

Meer doen met minder

Optimale prijs/ prestatie energie- opslagsystemen

Met steun van de NOVEM is er een onderzoek gedaan ter verbetering van de prijs/prestatie van energieopslagsystemen. De investeringen in energieopslagsystemen wel of niet met warmtepomp zijn hoger dan met een traditionele aanpak. Het is daarom zaak deze duurzame systemen zorgvuldig te ontwerpen.

In dit artikel worden eerst kort de uitvoeringsvormen van opslagsystemen besproken.

Daarna wordt besproken welke parameters de kosten van een bronsysteem bepalen en welke mogelijkheden er zijn ter beperking van deze kosten.

Vervolgens wordt een door Installeect ontwikkeld modelberekeningsprogramma besproken voor ontwerp van energieopslagsystemen waarin kan worden geoptimaliseerd met de besproken parameters.

- door ir. H.J. Broekhuizen*

Er zijn twee typen bronsystemen; monobronnen en doubletsystemen.

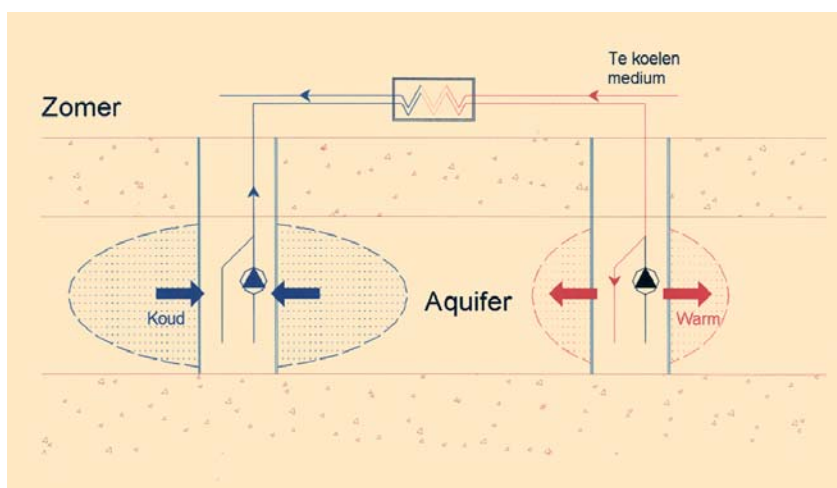
Figuur 1 toont een doubletsysteem;

een systeem met twee bronnen, een warme- en een koudebron. In de winter wordt warmwater uit de warmebron opgepompt, afgekoeld en als koudwa-

ter in de koudebron geïnfiltrerd. In de zomer kan het water uit de koudebron worden opgepompt voor koeling. Warmwater wordt dan geïnfiltrerd in de warmebron.

Een doubletsysteem wordt veelal voor grotere bronsystemen toegepast. Voor kleinere systemen (vanaf $\sim 60 \text{ m}^3/\text{uur}$) is dit systeem relatief duur, omdat er ook bij geringere debieten nog steeds twee bronnen moeten worden geboord. Een goedkoper alternatief is dan de monobron.

Hierbij wordt er slechts één boring verricht en zijn de warme- en koudevoorraad boven elkaar geïmponeerd. Bij eenzelfde waterverplaatsing is de monobronvariant goedkoper door besparing op de boorkosten. Voor een monobronstelsel is echter bij eenzelfde debiet een dikker watervoerend pakket vereist, omdat de filters van warme- en koudeaquifer boven elkaar zijn geïmponeerd. De monobronsystemen zijn mogelijk tot $40 \text{ m}^3/\text{uur}$. Systemen met $40 \text{ m}^3/\text{uur}$ zijn op een aantal plaatsen in Nederland mogelijk. Uit het voorgaande wordt duidelijk dan de bronkosten in belangrijke mate worden bepaald door het brondebiet. Het is daarom zinvol het werkelijk benodigde debiet zorgvuldig te bepalen. Wanneer door slimme selectie kan worden volstaan met minder bronboringen en/of minder debiet, dan heeft dit direct een positieve invloed op de terugverdientijd van het duurzame systeem.



