Antonin G. van de Bree

Martin H. de Wit TU Eindhoven, faculteit Bouwkunde, vakgroep FAGO

> Martin J. M. Wagemans DLO Instituut voor Milieu en Agritechniek

Inleiding

Een aardtunnel is een buis(stelsel) op zekere diepte in de grond waar ventilatielucht door wordt aangevoerd. De passerende lucht wisselt warmte uit met de grond. Door de warmte-uitwisseling worden vooral kortstondige temperatuurfluctuaties uitgedempt. In de zomer koelt de lucht af en in de winter warmt ze op. De werking is vergelijkbaar met het effect van gebouwmassa op de koellast. Door de eenvoud van het systeem is het op de eerste plaats aantrekkelijk waar de energiebehoefte of de comforteisen gering zijn. De meeste toepassingen vindt men in de landbouw bij de varkensfokkerij en de champignonteelt [5]. Maar ook in gebouwen waar mensen verblijven, past men dit systeem toe [3]. In deze bijdrage wordt een rekenmodel beschreven voor bepaling van de warmte-uitwisseling met de grond en de regeling van het systeem. De resultaten van het model zijn vergeleken met metingen van IMAG-DLO bij hun varkensproefbedrijf.

Warmtestroming in de grond rondom een aardtunnel

In het model wordt de grond als een homogeen materiaal beschouwd waarvan de fysische eigenschappen de volumegemiddelden van de afzonderlijke bestanddelen (grind, zand, klei, lucht, etc.) zijn. De eigenschappen worden onafhankelijk verondersteld van vochtgehalte en temperatuur. Bovendien wordt de grond rondom de buis isotroop verondersteld. De anisotropie door een eventuele grondwaterspiegel wordt dus niet meegenomen. De temperatuurvereffeningscoëfficiënt van de grond *a* is een functie van de fysische eigenschappen en geeft de snelheid aan waarmee een warmtefront zich verplaatst in de grond.

Tabel 1 Thermische eigenschappen van vochtige grond.

ρ_g	c _g	λ_{s}	a [m ² /s]
[kg/m ³]	[J/kgK]	[Ŵ/mK]	
1800	1400	2,30	9,1e-07

bron: VDI-wärme-atlas [4]

Verder wordt aangenomen dat het (wisselende) buitenklimaat aan het maaiveld geen invloed heeft op de warmtestroming rondom de aardtunnel. De warmtestroming is daardoor in elke richting gelijk. De juistheid hiervan hangt af van de aanlegdiepte. De warmte-uitwisseling geschiedt voornamelijk loodrecht op de aardtunnelwand. De temperatuurgradiënt in de grond evenwijdig aan de aardtunnel wordt verwaarloosd. De instationaire temperatuurverdeling in de grond rondom een buis kan nu worden beschreven door de onderstaande Fourier-vergelijking [2].

$$\frac{1}{r}\frac{\partial T}{\partial r} + \frac{\partial^2 T}{\partial r^2} = \frac{1}{a}\frac{\partial T}{\partial t}$$
(1)

Drie warmteweerstanden tussen de grond en de lucht in de aardtunnel belemmeren de warmte-uitwisseling; te weten de warmteweerstand $1/\alpha_g$ door het niet-ideale contact met de grond, de warmteweerstand van de buis D_w/λ_w zelf en de convectieve warmte-overdracht $1/\alpha_c$ aan de binnenzijde. De warmte-overdrachtscoëfficiënt α_c wordt sterk bepaald door de luchtsnelheid in de buis en voldoende nauwkeurig gegeven door de empirische formule uit Recknagel (voor lucht van 10° C):

$$\alpha_c = 4,15 \frac{v_l^{0.75}}{d^{0.25}}$$
(2)

De met de grond uitgewisselde warmte is gelijk aan de temperatuurverandering van de passerende luchtmassa:

$$\dot{m}c_{l}\frac{dT_{l}}{dz} = \pi d_{w}\tilde{q}_{w} \qquad \tilde{q}_{w} = \alpha_{c}(\tilde{T}_{w} - \tilde{T}_{l})$$
(3)

