



# Le stockage saisonnier de chaleur en aquifère

**CSDINGENIEURS**   
INGÉNIEUX PAR NATURE

11.04.2019 / Séminaires du jeudi / Joaquim Poppei et Olivier Masset

# Plan de la présentation

---

1. Généralité sur le stockage saisonnier de chaleur en aquifère
  - Motivation
  - Principe de fonctionnement
  - Faisabilité
  - Développement historique et actuel
2. Deux ou trois exemples d'application en Allemagne
3. Étude de préfaisabilité pour le stockage dans la nappe du Rhône
4. Conclusion

# Sources

 The Tenth International Conference on Thermal Energy Storage

**TWO-YEAR EXPERIENCE IN THE OPERATION OF AN AQUIFER THERMAL ENERGY STORE BASED ON SURPLUS HEAT ARISING FROM A GAS AND STEAM COGENERATION PLANT AT NEUBRANDENBURG / NE GERMANY**

F. Kabus, G. Möllmann, F. Hoffmann and J. Bartels  
GTN Geothermie Neubrandenburg GmbH, Seestrasse 7A,  
17033 Neubrandenburg, Germany  
gtn@gtn-online.de



Deep Saline Aquifers for Geological Storage of CO<sub>2</sub> and Energy  
Rueil-Malmaison, France  
17. April 2009



**Thermal energy storage in aquifers - three decades of experience gained, and what are future prospects?**

Burkhard Sanner<sup>1</sup> and Jörn Bartels<sup>2</sup>

<sup>1</sup> European Geothermal Energy Council, Brussels 

<sup>2</sup> Geothermie Neubrandenburg GmbH, Neubrandenburg, Germany 

**ATES Market Development in The Netherlands**

Aart L. Snijders

IFTech International - Arnhem - The Netherlands  
e-mail: office@ifinternational.com - Tel.: +31 26 3274965



**Aquiferwärmespeicher in Deutschland – Erfahrungen und Nutzungen**

**Aquiferwärmespeicher Neubrandenburg**  
**Aquiferwärmespeicher am Reichstagsgebäude**

Frank Kabus, Geothermie Neubrandenburg  
(Joachim Poppe, AF-Consult, Baden)

Jahrestagung der Schweizerischen Vereinigung für Geothermie  
23. November 2016 – Yverdon-les-Bains

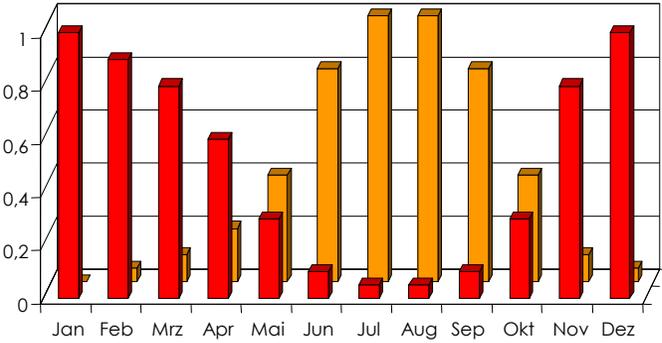


Et autres...

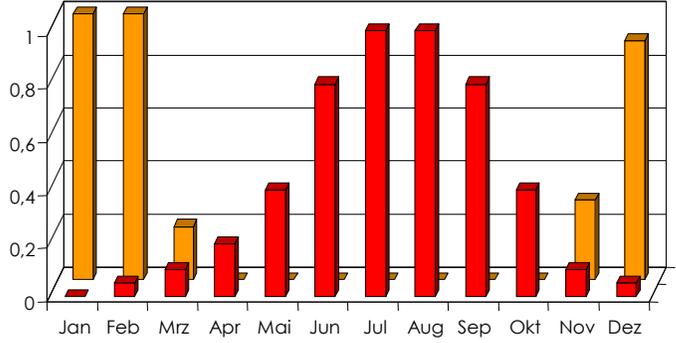


# Généralité sur le stockage saisonnier de chaleur en aquifère

# Stockage d'énergie thermique



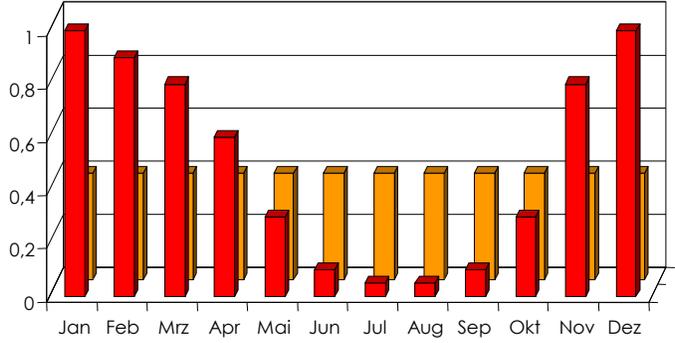
**Chauffage/Solaire**  
- Cartier d'habitations Helios,  
Rostock -



**Refroidissement/Freecooling**  
- Bâtiments du parlement Berlin-

■ *Demande en énergie*  
■ *Énergie produite*

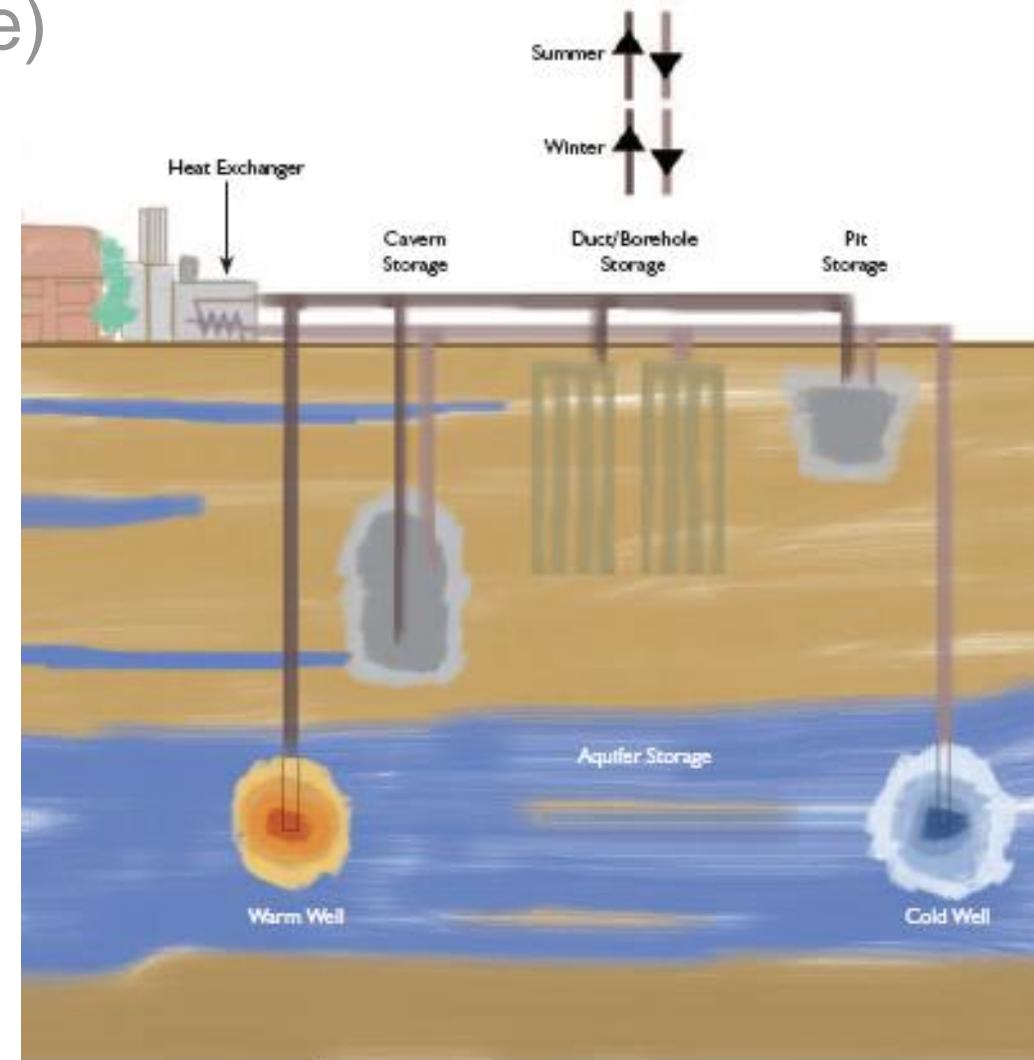
**Chauffage/Électricité**  
- Bâtiments du parlement Berlin -



# Types de stockage saisonnier d'énergie thermique – **STES** (Seasonal Thermal Energy Storage)

Stockage d'énergie thermique souterrain - **UTES** (Underground Thermal Energy Storage):

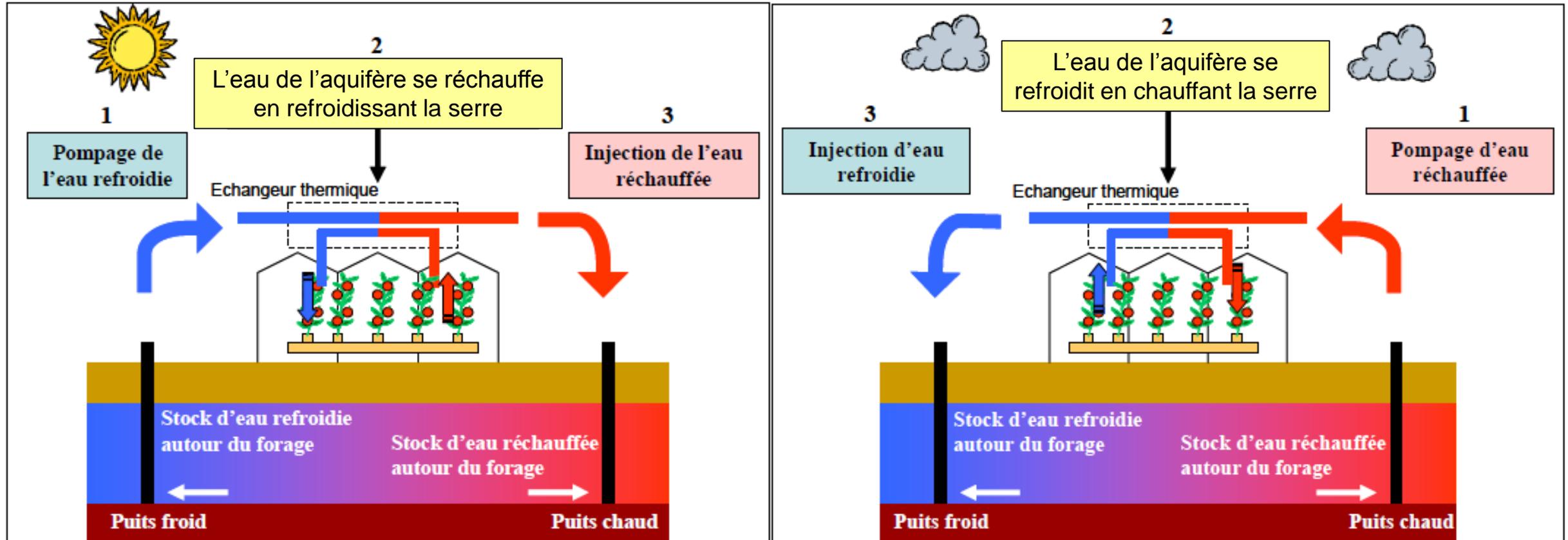
- + Stockage d'énergie thermique dans des cavités souterraines - **CTES** (Cavern Thermal Energy Storage)
- + Stockage d'énergie thermique avec des sondes géothermiques - **BTES** (Borehole Thermal Energy Storage)
- + Stockage d'énergie thermique en aquifère - **ATES** (Aquifer Thermal Energy Storage)



