

Ondergronds als alternatief voor bovengronds bouwen

Citation for published version (APA):

van Dronkelaar, C., Costola, D., Mangkuto, R. A., & Hensen, J. L. M. (2013). Ondergronds als alternatief voor bovengronds bouwen. *TVVL Magazine*, 42(10), 44-47.

Document status and date:

Gepubliceerd: 01/01/2013

Document Version:

Het geaccepteerde manuscript inclusief aanpassingen uit het peer-review proces

Please check the document version of this publication:

- A submitted manuscript is the version of the article upon submission and before peer-review. There can be important differences between the submitted version and the official published version of record. People interested in the research are advised to contact the author for the final version of the publication, or visit the DOI to the publisher's website.
- The final author version and the galley proof are versions of the publication after peer review.
- The final published version features the final layout of the paper including the volume, issue and page numbers.

[Link to publication](#)

General rights

Copyright and moral rights for the publications made accessible in the public portal are retained by the authors and/or other copyright owners and it is a condition of accessing publications that users recognise and abide by the legal requirements associated with these rights.

- Users may download and print one copy of any publication from the public portal for the purpose of private study or research.
- You may not further distribute the material or use it for any profit-making activity or commercial gain
- You may freely distribute the URL identifying the publication in the public portal.

If the publication is distributed under the terms of Article 25fa of the Dutch Copyright Act, indicated by the "Taverne" license above, please follow below link for the End User Agreement:

www.tue.nl/taverne

Take down policy

If you believe that this document breaches copyright please contact us at:

openaccess@tue.nl

providing details and we will investigate your claim.

Potentie energiebesparing gebouwen

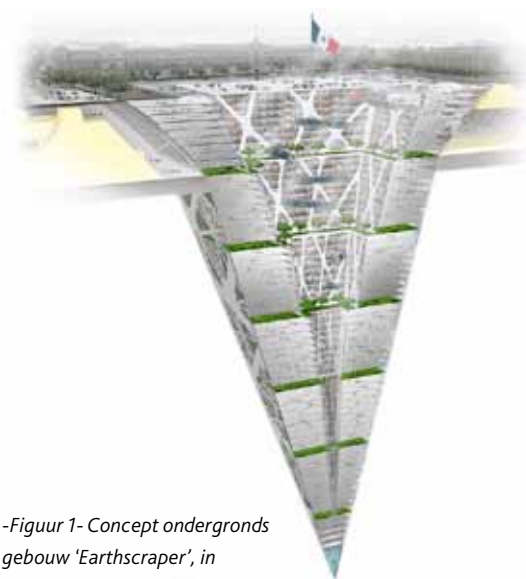
Ondergronds als alternatief voor bovengronds bouwen

Ondergrondse gebouwen worden gezien als alternatief voor bovengrondse gebouwen, omdat het totale energiegebruik ervan lager ligt. Verschillende aspecten bepalen het energiegebruik door warmte- en koudevraag van deze gebouwen, zoals de gebouwfunctie, bouwmaterialen, gebouwgrootte en -vorm en het klimaat. Slechts enkele onderzoeken naar warmteoverdracht in ondergrondse gebouwen richten zich op het energiegebruik ten opzichte van bovengrondse gebouwen. Onderzoek naar de relatie tussen het energiegebruik en de verschillende ontwerpaspecten in verschillende klimaten bestaat er niet. Het in dit artikel beschreven onderzoek [1] bevat een vergelijkende analyse van het berekende jaarlijkse energiegebruik van bovengrondse en ondergrondse gebouwen, gericht op de evaluatie van de potentie in energiebesparing door het gebruik van ondergrondse gebouwen.