De grond zelf bezit een warmteweerstand *R* en een warmtecapaciteit *C*. Beide bepalen ze de impedantie van de grond Z_g . In een elektrisch analogon is de warmtecapaciteit van de grond te beschouwen als een complexe weerstand ter grootte van $1/j\omega C$. Het volledige model is dan een aantal in serie-geschakelde, al dan niet complexe weerstanden met een totale impedantie Z_i .

$$Z_t = Z_g + \frac{1}{\alpha_g} + \frac{D_w}{\lambda_w} + \frac{1}{\alpha_c}$$
(4)

De oplossingsmethode

In plaats van discretisatie van vergelijking (1) naar plaats en tijd is gekozen voor een aanpak die het probleem oplost in het frequentiedomein. Dit is eenvoudig, snel en nauwkeurig te realiseren met algoritmen uit MatLab of MathCad. Voor een in de tijd sinusvormige temperatuurfluctuatie wordt de complexe overdrachtsfunctie bepaald welke de werking van de aardtunnel beschrijft. Deze overdrachtsfunctie is niets anders dan de verhouding tussen het ingaande- en het uitgaande temperatuursignaal. De Fourier-getransformeerde ingangstemperatuur wordt vermenigvuldigd met de overdrachtsfunctie en weer teruggetransformeerd tot de uitgangstemperatuur. De ingangstemperatuur is het temperatuurverloop van de buitenlucht welke wordt beschreven door een gemiddelde temperatuur vermeerderd met sinusvormige fluctuaties. De gemiddelde temperatuur in een jaar komt overeen met de ongestoorde grondtemperatuur T_{og} . In de praktijk wordt de buitentemperatuur in discrete uurwaarden geregistreerd. In dat geval gebruikt men de *fast Fourier transform* (FFT). In een complexe notatie wordt het fluctuerende deel van de ingangstemperatuur (voor een enkele frequentie $1/t_0$) beschreven door:

$$\tilde{T}_{l}(0,t) = \hat{T}_{l} e^{j(\omega t + \varphi)} \qquad \omega = \frac{2\pi}{t_{0}}$$
(5)

Om de impedantie van de grond Z_g rondom een buis te bepalen, wordt de Fourier-vergelijking (1) herschreven:

$$r^{*2} \frac{d^2 T}{dr^{*2}} + r^{*} \frac{dT}{dr^{*}} - jr^{*2}T = 0$$
(6)
$$r^{*} = r \sqrt{\frac{\omega}{a}}$$

De oplossing van vergelijking (6) is de som van een reële- en imaginaire Kelvin-functie van orde 0. De eerste afgeleide van de oplossing stelt de warmtestroom q naar de grond voor en is een Kelvin-functie van orde 1. De impedantie is gedefinieerd als de verhouding tussen de temperatuur- en de warmtestroomfluctuatie aan het oppervlak ($r = r_w$) en kan als volgt worden geschreven [1].

$$Z_{g} = \frac{\tilde{T}_{w}}{\tilde{q}_{w}} = \frac{d^{*}}{2\lambda_{g}} (1-j) \cdot \frac{ker_{0}(r_{w}^{*}) + jkei_{0}(r_{w}^{*})}{-kei_{1}(r_{w}^{*}) + jker_{1}(r_{w}^{*})}$$

$$R = Re(Z_{g}) \qquad \frac{1}{\omega C} = Im(Z_{g})$$
(7)

Het eerste gedeelte (zonder de Kelvin-functies) is de impedantie van de grond voor een *vlakke* wand, een warmteweerstand R_{vlak} en een warmtecapaciteit C_{vlak} . Hierbij is d^* de dempingsdiepte voor een *vlakke* wand welke gelijk is aan $\sqrt{(at_0\pi)}$. Vanwege het grotere grondvolume achter een hol-gekromde wand is de dempingsdiepte rondom een grondbuis kleiner dan achter een vlakke wand. Het tweede gedeelte van vergelijking (7) is de impedantie-correctie voor de kromming van de wand welke afhangt van de straal r_w van de aardtunnel en van de frequenties in het temperatuursignaal. Het reële gedeelte verlaagt de warmteweerstand die de te grote dempingsdiepte d^* corrigeert en het imaginaire gedeelte vergroot de warmtecapaciteit die het te kleine grondvolume corrigeert. Bij grote periodetijden (lage frequenties) zijn de krommingscorrecties het sterkst (zie figuur 1).

