



ΕΘΝΙΚΟ ΜΕΤΣΟΒΙΟ ΠΟΛΥΤΕΧΝΕΙΟ  
ΣΧΟΛΗ ΜΗΧΑΝΟΛΟΓΩΝ ΜΗΧΑΝΙΚΩΝ  
ΤΟΜΕΑΣ ΘΕΡΜΟΤΗΤΑΣ

ΔΙΠΛΩΜΑΤΙΚΗ ΕΡΓΑΣΙΑ

Ανασκόπηση εποχιακής αποθήκευσης θερμικής  
ενέργειας

Συγγραφή:

ΣΠΥΡΙΔΟΥΛΑ ΓΑΛΑΝΗ

Επιβλέπων καθηγητής: Τζιβανίδης Χρήστος

ΑΘΗΝΑ (Φεβρουάριος 2021)

# Περιεχόμενα

<b>ΠΕΡΙΛΗΨΗ</b> .....	4
<b>ABSTRACT</b> .....	4
<b>ΚΕΦΑΛΑΙΟ 1<sup>ο</sup></b> .....	5
1.1 Εισαγωγή.....	5
1.2 Ταξινόμηση και χαρακτηριστικά των συστημάτων αποθήκευσης θερμότητας.....	6
1.3. Αποθήκευση αισθητής θερμότητας.....	9
1.3.1 Αποθήκευση σε δεξαμενή νερού.....	11
1.3.2 Υπόγεια αποθήκευση .....	13
1.4 Αποθήκευση λανθάνουσας θερμότητας.....	15
1.5 Χημική αποθήκευση θερμότητας.....	17
1.6 Απόδοση και κόστος των συστημάτων TES.....	19
<b>ΚΕΦΑΛΑΙΟ 2<sup>ο</sup></b> .....	22
2.1 Εποχιακή αποθήκευση θερμικής ενέργειας.....	22
2.2 Αρχές της εποχιακής αποθήκευσης θερμικής ενέργειας.....	24
2.3 Αποθήκευση θερμικής ενέργειας ταμιευτήρα (ATES) .....	27
2.4 Αποθήκευση θερμικής ενέργειας με γεώτρηση (BTES) .....	28
2.5 Αποθήκευση θερμικής ενέργειας σε δεξαμενή (TTES) .....	29
2.6 Αποθήκευση θερμικής ενέργειας σε λάκκο (PTES).....	32
2.7 Κατασκευή υπογείων συστημάτων TES θερμού ύδατος .....	33
2.7.1. Γεωμετρία.....	35
2.7.2 Μονωτικό κέλυφος υπογείων συστημάτων TES.....	37
<b>ΚΕΦΑΛΑΙΟ 3<sup>ο</sup></b> .....	42
3.1 Τρέχουσες τεχνολογίες και μελλοντική πρόβλεψη .....	42
3.2 Εξέλιξη και στατιστικά στοιχεία της εποχιακής αποθήκευσης θερμικής ενέργειας στην Ευρώπη.....	45
3.2.1 Ιστορική εξέλιξη.....	45
3.2.2 Αριθμοί, όγκοι και χωρική κατανομή.....	47
3.3 Τεχνολογική κατάσταση σήμερα .....	53
3.3.1 Υπόγειες και υπέργειες εγκαταστάσεις .....	53
3.3.2. Γεωμετρία και υλικά πλήρωσης.....	53
3.3.3 Δομικά στοιχεία συστημάτων .....	56
3.3.4. Θερμική μόνωση .....	58
3.3.5 Υλικά μόνωσης.....	60
3.3.6 Στεγανοποίηση - Υλικά στεγανοποίησης.....	63
3.3.7 Διάχυση ατμών.....	65

3.4 Γενιές τεχνολογιών αποθήκευσης και υπόλοιπα ζητήματα.....	65
<b>ΚΕΦΑΛΑΙΟ 4°</b> .....	68
4.1 Συμπεράσματα.....	68
<b>ΒΙΒΛΙΟΓΡΑΦΙΑ</b> .....	70

## ΠΕΡΙΛΗΨΗ

Σκοπός της παρούσας διπλωματικής εργασίας είναι η βιβλιογραφική ανασκόπηση της τεχνολογίας της «εποχιακής αποθήκευσης θερμότητας». Αρχικά στο πρώτο κεφάλαιο αναπτύσσεται η έννοια της θερμικής αποθήκευσης ενέργειας γενικά και επεξηγούνται οι διάφορες υπάρχουσες τεχνολογίες και τρόποι με τους οποίους αυτή μπορεί να επιτευχθεί. Επίσης γίνεται αναφορά στους θεμελιώδεις ορισμούς και στοιχεία τα οποία αφορούν την αποθήκευση ενέργειας. Ακολούθως στο δεύτερο κεφάλαιο αναλύεται ο ορισμός της «εποχιακής» αποθήκευσης θερμικής ενέργειας και οι επιμέρους τεχνολογίες που την απαρτίζουν. Επεξηγούνται αναλυτικά όλοι οι διαφορετικοί τύποι τεχνολογιών που υπάρχουν σήμερα και αναφέρονται τα πλεονεκτήματα και μειονεκτήματα του κάθε τύπου. Στην συνέχεια στο επόμενο κεφάλαιο γίνεται ιστορική αναδρομή των συστημάτων εποχιακής αποθήκευσης θερμικής ενέργειας και επίσης επεξηγείται η τεχνολογική κατάσταση που επικρατεί σήμερα. Ιδιαίτερη αναφορά γίνεται στα υπάρχοντα έργα εποχιακής αποθήκευσης σε όλο τον κόσμο όπου έχει εφαρμοστεί η ανωτέρω τεχνολογία. Τέλος στο τελευταίο κεφάλαιο αναφέρονται τα συμπεράσματα της παρούσας εργασίας.

## ABSTRACT

*The purpose of this dissertation is the bibliographic review of the technology of "seasonal thermal energy storage". Initially, in the first chapter the the concept of thermal energy storage in general is developed and the various existing technologies are explained. Reference is also made to the fundamental definitions and elements relating to energy storage. The second chapter analyzes the definition of "seasonal" thermal energy storage and the individual technologies that make it up. All the different types of technologies that exist today are explained in detail and the advantages and disadvantages of each type are mentioned. The next chapter provides a historical overview of seasonal thermal energy storage systems and also explains the technological situation that prevails today. Particular reference is made to existing seasonal storage projects around the world where the above technology has been applied. Finally, the last chapter presents the conclusions of this dissertasion.*

# ΚΕΦΑΛΑΙΟ 1<sup>ο</sup>

## 1.1 Εισαγωγή

Πρόσφατες έρευνες δείχνουν ότι η πρωτογενής κατανάλωση ενέργειας παγκόσμια θα αυξηθεί κατά 48% μέχρι το 2040 [1]. Επίσης, η σταδιακή εξάντληση των ορυκτών πόρων συνδυαστικά με τις αρνητικές επιπτώσεις τους στο περιβάλλον έχει επιταχύνει τη μετάβαση προς άλλου είδους βιώσιμες πηγές ενέργειας. Οι ανανεώσιμες πηγές ενέργειας όπως η ηλιακή ακτινοβολία, τα κύματα των ωκεανών, ο άνεμος και το βιοαέριο έχουν διαδραματίσει σημαντικό ρόλο στον μετασχηματισμό της φυσικής ισορροπίας και στην κάλυψη των αναγκών της αυξανόμενης ζήτησης του παγκόσμιου πληθυσμού [2]. Λόγω των κλιματολογικών ιδιομορφιών, τα μέσα αποθήκευσης αυτών των τύπων ανανεώσιμων πηγών ενέργειας έχουν καταστεί πρώτιστης σημασίας [3]. Έτσι αυτό το γεγονός έχει οδηγήσει στην ανάγκη ανάπτυξης αποτελεσματικών και βιώσιμων μεθόδων αποθήκευσης ενέργειας.

Η αποθήκευση ενέργειας αποτελεί ένα απαραίτητο μέρος των συστημάτων τεχνολογίας ανανεώσιμων πηγών ενέργειας. Η αποθήκευση θερμικής ενέργειας (Thermal energy storage TES) είναι μια τεχνολογία που αποθηκεύει θερμική ενέργεια με θέρμανση ή ψύξη ενός μέσου αποθήκευσης, έτσι ώστε η αποθηκευμένη ενέργεια να μπορεί να χρησιμοποιηθεί αργότερα για εφαρμογές θέρμανσης και ψύξης [4] και για παραγωγή ενέργειας. Τα συστήματα TES χρησιμοποιούνται ιδιαίτερα σε κτίρια και σε βιομηχανικές διαδικασίες. Τα πλεονεκτήματα της χρήσης του TES σε ένα ενεργειακό σύστημα περιλαμβάνουν, αύξηση της συνολικής απόδοσης και καλύτερη αξιοπιστία και μπορεί να οδηγήσει σε καλύτερη οικονομία, μειώσεις του κόστους επένδυσης και λειτουργίας και λιγότερη ρύπανση του περιβάλλοντος, δηλαδή λιγότερες εκπομπές διοξειδίου του άνθρακα (CO<sub>2</sub>) [5].

Τα ηλιακά θερμικά συστήματα αποθήκευσης, σε αντίθεση με τα φωτοβολταϊκά συστήματα, είναι βιομηχανικά ώριμα και χρησιμοποιούν μεγάλο μέρος της θερμικής ενέργειας του ήλιου κατά τη διάρκεια της ημέρας. Ωστόσο, δεν μπορούν να συνεχίσουν να λειτουργούν κατά τις ώρες χαμηλής ή και καθόλου ηλιακής ακτινοβολίας. Τα συστήματα TES αποκτούν ιδιαίτερη σημασία για την αποθήκευση ηλεκτρικής ενέργειας σε συνδυασμό με μονάδες συγκέντρωσης ηλιακής ενέργειας (concentrating solar power - CSP) όπου η ηλιακή θερμότητα μπορεί να αποθηκευτεί για παραγωγή ηλεκτρικής ενέργειας όταν δεν υπάρχει διαθέσιμο ηλιακό φως. Τα νέα υλικά επιλέγονται, χαρακτηρίζονται και ενισχύονται στις θερμο-φυσικές τους ιδιότητες για να εξυπηρετήσουν το σκοπό μιας λειτουργίας 24 ωρών σε ένα αποτελεσματικό σύστημα TES.

Στην Ευρώπη, εκτιμάται ότι μπορούν να εξοικονομηθούν περίπου 1,4 εκατομμύρια GWh / έτος και να αποφευχθούν 400 εκατομμύρια τόνοι εκπομπών CO<sub>2</sub>, σε κτίρια και σε βιομηχανικούς τομείς με εκτενέστερη χρήση θερμότητας και ψυχρής αποθήκευσης [6].

Η πυκνότητα αποθήκευσης, από την άποψη της ποσότητας ενέργειας ανά μονάδα όγκου ή μάζας, είναι σημαντική για τη βελτιστοποίηση της ηλιακής αναλογίας (πόση ηλιακή ακτινοβολία είναι χρήσιμη για σκοπούς θέρμανσης / ψύξης), της αποδοτικότητας των συσκευών (ηλιακοί θερμικοί συλλέκτες και ψυκτικά απορροφητικά) και την κατανάλωση ενέργειας για την θέρμανσης / ψύξης χώρων.

## **1.2 Ταξινόμηση και χαρακτηριστικά των συστημάτων αποθήκευσης θερμότητας**

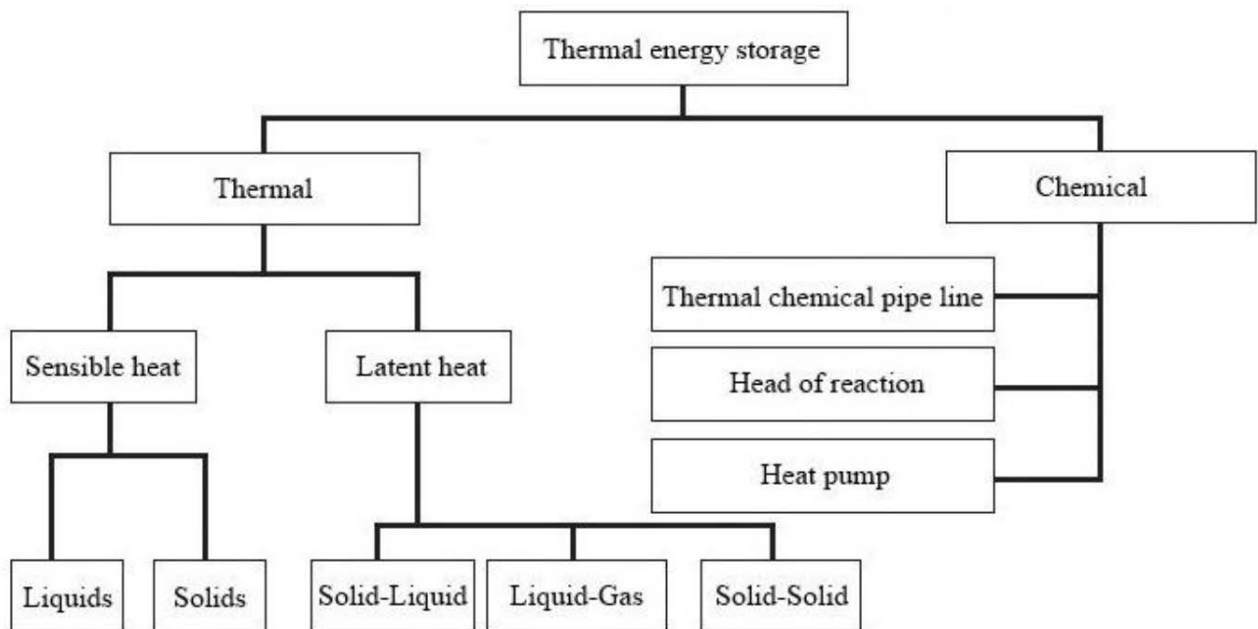
Λόγω της διαλείπουσας διαθεσιμότητας και της συνεχούς διακύμανσης της ηλιακής ακτινοβολίας, τα συστήματα TES βρήκαν τη θέση τους σε εφαρμογές θερμοδυναμικών συστημάτων. Τα TES όχι μόνο μειώνουν τη διαφορά μεταξύ της ζήτησης και της προσφοράς, εξοικονομώντας ενέργεια, αλλά επίσης βελτιώνουν την απόδοση και τη θερμική αξιοπιστία του συστήματος. Ως εκ τούτου, ο σχεδιασμός αποτελεσματικών και οικονομικών συστημάτων TES έχει μεγάλη σημασία. Ωστόσο, λίγα ηλιακά θερμικά εργοστάσια στον κόσμο έχουν χρησιμοποιήσει TES σε μεγάλη κλίμακα. Επιπλέον, διερευνάται ο σχεδιασμός συστημάτων TES σε διάφορες οικιακές ηλιακές εφαρμογές [7].

Οι κύριοι τύποι αποθήκευσης θερμικής ενέργειας ηλιακής ενέργειας παρουσιάζονται στην εικόνα 1.1. Ένα σύστημα αποθήκευσης ενέργειας μπορεί να περιγραφεί με βάση τα ακόλουθα χαρακτηριστικά [6]:

- Την χωρητικότητα η οποία καθορίζει την ενέργεια που αποθηκεύεται στο σύστημα και εξαρτάται από τη διαδικασία αποθήκευσης, το μέσο και το μέγεθος του συστήματος.
- Την ισχύ που καθορίζει το πόσο γρήγορα μπορεί να εκφορτιστεί η ενέργεια που αποθηκεύεται στο σύστημα (και να φορτιστεί).
- Την αποδοτικότητα που είναι ο λόγος της ενέργειας που παρέχεται στον χρήστη προς την ενέργεια που απαιτείται για τη φόρτιση του συστήματος αποθήκευσης. Υπολογίζει

την απώλεια ενέργειας κατά την περίοδο αποθήκευσης και τον κύκλο φόρτισης / εκφόρτισης.

- Η περίοδος αποθήκευσης καθορίζει το χρονικό διάστημα αποθήκευσης της ενέργειας και διαρκεί ώρες έως μήνες (δηλαδή ώρες, ημέρες, εβδομάδες και μήνες για εποχική αποθήκευση).
- Ο χρόνος φόρτισης και εκφόρτισης καθορίζει πόσος χρόνος απαιτείται για τη φόρτιση / εκφόρτιση του συστήματος. και
- Το κόστος αναφέρεται είτε σε χωρητικότητα (E/kWh) είτε σε ισχύ (E/ kW) του συστήματος αποθήκευσης και εξαρτάται από το κόστος κεφαλαίου και λειτουργίας του εξοπλισμού αποθήκευσης και τη διάρκεια ζωής του (δηλαδή, τον αριθμό κύκλων).



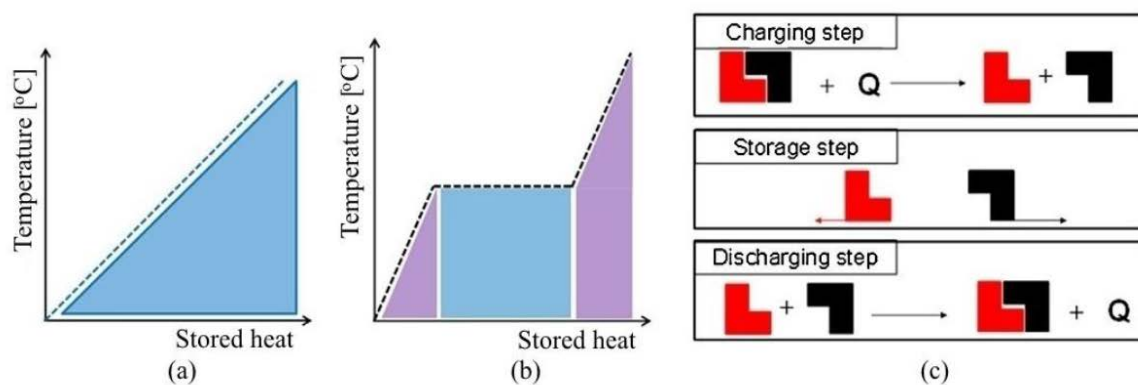
Εικόνα 1.1 Τύποι αποθήκευσης ηλιακής θερμικής ενέργειας (TES) [8]

Η χωρητικότητα, η ισχύς και ο χρόνος εκφόρτισης είναι αλληλεξαρτώμενες μεταβλητές. Τυπικές παράμετροι για συστήματα TES παρουσιάζονται στον Πίνακα 1 [8], συμπεριλαμβανομένης χωρητικότητας, ισχύος, αποδοτικότητας, περιόδου αποθήκευσης και κόστους. Η πυκνότητα αποθήκευσης υψηλής ενέργειας και η υψηλή ισχύς για φόρτιση και εκφόρτιση είναι επιθυμητές ιδιότητες οποιουδήποτε συστήματος αποθήκευσης. Είναι γνωστό ότι υπάρχουν τρεις μέθοδοι για TES σε θερμοκρασίες από  $-40^{\circ}\text{C}$  έως πάνω από  $400^{\circ}\text{C}$ :

αισθητή θερμότητα, λανθάνουσα θερμότητα που σχετίζεται με PCMs και θερμο-χημική αποθήκευση θερμότητας που σχετίζεται με χημικές αντιδράσεις Σχήμα 1.2 [9].

Πίνακας 1.1 Τυπικές παράμετροι των συστημάτων TES [8].

Σύστημα TES	Χωρητικότητα (kWh / t)	Ισχύς (MW)	Απόδοση (%)	Περίοδος αποθήκευσης	Κόστος (€/ kWh)
Sensible (hot water)	10–50	0.001- 10.0	50-90	days/months	0.1–10
Phase-change material (PCM)	50–150	0.001-1.0	75-90	hours/months	10–50
Chemical reactions	120–250	0.01-1.0	75-100	hours/days	8–100



Εικόνα 1.2 Μέθοδοι αποθήκευσης θερμικής ενέργειας: (α) αισθητή θερμότητα. (β) λανθάνουσα θερμότητα γ) θερμοχημικές αντιδράσεις [9].

Η επιλογή του μέσου αποθήκευσης εξαρτάται από τη φύση της διαδικασίας. Για θέρμανση νερού, η αποθήκευση ενέργειας ως αισθητή θερμότητα αποθηκευμένου ύδατος είναι λογική επιλογή. Εάν χρησιμοποιούνται συλλέκτες θέρμανσης αέρα, ενδείκνυται η αποθήκευση με φαινόμενη ή λανθάνουσα θερμότητα σε μονάδες αποθήκευσης σωματιδίων. Στην παθητική θέρμανση, η αποθήκευση γίνεται ως αισθητή θερμότητα στην κατασκευή των στοιχείων. Εάν χρησιμοποιούνται φωτοβολταϊκές ή φωτοχημικές διεργασίες, η θερμοχημική αποθήκευση είναι μια λογική επιλογή.



### 1.3. Αποθήκευση αισθητής θερμότητας

Η μέθοδος SHS – (Sensible heat storage) (Σχήμα 1.2α) είναι η απλούστερη μέθοδος που βασίζεται στην αποθήκευση θερμικής ενέργειας με θέρμανση ή ψύξη υγρού ή στερεού μέσου αποθήκευσης (π.χ. νερό, άμμο, άλατα ή πετρώματα), με το νερό να είναι η φθηνότερη επιλογή. Το πιο δημοφιλές και εμπορικό μέσο αποθήκευσης θερμότητας είναι το νερό, το οποίο έχει πολλές οικιακές και βιομηχανικές εφαρμογές. Η υπόγεια αποθήκευση αισθητής θερμότητας σε υγρά και στερεά μέσα χρησιμοποιείται επίσης για τυπικά εφαρμογές μεγάλης κλίμακας. Η SHS έχει δύο κύρια πλεονεκτήματα: είναι φθηνή μέθοδος και χωρίς τους κινδύνους που σχετίζονται με τη χρήση τοξικών υλικών.

Το σύστημα SHS χρησιμοποιεί τη θερμική ικανότητα και την αλλαγή της θερμοκρασίας του μέσου αποθήκευσης κατά τη διαδικασία φόρτισης και εκφόρτισης. Η ποσότητα θερμότητας που αποθηκεύεται εξαρτάται από τη συγκεκριμένη θερμότητα του μέσου, την αλλαγή θερμοκρασίας και την ποσότητα του υλικού αποθήκευσης [10] και υπολογίζεται ως εξής:

$$Q_s = \int_{t_i}^{t_f} mc_p dt = mc_p (t_f - t_i) \quad (1.1)$$

όπου  $Q_s$  είναι η ποσότητα θερμότητας που αποθηκεύεται, σε Joules.  $m$  είναι η μάζα του μέσου αποθήκευσης θερμότητας, σε kg.  $c_p$  είναι η ειδική θερμότητα, σε J / (kg \* K).  $t_i$  είναι η αρχική θερμοκρασία, σε C και  $t_f$  είναι η τελική θερμοκρασία, σε C.

Ο πίνακας 2 δείχνει τα υλικά που χρησιμοποιούνται περισσότερο σε εφαρμογές SHS και τις ιδιότητές τους [11]. Το νερό φαίνεται να είναι το καλύτερο διαθέσιμο υγρό επειδή είναι φθινό και έχει υψηλή ειδική θερμότητα. Ωστόσο, πάνω από 100 C, χρησιμοποιούνται λάδια, άλατα και υγρά μέταλλα. Για εφαρμογές θέρμανσης αέρα, χρησιμοποιούνται υλικά αποθήκευσης τύπου πετρωμάτων.

Ο Πίνακας 3 δείχνει τα κύρια χαρακτηριστικά των πιο συχνά χρησιμοποιούμενων υλικών θερμικής αποθήκευσης στερεάς κατάστασης [13], συμπεριλαμβανομένων των ορυκτών άμμου-βράχου, του σκυροδέματος, των πυρότουβλων και των σιδηροκραμάτων. Αυτά τα υλικά έχουν θερμοκρασίες λειτουργίας από 200 έως 1200 C και έχουν εξαιρετικές θερμικές αγωγιμότητες: 1,0 W / (m \* K) -7,0 W / (m \* K) για ορυκτά άμμου-βράχου, σκυρόδεμα και πυρότουβλα. 37,0 W / (m \* K) -40,0 W / (m \* K) για υλικά σιδηροκραμάτων. Τα υλικά που φαίνονται στον Πίνακα 3 είναι όλα χαμηλού κόστους, που κυμαίνονται από 0,05 έως 5,00 \$ / kg. Το μόνο

μειονέκτημα είναι ότι η θερμική τους ικανότητα είναι μάλλον χαμηλή, κυμαινόμενη από 0,56 έως 1,3 kJ / (kg \* C), γεγονός που μπορεί να κάνει τη μονάδα αποθήκευσης εξαιρετικά μεγάλη.

Πίνακας 1.2 Κατάλογος επιλεγμένων στερεών-υγρών υλικών για αποθήκευση αισθητής θερμότητας [11].

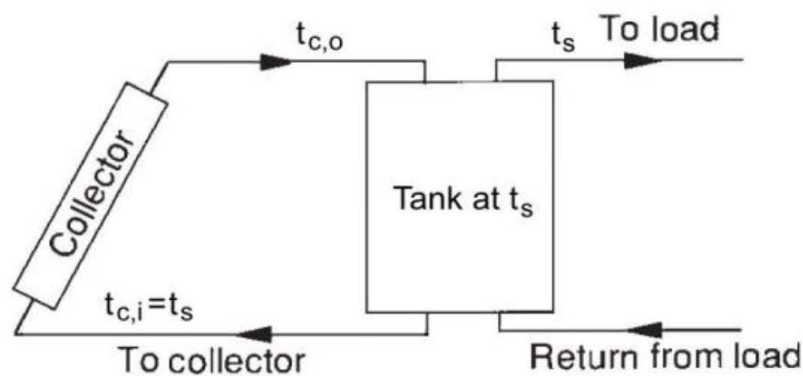
Μέσο	Τύπος υγρού	Εύρος θερμοκρασίας (C)	Πυκνότητα (kg / m <sup>3</sup> )	Ειδική θερμότητα (J / (kg K))
Sand	-	20	1555	800
Rock	-	20	2560	879
Brick	-	20	1600	840
Concrete	-	20	2240	880
Granite	-	20	2640	820
Aluminium	-	20	2707	896
Cast iron	-	20	7900	837
Water	-	0-100	1000	4190
Calorie HT43	Oil	12-260	867	2200
Engine oil	Oil	<160	888	1880
Ethanol	Organic Liquid	<78	790	2400
Propane	Organic Liquid	<97	800	2500
Butane	Organic Liquid	<118	809	2400
Isotunaol	Organic Liquid	<100	808	3000
Isopentanol	Organic Liquid	<148	831	2200
Octane	Organic Liquid	<126	704	2400

Πίνακας 1.3 Υλικά αποθήκευσης αισθητής θερμότητας σε στερεά κατάσταση [11]

Υλικά αποθήκευσης	Θερμοκρασία λειτουργίας (C)	Πυκνότητα (kg / m <sup>3</sup> )	Θερμική αγωγιμότητα (W / (m K))	Ειδική θερμότητα (kJ / (kg C))
sand rock minerals	200-300	1700	1	1.3
Reinforced concrete	200-400	2200	1.5	0.85
Cast iron	200-400	7200	37	0.56
NaCl	200-500	2160	7	0.85
Cast Steel	200-700	7800	40	0.6
Silica fire bricks	200-700	1820	1.5	1
Magnesia fire bricks	200-1200	3000	5	1.15

### 1.3.1 Αποθήκευση σε δεξαμενή νερού

Το πιο κοινό υλικό που χρησιμοποιείται σε ένα σύστημα αποθήκευσης αισθητής θερμότητας είναι το νερό. Η χρήση δεξαμενών ζεστού νερού είναι μια πολύ γνωστή τεχνολογία για την αποθήκευση θερμικής ενέργειας [14]. Οι δεξαμενές ζεστού νερού εξυπηρετούν το σκοπό εξοικονόμησης ενέργειας σε συστήματα θέρμανσης νερού μέσω ηλιακής ενέργειας και μέσω συστημάτων συμπαραγωγής (δηλ. Θερμότητας και ισχύος). Σύγχρονα έργα [15] έχουν δείξει ότι η αποθήκευση δεξαμενής νερού είναι μια οικονομικά αποδοτική επιλογή αποθήκευσης και ότι η αποτελεσματικότητά της μπορεί να βελτιωθεί περαιτέρω διασφαλίζοντας τη βέλτιστη διαστρωμάτωση του νερού στη δεξαμενή και εφαρμόζοντας εξαιρετικά αποτελεσματική θερμομόνωση. Ένα τυπικό σύστημα στο οποίο χρησιμοποιείται δεξαμενή νερού φαίνεται στο σχήμα 1.3.



Εικόνα 1.3. Ένα τυπικό σύστημα που χρησιμοποιεί αποθήκευση δεξαμενής νερού [4]

Η ικανότητα αποθήκευσης ενέργειας μιας μονάδας αποθήκευσης νερού (ή άλλου υγρού) σε ομοιόμορφη θερμοκρασία (δηλαδή, πλήρως αναμεμιγμένη ή χωρίς στρωματοποίηση) που λειτουργεί πάνω από μια πεπερασμένη διαφορά θερμοκρασίας δίνεται από την εξίσωση :

$$Q_s = mc_p \Delta t_s \quad (1.2)$$

όπου  $Q_s$  είναι η συνολική θερμική ικανότητα για έναν κύκλο που λειτουργεί μέσω του εύρους θερμοκρασίας  $\Delta t_s$ , και  $m$  και  $c_p$  είναι η μάζα και η ειδική θερμότητα, αντίστοιχα, του νερού στη μονάδα. Το εύρος θερμοκρασίας στο οποίο μπορεί να λειτουργήσει μια τέτοια μονάδα περιορίζεται στο κάτω άκρο για τις περισσότερες εφαρμογές από τις απαιτήσεις της

διαδικασίας. Το ανώτερο όριο μπορεί να προσδιοριστεί από τη διαδικασία, την πίεση ατμών του υγρού ή την απώλεια θερμότητας του συλλέκτη. Η ενεργειακή ισορροπία στη δεξαμενή χωρίς στρωματοποίηση είναι:

$$mc_p \frac{dt_s}{d\tau} = Q_u - Q_L - U_s A_s (t_i - t_a) \quad (1.3)$$

όπου  $Q_u$  και  $Q_L$  είναι οι ρυθμοί προσθήκης ή αφαίρεσης ενέργειας από τον συλλέκτη και στο φορτίο.  $U_s$  είναι ο συντελεστής απώλειας θερμότητας της δεξαμενής αποθήκευσης.  $A_s$  είναι η επιφάνεια της δεξαμενής αποθήκευσης.  $t_f$  είναι η τελική θερμοκρασία, σε C;  $t_a$  είναι η θερμοκρασία περιβάλλοντος για τη δεξαμενή και  $\tau$  είναι ο χρόνος.

Η εξίσωση αυτή πρέπει να ενσωματωθεί με την πάροδο του χρόνου για τον προσδιορισμό της μακροπρόθεσμης απόδοσης της μονάδας αποθήκευσης και της ηλιακής διαδικασίας. Οι χρήσιμες μακροπρόθεσμες αναλυτικές λύσεις δεν είναι δυνατές λόγω της πολύπλοκης χρονικής εξάρτησης ορισμένων από τους όρους. Υπάρχουν πολλές πιθανές μέθοδοι αριθμητικής ολοκλήρωσης. Η χρήση απλής ολοκλήρωσης Euler είναι συνήθως ικανοποιητική (δηλαδή, η επανεγγραφή του παραγώγου θερμοκρασίας ως  $(t_s - t_i) / \Delta t$  και η επίλυση ως προς την θερμοκρασία της δεξαμενής:

$$t_s = t_i + \frac{\Delta \tau}{mc_p} [Q_u - Q_L - U_s A_s (t_i - t_a)] \quad (1.4)$$

Η ανωτέρω εξίσωση (4) μπορεί να χρησιμοποιηθεί για την πρόβλεψη της θερμοκρασίας αποθήκευσης νερού ως συνάρτηση του χρόνου. Όταν είναι γνωστή η θερμοκρασία της δεξαμενής, μπορούν να εκτιμηθούν άλλες εξαρτώμενες από τη θερμοκρασία ποσότητες. Τα συστήματα αποθήκευσης ζεστού νερού που χρησιμοποιούνται ως αποθήκευση buffer για παροχή DHW συνήθως κυμαίνονται από 500 L έως αρκετά κυβικά μέτρα (m<sup>3</sup>). Αυτή η τεχνολογία χρησιμοποιείται επίσης σε ηλιακές θερμικές εγκαταστάσεις για DHW σε συνδυασμό με συστήματα θέρμανσης κτιρίων. Μεγάλες δεξαμενές ζεστού νερού χρησιμοποιούνται για εποχιακή αποθήκευση ηλιακής θερμικής θερμότητας σε συνδυασμό με μικρά συστήματα τηλεθέρμανσης. Αυτά τα συστήματα μπορούν να έχουν όγκο έως και αρκετές χιλιάδες κυβικά μέτρα. Οι θερμοκρασίες φόρτισης κυμαίνονται από 80-90 C. Η διαφορά θερμοκρασίας που μπορεί να χρησιμοποιηθεί μπορεί να ενισχυθεί με τη χρήση αντλιών θερμότητας για εκφόρτιση (έως θερμοκρασίες περίπου 10 C) [4].

### 1.3.2 Υπόγεια αποθήκευση

Η υπόγεια αποθήκευση θερμικής ενέργειας (UTES Underground thermal energy storage) είναι επίσης μια ευρέως χρησιμοποιούμενη τεχνολογία αποθήκευσης, η οποία χρησιμοποιεί το έδαφος (π.χ. το χώμα, την άμμο, τους βράχους και τον άργιλο) ως μέσο αποθήκευσης για αποθήκευση θερμότητας και ψύξης. Για να λειτουργεί αυτή η μέθοδος πρέπει να παρέχονται μέσα για να προστεθεί ή να αφαιρεθεί ενέργεια από το μέσο αποθήκευσης. Αυτό γίνεται με την άντληση ρευστών μεταφοράς θερμότητας (HTF heat transfer fluids) μέσω συστοιχιών σωληνώσεων στο έδαφος. Οι σωλήνες μπορεί να είναι κατακόρυφοι σωλήνες U που εισάγονται σε φρεάτια (γεώτρηση) που απέχουν σε κατάλληλα διαστήματα στο χώρο αποθήκευσης ή μπορεί να είναι οριζόντιοι σωλήνες θαμμένοι στο έδαφος. Οι ρυθμοί φόρτισης και εκφόρτισης περιορίζονται από την περιοχή των συστοιχιών σωλήνων και τους ρυθμούς μεταφοράς θερμότητας μέσω του εδάφους που περιβάλλει τους σωλήνες. Εάν το μέσο αποθήκευσης είναι πορώδες, η μεταφορά ενέργειας μπορεί να συμβεί με εξάτμιση και συμπύκνωση και με την κίνηση του νερού μέσω του μέσου, και μια πλήρης ανάλυση ενός τέτοιου χώρου αποθήκευσης πρέπει να περιλαμβάνει την εξέταση τόσο της μεταφοράς θερμότητας όσο και της μάζας. Αυτά τα συστήματα αποθήκευσης συνήθως δεν είναι μονωμένα, αν και η μόνωση μπορεί να παρέχεται στην επιφάνεια του εδάφους.

Οι γεωτρήσεις (εναλλάκτες θερμότητας εδάφους) χρησιμοποιούνται επίσης συχνά σε συνδυασμό με αντλίες θερμότητας όπου ο εναλλάκτης θερμότητας εδάφους εξάγει θερμότητα χαμηλής θερμοκρασίας από το έδαφος. Η αποθήκευση αυτού του είδους σχετίζεται στενά με την αποθήκευση εδάφους, εκτός από το ότι το κύριο μέσο αποθήκευσης είναι το νερό, το οποίο ρέει με χαμηλούς ρυθμούς μέσω του εδάφους. Το νερό αντλείται από και προς το έδαφος για να θερμανθεί και να εξαχθεί ενέργεια από αυτό. Η ροή του νερού παρέχει επίσης έναν μηχανισμό ανταλλαγής θερμότητας με το ίδιο το έδαφος. Ένα πρακτικό θέμα που προκύπτει είναι ότι οι υδροφορείς δεν μπορούν να μονωθούν. Μπορούν να χρησιμοποιηθούν μόνο υδροφορείς που έχουν χαμηλούς φυσικούς ρυθμούς ροής μέσω του χώρου αποθήκευσης. Ένας περαιτέρω περιορισμός μπορεί να είναι στις χημικές αντιδράσεις του θερμαινόμενου νερού με τα υπόγεια υλικά. Οι υδροφορείς, όπως και η αποθήκευση εδάφους, λειτουργούν σε μικρότερα εύρη θερμοκρασίας από την αποθήκευση νερού. Οι περισσότερες εφαρμογές ασχολούνται με την αποθήκευση του χειμερινού κρύου που χρησιμοποιείται για την ψύξη μεγάλων κτιρίων γραφείων και βιομηχανικών διεργασιών το καλοκαίρι.