Doublet systeem zomerbedrijf

- FIGUUR 1 -

* Installeect Advies

BRONKOSTEN WORDEN BEPAALD DOOR BRONDEBIET EN DE LOCATIE

In figuur 3 zijn de bronkosten voor de verschillende systemen uitgezet tegen het debiet.

Rond Amsterdam zijn doubletsystemen van 200 m³/uur mogelijk met één warme- en één koudebron. Op andere plaatsen zijn hiervoor soms wel vier warme- en vier koudebronnen nodig. Het laatste systeem is beduidend duurder dan het eerste.

De bronkosten zijn sterk afhankelijk van het debiet. Het is dus zaak dit debiet zorgvuldig te bepalen. De ontwerper kan niet veel veranderen aan de bodemgesteldheid, hij kan wel zorgvuldig het brondebiet bepalen.

In het navolgende worden de parameters besproken die van invloed zijn op het brondebiet.

BEPALENDE FACTOREN VOOR HET BRONDEBIET

Een bronsysteem wordt in de zomer en in de winter gebruikt. Voor een specifiek project kan het gewenste debiet voor de winter en de zomersituatie worden bepaald. Om het debiet zo gering mogelijk te houden, is het van belang na te gaan welke parameters het brondebiet bepalen. De hoeveelheid overgedragen energie (Q) kan worden bepaald door de volgende formule:

$$Q = \text{brondebiet} \times \Delta T \text{ water} \times \text{soortelijke warmte water.}$$

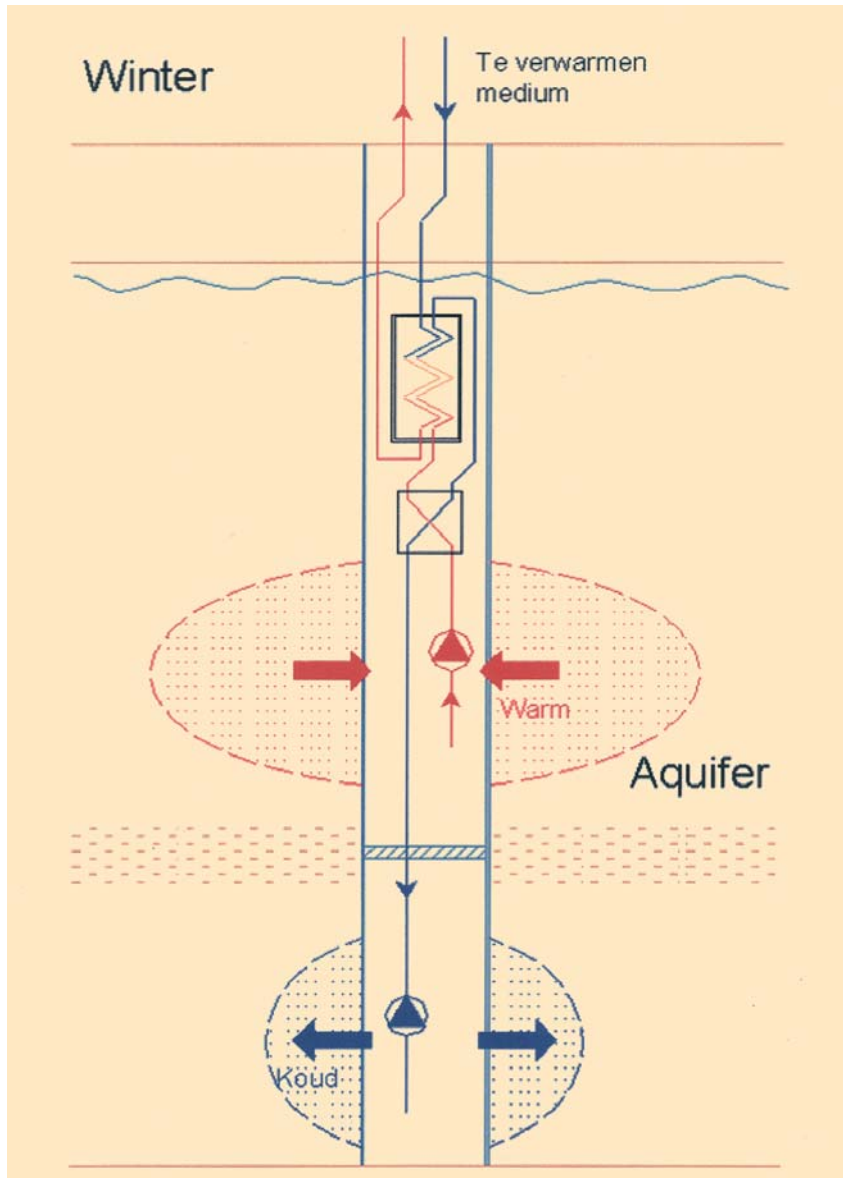
Voor de koeling kan de volgende eenvoudige vuistregel gebruikt worden voor snelle inschattingen.