$$C = \left(1 + \frac{d^*}{d_w}\right) \cdot C_{vlak}$$

$$R = \frac{r_w}{d^*} \ln\left(1 + \frac{d^*}{r_w} + \frac{1}{2}\frac{d^{*2}}{r_w^2}\right) \cdot R_{vlak}$$
(8)

De krommingscorrectie voor de warmteweerstand en de warmtecapaciteit kan ook worden benaderd door aan te nemen dat de *gehele* warmtecapaciteit van de grond zich bevind waar het grondvolume, rondom de buis en binnen de dempingsdiepte d^*



Fig. 1 De kromminscorrecties voor de warmteweerstand R en de warmteecapaciteit C t.o.v. een vlakke wand voor een diameter van 0,20 m.

(voor een *vlakke* wand), in twee gelijke helften wordt gedeeld. Dit leidt tot de onderstaande benaderingen voor R en C.

Beschrijving van de warmte-overdracht

De warmte-uitwisseling verstoort de grondtemperatuur rondom de aardtunnel. Op grotere afstand van de aardtunnel vermindert de verstoring. Theoretisch is op een oneindige afstand weer sprake van een ongestoorde grondtemperatuur, $T(r \rightarrow \infty, z, t) =$ T_{og} . In de praktijk treft men op een afstand van 50-60 maal de buisdiameter al een vrijwel ongestoorde grondtemperatuur aan. De hoeveelheid warmtecapaciteit rondom een buis neemt namelijk kwadratisch toe met de afstand en daarmee neemt de temperatuurverandering daar sterk af. De tweede randwaarde volgt uit het feit dat de temperatuur van passerende lucht verandert. Hoe langer de tunnel, hoe kleiner het temperatuurverschil met de grond wordt. Alhoewel steeds minder warmte wordt uitgewisseld, neemt de lucht in de tunnel uiteindelijk de ongestoorde grondtemperatuur aan, $T_l (r < r_w, z \rightarrow \infty, t) = T_{og}$. Het temperatuurverschil tussen de lucht en de buiswand $T_l - \tilde{T}_w$ is de drijvende kracht achter de warmtestroom, zoals ook blijkt uit (3) welke samen met (4) over gaat in:

$$\dot{m}c_{l}\frac{d\tilde{T}_{l}}{dz} = \pi d_{w}\frac{\tilde{T}_{l}}{Z_{l}}$$
⁽⁹⁾

De oplossing van de differentiaalvergelijking (9) volgt uit toepassing van de proces- en randvoorwaarden en wordt voor een aardtunnel met een lengte L gegeven door:

$$\tilde{T}_{l}(L,t) = \tilde{T}_{l}(0,t) e^{-P} = \tilde{T}_{l}(0,t-\Delta t) e^{-D}$$

$$D = Re(P) \qquad \Delta t = \frac{Im(P)}{\omega} \qquad P = \frac{\pi d_{w}L}{\dot{m}c_{l}Z_{l}}$$
(10)

Waarbij $\pi d_w L$ het warmte-uitwisselend oppervlak voorstelt en mc_i de warmtecapaciteitstroom. De overdrachtsfunctie e^{-P} beschrijft de werking van de aardtunnel; een demping e^{-D} en een tijdvertraging Δt . De demping die de belangrijkste rol speelt, is gedefinieerd als de fractie van de temperatuuramplitude aan het begin van de aardtunnel. Hoe lager deze fractie, hoe beter de demping. Voor snelle temperatuurfluctuaties zoals de dagelijkse, is de demping beter dan voor trage temperatuurfluctuaties zoals de jaarlijkse. De tijdvertraging hangt af van de aardtunnellengte en ligt in de orde grootte van 2,5% van de periodetijd $(L=40 \text{ m}, d_w=0,20 \text{ m}, v_i=1,5 \text{ m/s})$. De dempingsfractie e^{-D} neemt in dat geval snel toe met de periodetijd tot 0,2 à 0,3 bij 500 uren waarna ze redelijk constant blijft voor nog lagere frequenties.

