

Rapport

Energiebesparing door vloer- en bodemisolatie

Rekenmethoden en besparingskentallen

2 november 2010

TU Delft, Faculteit Bouwkunde,
afdeling Bouwtechnologie, groep Bouwfysica

Dr. R.M.J. Bokel
Ir. E.R. van den Ham

Onderzoek in opdracht van:

Agentschap NL	contactpersoon ir. M. Lacroix
Milieu Centraal	contactpersonen ir. A. Dommering en drs. J.T. van Wieringen

Referentienummer Agentschap NL KP38091081

Divisie Energie en Klimaat
Agentschap NL
Postbus 17 | 6130 AA | Sittard
<http://www.agentschapnl.nl>



Agentschap NL
Ministerie van Economische Zaken

Milieu Centraal
Herculesplein 357
3584 AA Utrecht

Tel 030 2305070
www.milieucentraal.nl



Inhoud

Gebruikte begrippen en symbolen	3
Samenvatting	4
1 Inleiding	7
2 Doelstelling en werkwijze	9
2.1 Doelstellingen	9
2.2 Afbakening van dit onderzoek	9
2.3 Werkwijze	9
2.4 Te onderzoeken vloerisolatiesystemen	10
2.5 Te berekenen varianten	15
3 Berekening van de energiebesparing door vloer- en bodemisolatie	18
3.1 Warmtetransport door de begane grondvloer	18
3.2 Invloedsfactoren	19
3.3 Beschikbare modellen voor berekening energiebesparing	21
3.4 Vergelijking van benaderingsmodellen	26
4 Berekeningsresultaten	28
4.1 Vergelijkende berekeningen NEN 1068 – ISO 13370	28
4.2 Variantberekeningen ISO 13370	31
4.3 Vergelijking op onderdelen met gedetailleerde berekeningen (TRISCO)	34
5 Effect van vloerisolatie op setpointtemperatuur	37
5.1 Uitgangspunten	37
5.2 Berekeningsresultaten	37
5.3 Voorstel voor aanpassing rekenmethode NEN 7120	39
5.4 Effect setpointtemperatuur op energieverbruik	39
6 Vergelijking met praktijkmetingen	41
6.1 Beschikbare gegevens van praktijkmetingen	41
6.2 Verklaring van verschil tussen praktijkmetingen en berekeningen	43
7 Onderlinge vergelijking isolatiesystemen	44
7.1 Vergelijking vloerisolatiesystemen	44
7.2 Vergelijking met dakisolatie	48
8 Conclusie en aanbevelingen	51
8.1 Conclusies	51
8.2 Voorstel voor aan te houden besparingskentallen	53
8.3 Aanbevelingen voor nader onderzoek	54
Literatuur	56
Bijlagen:	57
1. Artikel Warmtetransport via de grond	57
2. Achtergrond informatie EN ISO 13370	66
3. Berekeningsresultaten gemiddelde situatie	67
4. Berekeningen effect kruipruimte ventilatie	70
5. Besparingskentallen dakisolatie	71

Gebruikte begrippen en symbolen

R	warmteweerstand in $\text{m}^2\text{K/W}$
R_c	warmteweerstand van een uit één of meerdere lagen samengestelde constructie
U	de warmtedoorgangscoefficiënt in $\text{W/m}^2\text{K}$
U_c	de warmtedoorgangscoefficiënt van een constructie
L_{2d}	de thermische koppelingscoëfficiënt in W/K berekend m.b.v. een 2-dimensionaal model
ψ	lineaire warmtedoorgangscoefficiënt van een detail in W/mK
λ	warmtegeleidingscoëfficiënt van een materiaal in W/mK
ε	hoeveelheid ventilatieopeningen voor kruipruimteventilatie in m^2 per m' gevel
$\text{m}^3 \text{ aeq}$	m^3 aardgasequivalent = 35,2 MJ
EPN	energieprestatienormering als vastgelegd in Bouwbesluit en NEN 5128
ECW	energiecertificaat voor bestaande woningen, energielabel
EPG	energieprestatie van gebouwen, opvolger EPN en ECW, vastgelegd in NEN 7120

Samenvatting

In opdracht van Agentschap NL en Milieu Centraal is door de afdeling Bouwtechnologie van de faculteit Bouwkunde van de Technische Universiteit Delft een onderzoek uitgevoerd naar vloer- en bodemisolatie.