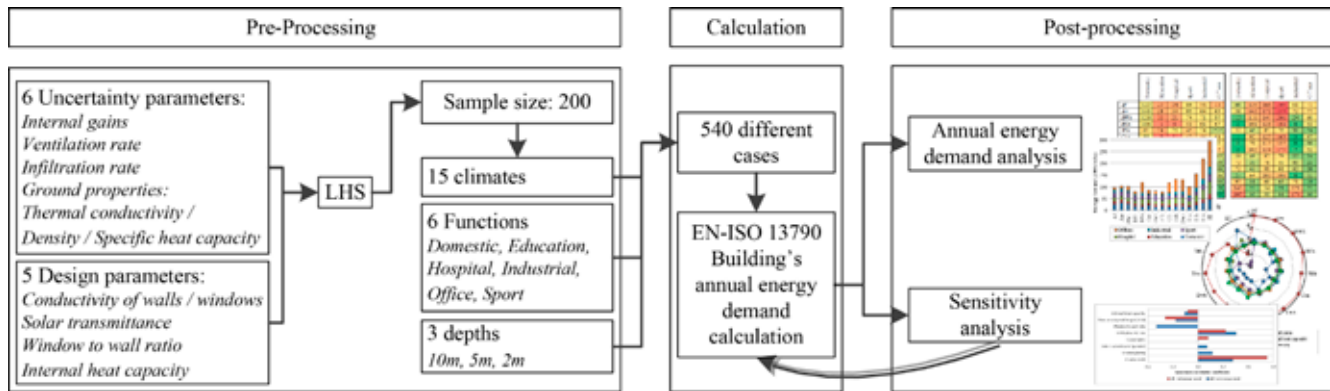
C. (Chris) van Dronkelaar MSc BBE, dr.ir. D. (Daniël) Cóstola, R. (Rizki) Mangkuto MSc, prof.dr.ir. J.L.M. Hensen; Technische Universiteit Eindhoven

De inspiratie voor dit onderzoek is een conceptueel gebouw dat geplaatst zou moeten worden in Mexico-Stad (figuur 1). Het onderzoek dat is uitgevoerd betreft de energiebesparende aspecten van ondergrondse gebouwen. Hieraan voorafgaand is literatuuronderzoek verricht naar de voor- en nadelen van ondergrondse gebouwen in vergelijking met bovengrondse gebouwen in algemene zin [1]. De procedure voor dit onderzoek is schematisch weergegeven in figuur 2, en bevat drie stappen: voorbereiding, berekening en nabewerking. De invoerparameters worden gedefinieerd in de eerste stap en gesampled met behulp van Latin hypercube sampling. Dit resulteert in 200 verschillende configuraties van invoerparameters en representeert de onzekerheid in het ontwerp. In de tweede stap

wordt het jaarlijkse energiegebruik voor de warmte- en koudebehoefte berekend door het gebruik van een maandelijkse berekeningsmethode die beschreven is in EN-ISO 13790 [2]. Verschillende klimaten en gebouwfuncties zijn vervolgens met elkaar vergeleken om te kijken naar de potentiële energiebesparing. In de laatste stap wordt er gekeken naar de invloed van de variabele invoerparameters door onzekerheid- en sensitiviteitanalyse. Het energiegebruik is vergeleken voor zes verschillende gebouwfuncties met verschillende bouwweigenschappen, die bepaald zijn aan de hand van het U.S. gebouwvoorraadoverzicht [3]. De Köppen-Geiger klimaatclassificering wordt gebruikt om verschil te maken tussen verschillende klimaten. Analyse is gedaan voor 15 van de 30 gespecificeerde klimaten, die



-Figuur 1- Concept ondergronds gebouw 'Earthscraper', in Mexico-Stad



-Figuur 2- Flowchart van de onderzoeksprocedure

Klimaat groep	Benadering wereld populatie	Klimaat classificatie [4]	Corresponderende stad
Tropical Humid	33	Af Aw	Singapore Bangkok
Dry	22	BWh BSh BSk	Phoenix San Antonio Colorado Springs
Mild Mid-Latitude	35	Csa Cwb Cfa Cfb	Seville Johannesburg Jacksonville Amsterdam
Severe Mid-Latitude	9	Dsb Dwb Dfa Dfb Dfc	Great Falls Minneapolis Kansas City Helsinki Sodankylae
Polar	1	ET	Inukjuak

Naar: <http://www.pdx.edu/econ/country-geography-data>

-Tabel 1- Köppen-Geiger klimaatclassificaties gegroepeerd in klimaattypen met een benadering tot de wereldpopulatie en corresponderende steden

gegeven zijn in tabel 1. Alle klimaatgroepen (A t/m E) zijn gerepresenteerd door ten minste één klimaat. In totaal zijn er respectievelijk 8 en 9 verschillende variabele parameters gebruikt voor het bovengrondse en ondergrondse gebouw.