Het koelvermogen van een bron is bij een ΔT van 8,5 °C ~10 maal het brondebiet (m³/h)

Uit de formule blijkt dat bij gevraagd vermogen, de ΔT bepalend is voor het brondebiet.

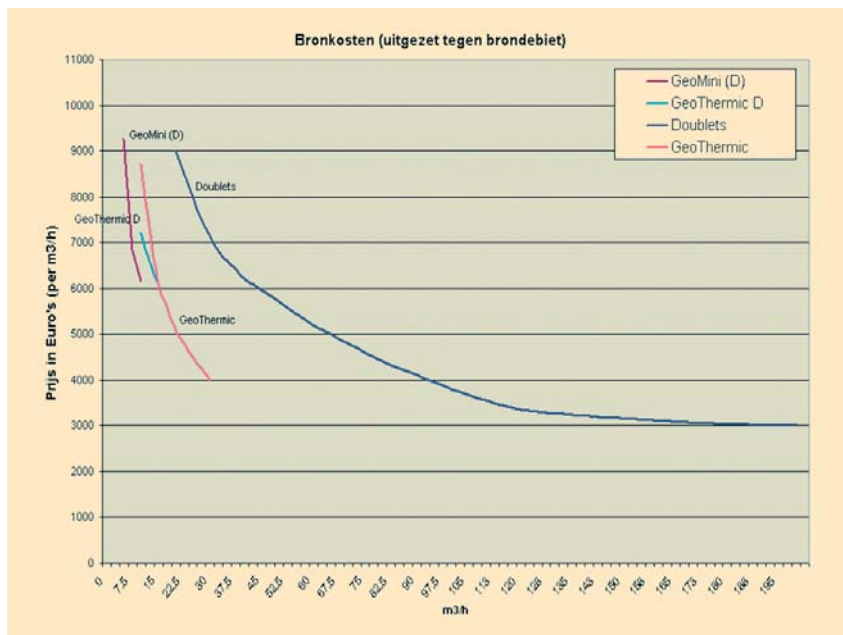
TEMPERATUURVERSCHIL (ΔT)

Zowel in de zomer als de winter zal het doel zijn het uitwisselen van een bepaalde hoeveelheid energie. De capaciteit van warmte-uitwisseling van een bron wordt bepaald door het waterdebiet en door het temperatuurverschil tussen het retourwater van de bovengrondse installatie en het bronsysteem.



Monobron in winterbedrijf

- FIGUUR 2-



Bronkosten uitgezet tegen debiet.

- FIGUUR 3-

Vanuit deze optiek verdient het aanbeveling systemen te ontwerpen met een groot temperatuurverschil. Bij een systeem met een ΔT van 8 °C is (bij gelijke koelcapaciteit) een bron nodig met 20 % meer debiet dan een systeem met een ΔT van 10 °C.