Het verbeteren van de thermische isolatie is de eerste en belangrijkste stap in het beperken van het energiegebruik, zowel voor bestaande als nieuwe gebouwen en woningen. Voor de isolatie van de begane grondvloer worden uiteenlopende technieken gebruikt, die in twee hoofdgroepen kunnen worden onderscheiden:

- Isolatie op of tegen de onderzijde van de vloerconstructie, hier verder aangeduid met vloerisolatie
- Isolatie op de bodem van de kruipruimte, hier verder aangeduid met bodemisolatie.

Er is in de bouwwereld veel discussie over de effectiviteit van isolatie van de begane grondvloer in zijn algemeenheid en van bodemisolatie in het bijzonder. Daarnaast geven verschillende rekenmethoden sterk uiteenlopende besparingscijfers voor vloer- en bodemisolatie, die bovendien meestal lager en soms zelfs veel lager zijn dan uit praktijkmetingen blijkt.

Dit onderzoek is er op gericht meer duidelijkheid te geven over de effectiviteit van vloer- en bodemisolatie. Daarbij is voortgebouwd op het onderzoek van Cauberg-Huijgen uit 2006 [2] waarin werd geconcludeerd dat de huidige rekenmethode conform NEN 5128 en NEN 1068 ontoereikend is en dat het effect van verlaging van de luchttemperatuur bij vloerisolatie een belangrijke verklaring kan vormen voor de grote verschillen tussen praktijkmetingen en berekeningen.

Inmiddels is de nieuwe EPG-norm NEN 7120 Energieprestatie van gebouwen in ontwikkeling. De warmteverliezen door de begane grondvloer worden daarin uiteindelijk bepaald conform een nieuwe versie van NEN 1068, gebaseerd op NEN-EN-ISO 13370:2008. Onderzocht is of deze nieuwe rekenmethode voor de warmteverliezen door de begane grondvloer betere uitkomsten geeft die meer in overeenstemming zijn met praktijkmetingen. Daarnaast is onderzocht hoe groot het effect van de verlaging van de luchttemperatuur bij vloerisolatie is en op welke wijze dit geïmplementeerd zou kunnen worden in NEN 7120.

Conclusies

De belangrijkste conclusies van dit onderzoek zijn:

- De nieuwe rekenmethode voor warmteverliezen door de begane grondvloer volgens EN-ISO 13370 is op dit moment de meest betrouwbare praktisch hanteerbare genormeerde rekenmethode. In tegenstelling tot de huidige methode volgens NEN 1068 maakt deze methode onderscheid tussen vloer- en bodemisolatie, in relatie tot de kruipruimteventilatie.
- Uit een vergelijking met meer gedetailleerde berekening m.b.v. Trisco blijkt dat de berekening volgens EN-ISO 13370 voldoende nauwkeurig is voor het bepalen van de warmteverliezen via de begane grondvloer.
- De berekende besparingen zijn lager dan uit (het beperkt aantal beschikbare) praktijkmetingen blijkt, maar dit verschil kan grotendeels worden verklaard door het effect van de verlaging van de setpointtemperatuur bij vloerisolatie en het effect van verdamping