RESULTATEN EN DISCUSSIE

Jaarlijkse energiegebruik

Het gemiddelde jaarlijkse energiegebruik ($\text{kWh/m}^2\text{y}$) is te zien voor 15 verschillende klimaten en zes verschillende gebouwfuncties. Tabel 2-links laat zien dat er een aantal ondergrondse gebouwen is met een heel laag energiegebruik, terwijl er ook gevallen zijn waar energiegebruik juist heel hoog is. Tabel 2-rechts laat de verschillen van energiegebruik zien tussen bovengronds en ondergronds; groen betekent een energiebesparing van de ondergrondse variant ten opzichte van de bovengrondse en rood betekent een toename in het energiegebruik. De resultaten in tabel 2-rechts laten dus zien dat er een reductie in het energiegebruik is voor alle klimaten en

Stad	Klimaat*	Gemiddelde jaarlijkse energiegebruik ($\text{kWh/m}^2\text{y}$)						Verschil tussen bovengrondse en ondergrondse ($\text{kWh/m}^2\text{y}$)					
		Woning	Educatie	Ziekenhuis	Sport	Industrie	Kantoor	Woning	Educatie	Ziekenhuis	Sport	Industrie	Kantoor
Singapore	Af	46	136	166	246	61	73	122	22	24	84	56	33
Bangkok	Aw	56	142	172	255	72	77	143	28	39	95	64	65
Phoenix	BWh	13	116	147	206	24	60	138	10	21	74	71	97
San Antonio	BSh	3	101	136	181	8	53	106	-1	0	53	61	67
Col. Springs	BSk	57	46	85	76	30	24	61	24	76	46	74	277
Seville	Csa	1	92	127	163	3	47	88	-9	-11	42	46	64
Johannesburg	Cwb	5	78	117	137	0	38	33	-21	-31	27	15	65
Jacksonville	Cfa	2	102	134	179	7	52	95	-4	-9	49	52	47
Amsterdam	Cfb	53	49	87	79	25	24	53	-2	43	14	53	245
Great Falls	Dsb	73	39	78	59	45	23	80	41	104	69	81	330
Minneapolis	Dwb	72	42	81	61	45	26	97	55	118	95	99	346
Kansas City	Dfa	27	64	103	108	8	32	107	22	58	58	96	216
Helsinki	Dfb	97	31	69	43	71	19	92	48	132	71	81	410
Sodankylae	Dfc	145	22	54	21	121	22	123	92	223	124	107	579
Inukjuak	ET	197	30	50	31	174	30	143	127	314	150	134	732

-Tabel 2- Links: het gemiddelde jaarlijkse energiegebruik ($\text{kWh/m}^2\text{y}$) van het ondergrondse gebouw; rechts: het verschil tussen het gemiddelde jaarlijkse energiegebruik ($\text{kWh/m}^2\text{y}$) van het bovengrondse en ondergrondse gebouw

gebouwfuncties, met uitzondering van de gebouwfuncties met een hoge interne warmteproductie, zoals educatieve faciliteiten en ziekenhuizen in milde klimaten. Gebouwfuncties met een lagere interne warmteproductie hebben een hogere potentie om het energiegebruik te reduceren in warme klimaten, terwijl gebouwfuncties met een hogere interne warmteproductie beter presteren in koude klimaten. Gebouwfuncties met een hoge energiereductie zijn: wonen, industrie en kantoor met een gemiddelde reductie in verschillende klimaten ongeveer 70%. Andere functies (educatie, ziekenhuis en sport) hebben een gemiddelde reductie tussen de 25 en 40%. De potentie in energiebesparing is hoger in strenge mid-latitude en poolklimaten, met een gemiddelde reductie van ongeveer 66%. Deze waarde geeft het voorspelde gebruik aan van ondergrondse gebouwen in regio's met ongeveer 10% van de globale populatie. In andere klimaten (waar 90% van de populatie zich bevindt) ligt de gemiddelde reductie rond de 42%.

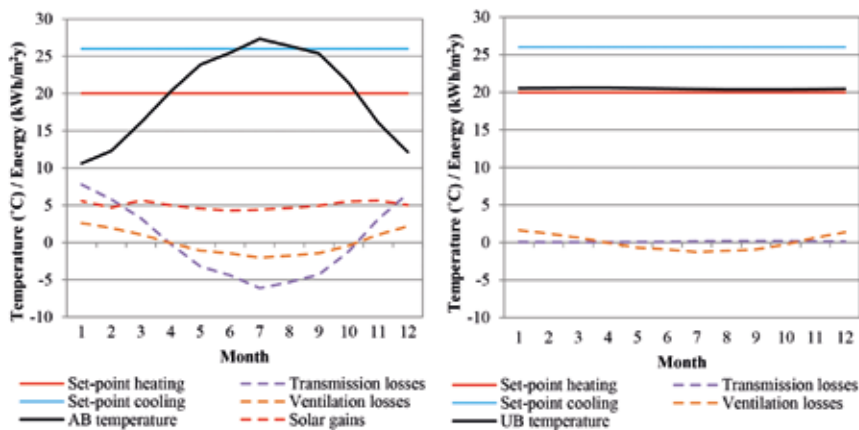
Warmtebalans

De balans tussen warmtewinst en warmteverlies in elk voorbeeld, definieert het behoud van een comfortabele temperatuur zonder benodigde verwarming of koeling. Figuur 3, op de volgende pagina, laat een voorbeeld