# Principe de fonctionnement d'un ATEs

- + ATEs composé d'une (ou plusieurs) paire de puits (doublet) qui pompe et injecte simultanément de l'eau souterraine dans un aquifère
- + 3 types de stockage: chaleur, froid ou mixte
- + 2 phases principales:
  - Stockage: injection d'eau chaude (froide) dans la nappe
  - Production: pompage d'eau chaude (froide) de la nappe
- + En cas de stockage mixte: production stockage simultanés

# Principe de fonctionnement d'un ATES (stockage mixte)



Modifié de Courtois et al. 2007 Application du stockage thermique en aquifère au chauffage et au refroidissement de serres maraîchères en France : étude de préféabilité. BRGM

# Faisabilité d'un ATEs

## Trois principaux aspects à étudier pour définir la faisabilité du stockage thermique en aquifère...

### 1) Produire un débit suffisant

va dépendre :

- de la nature géologique et des géométries des formations aquifères ;
- des caractéristiques hydrauliques.

### 2) Permettre la réinjection du débit pompé

va dépendre :

- des caractéristiques hydrauliques ;
- de la profondeur du niveau d'eau.



### 3) Conserver l'énergie thermique

va dépendre :

- de l'écoulement naturel de la nappe ;
- des déperditions thermiques.

# Faisabilité d'un ATES

## Trois principaux aspects à étudier pour définir la faisabilité du stockage thermique en aquifère...



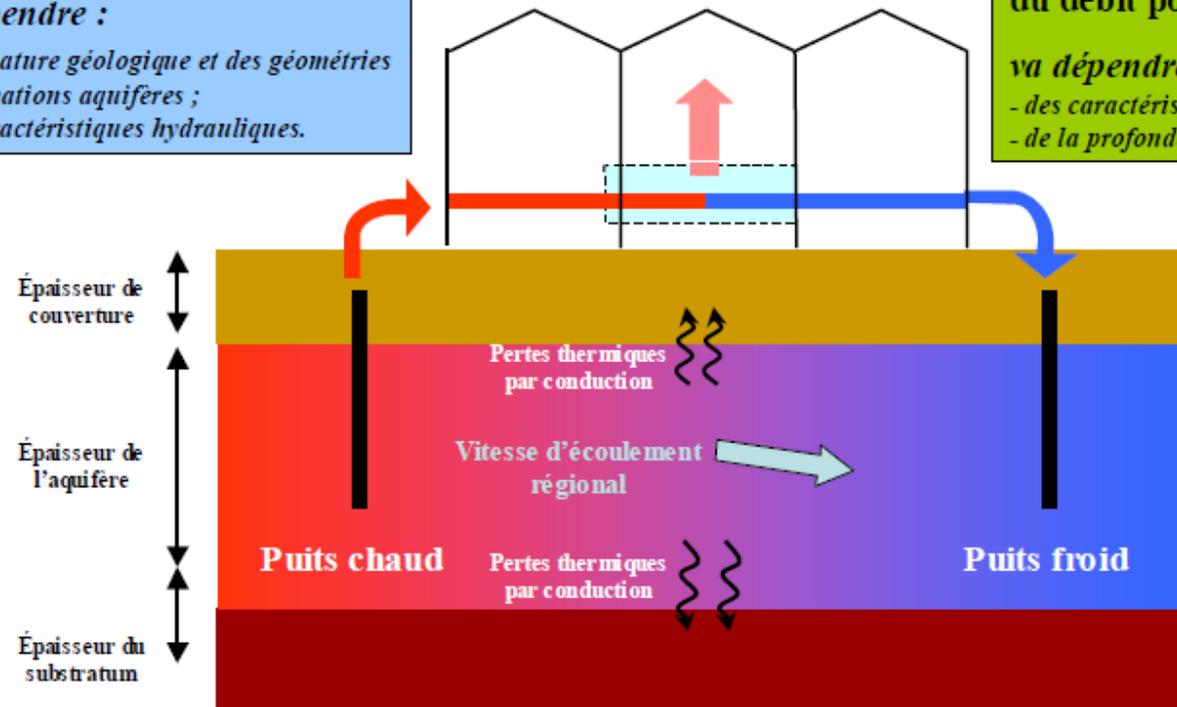
**Qualité chimique de l'eau**

1) Produire un **débit** suffisant  
*va dépendre :*

- de la nature géologique et des géométries des formations aquifères ;
- des caractéristiques hydrauliques.

2) Permettre la **réinjection** du débit pompé  
*va dépendre :*

- des caractéristiques hydrauliques ;
- de la profondeur du niveau d'eau.



3) **Conserver** l'énergie thermique  
*va dépendre :*

- de l'écoulement naturel de la nappe ;
- des déperditions thermiques.

# Qualité chimique de l'eau

- + La modification de la température de l'eau peut induire:
  - Précipitation de carbonate de calcium
  - Précipitation d'oxydes de fer, de magnésium ou de manganèse
  - Dégazage
  - Corrosion
  - ...
  
- + En fonction:
  - Chimie de l'eau
  - Différence de température (et pression)

# Avantage de l'ATES par rapport au BTES

- + Transfert de chaleur par conduction et advection
- + Plus grande capacité de transfert de chaleur
- + Plus efficient
- + Meilleur Marché

# Historique – Découverte fortuite de l'ATES

*Energies* 2010, 3, 1320-1334; doi:10.3390/en3061320

OPEN ACCESS

*energies*

ISSN 1996-1073

www.mdpi.com/journal/energies

*Review*

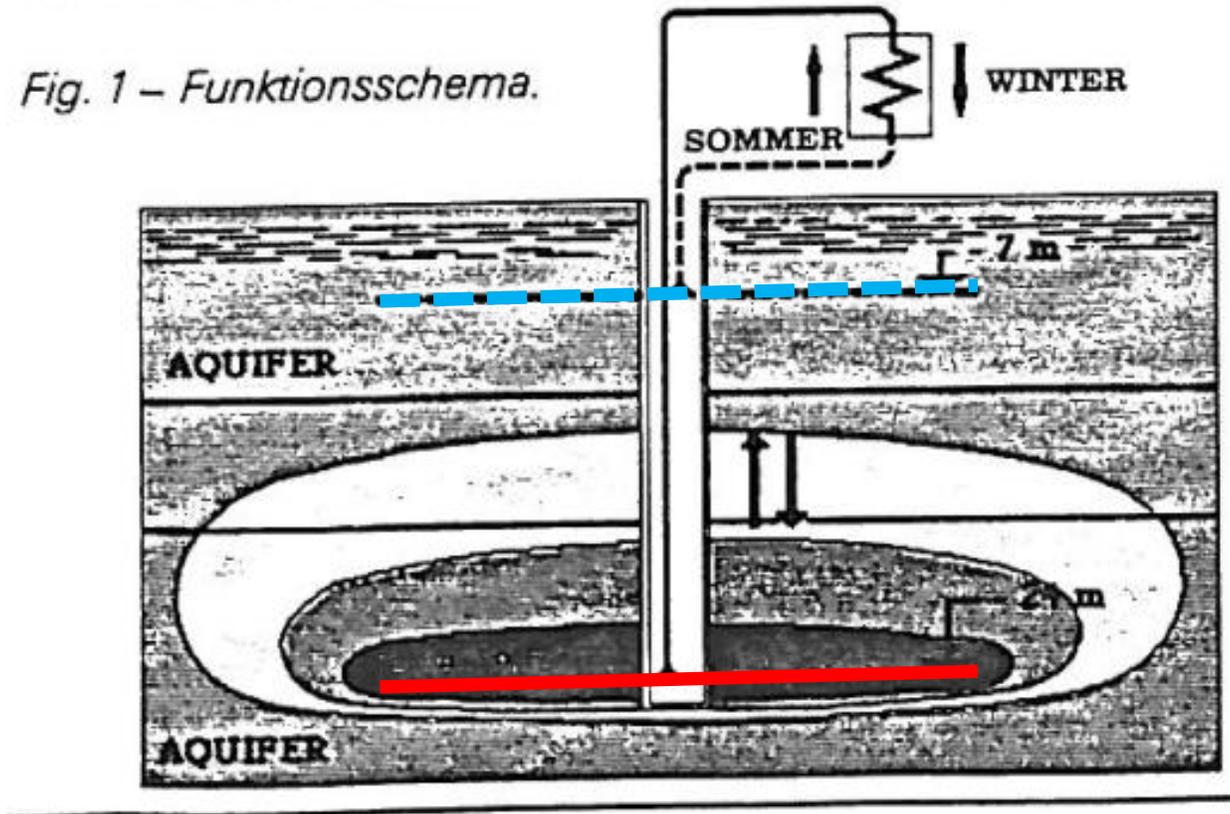
## **A Review on Concepts, Applications, and Models of Aquifer Thermal Energy Storage Systems**

### *2.2. History and Current Status*

The deliberate storage of cold water in an aquifer for later use or ATES has a history of more than forty years. Applications of ATES in large-scale projects started in the 1960s, mostly in China. In 1965, ATES was originated in Shanghai, China where excessive groundwater extraction related to industrial cooling had resulted in significant land subsidence [12]. To rectify the subsidence problem, cold water (from surface waters) was injected into the aquifers. Subsequently, it was observed that the injected and “stored” water had maintained its cool temperature for a long period of time and was suitable for industrial cooling. By 1984, some 492 cold storage wells, supplying cold thermal energy to the industries to cool down the machinery were in use [13].