- in de kruipruimte. Als wordt gecorrigeerd voor deze effecten liggen de berekende besparingen in lijn met de praktijkmetingen.
- In het algemeen kan met dakisolatie meer bespaard worden dan met vloer- of bodemisolatie, behalve bij onverwarmde zolders met een matig geïsoleerd plafond. Bij onverwarmde zolders is isolatie in het plafond van de bovenste verdieping of op de vliering effectiever dan dakisolatie.
 - In sommige gevallen wordt door het aanbrengen van vloer- of bodemisolatie de koudebrugwerking van de constructie vergroot, met een verhoogd risico van vochtproblemen als gevolg. Dit is het met name het geval bij ongeïsoleerde gevels waar de kruipruimtemwand aan de binnenzijde wordt geïsoleerd en het risico is het grootst bij houten vloeren. Het risico kan worden beperkt door gelijk met de vloer- en bodemisolatie ook de gevel te isoleren, bij voorkeur aan de buitenzijde of in de spouw.
 - Bij gelijke warmteweerstand R van de isolatie bespaart vloerisolatie meer dan bodemisolatie als de kruipruimtemwand ongeïsoleerd is, maar ook als de kruipruimtemwand tegelijk met het aanbrengen van de vloer- of bodemisolatie geïsoleerd wordt. Als de kruipruimtemwand al geïsoleerd is, is deze conclusie niet te trekken.

Besparingskentallen vloer- en bodemisolatie

Op basis van dit onderzoek zijn de volgende besparingskentallen voor vloer- en bodemisolatie bepaald conform EN-ISO 13370:

Type isolatie	Warmte- weerstand van de isolatie R [m ² K/W] 1)	Gemiddelde besparing m ³ aeq/m ² vloer tussenwoningen	
		kruipruimtemwand ongeïsoleerd	kruipruimtemwand geïsoleerd tegelijk met aanbrengen vloer/bodemisolatie 2)
vloerisolatie isolatie op of onder tegen de vloerconstructie	1,0	2,0	2,2
	2,0	2,7	2,8
	3,0	3,2	3,3
	4,0	3,6	3,7
bodemisolatie isolatie op de bodem van de kruipruimte	2,5	1,9	2,6
	3,0	2,0	2,7
	3,5	2,2	2,9
	4,0	2,3	3,0
	4,5	2,4	3,1

1) Voor tussenliggende R-waarden mag worden geïnterpoleerd

2) Het isoleren van de kruipruimtemwand aan de binnenzijde kan bij een ongeïsoleerde buitenwand/fundering de koudebrugwerking fundering versterken

Voor hoekwoningen en vrijstaande woningen kan de volgende toeslag op de besparing worden gerekend in m³ aeq/m²:

woningtype	Vloerisolatie	Bodemisolatie
Hoekwoningen of 2-onder-1- kap	+1,0	+0,7
Vrijstaande woningen	+2,0	+1,5

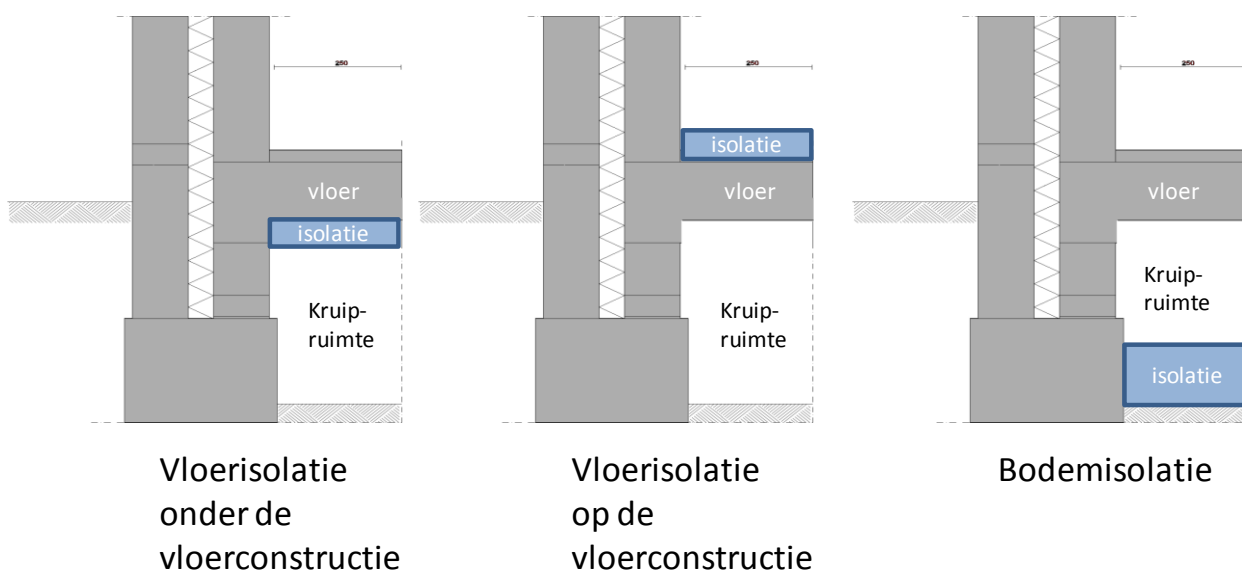
Hierop kunnen onder bepaalde voorwaarden toeslagen in rekening worden gebracht voor het effect van :