zien van het balanceren van energiestromen voor een domestieke gebouwfunctie in een gemiddelde-hoogte klimaat (Cfa). In figuur 3b is te zien dat de verwarmingstemperatuur en de ondergrondse temperatuur ongeveer gelijk zijn, ongeveer 20°C , en dat er een lage interne warmteproductie bestaat. De temperatuurvariaties in het gebouw zijn dus minimaal, de transmissieverliezen zijn te verwaarlozen en het gebouw heeft dus relatief een heel laag energiegebruik voor het behouden van de comfortabele binnentemperatuur. Figuur 3a toont dezelfde soort informatie voor het bovengrondse gebouw, echter met een fluctuatie van 13°C voor de buitentemperatuur gedurende het jaar. In dit geval is het verschil tussen de set-points en de buitentemperatuur veel groter, waardoor er veel meer transmissieverliezen zijn dan in het ondergrondse gebouw. Gedurende de zomer neemt het energiegebruik toe door de onbenodigde zonnewinsten.

Motivering energiebalans

De werking van de energiebalans is erg belangrijk om de resultaten en de samenhang van verschillende combinaties van klimaten en gebouwfuncties te begrijpen. De motivering van de energiebalans is dat het jaarlijkse energiegebruik van een gebouw afhankelijk is van de deviatie van het interval tussen de verwarmings- en koeltemperatuur. Uit de gepre-



-Figuur 3- Energiebalans van een bovengronds (A) en ondergronds (B) gebouw laten het verschil zien in het jaarlijkse energiegebruik, voor het Cfa-klimaat en woonfunctie

senteerde resultaten blijkt dat er verschillende voorbeelden zijn van ondergrondse gebouwen met een zeer laag energiegebruik. De belangrijkste reden hiervoor is de ondergrondse temperatuur, die een stabiele waarde behoudt binnen het set-point interval gedurende het jaar. Hierdoor is er geen energie benodigd om een comfortabele binnentemperatuur te behouden, tenzij de interne warmteproductie deze uit balans brengt. In tegenstelling, een bovengronds gebouw heeft grotere temperatuurfuctuaties die afwijken van het set-point temperatuurinterval en leiden tot een hoger energiegebruik om de comfortabele interne temperatuur te kunnen bewaren. Conclusie is dat de potentie in energiebesparing sterk afhankelijk is van twee factoren: klimaat en interne warmteproductie. De eerste factor bepaalt de buitentemperatuur in bovengrondse gebouwen en grondtemperatuur in ondergrondse gebouwen; de tweede factor zal invloed hebben op de combinatie van ondergrondse temperatuur en verwarmings- en koeltemperatuursetpoints.

Onzekerheidsanalyse

De verdeling van de resultaten met 200 uitgevoerde simulaties per situatie kan gegeven worden door een frequentiedistributie, die het jaarlijkse energiegebruik laat zien voor één bepaald geval. De gemiddelde en de standaard afwijkingswaarden van het jaarlijkse energiegebruik zijn gegeven voor de bovengrondse en ondergrondse situatie. In dit specifieke geval heeft het jaarlijkse energiegebruik van het ondergrondse gebouw een veel lagere waarde ($\mu = 46$, $\sigma = 7$) dan die van het bovengrondse gebouw ($\mu = 167$, $\sigma = 28$), dus een hoge potentie tot energiebesparing. Vermeldenswaard is dat de standaardafwijking tevens veel kleiner is voor het ondergrondse gebouw, terwijl het bovengrondse gebouw een grotere verdeling heeft door de variatie in onder andere de

muur-raamoppervlakte verhouding. Een belangrijke observatie kan gemaakt worden wanneer het beste geval (laagste energiegebruik) van het bovengrondse gebouw vergeleken wordt met het slechtste geval (hoogste energiegebruik) van het ondergrondse gebouw. Voor twee standaardafwijkingen is er een kans van ongeveer 95% ($0,976^2$) dat het verschil in energiegebruik tussen het bovengronds en ondergronds gebouw 53 kWh/m²y of meer is. Dezelfde vergelijking is gemaakt voor elk klimaat en elke gebouwfunctie. In de meeste gevallen blijkt hieruit dat het slechts presterende ondergrondse gebouw minder energie gebruikt dan het beste bovengrondse gebouw. Een uitzondering zijn de gebouwen in de klimaten 'Af to Cfb and Dfa' voor de gebouwfuncties: educatie, ziekenhuis en sport. Er kan geconcludeerd worden dat de ondergrondse gebouwen robuuster (lagere spreiding van resultaten) zijn en dat in de meerderheid van de situaties, de energiebesparing niet afhankelijk is van de onzekerheid in de invoerwaarden van de parameters.