Het is goed mogelijk om de primaire lucht te koelen met een ΔT van 10 °C (bijvoorbeeld met traject 11 °C naar 21 °C voor het koelwater). Voor secundaire systemen (koelconvectoren, koelplafonds etc.) zal dit niet zo goed lukken omdat de retourtemperatuur van secundaire systemen is gekoppeld aan de ruimtetemperatuur en niet aan de hogere buitentemperatuur. Ook in de winter zal om soortgelijke redenen het beste een grote ΔT dienen te worden nagestreefd.

Vanuit de optiek van de kosten van de bron een zo groot mogelijke ΔT nastreven.

Als randvoorwaarde dient hierbij te worden gekeken naar de gevolgen voor de COP van een warmtepomp en naar het gevaar van invriezen van de warmtewisselaar in de luchtstroom.

VERHOUDING PRIMAIRE/ SECUNDAIRE KOELING

De warmtebelasting alleen koelen met primaire koeling heeft vaak niet de voorkeur. Het leidt in de regel tot luchthoeveelheden die beduidend hoger zijn dan de eis van het bouwbesluit. Daarnaast zal alleen koelen met buitenlucht bij gelijke interne last een groter koelvermogen moeten worden

opgesteld, dan bij een systeem met ook secundaire koeling. Dit komt omdat er in het eerste geval meer lucht ontvochtigd moet worden. De verhouding primaire/secundaire koeling is daarom mede bepalend voor het brondebiet. In figuur 4 is dit mechanisme weergegeven voor een typisch kantoor met een interne warmtelast van 40 W/m². Bij weinig buitenlucht (bv. ventilatievoud 1) kan worden volstaan met 32 kW opgesteld koelvermogen. Er dienen aanvullend bijvoorbeeld fancoilunits te worden geplaatst om de gewenste koelprestatie (40 W/m²) te leveren. Er moet veel koelenergie (kWh) worden geleverd, omdat met een beperkt ventilatievoud weinig vrije koeling mogelijk is.

Met secundaire koeling is het mogelijk om lokaal de gewenste temperatuur te regelen.

Bij veel buitenlucht (bv. ventilatievoud 4) dient 47 kW koelvermogen te worden opgesteld. Plaatsing van fancoilunits is niet meer nodig om de gewenste koelprestatie te leveren. Er hoeft relatief weinig koelenergie te worden geleverd, omdat met deze hogere ventilatievoud veel vrije koeling mogelijk is. Met een systeem zonder secundaire koeling is het zonder naverwarming (en dus warmtevernietiging) lokaal niet mogelijk om de gewenste temperatuur te regelen.

VRIJE KOELING

De inzet van een koel/laadbatterij in een luchtbehandelingskast biedt de mogelijkheid van vrije koeling. Bij 10 °C buitentemperatuur kan geen

watertemperatuur van 6 °C meer worden gemaakt om daarmee de bron met koude te laden. Het is echter prima mogelijk om een watertemperatuur van bijvoorbeeld 15 °C te maken.

Deze temperatuur is voldoende voor koeling op bijvoorbeeld koelplafonds. Bronsystemen verplaatsen bij een lage koelbelasting, i.v.m. het minimum toerental van de pomp, relatief veel water. Dit kan efficiënter door deze lage koelbelasting m.b.v. vrije koeling op te vangen. Hierdoor kan in veel gevallen een groot gedeelte van de koelenergie direct worden geleverd zonder inzet van de bron. Hiermee wordt het ook eenvoudiger om de bron in de winter weer geladen te krijgen met koude. De optie "vrije koeling" is niet direct bepalend voor het brondebiet. Het biedt echter wel de mogelijkheid om bij systemen met geringere buitenluchthoeveelheden toch een thermische balans te realiseren.

Zoals uit figuur 4 blijkt, dient er bij systemen met minder buitenlucht meer te worden gekoeld.

Als de optie van vrije koeling niet aanwezig is, dan dient deze energiehoeveelheid helemaal te worden geleverd met de bron. In de winter moet dezelfde hoeveelheid ook weer worden geladen om de thermische balans te bewaren.