De werking verbetert bij afname van de luchtsnelheid. Dit wordt verklaard doordat bij een lagere luchtsnelheid de slechtere warmte-overdrachtcoëfficiënt ac niet opweegt tegen de nu langere verblijftijd van de lucht in de aardtunnel. Lijnen van gelijke demping door combinaties van luchtdebiet en luchtsnelheid tonen aan dat er een luchtsnelheid bestaat waarbij het luchtdebiet steeds maximaal is (voor een gegeven periodetijd). Uit een frequentie-analyse van de buitenluchttemperatuur over een jaar blijkt dat de dagfregentie de belangrijkste component is. De optimale luchtsnelheid ligt voor de dagelijkse temperatuurfluctuatie tussen de 1,0 en 1,3 m/s, enigszins afhankelijk van de demping. Dit optimum vindt men ook terug wanneer het luchtdebiet wordt uitgezet tegen de tunneldiameter waarin de luchtsnelheid impliciet is verwerkt (zie figuur 2). De maxima vormen voor een bepaalde tunnellengte een quasi-parabolische lijn. De bij een maximum behorende diameter is voor andere frequenties niet optimaal.



Fig. 2 Het verloop van iso-demping lijnen voor verschillende combinaties van luchtdebiet en tunneldiameter (dempingsfracties 0.05...0.30, tunnellengte 40 m en periodetijd 24 uur).

Onderbroken gebruik van de aardtunnel

Omdat de Fourier-transformatie een lineaire operator is, mag de overdrachtsfunctie geen met de tijd variërend luchtdebiet bevatten. Om toch een onderbroken gebruik te simuleren worden de gevolgen van de onderbreking voor de werking van de aardtunnel beschouwd; de warmte-uitwisseling is nihil. Dat is ook het geval wanneer de temperatuur van de passerende lucht gelijk wordt gesteld aan de wandtemperatuur. De wandtemperatuur is echter op voorhand niet bekend. Een goede eerste schatting voor de wandtemperatuur is de ongestoorde grondtemperatuur. Op de momenten dat de aardtunnel buiten gebruik is, wordt de ingangstemperatuur vervangen door een schatting van de wandtemperatuur. Na toepassing van de boven beschreven oplossingsmethode, levert de uitgangstemperatuur een betere schatting van de wandtemperatuur. De oorspronkelijke ingangstemperatuur kan opnieuw worden aangepast. Het proces itereert naar de exacte wandtemperatuur. Op deze manier kan het effect van een bepaalde aan/uit-regeling worden bekeken. Wanneer de perioden worden vermeden waarin de aardtunnel marginaal werkt, waarin het verschil tussen in- en uittree-temperatuur gering is, neemt de gemiddelde temperatuurverandering tussen ingaande- en uittredende lucht toe van 3°C tot 5°C.

De Bantham (IMAG-DLO)

De bovenstaande theorie is getoetst aan de meetresultaten van een grondbuizen-systeem van IMAG-DLO dat wordt gebruikt bij hun varkensproefbedrijf in Maartensdijk, 6 km hemelsbreed ten noorden van De Bilt. Het systeem is aangelegd voor luchtkoeling en -verwarming in varkensstallen.