- verlaging effect op setpointtemperatuur bij vloerisolatie;
- verdamping bij vochtige kruipruimtes;
- vermindering kruipruimteventilatie.

In hoofdstuk 8 worden aanbevelingen gedaan voor nader onderzoek naar de energiebesparing in praktijkomstandigheden.

1 Inleiding

Er zijn verschillende methoden om het warmteverlies door begane grondvloeren te beperken. Het belangrijkste onderscheid daarbij wordt gemaakt tussen isolatie direct op of tegen de onderzijde van de vloer en isolatie op de bodem van de kruipruimte, zie figuur 1.1.



Figuur 1.1 Principe van vloerisolatie en bodemisolatie

Er is in de bouwwereld geen consensus over de effectiviteit van vloerisolatie in zijn algemeenheid en van bodemisolatie in het bijzonder. Hiervoor zijn een paar oorzaken aan te wijzen:

- Het warmtetransport door het samenstel van vloer, kruipruimte en bodem is complex en er zijn verschillende rekenmethoden om het warmtetransport te bepalen.
- Voor de berekende besparing door vloerisolatie zijn sterk uiteenlopende getallen in omloop, die onderling meer dan een factor 10 verschillen [2], zonder dat duidelijk is waar deze verschillen door zijn veroorzaakt.
- Het is verre van eenvoudig om het besparingseffect van vloerisolatie in de praktijk betrouwbaar te meten. De beperkt beschikbare praktijkmetingen wijzen echter op een hoger besparingseffect van zowel vloer- als bodemisolatie dan het met de tot nu toe gehanteerde rekenmethoden berekende besparingseffect.
- De effecten van vloerisolatie worden thans veelal berekend conform NEN 1068 Thermische isolatie van gebouwen [1], die ook de basis vormt voor de energieprestatienormering NEN 5128. Uit eerder onderzoek is gebleken dat met deze berekeningsmethode het verschil tussen vloerisolatie en bodemisolatie onvoldoende tot zijn recht komt [2].

Op dit moment is een nieuwe norm voor de berekening van de energieprestatie van gebouwen in ontwikkeling, de EPG-norm NEN 7120. In deze norm wordt een nieuwe meer verfijnde

berekening van de vloerverliezen opgenomen, die in een wijziging van NEN 1068 wordt opgenomen. Deze nieuwe berekening is gebaseerd op EN-ISO 13370 [4].