Η αποθήκευση σε ταμιευτήρες συζητείται από τους Novo et al. [16], που αναφέρουν ότι η θερμική ικανότητα για τους ταμιευτήρες κυμαίνεται από 30-40 kWh / m<sup>3</sup> και ο όγκος αποθήκευσης για 1 m<sup>3</sup> ισοδύναμου νερού είναι 2-3 m<sup>3</sup>. Τονίζεται ότι οι σχετικές απώλειες θερμότητας γίνονται μικρότερες για μεγαλύτερους όγκους αποθήκευσης, καθώς η περιοχή που είναι ευαίσθητη σε απώλεια θερμότητας ανά όγκο μειώνεται. Μια προηγμένη ανασκόπηση για την αποθήκευση σε ταμιευτήρες για θέρμανση και ψύξη κτιρίων παρουσιάζεται από τους Paksoy et al. [17], οι οποίοι εξήγησαν ότι, λόγω των συνθηκών εδάφους που απαιτούνται για την αποθήκευση, είναι πολύ λιγότερο εφαρμόσιμη από την αποθήκευση γεωτρήσεων. Το κύριο πλεονέκτημα που αναφέρεται είναι το γεγονός ότι είναι δυνατόν να επιτευχθούν πολύ υψηλότεροι ρυθμοί ισχύος από έναν ταμιευτήρα, καθώς το νερό μπορεί να αντληθεί με υψηλό ρυθμό.

Η αποθήκευση σπηλαίων και η αποθήκευση κοιλωμάτων βασίζονται σε μεγάλες υπόγειες δεξαμενές νερού που δημιουργήθηκαν στο υπέδαφος για να λειτουργήσουν ως συστήματα TES. Τα σπήλαια είναι τα ίδια στις αρχές λειτουργίας τους με τις δεξαμενές που συζητήθηκαν στην προηγούμενη ενότητα. Η ενέργεια προστίθεται ή αφαιρείται με άντληση νερού μέσα ή έξω από τη μονάδα αποθήκευσης. Η κύρια διαφορά θα είναι οι μηχανισμοί απώλειας θερμότητας και η πιθανή θερμική σύζευξη με το έδαφος. Αυτές οι επιλογές αποθήκευσης είναι τεχνικά εφικτές, αλλά οι εφαρμογές είναι περιορισμένες λόγω του υψηλού επενδυτικού κόστους. Μια γερμανική μονάδα κεντρικής ηλιακής θέρμανσης με εποχική αποθήκευση περιγράφεται από τους Bauer et al. [18], οι οποίοι συζητούν επίσης τις απώλειες θερμότητας από ορισμένες εγκαταστάσεις. Για παράδειγμα, για εποχιακή αποθήκευση νερού με όγκο 12.000 m<sup>3</sup> στο Friedrichshafen, οι ετήσιες απώλειες θερμότητας από το σύστημα ήταν μεταξύ 322 και 482 MWh, αποδίδοντας συντελεστή απόδοσης αποθήκευσης περίπου 60%. Το ηλιακό κλάσμα για αυτό το σύστημα ήταν χαμηλότερο από το αναμενόμενο (μεταξύ 21 και 33% αντί για προβλεπόμενο 43%), και οι λόγοι που δίνονται είναι η υψηλότερη ζήτηση θερμότητας από τα κτίρια και οι υψηλότερες θερμοκρασίες επιστροφής στο σύστημα. Για εποχιακή αποθήκευση γεώτρησης που αξιολογείται από τους Heier et al. [19], η ίδια η αποθήκευση γεώτρησης φαίνεται να έχει ετήσια απώλεια θερμότητας περίπου 50% της ηλιακής ενέργειας που φορτίζεται.

## 1.4 Αποθήκευση λανθάνουσας θερμότητας

Τα υλικά LHS (Latent-Heat Storage) είναι γνωστά ως PCM λόγω της ιδιότητας τους να απελευθερώνουν ή να απορροφούν ενέργεια με αλλαγή στη φυσική κατάσταση. Η πυκνότητα αποθήκευσης ενέργειας αυξάνεται και ως εκ τούτου ο όγκος μειώνεται, στην περίπτωση των LHS (Σχήμα 1. 2β). Η θερμότητα αποθηκεύεται κυρίως στη διαδικασία αλλαγής φάσης (σε μια αρκετά σταθερή θερμοκρασία) και συνδέεται άμεσα με την λανθάνουσα θερμότητα της ουσίας. Η χρήση ενός συστήματος LHS που χρησιμοποιεί PCM είναι ένας αποτελεσματικός τρόπος αποθήκευσης θερμικής ενέργειας και έχει τα πλεονεκτήματα της πυκνότητας αποθήκευσης υψηλής ενέργειας και της ισοθερμικής φύσης της διαδικασίας αποθήκευσης.

Το κύριο πλεονέκτημα της χρήσης LHS έναντι SHS είναι η ικανότητά τους να αποθηκεύουν θερμότητα σε σχεδόν παρόμοιο εύρος θερμοκρασίας. Αρχικά, αυτά τα υλικά ενεργούν σαν υλικά SHS στο ότι η θερμοκρασία αυξάνεται γραμμικά με την ενθαλπία του συστήματος. Ωστόσο, αργότερα, η θερμότητα απορροφάται ή απελευθερώνεται σε σχεδόν σταθερή θερμοκρασία με αλλαγή στη φυσική κατάσταση του υλικού. Τα συστήματα LHS βασίζονται στην απορρόφηση θερμότητας ή την απελευθέρωση όταν ένα υλικό αποθήκευσης υφίσταται αλλαγή φάσης από στερεό σε υγρό ή υγρό σε αέριο ή αντίστροφα. Η χωρητικότητα αποθήκευσης  $Q_s$ , σε J, του συστήματος LHS με μέσο PCM [13] δίνεται από

$$Q_s = \int_{t_i}^{t_m} mc_p dt + mf \Delta q + \int_{t_m}^{t_f} mc_p dt \quad (1.5)$$

$$Q_s = m \left[ c_{ps} (t_m - t_i) + f \Delta q + c_{pl} (t_f - t_m) \right] \quad (1.6)$$

όπου  $t_m$  είναι η θερμοκρασία τήξης, σε C;  $m$  είναι η μάζα του μέσου PCM, σε kg.  $c_{ps}$  είναι η μέση ειδική θερμότητα της στερεάς φάσης μεταξύ  $t_i$  και  $t_m$ , σε kJ / (kg \* K).  $c_{pl}$  είναι η μέση ειδική θερμότητα της υγρής φάσης μεταξύ  $t_m$  και  $t_f$ , σε J / (kg \* K).  $f$  είναι το κλάσμα τήγματος.  $\Delta q$  είναι η λανθάνουσα θερμότητα σύντηξης, σε J / kg.

Οι τεχνικές μέτρησης που χρησιμοποιούνται επί του παρόντος για λανθάνουσα θερμότητα σύντηξης και θερμοκρασία τήξης των PCM είναι (1) διαφορική θερμική ανάλυση (DTA) και (2) θερμιδόμετρο διαφορικής σάρωσης (DSC) [13]. Στις τεχνικές DSC και DTA, τα υλικά δείγματος και αναφοράς θερμαίνονται με σταθερό ρυθμό. Η διαφορά θερμοκρασίας μεταξύ

τους είναι ανάλογη με τη διαφορά στη ροή θερμότητας μεταξύ των δύο υλικών και η εγγραφή είναι η καμπύλη DSC. Το συνιστάμενο υλικό αναφοράς είναι η αλουμίνα (Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>). Η λανθάνουσα θερμότητα σύντηξης υπολογίζεται χρησιμοποιώντας την περιοχή κάτω από την κορυφή και η θερμοκρασία τήξης εκτιμάται από την εφαπτομένη στο σημείο της μεγαλύτερης κλίσης στο μετωπικό τμήμα της κορυφής.

Οι Morrison και Abdel-Khalik [20] ανέπτυξαν ένα μοντέλο που μπορεί να εφαρμοστεί σε PCM σε μικρά δοχεία, όπου το μήκος στην κατεύθυνση ροής είναι L, η περιοχή διατομής του υλικού είναι A και η βρεχόμενη περίμετρος είναι P. Το υγρό μεταφοράς θερμότητας διέρχεται από τη μονάδα αποθήκευσης στην κατεύθυνση x με τον ρυθμό ροής μάζας m και με τη θερμοκρασία εισόδου  $t_f$ , i. Το μοντέλο βασίζεται σε τρεις παραδοχές: (1) κατά τη ροή, η αξονική αγωγιμότητα στο ρευστό είναι αμελητέα. (2) ο αριθμός Biot είναι αρκετά χαμηλός ώστε να μπορούν να αγνοηθούν οι θερμοκρασιακές κλίσεις της ροής. και (3) οι απώλειες θερμότητας είναι αμελητέες.

Μια ενεργειακή ισορροπία στο υλικό δίνει ότι:

$$\frac{\partial u}{\partial \tau} = \frac{\lambda_s}{\rho_s} \frac{\partial^2 t_s}{\partial x^2} + \frac{UP}{\rho_s A} (t_f - t_s) \quad (1.7)$$

όπου u,  $t_s$ ,  $\lambda_s$  και  $\rho_s$  είναι η ειδική εσωτερική ενέργεια, η θερμοκρασία, η θερμική αγωγιμότητα και η πυκνότητα του PCM.  $t_f$  και U είναι η θερμοκρασία του υγρού και ο συνολικός συντελεστής μεταφοράς θερμότητας μεταξύ του υγρού και του PCM και  $\tau$  είναι ο χρόνος.

Η ενεργειακή ισορροπία στο υγρό μας δίνει:

$$\frac{\partial t_f}{\partial \tau} + \frac{m}{\rho_f A_f} \frac{\partial t_f}{\partial x} = \frac{UP}{\rho_f A_f c_{p,f}} (t_s - t_f) \quad (1.8)$$

όπου  $\rho_f$ ,  $A_f$  και  $c_{p,f}$  είναι η πυκνότητα, η περιοχή ροής και η ειδική θερμότητα του υγρού.

Όπως απεικονίζεται στην εικόνα 1.1, η διαδικασία αλλαγής φάσης πραγματοποιείται σε διαφορετικούς τρόπους: στερεό-στερεό, υγρό-αέριο και στερεό-υγρό. Στην πρώτη περίπτωση, η θερμότητα αποθηκεύεται με μετάβαση μεταξύ διαφορετικών ειδών μορφών κρυστάλλωσης. Για συστήματα υγρού-αερίου, η λανθάνουσα θερμότητα είναι πολύ υψηλή, αλλά υπάρχουν προβλήματα στον έλεγχο αποθήκευσης λόγω των υψηλών διακυμάνσεων του όγκου κατά την



αλλαγή φάσης. Τα πιο διαδεδομένα είναι τα PCM στερεής-υγρής φάσης, τα οποία έχουν περιορισμένη διακύμανση όγκου κατά την λανθάνουσα ανταλλαγή θερμότητας (γενικά λιγότερο από 10%) και μια αρκετά υψηλή τήξη λανθάνουσας θερμότητας. Οι διαδικασίες τήξης περιλαμβάνουν ενεργειακή πυκνότητα 100 kWh / m<sup>3</sup> (π.χ. πάγο) σε σύγκριση με ένα τυπικό 25 kWh / m<sup>3</sup> για τις επιλογές SHS. Τα PCM μπορούν να χρησιμοποιηθούν τόσο για βραχυπρόθεσμη (ημερήσια) όσο και για μακροχρόνια (εποχιακή) αποθήκευση ενέργειας, χρησιμοποιώντας μια ποικιλία τεχνικών και υλικών.

Οι πιθανές εφαρμογές PCM είναι οι εξής:

- Η ενσωμάτωση σε γυψοσανίδα, γύψο, σκυρόδεμα ή άλλο υλικό κάλυψης τοίχου που αποτελεί μέρος της δομής του κτιρίου για την ενίσχυση της χωρητικότητας αποθήκευσης θερμικής ενέργειας, με κύρια χρήση στην αλλαγή φορτίου αιχμής [21]
- Η ψυκτική αποθήκευση για εγκαταστάσεις ψύξης (θερμοκρασία λειτουργίας 7-15 C) [14]
- Η θερμή αποθήκευση για εγκαταστάσεις θέρμανσης (40-50 C) [14].
- Η θερμή αποθήκευση για ηλιακή ψύξη και θέρμανση (80-90 C) [14].

Κάθε σύστημα αποθήκευσης λανθάνουσας θερμικής ενέργειας διαθέτει επομένως τουλάχιστον ακόλουθα τρία στοιχεία:

1. κατάλληλο PCM με το σημείο τήξης του στο επιθυμητό εύρος θερμοκρασίας,
2. κατάλληλη επιφάνεια ανταλλαγής θερμότητας, και
3. κατάλληλο δοχείο συμβατό με το PCM.

## 1.5 Χημική αποθήκευση θερμότητας

Η μέθοδος TCS (thermo-chemical storage) χρησιμοποιεί θερμο-χημικά υλικά (TCM), τα οποία αποθηκεύουν και απελευθερώνουν θερμότητα με μια αναστρέψιμη διαδικασία ενδοθερμικής / εξώθερμης αντίδρασης (Σχήμα 1.2γ). Κατά τη διάρκεια της διαδικασίας φόρτισης, εφαρμόζεται θερμότητα στο υλικό A, με αποτέλεσμα το διαχωρισμό δύο μερών B + Γ. Τα προκύπτοντα προϊόντα αντίδρασης μπορούν εύκολα να διαχωριστούν και να αποθηκευτούν έως ότου

απαιτείται η διαδικασία εκκένωσης. Στη συνέχεια, τα δύο μέρη B + C αναμιγνύονται σε κατάλληλες συνθήκες πίεσης και θερμοκρασίας και απελευθερώνεται ενέργεια.

Τα προϊόντα B και C μπορούν να αποθηκευτούν ξεχωριστά και οι θερμικές απώλειες από τις μονάδες αποθήκευσης περιορίζονται σε αισθητά θερμικά φαινόμενα, τα οποία είναι συνήθως μικρά σε σύγκριση με αυτά της θερμότητας της αντίδρασης.

Έχει ερευνηθεί η θερμική αποσύνθεση μεταλλικών οξειδίων για αποθήκευση ενέργειας [22]. Αυτές οι αντιδράσεις έχουν ένα πλεονέκτημα, ότι το οξυγόνο που απελευθερώνεται μπορεί να χρησιμοποιηθεί για άλλους σκοπούς ή να απορριφθεί στην ατμόσφαιρα και επίσης ότι το οξυγόνο από την ατμόσφαιρα μπορεί να χρησιμοποιηθεί στις αντίστροφες αντιδράσεις. Δύο παραδείγματα περιλαμβάνουν την αποσύνθεση του οξειδίου του καλίου



που συμβαίνει σε κλίμακα θερμοκρασίας 300-800 C με θερμότητα αποσύνθεσης 2,1 MJ / kg, και εκείνη του οξειδίου του μόλυβδου,

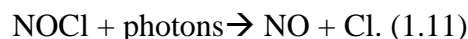


που εμφανίζεται σε εύρος θερμοκρασίας 300-350 C με θερμότητα αποσύνθεσης 0,26 MJ / kg.

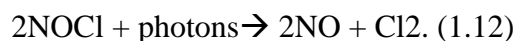
Υπάρχουν πολλά πρακτικά προβλήματα που πρέπει να αντιμετωπιστούν κατά τη χρήση αυτών των αντιδράσεων.

Η αποθήκευση ενέργειας με θερμική αποσύνθεση του Ca (OH) 2 έχει μελετηθεί εκτενώς από τους Fujii et al. [23]. Η αντίδραση είναι  $\text{Ca (OH)}_2 \leftrightarrow \text{CaO} + \text{H}_2\text{O}$ . Η προς τα εμπρός αντίδραση θα προχωρήσει σε θερμοκρασίες άνω των ~ 450 C. Οι ρυθμοί αντίδρασης μπορούν να αυξηθούν με την προσθήκη ψευδαργύρου ή αλουμινίου.

Το προϊόν CaO αποθηκεύεται απουσία νερού. Η αντίστροφη εξώθερμη αντίδραση προχωρά εύκολα. Ένα παράδειγμα αντίδρασης φωτοχημικής αποσύνθεσης είναι η αποσύνθεση του νιτροζυλοχλωριδίου, η οποία μπορεί να γραφτεί ως



Το παραγόμενο ατομικό χλώριο σχηματίζει αέριο χλώριο, Cl<sub>2</sub>, με την απελευθέρωση ενός σημαντικού μέρους της ενέργειας που προστίθεται στο NOCl σε αποσύνθεση. Έτσι, η συνολική αντίδραση είναι



Η αντίστροφη αντίδραση μπορεί να πραγματοποιηθεί για ανάκτηση μέρους της ενέργειας των φωτονίων που εισέρχονται στην αντίδραση. Οι διεργασίες που παράγουν ηλεκτρική ενέργεια μπορεί να διαθέτουν αποθήκευση ενέργειας ως χημική ενέργεια σε ηλεκτρικές μπαταρίες αποθήκευσης πχ

Θερμο-χημικές αντιδράσεις, όπως προσρόφηση (δηλ. Προσκόλληση μιας ουσίας στην επιφάνεια ενός άλλου στερεού ή υγρού), μπορούν να χρησιμοποιηθούν για την αποθήκευση θερμότητας και ψύξης, καθώς και για τον έλεγχο της υγρασίας. Η υψηλή χωρητικότητα αποθήκευσης των διαδικασιών απορρόφησης επιτρέπει επίσης τη μεταφορά θερμικής ενέργειας.

## 1.6 Απόδοση και κόστος των συστημάτων TES

Τα συστήματα TES περιλαμβάνουν μια σειρά διαφορετικών τεχνολογιών, καθεμία με τη δική της συγκεκριμένη απόδοση, εφαρμογή και κόστος.

Σημαντικά πεδία εφαρμογής για συστήματα TES υπάρχουν στον τομέα των κτιρίων (π.χ. DHW (τηλεθέρμανση), θέρμανση χώρου και κλιματισμός) και στον βιομηχανικό τομέα (π.χ. διεργασίες θέρμανσης και ψύξης). Τα συστήματα TES μπορούν να εγκατασταθούν είτε ως κεντρικές εγκαταστάσεις είτε ως κατανεμημένες συσκευές. Οι κεντρικές μονάδες έχουν σχεδιαστεί για την αποθήκευση θερμότητας από μεγάλες βιομηχανικές διεργασίες, συμβατικές μονάδες παραγωγής ενέργειας, συνδυασμένες μονάδες παραγωγής θερμότητας και ηλεκτρικής ενέργειας και ανανεώσιμες μονάδες παραγωγής ενέργειας. Η ισχύς τους κυμαίνεται συνήθως από εκατοντάδες kW έως αρκετά MW. Οι κατανεμημένες συσκευές είναι συνήθως ρυθμιστικά συστήματα αποθήκευσης για τη συσσώρευση ηλιακής θερμότητας που θα χρησιμοποιηθεί για οικιακά και εμπορικά κτίρια (π.χ. ζεστό νερό, θέρμανση και συσκευές). Τα κατανεμημένα συστήματα κυμαίνονται κυρίως από μερικά έως δεκάδες kW.

Τα συστήματα TES που βασίζονται σε αποθήκευση αισθητής θερμότητας προσφέρουν χωρητικότητα αποθήκευσης που κυμαίνεται από 10 έως 50 kWh / t και αποδοτικότητα αποθήκευσης μεταξύ 50 και 90%, ανάλογα με τη συγκεκριμένη θερμότητα του μέσου αποθήκευσης και των τεχνολογιών θερμομόνωσης. Τα PCM μπορούν να προσφέρουν υψηλότερη χωρητικότητα αποθήκευσης και αποδοτικότητα αποθήκευσης από 75 έως 90%. Στις περισσότερες περιπτώσεις, η αποθήκευση βασίζεται σε αλλαγή στερεάς-υγρής φάσης με

ενεργειακή πυκνότητα 100 kWh / m<sup>3</sup> (π.χ. πάγος). Τα συστήματα TCS μπορούν να φθάσουν σε χωρητικότητα αποθήκευσης έως και 250 kWh / t με θερμοκρασίες λειτουργίας άνω των 300 ° C και απόδοση από 75% έως σχεδόν 100%.

Το κόστος ενός πλήρους συστήματος για SHS κυμαίνεται μεταξύ 0,1 και 10 € / kWh, ανάλογα με το μέγεθος, την εφαρμογή και την τεχνολογία θερμομόνωσης. Το κόστος για συστήματα PCM και TCS είναι γενικά υψηλότερο. Σε αυτά τα συστήματα, τα μεγάλα κόστη σχετίζονται με την τεχνολογία μεταφοράς θερμότητας (και μάζας), η οποία πρέπει να εγκατασταθεί για την επίτευξη επαρκούς ισχύος φόρτισης / εκφόρτισης. Το κόστος των συστημάτων LHS που βασίζονται σε PCM κυμαίνεται μεταξύ 10 και 50 € / kWh, ενώ το κόστος για τα συστήματα TCS εκτιμάται ότι κυμαίνεται μεταξύ 8 και 100 € / kWh. Η οικονομική βιωσιμότητα ενός TES εξαρτάται σε μεγάλο βαθμό από τις ανάγκες εφαρμογής και λειτουργίας, συμπεριλαμβανομένου του αριθμού και της συχνότητας των κύκλων αποθήκευσης.

Το εκτιμώμενο κόστος των συστημάτων TES περιλαμβάνει υλικά αποθήκευσης, τεχνικό εξοπλισμό για φόρτιση και εκφόρτιση και κόστος λειτουργίας. Αν και οι οικονομικές αναλύσεις για συμβατικά συστήματα (χωρίς θερμική αποθήκευση) [24] και συστήματα με δεξαμενές αποθήκευσης (νερό) είναι άφθονα [25–31], συγκριτικές αναλύσεις κόστους της χρήσης ενός PCM ως θερμικής μονάδας αποθήκευσης λανθάνουσας θερμότητας σπάνια αναφέρονται στην βιβλιογραφία. Οι Godarzi et al. [32] σχεδίασαν ένα σύστημα αποθήκευσης PCM βασισμένο σε εργο-οικονομική ανάλυση και έναν γενετικό αλγόριθμο σε ένα σύστημα LiBr / H<sub>2</sub>O 45,4 kW. Η ανάλυσή τους έδειξε περίοδο απόσβεσης 0,61 ετών χωρίς αποθήκευση PCM έως 1,13 χρόνια με αποθήκευση PCM.

Ο Calise [26] διερεύνησε επίσης αριθμητικά ένα σύστημα LiBr / H<sub>2</sub>O χρησιμοποιώντας θερμο-οικονομικές και τεχνικές βελτιστοποιήσεις και το 64% της πρωτογενούς ενέργειας εξοικονομήθηκε με περίοδο απόδοσης 12 ετών.

Τα συστήματα TES για αισθητή θερμότητα είναι σχετικά φθηνά, καθώς αποτελούνται βασικά από ένα απλό δοχείο για το μέσο αποθήκευσης και τον εξοπλισμό φόρτισης / εκφόρτισης. Τα μέσα αποθήκευσης (π.χ. νερό, χώμα, πετρώματα, σκυρόδεμα ή άλατα) είναι συνήθως σχετικά φθηνά. Ωστόσο, το δοχείο του υλικού αποθήκευσης απαιτεί αποτελεσματική θερμομόνωση, η οποία μπορεί να είναι σημαντικό στοιχείο για το κόστος του TES.

Στην περίπτωση των συστημάτων UTES, οι γεωτρήσεις και οι εναλλάκτες θερμότητας για την ενεργοποίηση της υπόγειας αποθήκευσης είναι τα πιο σημαντικά στοιχεία κόστους. Το ειδικό

κόστος κυμαίνεται από 0,1 έως 10 E / kWh [6] και εξαρτάται σε μεγάλο βαθμό από τις τοπικές συνθήκες.

Τα συστήματα αποθήκευσης PCM και TCS είναι σημαντικά πιο περίπλοκα και ακριβά από τα συστήματα αποθήκευσης αισθητής θερμότητας. Στις περισσότερες περιπτώσεις (π.χ. θερμοχημικοί αντιδραστήρες), χρησιμοποιούν βελτιωμένες τεχνολογίες μεταφοράς θερμότητας και μάζας για να επιτευχθεί η απαιτούμενη απόδοση όσον αφορά την ικανότητα αποθήκευσης και την ισχύ, και το κόστος του εξοπλισμού είναι πολύ υψηλότερο από το κόστος για το υλικό αποθήκευσης.

Τα υλικά για TCS είναι επίσης ακριβά, καθώς πρέπει να παρασκευαστούν (π.χ., σφαιροποιημένα ή στρωματοποιημένα πάνω σε δομές στήριξης). Επίσης ακριβά είναι τα δοχεία και ο βοηθητικός εξοπλισμός των συστημάτων TCS για μεταφορά θερμότητας και μάζας κατά τη φόρτιση και εκφόρτιση ενέργειας. Τα συστήματα TCS μπορούν να λειτουργούν είτε ως ανοιχτά συστήματα (δηλαδή, βασικά συσκευασμένα στρώματα σβόλων σε πίεση περιβάλλοντος) είτε ως κλειστά συστήματα. Τα ανοιχτά συστήματα είναι συχνά η φθηνότερη επιλογή, ενώ τα κλειστά συστήματα χρειάζονται εξελιγμένους εναλλάκτες θερμότητας.

Η συνολική οικονομική αξιολόγηση ενός συστήματος TES εξαρτάται σημαντικά από τις συγκεκριμένες ανάγκες εφαρμογής και λειτουργίας, συμπεριλαμβανομένου του αριθμού και της συχνότητας των κύκλων αποθήκευσης.

Οι τεχνολογίες TES αντιμετωπίζουν ορισμένα εμπόδια στην είσοδο στην αγορά και το κόστος είναι ένα βασικό ζήτημα. Άλλα εμπόδια σχετίζονται με τις ιδιότητες του υλικού και τη σταθερότητα, ιδίως για το TCS. Κάθε εφαρμογή αποθήκευσης χρειάζεται ένα συγκεκριμένο σχέδιο TES για να ταιριάζει σε συγκεκριμένες συνθήκες και απαιτήσεις ορίου. Οι δραστηριότητες έρευνας και ανάπτυξης επικεντρώνονται σε όλες τις τεχνολογίες TES.

Η ανάπτυξη και η διείσδυση στην αγορά των συστημάτων TES ποικίλλει σημαντικά, ανάλογα με τα πεδία εφαρμογής και τις περιοχές. Έτσι, το δυναμικό TES για συμπαραγωγή και τηλεθέρμανση στην Ευρώπη συνδέεται με τον κτιριακό τομέα. Το ποσοστό εφαρμογής της συμπαραγωγής είναι 10,2%, ενώ η εφαρμογή TES σε αυτά τα συστήματα θεωρείται ότι είναι 15%. Όσον αφορά τα TES για εφαρμογές ισχύος, ένας τομέας είναι το CSP, όπου σχεδόν όλοι οι νέοι σταθμοί παραγωγής ενέργειας που βρίσκονται σε λειτουργία ή υπό κατασκευή είναι εξοπλισμένοι με συστήματα TES, βασισμένα κυρίως σε άλατα.

## ΚΕΦΑΛΑΙΟ 2<sup>ο</sup>

### 2.1 Εποχιακή αποθήκευση θερμικής ενέργειας

Η τρέχουσα ενεργειακή ζήτηση στον τομέα των κτιρίων (π.χ. θέρμανση χώρου και ζεστό νερό οικιακής χρήσης) αντιπροσωπεύει το 40% της συνολικής ζήτησης ενέργειας στην Ευρωπαϊκή Ένωση (ΕΕ) [33]. Αυτή η ζήτηση ικανοποιείται συχνά μέσω συστημάτων τηλεθέρμανσης (DH) που συνδέονται με συνδυασμένη θερμότητα και ισχύ (CHP) ή / και μονάδες θέρμανσης στις οποίες η θερμότητα που παράγεται προέρχεται κυρίως από ορυκτά καύσιμα ως κύρια πηγή ενέργειας και, κατά συνέπεια, αυτός ο τομέας διαδραματίζει σημαντικό ρόλο στην παραγωγή εκπομπών ρύπων [34]. Ως εκ τούτου, η ΕΕ έχει υποστηρίξει πολλά ενεργειακά έργα τα τελευταία χρόνια για την ενίσχυση του ρόλου των ανανεώσιμων πηγών ενέργειας στο ευρωπαϊκό ενεργειακό σύστημα [35]. Η βιομάζα παίζει τον σημαντικότερο ρόλο των ανανεώσιμων πηγών ενέργειας στον τομέα της τηλεθέρμανσης μέχρι στιγμής, αλλά περιορίζεται για την περαιτέρω αύξηση. Ως εκ τούτου, η ηλιακή ενέργεια φαίνεται να είναι η πιο υποσχόμενη εναλλακτική πηγή ενέργειας σε σύγκριση με τα ορυκτά καύσιμα μεταξύ όλων των ανανεώσιμων πηγών ενέργειας και, ως εκ τούτου, οι κεντρικές μονάδες ηλιακής θέρμανσης έχουν λάβει μεγάλη προσοχή στη βιβλιογραφία [36,37]. Ωστόσο, το κύριο μειονέκτημα της ηλιακής ενέργειας, καθώς και των περισσότερων άλλων ανανεώσιμων πηγών ενέργειας, είναι η διακοπή της καθώς κυμαίνονται με βάση την καθημερινή, εβδομαδιαία και εποχιακή βάση [38,39]. Ως αποτέλεσμα, παρατηρείται συχνά αναντιστοιχία μεταξύ της ζήτησης και της προσφοράς ενέργειας [40]. Η μεγαλύτερη αναντιστοιχία είναι αυτή μεταξύ της διαθεσιμότητας ηλιακής θερμότητας το καλοκαίρι και της υψηλής ζήτησης θέρμανσης χώρου σε περιοχές κατά τη χειμερινή περίοδο [41].

Μεταξύ πολλών τεχνικών αποθήκευσης, η αποθήκευση θερμικής ενέργειας (TES) φαίνεται ως μία από τις πολλά υποσχόμενες τεχνολογίες που μπορούν να γεφυρώσουν το χάσμα της διακοπτόμενης ενέργειας στην ηλιακή ενέργεια [42,43]. Τα συστήματα TES αποθηκεύουν την υπερβολική ισχύ που παράγεται από μια διακοπτόμενη πηγή ενέργειας και την καθιστούν διαθέσιμη κατ'απαίτηση στο απαιτούμενο ποσό, όποτε και όπου απαιτείται [44]. Έτσι, αυτά τα συστήματα (TES) προσφέρουν την απάντηση στην αναντιστοιχία μεταξύ της ζήτησης και της προσφοράς ενέργειας. Τα συστήματα αυτά είναι κοινά σε ένα ευρύ φάσμα εφαρμογών. Τέτοιες εφαρμογές είναι εφαρμογές κτιρίων (τηλεθέρμανση και ψύξη, ζεστό νερό οικιακής

χρήσης κ.λπ.) και βιομηχανικές εφαρμογές (αποθήκευση απορριμμάτων θερμότητας σε χημικές βιομηχανίες) [45].

Τα συστήματα TES έχουν προσελκύσει μεγάλο ενδιαφέρον τα τελευταία χρόνια για να χρησιμεύσουν ως αναδυόμενη τεχνολογία για ένα ευρύ φάσμα εφαρμογών. Ωστόσο, η επιλογή ενός κατάλληλου συστήματος TES αλλάζει σημαντικά, κυρίως ανάλογα με την εφαρμογή, τις συνθήκες λειτουργίας (π.χ. εύρος θερμοκρασίας, όγκος και διάρκεια ζωής), την περίοδο αποθήκευσης (π.χ. καθημερινά ή εποχιακά) και την οικονομική σκοπιμότητα [46].

Λαμβάνοντας υπόψη τον απαιτούμενο χρόνο αποθήκευσης, τα συστήματα TES μπορούν να ταξινομηθούν σε βραχυπρόθεσμα συστήματα και σε συστήματα μακροπρόθεσμης αποθήκευσης. Ο πρώτος τύπος έχει περίοδο φόρτισης και εκφόρτισης μερικών ημερών και επομένως είναι ευρέως γνωστός ως ημερήσια αποθήκευση θερμότητας. Ορισμένες μελέτες έχουν διερευνήσει ευρέως αυτόν τον τύπο συστημάτων αποθήκευσης λαμβάνοντας υπόψη διαφορετικές πτυχές και προοπτικές. Ενώ η τελευταία ιδέα, η μακροχρόνια αποθήκευση, είναι γνωστή για τις μεγάλες περιόδους αποθήκευσης που διαρκούν έως και αρκετούς μήνες [47]. Κατά συνέπεια αυτή η μέθοδος είναι γνωστή ως εποχιακή αποθήκευση θερμότητας. Η αρχή του εποχιακού TES (STES) επιτρέπει την αποθήκευση της ηλιακής θερμικής ενέργειας (για παράδειγμα) που συλλέχθηκε το καλοκαίρι μέσω εγκαταστάσεων κεντρικής ηλιακής θέρμανσης και, στη συνέχεια, την απορρίπτει για την ζήτηση για θέρμανση χώρων το χειμώνα [48]. Κατά συνέπεια, αυτή η ιδέα συμβάλλει σημαντικά στην αποτελεσματική χρήση των ανανεώσιμων πηγών ενέργειας σε συστήματα τηλεθέρμανσης και στην ανεξαρτητοποίηση από την χρήση άνθρακα στον κτηριακό τομέα [49,50].

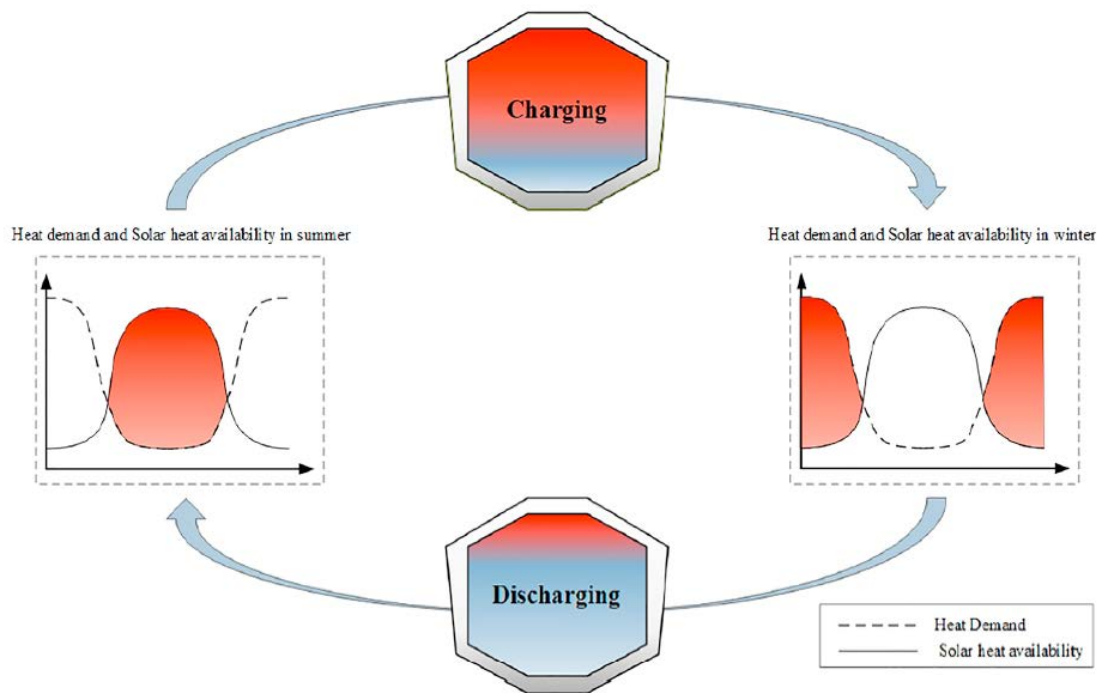
Η σημασία των συστημάτων STES είναι ότι αυξάνουν την ευελιξία στις πλευρές παραγωγής, μετάδοσης και ζήτησης συστημάτων DH υποβοηθούμενης από ηλιακή ενέργεια, καθώς είναι σε θέση να εξισορροπούν εποχικά την προσφορά θερμότητας και ζήτησης θερμότητας παρέχοντας ανθεκτικότητα στα συστήματα DH [49].

Ωστόσο, η εφαρμογή τους σε συστήματα DH εξακολουθεί να αποτελεί τεχνική και οικονομική πρόκληση. Ενώ η ισχύς-θερμότητα μπορεί να έχει καλές δυνατότητες στον τομέα DH, επειδή διασυνδέει το ηλεκτρικό δίκτυο με το δίκτυο θέρμανσης [51]. Αξιοποιώντας το πλεόνασμα ηλεκτρικής ενέργειας για την παραγωγή θερμότητας σε περιόδους με υψηλό ποσοστό ανανεώσιμων πηγών ενέργειας, η ισχύς σε θερμότητα διευκολύνει την ευελιξία και στα δύο δίκτυα (δηλαδή θερμότητα και ισχύς) [52] Εκτός αυτού, θεωρείται ότι μία από τις προκλήσεις για τα μελλοντικά ενεργειακά συστήματα είναι η σύζευξη τομέων. Με οποιαδήποτε άλλη

τεχνολογία, απαιτείται μεγάλης κλίμακας TES. Επιπλέον, τα συστήματα TES μπορούν να κατηγοριοποιηθούν ακολουθώντας τη μέθοδο που χρησιμοποιείται για την αποθήκευση ενέργειας σε αισθητή, λανθάνουσα και θερμοχημική όπως αναφέρθηκε στο πρώτο κεφάλαιο.