# Historique – SPEOS, l'un des projets précurseurs, initié par l'EPFL et l'UNIL

- + SPEOS opérationnel de 1982 à 1993
- + Difficultés liées à la haute température de l'eau injectée (67°C en moyenne) → entartrage
- + Arrêté principalement en raison du coût relativement élevé d'exploitation et du manque d'intérêt du propriétaire



# Historique – Projets d'ATES répertoriés jusqu'en 2000 – Que peut-on en dire

- + Régions avec peu de relief et une géologie prévisible
- + Beaucoup de stockage de chaud et de froid ou de froid uniquement
- + Différences de température petites
- + Débits importants

Land	Standort	Nutzung für:	Realisierung	Speicher- aufgabe	Temperatur warm (°C)	Temperatur kalt (°C)	Volumen- strom (m³/h)
Niederlande	Utrecht	Universitäts- gebäude	1990	Heizung	90	40	100
Niederlande	Eindhoven	Einkaufs- zentrum	1992	Kühlung	32	18	100
Niederlande	Bunnik	Bürogebäude	1993	Kühlung	16	6	28
Niederlande	Zwolle	Bürogebäude	1985	Kühlung	20	9	60
Niederlande	Schiedam	Bürogebäude	1992	Kühlung	15	6	125
Niederlande	Zoetermeer	Bürogebäude	1993	Kühlung	15	5	100
Niederlande	Gameren	Bürogebäude	1993	Kühlung	12	12	50
Niederlande	HogeVeluwe	Museum	1993	Kühlung/ Heizung	12	12	5
Niederlande	Lutteleest	Gewächs- häuser	1993	Kühlung	12	12	50
Niederlande	Utrecht	Kulturzentrum	1993	Kühlung	14	7	400
Niederlande	Amsterdam	Presse- gebäude	1987	Kühlung	14	9	120
Niederlande	Gouda	Krankenhaus	1992	Kühlung	15	8	60
Niederlande	Amsterdam	Rijksmuseum	1994	Kühlung	12	5,7	70
Belgien	Leuven	Bankgebäude	1996	Kühlung	20	10	100
Schweden	Lomma	Gebäude	1990	Kühlung	15	5	350
Schweden	Solna	Büro	1987	Kühlung/ Heizung	15	8	700
Schweden	Klippan	Gebäude	1984	Heizung	16	8	150
Schweden	Kristianstad	Industrie	1985	Heizung/ Kühlung	15	5	70
Schweden	Malmö	Einkaufs- zentrum	1985	Heizung	25	10	40
Schweden	Malmö	Rundfunk-/ Fernsehstation	1991	Heizung/ Kühlung	15	4	60
Schweden	Malmö	Rundfunk-/ Fernsehstation	1992	Heizung/ Kühlung	16	8	20
Schweden	Malmö	Rundfunk-/ Fernsehstation	1993	Heizung/ Kühlung	16	8	15
Schweden	Malmö	Fernsehstudio	1993	Heizung	30	5	70
Schweden	Malmö	Büro	1994	Heizung/ Kühlung	17	8	30
Schweden	Malmö	Rundfunk-/ Fernsehstation	1994	Heizung/ Kühlung	17	8	30
Schweden	Falun	Schule	1985	Heizung	35	10	
Schweden	Höllviken	Rundfunk-/ Fernsehstation	1989	Heizung/ Kühlung	15	8	700
Kanada	Scarborough	Büro	1984	Heizung/ Kühlung			
Kanada	Winnipeg	Industrie	1987	Heizung/ Kühlung	12	5,5	288
Kanada	Ottawa	Universitäts- gebäude	1989	Heizung/ Kühlung	9	9	120
Kanada	Sussex	Krankenhaus	1984	Heizung/ Kühlung	11	6	125
Schweiz	Lausanne	Fernheizung/ Sportzentrum	1986	Heizung	70	30	
Deutschland	Berlin	Parlaments- gebäude	1999	Heizung/ Kühlung	70	5	100/300

# Multiplication des ATEs aux Pays-Bas

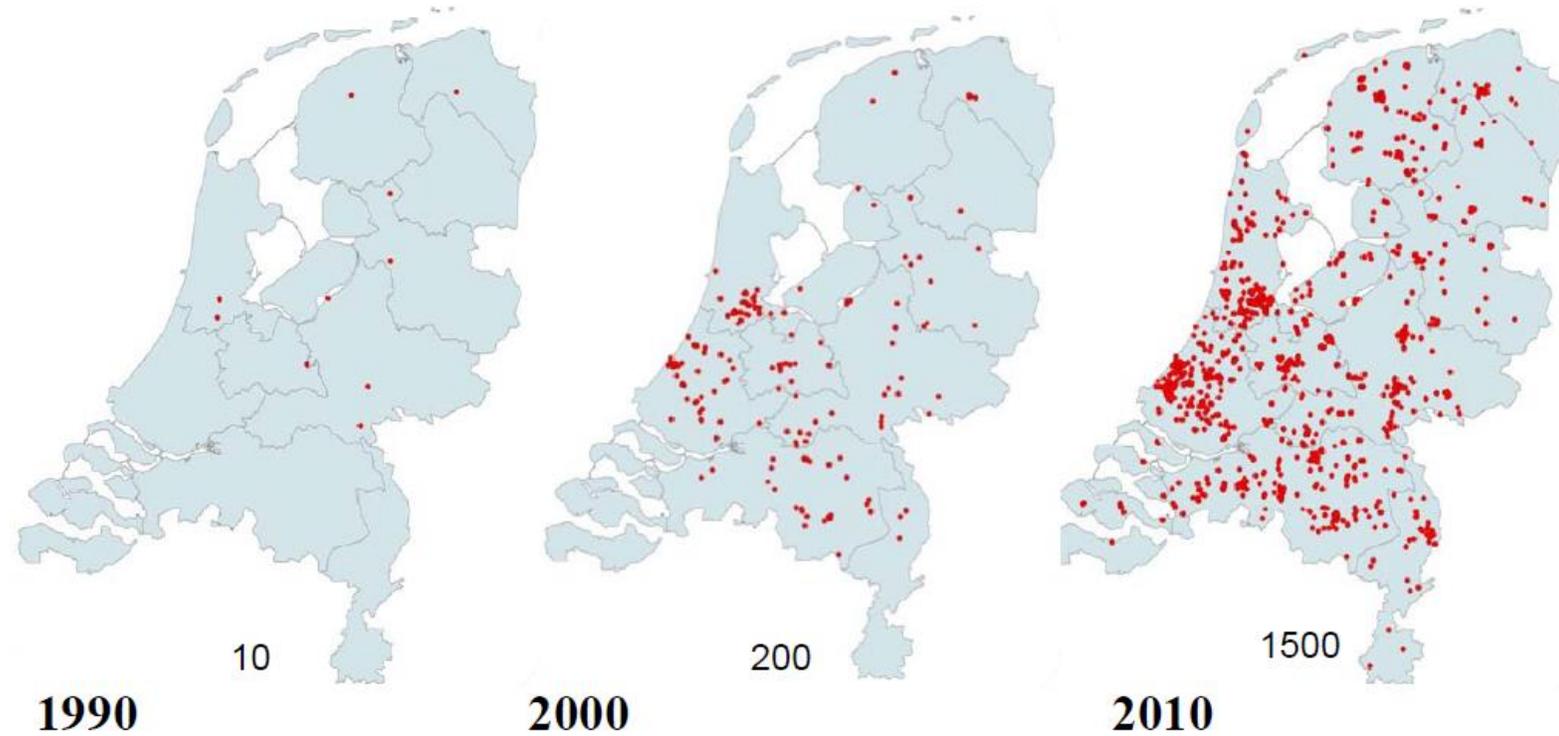


Fig.3. Map over the Netherlands showing the number of installed ATEs in operation in 1990 (10), 2000 (200), in the year 2010 (1500). IF Technology estimates that the number of installed ATEs system in the Netherlands will continue to grow until 2020. (Bakema, 2010)

Exemples d'application

# Densité des exploitations dans le centre d'Amsterdam

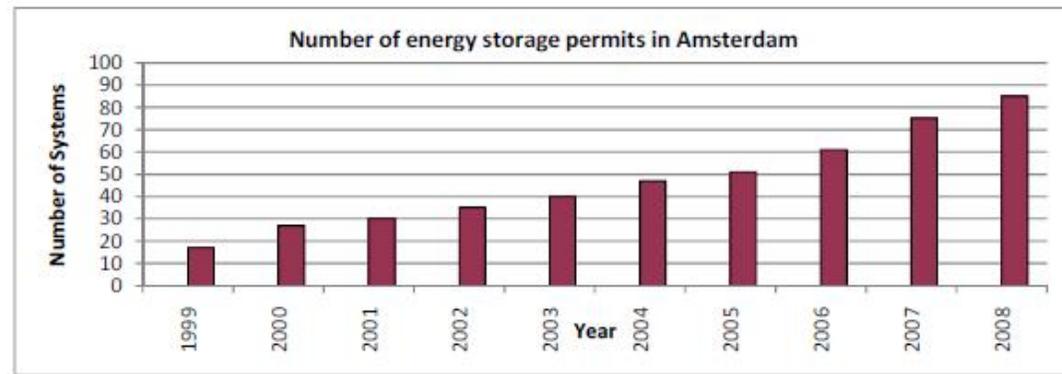


Figure 5: Number of permits issued by the province from 1999 until the end of 2008.



Figure 6: ATEs systems with a permit in Amsterdam, from data of the province of North Holland. The systems that have a stripe in the circle are not in use any more.