Technische gegevens:

6 (buitendiameter 200 mm, lengte 30 m). De		
metingen hebben betrekking op twee van de		
zes (identieke) buizen.		
blinde drainagebuis, geribbeld (dikte 0,6 mm).		
2,85 m onder maaiveld.		
0,63 m.		
oplopend van 1,0 tot 2,2 m/s gedurende een		
biggenronde.		
continu, verminderd gebruik tussen twee		
ronden.		
zanderig (onder waterspiegel)		

De technische gegevens zijn aangevuld met de schattingen zoals vermeld in tabel 1. Het model kan alleen constante luchtsnelheden hanteren. Daarom is gerekend met de gemiddelde luchtsnelheid over de vier meetperioden, 1,6 m/s. De ribbelvorm van de blinde drainage-buis en het daaruit voortvloeiende extra warmte-uitwisselend oppervlak geven een goede warmte-overdracht tussen de tunnelwand en de grond, $\alpha_g = 45 \text{ W/m}^2\text{K}$. Alleen gedurende de biggenronde werd elk uur de temperatuur gemeten op verschillende afstanden in de buis; 0 (buitenlucht), 15 en 30 m. In de periode tussen twee ronden wordt een verlaagde ventilatie toegepast, waarbij eveneens warmte wordt uitgewisseld die vertraagd en in de tijd gespreid weer vrij komt in een volgende (meet)periode. Daar geen metingen tussen de meetperioden beschikbaar zijn, is gebruik gemaakt van weergegevens uit De Bilt om een representatieve opbouw van de voorgeschiedenis van de grond te verkrijgen. Op gelijke wijze is de

inslingering van de grond tot stand gekomen, circa een jaar voorafgaand aan de eerste meetperiode. De belangrijkste verschillen tussen model en werkelijkheid zijn in figuur 3 weergegeven.

In de figuren 4 en 5 zijn de resultaten weergegeven. Het betreft twee van de vier meetperioden.



Metingen

Model

Fig. 3 Visualisatic van de meetsituatie en de modelaannames. In het model is de luchtsnelheid constant terwijl deze in werkelijkheid langzaam opliep met de tijd.

Duidelijk is de overeenkomst te zien in trend tussen het model en de metingen. Op lange termijn valt op dat het model sterker nivelleert. In de zomer is de gemodelleerde temperatuur lager dan de metingen. In de winter is de gemodelleerde temperatuur juist hoger. Dit verschijnsel kon niet worden verklaard uit de onzekerheidsmarges van de fysische eigenschappen van de grond. De invloed van condensatie kan eveneens worden uitgesloten. 's Zomers komt weliswaar door condensatie warmte vrij waardoor de werking van de aardtunnel verslechtert, maar het condensaat wordt afgevoerd doordat de buizen op afschot liggen. 's Winters treedt de sterkere nivellering echter eveneens op terwijl geen condensaat beschikbaar is voor verdamping. Er kan dus geen warmte worden onttrokken aan de lucht. De verklaring voor de sterkere nivellering is de verslechterde af- of aanvoer van warmte door de nabijheid van het maaiveld en andere aardtunnels. Deze verkleinen de temperatuurverschillen in de grond waardoor het potentiaal voor de warmtestroom in de grond vermindert. De invloed van maaiveld en andere aardtunnels is vrijwel onmogelijk analytisch op te lossen en dient numeriek te worden bepaald.

Verbetering van de aardtunnel

Vanwege de lage luchtsnelheden waarbij de aardtunnel optimaal functioneert bij dagelijkse temperatuurfluctuaties spelen de aanlegkosten en niet de bedrijfskosten een doorslaggevende rol bij



Fig. 4 Vergelijking van meetgegevens en model voor de periode 1 juli–10 augustus 1993 voor buis 12. De gestippelde lijn is de buitentemperatuur.

economische toepassing van het systeem. Om 's zomer en 's winter zo min mogelijk hinder te ondervinden van de indringing van de stralings-luchttemperatuur aan het maaiveld, dient de aanlegdiepte lager dan 3 meter onder het maaiveld te worden



Fig. 5 Vergelijking van meetgegevens voor de periode 2 december 1993–11 januari 1994 voor buis 12. De gestippelde lijn is de buitentemperatuur.



De kelder met thermokoppels.