## 2.2 Αρχές της εποχιακής αποθήκευσης θερμικής ενέργειας

Όπως αναφέρθηκε προηγουμένως, τα εποχιακά συστήματα TES είναι ιδανικά συστήματα για εφαρμογές ηλιακής θέρμανσης, καθώς εξαλείφουν την εποχιακή απόκλιση μεταξύ της αφθονίας ηλιακής θερμότητας το καλοκαίρι και της ζήτησης θέρμανσης χώρου το χειμώνα, όπως φαίνεται στο Σχ. 2.1. Παρ'όλα αυτά, τα συστήματα STES συχνά είναι δύσκολα στην κατασκευή από τεχνικής απόψεως [53]. Το γεγονός αυτό προκύπτει από τον μεγάλο όγκο που απαιτείται για την εποχική αποθήκευση.



Εικόνα 2.1 Ο ρόλος και ο κύκλος της εποχιακής αποθήκευσης θερμικής ενέργειας σε ένα σύστημα τηλεθέρμανσης με υποβοήθηση ηλιακής ενέργειας..

Ως εκ τούτου, τα συστήματα STES είναι συνήθως είτε θαμμένα κάτω από το έδαφος (μερικώς ή πλήρως) είτε χτισμένα κοντά στην επιφάνεια και, ως εκ τούτου, τα συστήματα αυτά ονομάζονται συχνά συστήματα υπόγειας αποθήκευσης θερμικής ενέργειας (Underground



Thermal Energy Storage UTES). Από τους διάφορους τύπους συστημάτων UTES που ερευνήθηκαν στη βιβλιογραφία, οι πιο συνηθισμένοι με βάση την κατασκευή τους είναι:

- Σύστημα αποθήκευσης θερμικής ενέργειας ταμιευτήρα (Aquifer thermal energy storage system - ATES),
- Σύστημα αποθήκευσης θερμικής ενέργειας με γεώτρηση (Borehole thermal energy storage BTES),
- Σύστημα αποθήκευσης θερμικής ενέργειας δεξαμενής (Tank thermal energy storage system TTES)
- Αποθήκευση θερμικής ενέργειας σε «λάκκο» (Pit thermal energy storage PTES)
- Σύστημα αποθήκευσης θερμικής ενέργειας «σπηλαιού» (Cavern thermal energy storage CTES)

Ωστόσο, η απόφαση για τη χρήση ενός συγκεκριμένου συστήματος UTES εξαρτάται σε μεγάλο βαθμό από τις υδρο-γεωλογικές συνθήκες της αντίστοιχης θέσης [54].

Είναι σημαντικό να επισημανθεί ότι τα συστήματα CTES συνδέονται κυρίως με υψηλές θερμοκρασίες λειτουργίας ( $\geq 200$  ° C) και, ως εκ τούτου, δεν χρησιμοποιείται ευρέως για εφαρμογές τηλεθέρμανσης, ενώ συχνά θεωρείται ως συμπληρωματικό στοιχείο με αποθήκευση ενέργειας πεπιεσμένου αέρα (CAES) σε εγκαταστάσεις αεριοστροβίλων.

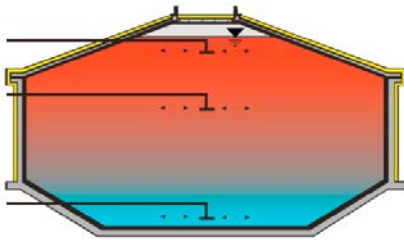
Αν και είναι δύσκολο να συγκριθούν τα υπόλοιπα τέσσερα συστήματα αποθήκευσης αυτά απεικονίζονται στο Σχ. 2.2, όπου τα πλεονεκτήματα και τα μειονεκτήματά τους εξετάζονται.. Επίσης στον Πίνακα 2.1 συγκρίνονται τα τέσσερα συστήματα αποθήκευσης όσον αφορά ως προς το μέσο αποθήκευσης, την ενεργειακή πυκνότητα και τον ισοδύναμο όγκο αποθήκευσης. Σε αυτόν τον πίνακα, φαίνεται ότι η ενεργειακή πυκνότητα των δεξαμενών ζεστού νερού είναι 50% υψηλότερη από εκείνη του TES χαλικιού-νερού και 100% υψηλότερη από εκείνη του ATES. Επίσης το BTES δείχνει τη χαμηλότερη ενεργειακή πυκνότητα ανάλογα με τις ιδιότητες του εδάφους. Ακόμη, τα συστήματα BTES και ATES απαιτούν ειδικές γεωλογικές συνθήκες, ενώ τα TTES και PTES μπορούν να κατασκευαστούν σχεδόν σε κάθε τοποθεσία [55]. Επιπλέον, φαίνεται ευρέως ότι το εύρος θερμοκρασίας για το TTES είναι υψηλότερο σε σύγκριση με τα υπόλοιπα. Έτσι, η ισχύς λειτουργίας (φόρτιση / εκφόρτιση) θεωρείται υψηλότερη.

Οι εφαρμογές τηλεθέρμανσης χρησιμοποιούν συνήθως νερό ως φορέα θερμότητας και, στη συνέχεια, το νερό είναι συχνά το καταλληλότερο μέσο αποθήκευσης για συστήματα UTES ενσωματωμένα σε συστήματα DH [56]. Αυτό οφείλεται επίσης στην ιδιαίτερα υψηλή

θερμοχωρητικότητα ( $4186 \text{ J} / (\text{kg K})$ ) του, στην αφθονία, στην χημική σταθερότητα, στο χαμηλό κόστος και στο καλό εύρος θερμοκρασίας για τη λειτουργία [57]. Έτσι, το νερό πραγματοποιεί υψηλούς ρυθμούς χωρητικότητας για φόρτιση και εκκένωση από θερμοδυναμικής άποψης [40]. Τα συστήματα UTES αποθηκεύουν θερμική ενέργεια αλλάζοντας τη θερμοκρασία του μέσου αποθήκευσης (π.χ. νερό, χαλίκι-νερό) χωρίς καμία σχετική αλλαγή στη φάση και, επομένως, η αρχή αποθήκευσης είναι αποθήκευση αισθητής θερμότητας[58].

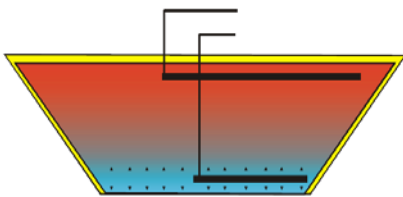
Ωστόσο, ορισμένα είδη συστημάτων UTES σπάνια χρησιμοποιούν το έδαφος (π.χ. βράχος, χώμα / άμμος) ως μέσα αποθήκευσης. Επομένως, τα συστήματα UTES μπορούν επίσης να διακριθούν ανάλογα με το μέσο αποθήκευσης σε: (1) TES Gravel-water (GW), (2) TES εδάφους / άμμου (SW) και (3) TES ζεστού νερού (HW) [54].

#### Tank TES (water)



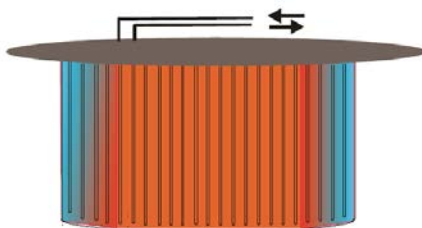
- + υψηλή θερμική χωρητικότητα (νερό)
- + καλά χαρακτηριστικά λειτουργίας (υψηλή (εκ-)φόρτιση, μπορεί να χρησιμοποιηθεί ως buffer store)
- + ελευθερία σχεδιασμού (γεωμετρία)
- + θερμική στρωματοποίηση
- + συντήρηση / επισκευή
- περιορισμένο μέγεθος ( $<100.000 \text{ m}^3$ )
- ζήτηση πρωτογενούς ενέργειας - υψηλό κόστος κατασκευής

#### Pit TES (gravel-water or water)



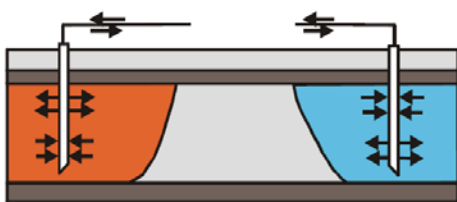
- + Λογικό κόστος κατασκευής
- + Μεσαία (gravel-water) μέχρι υψηλή (νερό) θερμική χωρητικότητα μέσου
- + Σχεδόν απεριόριστες διαστάσεις αποθήκευσης
- + Χαρακτηριστικά λειτουργίας (μέση ισχύς φόρτισης σε περίπτωση χαλίκιου νερού)
- Σύνθετη και δαπανηρή κάλυψη (σε περίπτωση νερού)
- Περιορισμένη ελευθερία σχεδιασμού (γωνία κλίσης)
- Δύσκολη / μη δυνατή επισκευή συντήρησης

#### BTES (soil)



- + Χαμηλό κόστος κατασκευής
- + Εύκολα επεκτάσιμο
- Χαμηλή θερμική χωρητικότητα
- Χαρακτηριστικά λειτουργίας (χαμηλή ισχύς φόρτισης και εκφόρτισης, απαιτούμενο buffer, συνιστάται αντλία θερμότητας)
- περιορισμένη επιλογή τοποθεσιών
- δεν είναι δυνατή η θερμομόνωση στο πλάι και στο κάτω μέρος
- δύσκολη / μη δυνατή επισκευή συντήρησης

### ATES (saturated sand-water)



- + πολύ χαμηλό κόστος κατασκευής
- + θερμική ικανότητα μέσου
- χαρακτηριστικά λειτουργίας (χαμηλή / μεσαία (dis-) ισχύ φόρτισης, απαιτούμενο buffer, συνιστάται αντλία θερμότητας)
- πολύ περιορισμένη επιλογή τοποθεσιών
- δεν είναι δυνατή η θερμομόνωση, σχετικά υψηλές θερμικές απώλειες

Εικ. 2.2 Κατασκευαστικές σχέδια για συστήματα μεγάλης κλίμακας εποχιακής αποθήκευσης θερμικής ενέργειας με τα πλεονεκτήματα και τα μειονεκτήματά τους ([54,59,60]).

## 2.3 Αποθήκευση θερμικής ενέργειας ταμιευτήρα (ATES)

Ένας ταμιευτήρας είναι μια υπόγεια δεξαμενή νερού. Έτσι, ένα σύστημα ATES χρησιμοποιεί ένα μείγμα φυσικού νερού και εδάφους (π.χ. βράχος) για την αποθήκευση της συλλεγόμενης ηλιακής θερμότητας σε ένα υπόγειο στρώμα, όπου δύο οδεύσεις. Η μια ζεστή και η άλλη κρύα, ανοίγονται στον ταμιευτήρα για εξαγωγή / έγχυση των υπόγειων υδάτων [61]. Κατά συνέπεια, αυτό το είδος συστημάτων UTES χαρακτηρίζεται από τον αποκλεισμό των ανθρωπογενών δεξαμενών, κάτι το οποίο αποφέρει χαμηλότερο επενδυτικό κόστος ως πλεονέκτημα [62]. Παρόλα αυτά, πρέπει να ληφθούν υπόψη ειδικές εκτιμήσεις προκειμένου να επιτευχθεί η κατάλληλη απόδοση για το ATES. Θα πρέπει να ληφθεί υπόψη ότι οι ταμιευτήρες στα ATES είναι διαπερατοί και, επομένως, είναι απαραίτητο να επιλεγεί ένα κατάλληλο μέσο αποθήκευσης με το οποίο αποφεύγεται ο κίνδυνος μόλυνσης από χημικά. Επομένως, το νερό είναι συνήθως το μέσο αποθήκευσης που χρησιμοποιείται σε αυτά τα συστήματα [63]. Ένα άλλο πλεονέκτημα που έχουμε είναι η υψηλή ειδική θερμότητα που παρέχεται από το νερό.

Εκτός από τον περιορισμό του μέσου αποθήκευσης, ένα ATES έχει ένα επιπλέον μειονέκτημα. Ότι αυτού του είδους τα συστήματα δεν μπορούν να μονωθούν και, κατά συνέπεια έχουμε, υψηλότερες απώλειες θερμότητας στο έδαφος [64,65]. Κατά συνέπεια, μπορούν να χρησιμοποιηθούν ταμιευτήρες με μόνο χαμηλούς φυσικούς ρυθμούς ροής μέσω του συστήματος αποθήκευσης ή λειτουργούν σε μικρότερο εύρος θερμοκρασιών με υψηλότερους ρυθμούς ροής προκειμένου να διατηρηθούν αποδεκτές οι απώλειες θερμότητας [38]. Ο Nono et al. [38] επισημαίνει ότι για μεγαλύτερους όγκους αποθήκευσης, οι σχετικές απώλειες θερμότητας τείνουν να μειώνονται επειδή η περιοχή μέσω της οποίας η θερμότητα έχασε μειώνεται ανά όγκο.

## 2.4 Αποθήκευση θερμικής ενέργειας με γεώτρηση (BTES)

Η ιδέα που χρησιμοποιείται για την αποθήκευση ενέργειας σε συστήματα BTES είναι σύμφωνη με την προηγούμενη μέθοδο. Αυτά τα συστήματα αποθηκεύουν την επιπλέον θερμότητα χρησιμοποιώντας το χώμα ή / και βράχο [66]. Έτσι, το ίδιο το στρώμα εδάφους είναι το μέσο αποθήκευσης [67]. Ως εκ τούτου, χρησιμοποιούνται πολλές κατακόρυφες οπές για την αποθήκευση της συλλεγόμενης θερμότητας και, συνήθως, το νερό χρησιμοποιείται ως φορέας σε αυτούς τους εναλλάκτες θερμότητας γεωτρήσεων που μεταφέρουν τη θερμότητα μεταξύ νερού και εδάφους [68,69]. Σε αντίθεση με το ATES, αυτά τα συστήματα δεν περιορίζονται σε συγκεκριμένες συνθήκες σχετικά με τους κινδύνους μόλυνσης [70]. Ως αποτέλεσμα, το BTES θεωρείται συχνά ως προτιμώμενη επιλογή έναντι του ATES [71]. Ωστόσο, η απόδοση του συστήματος BTES επηρεάζεται σε μεγάλο βαθμό από τις κλιματικές συνθήκες [72]. Κατά συνέπεια, ενδέχεται να σημειωθούν υψηλές απώλειες θερμότητας σχηματίζοντας έναν περιορισμό παρόμοιο με αυτόν του ATES [69]. Επίσης σε σύγκριση με το ATES, η φάση εγκατάστασης αυτών των συστημάτων συνεπάγεται κόστος γεώτρησης που είναι σημαντικά υψηλότερο και, επομένως, υψηλότερο αρχικό κόστος και κεφάλαιο [73,74].

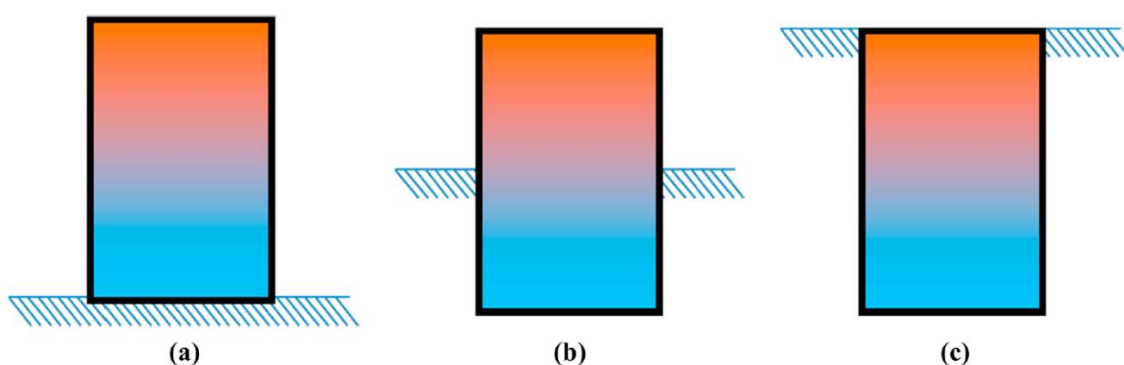
Το σύστημα BTES είναι κατασκευασμένο έτσι ώστε οι γεωτρήσεις να ανοίγονται πρώτα στο έδαφος έως ένα ορισμένο βάθος και, στη συνέχεια, πολλοί κάθετα προσανατολισμένοι σωλήνες με σχήμα U εισάγονται σε αυτές τις οπές σχηματίζοντας τους λεγόμενους εναλλάκτες θερμότητας μέσω των οποίων ένας φορέας θερμότητας ( δηλαδή νερό) περνά [75]. Το βέλτιστο βάθος των γεωτρήσεων εξαρτάται από διάφορους παράγοντες, όπως η θερμική αγωγιμότητα του εδάφους, η φυσική θερμοκρασία στο έδαφος, η στάθμη των υπόγειων υδάτων, το προφίλ φορτίου θερμότητας και η απόσταση από άλλα παρόμοια συστήματα αποθήκευσης [73,76,77]. Εναλλακτικά, οι εναλλάκτες θερμότητας γεωτρήσεων μπορούν να τοποθετηθούν οριζόντια σε κάποια σύστημα BTES [78,79], το οποίο οδηγεί σε συγκριτικά χαμηλότερο κόστος γεώτρησης για τέτοια συστήματα λόγω των χαμηλότερων βάσεων από αυτά των κατακόρυφων γεωτρήσεων [80].

Παρά το χαμηλότερο κόστος εγκατάστασης σε οριζόντιο προσανατολισμό, παρατηρείται ότι λόγω της μεγάλης περιοχής διασύνδεσης μεταξύ των οριζόντια προσανατολισμένων σωλήνων και του εδάφους, οι απώλειες θερμότητας αποθήκευσης ενδέχεται να αυξηθούν και, κατά συνέπεια, η αναλογία επιφάνειας προς όγκο ( $A / V$ ) θα πρέπει να διατηρείται στο ελάχιστο για να μειώνονται οι απώλειες στο περιβάλλον έδαφος [81].

## 2.5 Αποθήκευση θερμικής ενέργειας σε δεξαμενή (TTES)

Σε αυτή την μέθοδο η θερμική ενέργεια αποθηκεύεται σε δεξαμενές που κατασκευάζονται τεχνητά από οπλισμένο σκυρόδεμα ή ανοξείδωτο χάλυβα και, συνήθως, το νερό θεωρείται ως το ευνοϊκότερο μέσο αποθήκευσης [82]. Λόγω της μεγάλης έκτασης που προκύπτει από την εποχιακή αποθήκευση, αυτές οι δεξαμενές νερού μονώνονται συχνά με ένα παχύ στρώμα μόνωσης [83]. Λόγω του μεγάλου όγκου που απαιτείται και της διαθεσιμότητας χώρου, αυτά τα συστήματα είναι θαμμένα είτε πλήρως είτε μερικώς στο έδαφος.

Ωστόσο, σε ορισμένες περιπτώσεις δεξαμενές αποθήκευσης με μεγάλο όγκο μπορεί και να κατασκευαστούν εκτός του εδάφους (βλ. Εικ. 2.3). Αυτές οι δεξαμενές λειτουργούν χρησιμοποιώντας στρωματοποίηση στην οποία το μέσο αποθήκευσης στη δεξαμενή είναι θερμότερο στην κορυφή από αυτό στο κάτω μέρος λόγω θερμικής πλευστότητας. Το κρύο νερό έχει μεγαλύτερη πυκνότητα από το ζεστό νερό στην κορυφή και, ως εκ τούτου, συγκεντρώνεται στο κάτω μέρος της δεξαμενής. Κατά συνέπεια, σχηματίζεται μια περιοχή κλίσης θερμότητας μεταξύ αυτών των δύο περιοχών [84]. Η περιοχή αυτή θεωρείται ως ένα δυναμικό φυσικό φράγμα που εμποδίζει την ανάμιξη του ζεστού νερού με κρύο. Επομένως, είναι ζωτικής σημασίας να διατηρηθεί αυτή η περιοχή όσο το δυνατόν μικρότερη, γεγονός που οδηγεί σε μικρότερο αποτέλεσμα ανάμιξης και, συνεπώς, λιγότερες θερμικές απώλειες από τη δεξαμενή που επηρεάζουν θετικά την απόδοση του συστήματος [84]

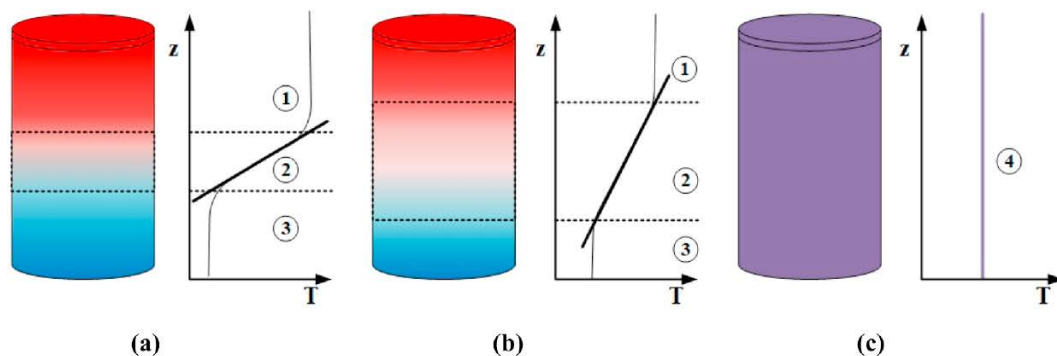


Εικ. 2.3 Διαφορετικοί τύποι κατασκευής δεξαμενών ζεστού νερού μεγάλης κλίμακας (α): πάνω από το έδαφος, (β) μερικώς θαμμένη και (γ) πλήρως θαμμένη

Το Σχ. 2.4 απεικονίζει την περιοχή που αναφέρθηκε ανωτέρω και τους διαφορετικούς βαθμούς στρωματοποίησης μέσα σε μια δεξαμενή αποθήκευσης για την ίδια ποσότητα αποθηκευμένης θερμότητας. Στην περίπτωση (α): η περιοχή της θερμοκλίνης είναι μικρή σε σύγκριση με τη δεύτερη περίπτωση (β). Αυτό έχει ως αποτέλεσμα μια μεγάλη κλίση θερμοκρασίας ( $T / Z$ ) μεταξύ των θερμών και κρύων περιοχών όπως φαίνεται στο Σχ. 2.4 (α). Στην περίπτωση (β): η κλίση θερμοκρασίας μεταξύ των δύο περιοχών είναι σχετικά μικρότερη από εκείνη στην περίπτωση (α) (δηλ.  $(T / Z)_\alpha > (T / Z)_\beta$  λόγω διεύρυνσης στην περιοχή της θερμοκλίνης όπως φαίνεται το Σχ. 2.4 (b) [85]. Κατά συνέπεια, η αποθήκευση στην περίπτωση (β) θεωρείται λιγότερο στρωματοποιημένη από την περίπτωση (α).

Σε σύγκριση με τις δυο προηγούμενες περιπτώσεις, η αποθήκευση στην περίπτωση (c) του σχήματος 2.4 παρατηρείται σε μία ομοιόμορφη θερμοκρασία και, επομένως, η περιοχή της θερμοκλίνης εξαφανίζεται τελείως με αποτέλεσμα μια πλήρως μικτή αποθήκευση (μη στρωματοποιημένη αποθήκευση) [85].

Ένας βασικός παράγοντας για μια καλή θερμική διαστρωμάτωση σε αυτού του είδους τα TES είναι οι θύρες εισόδου και εξόδου νερού (π.χ. τοποθεσία σχεδιασμού). Ο σχεδιασμός (π.χ. γεωμετρία) της εισόδου και της εξόδου έχει αντίκτυπο στη διαστρωμάτωση και, επομένως, επίδραση στην ενεργειακή απόδοση του TES [86]. Συγκεκριμένα, μια ακατάλληλη συσκευή εισόδου δημιουργεί τοπική αναταραχή με αποτέλεσμα την ανάμιξη [87]. Αυτός ο τοπικός στροβιλισμός σχηματίζεται επειδή το εισερχόμενο νερό ρέει διαδοχικά, συντίθεται μια ελεύθερη στρώση διάτμησης που οδηγεί σε έναν πίδακα στη θύρα εισόδου προκαλώντας ανατάραξη του νερού μέσα στο TES όπως φαίνεται στο Σχ. 2.5 [88]. Επιπλέον, εάν το εισερχόμενο νερό έχει θερμοκρασία διαφορετική από εκείνη του νερού στη θύρα εισόδου στο TES, τότε η πλευστότητα οδηγεί τον πίδακα προς τα πάνω ή προς τα κάτω μεγιστοποιώντας την περιοχή ανάμιξης [89]. Όλοι αυτοί οι προαναφερθέντες μηχανισμοί παράγουν μαζί μια καταστροφή της διαστρωμάτωσης καθώς σχηματίζουν ανάμιξη στην περιοχή εισόδου του TES.

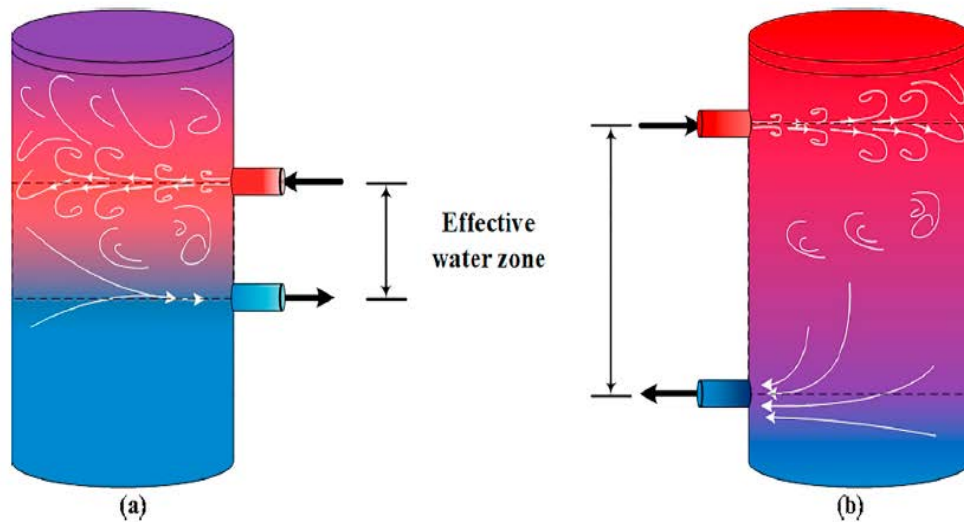


Εικ. 2.4 Διαφορετικά επίπεδα στρωματοποίησης για την ίδια ποσότητα αποθηκευμένης θερμότητας (α) υψηλή στρωματοποίηση, (β) μέτρια στρωματοποίηση, ενώ (γ) πλήρως αναμεμιγμένη αποθήκευση. (1) Καυτή περιοχή, (2) θερμοκλίνη, (3) ψυχρή περιοχή και (4) ομοιόμορφη θερμοκρασία.

Από την άλλη πλευρά, καθώς το νερό ρέει έξω από το TES, αντλείται ένα μείγμα νερού από διαφορετικά επίπεδα. Έτσι, αυτός ο μηχανισμός μπορεί να οδηγήσει σε ανάμιξη κοντά στη θύρα εξόδου (βλ. Εικ. 2.5). Ως αποτέλεσμα, είναι σημαντικό να εντοπίζονται οι θύρες εισόδου και εξόδου όσο το δυνατόν πιο κοντά στην κορυφή και στο κάτω μέρος του χώρου αποθήκευσης, αντίστοιχα. Ένας τέτοιος τρόπος εγκατάστασης παράγει μια ομοιόμορφη ροή νερού και, κατά συνέπεια, μπορεί να αποφευχθεί η καταστροφή της διαστρωμάτωσης (δηλαδή ανάμιξη). Επιπλέον, βοηθά στη μείωση του όγκου νεκρού νερού και τη μεγιστοποίηση της αποτελεσματικής ζώνης νερού όπως φαίνεται στο Σχ. 2.5 (η διακεκομμένη περιοχή και στις δύο δεξιαμενές αποθήκευσης).

Επιπλέον, είναι επίσης σημαντικό να δοθεί προσοχή στον σχεδιασμό εισαγωγής νερού. Ο βέλτιστος σχεδιασμός παράγει μια ομοιόμορφη κυκλοφορία νερού που αποδίδει βελτίωση της διαστρωμάτωσης [90]. Κατά συνέπεια, οι θύρες νερού (δηλ. Θέση και σχεδιασμός) επηρεάζουν σημαντικά τη διαστρωμάτωση.

Αυτός ο τύπος εποχιακού TES είναι ευρέως γνωστός για την υψηλή ειδική θερμοχωρητικότητα. Ωστόσο, ένα βασικό μειονέκτημα αυτών των συστημάτων είναι το αξιοσημείωτο υψηλό κόστος κατασκευής που αποδίδεται ουσιαστικά στην εκσκαφή, τη δομή και τη μόνωση.



Εικ..2.5 Σχηματική αναπαράσταση της ροής του νερού, φαινόμενα ανάμιξης, θέσεις εισόδου / εξόδου νερού και αποτελεσματική ζώνη νερού για θερμικά στρωματοποιημένο TES με απευθείας θύρες φόρτισης / εκφόρτισης ([89,91]).

## 2.6 Αποθήκευση θερμικής ενέργειας σε λάκκο (PTES)

Αυτό το είδος εποχιακού συστήματος TES θεωρείται συχνά παρόμοιο με το προηγούμενο (TTES) από λειτουργική άποψη, καθώς και τα δύο εφαρμόζουν την έννοια της διαστρωμάτωσης για την αποθήκευση ενέργειας στο TES. Σε αντίθεση με τα συστήματα TTES, η θερμική ενέργεια αποθηκεύεται σε ένα ανασκαμμένο έδαφος που περικλείεται με στεγανές επενδύσεις [92]. Διαφορετικά, μπορεί επίσης να αποθηκευτεί σε τεχνητό ταμιευτήρα από οπλισμένο σκυρόδεμα ή ανοξείδωτο χάλυβα, ο οποίος είναι κατασκευασμένος κάτω από την επιφάνεια του εδάφους ή κοντά στην επιφάνεια [38]. Ωστόσο, η τελευταία ιδέα παράγει υψηλότερο κόστος κατασκευής από την προηγούμενη. Επιπλέον, η αποθήκευση κατασκευάζεται συχνά χρησιμοποιώντας μια γεωμετρία με κλίση, όπως το σχήμα πυραμίδας με ορθογώνια διατομή και ανάποδη τοποθέτηση, ή έναν περικομμένο κώνο με κυκλική διατομή [93].

Σε αυτού του είδους τα TES χρησιμοποιείται συχνά νερό ως μέσο αποθήκευσης. Παρ' όλα αυτά, ένα μείγμα νερού και πετρωμάτων χρησιμοποιείται μερικές φορές ως μέσο αποθήκευσης σε ορισμένους υπάρχοντες λάκκους και, στη συνέχεια, η αποθήκευση ονομάζεται gravelwater pit. Επιπλέον, είναι σημαντικό να επισημανθεί η χαμηλότερη ειδική θερμική ικανότητα του μίγματος χαλικιού-νερού από εκείνη του νερού και, κατά συνέπεια, ο όγκος της αποθήκευσης



πρέπει να είναι περίπου 50% υψηλότερος σε σύγκριση με αυτόν του TES για να αντισταθμιστεί η διαφορά στη πυκνότητα ενέργειας αποθήκευσης [38,55].

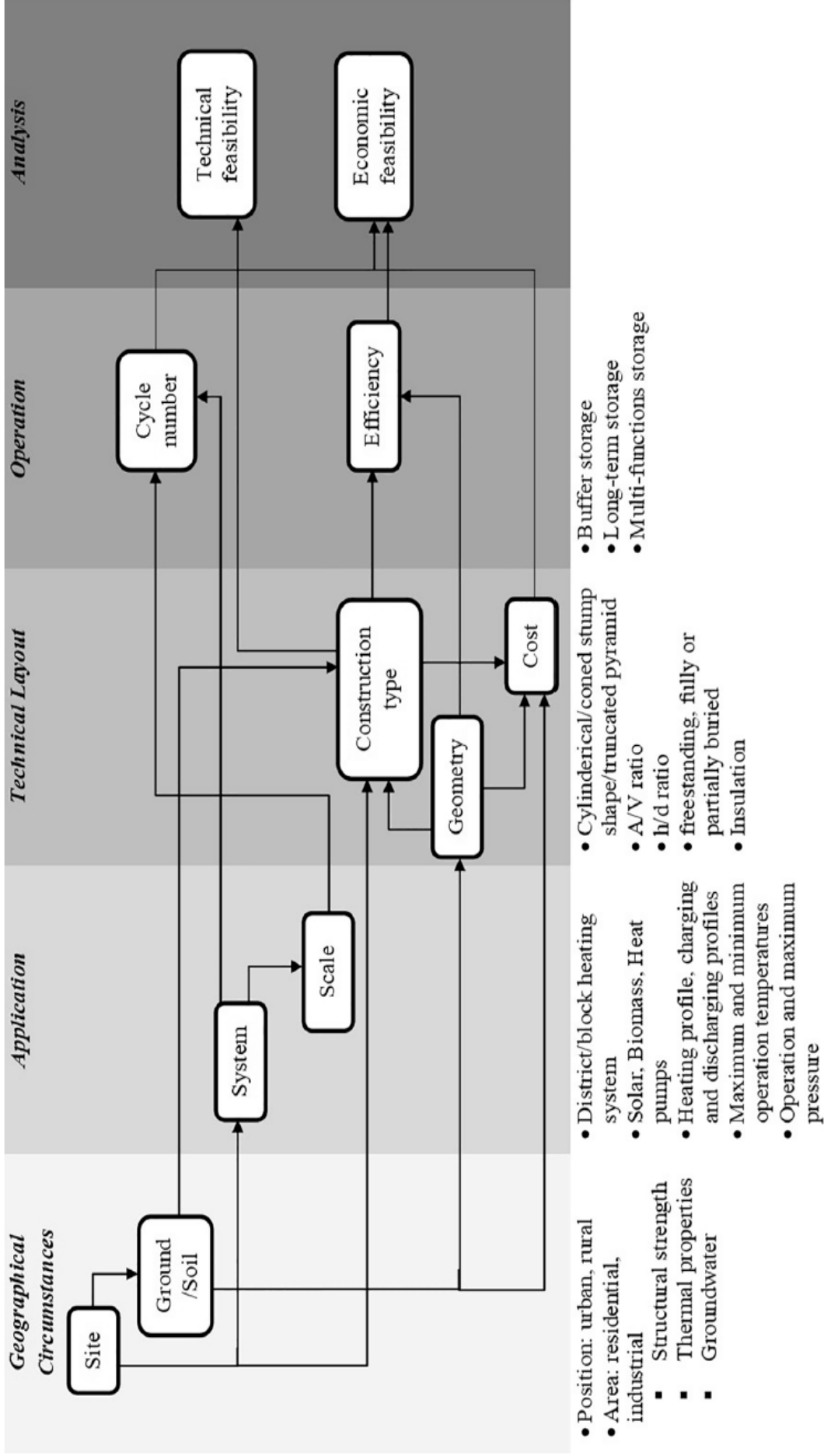
## **2.7 Κατασκευή υπογείων συστημάτων TES θερμού ύδατος**

Η επιλογή μιας κατάλληλης εποχικής τεχνολογίας TES θεωρείται συχνά μια περίπλοκη διαδικασία που λαμβάνει υπόψη διάφορους παράγοντες (π.χ. γεωλογικούς παράγοντες, εφαρμογή συστήματος, λειτουργία συστήματος κ.λπ.). Ωστόσο, η κατασκευή μιας επιλεγμένης τεχνολογίας TES είναι ακόμα πιο πολύπλοκη καθώς εξαρτάται από ένα ευρύ φάσμα αλληλένδετων παραγόντων. Τέτοιοι παράγοντες είναι οι υδρο-γεωλογικές συνθήκες, η εκάστοτε εφαρμογή, η λειτουργία του συστήματος, το κόστος και η σκοπιμότητα της επιλεγμένης τεχνολογίας από οικονομικής και τεχνικής άποψης [94].

Οι πιο σημαντικές παράμετροι που επηρεάζουν την κατασκευή των υπόγειων TES φαίνονται σχηματικά στο Σχ. 2.6. Σε αυτό, φαίνεται ξεκάθαρα ότι οι παράμετροι που επηρεάζουν το έργο κατανέμονται σε διαφορετικές κατηγορίες μετά την επίδρασή τους στον επιθυμητό τύπο αποθήκευσης.