AANVULLENDE KOELING MET KOELMACHINE EN/OF WARMTEPOMP

Een situatie van 28 °C en 60 % luchtvochtigheid als buitenconditie komt maar weinig uren per jaar voor. Veel installaties worden echter wel gedimensioneerd op deze conditie. Het is niet altijd nodig en/of zinvol om een bronstelsel uit te leggen op de maximale benodigde capaciteit. Afhankelijk van het ontwerp kan een bron, uitgelegd op 60-70 % van de maximale koelcapaciteit, meer dan 90 % van het totaal benodigde koelvermogen leveren. Deze 90 % wordt geleverd met een grote primaire energiebesparing.

De rentabiliteit van een systeemontwerp met 100 % koudelevering door energieopslag kan daarom in een aantal gevallen beduidend worden verbeterd door een deel van het vermogen met een koelmachine te gaan leveren. Het voorgaande zal vooral het geval zijn als men voor de keuze staat tussen een monobron/doublet of bij de keuze wel of niet een extra doublet.

vv	m ³ /s	cv	Ontwerp-cap. (kW)	Vollast (uren)	koelen (kWh)
1	0,5	3	32	800	25.600
2	1,0	2	37	580	21.460
3	1,5	1	42	420	17.640
4	2,0	0	47	300	14.100

Hoeveel koeling is er nodig?
Voorbeeld: Kantooropp. = 666 m²
Koelcapaciteit bij 28 °C en 60 % RV en interne belasting 40 W/m²

vv = verversingsvoud per uur
cv = circulatievoud per uur

Koelcapaciteit afhankelijk van ventilatie- en circulatievoud

- FIGUUR 4-

Het voorgaande is minder relevant als op een locatie een monobron of dubbelsysteem éénvoudig kan worden opgeschaald van bijvoorbeeld 70 naar 100 % van de benodigde koelcapaciteit. De meerkosten liggen dan in de regel op het niveau van de kosten van een koelmachine.

Het is verstandig om bij inzet van een warmtepomp ook te overwegen om de warmtepomp tijdens koelbedrijf in te zetten "in koelmachinemodus" (zie figuur 5). De warmtepomp is toch al voor de warmtelevering beschikbaar en met een geringe investering (warmteafvoer) kan de machine ook worden ingezet als koelmachine. Op deze manier wordt het koelvermogen, op de momenten dat het bronvermogen niet toereikend is, vergroot; zodat mogelijk op een extra boring kan worden bespaard.

KOUDE LADEN

Bij koudeopslag in de bodem kan 's zomers worden gekoeld met de koude van het grondwater. De overheden gaan hiermee akkoord, als hierbij in de winter ook weer koude in de grond wordt gebracht zodat het systeem thermisch neutraal is.

Het inbrengen van koude kan geschieden met een laadbatterij in de luchtbehandelingkast, met een warmtepomp, met een droge koeler of met een koeltoren.

Bij laden met een koel/laadbatterij in combinatie met warmtewiel kan de lucht ook bij -10 °C nog worden opgewarmd tot 18 °C zonder bijverwarming met een cv. Hierbij verwarmt de koel/laadbatterij tot ±10 °C en de rest geschiedt met het warmtewiel.

Met een warmtewiel is ook bij 4 °C na een koel/laadblok nog een inblaastemperatuur van 18 °C te realiseren, zonder naverwarming. Er is dus overlap in capaciteit. In het Novem-onderzoek is onderzocht of deze overlap er kan worden uitgehaald en de beschikbare energie effectiever kan worden ingezet.

Als eerste oplossing kan worden gedacht aan het verlagen van het waterdebiet in laadbedrijf en een regeling op een luchtuitredetemperatuur van 4 °C. Dit leidt echter tot een daling van de wateruitredetemperatuur. Een te lage watertemperatuur kan tot bevriezing van het koel/laadblok leiden, wat ongewenst is.

LADEN/KOELEN

In figuur 6 is een laadsituatie met luchtbehandeling weergegeven met een watertemperatuurtraject van 12/6 °C. Hiermee wordt de buitenlucht bij -10 °C opgewarmd tot ± 10 °C. Globaal gesproken is hiervoor een waterhoeveelheid van 1 m³/uur per 1.000 m³/uur lucht nodig.

