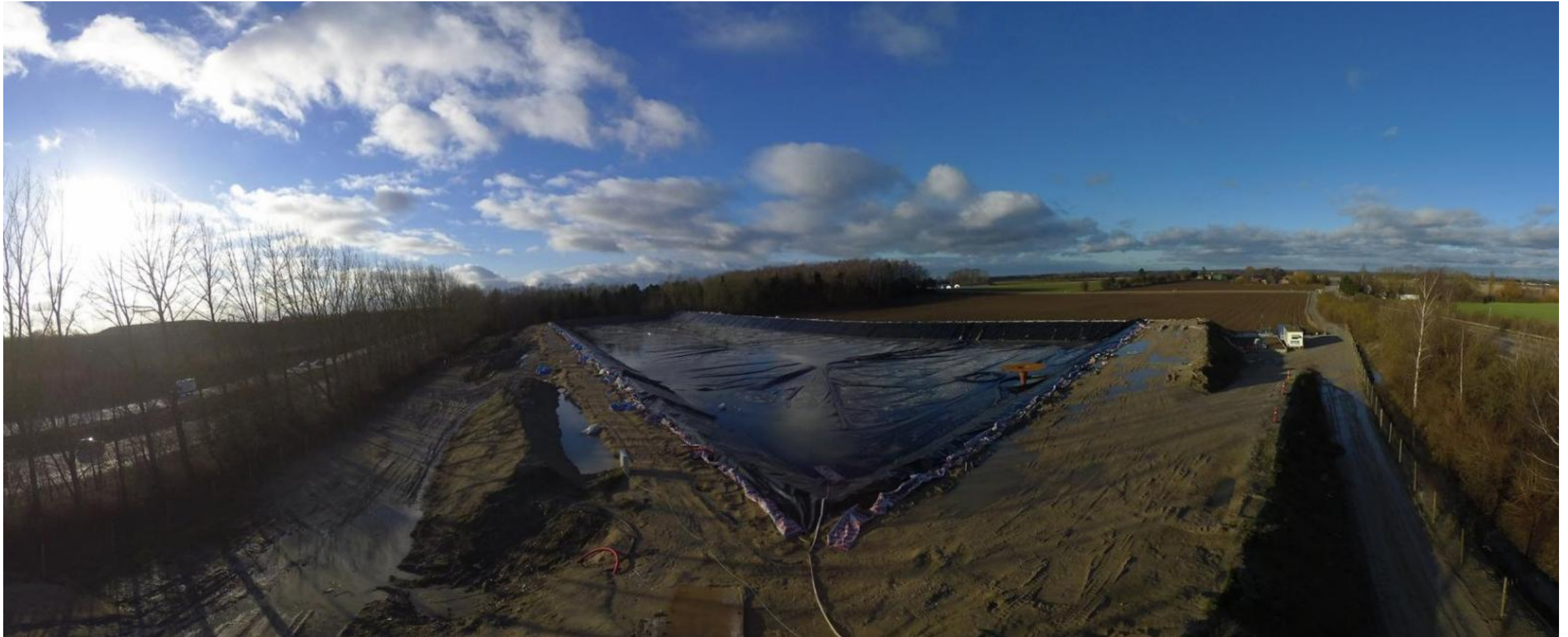
Quelle: HTF Denmark

Baufortschritt, vor der Wasserbefüllung mit FW-Wasser



Photo: DTU, Ioannis Sifnaios

Wasserbefüllung mit Fernwärmewasser



Baufortschritt – schwimmende Geomembran



Einsatz einer **Geomembrane** aus **hochtemperatur-resistentem Polypropylene**

wurde auch für die Abdichtung von Sohle und Seiten eingesetzt



Baufortschritt – isolierender Deckel





Vielen Dank für Ihre Aufmerksamkeit

Hendrik Wetzel
hw@planenergi.dk
[+45 20 94 85 52](tel:+4520948552)