Πρώτον, η κατάσταση του εδάφους επηρεάζει άμεσα το κόστος, ενώ η τοποθεσία και το αντίστοιχο χώμα της τοποθεσίας έχουν έμμεσο αντίκτυπο στη γεωμετρία (μέγιστη διαθέσιμη επιφάνεια, μέγιστο βάθος κ.λπ.). Στη συνέχεια, το σύστημα παροχής θερμότητας στο οποίο ενσωματώνεται η αποθήκευση επηρεάζεται σε μεγάλο βαθμό από τον τύπο του συστήματος αποθήκευσης (buffer ή μακροπρόθεσμη αποθήκευση) μέσω του αριθμού των κύκλων φόρτισης από λειτουργικής άποψης.

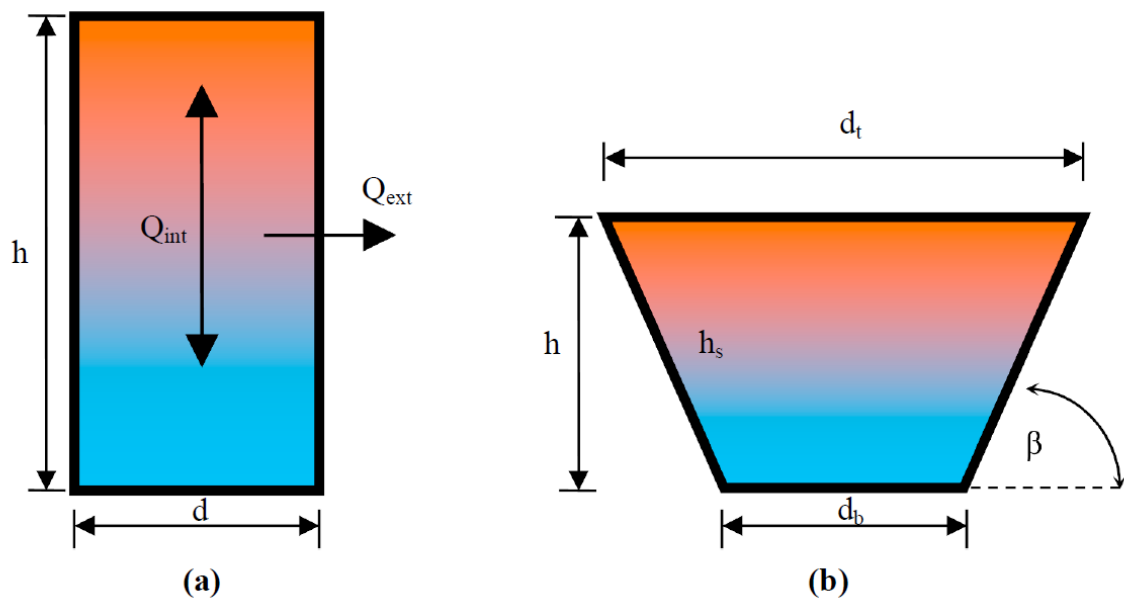
Αυτό έχει επίδραση στον τύπο κατασκευής της αποθήκευσης, ο οποίος στη συνέχεια επηρεάζει το επενδυτικό κόστος και, επομένως, ο αριθμός κύκλων έχει επίσης αντίκτυπο στο επενδυτικό κόστος. Ως εκ τούτου, είναι δύσκολο να προσδιοριστεί ο βέλτιστος τύπος αποθήκευσης και η αντίστοιχη κατασκευή του χωρίς προσομοιώσεις [95].



Εικ. 2.6 Σχηματική αναπαράσταση των παραγόντων που επηρεάζουν περισσότερο την κατασκευή υπόγειων TES μεγάλης κλίμακας και την οικονομική σκοπιμότητά τους ([75]).

### 2.7.1. Γεωμετρία

Σε υπόγεια συστήματα TES, σημειώνεται ότι η βέλτιστη γεωμετρία για την αποθήκευση της δεξαμενής είναι το κατακόρυφο κυλινδρικό σχήμα με κυκλική διατομή, ενώ οι λάκκοι είναι χτισμένοι σε γεωμετρία είτε κολόνας πυραμίδας με ορθογώνια διατομή είτε κόλουρου κώνου με κυκλική διατομή. Τέτοια συστήματα TES έχουν ουσιαστικά όγκο έως και αρκετές χιλιάδες κυβικά μέτρα για να μπορέσουν να επιτύχουν εποχιακή λειτουργία. Ένας μεγάλος όγκος ενός τέτοιου συστήματος το οποίο είναι υπόγειο (θαμμένης αποθήκευσης) τείνει να ελαχιστοποιεί τις εξωτερικές θερμικές απώλειες μέσω του περιβλήματος για τέτοια συστήματα μεγάλης κλίμακας. Αυτό συμβαίνει λόγω του μειούμενου λόγου επιφάνειας προς όγκο ( $A / V$ ) και, επομένως, είναι απαραίτητος ο σχεδιασμός του συστήματος αποθήκευσης με μέγιστο όγκο και ελάχιστη επιφάνεια [96]. Η εικ. 2.7 δείχνει δύο γεωμετρίες για TES, η μια ένα είναι το κυλινδρικό σχήμα για τη δεξαμενή και η άλλη για το λάκκο (κόλουρος κώνος ή πυραμίδα).



Εικ. 2.7. Γεωμετρία υπόγειας δεξαμενής εποχικής αποθήκευσης θερμικής ενέργειας με εσωτερικές και εξωτερικές απώλειες: (α) δεξαμενή, (β) λάκκος.

**Πίνακας 2.1** Παραδείγματα γεωμετρίας (μερικώς) θαμμένων δεξαμενών που εγκαταστάθηκαν τις τελευταίες δύο δεκαετίες σε σχέση με τον όγκο ( $V$ ), τη συνολική επιφάνεια ( $A$ ), τη γωνία κλίσης ( $\beta$ ), τον λόγο διαστάσεων ( $h/d$ ) και την αναλογία περιοχής προς όγκο ( $A/V$ ) ([54,97–100]).

Location/name	Country	Year of Inception	$V$ [m <sup>3</sup> ]	$A$ [m <sup>2</sup> ]	$\beta$ [°]	$h/d$ [-]	$A/V$ [1/m]
<i>Tank TES</i>							
Hamburg-Bramsf.	DE	1996	4500	1650	90	10.7/25.7	0.37
Friedrichshafen-Wiggenhausen <sup>a</sup>	DE	1996	12,000	2796	90	19.4/32.4	0.23
Ilmenau	DE	1998	300	262	90	8.0/7.2	1.14
Hanover-Kronsberg <sup>a</sup>	DE	2000	2750	1135	90	11.1/19.0	0.41
Attenkirchen	DE	2001	500	350	90	8.0/8.9	0.7
Crailsheim-Hirt.	DE	2006	480	362	90	14.5/6.3	0.75
Munich-Acker. <sup>a</sup>	DE	2006	6000	1800	90	16.1/24.6	0.30
<i>Pit TES</i>							
Chemnitz (GW)	DE	1997	8000	3375	90	7.0/39.0	0.42
Egenhausen (SW)	DE	1997	300	115	60	4.0/8.7	1.2
Augsburg (GW)	DE	1997	6500	n/a	90	n/a	n/a
Marstal (SW)	DK	1999	3500	1850	34	7/21.15	0.53
Steinfurt-B. (GW)	DE	1999	1500	1305	50	4.0/24.25	0.87
Lyngby (HW)	DK	2002	500	n/a	n/a	n/a	n/a
Marstal I (HW) <sup>b</sup>	DK	2003	10,000	5600	27	6.5/40.5	0.56
Eggenstein-L. (HW)	DE	2007	4500	1964	35	8/27.7	0.44
Dronninglund (HW)	DK	2014	60,000	13,670	27	16/60.5	0.23

DE: Germany, DK: Denmark.

HW: Hot-Water, GW: Gravel-Water, SW: Sand/soil-Water.

n/a: Not available.

<sup>a</sup> Cylindrical geometry with truncated cone bottom/top.

<sup>b</sup> Inverted pyramid trunk.

Είναι επίσης σημαντικό να επισημανθούν οι άλλες θερμικές απώλειες που είναι οι εσωτερικές απώλειες. Τέτοιες απώλειες προκύπτουν λόγω της απώλειας της στρωματοποίησης στην αποθήκευση Έτσι, αυτός ο τύπος απωλειών εξαρτάται σημαντικά από το μέσο αποθήκευσης (π.χ. νερό, χαλίκι-νερό), τον λόγο διαστάσεων ( $h/d$ ) και τις γεωμετρίες εισόδου / εξόδου ροής, ενώ οι εξωτερικές θερμικές απώλειες εξαρτώνται σε μεγάλο βαθμό από την ( $A/V$ ) αναλογία και τα στρώματα μόνωσης. Κατά συνέπεια, είναι σημαντικό να καταλάβουμε έναν γεωμετρικό συμβιβασμό που αποδίδει ένα βέλτιστο ( $h/d$ ) και ένα πλεονεκτικό ( $A/V$ ) [54]. Επιπλέον, ο λόγος διαστάσεων ( $h/d$ ) υπολογίζεται ελαφρώς διαφορετικός για αποθήκευση λάκκων από αυτόν της αποθήκευσης δεξαμενής. Κατά συνέπεια, η μέση διάμετρος της αποθήκευσης pit χρησιμοποιείται συνήθως για υπολογισμούς. Αυτή η μέση διάμετρος είναι ο μέσος όρος των άνω και κάτω διαμέτρων.

Επιπλέον, οι Dincer και Rosen επεσήμαναν ότι οι συνολικές απώλειες θερμότητας μπορούν να ελαχιστοποιηθούν αποτελεσματικά, εάν το ύψος και η ακτίνα είναι ίδια. Επομένως, η αναλογία διαστάσεων 1 θεωρείται η πιο πλεονεκτική αναλογία για εποχιακά συστήματα TES. Παρ'όλα αυτά, ορισμένες υδρο-γεωλογικές συνθήκες και γεωλογικές διαμορφώσεις παίζουν βασικό ρόλο στον περιορισμό των υπόγειων συστημάτων TES από την πραγματοποίηση της

στοχευμένης αναλογίας διαστάσεων και, έτσι εφαρμόστηκαν λόγοι διαστάσεων χαμηλότεροι από το 1 για πολλές εφαρμογές (βλ. Πίνακα 2).

Επιπλέον, οι δεξαμενές αποθήκευσης ζεστού νερού κατασκευάζονται επίσης ως ανεξάρτητες δεξαμενές στο έδαφος. Εάν ο όγκος της δεξαμενής ωστόσο, υπερβαίνει ένα συγκεκριμένο μέγεθος, συχνά θάβονται μερικώς ή πλήρως στο έδαφος για διαφορετικούς λόγους (π.χ. ο μεγάλος όγκος που απαιτείται και η διαθεσιμότητα χώρου).

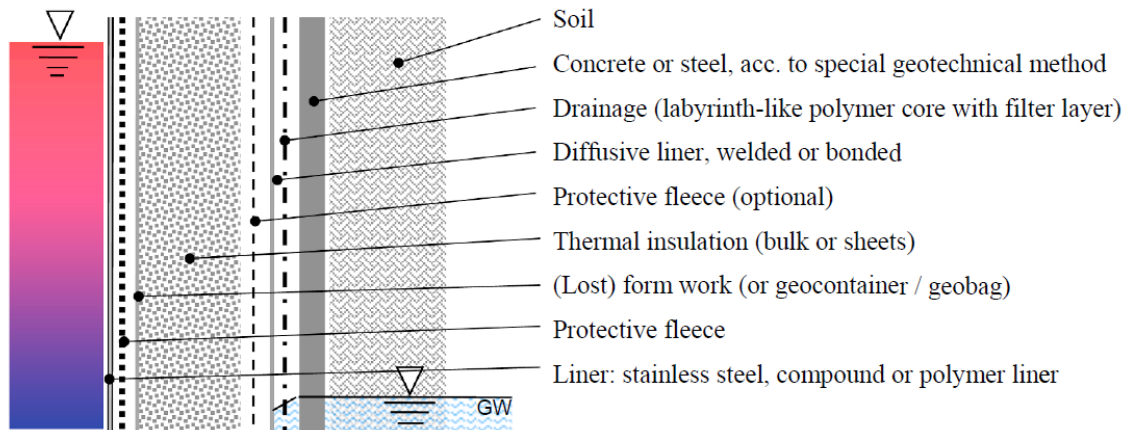
Μια διαμόρφωση στην οποία θάβονται υπογείως οι δεξαμενές μπορεί να αυξήσει το αρχικό κόστος λόγω των πρόσθετων δαπανών για εκσκαφή. Βέβαια θα πρέπει αν ληφθεί υπόψη πως παρά το μικρότερο κόστος εκσκαφής για μερικώς βυθισμένες δεξαμενές, οι δεξαμενές μερικής ταφής απαιτούν επιπλέον στρώματα μόνωσης στην κορυφή.

### **2.7.2 Μονωτικό κέλυφος υπογείων συστημάτων TES**

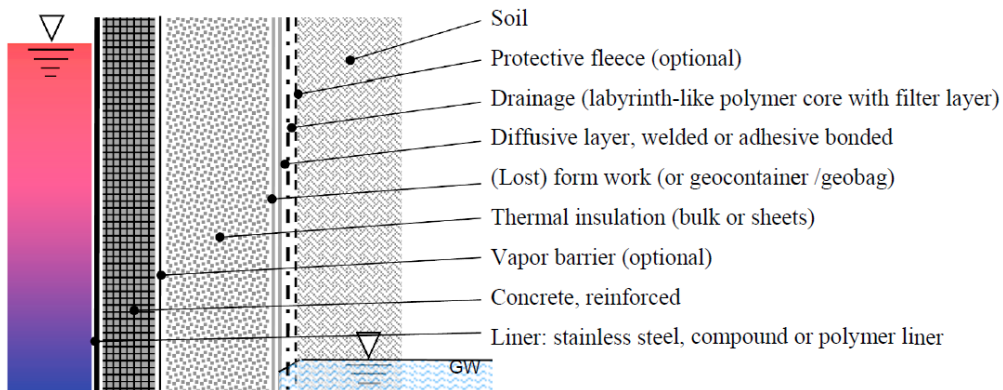
Σε υπόγεια συστήματα TES, εξωτερικές θερμικές απώλειες λαμβάνουν συχνά χώρα λόγω των μηχανισμών μεταφοράς θερμότητας μεταξύ της επιφάνειας της δεξαμενής και του εδάφους λόγω της μεγάλης επιφάνειας επαφής.

Κατά συνέπεια, είναι σημαντικό να δοθεί προσοχή στην ελαχιστοποίηση των θερμικών απωλειών για να αυξηθεί η απόδοση. Οι δεξαμενές τέτοιας μεγάλης κλίμακας συνήθως περικλείονται από παχιά μονωτικά στρώματα που σχηματίζουν ένα σύνθετο τοίχωμα όπως φαίνεται στο Σχ. 2.8. Τυπικά μονωτικά είναι πολυουρεθάνη, υαλοβάμβακας, διογκωμένη πολυστερίνη (EPS), αφρώδες γυαλί και εξηλασμένη πολυστερίνη (XPS).

Στο σύνθετο τοίχωμα, τα μονωτικά στρώματα μπορούν να εισαχθούν στο περίβλημα είτε εντός είτε εκτός του κύριου κατασκευαστικού υλικού (σκυρόδεμα ή χάλυβας). Αυτή η κρίσιμη διαφορά παρουσιάζεται στα σχήματα 2.8 και 2.9.



Εικ. 2.8 Διάταξη σύνθετου πλευρικού τοιχώματος για εποχιακό σύστημα TES, μόνωση στο εσωτερικό σε σχέση με τη δομή σκυροδέματος / χάλυβα.



Εικ.2.9 Διάταξη ενός σύνθετου πλευρικού τοιχώματος για εποχιακό σύστημα TES, μόνωση εξωτερική σε σχέση με τη δομή σκυροδέματος / χάλυβα.

Επιπλέον, ένα κοινό ζήτημα που παρατηρείται σε συστήματα αποθήκευσης μεγάλης κλίμακας είναι η μεταφορά υγρασίας και, επομένως, οι επενδύσεις εισάγονται στην εσωτερική πλευρά της δεξαμενής για παροχή στεγανότητας που αποτρέπει τη διαρροή νερού. Επιπλέον, οι επενδύσεις βοηθούν στη μείωση των απωλειών θερμότητας καθώς παρέχουν στεγανότητα έναντι της μεταφοράς ατμών μέσω των τοιχωμάτων, διαφορετικά ο ατμός μπορεί να συγκεντρωθεί στα στρώματα μόνωσης προκαλώντας ζημιά και, συνεπώς, υψηλότερες απώλειες θερμότητας. Συνήθως, οι επενδύσεις κατασκευάζονται από ανοξείδωτο χάλυβα, πολυμερή όπως πολυαιθυλένιο υψηλής και χαμηλής πυκνότητας (HDPE, LDPE) ή πολυπροπυλένιο (PP) και ελαστομερή όπως μονομερές αιθυλενίου προπυλενίου διενίου

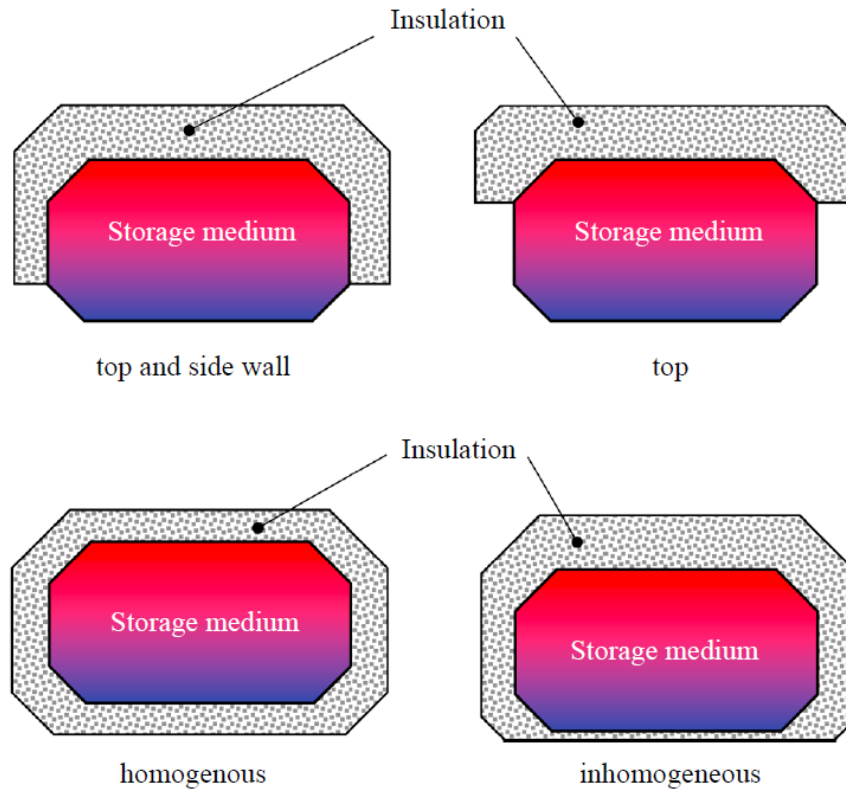
(EPDM) και καουτσούκ βουτυλίου (IIR). Εναλλακτικά, μπεντονίτης, άσφαλτος, γεωμεμβράνες και σκυρόδεμα υψηλής απόδοσης μπορούν επίσης να χρησιμοποιηθούν.

Επιπλέον, αξίζει να αναφερθεί ότι οι απώλειες θερμότητας μέσω του εδάφους λαμβάνουν χώρα και στη διεπαφή εδάφους-αέρα. Επομένως, συνιστάται ιδιαίτερα να περικλείετε το περίβλημα αποθήκευσης (δεξαμενή ή λάκκος) με μόνωση. Υπάρχουν διάφορες επιλογές για τη διανομή της μόνωσης γύρω από το κέλυφος.

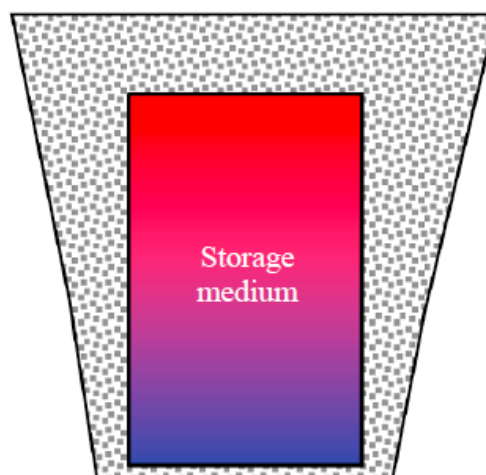
Για παράδειγμα, συνιστάται μερικές φορές να μην μονώνεται ο πυθμένας του κελύφους, ενώ σε άλλες περιπτώσεις (π.χ. παρουσία υπόγειων υδάτων) απαιτείται η μόνωση του πυθμένα όπως απεικονίζεται στο Σχ. 2.10. Κατά συνέπεια, είναι πολύ σημαντικό να προσδιοριστεί η βέλτιστη κατανομή της μόνωσης. Παρ' όλα αυτά, ορισμένοι παράγοντες διαδραματίζουν πρωταρχικό ρόλο στο αν θα πρέπει να υπάρχει μόνωση πυθμένα ή όχι. Τέτοιοι παράγοντες είναι οι οριακές συνθήκες της συγκεκριμένης περιοχής (θερμοκρασία εδάφους, παρουσία υπόγειων υδάτων, ροή υπόγειων υδάτων) και η λειτουργία αποθήκευσης (εύρος θερμοκρασίας).

Είναι σαφές ότι το κόστος αυξάνεται καθώς η μόνωση εφαρμόζεται και για τα πλευρικά τοιχώματα και το πάνω μέρος του κελύφους και, ως εκ τούτου, το κόστος προς το όφελος πρέπει επίσης να συμπεριληφθεί στα πράγματα που πρέπει να ελεγχθούν και να μελετηθούν.

Παρά τις διαφορετικές επιλογές για τη βέλτιστη κατανομή της μόνωσης, συνιστάται επίσης μερικές φορές να εφαρμοστεί μόνωση σε ένα ανομοιογενές σχέδιο (περικομμένες γεωμετρικές μόνωσης σε σχήμα κώνου / πυραμίδας) στο οποίο η μόνωση έχει περισσότερο πάχος στην κορυφή και, στη συνέχεια το πάχος ελαχιστοποιείται με το βάθος όπως φαίνεται στο Σχ. 2.11. Το πλεονέκτημα αυτού του σχεδίου είναι η παροχή καλύτερης μόνωσης για την περιοχή στην οποία συγκεντρώνεται το ζεστό νερό, ενώ ο πυθμένας στον οποίο υπάρχει το κρύο νερό περιβάλλεται από μικρότερο μεν αλλά αποδεκτό δε πάχος μόνωσης. Αυτή η προσέγγιση θα μπορούσε να οδηγήσει σε χαμηλότερο κόστος και καλύτερη διαστρωμάτωση εντός του χώρου αποθήκευσης και συνεπώς σε καλύτερη απόδοση [101]



Εικ. 2.10. Τέσσερις επιλογές για τη βέλτιστη κατανομή της μόνωσης σε συνάρτηση με τη γεωμετρία, τη λειτουργία του συστήματος (στρωματοποίηση, αποθήκευση, φόρτιση και καθαρή θερμοκρασία επιστροφής) και τις οριακές συνθήκες (ιδιότητες εδάφους, υπόγεια ύδατα).



Εικ. 2.11 Βέλτιστη ανομοιογενής κατανομή μόνωσης λαμβάνοντας υπόψη την οικονομική σκοπιμότητα και την τεχνική απόδοση για τη διατήρηση της διαστρωμάτωσης σε καλύτερη κατάσταση και το κόστος ελάχιστο.



Επιπλέον, τα υπόγεια συστήματα TES γενικά δεν εφαρμόζονται μόνο σε μια σε συγκεκριμένη τοποθεσία. Παρ'όλα αυτά, υδρο-γεωλογικά πρότυπα έχουν τεθεί σε εφαρμογή τα τελευταία χρόνια σε ορισμένες ευρωπαϊκές χώρες και, ως εκ τούτου, παρέχονται με συνέπεια αρκετές χωρικές οριακές συνθήκες για την κατασκευή υπογείων TES (μερικώς ή πλήρως θαμμένων) για να αποφευχθούν οι επιπτώσεις τους στο γύρω έδαφος και περιβάλλον. Αυτό προκύπτει από το γεγονός ότι οι θερμικές ιδιότητες του περιβάλλοντος εδάφους εξαρτώνται μερικές φορές από την τοποθεσία, το χρόνο και τη θερμοκρασία. Επομένως, εάν επιτρέπονται ενεργειακές αλληλεπιδράσεις μεταξύ της αποθήκευσης και του εδάφους, τότε η θερμότητα μπορεί να μεταφερθεί στο έδαφος προκαλώντας αύξηση της θερμοκρασίας και, κατά συνέπεια, ξήρανση του εδάφους. Ένα άλλο ζήτημα που σχετίζεται με την υγρασία αφορά το γεγονός ότι η υψηλή περιεκτικότητα σε υγρασία στο έδαφος οδηγεί σε υψηλότερη θερμική αγωγιμότητα και, στη συνέχεια, προκαλεί υψηλότερες απώλειες θερμότητας. Επομένως, τέτοιες περιπτώσεις μπορούν να αλλάξουν σημαντικά τις θερμικές ιδιότητες του εδάφους οδηγώντας σε δυσμενείς επιπτώσεις και, συνεπώς, ο βέλτιστος σχεδιασμός των υπογείων TES εξαρτάται σε μεγάλο βαθμό από τη βαθιά κατανόηση της αλληλεπίδρασης μεταξύ του εδάφους και της ίδιας της δεξαμενής. Ως εκ τούτου, η προσομοίωση είναι ένα βασικό βοηθητικό εργαλείο για τον προσδιορισμό του βέλτιστου σχεδιασμού της αποθήκευσης και άλλων στόχων του εκάστοτε μελετητή.

Ως αποτέλεσμα, το κέλυφος των TTES εφαρμόζεται για να εκπληρώνει πολλούς βασικούς σκοπούς. Τέτοιοι σκοποί είναι η στεγανότητα στο μέσο αποθήκευσης (δηλ. Νερό) και των υδρατμών, μείωση των αγωγίμων θερμικών απωλειών και πρόληψη μεταφοράς υγρασίας από / προς το περιβάλλον έδαφος. Μια άλλη σημαντική πτυχή είναι η διάρκεια ζωής του μονωτικού κελύφους. Το κέλυφος πρέπει να είναι σχεδιασμένο και κατασκευασμένο ώστε να εξυπηρετεί όσο το δυνατόν περισσότερο με ελαχιστοποιημένο κόστος και, επομένως, πρέπει να αντέχει σε βλάβες ή περιστατικά αστοχίας. Ως εκ τούτου, προκειμένου να αυξηθεί η διάρκεια ζωής ενός κελύφους TES, ένας βέλτιστος σχεδιασμός και κατασκευή μπορεί να πραγματοποιηθεί μόνο εάν πραγματοποιηθεί λεπτομερής ανάλυση για τα διάφορα εξαρτήματα (π.χ. επενδύσεις, μονωτικά) και τις σχετικές ιδιότητές τους (π.χ. θερμική αγωγιμότητα, αντίσταση διαπερατότητας). Επομένως επίσης οι προσομοιώσεις μοντελοποίησης παίζουν βασικό ρόλο στην παροχή μιας τέτοιας απαιτούμενης ανάλυσης.

## ΚΕΦΑΛΑΙΟ 3<sup>ο</sup>

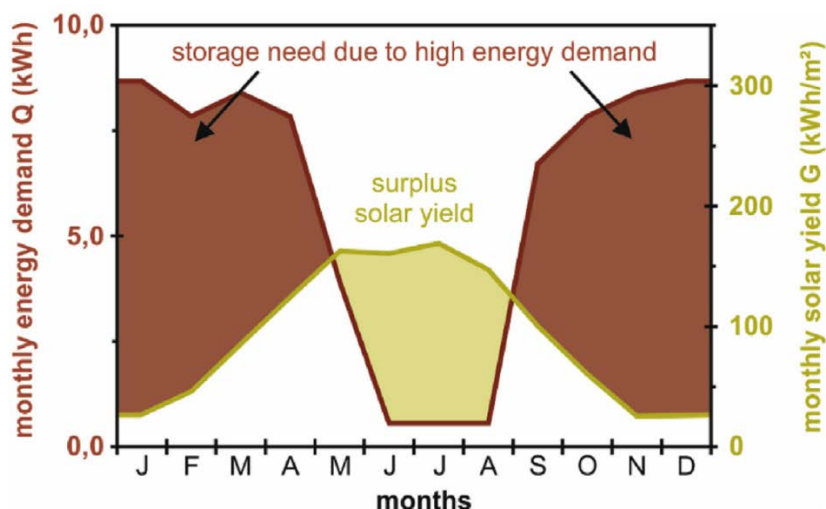
### 3.1 Τρέχουσες τεχνολογίες και μελλοντική πρόβλεψη

Η διαχείριση της αειφόρου ενέργειας στοχεύει στη μείωση του αποτυπώματος άνθρακα, χρησιμοποιώντας υψηλότερα μερίδια ανανεώσιμων πηγών ενέργειας μέσω έξυπνου συντονισμού της κεντρικής και αποκεντρωμένης προσφοράς και μέσω ολοκληρωμένων προτάσεων αποθήκευσης.

Ο μελλοντικός ενεργειακός εφοδιασμός, στην ιδανική περίπτωση, βασίζεται σε έναν συνδυασμό κυρίως κυμαινόμενων ανανεώσιμων πηγών όπως αιολική, βιομάζα, ηλιακή και γεωθερμική ενέργεια [102,103]. Αυτές οι πηγές είναι ιδιαίτερα απαραίτητες για τον αποκαρβονισμό του τομέα θέρμανσης, ψύξης και παροχής ζεστού νερού, ο οποίος είναι υπεύθυνος για ένα μεγάλο μέρος της κατανάλωσης ενέργειας. Σήμερα, ωστόσο, η παγκόσμια παραγωγή θέρμανσης χώρου και ζεστού νερού κυριαρχείται από την καύση ορυκτών καυσίμων. Από το 2010, παρά τα ευνοϊκά σχέδια πράσινης ενέργειας σε όλα τα πολιτικά επίπεδα, οι παγκόσμιες άμεσες εκπομπές από τη θέρμανση στα κτίρια δεν έχουν μειωθεί, αντιπροσωπεύοντας την ταχύτερα αναπτυσσόμενη τελική χρήση σε κτίρια [104].

Ο αργός ρυθμός του ενεργειακού μετασχηματισμού έχει πολλές αιτίες, εκ των οποίων μια είναι η υψηλή εξάρτηση των ανανεώσιμων πηγών από τις περιβαλλοντικές συνθήκες. Αυτές είναι δύσκολο να περιγραφούν, να προβλεφθούν και να ποσοτικοποιηθούν για την εγγύηση μιας αξιόπιστης προσφοράς ενέργειας. Τα συστήματα αποθήκευσης θερμικής ενέργειας (TES) προσφέρουν την ευκαιρία να συλλέξουν τη θερμική ενέργεια από διάφορες κυμαινόμενες ανανεώσιμες και μη ανανεώσιμες πηγές ανεξάρτητα από τη ζήτηση και να μεταφέρουν προσωρινά διαθέσιμη ενέργεια σε μόνιμα προσβάσιμη ενέργεια. Η αποθήκευση θερμικής ενέργειας επιτρέπει την εξομάλυνση της ζήτησης ενέργειας στις περιπτώσεις έντονης ζήτησης όπου δημιουργείται πρόβλημα στο δίκτυο διανομής [105,106]. Σε συνδυασμό με ανανεώσιμες πηγές ενέργειας, διευκολύνει τελικά την εξοικονόμηση στην κατανάλωση θερμότητας από τη μία πλευρά και την αντικατάσταση της θερμότητας που παρέχεται από τα ορυκτά καύσιμα από την άλλη [107–110].

Όλοι οι τύποι συστημάτων αποθήκευσης ενέργειας είναι εξοπλισμένοι με ένα μέσο αποθήκευσης και ένα σύστημα φόρτισης και εκφόρτισης. Σε περιόδους χαμηλής ζήτησης και υψηλής προσφοράς, πραγματοποιείται η αποθήκευση και σε περιόδους υψηλής ζήτησης το αντίθετο. Τα TES διαφοροποιούνται από άλλους τύπους αποθήκευσης λόγω του χαμηλού κόστους, τη μακροζωία και την επάρκεια των πόρων τους [111]. Σύμφωνα με την πηγή [112], υπάρχουν διάφορες μέθοδοι ταξινόμησης αυτών των συστημάτων. Για παράδειγμα, διαφέρουν ως προς το υλικό αποθήκευσης (αισθητή, λανθάνουσα και θερμοχημική) και στις τεχνολογικές τους έννοιες (υπόγεια, ζεστό νερό και πάνω από το έδαφος, χρήση υλικών αλλαγής φάσης (PCM), θερμοχημική αποθήκευση [105]). Στην πράξη, η αισθητή αποθήκευση θερμότητας είναι η πιο κοινή [112–115]. Τα τελευταία χρόνια, η προσοχή έχει αυξηθεί προς την εποχική ευαίσθητη αποθήκευση θερμότητας. Αυτό είναι ιδιαίτερα ενδιαφέρον για την αποθήκευση του τεράστιου πλεονάσματος της ηλιακής θερμότητας που συλλέγεται κατά τη διάρκεια του καλοκαιριού, αντισταθμίζοντας έτσι την περιορισμένη διαθεσιμότητα της ηλιακής θερμότητας κατά τη διάρκεια της περιόδου πρωτογενούς θέρμανσης το χειμώνα (Εικ. 3.1). Οι εποχιακές εφαρμογές διαφέρουν ριζικά στις απαιτήσεις και τα σχέδιά τους από τα ημερήσια συστήματα αποθήκευσης και είναι πιο δύσκολο να εφαρμοστούν. Τα μακροπρόθεσμα ή εποχιακά TES έχουν μόνο έναν έως δύο κύκλους ετησίως [116]. Είναι σαφές ότι μια τέτοια μακροχρόνια αποθήκευση αισθητής θερμότητας απαιτεί σημαντικό όγκο αποθηκευτικού χώρου. Μόνο εφαρμογές μεγάλης κλίμακας μπορούν να καλύψουν τη ζήτηση θερμότητας για μήνες ενώ ελαχιστοποιούν τη συνεχή αγωγή απώλεια θερμότητας κατά την αποθήκευση.



Εικ. 3.1. Ζήτηση θερμότητας και απόδοση ηλιακής θερμότητας ενός υποθετικού παραδείγματος νοικοκυριού στο Μόναχο (θερμαινόμενη περιοχή:  $150\text{m}^2$ , ζήτηση ενέργειας:  $70\text{ kWh} / (\text{m}^2 \cdot \text{a})$ , ηλιακή θερμική περιοχή:  $10\text{m}^2$ , υποτιθέμενη μακροπρόθεσμη απόδοση: 0,5).

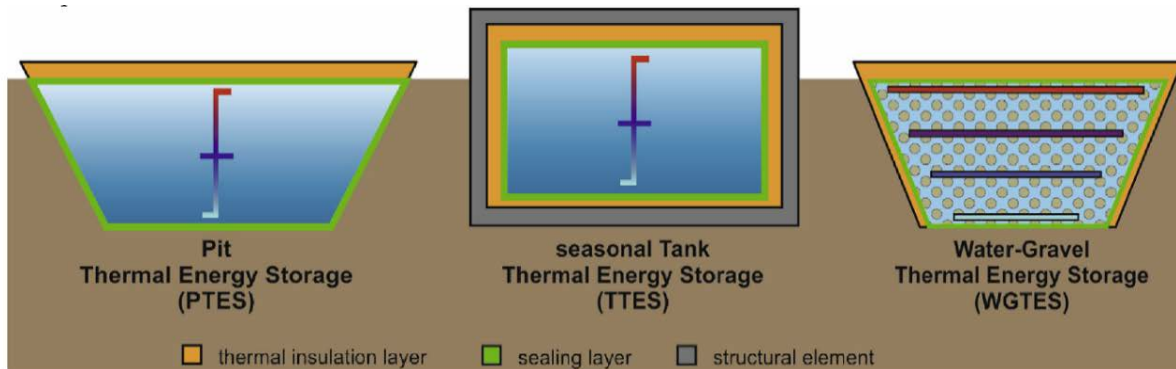
Οι πιο γνωστοί τύποι εποχιακών παραλλαγών TES είναι η αποθήκευση υδροφορέων – ταμειυτήρων (ATES), η αποθήκευση γεώτρησης (BTES), η αποθήκευση σπηλαιών (CTES), η αποθήκευση λάκκου- pit (PTES) και οι εποχιακές αποθήκες δεξαμενών (TTES). Τα ATES, τα BTES και τα CTES είναι γεωθερμικές εφαρμογές που χρησιμοποιούν φυσικό έδαφος που δεν περιλαμβάνονται μηχανικά συστήματα [117]. Στην παρούσα ενότητα, το επίκεντρο εστιάζεται αποκλειστικά σε μια οικογένεια κλειστών συστημάτων τεχνητής αποθήκευσης, τα οποία εξαρτώνται λιγότερο από τις (υδρο-) γεωλογικές οριακές συνθήκες και συνεπώς είναι πιθανές σε σχεδόν οποιαδήποτε τοποθεσία [118,119]. Αυτή η ενότητα εξετάζει την τρέχουσα τεχνολογική κατάσταση των κλειστών εποχιακών TES με βάση τις πληροφορίες που είναι ευρέως διασκορπισμένες σε ετερογενείς πηγές και γλώσσες επιστημονικής βιβλιογραφίας. Αυτό συμπληρώνεται από την εμπειρία που αναφέρεται από τον αυξανόμενο αριθμό εφαρμογών στην πράξη, προκειμένου να φτάσει σε μια συνοπτική επισκόπηση των προηγμένων συστημάτων αποθήκευσης.