Sensitiviteitsanalyse

Het analyseren van de invloed van verschillende ontwerp- en onzekerheidsparameters op het energiegebruik, maakt het mogelijk om sterke correlaties te identificeren. Dit kan nuttig zijn om het niveau van ontwerp te bepalen waarmee de hoogste prestatie kan worden behaald. Sensitiviteitsanalyse is uitgevoerd voor alle situaties (klimaat en gebouwfuncties, bovengronds en ondergronds), met behulp van Spearman's rank correlatie. De resultaten van de vijf belangrijkste variabele parameters zijn weergegeven in tabel 3. De correlatie is weergegeven met behulp van een kleurschaal: -1 betekent een sterke negatieve correlatie (rood) tot 1, een sterke positieve correlatie (groen); 0 (wit) betekent dat er

geen correlatie is tussen de parameter en het energiegebruik.

Geen enkele parameter heeft het meeste invloed in elke situatie, maar er zijn wel parameters die een grotere invloed hebben in de meeste situaties. De grondeigenschappen zijn niet weergegeven, aangezien hun invloed op het energiegebruik zeer klein is. Tevens zijn drie parameters niet weergegeven (U-waarde glas, g-waarde van het glas en de oppervlakte wand-glasverhouding), omdat deze alleen een grote invloed hebben voor de woonfunctie. De resultaten in tabel 3 kunnen gebruikt worden om het ontwerp van ondergrondse gebouwen in de ontwerpfase te verbeteren door het accent te leggen op de meest gevoelige parameters.

CONCLUSIE

De potentie in energiebesparing van ondergrondse gebouwen is onderzocht door het uitvoeren van maandelijkse berekeningen van het jaarlijkse energiegebruik. Een vergelijkende analyse tussen bovengrondse en ondergrondse gebouwen is toegepast voor verschillende klimaten, gebouwfuncties en diepten. Sensitiviteitsanalyse is uitgevoerd door het analyseren van variabele invoerparameters en hun correlatie tot het jaarlijkse energiegebruik. De volgende conclusies kunnen gemaakt worden, gebaseerd op de berekende resultaten:

- ondergrondse gebouwen hebben de potentie om het energiegebruik in vergelijking met conventionele bovengrondse gebouwen te verminderen, door het gebruik van voordelige grondtemperaturen en grote hoeveelheden aardebedekking als isolatie. Echter, de omvang van deze potentie is gerelateerd aan de combinatie van verschillende ontwerp elementen;
- de balans tussen de ondergrondse temperatuur en de interne warmteproductie is erg belangrijk om een hoge energiebesparing te behalen;
- berekeningen voor verschillende ondergrondse diepten (2 m, 5 m, 10 m) laten zien dat het effect op het energiegebruik van een ondergronds gebouw te verwaarlozen is;
- variabele grondeigenschappen laten een zeer kleine invloed zien op het energiegebruik van een ondergronds gebouw;
- onzekerheidsanalyse laat dezelfde trends zien in bovengrondse en ondergrondse gebouwen, en geen enkele ontwerpparameter is dominerend in alle klimaten en functies.

Verder onderzoek zal zich richten op het gebruik van accurate uurlijkse berekeningen met behulp van gebouwsimulaties voor de energieberekeningen van de verschillende

situaties met de potentie van een hoge energiebesparing.

REFERENTIES

1. C. van Dronkelaar, 'MSc Thesis: Underground buildings - potential in terms of energy reduction', Eindhoven University of Technology, 2013
2. EN-ISO 13790, 'Energy performance of buildings - Calculation of energy use for space heating and cooling (ISO 13790:2008)', European Committee for Standardization, 2008
3. M. Deru, K. Field, D. Studer, K. Benne, B. Griffith and P. Torcellini, U.S. Department of Energy Commercial Reference Building Models of the National Building Stock, Colorado: National Renewable Energy Laboratory, 2011
4. M. Peel, B. Finlayson and T. McMahon, 'Updated world map of the Köppen-Geiger climate classification', Hydrol. Earth Syst. Sci., vol. 11, pp. 1633-1644, 2007