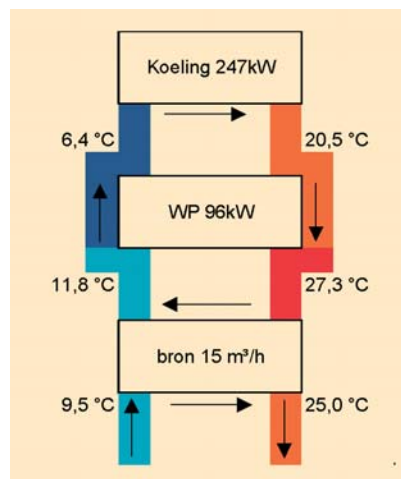
Voor een luchtbehandelingsysteem van 20.000 m³/uur is een bron van ~20 m³/uur nodig tijdens laden. Het brondebiet kan worden verlaagd door een lagere uittredetemperatuur van het water toe te staan. Dit kan echter leiden tot vorstgevaar.

Het bronsysteem wordt in de zomer gebruikt om koeling te kunnen leveren (zie figuur 7). Uitgaande van een watertemperatuurtraject 11/21 °C voor de koelbatterij is dan ±16 m³/uur koelwater nodig om de ventilatielucht af te koelen van 28 °C 60 % tot 15 °C. Als voor de rest geen secundaire koeling in de vorm van koelconvectoren o.i.d. aanwezig is, zal het waterdebiet tijdens laden, bij een uittredetemperatuur van 6 °C, bepalend zijn voor de dimensionering van de bron (20 m³/h). Het systeem heeft dan een overcapaciteit voor wat betreft de koeling (4 m³/uur bij Δ T 8 °C geeft 37 kW overcapaciteit).

Als het toch mogelijk is in de wintersituatie met een lagere wateruittredetemperatuur, bijvoorbeeld 5 °C i.p.v. 6 °C, te werken dan zal het winterdebiet gelijk kunnen worden aan het debiet in de zomer. Deze verandering leidt in de winter tot een verlaging van de luchttemperatuur na de koel/laadbatterij met ± 0,5 °C. Deze verlaging wordt opgevangen door het warmtewiel.

Het voorbeeld geeft aan dat het mogelijk is door verandering van randvoorwaarden (in dit geval een wateruittredetemperatuur) een besparing van ± 20 % op het brondebiet is te realiseren, zonder noemenswaardige verandering van de prestatie van het totale systeem.

Bij een verlaging van de luchtuitredetemperatuur na de laadbatterij tot 4 °C zou het debiet in de winter kunnen verminderen naar ± 11 m³/uur. Dit biedt in deze opstelling echter geen voordeel meer omdat het debiet in de zomer maatgevend is geworden. De aanpak heeft echter wel perspectief met inzet van een warmtepomp. De 5 m³/uur overcapaciteit (16 m³/h⁻¹ m³/h) kan worden gebruikt om een warmte-



Eenvoudige weergave warmtepomp ingezet "als koelmachine" met warmteafvoer "op de bron".

- FIGUUR 5-

pomp in te zetten voor verwarming. Met een COP van 3,5 op verwarming en een Δ T van 6 °C over de verdamper kan dan nog ± 50 kW warmte worden geleverd met een warmtepomp.

Bij een uittredetemperatuur van 6 °C is voor bedrijfsvoering met deze warmtepomp een bronsysteem van 24 m³/uur nodig.