Δεδομένου ότι το νερό είναι το πιο συνηθισμένο εποχιακό μέσο αποθήκευσης θερμότητας, το πεδίο αυτής της ενότητας αφορά μόνο TES με βάση το νερό. Ως κύριες κατηγορίες, διακρίνονται αποκλειστικά τεχνολογίες με βάση το νερό και εκείνες με υλικά πλήρωσης πολλαπλών συστατικών (Εικ. 3.2). Οι αποκλειστικές τεχνολογίες που βασίζονται στο νερό είναι είτε συστήματα TTES, τα οποία αντιπροσωπεύουν κατασκευασμένες δεξαμενές που εφάπτονται μερικώς ή πλήρως από την επιφάνεια του εδάφους, είτε σφραγισμένα δοχεία γεμάτα με νερό (PTES) χωρίς κανένα δομικό στοιχείο για σταθεροποίηση. Όλες οι εφαρμογές με υλικό πλήρωσης πολλαπλών συστατικών ταξινομούνται ως συστήματα αποθήκευσης θερμικής ενέργειας με χαλίκι και νερό (WGTES).

Το χαλίκι δεν χρησιμοποιείται πάντα για συστήματα WGTES στην πράξη, και έτσι οι παραλλαγές με βάση πολλαπλά συστατικά μπορούν να υποδιαιρεθούν περαιτέρω σε αποθήκες γήινου νερού και χαλικιού-νερού ανάλογα με το περιεχόμενό τους [120].

Στις επόμενες παραγράφους, παρουσιάζεται πρώτα στατιστική στοιχεία, συμπεριλαμβανομένων της ιστορικής εξέλιξης κλειστών TES μεγάλης κλίμακας. Επιπλέον, παρουσιάζονται οι εξελίξεις των στενά συνδεδεμένων μη εποχικών ρυθμιστικών στοιχείων αποθήκευσης θερμότητας. Παρόλο που ο τύπος χρήσης τους ποικίλλει από εκείνους των PTES, WGTES και TTES, υπάρχουν κοινά τεχνολογικά χαρακτηριστικά και επομένως προστίθενται buffer για σύγκριση. Στη συνέχεια, εξετάζονται τα τεχνολογικά χαρακτηριστικά όπως το

περιεχόμενο, δομικά στοιχεία, θερμικές μονώσεις, μέθοδοι στεγανοποίησης και τεχνικές κατασκευής.

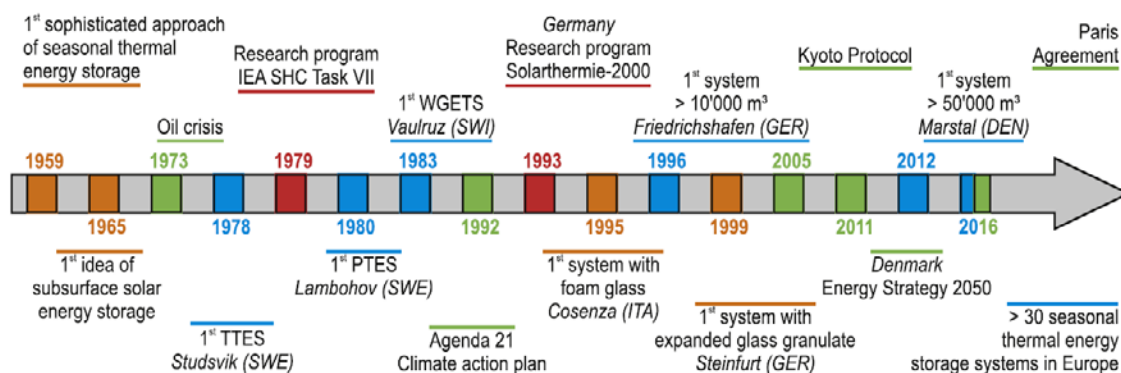


Εικ. 3.2 Σχηματική διάταξη των συστημάτων που επιλέχθηκαν για περαιτέρω ανάλυση.

## 3.2 Εξέλιξη και στατιστικά στοιχεία της εποχικής αποθήκευσης θερμικής ενέργειας στην Ευρώπη

### 3.2.1 Ιστορική εξέλιξη

Οι γνωστές πρώιμες, προ-βιομηχανικές εφαρμογές μακροχρόνιας αποθήκευσης θερμικής ενέργειας ήταν υποθαλάσσιες αποθήκες πάγου που χρησιμοποιούταν για τη διατήρηση των τροφίμων. Η πρόσφατη ιστορία κλειστών εποχιακών TES (Εικ. 3.3) μπορεί να ανιχνευθεί το 1959, όταν η [121] παρουσίασε μια πρώτη τεχνικά εξελιγμένη προσπάθεια για εποχιακή αποθήκευση θερμικής ενέργειας σε θαλάμους υπεδάφους. Λίγα χρόνια αργότερα [122] δημοσιεύθηκαν νέες ιδέες για την αποθήκευση της ηλιακής ενέργειας υπόγεια. Ωστόσο, και οι δύο μελέτες αντιπροσώπευαν κυρίως θεωρητικές σκέψεις χωρίς πρακτικές εφαρμογές. Σύμφωνα με τα [117,123–125], πρωτοποριακά έργα μπορούν να βρεθούν ειδικά στις αρχές της δεκαετίας του 1970, όταν η κρίση του πετρελαίου αύξησε την ευαισθητοποίηση του κοινού για τη σημασία του ενεργειακού εφοδιασμού (Εικ. 3.3).



Εικ. 3.3 Χρονοδιάγραμμα που δείχνει μερικά από τα σημαντικά βήματα στην ιστορία της ανάπτυξης της εποχιακής αποθήκευσης θερμικής ενέργειας (πορτοκαλί: εφευρέσεις, πράσινο: κλιματικές δράσεις, μπλε: συστήματα ορόσημα, κόκκινο: ερευνητικές δραστηριότητες)

Το πρώτο θαμμένο κλειστό εποχιακό σύστημα αποθήκευσης θερμότητας χτίστηκε το 1978 ως PTES στο Studsvik (Σουηδία) και είχε όγκο μόλις 800 m<sup>3</sup> [126]. Τα έργα WGTES πραγματοποιήθηκαν για πρώτη φορά το 1983 στη Στουτγάρδη [127] και στο Vulruz (Ελβετία [120]). Λίγα χρόνια αργότερα, η εμφάνιση κεντρικών ηλιακών εγκαταστάσεων θέρμανσης με εποχιακές αποθήκες (CSHPSS) ήταν ένας επιπλέον παράγοντας για την ώθηση της έρευνας από το 1980 και μετά [128]. Κατά τη διάρκεια αυτής της περιόδου, η Σουηδία ήταν πρωτοπόρος στην τεχνολογία με πολλά έργα (π.χ. Studsvik [126], Ingelstad [129,130], Lambohov [129,131], Malung [132]) με επίκεντρο την παραγωγή ηλιακής ενέργειας και την ανάπτυξη στρατηγικής με εποχιακά συστήματα αποθήκευσης θερμικής ενέργειας ηλιακής ενέργειας [119]. Αυτά τα χρόνια, η τεχνολογία των εποχιακών αποθηκών προσελκύνθηκε επίσης από το Πρόγραμμα Ηλιακής Θέρμανσης & Ψύξης του Διεθνούς Οργανισμού Ενέργειας (IEA SHC), κυρίως στο πλαίσιο του έργου VII «Κεντρικά ηλιακά εργοστάσια θέρμανσης με εποχιακή αποθήκευση» που πραγματοποιήθηκε από το 1979 έως το 1988 [126]. Σύμφωνα με αυτό το πρόγραμμα, η γνώση και η δέσμευση 18 κρατών μελών του ΔΟΕ συγκεντρώθηκαν, με αποτέλεσμα τον καθορισμό βασικών εννοιών και σχεδίων [133,134], μεθόδων ανάλυσης κόστους [135] και σημαντικού αριθμού τοποθεσιών έργων, π.χ. Herlev (Δανία), Στουτγάρδη, Ingelstad και Vulruz.

Εκτός από την έρευνα σχετικά με τον τρόπο αποθήκευσης ενέργειας για μεγαλύτερους χρόνους, οι διεθνείς συνθήκες για το κλίμα (π.χ. το πρόγραμμα δράσης για το κλίμα της Ατζέντα 21 το 1992 ή το πρωτόκολλο του Κιότο το 2005) αποτέλεσαν σημαντικά κίνητρα για την ανάπτυξη νέων τεχνολογιών. Με τη συμφωνία του Παρισιού το 2016, στο μέλλον θα

απαιτηθούν νέες εφαρμογές και περαιτέρω εξελίξεις σε συνδυασμό με ανανεώσιμες πηγές ενέργειας.

Τα περισσότερα από τα υπάρχοντα εποχιακά TES βρίσκονται στη Γερμανία και τη Δανία. Αυτό είναι το αποτέλεσμα πολλών ειδικών ερευνητικών προγραμμάτων σε αυτές τις χώρες. Στη Γερμανία, αυτά ήταν, μεταξύ άλλων, τα προγράμματα Solarthermie-2000 (1993-2002 [110,136,137]) και Solarthermie2000-plus (2004-2008 [110,138–140]). Στη Δανία, ο κύριος μοχλός για την ανάπτυξη νέων ενεργειακών τεχνολογιών ήταν η «ενεργειακή στρατηγική 2025» της κυβέρνησης (που δημοσιεύθηκε το 2005) πρώτη και η δεύτερη «ενεργειακή στρατηγική 2050» (που δημοσιεύθηκε το 2011) με φιλόδοξο στόχο την επίτευξη μιας ενεργειακής αγοράς ανεξάρτητης από τα ορυκτά καύσιμα (Εικ. 3.3, [141]).

Εκτός από την αποθήκευση μόνο θερμότητας σε συστήματα αποθήκευσης, τα συνδυασμένα συστήματα θέρμανσης και ψύξης στο πλαίσιο των δικτύων τηλεθέρμανσης και ψύξης είχαν ήδη προταθεί το 1997 για τα WGTES [142]. Μια αντίστοιχη δοκιμή πραγματοποιήθηκε στην εγκατάσταση αποθήκευσης στη Στουτγκάρδη, η οποία είχε κατασκευαστεί το 1985 [127], προτείνοντας μια ιδέα θέρμανσης και ψύξης για την περαιτέρω ανάπτυξη της τεχνολογίας. Πιο πρόσφατα, στην έρευνα της [143] συζητήθηκαν διάφορες τοποθεσίες στην Ισπανία με ιδιαίτερη έμφαση στις αντίστοιχες κλιματολογικές συνθήκες. Υπολογίστηκαν οι ετήσιες ενεργειακές απαιτήσεις για ψύξη και θέρμανση και οι αριθμητικές προσομοιώσεις έδειξαν ότι τα ηλιακά συστήματα τηλεθέρμανσης και ψύξης με μακροχρόνιες αποθήκες μπορούν να είναι μια οικονομική βιώσιμη εναλλακτική λύση έναντι των συμβατικών συστημάτων.

### **3.2.2 Αριθμοί, όγκοι και χωρική κατανομή**

Από την πρώτη κατασκευή ενός εποχιακού TES το 1978, έχει εγκατασταθεί ένας μικρός αλλά συνεχώς αυξανόμενος αριθμός συστημάτων (Εικ. 3.4β). Γύρω στο 1995, η αύξηση του συνολικού αριθμού εποχικών TES υποκινήθηκε από τα ερευνητικά προγράμματα στις αρχές της δεκαετίας του 1990. Μεταξύ των τεχνολογικών παραλλαγών (Εικ. 3.4α), το TTES ήταν πιο δημοφιλές με σημαντική αύξηση στα εγκατεστημένα συστήματα γύρω στο 1995. Το PTES ήταν λιγότερο δημοφιλές από το TTES κατά τη διάρκεια του 1978-1995, αλλά ο αριθμός τους αυξήθηκε σχεδόν στον ίδιο ρυθμό. Υπήρξε μια παύση από το 1995 έως το 2012, και μετά το 2012 δημιουργήθηκαν νέα συστήματα στη Δανία (π.χ. Marstal [144,145], Dronninglund [146–148], Fig. 4a). Η προηγούμενη ανάπτυξη του WGTES ήταν παρόμοια με αυτήν του PTES.

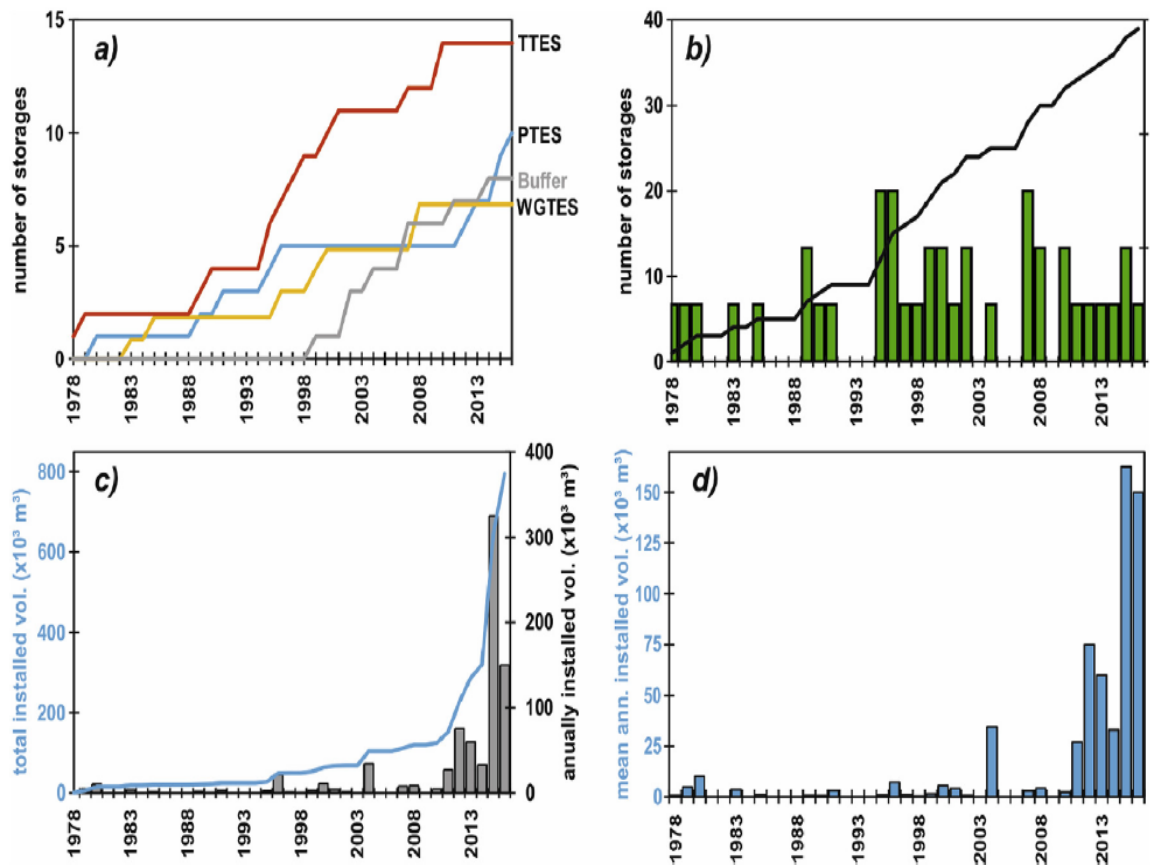
Ωστόσο, βρέθηκε μια σταθερή αύξηση του αριθμού χωρίς διακοπές. Σε αντίθεση με τα εποχικά συστήματα αποθήκευσης, οι σημαντικές εφαρμογές αποθήκευσης θερμότητας με buffer παρατίθενται αρχικά το 1999 με εγκατάσταση στο Aeroeskoebing (Δανία [149–151]). Στη συνέχεια, ο αριθμός αυτών των συστημάτων αυξήθηκε γρήγορα. Αυτό προκλήθηκε ιδιαίτερα από την αυξανόμενη δημοτικότητα της τηλεθέρμανσης σε χώρες όπως η Δανία (Samsø [152]), η Αυστρία (Linz [153] και το Σάλτσμπουργκ [111,154]) και η Γερμανία (Νυρεμβέργη [155]).

Η εξέλιξη του εγκατεστημένου όγκου αποθήκευσης δείχνει μια μέτρια εξέλιξη έως το 2010 (Εικ. 3.4γ). Αυτό οφείλεται στην αρχική κατασκευή μόνο μικρότερων συστημάτων σε πιλοτικά έργα. Από το 2010 και μετά, μια σχεδόν εκθετική τάση βρίσκεται στο συνολικό εγκατεστημένο όγκο, που συμπίπτει με τον πρόσφατα αυξανόμενο αριθμό PTES (Εικ. 3.4α). Το Σχ. 3.4γ δείχνει τον συνολικό εγκατεστημένο όγκο αποθήκευσης για κάθε έτος, ενώ το Σχ. 3.4d απεικονίζει το μέσο μέγεθος των μοναδικών εγκατεστημένων αποθηκών.

Σε αυτή τη βάση, είναι προφανές ότι η εκθετική αύξηση του όγκου δεν είναι αποτέλεσμα εκθετικής αύξησης του αριθμού των ενσωματωμένων συστημάτων (Εικ. 3.4β), αλλά ότι οι όγκοι των μεμονωμένων συστημάτων (Εικ. 3.4δ) έχουν ακολουθήσει μια εκθετική τάση ανάπτυξης από το 2010. Μέχρι σήμερα, η μεγαλύτερη εγκατάσταση εποχιακής αποθήκευσης βρίσκεται στο Vojens (Δανία) ως PTES με όγκο περίπου 200.000 m<sup>3</sup> νερού [145,147,156,157]. Αντίθετα, μέχρι το 2010, το μεγαλύτερο εποχιακό σύστημα αποθήκευσης είχε μόνο όγκο 12.000 m<sup>3</sup> (TTES Friedrichshafen, Γερμανία [142,149,158–160]).

Λόγω του πιο απαιτητικού σχεδιασμού τους, τα τυπικά συστήματα WGTES είναι μικρότερα σε μέγεθος, με το μεγαλύτερο να βρίσκεται στο Eggenstein (Γερμανία), με όγκο 4.500 m<sup>3</sup> [161–163]. Συνοπτικά, η εκθετική αύξηση του συνολικού όγκου αποθήκευσης και του μέσου όγκου χωριστού χώρου αποθήκευσης έρχεται σε αντίθεση με την σχεδόν γραμμική ανάπτυξη του αριθμού των συστημάτων. Αυτό δείχνει σαφώς μια τάση μεγαλύτερων εγκαταστάσεων κατά την τελευταία δεκαετία, η οποία υποκινείται από τις συνεχιζόμενες τεχνολογικές εξελίξεις, την εμπειρία και τις οικονομίες κλίμακας.





Εικ. 3.4. α) Εξέλιξη του αριθμού διαφορετικών εποχιακών συστημάτων αποθήκευσης και μεγάλων αποθηκευτικών χώρων αποθήκευσης. β) Ανάπτυξη του συνολικού αριθμού και των ετήσιων νεόκτιστων συστημάτων (TTES, PTES, WGTES και αποθήκευση buffer) και σωρευτικός αριθμός αποθηκών (μαύρη γραμμή). γ) Ανάπτυξη του εγκατεστημένου όγκου στην Ευρώπη για εποχιακή αποθήκευση θερμικής ενέργειας (TTES, PTES, WGTES, συμπεριλαμβανομένης της αποθήκευσης buffer) με ετήσιους πρόσφατα εγκατεστημένους τόμους. δ) Ανάπτυξη του μέσου μεγέθους των πρόσφατα εγκατεστημένων εποχιακών συστημάτων αποθήκευσης (TTES, PTES, WGTES) και αποθήκευσης buffer..

Λαμβάνοντας υπόψη τις σημερινές στατιστικές, είναι επίσης χρήσιμο να γίνει διάκριση μεταξύ των διαφόρων τύπων αποθήκευσης θερμικής ενέργειας (Πίνακας 1). Εκτός από τα εποχιακά συστήματα (PTES, WGTES, TTES), υπάρχει επίσης ένας σχετικός αριθμός σημαντικών βραχυπρόθεσμων συστημάτων αποθήκευσης buffer. Όσον αφορά αυτούς τους τέσσερις τύπους συστημάτων αποθήκευσης, κυριαρχούν τα TTES και ακολουθούν τα PTES και WGTES. Αν και ο αριθμός των PTES είναι χαμηλότερος από τον αριθμό των TTES, ο όγκος των PTES είναι μεγαλύτερος από αυτόν των οποιουδήποτε άλλου συστήματος αποθήκευσης, τόσο ως προς τους μεμονωμένους όγκους αποθήκευσης όσο και για το συνολικό άθροισμα όλων των όγκων αποθήκευσης στην Ευρώπη (Εικ. 3.5). Είναι επίσης αξιοσημείωτο ότι το WGTES είναι κατά

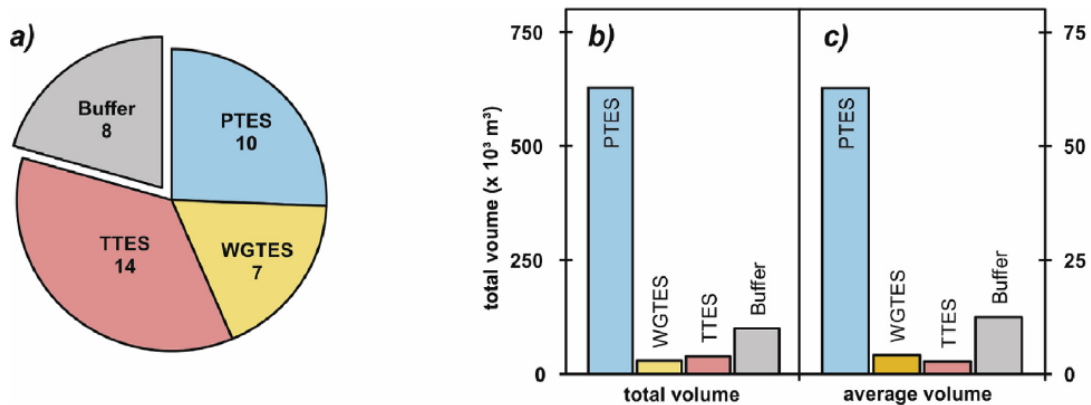
μέσο όρο μεγαλύτερο από το TTES, αλλά χαμηλότερο σε συνολικό όγκο. Αυτό συμβαίνει επειδή το WGTES εξισορροπεί τη μειωμένη χωρητικότητα αποθήκευσης θερμότητας λόγω της χρήσης χαλικιού με μεγαλύτερο όγκο.

Πίνακας 1 Επισκόπηση όλων των εποχιακών χώρων αποθήκευσης θερμικής ενέργειας και μεγάλων θέσεων αποθήκευσης buffer που καταγράφονται μέχρι σήμερα

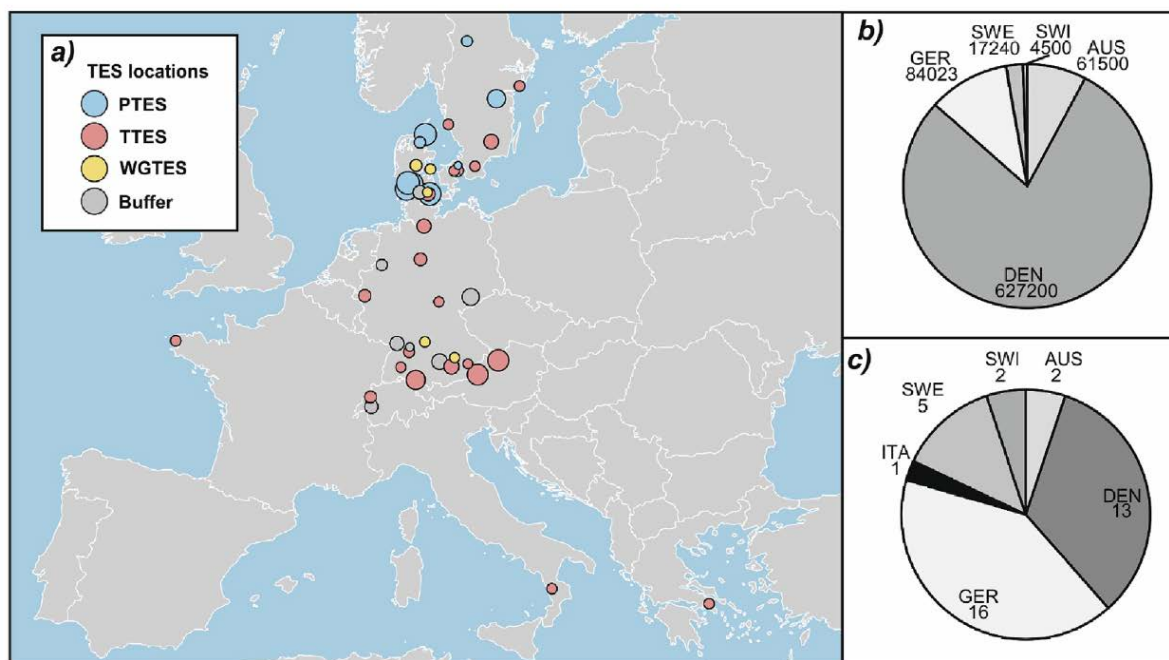
#	Όνομα	Έτος	Χώρα	Τύπος αποθήκευσης	Όγκος (m <sup>3</sup> )	Ισοδύναμα νερού (m <sup>3</sup> )	Αναφορά
1	Lambohov	1980	SWE	PTES	10,000	10,000	[106,115,126,164–166]
2	Malung	1989	SWE	PTES	800	800	[165,167]
3	Herlev (Tubberupvaenge)	1991	DEN	PTES	3,000	3,000	[115,125,126,148,150,164,165,168–171]
4	Ottrupgaard	1995	DEN	PTES	1,500	1,500	[119,127,129,132,148,149,165,169,170, 172–174]
5	Jülich	1996	GER	PTES	2,500	2,500	[106,165,172,175]
6	Marstal (SUN	2012	DEN	PTES	75,000	75,000	[144,154,172,174,176–178]
7	Dronninglund	2013	DEN	PTES	62,000	62,000	[146,147,165,166,174,176,179]
8	Gram	2015	DEN	PTES	122,000	122,000	[145,147,179–181]
9	Vojens (1+2)	2015	DEN	PTES	203,000	203,000	[154,156,157,182,183]
10	Logumkloster	2016	DEN	PTES	150,000	150,000	[183,184]
11	Studsvik	1978	SWE	TTES	800	800	[164,165,169,172]
12	Ingelstad	1979	SWE	TTES	5,000	5,000	[106,107,125,126,129,130]
13	Särö	1989	SWE	TTES	640	640	[126,127,132,165,169,171,172]
14	Hoerby	1990	DEN	TTES	500	500	[106,114,130,165,170,185–187]
15	Rottweil	1995	GER	TTES	597	597	[106,127,142,188–190]
16	Cosenza (Calabria)	1995	ITA	TTES	500	500	[106,191,192]
17	Friedrichshafen (Wiggenhausen)	1996	GER	TTES	12,000	12,000	[108,127,136,138,142,149,158,160,165, 189,193–195]
18	Neuchatel	1997	SWI	TTES	1,000	1,000	[105,114,129,149,196]
19	Ilmenau	1998	GER	TTES	300	300	[132,137,189,190,197–199]
20	Hannover (Kronsberg)	2000	GER	TTES	2,750	2,750	[108,138,139,158,189,193,200,201]
21	Rise	2001	DEN	TTES	4,000	4,000	[148,179,184,202,203]
22	Munich (Ackermannbogen)	2007	GER	TTES	5,700	5,700	[108,139,149,158,159,193,204–207]
23	Hamburg (Bramfeld)	2010	GER	TTES	4,500	4,500	[108,116,119,127,139,149,159,172, 194,199,200]
24	Mühdorf	2010	GER	TTES	16.4	16.4	[208]

25	Vaulruz	1983	SWI	WGTES	3,500	<i>n.a.</i>	[120,126,209–211]
26	Stuttgart	1985	GER	WGTES	1,050	725	[106,118,120,126,127,212]
27	Augsburg	1996	GER	WGTES	6,500	3,250	[120,149,165,169,186,189,209]
28	Steinfurt (Borghorst)	1999	GER	WGTES	1,500	1,000	[106,116,136,138,149,158,165,200, 210,212,213]
29	Chemnitz	2000	GER	WGTES	8,000	5,300	[106,108,114,118–120,125–127, 138,149,189,210,214–218]
30	Eggenstein (Leopoldshafen)	2008	GER	WGTES	4,530	3,000	[119,138,139,149,158,159,162,205,219– 222]
31	Sonderborg	2008	DEN	WGTES	4,000	<i>n.a.</i>	[149]
32	Aeroeskoebing	1999	DEN	Buffer	1,400	1,400	[150,151,187]
33	Attenkirchen	2002	GER	Buffer	500	500	[108,138,159,193]
34	Samsø	2002	DEN	Buffer	800	800	[152]
35	Linz	2004	AUS	Buffer	34,500	34,500	[153,165,186]
36	Braedstrup	2007	DEN	Buffer	2,000	2,000	[176,223,224]
37	Crailsheim (Hirtenwiesen)	2007	GER	Buffer	580	580	[108,119,137–139,158,165,194, 221,222]
38	Salzburg (North)	2011	AUS	Buffer	27,000	27,000	[111,154]
39	Nuremberg	2014	GER	Buffer	33,000	33,000	[155]

Η κατανομή των εποχικών θέσεων αποθήκευσης θερμικής ενέργειας ποικίλλει γεωγραφικά στην Ευρώπη (Εικ. 3.6α). Συνολικά, εντοπίζονται 39 εγκαταστάσεις αποθήκευσης. Τα περισσότερα συστήματα εγκαθίστανται στη Γερμανία, ακολουθούμενη από τη Σουηδία, την Αυστρία, την Ελβετία και την Ιταλία (Εικ. 6α και β, Πίνακας 1). Λόγω των πρόσφατων εξελίξεων με πολλές εφαρμογές μεγάλης κλίμακας, ο μεγαλύτερος όγκος αποθήκευσης είναι εγκατεστημένος στη Δανία, ακολουθούμενος από τη Γερμανία, την Αυστρία, τη Σουηδία, την Ελβετία και την Ιταλία (Εικ. 6γ). Αυτό είναι αποτέλεσμα των συνεχών ερευνητικών δραστηριοτήτων και του δημόσιου ενδιαφέροντος που ξεχωρίζουν σε αυτές τις χώρες.



Εικ. 3.5. α) Εγκατεστημένος αριθμός διαφορετικών τύπων TES σε σύγκριση με β) τον συνολικό διαθέσιμος όγκο αποθήκευσης και γ) τον μέσο όρο μεμονωμένων όγκων αποθήκευσης.



Εικ.3. 6. α) Χάρτης που δείχνει τις τοποθεσίες των διαφόρων εποχιακών τύπων αποθήκευσης, συμπεριλαμβανομένων μεγάλων αποθηκευτικών χώρων στην Ευρώπη, β) εγκατεστημένους όγκους ανά χώρα (m<sup>3</sup>) και γ) αριθμούς

### **3.3 Τεχνολογική κατάσταση σήμερα**

#### **3.3.1 Υπόγειες και υπέργειες εγκαταστάσεις**

Τα κλειστά TES που είναι εν μέρει ή πλήρως θαμμένα στο έδαφος (PTES, WGTES) βασίζονται σε ορισμένες (υδρο-) γεωλογικές συνθήκες όπως η σταθερότητα του εδάφους και η απουσία υπόγειων υδάτων. Οι εφαρμογές πάνω από το έδαφος εξαρτώνται λιγότερο από το χώρο και έτσι τα περισσότερα TES κατασκευάζονται πάνω από το έδαφος. Αυτή είναι επίσης μια ευνοϊκή επιλογή λόγω της εξοικονόμησης του κόστους εκσκαφής και επειδή τα κατασκευαστικά στοιχεία και τα περιβλήματα δεξαμενών διαχειρίζονται την πίεση που προκαλείται από την πλήρωση [106,209]. Μερικές φορές, μια χρήσιμη διαφορά υδραυλικής πίεσης από τη συσκευή αποθήκευσης στο δίκτυο θέρμανσης μπορεί να επιτευχθεί με την κατασκευή ανυψωμένων εφαρμογών. Αναφ. [113] περιγράφουν ένα πλήρως θαμμένο σύστημα αποθήκευσης σκυροδέματος και υπογραμμίζουν ότι το περιβάλλον χώμα είναι πλεονεκτικό καθώς προσφέρει επιπλέον χωρητικότητα αποθήκευσης, το οποίο υποστηρίζεται επίσης από προσομοιώσεις [225]. Σύμφωνα με τα αριθμητικά αποτελέσματα μοντελοποίησης της μελέτης [155], οι θαμμένες εγκαταστάσεις εμφανίζουν υψηλότερες θερμοκρασίες αποθήκευσης σε μεγαλύτερο βάθος. Για λόγους καλύτερης απόδοσης αποθήκευσης και αισθητικής, συνιστάται συχνά να θάβονται και να ενσωματώνονται στο περιβάλλον οι αποθήκες [226]. Το TTES στο Αννόβερο (Γερμανία) ενσωματώθηκε σε μια αστική παιδική χαρά. Στο Μόναχο (Γερμανία), το έδαφος συσσωρεύτηκε γύρω από την αποθήκη για να ενσωματωθεί στο τοπίο [119]. Επίσης, στη Σουηδία, προτιμώνται οι θαμμένες εγκαταστάσεις αποθήκευσης και η τελευταία εγκατάσταση επίγειας αποθήκευσης στο Ingelstad χτίστηκε το 1979 [126]. Σε πολλές περιπτώσεις, το κόστος εκσκαφής θα μπορούσε να ελαχιστοποιηθεί με την αποκατάσταση παλαιών ορυχείων.

#### **3.3.2. Γεωμετρία και υλικά πλήρωσης**

Το μέγεθος και ο όγκος μιας εγκατάστασης TTES ενδέχεται να περιορίζεται από κανονισμούς σχετικά με το μέγιστο ύψος πάνω από το γύρω έδαφος, ανάλογα με την τοποθεσία και τους αντίστοιχους νόμους δόμησης (π.χ. Αμβούργο (Γερμανία) [200]). Το PTES μπορεί να

κλιμακωθεί σε τεράστιους όγκους [159], ειδικά επειδή αυτά είναι χτισμένα κάτω από την επιφάνεια του εδάφους και έτσι περιβάλλονται από το έδαφος.

Για να ελαχιστοποιηθούν οι αγωγιμες απώλειες ενέργειας μέσω του κελύφους, η γεωμετρία του TES πρέπει πάντα να στοχεύει στη χαμηλότερη δυνατή αναλογία επιφάνειας προς όγκο ( $A / V$ ) ( $m - 1$ ) [116,163,210]. Αναφερόμενοι σε τυπικές γεωμετρίες όπως κύβοι ή σφαίρες, η μελέτη [227] παρουσίασε ότι ο όγκος επηρεάζει στην τρίτη δύναμη σε σύγκριση με την επιφάνεια η οποία επηρεάζει στην δεύτερη δύναμη. Ταυτόχρονα, η αναλογία  $A / V$  συμπεριφέρεται αμοιβαίως στο ύψος ή τη διάμετρο του συστήματος. Αυτό σημαίνει επίσης ότι οι μεγαλύτεροι όγκοι αποθήκευσης έχουν θετική επίδραση [159] στην αποδοτικότητα αποθήκευσης. Στην μελέτη [119] φαίνεται ότι η ενεργειακά αποδοτική εποχική αποθήκευση λειτουργεί μόνο με όγκο  $1.000 \text{ m}^3$  ή περισσότερο. Οι τιμές που αναφέρονται στον Συμπληρωματικό Πίνακα S – 1 επιβεβαιώνουν ότι γενικά οι λόγοι  $A / V$  μειώνονται με τον όγκο του εγκατεστημένου TES, ακόμη και όταν μια πιο προσεκτική ματιά αποκαλύπτει ότι υπάρχει ισχυρή μεταβλητότητα.