Een ander aspect van de EPG-norm in relatie tot de vloerisolatie is de aan te houden setpointtemperatuur voor ruimteverwarming. In de berekening wordt aangenomen dat er een reboundeffect optreedt bij thermische isolatie doordat de gemiddelde temperatuur in de woning hoger wordt. Voor isolatie van de begane grondvloer treedt echter ook nog een ander effect op, namelijk dat bij vloerisolatie de vloertemperatuur hoger wordt en dat daardoor de setpointtemperatuur significant lager kan zijn om een zelfde comfortniveau te bereiken. Er dient te worden onderzocht hoe groot dit effect is en of het in de EPG-norm geïmplementeerd kan worden.

Dit onderzoek bestaat uit de volgende onderdelen:

- onderzoek naar het berekende effect van diverse vormen van vloer- en bodemisolatie op het warmteverlies en energiegebruik;
In dit deel van het onderzoek zijn verschillende vloer- en bodemisolatiesystemen doorgerekend met de oude en nieuwe rekenmethode en vergeleken met beschikbare meetgegevens (zie hoofdstuk 4 en 6).
Daarnaast is de effectiviteit van vloerisolatie vergeleken met isolatie van daken, omdat daarover een vergelijkbare discussie gevoerd wordt (zie hoofdstuk 7).
Op basis hiervan is een voorstel gemaakt voor de aan te houden besparingskentallen voor verschillende vormen van vloer- en bodemisolatie (zie hoofdstuk 8).
- onderzoek naar het effect van vloer- en bodemisolatie op de comforttemperatuur in de woning en de setpointtemperatuur;
Dit deelonderzoek is er op gericht het effect te kwantificeren waarmee enerzijds het verschil tussen praktijkmetingen en berekeningen deels verklaard kan worden (zie hoofdstuk 6).
Op basis hiervan is een voorstel gedaan voor aanpassing van ontwerp-NEN 7120.

2 Doelstelling en werkwijze

2.1 Doelstellingen

Doel van dit onderzoek is het verkrijgen van inzicht in het effect op het energiegebruik van verschillende vormen van vloerisolatie en bodemisolatie en hoe dit is geïmplementeerd in de verschillende rekenmethoden, waaronder de nieuwe EPG-norm.

De subdoelen zijn:

- Het inzichtelijk maken van de effecten van verschillende vormen van vloerisolatie conform de nieuwe EPG-norm (NEN7120);
- Het vergelijken van de nieuwe EPG-berekening met de oude berekening volgens NEN 1068 en een nauwkeuriger berekening met een 3D-model;
- Het vergelijken van de berekende effecten met eerder uitgevoerde praktijkmetingen;
- Het onderzoeken van het effect van vloerisolatie op de setpointtemperatuur in woningen.
- Het vergelijken van het effect van vloerisolatie met dakisolatie.

2.2 Afbakening van dit onderzoek

Dit onderzoek richt zich vooral op bestaande woningen. De effecten van vloerisolatie bij utiliteitsgebouwen met grote vloerafmetingen worden niet onderzocht.

Er wordt alleen gekeken naar het effect op het energiegebruik voor verwarming.

De effectiviteit van vloerisolatie wordt alleen onderzocht met behulp van rekenmodellen. De uitkomsten worden vergeleken met beschikbare gegevens van eerder uitgevoerde praktijkmetingen.

2.3 Werkwijze

2.3.1 Deelonderzoek 1: Effect diverse vormen van vloerisolatie op het warmteverlies

De verschillende vormen van vloerisolatie worden geïnventariseerd, beschreven en gerubriceerd. Daarbij wordt gekeken naar de volgende aspecten:

- door leveranciers geclaimde energiebesparing
- effect op de vochthuishouding in de kruipruimte
- uitvoerbaarheid bij bestaande bouw en nieuwbouw
- mogelijke risico's op vochtproblemen.

In 2.4 zijn de onderzochte vloerisolatiesystemen beschreven.

De verschillende rekenmethodieken voor warmteverliezen door de begane grond vloer (NEN 1068:2001, EN-ISO 13370 en berekening met een 3D-model (Trisco)) worden kort beschreven met de belangrijkste onderlinge verschillen, zie hoofdstuk 3.