# Gestion des interférences entre plusieurs exploitations

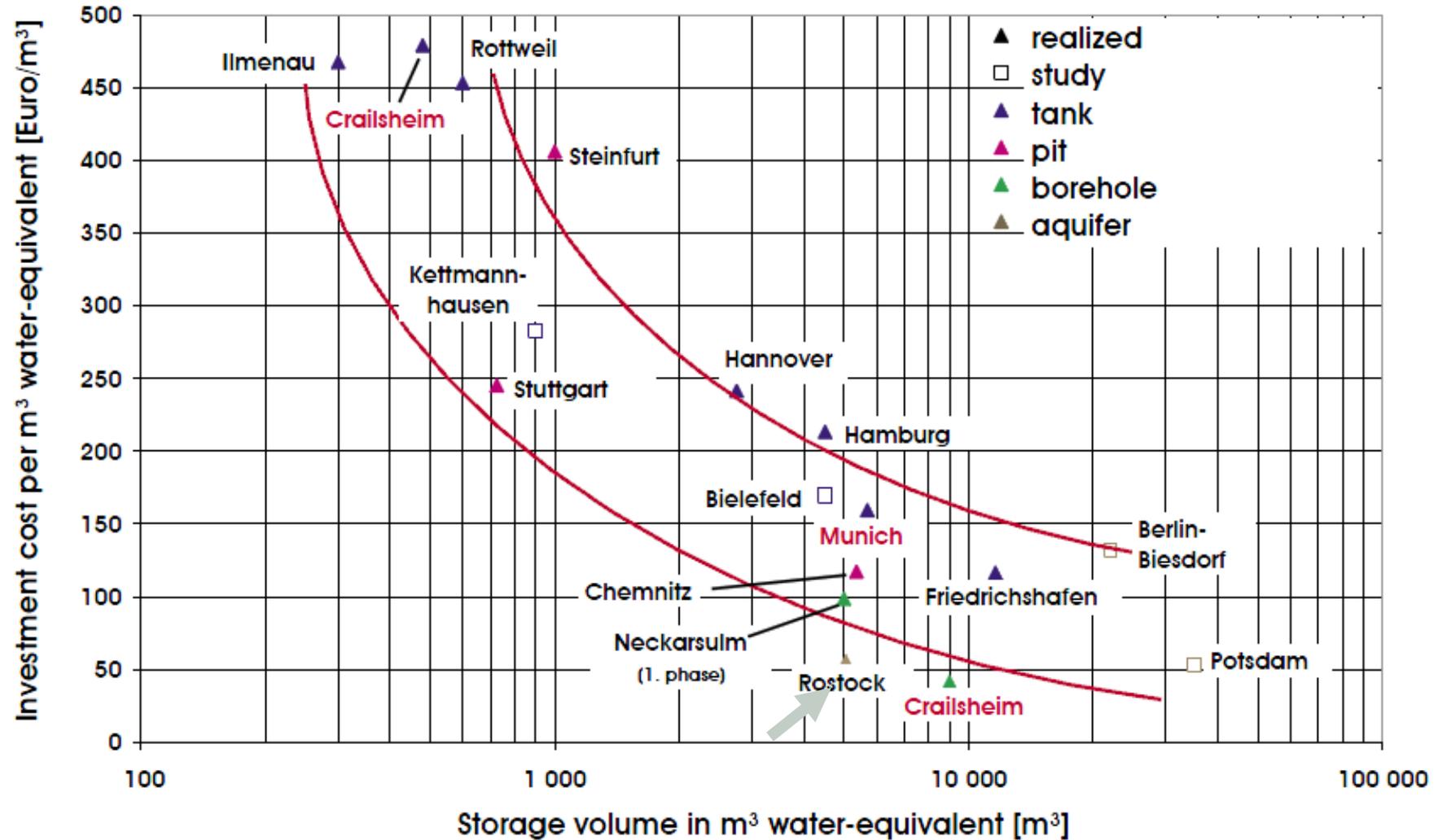


Direction  
d'écoulement  
des eaux  
souterraines

An example of placing the warm and cold wells parallel to the southwestern groundwater flow at the Zuidas in Amsterdam (IF Technology).

# Rentabilité

Costs of Seasonal Stores (with planning, without VAT)





Deux ou trois exemples d'application  
situés en Allemagne

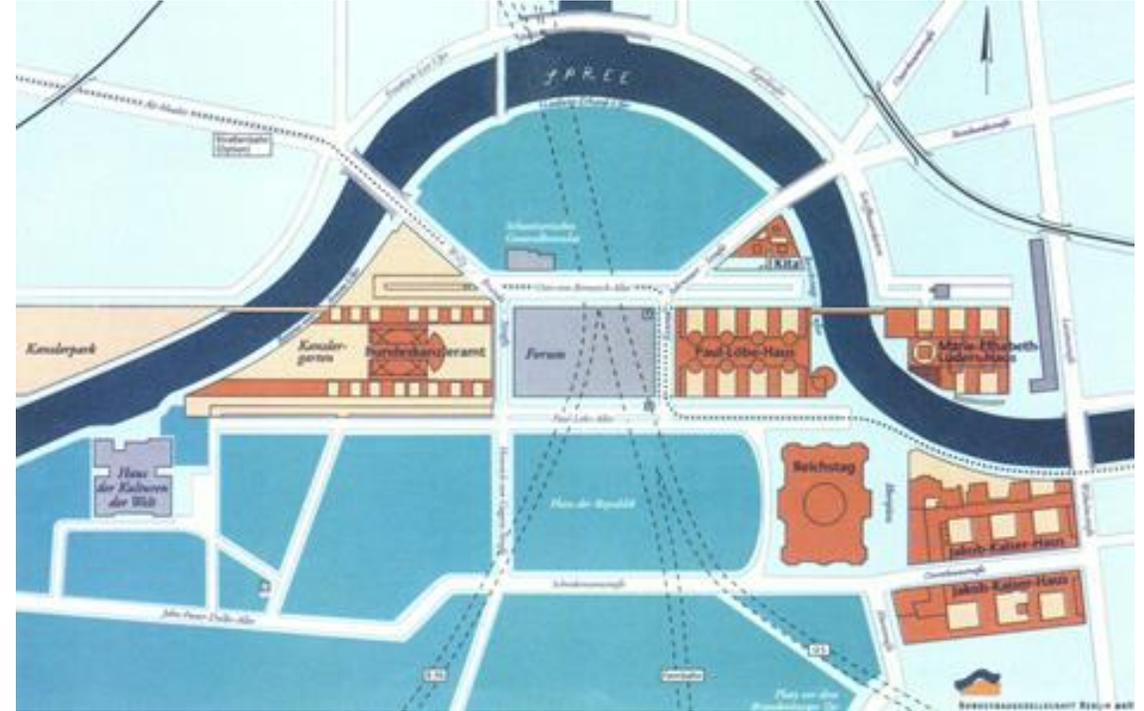
# Caractéristiques

	2	1		3
Site	<b>Rostock- Brinckmanshöhe</b>	<b>Buildings of the German Parliament in Berlin</b>		<b>Neubrandenburg</b>
Geological Formation	Quaternary	Hettangian	Quaternary	Upper Postera
Depth	13m-27m	285m-315m	30m-60m	1234m-1274m
Porosity	~20%	30%	~30%	25%
Permeability	8 $\mu\text{m}^2$	2.8 – 4.2 $\mu\text{m}^2$	>1 $\mu\text{m}^2$	>1 $\mu\text{m}^2$
Mineralisation	Freshwater	29 g/L	Freshwater	133 g/L
Store temperature (initial)	10°C	19°C	10°C	54°C

# Caractéristiques

Site	Rostock- Brinckmanshöhe	Buildings of the German Parliament, Berlin		Neubrandenburg
commissioning	2000	1999	1999	2003
heat source	solar energy	waste heat arising from a biodiesel-driven cogeneration plant	ambient cold	waste heat arising from a gas and steam cogeneration plant
aquifer store:	heat store	heat store	cold and heat store	heat store
- shaping	doublet	doublet	2*5 wells	doublet
- max. flowrate	15 m <sup>3</sup> /h	100 m <sup>3</sup> /h	300 m <sup>3</sup> /h	100 m <sup>3</sup> /h
- charging temperature	50°C	70°C	5°C	80°C
consumer systems:				
- connected load	0.25 MW	12.5 MW	7.0 MW (cold)	12 MW
- energy demand	495 MWh/a	16,000 MWh/a	5,000 MWh/a	18,000 MWh/a
- network temperatures	65°C (SHW)/ 50°C (heating)/.30°C	45°C/ 30°C	14 °C/ 19 °C	80°C/ 45°C
energy balance (design):				
- energy charge	234 MWh/a	2,650 MWh/a	4,250 MWh/a (cold)	12,000 MWh/a
- energy discharge	148 MWh/a	2,050 MWh/a	3,950 MWh/a (cooling)	8,600 MWh/a
- coefficient of recovery	63%	77%	93%	72%
- percentage of the stored energy in the coverage of the demand	30%	13%	55% (without re- cooling )	48%