Bij optimalisatie temperatuurtrajecten bij laden is reductie van het brondebiet van 30 % mogelijk

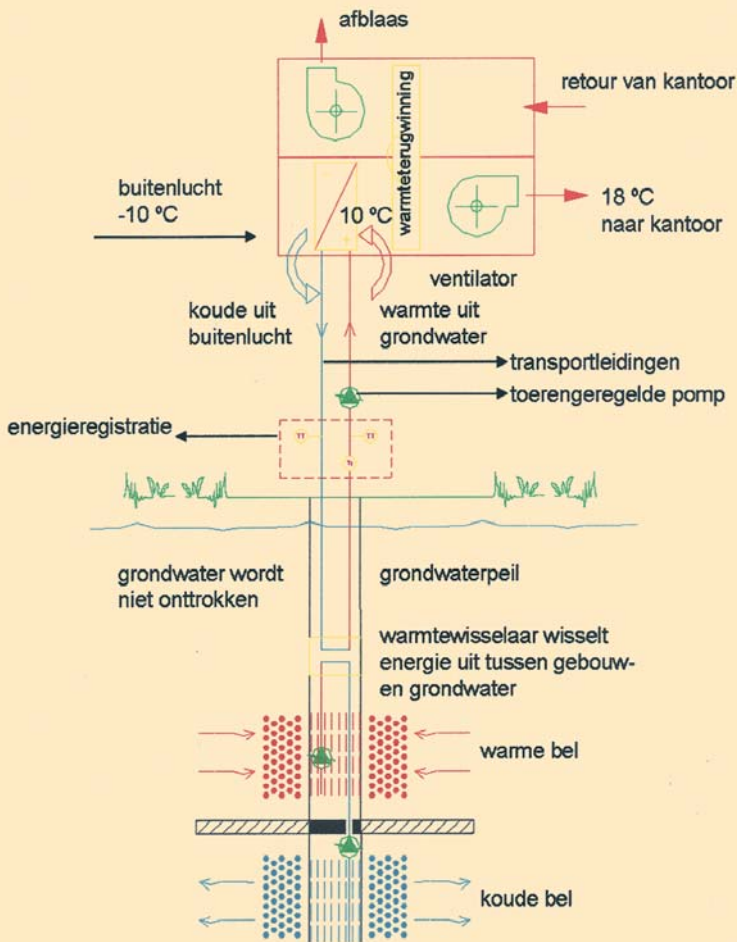
Uit het voorgaande blijkt dat er winst te behalen valt als de uittredetemperatuur bij laden wordt verlaagd. Het kan leiden tot kleinere bronsystemen zonder dat de totaalprestatie van het systeem beduidend verandert. In de Novem-studie is aangetoond dat deze optimalisaties mogelijk zijn.

Door koude laden met luchtbehandeling zijn reducties op benodigde verwarmingscapaciteit tot 25 % mogelijk.

DEBIET OPTIMALISATIE BIJ INPASSING WARMTEPOMP

Warmtepompleveranciers ontwerpen hun systemen vaak met een hoog debiet over de verdamper met een relatief kleine Δ T; bijvoorbeeld 3 K. Vanuit de optiek van de bedrijfszekerheid en een hoge COP is dat begrijpelijk. Vanuit de optiek van optimalisatie van kosten/baten is hierop nog wel wat af te dingen.

Een warmtepomp met een bronsysteem met 6 K Δ T vraagt 50% min-



Koude laden met luchtbehandeling.

- FIGUUR 6-

der debiet dan een systeem met de eerdergenoemde 3 K. Meer debiet betekent mogelijk een verbetering van de COP van de warmtepomp alleen, maar leidt wel tot meer investerings- en exploitatiekosten van het bronsysteem.

Bij een goede regelstrategie zal de grote ΔT alleen hoeven op te treden bij de maximale warmtevraag en bij 100 % debiet van de bron. Deze maximale belastingen komen maar enige uren per jaar voor en de reductie van de COP voor deze beperkte uren telt daarom nagenoeg niet door in de potentie van energiebesparing.

Een warmtepomp die in staat is met een temperatuurtraject 12-4 °C te draaien kan 25 % meer vermogen uit een bron van $x \text{ m}^3/\text{uur}$ halen dan een machine die beperkt is op functioneren met 12-6 °C.