Αυτό δείχνει ότι άλλες πτυχές που σχετίζονται με την γεωγραφία του τόπου εγκατάστασης παίζουν καθοριστικό ρόλο για τη διάταξη κάθε συστήματος. Εκτός από την αναλογία  $A / V$ , δίνεται συχνά η αναλογία ύψους προς διάμετρο ( $h / d$ ) και αναφέρεται επίσης στον Πίνακα S – 1. Με τιμές κοντά στο ένα, η εξωτερική επιφάνεια τείνει να είναι μικρότερη, αλλά γενικά επίσης ο λόγος  $h / d$  μειώνεται με τον όγκο πλήρωσης των αναφερόμενων περιπτώσιολογικών μελετών. Αυτό ισχύει ιδιαίτερα για το Δανικό PTES μεγάλης κλίμακας, όπου υπάρχουν λόγοι  $h / d$  περίπου  $1/10$ . Αυτές οι τιμές αντικατοπτρίζουν ότι οι φόρμες TES καθορίζονται έντονα από το μέγεθος και τη γεωμετρία του αρχικού λάκκου, όπου κατασκευάστηκε το TES. Καθώς τα PTES και WGTES είναι κατά προτίμηση ενσωματωμένα σε υπάρχουσες λεκάνες, η μορφή τους είναι πολύ πιο προκαθορισμένη από αυτή του TTES. Τα PTES και WGTES κατασκευάζονται συνήθως ως ανεστραμμένοι κωνικοί κώνοι ή πυραμίδες (π.χ. δύο γερμανικές εγκαταστάσεις: Steinfurt [213,228] και Stuttgart [127]). Το TTES στο Αμβούργο είναι κατασκευασμένο ως συνδυασμός ενός ανεστραμμένου κόλουρου κώνου (πυθμένα) και ενός κυλίνδρου, και ως εκ τούτου έχει βελτιστοποιημένη αναλογία  $A / V$  [200]. Μια αντίστροφη διαμόρφωση μπορεί να βρεθεί στο Αννόβερο, όπου ο περικομμένος κώνος βρίσκεται στην κορυφή και η αναλογία  $A / V$  είναι ακόμη καλύτερη λόγω των βελτιστοποιημένων διαστάσεων [200].

Η μοντελοποίηση της απόδοσης αποθήκευσης σε ενεργειακά συστήματα γίνεται συχνά με το κοινώς χρησιμοποιούμενο λογισμικό TRNSYS για μεγάλες και μικρές εγκαταστάσεις (π.χ., Αναφορές [229,230]). Ωστόσο, η αναφορά [159] συμπεραίνει ότι οι προσομοιώσεις υπό ιδανικές συνθήκες συνήθως οδηγούν σε υποτιμημένες απώλειες θερμότητας, σε σύγκριση με τις μετρούμενες τιμές των κατασκευασμένων συστημάτων [231,232]. Στην μελέτη [233] πραγματοποιήθηκαν αριθμητικές προσομοιώσεις για να βρει μια βέλτιστη γεωμετρία αποθήκευσης και τις καλύτερες συνθήκες ορίου. Διερευνήθηκαν λεκάνες με κυβικές, κυβοειδείς και κάθετες κυλινδρικές γεωμετρίες, καθώς και διασυνδεδεμένους μεγάλους σωλήνες. Μια κυλινδρική λεκάνη βρέθηκε να είναι η καλύτερη γεωμετρία για μεγάλες εγκαταστάσεις, η οποία παρείχε την καλύτερη προσέγγιση σε σφαίρα. Επιπλέον, η αναφορά [233] πρότεινε την εφαρμογή εσωτερικών τοιχωμάτων για ακόμη καλύτερη θερμική διαστρωμάτωση. Αυτή η μελέτη επικεντρώθηκε αποκλειστικά στη βελτιστοποίηση γεωμετρικού σχεδιασμού, αλλά δεν εξετάστηκαν τα διαφορετικά κόστη για τις διάφορες διατάξεις. Έτσι, θεωρητικά, μια σφαίρα θα ήταν πάντα βέλτιστη με ελαχιστοποίηση της αγωγιμής απώλειας θερμότητας (και χαμηλότερη αναλογία  $A / V$ ). Λόγω των κατασκευαστικών προκλήσεων, ωστόσο, ένας κύλινδρος μπορεί να είναι οικονομικά πιο αποδοτικός.

Όσον αφορά το υλικό πλήρωσης το νερό είναι μακράν το πιο κοινό υλικό. Είναι ένα φυσικό μέσο, ακίνδυνο και σχεδόν διαθέσιμο παντού, το οποίο είναι ένα ιδιαίτερο πλεονέκτημα σε σύγκριση με τα ειδικά σχεδιασμένα υλικά αλλαγής φάσης (PCM) και τα υψηλής ποιότητας χαλίκια [234]. Το νερό προτιμάται λόγω των θερμοδυναμικών ιδιοτήτων του [112,159]. Σύμφωνα με την αναφορά. [111], η ικανότητα αποθήκευσης θερμότητας του νερού είναι περίπου  $1,16 \text{ kWh} / \text{m}^3\text{K}$  ( $4,18 \text{ MJ} / \text{m}^3\text{K}$ ) σε εύρος θερμοκρασιών από  $0^\circ \text{C}$  έως  $100^\circ \text{C}$ . Αυτή η τιμή είναι μόνο περίπου  $0,69 \text{ kWh} / \text{m}^3\text{K}$  ( $2,50 \text{ MJ} / \text{m}^3\text{K}$ ) για το έδαφος ή  $0,33 \text{ kWh} / \text{m}^3\text{K}$  ( $1,20 \text{ MJ} / \text{m}^3\text{K}$ ) για ένα χαλίκι με χώρο πόρων 45%. Εντός θερμοκρασίας από  $35^\circ \text{C}$  έως  $60^\circ \text{C}$ , η προκύπτουσα χωρητικότητα αποθήκευσης είναι  $15\text{-}30 \text{ kWh} / \text{m}^3$  για υπόγειο υλικό, όπως χώμα ή βράχος, και  $30\text{-}50 \text{ kWh} / \text{m}^3$  για μίγματα χαλικιού νερού σε σύγκριση με  $60\text{-}80 \text{ kWh} / \text{m}^3$  μόνο για νερό [106]. Αυτό σημαίνει μειωμένη ικανότητα αποθήκευσης 60% για το έδαφος και 20% για χαλίκια [149].

Για να αποφευχθεί το φράξιμο, και επειδή οι διαδρομές ροής εντός της μήτρας είναι δύσκολο να ελεγχθούν, οι WGTES απαιτούν εναλλάκτες θερμότητας που μειώνουν την αποτελεσματικότητα και ενισχύουν τις απώλειες θερμότητας. Αντίθετα, το νερό μπορεί να χρησιμεύσει ταυτόχρονα ως μέσο αποθήκευσης και φορέας θερμότητας. Οι εναλλάκτες θερμότητας αποφεύγονται έτσι και η αποθήκευση μπορεί να ενσωματωθεί στο συνδεδεμένο σύστημα θέρμανσης / ψύξης όταν το νερό χρησιμοποιείται άμεσα ως ρευστό [112]. Οι αρνητικές ιδιότητες του νερού περιλαμβάνουν το χαμηλό εύρος λειτουργίας μεταξύ σημείων τήξης και βρασμού, διαβρωτικές επιδράσεις σε άλλα στοιχεία αποθήκευσης και την επιπλοκή της φυσικής μεταφοράς στη διατήρηση της θερμικής στρωματοποίησης [112]. Επιπλέον, η θερμική αγωγιμότητα του νερού ( $0,6 \text{ W / m K}$ ) είναι χαμηλότερη από εκείνη του κορεσμένου με νερό εδάφους ( $0,6-4 \text{ W / m K}$ ) [196].

Για συστήματα με μικρούς όγκους, προτάθηκε η χρήση ενός συνδυασμού νερού και υλικών αλλαγής φάσης κατά παραγγελία [235]. Αυτό αποδίδει υψηλότερη χωρητικότητα αποθήκευσης με λανθάνουσα μετατροπή θερμότητας. Επειδή αυτά τα ειδικά υλικά αλλαγής φάσης είναι σχετικά ακριβά, δεν είναι κοινά σε εποχιακά συστήματα αποθήκευσης. Αντίθετα, είναι συχνά πιο οικονομικό για τις εποχιακές αποθήκες να σχεδιάζουν μεγαλύτερο όγκο αποθήκευσης νερού. Ωστόσο, σε πολλές εφαρμογές χρησιμοποιείται επίσης η αλλαγή φάσης από νερό σε πάγο [236]. Εδώ, οι θερμοκρασίες λειτουργίας της συσκευής αποθήκευσης είναι χαμηλές, αλλά η λανθάνουσα θερμότητα αποθηκεύεται και απελευθερώνεται επιπλέον της απελευθέρωσης της αισθητής θερμότητας [105,237,238]. Οι λίμνες πάγου εισήχθησαν για πρώτη φορά το 1984 από την μελέτη [239] ως τεχνική παραλλαγή για την αποθήκευση θερμικής ενέργειας, και συζητούνται περαιτέρω από στην μελέτη [236]. Στην πρόσφατη εργασία [240], ο συνδυασμός μονάδων αποθήκευσης πάγου και κρύου νερού για εφαρμογές ψύξης αποδεικνύεται οικονομικά επωφελής.

### **3.3.3 Δομικά στοιχεία συστημάτων**

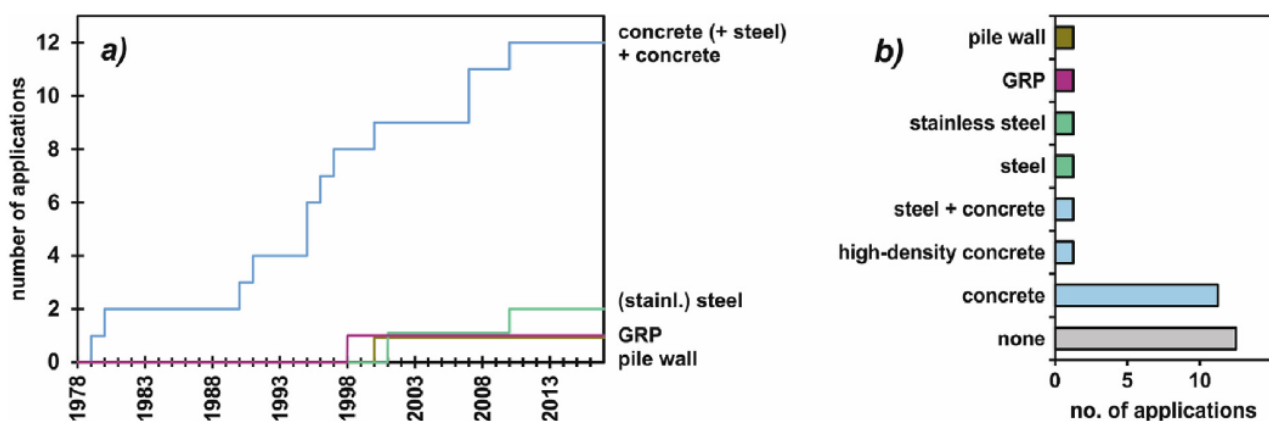
Δεδομένου ότι τα TTES είναι συνήθως χτισμένα πάνω από το έδαφος, χρειάζονται δομικά στοιχεία για να φέρουν τάσεις. Κυρίως, αυτά είναι κατασκευασμένα από σκυρόδεμα ενισχυμένο από χάλυβα για τη βελτίωση των μηχανικών ιδιοτήτων (Εικ. 3.7α). Το σκυρόδεμα υψηλής απόδοσης που χρησιμοποιήθηκε για το TTES στο Αννόβερο αντιπροσωπεύει τόσο το



στατικό όσο και το αδιάβροχο στοιχείο (λόγω της μειωμένης διαπερατότητας) αλλά με δυσανάλογα υψηλό κόστος [119,200,242].

Ταυτόχρονα, τα βελτιστοποιημένα σχήματα και οι μέθοδοι κατασκευής μπορούν να βοηθήσουν στην αύξηση της σταθερότητας του σκυροδέματος. Για παράδειγμα, απαιτείται υψηλή αντοχή στις τάσεις για την κορυφή του χώρου αποθήκευσης στο Friedrichshafen, και επιτεύχθηκε με την κατασκευή μιας προεντεταμένης οροφής κελυφώδους σχήματος [188,201].

Σύμφωνα με το Σχ. 3.7b, υπάρχουν μερικά συστήματα που χρησιμοποιούν μόνο ανοξείδωτο χάλυβα. Αυτό είναι κοινό για μεγάλες αποθηκευτικές αποθήκες, αλλά και για μικρότερα εποχιακά TES. Ο ανοξείδωτος χάλυβας μπορεί να είναι επωφελής επειδή δεν χρειάζονται περαιτέρω φράγματα στεγανοποίησης. Ωστόσο, την ίδια στιγμή, ο όγκος αποθήκευσης είναι περιορισμένος λόγω της χαμηλότερης αντοχής στο στρες. Εναλλακτικά, προφίλ πλαστικού ενισχυμένου με ίνες γυαλιού (GRP) με πάχος 10 mm δοκιμάστηκαν σε πιλοτική τοποθεσία στο Pfenau (Γερμανία [110,198,243], Εικ. 3.7b). Ο στόχος ήταν να μειωθεί το κόστος και να επωφεληθεί από τη χαμηλή θερμική αγωγιμότητα αυτού του υλικού. Ωστόσο, οι περιορισμένες στατικές ιδιότητες αυτού του υλικού περιορίζουν τον μέγιστο όγκο μιας δεξαμενής αποθήκευσης.



Εικ. 3.7. Ανάπτυξη του αριθμού εφαρμογών (α) και κατανομή των σημερινών εφαρμογών (β) για τα διάφορα υλικά των δομικών στοιχείων.

Για τις αποθήκες που κατασκευάζονται υπόγεια (PTES και WGTES), οι απαιτήσεις σταθερότητας για δομικά στοιχεία μειώνονται από το κλειστό έδαφος. Ωστόσο, η γεωμετρία ορισμένων εγκαταστάσεων συνεπάγεται την ανάγκη για συγκεκριμένα δομικά στοιχεία: το WGTES στο Chemnitz (Γερμανία) χτίστηκε με τοίχωμα για τη σταθεροποίηση της οπής

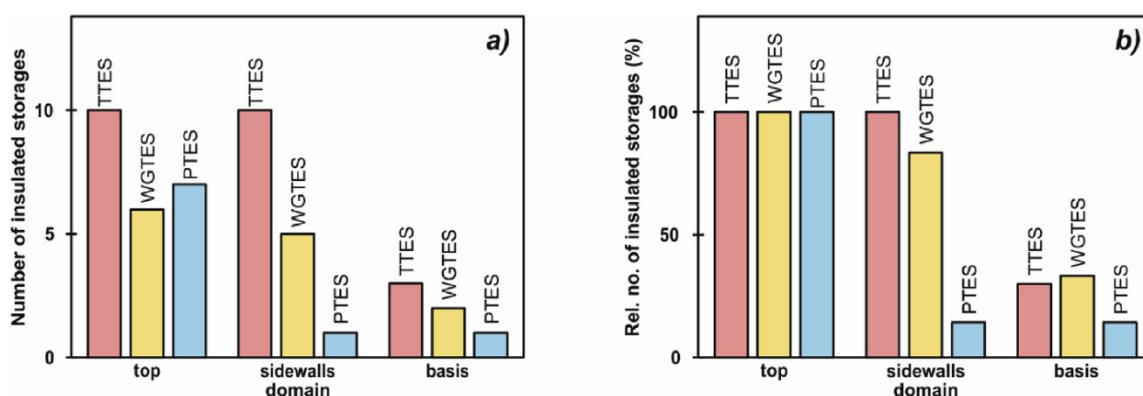
εκσκαφής [138,195,217]. Όσο πιο απότομες είναι οι γωνίες κλίσης μιας δεδομένης οπής εκσκαφής, τόσο μεγαλύτερος είναι ο όγκος αποθήκευσης. Αυτό είναι ιδιαίτερα σημαντικό σε περιοχές με περιορισμένο χώρο. Άλλα παραδείγματα για διαφορετικά από TTES συστήματα με δομικά στοιχεία είναι το PTES στο Herlev (προφίλ χάλυβα [170]) και στο Lambohon (σκυρόδεμα [106]).

Η απόδοση των εποχιακών TES δεν εξαρτάται μόνο από τα κατασκευαστικά στοιχεία τους, αλλά και από τις γύρω (υδρο-) γεωλογικές συνθήκες. Στην μελέτη [244] παρέχεται μια θεωρητική έρευνα για τις επιπτώσεις των διαφόρων περιβαλλόντων υλικών, συγκρίνοντας την πυκνότητα, τη θερμική αγωγιμότητα, τη διάχυση και τη θερμική ικανότητα. Βρέθηκε ότι το χοντρό χαλίκι είναι το προτιμώμενο περιβάλλον υλικό σε σύγκριση με τον γρανίτη και τον ασβεστόλιθο. Για τα επιλεγμένα εποχιακά TES αυτής της μελέτης, οι παράμετροι σχεδιασμού σχετικά με τα δομικά στοιχεία απεικονίζονται στον Πίνακα S-2 (συμπληρωματικό υλικό).

### 3.3.4. Θερμική μόνωση

Η θερμική μόνωση στο πάνω, κάτω και πλευρικό τοίχωμα είναι θεμελιώδης για τον μετριασμό της αγωγικής απώλειας θερμότητας (Εικ. 3.8α και β). Για παράδειγμα, οι μετρήσεις που πραγματοποιήθηκαν στην εγκατάσταση στη Στουτγκάρδη έδειξαν απώλειες θερμότητας εδάφους 40%, επειδή τα πλαϊνά τοιχώματα και το κάτω μέρος δεν ήταν μονωμένα [127]. Η μελέτη [241] καταδεικνύει ότι οι απώλειες θερμότητας σε μη μονωμένα PTES εμφανίζονται κυρίως στο κάλυμμα και στα άνω άκρα. Με την προσομοίωση της λειτουργίας ενός πειραματικού συστήματος, παρατηρήθηκε στάσιμη απώλεια θερμότητας στο κάτω μέρος της αποθήκευσης, ενώ η υπόλοιπη επιφάνεια αποθήκευσης δεν είχε φτάσει ακόμη σε σταθερή κατάσταση. Η κορυφή και των τριών τύπων αποθήκευσης (TTES, PTES, WGTES) έχει ήδη μονωθεί στα πρώτα έργα, καθώς αναμενόταν οι μεγαλύτερες απώλειες θερμότητας [241]. Οι πρώτες εγκαταστάσεις στο Αμβούργο (1996) και στο Rottweil (Γερμανία, 1995) χρησιμοποίησαν θερμομόνωση στο πάνω μέρος και στα πλαϊνά τοιχώματα, αλλά λόγω του υψηλού αναμενόμενου κόστους δεν πραγματοποιήθηκε μόνωση στο κάτω μέρος [160,188,200,214]. Χρησιμοποιώντας υλικά ανθεκτικά στη μηχανική καταπόνηση, όπως το αφρώδες γυαλί, η μόνωση του πυθμένα πραγματοποιήθηκε για παράδειγμα στο TTES στην Cosenza (Ιταλία [191,192,213]). Σύμφωνα με αυτή τη βελτίωση, τα επόμενα TTES και WGTES μονώθηκαν κατά προτίμηση σε όλες τις πλευρές (π.χ. Μόναχο [163,214]).

Αντιθέτως, τα συστήματα PTES αποφεύγουν το κόστος των πλευρικών και κάτω μονώσεων, αλλά προσπαθούν να αντισταθμίσουν τις αυξημένες θερμικές απώλειες από τους μεγαλύτερους όγκους αποθήκευσης. Ωστόσο, συνιστάται μόνωση της επιφάνειας αποθήκευσης για όλους τους τύπους συστημάτων [193]. Ως αποτέλεσμα, τα υφιστάμενα PTES και ορισμένα WGTES συχνά δεν έχουν πλευρικές θερμικές μονώσεις, ενώ αυτές είναι πάντα παρούσες στο TTES (Εικ. 3.8β). Αυτό συμβαίνει επίσης επειδή η μόνωση μπορεί να εφαρμοστεί εύκολα κατά την κατασκευή των πλευρικών τοιχωμάτων των TTES.



Εικ. 3.8 Απόλυτοι α) και σχετικοί β) αριθμοί των μονωμένων περιοχών αποθήκευσης, που διαφοροποιούνται ανάλογα με τους διαφορετικούς τύπους αποθήκευσης.

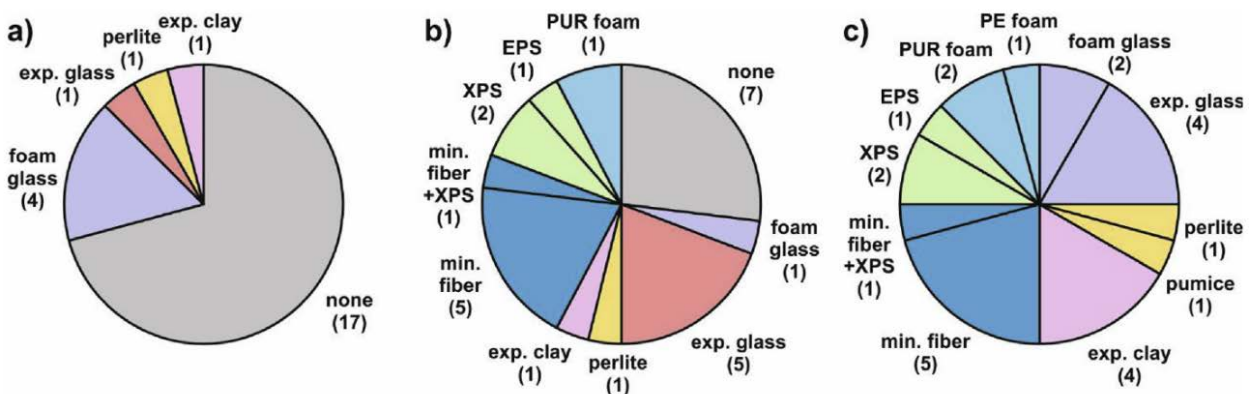
Οι διαφορετικές πλευρές μιας συσκευής αποθήκευσης είναι ιδανικά εξοπλισμένες με διαφορετικά μονωτικά υλικά [159,214]. Απαιτείται υψηλή μηχανική αντοχή ειδικά για το κάτω μέρος και τα πλευρικά τοιχώματα. Ως συνέπεια της υψηλότερης πυκνότητας του χαλκίου, οι απαιτήσεις σχετικά με την αντίσταση στη μηχανική καταπόνηση που προκαλείται από το βάρος του υλικού αποθήκευσης είναι υψηλότερες για τα WGTES. Μεταξύ άλλων απαιτήσεων για τις ιδιότητες του υλικού είναι η ομοιόμορφη και συνεχής εφαρμογή μόνωσης, ανθεκτικότητας, ευαισθησίας σε θερμική καταπόνηση ή εξωτερικών φυσικών επιδράσεων και καλές ικανότητες στεγνώματος. Για παράδειγμα, στην μελέτη [132] συνιστάται βραχυπρόθεσμη αντίσταση σε υψηλή θερμοκρασία έως  $100\text{ }^{\circ}\text{C}$  και μακροπρόθεσμα σε  $90\text{ }^{\circ}\text{C}$ , αντοχή στη γήρανση και την πίεση, καθώς και αντοχή στην υδρόλυση. Επιπλέον, στην αναφορά [132] δοκιμάστηκαν διάφορα υλικά και απεδείχθη ότι ακόμη και με νέα υλικά (π.χ. αφρώδες γυαλί) η θερμική αγωγιμότητα αυξάνεται κατά 30% κατά μέσο όρο όταν η θερμοκρασία αυξάνεται κατά  $20\text{ }^{\circ}\text{C}$ .

Αυτό τονίζει την ανάγκη για ομοιόμορφη υλική συμπεριφορά. Δεν αναφέρθηκαν μόνο προβλήματα υγρασίας στα παλιά συστήματα αποθήκευσης από τη Δανία (Herlev, Ottrupgaard [129,132,148,170]), αλλά και από νεότερα συστήματα.

Στο Steinfurt, η διαπέραση υγρασίας στη μόνωση (διογκωμένος κόκκος γυαλιού) σημειώθηκε όταν το σύστημα αποστράγγισης απέτυχε [108]. Για να επιλυθεί αυτό το πρόβλημα, το διογκωμένο κοκκώδες γυαλί έπρεπε να στεγνώσει [214]. Οι μετρήσεις αποκάλυψαν ότι χρειάστηκαν περισσότερο από ένα έτος για να επανακτήσει το μονωτικό υλικό την αρχική του τιμή [108].

### 3.3.5 Υλικά μόνωσης

Τα συμβατικά μονωτικά υλικά περιλαμβάνουν ορυκτές ίνες, εξωθημένο αφρό πολυστερίνης (XPS), διογκωμένο αφρό πολυστερίνης (EPS), αφρό πολυαιθυλενίου (PE) και αφρό πολυουρεθάνης / πολυισοκυανουρικού (PUR / PIR). Το Σχ. 3.9 δείχνει ότι αυτά αντιπροσωπεύουν πάνω από το 50% των υλικών που χρησιμοποιούνται για τα πλαϊνά τοιχώματα και το πάνω μέρος. Σύμφωνα με το την [186], οι αφροί PUR / PIR είναι χρήσιμοι τόσο για τα πλαϊνά τοιχώματα όσο και για τις μονώσεις οροφής, ενώ οι ανόργανες ίνες χρησιμοποιούνται μόνο στην κορυφή του χώρου αποθήκευσης. Περαιτέρω, ορυκτές ίνες χρησιμοποιήθηκαν σταθερά με TTES. Λόγω της ανεπαρκούς αντοχής στο στρες, τέτοια συμβατικά υλικά, ωστόσο, δεν λαμβάνονται υπόψη για μόνωση πυθμένα.



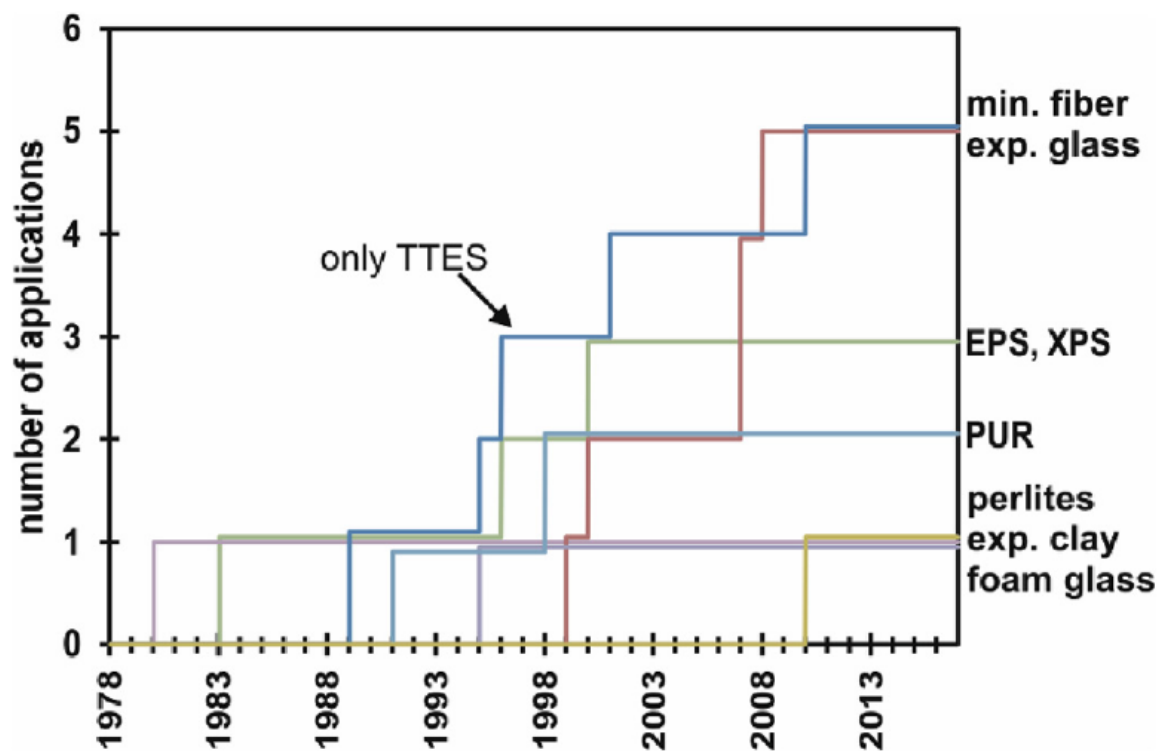
Εικ. 3. 9. Αριθμός υλικών που χρησιμοποιούνται για (α) κάτω μέρος, (β) πλευρικό τοίχωμα και (γ) μόνωση κορυφής. Το αφρώδες γυαλί εφαρμόζεται κυρίως στο κάτω μέρος, ενώ τα πλαϊνά τοιχώματα είναι μονωμένα κυρίως με συμβατικό ορυκτό βάμβακα και διογκωμένο γυαλί.

Ένα κύριο μειονέκτημα των συμβατικών μονωτικών υλικών είναι η μη ομοιόμορφη θερμική συμπεριφορά τους [210]. Για τις ανόργανες ίνες, η θερμική αγωγιμότητα μειώνεται σημαντικά στους 40 ° C – 90 ° C [214]. Ωστόσο, εάν το νερό διεισδύσει στο μονωτικό στρώμα σε περίπτωση διαρροής, η θερμική αγωγιμότητα αυξάνεται έντονα [132,214]. Στην μελέτη [200] μετρήθηκαν οι αυξανόμενες απώλειες θερμότητας που προκαλούνται από τη διαπέραση υγρασίας στη μόνωση από το εξωτερικό, η οποία επιταχύνθηκε από μια υψηλή στάθμη υπόγειων υδάτων στις αποθήκες στο Αμβούργο και τη Στάινφούρτη. Για να αποφευχθεί αυτό, η μελέτη [214] συνιστά δαπανηρή συσκευασία φύλλων XPS ή PUR σε στεγανοποιητικές μεμβράνες. Για παράδειγμα, στο Ottrupgaard, αφρός PUR εφαρμόστηκε σε δομή σάντουιτς για να αποφευχθεί η είσοδος υγρασίας [148,246].

Τα φυσικά υλικά που χρησιμοποιούνται ως θερμικοί μονωτές περιλαμβάνουν ελαφρόπετρα (π.χ. Στουτγκάρδη [127]), διογκωμένο περλίτη (π.χ. Mühlendorf, Γερμανία [208]) και διογκωμένο άργιλο (π.χ. Cosenza [131,191]). Τα δύο πρώτα είναι ηφαιστειακά υλικά με λεπτούς πόρους. Σύμφωνα με την [132], ο διογκωμένος περλίτης έχει τις καλύτερες θερμικές ιδιότητες, αλλά είναι ακατάλληλος λόγω της χαμηλής αντίστασης στην πίεση. Ωστόσο, στο Mühlendorf, μια ειδική τεχνική μόνωσης κενού επέτρεψε τη χρήση διογκωμένου περλίτη ως θερμομονωτικού υλικού όχι μόνο στα πλαϊνά τοιχώματα και στο επάνω μέρος αλλά και στο κάτω μέρος ([208], Εικ. 3.9 και 3.10). Ο διογκωμένος πηλός έχει ήδη χρησιμοποιηθεί στις αρχές του TES, για παράδειγμα στο Lambohon, που χτίστηκε το 1980 [132]. Άλλα πλεονεκτήματα των φυσικών υλικών είναι η ευνοϊκή περιβαλλοντική συμβατότητα και συχνά το χαμηλό κόστος. Παρ' όλα αυτά, τα περισσότερα από αυτά τα φυσικά υλικά δεν χρησιμοποιήθηκαν σε περαιτέρω συστήματα αποθήκευσης διαφορετικά από εκείνα όπου έχουν δοκιμαστεί αρχικά (Εικ. 3.10).

Μια νεότερη τάση είναι η χρήση υλικών ανακύκλωσης. Αυτά περιλαμβάνουν αφρώδες γυαλί (ως φύλλα ή κοκκώδη) και διογκωμένα υάλινα κοκκία, και τα δύο ανακτώνται από απορρίμματα γυαλιού. Όπως φαίνεται στο Σχ. 3.10, αυτή η ανάπτυξη ξεκινά σχετικά αργά, ξεκινώντας από τα έτη 1995 (αφρώδες γυαλί) και 1999 (διογκωμένο γυαλί). Τα υλικά ανακύκλωσης δεν ήταν διαθέσιμα για όσο διάστημα ήταν και οι συμβατικοί θερμικοί μονωτές. Το αφρώδες γυαλί εν τω μεταξύ αντιπροσωπεύει ένα συνήθως χρησιμοποιούμενο υλικό για μόνωση πυθμένα, ενώ το διογκωμένο κοκκώδες γυαλί εφαρμόζεται συχνά για μονωτικά πλαϊνά τοιχώματα και για μόνωση οροφής (Σχ. 3.9 και 3.10) Εκτός από τις ελκυστικές ιδιότητες θερμομόνωσης, δείχνουν επίσης καλή μηχανική αντίσταση [165]. Μεταξύ των υλικών

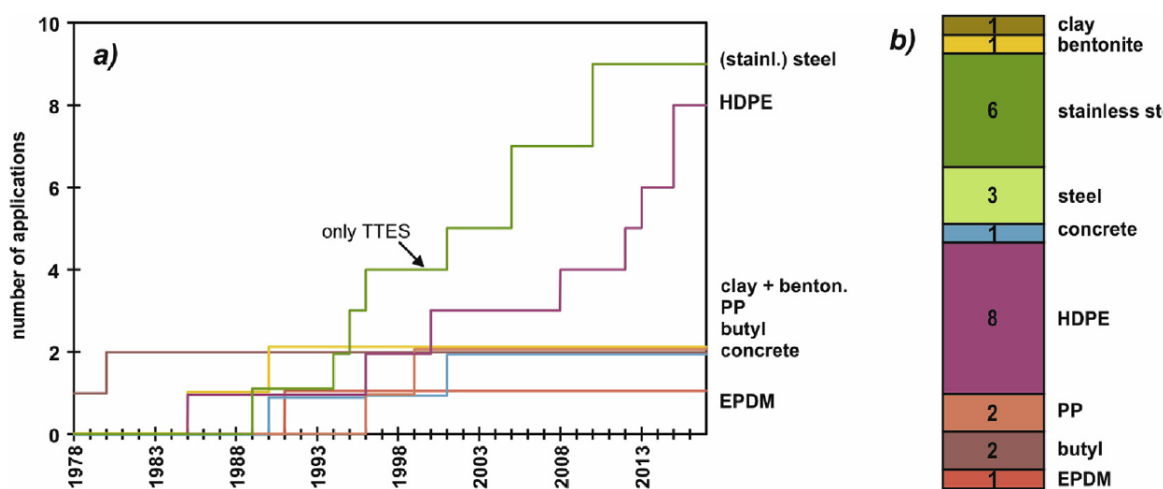
ανακύκλωσης, ο διογκωμένος κόκκος γυαλιού έχει τη χαμηλότερη θερμική αγωγιμότητα [132]. Επιπλέον, όλα τα υλικά ανακύκλωσης είναι ανθεκτικά στο νερό και μπορούν να στεγνώσουν εύκολα. Αντίστοιχα, το διογκωμένο κοκκώδες γυαλί χρησιμοποιήθηκε ως υλικό συμβατό με την υγρασία στο εξωτερικό των πλευρικών τοιχωμάτων αποθήκευσης στο Αννόβερο, το οποίο είναι κατασκευασμένο από σκυρόδεμα κρίσιμης διαπερατότητας [200]. Στο WGTES στο Steinfurt, χρησιμοποιούνται αφρώδες γυαλί και διογκωμένα κοκκία [212,213]. Το αφρώδες γυαλί είναι τοποθετημένο σε πλάκες πάχους 0,15μ. στο κάτω μέρος ενώ το διογκωμένο κοκκώδες γυαλί είναι εγκατεστημένο σε σάκους γεωφύσματος πάχους 0,5μ. Οι μελέτες [186,195] παρέχουν μια λεπτομερή επισκόπηση διαφόρων μονωτικών υλικών. Με βάση τον ορισμό και την ιεράρχηση των θερμικών, μηχανικών και άλλων απαιτήσεων, αξιολογούνται διάφορα δελτία δεδομένων.



Εικ. 3.10. Εξέλιξη εφαρμοσμένων μονωτικών υλικών που χρησιμοποιούνται στα πλαϊνά τοιχώματα για όλους τους τύπους αποθήκευσης (TTES, PTES, WGTES). Οι ανόργανες ίνες χρησιμοποιούνται εντατικά από τα μέσα της δεκαετίας του 1990, αλλά αποκλειστικά για TTES.

### 3.3.6 Στεγανοποίηση - Υλικά στεγανοποίησης

Οι διαρροές είναι ένα σημαντικό ζήτημα συστημάτων αποθήκευσης με βάση το νερό. Μπορεί να προκληθούν από ζημιές κατά την κατασκευή ή μπορεί να συμβούν αργότερα λόγω κόπωσης του υλικού. Κατά συνέπεια, υπάρχουν πολλές διαθέσιμες μέθοδοι και υλικά για την αποφυγή τόσο της απώλειας όσο και της διείσδυσης νερού και υγρασίας. Τα υλικά στεγανοποίησης στα TES μπορούν να προσαρμοστούν από μια ποικιλία άλλων πεδίων εφαρμογής. Έρευνες όπως η μελέτη [186] καλύπτουν συμβατικά υλικά για την ταφή, τα φράγματα, τα κανάλια, τις λίμνες, και την κατασκευή σηράγγων. Οι πλαστικές επενδύσεις, όπως το μονομερές αιθυλενίου προπυλενίου διενίου (EPDM), πολυαιθυλενίου υψηλής πυκνότητας (HDPE), πολυπροπυλενίου (PP) και χλωριούχου πολυβινυλίου (PVC), είναι κοινές σε αυτές τις περιοχές και έχουν χρησιμοποιηθεί επίσης σε εποχιακά TES ([178], Σχ. 3.11α και β).