# 1. Bâtiments du parlement allemand à Berlin

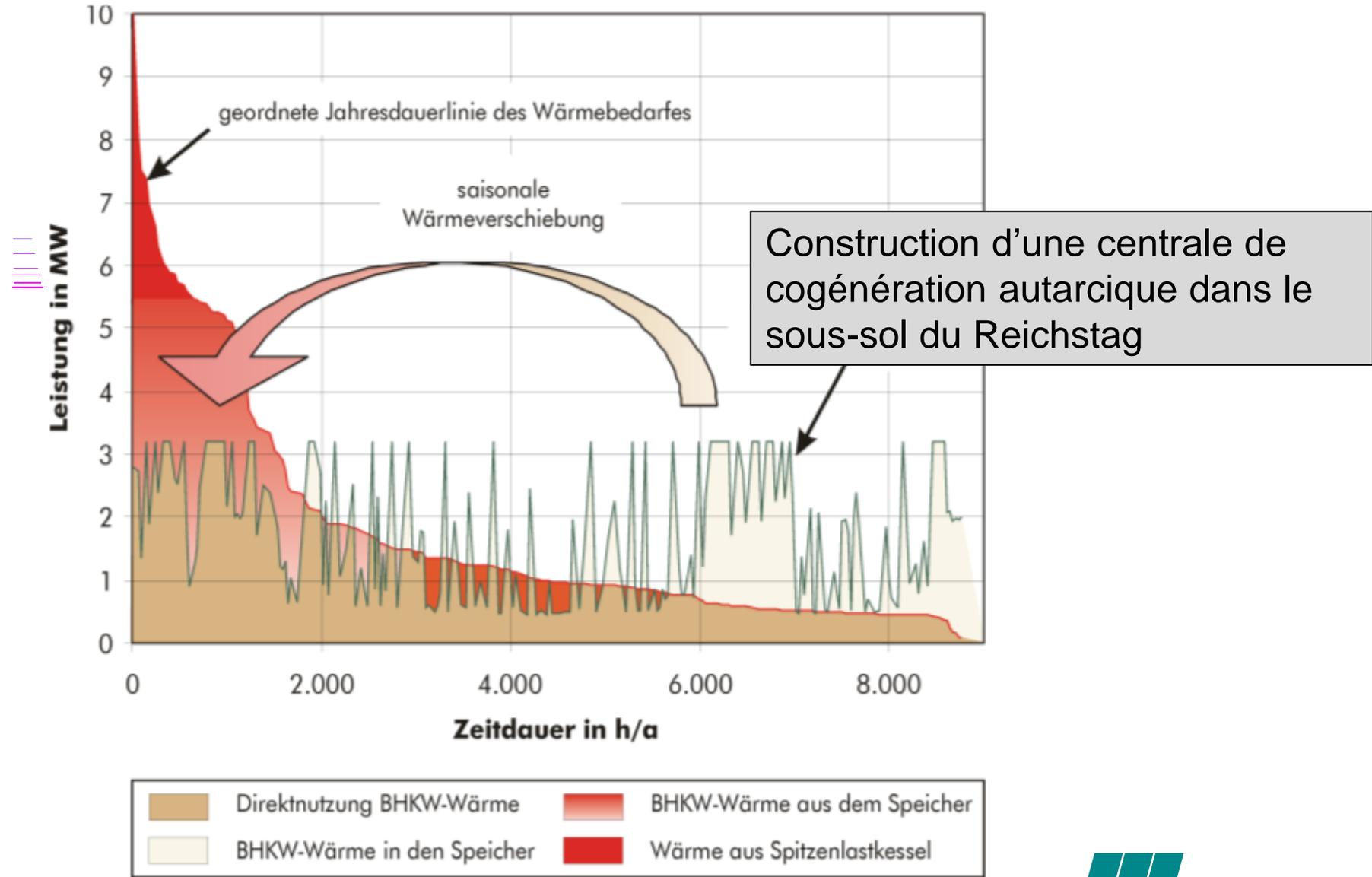


# Crise constitutionnelle russe de 1993



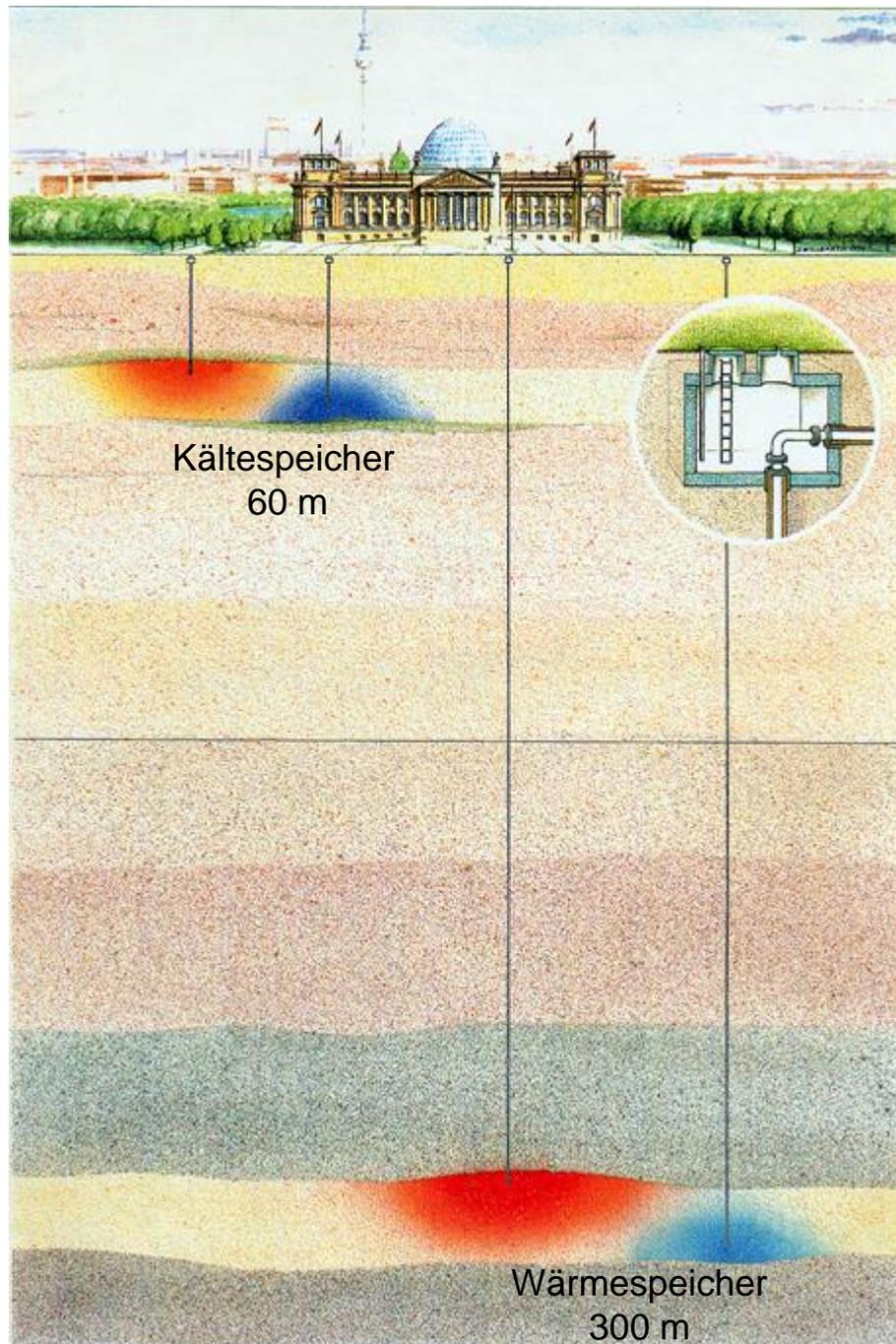
- + Oppose le président Boris Eltsine au parlement
- + Le 24 septembre, le maire de Moscou, loyal à Boris Eltsine, ordonne de couper l'électricité et l'eau chaude de la Maison blanche (bâtiment du parlement).
- + Quel rapport avec le Reichstag?

# Energieverbund der Parlamentsbauten im Berliner Spreebogen



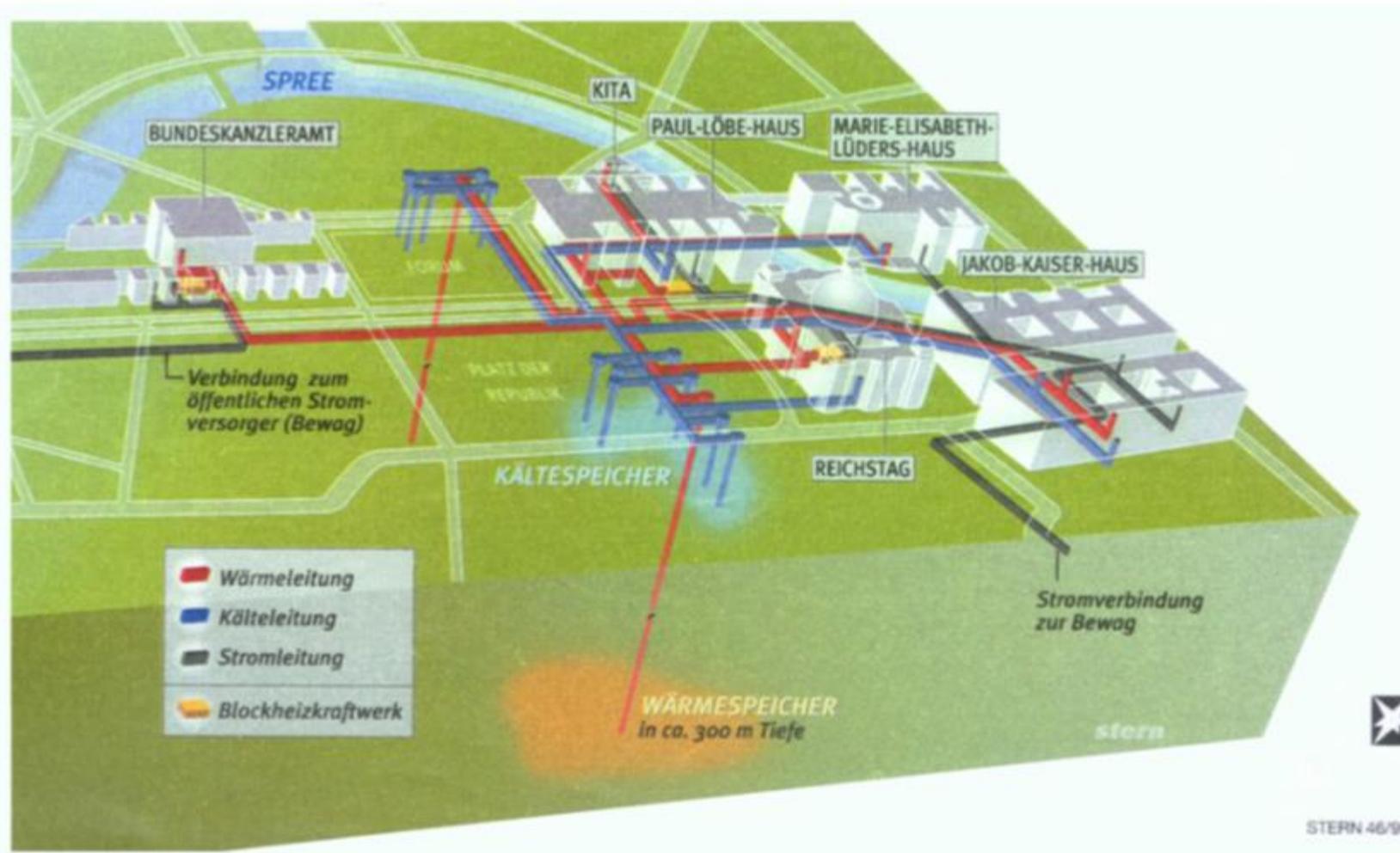
Energetischer Vorteil des Wärmespeichers