De inlaatopening van een aardtunnel.

gekozen. Een isolerende laag boven het buizenstelsel verkleint de economische aanlegdiepte. De isolatie kan het betreffende gebouw zelf zijn, een laag droge humus of een laag PS-schuim. In figuur 6 is het effect weergegeven van een 0,40 m dikke, droge veenachtige laag (humus, $\lambda = 0.20$ W/mK) op de indringing van de jaarlijkse temperatuurschommeling aan het maai-

Maaiveld	0%	100	0%
droge veenad	chtige laag (hum	us)	folie
Ö		0/0) D
	met isolatie	zonder isolatie	

Fig. 6 De indringing van de buitenlucht-temperatuur wordt verminderd door het aanbrengen van een isolerende laag onder het maaiveld. veld. De tijdvertraging van de indringing is in de afbeelding buiten beschouwing gelaten. Op een diepte van 1,40 m bedraagt de temperatuurfluctuatie nog maar 17% van die aan het maaiveld. Zonder isolatie was dit nog 57%.

Andere verbeteringen zijn het verdichten en/of verbeteren van de grond rondom de aardtunnel tot een afstand uit de buiswand van 1 à 2 maal de dempingsdiepte voor dagelijkse temperatuur-fluctuaties. Het verdichten verkleint ook de warmteweerstand $1/\alpha_g$ en verlaagt zodoende de barrière voor verbetering door een hogere luchtsnelheid.

Conclusies

In een instationaire situatie wisselt lucht in een aardtunnel warmte uit met de grond. Dit leidt tot een demping en tijdvertraging van de temperatuurfluctuaties van deze lucht. Beide verschijnselen hangen met name af van de duur van de temperatuurfluctuatie en de lengte van de aardtunnel. De tijdvertraging speelt een ondergeschikte rol voor 'korte' tunnellengtes. De kromming van de tunnelwand heeft een significante invloed op de warmte-uitwisseling, vooral door temperatuurfluctuaties over een langere periode.

Het oplossen van het probleem in het frequentie-domein noodzaakt tot een eenvoudig model waarmee niettemin snelle en nauwkeurige resultaten zijn te behalen.

Zowel 's zomers als 's winters wordt het systeem tegengewerkt door indringing van de buitenluchttemperatuur in de bodem. De indringing neemt af op grotere dieptes. Omdat de terugverdientijd eerder wordt bepaald door de aanlegkosten dan door de bedrijfskosten, is het aan te bevelen een isolerende laag onder het maaiveld aan te brengen. Hiermee kan de economische aanlegdiepte worden verkleind.

De gemiddelde temperatuurverandering verbetert wanneer de aardtunnel buiten werking wordt gesteld op die momenten dat het temperatuurverschil tussen de intree- en de uittreetemperatuur gering is. De warmte-opslag in de grond maakt het vinden van een optimale regeling lastig.

Nomenclatuur

α	warmte-overdrachtscoëfficiënt	W/m^2K
λ	warmtegeleidingscoëfficiënt	W/mK
ρ	dichtheid	kg/m ³
ω	hoekfrequentie	s^{-1}
φ	faseverschuiving	S
а	temperatuurvereffeningscoëfficiënt	m ² /s
С	soortelijke warmte	J/kgK
С	warmtecapaciteit	J/m ³ K
d	diameter	m
d^*	dempingsdiepte achter vlakke wand	m
D	dikte	m
т	luchtdebiet	kg/s
q	warmtestroom	W
r	straal (loodrecht)	m
R	warmteweerstand	m ² K/W
t	tijd	S

Т temperatuur

- v luchtsnelheid
- lengte (evenwijdig) Z
- Ζ impedantie

Literatuur

°C

m/s

m

m²K/W

- 1. Abramowitz, M., Segun, I. A. (eds.), Handbook of Mathematical Functions, Dover Publications, inc., New York, 1965.
- 2.
- Holman, J. P., Heat Transfer, McGraw-Hill, Tokyo 1981. Spruit, F. P. M., Lucht Verwarmen en Koelen met Bodemwarmte, 3. Verwarming & Ventilatic Vol.49 (333-337), V. N. I., 1992.
 4. VDI Wärme-atlas, 6. Auflage, V. D. I., 1991.
- Jpma, H., Smeets, L. J. P., Energiebesparing in de Champignon-teelt, T.U. Delft, 1994.