Εικ. 3.11. (α) Ανάπτυξη εφαρμογών και (β) τρέχουσα κατανομή στεγανοποιητικών υλικών για όλους τους τύπους αποθήκευσης (TTES, PTES, WGTES).

Οι επενδύσεις χάλυβα ή ανοξείδωτου χάλυβα χρησιμοποιούνται πολύ συχνά, αλλά αυτές περιορίζονται σε TTES (Εικ. 3.11α και β). Τα πλεονεκτήματα του ανοξείδωτου χάλυβα προσφέρουν υψηλή αντοχή στη γήρανση και διάχυση, ενώ τα μειονεκτήματα περιλαμβάνουν πιθανή διάβρωση, πιο περίπλοκες διαδικασίες εγκατάστασης και υψηλότερο κόστος [186].

Ωστόσο, με τη χρήση ανοξειδωτού χάλυβα, η μέγιστη θερμοκρασία αποθήκευσης ( $>> 95 \text{ }^\circ \text{C}$ ) είναι πολύ υψηλότερη από εκείνη των πλαστικών επενδύσεων ( $<90 \text{ }^\circ \text{C}$ ) [116,178]. Οι πλαστικές επενδύσεις είναι πλεονεκτικές λόγω του συγκεκριμένου κόστους τους, της μορφής τους ως λωρίδες και της ταχύτητας εφαρμογής.

Το HDPE κυριαρχεί σαφώς (Εικ. 3.11b), καθώς στο μεταξύ έχει αποδειχθεί ότι είναι κατάλληλο για PTES και WGTES. Το HDPE χρησιμοποιείται σε δύο από τις τρεις γερμανικές αποθήκες WGTES (Στουτγκάρδη, Chemnitz) και στο WGTES στο Lyngby (Δανία [170,217]). Αντιθέτως, άλλες γεωμεμβράνες (PP, βουτύλιο, EPDM) δεν έχουν επιβιώσει πέραν του πειραματικού τους στάδιου (Εικ. 3.11α).

Τα WGTES συχνά χρησιμοποιούν πλαστικές επενδύσεις για να διαχωριστεί το υλικό αποθήκευσης από το περιβάλλον χώμα [112]. Επιπλέον, αυτές οι επενδύσεις επιτρέπουν τον έλεγχο διαρροών. Στο Steinfurt, μια επένδυση διπλού στρώματος πολυπροπυλενίου (PP), η οποία μπορεί να ελεγχθεί με κενό για στεγανότητα ακόμη και μετά την εγκατάσταση, εφαρμόστηκε για πρώτη φορά το 1999. Το πλαστικό PP τροποποιήθηκε για να εξασφαλίσει καλύτερη μακροπρόθεσμη αντοχή στη θερμοκρασία έως  $90 \text{ }^\circ \text{C}$  [212]. Η μελέτη [214] σημειώνει ότι το κόστος για περισσότερα ανθεκτικά στη θερμοκρασία υλικά όπως ο ανοξειδωτός χάλυβας είναι σημαντικά υψηλότερο. Ακόμα, τα φύλλα είναι γενικά ευάλωτα σε διαρροές, όπως τεκμηριώνονται στην αποθήκη στο Herlev, για παράδειγμα, η οποία ήταν εξοπλισμένη με επένδυση EPDM μονής στρώσης στην εσωτερική πλευρά των χαλύβδινων φύλλων [170]. Για να αποφευχθεί η διαρροή λόγω θερμικής παραμόρφωσης, το PTES στο Marstal ήταν εξοπλισμένο με ατσάλινο πλέγμα [148].

Η εγκατάσταση στο Ottrupgaard σφραγίστηκε με στρώμα αργίλου πάχους 0,85 m στο κάτω μέρος και στα πλαϊνά τοιχώματα [148,149]. Δυστυχώς, δεν επιτεύχθηκε ικανοποιητική αντίσταση και σημαντικές απώλειες νερού σημειώθηκαν λίγο μετά την έναρξη λειτουργίας [170]. Η μελέτη [169] επισημαίνεται ότι η διαρροή είναι συχνή για συναφή έργα με στεγανοποίηση από πηλό ή μπετονίτη λόγω της υψηλής ευαισθησίας του, όπως παρατηρείται επίσης και στην αποθήκη στο Χόερμπι (Δανία [131]) Επομένως, η χρήση αυτού του φυσικού υλικού επίσης στο μέλλον είναι αβέβαιη.

Στο Αννόβερο δοκιμάστηκε ένα αδιάβροχο σκυρόδεμα υψηλής απόδοσης με βελτιστοποιημένο ρυθμό διάχυσης (επίπεδο ποιότητας B85,  $4 \text{ L} / \text{m}^2 \cdot \text{a}$ ). Η ποιότητα επιτεύχθηκε με την προσθήκη μικροπυριτίου, αντικαθιστώντας ανοξειδωτά χιτώνια [200,242]. Αναμένονταν μείωση κόστους κατά 15%, η οποία τελικά δεν μπόρεσε να επιτευχθεί [119,195].



### 3.3.7 Διάχυση ατμών

Οι απώλειες νερού στα συστήματα TES δεν προκαλούνται μόνο από νερό σε υγρή φάση, αλλά και από ατμούς, που διεισδύουν μέσω του κελύφους αποθήκευσης προς τα έξω. Αυτό μειώνει σημαντικά την απόδοση του μονωτικού υλικού και, ως εκ τούτου, μειώνει επίσης τη συνολική απόδοση του συστήματος. Δεδομένου ότι η μεταφορά υγρασίας συμβαίνει κυρίως σε περιοχές με υψηλότερες θερμοκρασίες (στην κορυφή και στα πλαϊνά τοιχώματα), αυτό είναι κυρίως όπου χρησιμοποιούνται φράγματα διάχυσης ατμών. Για οικονομικούς λόγους, αυτά συχνά παραμελούνται στο σχετικά χαμηλό κρύο χώρο αποθήκευσης [213].

Οι αποθηκευτικές δεξαμενές δεν χρειάζονται φράγματα διάχυσης ατμών καθώς περιέχουν ήδη εσωτερική επένδυση από ανοξείδωτο χάλυβα [116,159]. Για παράδειγμα, στο Αμβούργο, ένα συγκολλημένο φύλλο ανοξείδωτου πάχους 1,25 mm χρησιμεύει ως εντελώς αδιαπέραστο στρώμα [200]. Αντίθετα, οι πλαστικές επενδύσεις εμφανίζουν αξιοσημείωτη διαπερατότητα [210]. Επειδή τα πρώτα γερμανικά WGTES στη Στουτγκάρδη και στο Chemnitz δεν είχαν φράγματα διάχυσης ατμών, εντοπίστηκαν απώλειες νερού μέσω της επένδυσης HDPE. Στη Στουτγκάρδη, 10–15 m<sup>3</sup> νερού έπρεπε να ξαναγεμίζεται κάθε χρόνο, που αντιστοιχεί σε ένα κλάσμα του 3% του συνολικού όγκου νερού [127]. Λόγω αυτών των εμπειριών, έπρεπε να εφαρμοστούν πρόσθετα υλικά, κυρίως μεταλλικά φύλλα, για να αποφευχθεί η μεταφορά υγρασίας μεταξύ του χώρου αποθήκευσης και του περιβάλλοντος χώρου [159,186,210]. Στο Steinfurt, εγκαταστάθηκε μια επένδυση PP-Al-PE [164,213]. Η έννοια των σύνθετων φύλλων είναι επίσης κοινή σε άλλους τομείς εφαρμογής (π.χ. στον κατασκευαστικό τομέα). Στο Eggenstein, το φράγμα αλουμινίου τοποθετείται μέσα στην πλαστική επένδυση που συγκολλήθηκε στους θαλάμους [162,195].

## 3.4 Γενιές τεχνολογιών αποθήκευσης και υπόλοιπα ζητήματα

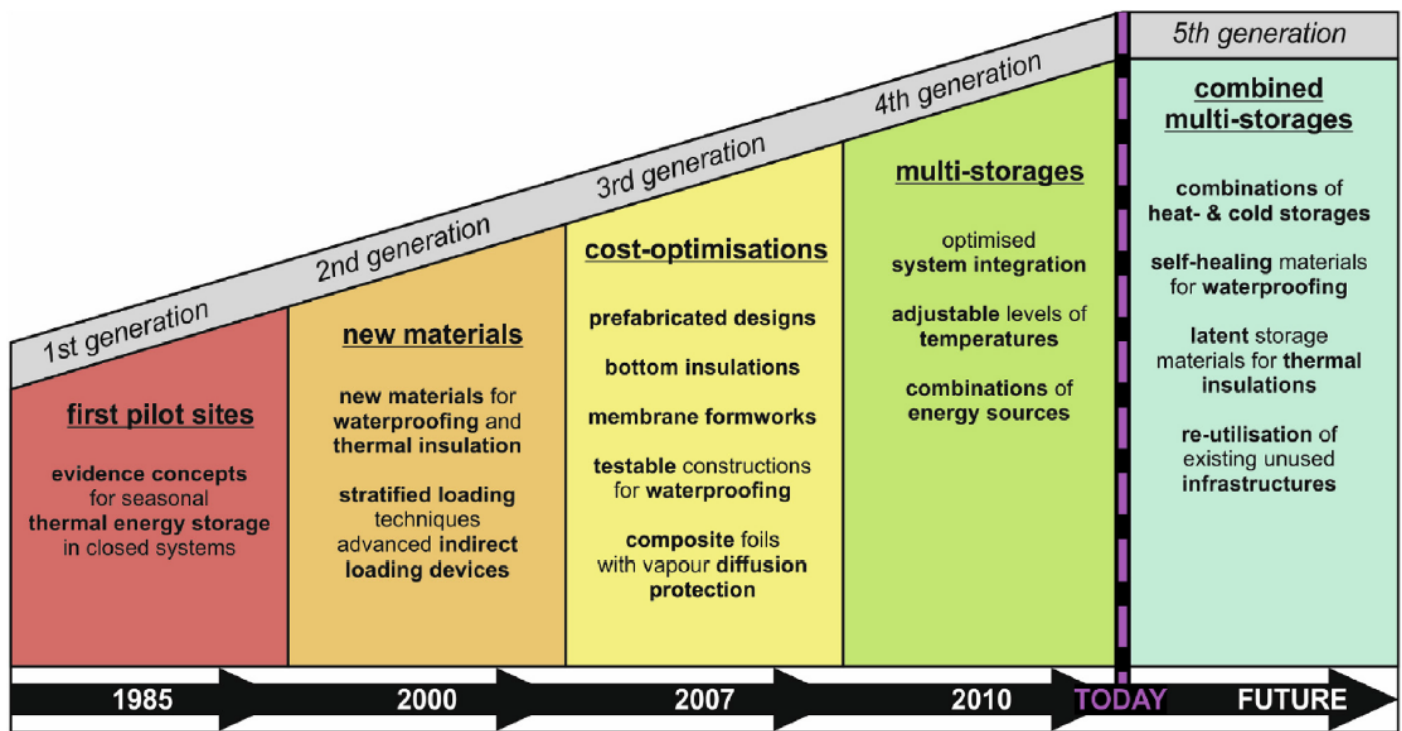
Οι πιο σημαντικές καινοτομίες κατά την προηγούμενη ανάπτυξη των TES παρουσιάζονται ως εξέλιξη πολλαπλών γενεών στο Σχ. 3.12 [138,150,187,212]. Ενώ τα πιλοτικά έργα απέδειξαν για πρώτη φορά τη βασική σκοπιμότητα των εποχιακών TES, νέα υλικά στεγανοποίησης και θερμομόνωσης έχουν ήδη εφαρμοστεί στη δεύτερη γενιά. Έτσι, αυξήθηκε η αποτελεσματικότητα (π.χ. μέσω βελτιστοποιημένων συστημάτων φόρτωσης και εκφόρτωσης)

και τα πρώτα προβλήματα (ειδικά διαρροές) επιλύθηκαν ταυτόχρονα. Στην τρίτη γενιά, η προτεραιότητα μετατοπίστηκε σε μειώσεις κόστους, για παράδειγμα χρησιμοποιώντας προκατασκευασμένα στοιχεία για θερμικές μονώσεις ή δομικά στοιχεία των TES. Οι νέες τεχνικές μόνωσης και ειδικότερα η θερμομόνωση πυθμένα βελτίωσαν την απόδοση, ενώ τα σύνθετα φύλλα με στρώματα διάχυσης ατμών και δοκιμαστικές τεχνικές στεγανοποίησης μείωσαν περαιτέρω τις απώλειες νερού. Σήμερα, στο επίπεδο της τέταρτης γενιάς, η μεγαλύτερη προσοχή εστιάζεται στην αποτελεσματική ενσωμάτωση και λειτουργία αποθήκευσης σε μεγαλύτερα δίκτυα. Αυτό συμπληρώνεται με το συντονισμό των επιπέδων θερμοκρασίας και τον συνδυασμό διαφορετικών πηγών ενέργειας.

Ωστόσο, παραμένουν ορισμένα άλυτα κρίσιμα ζητήματα που απαιτούν περαιτέρω προσοχή. Στο Σχ. 3.12, αποδίδονται στην επόμενη, πέμπτη γενιά. Τεχνικά, χρειάζονται βελτιώσεις και νέες εξελίξεις κατάλληλων υλικών. Η επίτευξη μακροπρόθεσμης ζωής είναι μια διαδεδομένη πρόκληση των υπαρχόντων εγκαταστάσεων, π.χ. λόγω δομικής κόπωσης στεγανοποίησης. Τα TES πρέπει να διατηρήσουν τις απώλειες ενέργειας στο ελάχιστο για μια ζωή αρκετών δεκαετιών, όχι μόνο για λόγους αποδοτικότητας αποθήκευσης, αλλά και για την ελαχιστοποίηση των περιβαλλοντικών κινδύνων. Για παράδειγμα, στην μελέτη. [200] μετρήθηκε μια αύξηση της θερμοκρασίας από 8 ° C έως 30 ° C στα 4m κάτω από την επιφάνεια του εδάφους δίπλα στην εγκατάσταση στο Αννόβερο. Γενικά, τέτοια σημαντική θέρμανση εδάφους ανιχνεύεται σπάνια και αυτό υποστηρίζεται από προσομοιώσεις [241]. Ωστόσο, στην πράξη, απαιτούνται κατάλληλα συστήματα παρακολούθησης και ελέγχου για τη διάσωση του περιβάλλοντος και υπόγειων υδάτων [12]

Όσον αφορά τη λειτουργία των TES, οι τεράστιες ευκαιρίες για ενσωμάτωση νέων και διαφορετικών πηγών ενέργειας δεν αξιοποιούνται ακόμη. Τα περισσότερα TES βασίζονται στην ηλιακή ενέργεια, αλλά η έξυπνη ενσωμάτωση στα δίκτυα θέρμανσης και ψύξης μπορεί επίσης να διευκολύνει τη βιομηχανική υπερβολική ενέργεια, τη γεωθερμική ενέργεια και τη σπατάλη θερμότητας από κτίρια γραφείων και κέντρα δεδομένων. Εκτός από αυτό, η βέλτιστη χρήση των TES απαιτεί προσαρμοσμένη μηχανική έλεγχο. Σε πολλές περιπτώσεις, για παράδειγμα, οι θερμοκρασίες επιστροφής είναι πολύ υψηλές, και σε άλλες η επιτευχθείσα θερμική διαστρωμάτωση είναι μη βέλτιστη. Για ηλιακά συστήματα, το ηλιακό κλάσμα μπορεί να αυξηθεί κατά ένα τοις εκατό εάν η θερμοκρασία επιστροφής μειωθεί κατά μόνο έναν βαθμό [108]. Τέλος, μια μελλοντική προσέγγιση για μεγαλύτερη ευελιξία είναι η εξέταση συνδυασμένων συστημάτων αποθήκευσης που αντιπροσωπεύουν λύσεις πολλαπλών αποθηκευτικών χώρων διαφορετικών μεγεθών και διαφορετικών επιπέδων θερμοκρασίας.

Τέτοιες λύσεις προσφέρουν όχι μόνο περισσότερη ευελιξία, αλλά μπορούν επίσης να αναβαθμιστούν πιο εύκολα σε περίπτωση επέκτασης δικτύου ή καινοτόμων υλικών. Αυτή η αρθρωτή εφαρμογή των TES μπορεί επίσης να μειώσει το υψηλό αρχικό κόστος κατασκευής, το οποίο συχνά είναι καθοριστικό για την υλοποίηση ενός έργου.



Εικ. 3.12. Γενιές εποχιακών συστημάτων αποθήκευσης με τις πιο σημαντικές εφευρέσεις στους διαφορετικούς τομείς.

## ΚΕΦΑΛΑΙΟ 4<sup>ο</sup>

### 4.1 Συμπεράσματα

Η αποθήκευση θερμικής ενέργειας είναι μια πολλά υποσχόμενη τεχνολογία για τη βελτίωση της εξοικονόμησης ενέργειας. Καθώς η Ευρωπαϊκή Ένωση υποστηρίζει σε μεγάλο βαθμό την ενσωμάτωση των ανανεώσιμων πηγών ενέργειας στα δίκτυα ηλεκτρικής ενέργειας και στα δίκτυα θέρμανσης, η τεχνολογία TES βρήκε ενσωματώθηκε εύκολα στα συστήματα ηλιακής ενέργειας. Η ανασκόπηση που έγινε στην παρούσα διπλωματική εργασία της βιβλιογραφίας υποδεικνύει ότι οι τεχνολογίες εποχικών TES (TTES και PTES) είναι οι περισσότερο υποσχόμενοι τύποι STES λόγω της υψηλής θερμοκρασίας λειτουργίας τους και, στη συνέχεια, της υψηλής ισχύος φόρτισης / εκφόρτισης. Έτσι έγινε εκτεταμένη τεκμηρίωση της κατασκευής των ανωτέρω TES με την ανάλυση των διάφορων επιμέρους στοιχείων και υλικών που χρησιμοποιούνται.

Τελικά τα συμπεράσματα που προκύπτουν είναι τα εξής:

- Τα συστήματα ATES και BTES είναι οικονομικά αποδοτικές επιλογές σε σύγκριση με τα TTES και PTES. Ωστόσο, τα μικρά εύρη λειτουργίας και οι υδρο-γεωλογικές συνθήκες εμποδίζουν την επέκταση αυτών των συστημάτων.
- Τα συστήματα ATES και BTES παρουσιάζουν σχετικές χαμηλές θερμοκρασίες και τις ροές φόρτισης / εκφόρτισης σε σύγκριση με τα TTES και PTES. Επομένως, τα ATES και BTES παρέχουν λιγότερη λειτουργική ισχύ (δηλ. Θερμότητα).
- Τα TTES και PTES χαρακτηρίζονται με διαφορά θερμοκρασίας λειτουργίας έως 30 K (ή μερικές φορές ακόμη περισσότερο) και υψηλές ροές και, συνεπώς, υψηλή ισχύ φόρτισης / εκφόρτισης.
- Τα υπόγεια TTES και PTES μπορούν να κατασκευαστούν σε οποιαδήποτε τοποθεσία και, ως εκ τούτου, συχνά θεωρούνται προηγμένα σε σχέση με τα ATES και τα BTES για εφαρμογές μεγάλης κλίμακος τηλεθέρμανσης. Ωστόσο, η κατασκευή απαιτεί μεγάλο κόστος λόγω της απαιτούμενης μόνωσης. Συνεπώς, συνιστάται να υπάρξει ένας συμβιβασμός μεταξύ του κόστους επένδυσης και του απαιτούμενου επιπέδου μόνωσης.
- Επίσης τα υπόγεια TES μπορούν να κατασκευαστούν σε οποιοδήποτε επιθυμητό γεωμετρικό σχήμα (κυλινδρικός, κόλουρος κώνος, και πυραμίδα). Ωστόσο, η επιλογή του σχήματος είναι

μια συνάρτηση σε μια λίστα παραμέτρων. Προφανώς, το επιλεγμένο σχήμα πρέπει να λαμβάνει υπόψη τη σημασία των λόγων  $A / V$  και  $h / d$  και την επίδρασή τους στην αποθήκευση και την απόδοση του συστήματος.

- Η επιλογή μεταξύ ενός υπόγειου και ενός υπέργειου συστήματος TES θεωρείται συχνά δύσκολη λόγω των διαφορετικών τεχνικών και οικονομικών διαφορών. Εάν προτιμηθεί ένα υπόγειο TES, τότε το κόστος κατασκευής είναι χαμηλότερο σε σύγκριση με τις δεξαμενές (λόγω του λιγότερου κόστους εκσκαφής και του μικρότερου βάθους από τις δεξαμενές). Ωστόσο, φαίνεται ότι η διαστρωμάτωση τείνει να υποβαθμίζεται, καθώς το βάθος γίνεται όλο και μικρότερο. Επομένως, οι δεξαμενές είναι τεχνικά προτιμητέες, καθώς δείχνουν καλύτερη διαστρωμάτωση, αλλά απαιτούν επίσης υψηλό κόστος κατασκευής. Ως εκ τούτου, απαιτούνται προσομοιώσεις για τον προσδιορισμό του βέλτιστου τύπου κατασκευής και του βέλτιστου βάθους.

- Υπάρχουν πολλοί δείκτες που χρησιμοποιούνται για την αξιολόγηση των συστημάτων TES. Ωστόσο, δεν έχει βρεθεί κοινή αποτελεσματική προσέγγιση για τη σύγκριση της απόδοσης ενός συστήματος TES με αυτήν ενός άλλου συστήματος TES που λειτουργεί υπό διαφορετικές συνθήκες.

Οι προσπάθειες ενσωμάτωσης και / ή επέκτασης των ανανεώσιμων πηγών ενέργειας στο συνολικό ενεργειακό σύστημα αυξάνονται δραστικά σε πολλές χώρες σε όλο τον κόσμο επομένως, εισάγονται ορισμένες στρατηγικές και τεχνολογίες που επιτρέπουν την επέκταση των ανανεώσιμων πηγών ενέργειας. Μεταξύ των τεχνολογιών, η αποθήκευση ενέργειας θεωρείται συχνά βασική λύση, ειδικά τα εποχικά συστήματα αποθήκευσης θερμικής ενέργειας για τη γεφύρωση του χάσματος μεταξύ της ζήτησης θέρμανσης χειμώνα και της διαθεσιμότητας ηλιακής θερμότητας το καλοκαίρι. Αυτά τα συστήματα είναι πολύτιμες επιλογές για το συνολικό ενεργειακό σχήμα. Ωστόσο, οι γνώσεις τους βρίσκονται ακόμη σε προκαταρκτικά στάδια και οι ερευνητές και οι μηχανικοί ενθαρρύνονται ιδιαίτερα να προωθήσουν αυτά τα συστήματα για μια αποτελεσματική λειτουργία και μια βέλτιστη κατασκευή.

Τελικά η τεχνολογία που υπάρχει σήμερα για τις μονάδες TES μικρής κλίμακας κατανοείται και υλοποιείται σε βάθος, αλλά το περιβάλλον είναι γεμάτο εποχιακές φθηνές πηγές ενέργειας όπως οι ανανεώσιμες. Κάτι το οποίο οδηγεί και ευνοεί την περαιτέρω μελέτη και ανάπτυξη της τεχνολογίας των εποχιακών συστημάτων αποθήκευσης θερμικής ενέργειας.

## ΒΙΒΛΙΟΓΡΑΦΙΑ

- [1] European Commission. *European Union Energy in Figures; Statistical Pocketbook; Publications Office of the EU: Luxembourg, Luxembourg, 2016.*
- [2] Twidell, J.; Weir, T. *Renewable Energy Resources; Routledge: London, UK, 2015.*
- [3] Iten, M.; Liu, S.; Shukla, A. A review on the air-PCM-TES application for free cooling and heating in the buildings. *Renew. Sustain. Energy Rev.* **2016**, *61*, 175–186.
- [4] Sarbu, I.; Sebarchievici, C. *Solar Heating and Cooling: Fundamentals, Experiments and Applications; Elsevier: Oxford, UK, 2016.*
- [5] Dincer, I.; Rosen, M.A. *Thermal Energy Storage: Systems and Application; John Wiley & Sons: Chichester, UK, 2011.*
- [6] International Renewable Energy Agency (IRENA). *The Energy Technology Systems Analysis Programmes (ETSAP): Technology Brief E17; International Energy Agency: Paris, France, 2013. Available online: <http://www.irena.org/Publications> (accessed on 8 July 2015).*
- [7] Joseph, A.; Kabbara, M.; Groulx, D.; Allred, P.; White, M.A. Characterization and real-time testing of phase-change materials for solar thermal energy storage. *Int. J. Energy Res.* **2016**, *40*, 61–70.
- [8] Hauer, A. *Storage Technology Issues and Opportunities, International Low-Carbon Energy Technology Platform. In Proceedings of the Strategic and Cross-Cutting Workshop “Energy Storage—Issues and Opportunities”, Paris, France, 15 February 2011.*
- [9] De Garcia, A.; Cabeza, C.F. Phase change materials and thermal energy storage for buildings. *Energy Build.* **2015**, *103*, 414–419.
- [10] Kumar, A.; Shukla, S.K. A Review on Thermal Energy Storage Unit for Solar Thermal Power Plant Application. *Energy Procedia* **2015**, *74*, 462–469.
- [11] Ayappan, S.; Mayilsamy, K.; Sreenarayanan, V.V. Performance improvement studies in a solar greenhouse drier using sensible heat storage materials. *Heat Mass Transf.* **2016**, *52*, 459–467.
- [12] Brielmann H, Lueders T, Schreglmann K, Ferraro F, Avramov M, Hammerl V, et al. Shallow geothermal energy usage and its potential impacts on groundwater ecosystems. *Grundwasser* 2011;16(2):77–91.
- [13] Tian, Y.; Zhao, C.Y. A review of solar collectors and thermal energy storage in solar thermal applications. *Appl. Energy* **2013**, *104*, 538–553.
- [14] Basecq, V.; Michaux, G.; Inard, C.; Blondeau, P. Short-term storage systems of thermal energy for buildings: A review. *Adv. Build. Energy Res.* **2013**, *7*, 66–119.
- [15] International Energy Agency (IEA). *Energy Conservation through Energy Storage (ECES) Programme; Brochure, International Energy Agency: Paris, France, 2016. Available online: [http://www.iea-ec.es.org/files/090525\\_broschuere\\_eces.pdf](http://www.iea-ec.es.org/files/090525_broschuere_eces.pdf) (accessed on 10 October 2016).*
- [16] Novo, A.V.; Bayon, J.R.; Castro-Fresno, D.; Rodriguez-Hernandez, J. Review of seasonal heat storage in large basins: Water tanks and gravel-water pits. *Appl. Energy* **2010**, *87*, 390–397.
- [17] Paksoy, H.; Snijders, A.; Stiles, L. State-of-the-art review of aquifer thermal energy storage systems for heating and cooling buildings. *In Proceedings of the Effstock Conference, Stockholm, Sweden, 5–17 June 2009.*
- [18] Bauer, D.; Marx, R.; Nußbicker-Lux, J.; Ochs, F.; Heidemann, W.; Müller-Steinhagen, H. German central solar heating plants with seasonal heat storage. *Sol. Energy* **2010**, *84*, 612–623.
- [19] Heier, J.; Bales, C.; Sotnikov, A.; Ponomarova, G. Evaluation of high temperature solar thermal seasonal borehole storage. *In Proceedings of the ISES SolarWorld Congress, Kassel, Germany, 28 August–2 September 2011.*
- [20] Morrison, D.J.; Abdel-Khalik, S.I. Effects of phase-change energy storage on the performance of air-based and liquid-based solar heating systems. *Sol. Energy* **1978**, *20*, 57–67.
- [21] Kenisarin, M.; Mahkamov, K. Passive thermal control in residential buildings using phase change materials. *Renew. Sustain. Energy Rev.* **2016**, *55*, 371–398.

- [22] Kerskes, H.; Mette, B.; Bertsch, F.; Asenbeck, S.; Drück, H. *Chemical energy storage using reversible solid/gas-reactions (CWS)—Results of the research project*. *Energy Procedia* 2012, 30, 294–304.
- [23] Fujii, I.; Tsuchiya, K.; Higano, M.; Yamada, J. *Studies of an energy storage system by use of the reversible chemical reaction:  $\text{CaO} + \text{H}_2\text{O} \rightleftharpoons \text{Ca(OH)}_2$* . *Sol. Energy* 1985, 34, 367–377.
- [24] Kizilkan, Ö.; Sencan, A.; Kalogirou, S.A. *Thermoeconomic optimization of a LiBr absorption refrigeration system*. *Chem. Eng. Process. Process Intensif.* 2007, 46, 1376–1384.
- [25] Al-Ugla, A.A.; El-Shaarawi, M.A.I.; Said, S.A.M.; Al-Qutub, A.M. *Techno-economic analysis of solar-assisted air-conditioning systems for commercial buildings in Saudi Arabia*. *Renew. Sustain. Energy Rev.* 2016, 54, 1301–1310.
- [26] Calise, F.; D'Accadia, M.D.; Vanoli, L. *Thermoeconomic optimization of solar heating and cooling systems*. *Energy Convers. Manag.* 2011, 52, 1562–1573.
- [27] Calise, F. *Thermoeconomic analysis and optimization of high efficiency solar heating and cooling systems for different Italian school buildings and climates*. *Energy Build.* 2010, 42, 992–1003.
- [28] Eicker, U.; Pietruschka, D. *Design and performance of solar powered absorption cooling systems in office buildings*. *Energy Build.* 2009, 41, 81–91.
- [29] Al-Alili, A.; Islam, M.; Kubo, I.; Hwang, Y.; Radermacher, R. *Modeling of a solar powered absorption cycle for Abu Dhabi*. *Appl. Energy* 2012, 93, 160–167.
- [30] Hang, Y.; Qu, M.; Zhao, F. *Economical and environmental assessment of an optimized solar cooling system for a medium-sized benchmark office building in Los Angeles, California*. *Renew. Energy* 2011, 36, 648–658.
- [31] Tsoutsos, T.; Aloumpi, E.; Gkouskos, Z.; Karagiorgas, M. *Design of a solar absorption cooling system in a Greek hospital*. *Energy Build.* 2010, 42, 265–272.
- [32] Godarzi, A.; Jalilian, M.; Samimi, J.; Jokar, A.; Vesaghi, M.A. *Design of a PCM storage system for a solar absorption chiller based on exergoeconomic analysis and genetic algorithm*. *Int. J. Refrig.* 2013, 36, 88–101.
- [33] International Energy Agency (IEA). *Transition to Sustainable Buildings: Strategies and Opportunities to 2050*, Paris, France: Organisation for Economic Cooperation and Development (OECD); 2013.
- [34] Sartor K. *Simulation models to size and retrofit district heating systems*. *Energies* 2017;10(12).
- [35] *An EU Strategy on Heating and Cooling*. The European Commission, Brussels; 2016.
- [36] Tulus V, Boer D, Cabeza LF, Jiménez L, Guillén-Gosálbez G. *Enhanced thermal energy supply via central solar heating plants with seasonal storage: a multi-objective optimization approach*. *Appl Energy* 2016;181:549–61.
- [37] Bauer D, Marx R, Nußbicker-Lux J, Ochs F, Heidemann W, Müller-Steinhagen H. *German central solar heating plants with seasonal heat storage*. *Sol Energy* 2010;84(4):612–23.
- [38] Novo AV, Bayon JR, Castro-Fresno D, Rodriguez-Hernandez J. *Review of seasonal heat storage in large basins: Water tanks and gravel–water pits*. *Appl Energy* 2010;87(2):390–7.
- [39] Gao L, Zhao J, Tang Z. *A review on borehole seasonal solar thermal energy storage*. *Energy Proc* 2015;70:209–18.
- [40] Gao L, Zhao J, An Q, Wang J, Liu X. *A review on system performance studies of aquifer thermal energy storage*. *Energy Proc* 2017;142:3537–45.
- [41] Allegrini J, Orehounig K, Mavromatidis G, Ruesch F, Dorer V, Evins R. *A review of modelling approaches and tools for the simulation of district-scale energy systems*. *Renew Sustain Energy Rev* 2015;52:1391–404.
- [42] Sarbu I, Sebarchievici C. *Solar heating and cooling systems: fundamentals, experiments and applications*. Oxford, UK: Elsevier; 2017.
- [43] Denholm P, Jorgenson J, Miller M, Zhou E, Wang C. *Methods for analyzing the economic value of concentrating solar power with thermal energy storage*. Golden, CO, USA: National Renewable Energy Laboratory; 2015.

- [44] Cabeza LF, editor. *Advances in thermal energy storage systems*. Woodhead Publishing Series in Energy; 2015.
- [45] Stutz B, Le Pierres N, Kuznik F, Johannes K, Del Barrio EP, Bédécarrats J-P, et al. Storage of thermal solar energy. *CR Phys* 2017;18(7–8):401–14.
- [46] Ibrahim H, Ilinca A, Perron J. Energy storage systems—Characteristics and comparisons. *Renew Sustain Energy Rev* 2008;12(5):1221–50.
- [47] Guo F, Yang X, Xu L, Torrens I, Hensen J. A central solar-industrial waste heat heating system with large scale borehole thermal storage. *Proc Eng* 2017;205:1584–91.
- [48] Persson J, Westermark M. Low-energy buildings and seasonal thermal energy storages from a behavioral economics perspective. *Appl Energy* 2013;112:975–80.
- [49] Reed AL, Novelli AP, Doran KL, Ge S, Lu N, McCartney JS. Solar district heating with underground thermal energy storage: pathways to commercial viability in North America. *Renew Energy* 2018;126:1–13.
- [50] International Renewable Energy Agency (IRENA). “The Energy Technology Systems Analysis Programme (ESTAP): Technology Brief E17,” International Energy Agency (IEA); 2013.
- [51] Gudmundsson O, Thorsen JE, Brand M. The role of district heating in coupling of the future renewable energy sectors. *Energy Proc* 2018;149:445–54.
- [52] Schweiger G, Rantzer J, Ericsson K, Lauenburg P. The potential of power-to-heat in Swedish district heating systems. *Energy* 2017;137:661–9.
- [53] Xu J, Wang RZ, Li Y. A review of available technologies for seasonal thermal energy storage. *Sol Energy* 2014;103:610–38.
- [54] Ochs F. *Modelling large-scale thermal energy stores*, Ph.D. Dissertation, Shaker Verlag, Stuttgart; 2009.
- [55] “Fact sheet 7.2: Components Chapter. In: *Solar district heating guidelines*, Solar District Heating; 2012. p. 107–19.
- [56] Perez-Mora N, Bava F, Andersen M, Bales C, Lennermo G, Nielsen C, et al. Solar district heating and cooling: a review. *Int J Energy Res* 2018;42(4):1419–41.
- [57] Heier J, Bales C, Martin V. Combining thermal energy storage with buildings – a review. *Renew Sustain Energy Rev* 2015;42:1305–25.
- [58] Lizana J, Chacartegui R, Barrios-Padura A, Valverde JM. *Advances in thermal energy storage materials and their applications towards zero energy buildings: a critical review*. *Appl Energy* 2017;203:219–39.
- [59] Marx R, Nußbicker-Lux J, Bauer D, Heidemann W, Drück H. *Saisonale Wärmespeicher – Bauarten, Betriebsweise und Anwendungen*. *Chemie Ingenieur Technik*, Vols. 83, Special Issue: Energie, no. 11; 2011. p. 1994–2001.
- [60] Nußbicker-Lux J. *Simulation und Dimensionierung solar unterstützter Nahwärmesysteme mit Erdsonden-Wärmespeicher*. Ph.D. Dissertation, University of Stuttgart; 2010.
- [61] Lee KS. A review on concepts, applications, and models of aquifer thermal energy storage systems. *Energies* 2010;3(10):1320–34.
- [62] Seibertz KSO, Chirila MA, Bumberger J, Dietrich P, Vienken T. Development of aquifer heat testing for high resolution subsurface thermal-storage capability characterisation. *J Hydrol* 2016;534:113–23.
- [63] Sommer W, Valstar J, Leusbrock I, Grotenhuis T, Rijnaarts H. Optimization and spatial pattern of large-scale aquifer thermal energy storage. *Appl Energy* 2015;137:322–37.
- [64] Bloemendal M, Olsthoorn T, van de Ven F. Combining climatic and geo-hydrological preconditions as a method to determine world potential for aquifer thermal energy storage. *Sci Total Environ* 2015;538:621–33.
- [65] Pavlov GK, Olesen BW. *Thermal energy storage—A review of concepts and systems for heating and cooling applications in buildings: Part 1—Seasonal storage in the ground*. *VAC&R Res* 2012;18(3):515–38.