## Energieverbund der Parlamentsbauten im Berliner Spreebogen

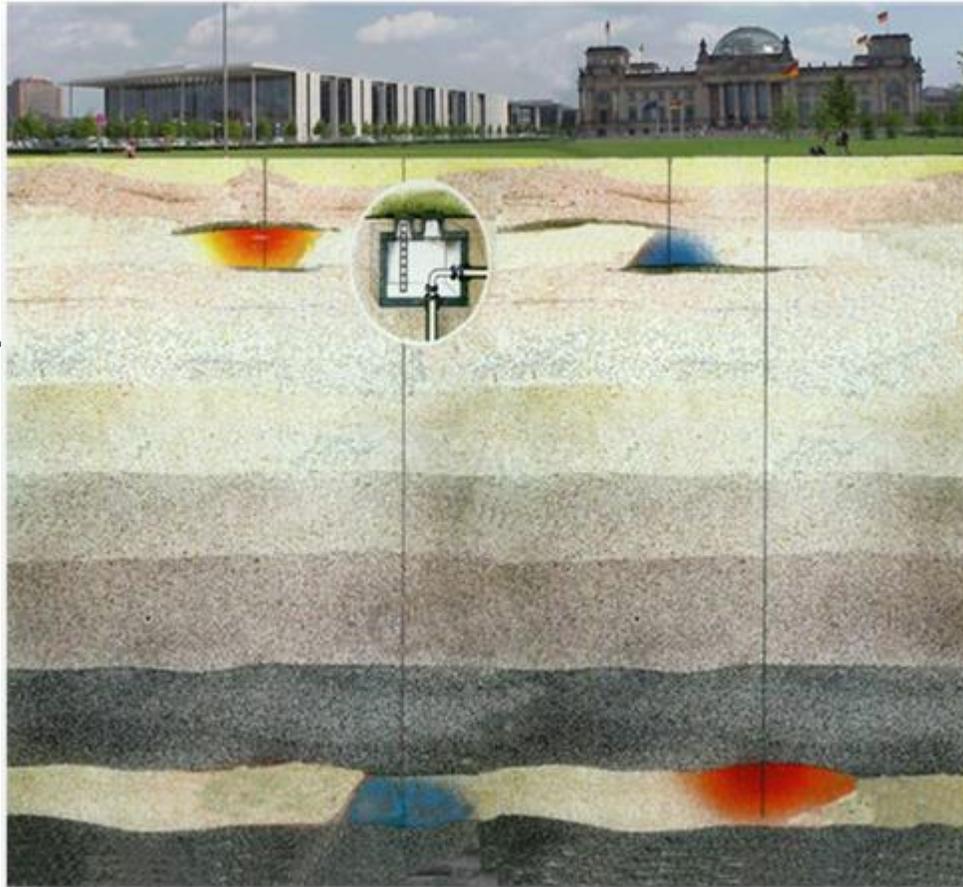


Abteufung der Bohrung  
Am Reichstag 1/86

# Energieverbund der Parlamentsbauten im Berliner Spreebogen



# Energieverbund der Parlamentsbauten im Berliner Spreebogen



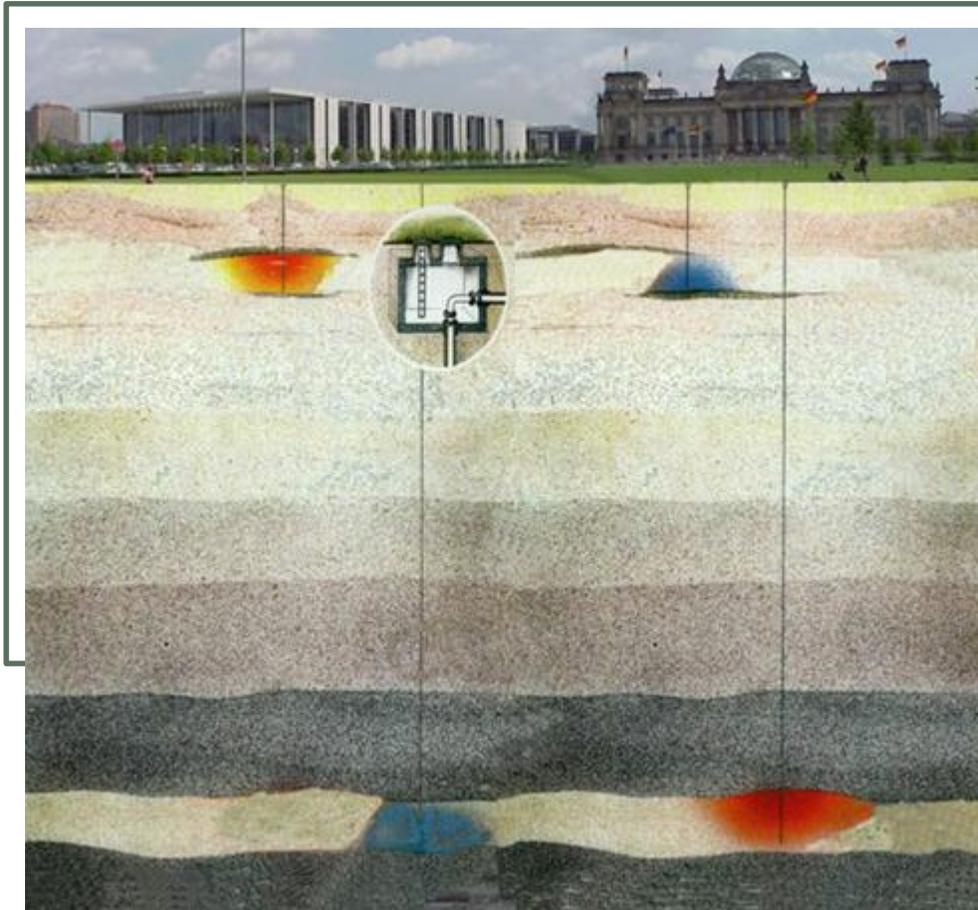
Flacher Speicher – Kälte

Tiefer Speicher - Wärme

Speicher	Poröse Sandsteine
Stratigraphie	Hettang
Mächtigkeit	17 m
Tiefe	270 m TVD
Temperatur	20 °C
Porosität	30 %
Permeabilität	$0.4 D \approx 4e-6 \text{ m/s}$

Aquifer-Wärmespeicher

# Energieverbund der Parlamentsbauten im Berliner Spreebogen



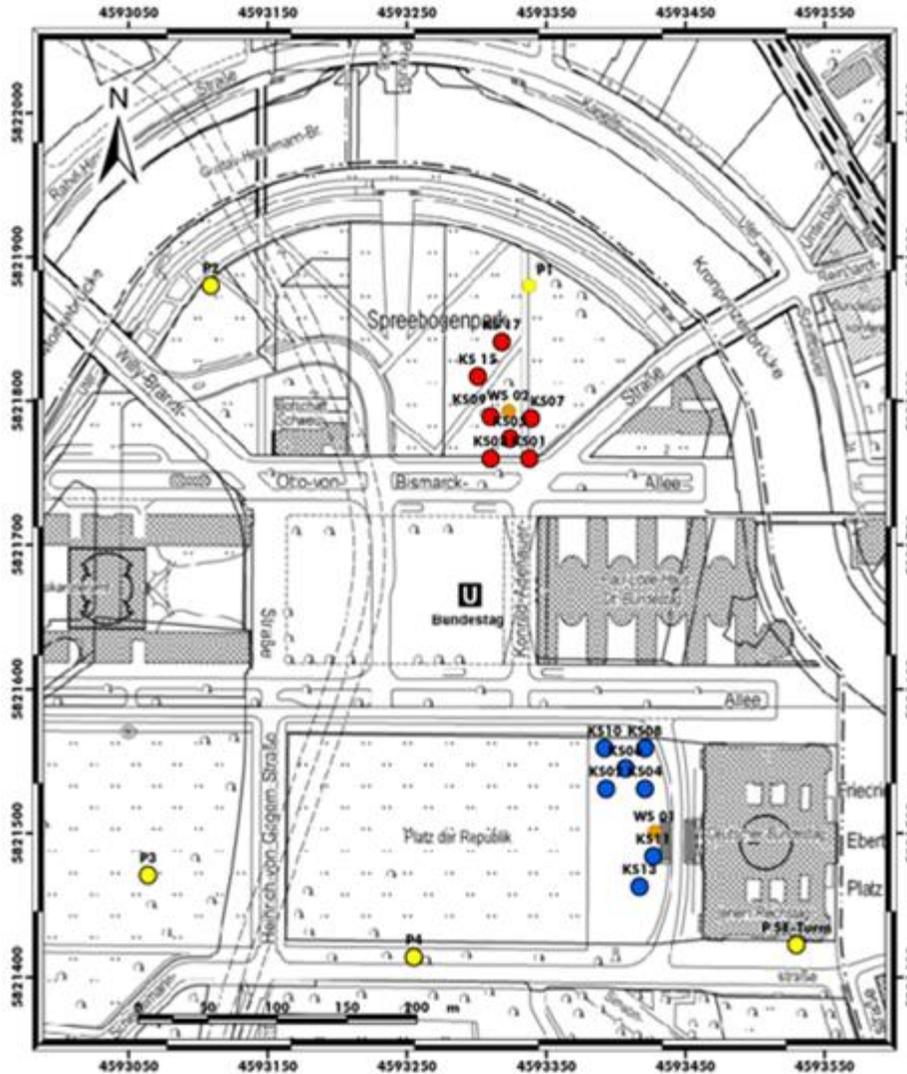
## Flacher Speicher – Kälte

Tiefe:	30-50 m TVD
Bohrungen:	2 x 7
Volumenstrom:	300 m <sup>3</sup> /h
Kältequelle:	Umgebungskälte
Speichertemp.:	7-8 °C
Ausspeichertemp.:	8-11 °C

## Tiefer Speicher – Wärme

Aquifer-Kältespeicher

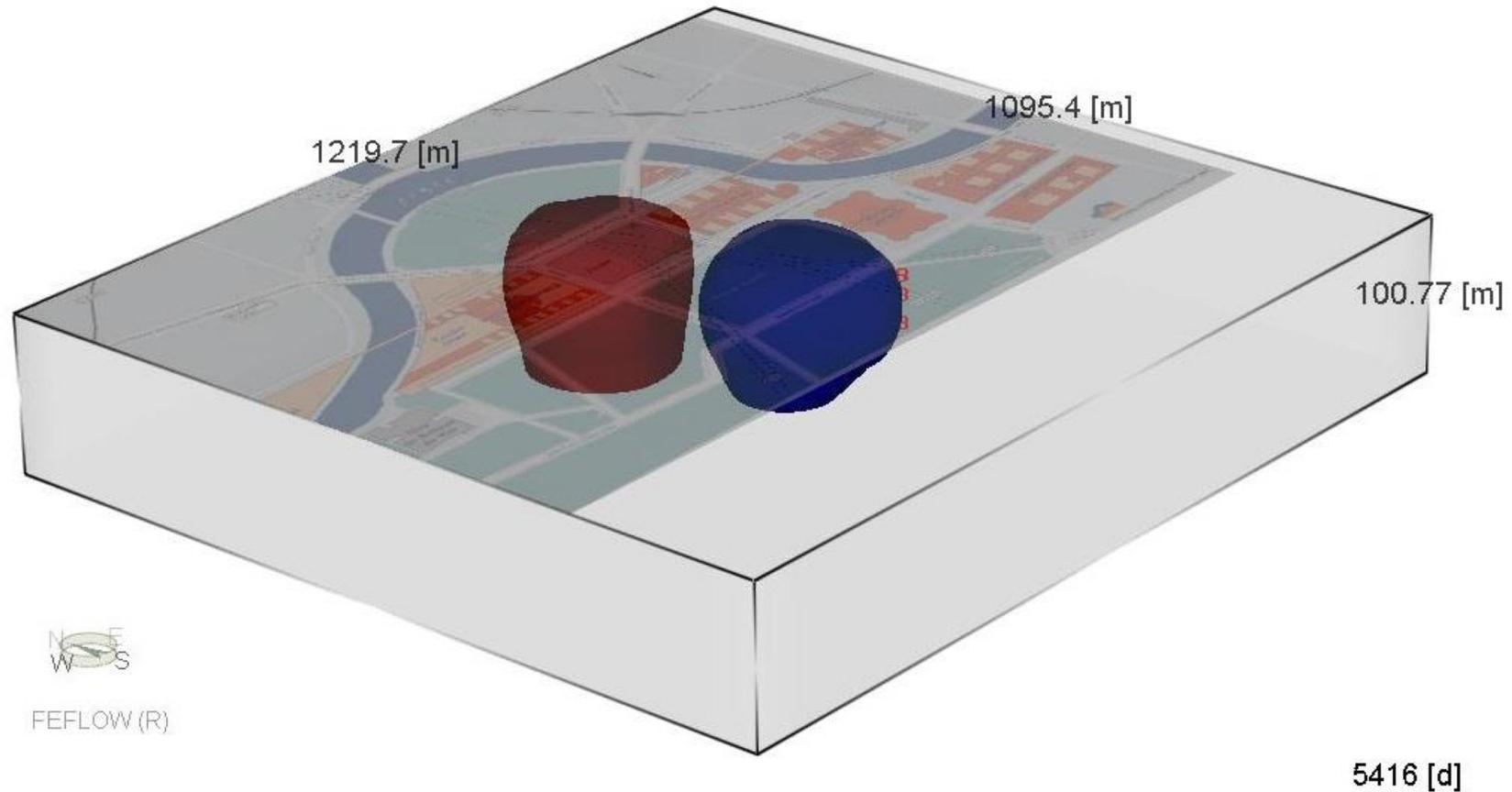
# Energieverbund der Parlamentsbauten im Berliner Spreebogen