Grotere ΔT verdampert warmtepomp: reductie op brondebiet van 25-50 % mogelijk

MODELBEREKENING VOOR ONTWERP BRONSYSTEMEN

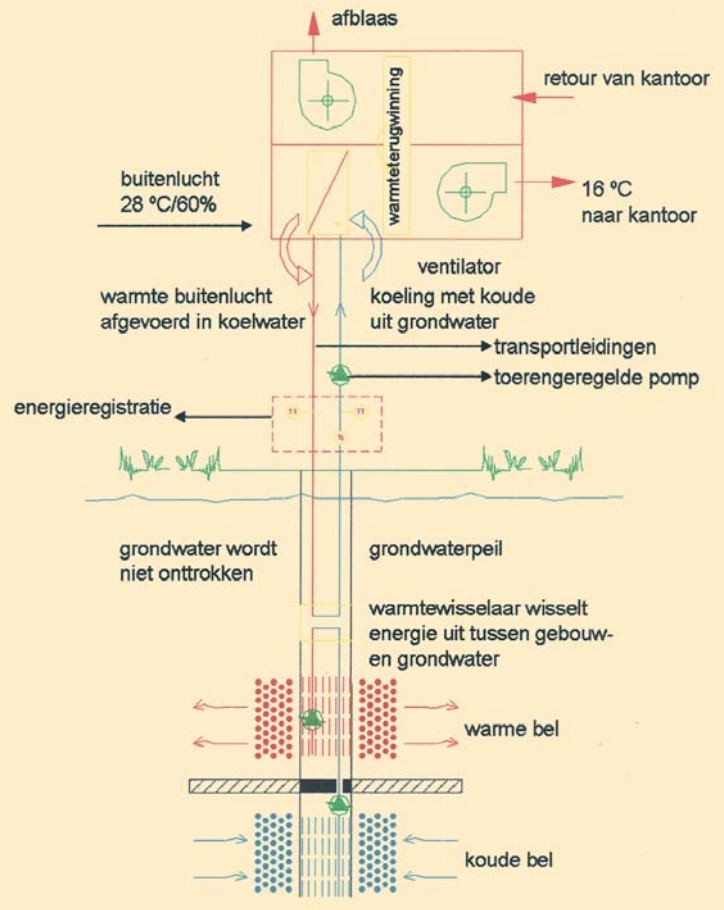
Uit het voorgaande is gebleken dat het ontwerpen van systemen met energieopslag een proces is met een veelheid aan mogelijkheden tot optimalisatie van prestatie en kosten. Het ontwerpen van dergelijke systemen is een proces van optimalisatie en iteratie. Ter ondersteuning hiervan is een modelberekening opgezet.

Met deze berekening kan voor een project het brondebiet en de systeemopzet worden bepaald. Hierbij wordt dan rekening gehouden met de benodigde thermische balans en wordt het systeem ook doorgerekend op CO₂-reductie en rentabiliteit

CONCLUSIES

Uit het onderzoek is naar voren gekomen dat het zeer lonend is het brondebiet bij systemen met energieopslag zorgvuldig te bepalen. Hierbij dient te worden gestreefd naar maximale benutting van de dure en duurzame investering. Dit leidt tot;

- integraal ontwerpen; niet alleen optimalisatie van componenten maar de gehele keten optimaliseren;
- streven naar een grote ΔT en beper-



Luchtkoeling met bron

- FIGUUR 7-

- streven naar gelijk maximaal debiet voor zomer en winter;
 - optimaal inzetten van componenten (warmtepomp als koelmachine etc.);
 - veel vollasturen voor een bronsysteem (geen tweede bronsysteem met weinig vollasturen);
 - maximale benutting duurzaam systeem.
- Het vergroten van de ΔT over de bron dient geen noemenswaardige nadelige effecten te hebben voor het bovengrondse klimaatstelsel. Het onderzoek heeft aangetoond dat dit mogelijk is. Beschreven optimalisatie kunnen leiden tot forse reductie van brondebieten, tot 50 %, zonder dat de besparing van het systeem noemenswaardig afneemt. Met deze benaderingswijze kan de rentabiliteit van systemen met energieopslag daarom sterk worden verbeterd.