- [66] Sibbitt B, McClenahan D, Djebbar R, Thornton J, Wong B, Carriere J, et al. The performance of a high solar fraction seasonal storage district heating system – five years of operation. *Energy Proc.* 2012;30:856–65.
- [67] Zhang L, Xu P, Mao J, Tang X, Li Z, Shi J. A low cost seasonal solar soil heat storage system for greenhouse heating: design and pilot study. *Appl Energy* 2015;156:213–22
- [68] Xu L, Torrens JI, Guo F, Yang X, Hensen JLM. Application of large underground seasonal thermal energy storage in district heating system: a model-based energy performance assessment of a pilot system in Chifeng, China. *Appl Therm Eng* 2018;137:319–28.
- [69] Rad FM, Fung AS. Solar community heating and cooling system with borehole thermal energy storage – review of systems. *Renew Sustain Energy Rev* 2016;60:1550–61.
- [70] Rad FM, Fung AS, Leong WH. Feasibility of combined solar thermal and ground source heat pump systems in cold climate, Canada. *Energy Build* 2013;61:224–32.
- [71] Kalaiselvam S, Parameshwaran R. *Thermal energy storage technologies for sustainability: systems design, assessment and applications*. 1st ed. Elsevier; 2014.
- [72] Nam YJ, Gao XY, Yoon SH, Lee KH. Study on the performance of a ground source heat pump system assisted by solar thermal storage. *Energies* 2015;8(12):13378–94.
- [73] Hesaraki A, Holmberg S, Haghighat F. Seasonal thermal energy storage with heat pumps and low temperatures in building projects—a comparative review. *Renew Sustain Energy Rev* 2015;43:1199–213.
- [74] Sibbitt B, McClenahan D. *Seasonal borehole thermal energy storage—guidelines for design & construction*. International Energy Agency (IEA) - Solar Heating and Cooling Programme (SHC); 2015.
- [75] Alva G, Lin Y, Fang G. An overview of thermal energy storage systems. *Energy* 2018;144:341–78.
- [76] Terziotti LT, Sweet ML, McLeskey JT. Modeling seasonal solar thermal energy storage in a large urban residential building using TRNSYS 16. *Energy Build* 2012;45:28–31.
- [77] Kjellsson E, Hellström G, Perers B. Optimization of systems with the combination of ground-source heat pump and solar collectors in dwellings. *Energy* 2010;35(6):2667–73.
- [78] Pu L, Xu L, Qi D, Li Y. Structure optimization for horizontal ground heat exchanger. *Appl Therm Eng* 2018;136:131–40.
- [79] Sarbu I, Sebarchievici C. General review of ground-source heat pump systems for heating and cooling of buildings. *Energy Build* 2014;70:441–54.
- [80] Omer Abdeen M. Ground-source heat pumps systems and applications. *Renew Sustain Energy Rev* 2008;12(2):344–71.
- [81] Giordano N, Comina C, Mandrone G, Cagni A. Borehole thermal energy storage (BTES). First results from the injection phase of a living lab in Torino (NW Italy). *Renew Energy* 2016;86:993–1008.
- [82] Pinel P, Cruickshank CA, Beausoleil-Morrison I, Wills A. A review of available methods for seasonal storage of solar thermal energy in residential applications. *Renew Sustain Energy Rev* 2011;15(7):3341–59.
- [83] Mangold D. Seasonal storage – a German success story. *Sun & Wind Energy* 2007;1:48–58.
- [84] Li G. Sensible heat thermal storage energy and exergy performance evaluations. *Renew Sustain Energy Rev* 2016;53:897–923.
- [85] Cruickshank CA. *Evaluation of a Stratified Multi-Tank Thermal Storage for Solar Heating Applications*, Kingston, Ontario, Canada; 2009.
- [86] Haller MY, Mojic I, Frank E, Kaufmann M, Lötscher L, Podhradsky J, et al. Disturbance of stratification caused by direct horizontal inlets into a water storage tank. In: *EuroSun 2014: international conference on solar energy and buildings*, Aix-les-Bains, France, 16–19 September 2014.
- [87] Hegazy AA. Effect of inlet design on the performance of storage-type domestic electrical water heaters. *Appl Energy* 2007;84(12):1338–55.

- [88] Steinert P, Göppert S, Platzer B. Transient calculation of charge and discharge cycles in thermally stratified energy storages. *Sol Energy* 2013;97:505–16.
- [89] Baeten B. Residential heating using heat pumps and hot water storage tanks. Ph.D. Dissertation, KU Leuven, Leuven; 2017.
- [90] Moncho-Esteve IJ, Gasque M, González-Altozano P, Palau-Salvador G. Simple inlet devices and their influence on thermal stratification in a hot water storage tank. *Energy Build* 2017;150:625–38.
- [91] Dincer I, Rosen MA. *Thermal energy storage: systems and applications*, 2nd ed.; 2011.
- [92] Chang C, Leng G, Li C, Nie B, She X, Peng X, et al. Investigation on transient cooling process in a water heat storage tank with inclined sidewalls. *Energy Proc* 2017;142:142–7.
- [93] Jensen MV. Seasonal pit heat storages - Guidelines for materials & construction. International Energy Agency (IEA) - Solar Heating & Cooling Programme (SHC); 2014.
- [94] Ochs F, Zottl A, Lauerer M, Schranzhofer H, Halmdienst C, Reiterer D. *Optimierte Erdbecken-Wärmespeicher für Nahwärmenetze, Klima- und Energiefonds*; 2015.
- [95] Ochs F, Zottl A, Lauerer M, Schranzhofer H, Halmdienst C, Reiterer D. *Store4Grid: Optimierte Erdbecken-Wärmespeicher für Wärmenetze, Klima- und Energiefonds*; 2015.
- [96] Urbaneck T. *Kältespeicher: Grundlagen, Technik, Anwendung*, München: Oldenbourg Verlag; 2011.
- [97] Ochs F, Heidemann W, Müller-Steinhagen H. Saisonale Wärmespeicherung – eine Herausforderung für Polymere. In: *Proceedings of 2. Leobener Symposium Polymeric Solar Materials, Leoben, Austria*; 2008.
- [98] Ochs F, Heidemann W, Müller-Steinhagen H. Langzeit-Wärmespeicher für solare unterstützte Nahwärmesysteme. In: *Proceedings of 2. Internationale Speicherkonferenz Erneuerbare Energien - IRES II, Bonn, Germany*; 2007.
- [99] Sorknæs P. Simulation method for a pit seasonal thermal energy storage system with a heat pump in a district heating system. *Energy* 2018;152:533–8.
- [100] Sørensen PA, Schmidt T. Design and construction of large scale heat storages for district heating in Denmark. In: *EnerSTOCK2018: 14th International Conference on Energy Storage, Adana, Turkey, 25–28 April 2018*.
- [101] Kurşun B. Thermal stratification enhancement in cylindrical and rectangular hot water tanks with truncated cone and pyramid shaped insulation geometry. *Sol Energy* 2018;169:512–25.
- [102] Kammen DM, Sunter DA. City-integrated renewable energy for urban sustainability. *Science* 2016;352(6288):922–8.
- [103] Lund H, Werner S, Wiltshire R, Svendsen S, Thorsen JE, Hvelplund F, et al. 4th Generation District Heating (4GDH): Integrating smart thermal grids into future sustainable energy systems. *Energy* 2014;68:1–11.
- [104] International Energy Agency. *Tracking Clean Energy Progress: Buildings Available from: <http://www.iea.org/tcep/buildings>, Accessed date: 9 January 2019.*
- [105] Xu J, Wang RZ, Li Y. A review of available technologies for seasonal thermal energy storage. *Sol Energy* 2014;103:610–38.
- [106] Novo AV, Bayon JR, Castro-Fresno D, Rodriguez-Hernandez J. Review of seasonal heat storage in large basins: Water tanks and gravel–water pits. *Appl Energy* 2010;87(2):390–7.
- [107] Pavlov GK, Olesen BW. Seasonal ground solar thermal energy storage - review of systems and applications. In: *Proceedings, P-1.2-07*.
- [108] Mangold D, Raab S, Möller-Steinhagen H. Saisonale Wärmespeicherung in solaren Großanlagen: Status und Perspektiven. *DGS-Tagung Solares Heizen, Intersolar, Freiburg, 27.06. 2003. p. 1–9. 2003.*
- [109] Arce P, Medrano M, Gil A, Ors E, Cabeza LF. Overview of thermal energy storage (TES) potential energy savings and climate change mitigation in Spain and Europe. *Appl Energy* 2011;88(8):2764–74.

- [110] Schirmer U, Urbaneck T, Dionat P. Solares Heizen mit Großanlagen: Chancen und Perspektiven. Bautechnik-Forum Chemnitz 2004, VDI, Ingenieurkammer Sachsen, iproplan, VUBIC. TU Chemnitz; 2004. p. 80–104.
- [111] Thess A, Trieb F, Wörner A, Zunft S. Herausforderung Wärmespeicher. *Physik Journal* 2015;14(2):33–9.
- [112] Socaciu LG. Seasonal sensible thermal energy storage solutions. *Leonardo Electron J Pract Technol* 2011(19):49–68.
- [113] Dinnler I, Rosen M. *Thermal energy storage: Systems and applications*. 2nd ed. Hoboken N.J.: Wiley; 2011.
- [114] Kalaiselvam S. *Thermal energy storage technologies for sustainability: Systems design, assessment, and applications*. 1st ed. London, U.K.: Academic Press; 2014.
- [115] Hesaraki A, Holmberg S, Haghighat F. Seasonal thermal energy storage with heat pumps and low temperatures in building projects—a comparative review. *Renew Sustain Energy Rev* 2015;43:1199–213.
- [116] Bodmann M, Fisch MN. *Solarthermische Langzeit-Wärmespeicherung*. Eurosolar 2003. Wuppertal; 2003.
- [117] Fleuchaus P, Godschalk B, Stober I, Blum P. Worldwide application of aquifer thermal energy storage – a review. *Renew Sustain Energy Rev* 2018;94:861–76.
- [118] Lottner V, Schulz ME, Hahne E. Solar-Assisted district heating plants: Status of the German Programme Solarthermie-2000. *Sol Energy* 2000;69(6):449–59.
- [119] Mangold D. Seasonal Storage - a German success story. *Sun & Wind Energy* 2007(1):48–58.
- [120] Ochs F, Heidemann W, Möller-Steinhagen H, Koch H. Erdreich/Wasser-Erdbecken-Wärmespeicher mit direktem Beladesystem. OTTI, 16. Symposium thermische Solarenergie, Kloster Banz, Bad Staffelstein, 17.-19.05, vol. 2006. 2006.
- [121] Margen PH. Thermal energy storage in rock chambers - a complement to nuclear power. *Nucl Eng June* 1959:259–62.
- [122] Brun G. La régularisation de l'énergie solaire par stockage thermique dans le sol. *Rev Gen Therm* 1965(44).
- [123] Socaciu LG. Seasonal thermal energy storage concepts. *Appl Math Mech* 2012;55(IV):775–84.
- [124] Colclouth S. Seasonal thermal energy storage. Seminar on seasonal thermal energy storage (STES) for District Heating and Smart Cities, San Sebastian, 11.06. 2015. 2015.
- [125] Pavlov GK, Olesen BW. Thermal energy storage - a review of concepts and systems for heating and cooling applications in buildings: Part 1-Seasonal storage in the ground. *HVAC R Res* 2012;18(3):515–38.
- [126] Dalenbäck J-O, editor. *Central solar heating plants with seasonal storage: Status report*. Stockholm: Swedish Council for Building Research; 1990.
- [127] Hahne E. The ITW solar heating system: An oldtimer fully in action. *Sol Energy* 2000;69(6):469–93.
- [128] Chung M, Park J-U, Yoon H-K. Simulation of a central solar heating system with seasonal storage in Korea. *Sol Energy* 1998;64(4–6):163–78.
- [129] Dalenbäck J-O. *European large-scale solar heating network*. Göteborg: Department of Building Services Engineering, Chalmers University of Technology; 2002.
- [130] Akhmetov B, Tungatarova M, Kaltayev A. Thermal energy storage systems - review. *Bulg Chem Commun* 2016;48(Special Issue E):31–40.
- [131] Fan Y, Luo L. Energy storage by sensible heat for buildings. In: Wang R, Zhai X, editors. *Handbook of Energy Systems in Green Buildings*. Berlin, Heidelberg: Springer Berlin Heidelberg; 2018. p. 953–93.
- [132] Ochs F, Heidemann W, Möller-Steinhagen H. *Langzeit-Wärmespeicher für solare unterstützte Nahwärmesysteme*. IRES II, Bonn, 2007. 2007.
- [133] Chuard P, Hadorn J-C. *Heat Storage Systems: Concepts, Engineering Data and Compilation of Projects*. Berne, Switzerland: Office central fédéral; 1983.

- [134] Boysen A. *Preliminary Designs for Ten Countries*. Stockholm, Sweden: Swedish Council for Building Research; 1984.
- [135] Hadorn J-C, Chuard P. *Cost Data and Cost Equations for Heat Storage Concepts*. Berne, Switzerland: Office central fédéral; 1983.
- [136] Mangold D, Peuser FA. *10 Jahre Solarthermie-2000*. OTTI, 13. Symposium Thermische Solarenergie, Kloster Banz, Bad Staffelstein, 14.-16.05.2003. 2003.
- [137] Mangold D, Schmidt T, Möller-Steinhagen H. *Saisonale Wärmespeicher in solar unterstützten Nahwärmernetzen: Erfahrungen aus dem Programm Solarthermie- 2000*. VDI-Fachtagung Energiespeicher, Würzburg, 5.-6.11.2002. 2002.
- [138] Mangold D, Schmidt T. *Saisonale Wärmespeicher - neue Pilotanlagen im Programm Solarthermie2000plus und Forschungsperspektiven*. Statusseminar Thermische Energiespeicher, Freiburg, 2.-3.11.2006. 2006.
- [139] Mangold D, Schmidt T. *Die neuen Pilotprojekte mit Langzeit-Wärmespeicher*. OTTI, 16. Symposium thermische Solarenergie, Kloster Banz, Bad Staffelstein, 17.- 19.05.2006. 2006.
- [140] Mangold D. *Gespeicherte Sonnenenergie: Solar unterstützte Nahwärmesiedlungen*. Markt - Solares Bauen 2004(Okttober 04):82–5.
- [141] OECD, IEA. *Energy Policies of IEA Countries*. Paris: OECD Publishing; 2012.
- [142] Kóbler R, Fisch N, Hahne E. *High temperature water pit storage projects for the seasonal storage of solar energy*. *Sol Energy* 1997;61(2):97–105.
- [143] Lopez-Villada J, Bruno JC, Coronas A. *Storage concepts for solar district heating and cooling systems*. *Vajen (Hg.) – Proceedings of the ISES Solar*. 2011. p. 1–11.
- [144] Lasse KL. *Summary of technical description of the SUNSTORE 4 plant in Marstal* Available from: <https://www.solarmarstal.dk/media/6600/summary-technicaldescription-marstal.pdf>, Accessed date: 9 January 2019.
- [145] Dyrelund A. *4th generation district energy: The back bone of liveable and resilient campuses and cities*. *Energy Planning for Resilient Military Installations, EBC Annex 73 Symposium, Washington D.C.*, 6.12.2017. 2017.
- [146] ARCON SUNMARK. *Large-Scale showcase projects* Available from: [http://arconsunmark.com/uploads/ARCON\\_References.pdf](http://arconsunmark.com/uploads/ARCON_References.pdf), Accessed date: 9 January 2019.
- [147] Eberg PK. *Construction of a Heat Storage: Photos with courtesy of Dronninglund Fjernvarme amba Denmark, Johan Freylund. Short History, Economy*. 2015. Vilnius.
- [148] Ellehauge K, Pedersen TE. *Solar heat storages in district heating networks: Energinet. dk Project no; 2007*. 2006-2-6750.
- [149] Guadalajara M, Lozano MA, Serra LM. *Analysis of large thermal energy storage for solar district heating*. *Eurotherm Seminar #99 - Advances in Thermal Energy Storage*. 2014.
- [150] Heller A. *Advances in large-scale solar heating and long term storage in Denmark*. *Proceedings for EuroSun'2000* 000[http://orbit.dtu.dk/en/publications/advances-in-largescale-solar-heating-and-long-term-storage-in-denmark\(7bca2f36-f526-42cb-9456-d6e5ea40de9a\).html](http://orbit.dtu.dk/en/publications/advances-in-largescale-solar-heating-and-long-term-storage-in-denmark(7bca2f36-f526-42cb-9456-d6e5ea40de9a).html).
- [151] SOLARGE. *Aeroeskoebing Solar Heating: Project Summary*. Aeroeskoebing, Denmark Available from: [http://www.solarge.org/uploads/media/SOLARGE\\_goodpractice\\_dk\\_aeroeskoebing.pdf](http://www.solarge.org/uploads/media/SOLARGE_goodpractice_dk_aeroeskoebing.pdf), Accessed date: 9 January 2019.
- [152] SOLARGE. *NRGi Samsø: Project Summary*. Samsø, Denmark Available from: <http://www.solarge.org/index.php?id=1645>, Accessed date: 9 January 2019.
- [153] Gimmelsberger J. *Efficient energy supply (Electricity and district heat) for the city of Linz*. *Energy Efficiency in IPPC-Installations, Parallel session: Producing more with less*. 2004.
- [154] Muser C. *Machbarkeits-Vorstudie eines saisonalen Groß-Wärmespeichers für Linz: Abschlussbericht der Sondierung*. 2015. Vienna.
- [155] N-ERGIE AG. *Wahrzeichen der Energiewende: Der Wärmespeicher der N-ERGIE*. Nürnberg; 2015.

- [156] J Ulbjerg F. *Heat storage pits: Cheap and efficient energy with heat storage pits*. Copenhagen: Ramboll Group; 2017.
- [157] Stutz B, Le Pierres N, Kuznik F, Johannes K, Palomo Del Barrio E, Bidicarrats J-P, et al. *Storage of thermal solar energy*. *Compt Rendus Phys* 2017;18(7–8):401–14.
- [158] Bauer D, Marx R, Nußbicker-Lux J, Ochs F, Heidemann W, Möller-Steinhagen H. *German central solar heating plants with seasonal heat storage*. *Sol Energy* 2010;84(4):612–23.
- [159] Marx R, Nußbicker-Lux J, Bauer D, Heidemann W, Dróck H. *Saisonale Wärmespeicher - Bauarten, Betriebsweise und Anwendungen*. *Chem Ing Tech* 2011;83(11):1994–2001.
- [160] Fisch N, Köbler R. *Solar assisted district heating: Status of the projects in Germany*. *Int J Sol Energy* 1997;18(4):259–70.
- [161] Marx R, Bauer D, Dróck H. *Next generation of seasonal gravel-water thermal energy store - design and operating results from Eggenstein-Leopoldshafen, Germany*. In: *Innostock 2012 – The 12th International Conference on Energy Storage, Lleida, Spain, 15.-18.05.2012*; 2012.
- [162] Riegger M, Mangold D. *Planungsoptimierung und Bau des solaren Nahwärmesystems mit saisonalem Kies-Wasser-Wärmespeicher in Eggenstein-Leopoldshafen*. *Symposium Thermische Solarenergie, Kloster Banz, Bad Staffelstein, 18. 2008. p. 3. 23.-25.05.2008*.
- [163] Bauer D. *Solare Nahwärme und saisonale Wärmespeicherung*. *Clean Energy & Passivehouse 2012 vol. 29*. Stuttgart, Germany: *Große solarthermische Anlagen für Mehrfamilienhäuser und Kommunen*; 2012. p. 31. 03.2012.
- [164] Ochs F, Heidemann W, Möller-Steinhagen H. *Saisonale Wärmespeicherung: Eine Herausforderung für Polymere. 2. Leobener Symposium Polymeric Solar Materials*. 2008.
- [165] Ochs F, Möller-Steinhagen H. *Abschlussbericht zum Vorhaben Weiterentwicklung der Erdbecken-Wärmespeichertechnologie*. FKZ 0329607 E. Stuttgart; 2008.
- [166] Lasierra A. *Energy analysis and simulation of thermal solar plants with seasonal storage [Student thesis, Master degree]*. Gøvlø: University of Gøvlø; 2014.
- [167] Zinko H, Hahn T. *The high temperatures (95°C) water pit storage of Malung*. In: *Proc Calorstock 1994, 6th International Conference on Thermal Energy Storage*; 1994.
- [168] SOLARGE. *Tubberupvaenge: Project Summary*. Herlev, Denmark. [January 09, 2019].
- [169] Ochs F, Heidemann W, Möller-Steinhagen H. *Seasonal thermal energy storage: A challenging application for geosynthetics*. *Eurogeo4* 2008;4.
- [170] Heller A. *15 Years of R&D in central solar heating in Denmark*. *Sol Energy* 2000;69(6):437–47.
- [171] Wang R, Zhai X, editors. *Handbook of Energy Systems in Green Buildings*. Berlin, Heidelberg: Springer Berlin Heidelberg; 2018.
- [172] Ochs F, Lichtenfels A, Koch H, Heidemann W, Möller-Steinhagen H. *Heißwasser- Erdbecken-Wärmespeicher mit freitragender Abdeckung für solare Nahwärmesysteme*. OTTI, 17. *Symposium Thermische Solarenergie, Kloster Banz, Bad Staffelstein. vol. 09. 2007. p. 11.05. 2007*.
- [173] Heller A. *Investigation on floating lid construction pit water storage Otterupgaard, Denmark: Pit Water Storage, Ottrupgaard, Denmark*. Copenhagen, Denmark: Report R-010. Lyngby; 1997.
- [174] Jensen MV. *Seasonal pit heat storages - Guidelines for materials & construction: IEA-SHC TECH SHEET 45.B.3.2. IEA Solar Heating and Cooling Programme, Task 45 Large Systems. fact sheets*; 2014.
- [175] Melii M, Spöte F. *The solar heating system with seasonal storage at the Solar- Campus Jólích*. *Sol Energy* 2000;69(6):525–33.
- [176] Long PlanEnergie. *Term Storage and Solar District Heating: A presentation of the Danish pit and borehole thermal energy storages in Brødstrup*. Marstal: Dronninglund and Gram; 2016.
- [177] Fjernvarme Marstal. *Innovative, multi-applicable and cost efficient hybrid solar (55 %) and biomass energy (45 %) large scale (district) heating system with long term heat storage – and Organic Rankine Cycle electricity production. 2nd draft Project final report*; 2014.

- [178] *Sørensen PA, Schmidt T. Design and construction of large scale heat storages for district heating in Denmark. 14th International Conference on Energy Storage. 2018. p. 25–8. April 2018.*
- [179] *Radloff R, Løck S. Dronninglund Fjernvarme: Seit 2014 solarthermische Deckungsrate von 41%. Wärmewende-Info 2015;20.*
- [180] *Radloff R. Große Solarthermie in Wärmernetzen: Beispiel Dänemark – In Deutschland Alternative zu Biogas. Wärmewende-Info 2014;03.*
- [181] *Galindo Fernandez M, Roger-Lacan C, Gøhrs U, Aumaitre V. Efficient district heating and cooling systems in the EU: Case studies analysis, replicable key success factors and potential policy implications. EUR 28418 EN. Luxembourg: Publications Office of the European Union; 2016.*
- [182] *Radloff R. Weltgrößte Solarthermieanlage in Vojens. Wärmewende-Info 2015;15.*
- [183] *Radloff R. Entwicklung der großen Solarthermie in Dänemark. Wärmewende-Info 2015;16.*
- [184] *Radloff R, Løck S. Løgumkloster Fjernvarme: 45% solarer Deckungsgrad - "Hick- Hack" um Solarwärmeprojekt. Wärmewende-Info 2015;19.*
- [185] *Ochs F, Heidemann W, Möller-Steinhagen H. Geosynthetic clay liner for seasonal thermal energy stores. Eurogeo4: 4th European Geosynthetics Conference. Edinburgh. 2008.*
- [186] *Ochs F. Stand der Technik erdvergrabener Wärmespeicher. FFG store4grid; 2013.*
- [187] *Heller A, Svendsen S, Furbo S. Large scale solar district heating: Evaluation, Modelling and Designing Lyngby: Dept. of Buildings and Energy, Technical University of Denmark 2001.*
- [188] *Schmidt T, Benner M, Heidemann W, Möller-Steinhagen H. Saisonale Wärmespeicher: aktuelle Speichertechnologien und Entwicklungen bei Heißwasser-Wärmespeichern. OTTI, Fachseminar Oberflächennahe Geothermie, 18.-19.02.2003. 2003.*
- [189] *Schmidt T, Mangold D, Möller-Steinhagen H. Seasonal thermal energy storage in Germany. ISES Solar World Congress 2003, Göteborg, 14.-19.06. vol. 2003. 2003.*
- [190] *Sterner M, Stadler I. Energiespeicher: Bedarf, technologien, integration. Berlin: Springer Vieweg; 2014.*
- [191] *Oliveti G, Arcuri N. Prototype experimental plant for the interseasonal storage of solar energy for the winter heating of buildings: Description of plant and its functions. Sol Energy 1995;54(2):85–97.*
- [192] *Oliveti G, Arcuri N, Ruffolo S. First experimental results from a prototype plant for the interseasonal storage of solar energy for the winter heating of buildings. Sol Energy 1998;62(4):281–90.*
- [193] *Bodmann M, Mangold D, Nußbicker-Lux J, Raab S, Schenke A, Schmidt T. Solar unterstützte Nahwärme und Langzeit-Wärmespeicher: Forschungsbericht zum BMWA/BMU-Vorhaben. Februar 2003 bis Mai 2005. 2005.*
- [194] *Mangold D, Schmidt T. The next generations of seasonal thermal energy storage in Germany. ESTEC 2007, München, 15.-16.10.2007. 2007.*
- [195] *Göppert S, Lohse R, Urbaneck T, Schirmer U, Platzer B. Forschungsbericht - Solarthermie 2000plus - Weiterentwicklung und Optimierung von Be- und Entladesystemen für Tank- und Erdbeckenspeicher: 2004 - 2008. FKZ 0329271A. Hannover, Chemnitz: Technische Informationsbibliothek u. Universitätsbibliothek; 2009.*
- [196] *Hadorn J-C. Storage solutions for solar thermal energy. Freiburg Solar Academy. Freiburg; 2004. 2004.*
- [197] *Schmidt T, Mangold D. Status der solaren Nahwärme in Deutschland. Status-Tagung Solare Kombianlagen für Mehrfamilienhäuser im europäischen Vergleich, Graz, 14.11.03. 2003.*
- [198] *Milow B, Stadermann G, editors. Workshop Wärmespeicherung: FVS Workshop 2001. Köln; 2001.*
- [199] *Mangold D, Schmidt T, Möller-Steinhagen H. Solaranlagen und Nahwärmernetze: Erfahrungen aus dem Programm Solarthermie-2000. AGFW-Seminar "Fernwärme und Solarenergienutzung", München, 10.-11.09.2002. 2002.*

- [200] Bodmann M, Fisch MN. *Solar unterstützte Nahwärmeverorgung: Pilotprojekte Hamburg, Hannover und Steinfurt*. 5. FKS-Symposium: FKS-Forschungskreis Solarenergie TU Braunschweig, Braunschweig, 17.-18.06.2004. 2004.
- [201] Fisch MN, Bodmann M. *Solarcities Friedrichshafen, Neckarsulm und Hannover mit Langzeit-Wärmespeicher*. Gleisdorf Solar; 2000.
- [202] SOLARGE. *Rise Fjernvarme: Project summary*. Rise, Aeroe, Denmark. [January 09, 2019].
- [203] Jensen S $\varphi$ , Ulbjerg F. *Store solvarmeanlæg med høje dækningsgrader*. Taastrup. Denmark: SolEnergiCentret Teknologisk Institut; 2005.
- [204] Mangold D, Schmidt T. *The new central solar heating plants with seasonal storage in Germany*. EuroSun 2006, Glasgow, 27.-30.6.2006. 2006.
- [205] Bauer D, Heidemann W, Marx R, Nußbicker-Lux J, Ochs F, Panthalookaran V, et al. *Solar unterstützte Nahwärme und Langzeit-Wärmespeicher*. Stuttgart: Forschungsbericht zum BMU-Vorhaben FKZ 0329607 J; 2009.
- [206] Reu $\ddot{u}$  M. *Solar district heating - an innovative approach of an established technology*. Solar District Heating, 24.08.2016, Mikkeli. 2016.
- [207] IEA-ECES. *Applications of thermal energy storage in the energy transition: Benchmarks and developments*. 2018. p. 8. Public Report of IEA ECES Annex 2018. IEA Technology Collaboration Programme on Energy Conservation through Energy Storage (IEA-ECES).
- [208] Demharter M, Beikircher T. *Neue Entwicklungen im Bereich kleiner und mittlerer Speicher mit Superisolation*. OTTI, Anwenderforum thermische Energiespeicher, Neumarkt, 05.-06.07.2012. 2012.
- [209] Ochs F, Heidemann W, Möller-Steinhagen H, Koch H. *Soil-water pit heat store with direct charging system*. Ecstock 2006, vol. 2006. New Jersey: Richard Stockton College of; 2006.
- [210] Ochs F, Heidemann W, Möller-Steinhagen H. *Weiterentwicklung der Erdbecken-Wärmespeichertechnologie*. PtJ Statusseminar Thermische Energiespeicher 2006.
- [211] Lanahan M, Tabares-Velasco PC. *Seasonal thermal-energy storage: a critical review on BTES systems, modeling, and system design for higher system efficiency*. Energies 2017;10(6):743.
- [212] Pfeil M, Koch H. *Kies/Wasser-Wärmespeicher: Langzeitwärmespeicherung ökologisch und kostengünstig*. OTTI, 14. Symposium Thermische Solarenergie, Kloster Banz, Bad Staffelstein, 12.-14.05.2004. 2004.
- [213] Bodmann M, Koch H, Fisch MN. *Solare Nahwärmeverorgung mit Kies/ Wasserspeicher in Steinfurt-Borghorst*. OPET-Seminar Solarunterstützte Nahwärmeverorgung, Neckarsulm, 29.-30.03.2001. 2001.
- [214] Mangold D. *Erfahrungen und Ergebnisse aus der Umsetzung der Bundesforschungsprogramme Solarthermie-2000 und Solarthermie2000plus*. Input zum EU-Vorhaben Solarge (Solarthermische Großanlagen). Hannover: Target GmbH; 2006.
- [215] Urbaneck T, Platzer B, Schirmer U. *Berechnung von Kies-Wasser-Speichern*. OTTI, 12, vol. 24. Regensburg: Symposium Thermische Solarenergie; 2002. p. 26. 04.2002.
- [216] Torgal FP, Mistretta M, Kakauskas A, Granqvist CG, Cabeza LF. *Nearly Zero Energy Building Refurbishment: A Multidisciplinary Approach*. London: Springer London; 2013.
- [217] Schirmer U, Urbaneck T. *Saisonaler Kies-Wasser-Speicher: Solarthermische Großanlage mit Langzeit-Wärmespeicher im Chemnitzer Gewerbepark SOLARIS*. Sonnenenergie 1998;98(1):41–3.
- [218] Urbaneck T, Platzer B, Schirmer U. *Advanced monitoring of gravel water storage*. Futurestock 2003, 9th International Conference on Thermal Energy Storage, Warschau, 01.-04.09.2003. 2003.
- [219] Schmidt T, Mangold D. *New steps in seasonal thermal energy storage in Germany*. Ecstock 2006. New Jersey: Richard Stockton College of; 2006. p. 2006.
- [220] Marx R, Nußbicker-Lux J, Bauer D, Heidemann W. *Integration von Wärmepumpen in solar unterstützte Nahwärmesysteme mit saisonaler Wärmespeicherung*. OTTI, 21. Symposium thermische Solarenergie, Kloster Banz, Bad Staffelstein, 11.- 13.05.2011. 2011.

- [221] Nußbicker-Lux J, Marx R, Bauer D, Dröck H. *Lektionen aus Planung und Betrieb von drei Deutschen solaren Nahwärmever sorgungen mit saisonaler Wärmespeicherung. Gleisdorf Solar 2012, 10. Internationale Konferenz für thermische Solarenergienutzung, Gleisdorf, 12.-14.09.2012.* 2012.
- [222] Schmidt T, Mangold D. *Neue Anwendungen und Technologien saisonaler Wärmespeicher. OTTI, 19. Symposium Thermische Solarenergie, Kloster Banz, Bad Staffelstein, 06.-08.05.2009.* 2009.
- [223] SOLARGE. *Braedstrup Fjernvarme: Project Summary. Braedstrup, Denmark. [January 09, 2019].*
- [224] Brzdstrup Fjernvarme AMBA. *Solare Nah- und Fernwärme: Fallbeispiel Brzdstrup District Heating. Typ: Solare Fernwärmesysteme mit gekoppelter Strom- und Wärmeezeugung Smart District Heating.* 2015.
- [225] Ucar A, Inalli M. *A thermo-economical optimization of a domestic solar heating plant with seasonal storage. Appl Therm Eng 2007;27(2-3):450-6.*
- [226] Schmidt T, Möller-Steinhagen H. *Nutzung des Untergrundes zur Kälteversorgung von Gebäuden: Ergebnisse aus dem EU-Projekt Soil-Cool. OTTI Profiforum Oberflächennahe Geothermie, Regenstauf, 14.-15.04.2005.* 2005.
- [227] Duffie JA, Beckman WA. *Solar engineering of thermal processes John A. Duffie, William A. Beckman. 4th ed. Hoboken: John Wiley; 2013.*
- [228] Gries A. *Solarsiedlung Steinfurt-Borghorst: 50 Solarsiedlungen in Nordrhein- Westfalen. Düsseldorf: Ministerium für Wirtschaft, Mittelstand und Energie des Landes Nordrhein- Westfalen; 2008.*
- [229] Terziotti LT, Sweet ML, McLeskey JT. *Modeling seasonal solar thermal energy storage in a large urban residential building using TRNSYS 16. Energy Build 2012;45:28-31.*
- [230] Sweet ML, McLeskey JT. *Numerical simulation of underground Seasonal Solar Thermal Energy Storage (SSTES) for a single family dwelling using TRNSYS. Sol Energy 2012;86(1):289-300.*
- [231] Fisch MN. *Solare Groispeicherprojekte in Stadtteilen: Betriebsergebnisse und Erfahrungen. 5. Hessischer Energieberater tag Frankfurt am Main, 04.06.2008.* 2008.
- [232] Schlosser M, Heuer M, Fisch MN. *Langzeitmonitoring solar unterstützte Nahwärmever sorgung Hamburg-Bramfeld. E.ON Hanse Wärme, 25.07.2007.* 2007.
- [233] Forkel C, Daniels H. *Finite element simulation of circulation in large scale thermal energy storage basins. Adv Water Resour 1995;18(3):147-58.*
- [234] Hasnain SM. *Review on sustainable thermal energy storage technologies, Part I: heat storage materials and techniques. Energy Convers Manag 1998;39(11):1127-38.*
- [235] Mazman M, Cabeza LF, Mehling H, Nogues M, Evliya H, Paksoy HΦ. *Utilization of phase change materials in solar domestic hot water systems. Renew Energy 2009;34(6):1639-43.*
- [236] Akbari H, Sezgen O. *Case studies of thermal energy storage (TES) systems: Evaluation and verification of system performance: Final report. DE93-001572 1992. LBL-30852.*
- [237] Gorski AJ. *Third international workshop on ice storage for cooling applications: Technical Memo. 1986. ANL/CNSV-TM-177; CONF-8311308-Absts.*
- [238] Skogsberg K, Nordell B. *The Sundsvall hospital snow storage. Cold Reg Sci Technol 2001;32(1):63-70.*
- [239] Taylor TB. *Ice ponds. AIP Conf Proc 1985(135):565-75.*
- [240] Yan C, Shi W, Li X, Zhao Y. *Optimal design and application of a compound cold storage system combining seasonal ice storage and chilled water storage. Appl Energy 2016;171:1-11.*
- [241] Mattheess A, Stange P, Hölser A, Röhling K. *GREEN HEAT<sup>3</sup>: Entwicklung innovativer Energieversorgungstechniken und -strukturen mit Kernkomponenten modularer Großwärmespeicher und Maxianlage Solarthermie. Symposium Solarthermie - Technik für die Energiewende, Kloster Banz, Bad Staffelstein, 13.- 15.06.2018.* 2018. p. 389-401.
- [242] Jooi M. *Dichtheit von Heißwasser-Langzeitspeichern aus Hochleistungsbeton: Von der Fakultät Bauingenieur- und Vermessungswesen der Universität Stuttgart zur Erlangung der Würde eines*



*Doktor-Ingenieurs (Dr.-Ing.) genehmigte Abhandlung [Ph.D. Thesis]. Stuttgart: Universität Stuttgart; 2001.*

- [243] *Bóhl J. Langzeitwärmespeicherung mit einem neuartigen Speicherkonzept für solar-gestützte Nahwärmesysteme. FVS Workshop 2001;4–13. 2001.*
- [244] *Yumrutaş R, Ánsal M. Analysis of solar aided heat pump systems with seasonal thermal energy storage in surface tanks. Energy 2000;25(12):1231–43.*