Speicher	Fein-Mittelsand
Stratigraphie	Quartär
Mächtigkeit	20 m
Tiefe	30-50 m TVD
Temperatur	11 °C
Porosität	38 %
Permeabilität	80 D $\approx$ 8e-4 m/s

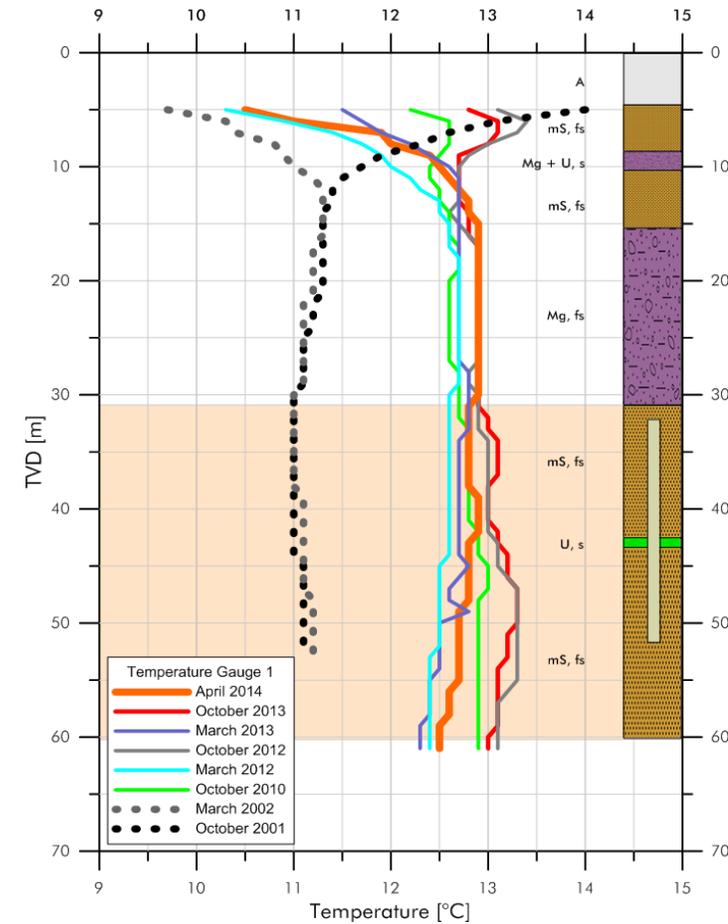
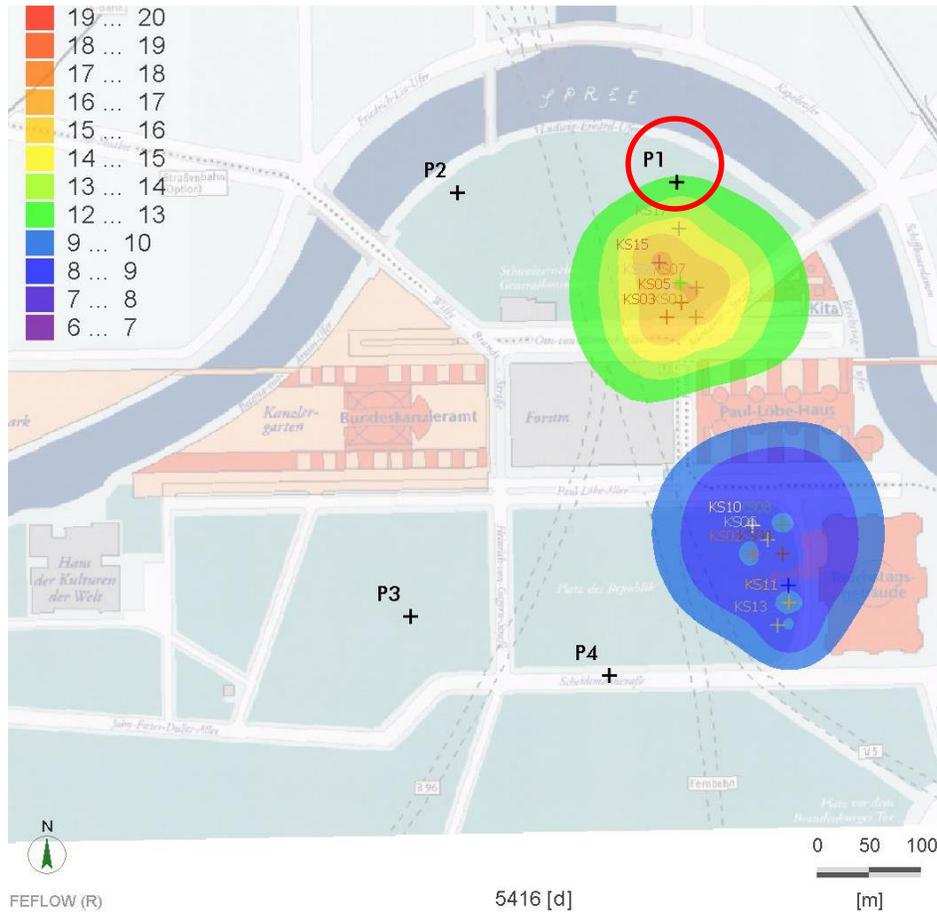
Speicherhorizont

# Energieverbund der Parlamentsbauten im Berliner Spreebogen



Aquifer-Kältespeicher - Thermische Beeinflussung des Untergrunds

# Energieverbund der Parlamentsbauten im Berliner Spreebogen

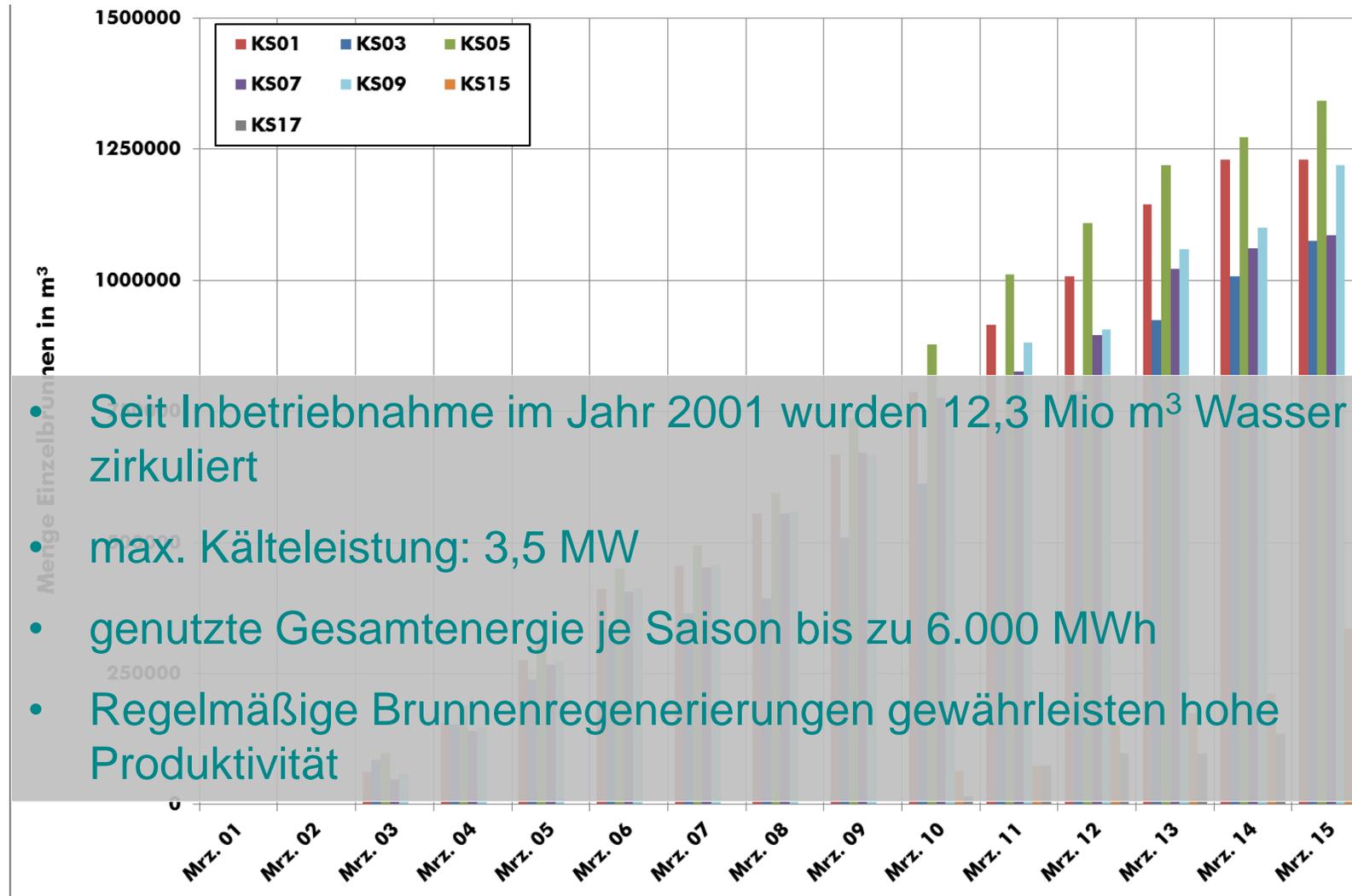


Ausdehnung des thermisch beeinflussten Grundwassers nach der Kälteeinspeicherung  
Ende März 2014

Temperaturprofil an GWMS P1

Aquifer-Kältespeicher - Temperaturmonitoring

# Energieverbund der Parlamentsbauten im Berliner Spreebogen



- Seit Inbetriebnahme im Jahr 2001 wurden 12,3 Mio m<sup>3</sup> Wasser zirkuliert
- max. Kälteleistung: 3,5 MW
- genutzte Gesamtenergie je Saison bis zu 6.000 MWh
- Regelmäßige Brunnenregenerierungen gewährleisten hohe Produktivität

Aquifer-Kältespeicher – Ausspeichermengen Nordfeld



WIRO – Wohnen in Rostock Wohnungsgesellschaft mbH

108 Wohnungen

1'000 m<sup>2</sup> Kollektorfläche  
(solar roof)

## 2. Beispiel

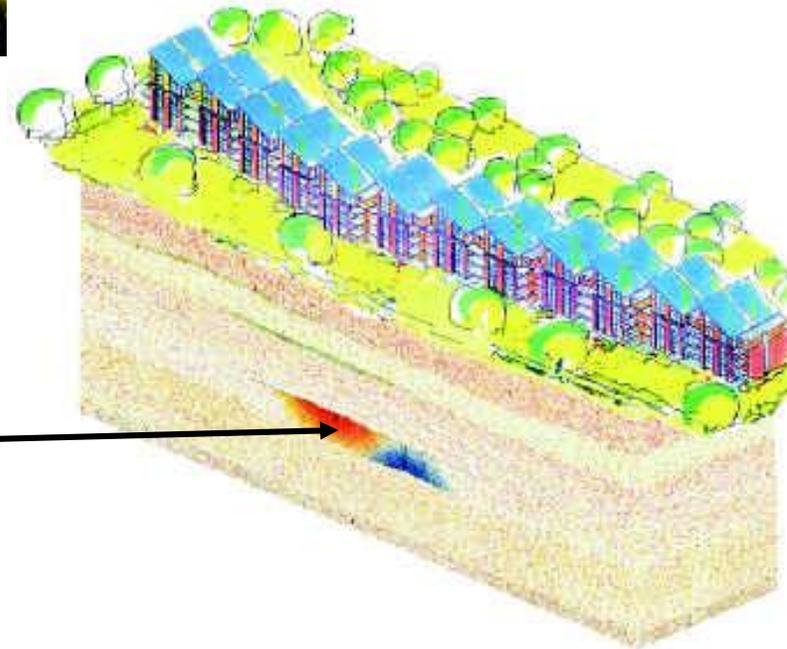
### saisonaler Aquiferspeicher „Helios Rostock“

Speicher: 15 ... 25 u. G.

Überdeckung Mergellehm

2 Bohrungen im Abstand 55m

Max. Förderung und Injektion  
15 m<sup>3</sup>/h



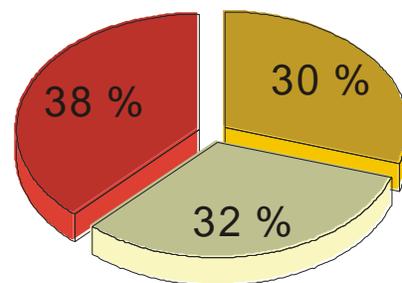
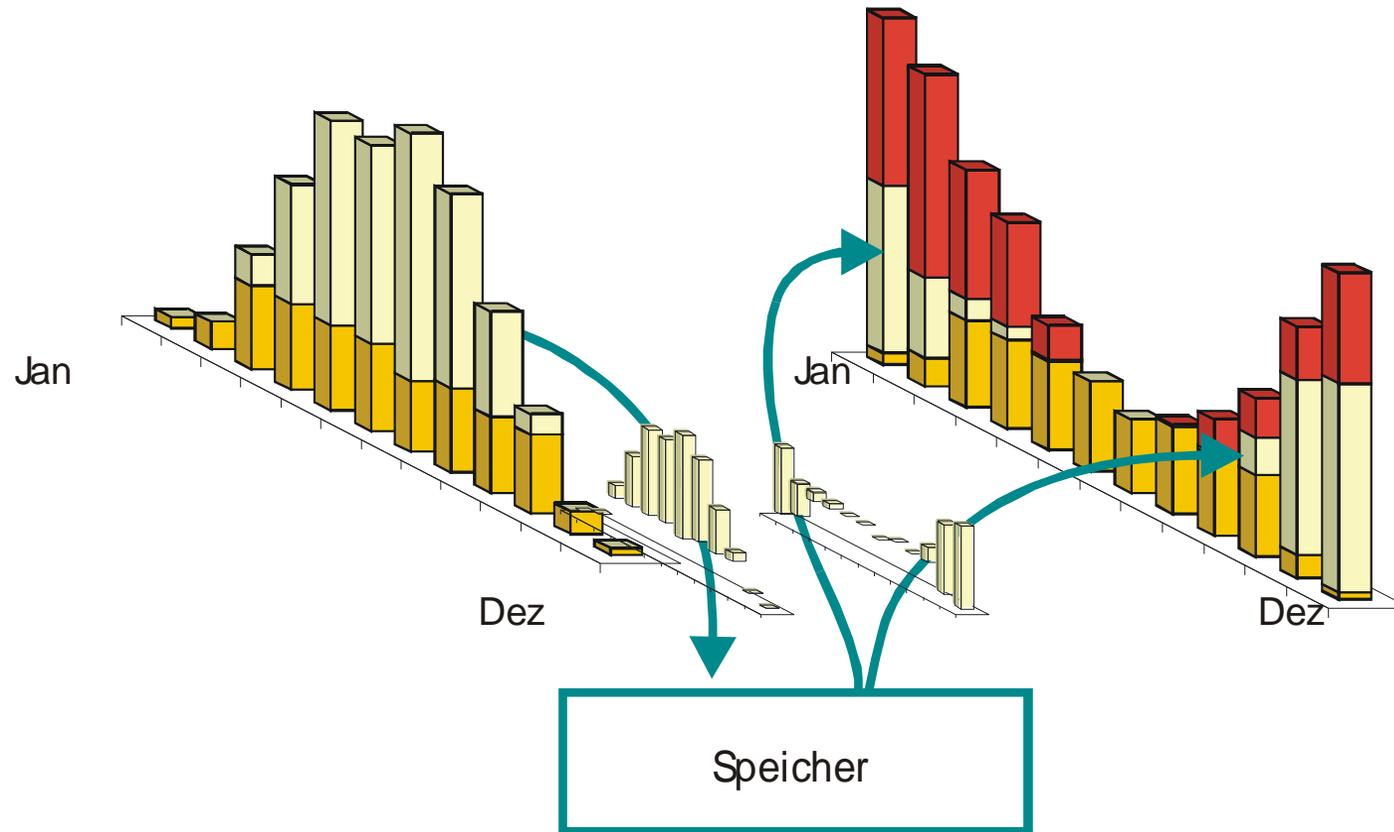
Kollektordächer in der Bauphase



Außenansicht des Kellers  
der warmen Bohrung

# Solare Wärmeenerzeugung

# Wärmebedarf



- solare Wärme - direkt
- solare Wärme - Speicher
- konventionelle Zusatzheizung



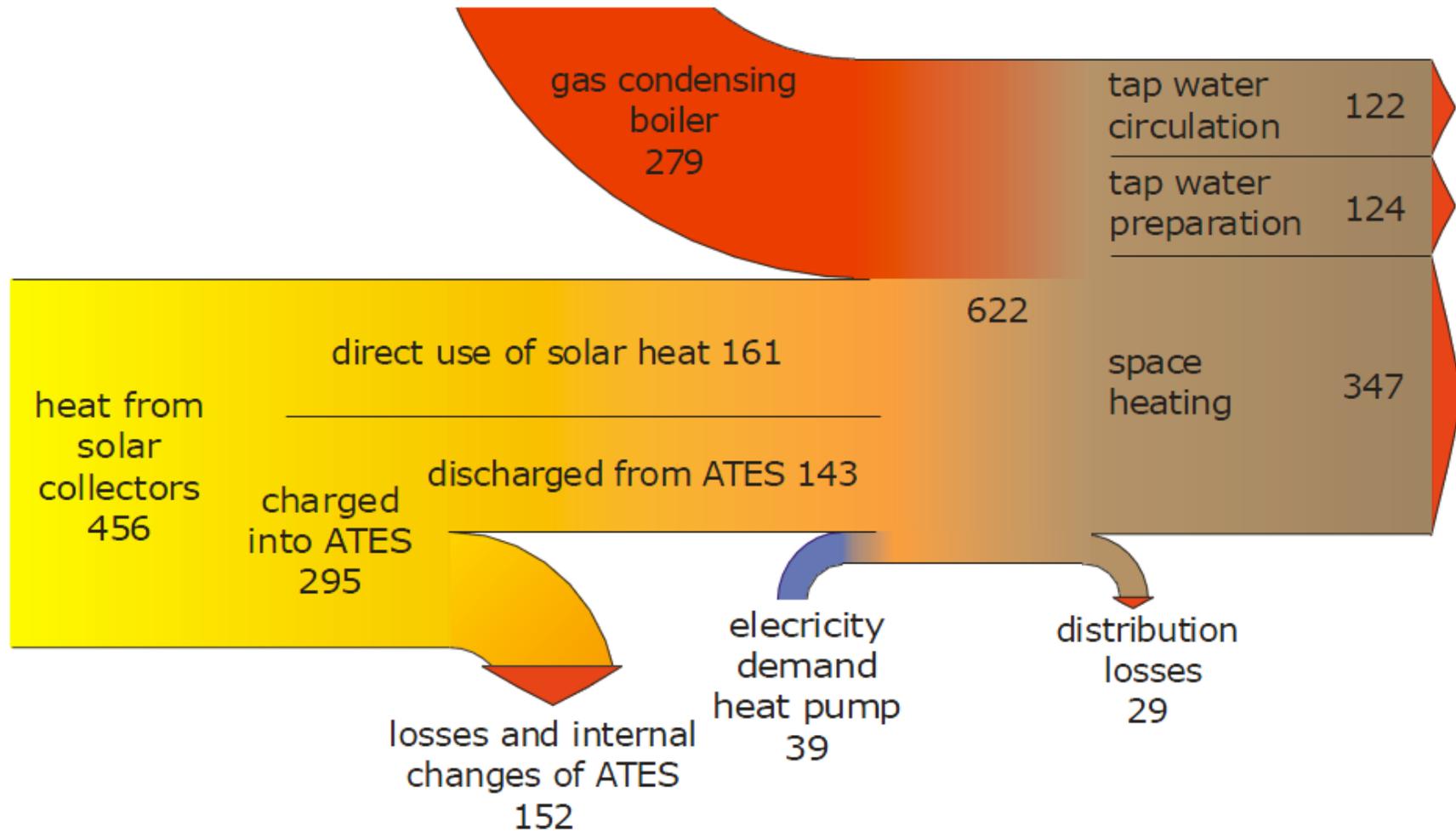


Figure 5: energy flow diagram for the year 2003, numerical values in MWh

Schmidt, Müller-Steinhagen, EuroSun 2004

# Wärmespeicher Neubrandenburg, obere Postera

Reservoirtemperatur	55°C
Speichertiefe	1'228 – 1'268 m
Speichertemperatur	80°C
Mineralisation	135 g/l
Volumenstrom	100 m <sup>3</sup> /h
Inbetriebnahme	2004
Rückfördertemperatur	78 ... 72°C (im 5. Jahr)

**3. Beispiel**

## ATES at Neubrandenburg



Geothermal heating plant and low-temperature network (12 MW, 80°C/45°C)



Gas and steam cogeneration plant (77 MW electrical, 90 MW thermal) and high-temperature network (200 MW, 130°C / 60°C)



District heat supply by the Neubrandenburg public utilities

## ATES at Neubrandenburg



“Cold” well head

## ATES at Neubrandenburg



Heat exchanger between district heat supply network and intermediate loop