In 2.5 zijn de varianten beschreven waarvoor berekeningen zijn gemaakt. De resultaten van de berekeningen zijn beschreven in hoofdstuk 4.

2.3.2 Deelonderzoek 2: Effect van vloerisolatie op de setpointtemperatuur

Aan de hand van een model van een woonkamer op de begane grond van een woning wordt het effect van de vloertemperatuur op de optimale luchttemperatuur berekend. De optimale comforttemperatuur wordt bepaald conform het Fanger-model.

Aan de hand van deze berekeningen wordt een relatie gelegd tussen de warmtedoorlatendheid van de begane grondvloer en de setpointtemperatuur in de woonkamer.

De resultaten van dit onderzoek kunnen worden gebruikt om de bepaling van de setpointtemperatuur in Ontwerp NEN 7120 aan te passen. Er wordt een voorstel geformuleerd voor aanpassing van Ontwerp NEN 7120, dat bij de rapporteurs wordt ingebracht.

2.4 Te onderzoeken vloerisolatiesystemen

Hieronder worden de onderzochte vloerisolatiesystemen beschreven.

Deze zijn in drie hoofdgroepen verdeeld:

- I. Isolatie tegen de onderzijde van de bestaande vloerconstructie*
- II. Isolatie op de bestaande vloerconstructie*
- III. Isolatie op de bodem van de kruipruimte*

De te bereiken besparing is hoofdzakelijk afhankelijk van het isolatieprincipe (I, II of III) in combinatie met de gerealiseerde R-waarde. Binnen de hoofdgroepen zijn enkele in de praktijk gebruikte subvarianten onderscheiden die voornamelijk relevant zijn voor beoordeling van mogelijke risico's en secundaire effecten zoals vochthuishouding en luchttransport.

In tabel 2.1 zijn enkele technische gegevens van deze systemen op een rij gezet. In de figuren 2.1 t/m 2.3 zijn de subvarianten geïllustreerd.

Tabel 2.1 Overzicht vloerisolatiesystemen met enkele eigenschappen

Isolatiesysteem	isolatiemateriaal	isolatie dikte	R-waarde [m ² K/W]	gewicht [kg/m ²]
<i>I. Isolatie tegen de onderzijde van de bestaande vloerconstructie</i>				
- I.a vloerisolatie onder de vloer met thermokussens	HR-folie	15 - 30 cm	2,7 / 3,8	<<1
- I.b vloerisolatie onder de vloer met gespoten PUR	PUR	5 tot 10 cm	1,5 tot 2,5	ca. 1
- I.c vloerisolatie onder de vloer met plaatmateriaal	EPS/XPS/min. wol	ca. 10 cm	2,5 tot 3,5	ca. 2
<i>II. Isolatie op de bestaande vloerconstructie</i>				
- II.a droog systeem, combinatiesysteem met vloerplaat en isolatie	EPS/XPS/min. wol	2 tot 5 cm	0,5 tot 1,5	20 tot 30
- II.b nat systeem met isolatieplaat en ter plaatse vervaardigde dek	EPS/XPS/PIR	5 tot 10 cm	1,5 tot 3	50 tot 100
<i>III. Isolatie op de bodem van de kruipruimte</i>				
- III.a bodemisolatie met zeeschelpen	natuurschelp	ca. 35 cm	ca. 3	ca. 150
- III.b bodemisolatie met EPS-chips	EPS	ca. 30 cm	ca. 4	ca. 5
- III.c bodemisolatie met los gestorte EPS-parels	EPS	ca. 15 cm	ca. 3	ca. 3
- III.d bodem-hygrolatie (EPS-parels in PE-folie)	EPS	ca. 10 cm	ca. 2	ca. 2

De genoemde R-waarde is een rekenwaarde die volgt uit NEN 1068 of uit gelijkwaardigheidsverklaringen.

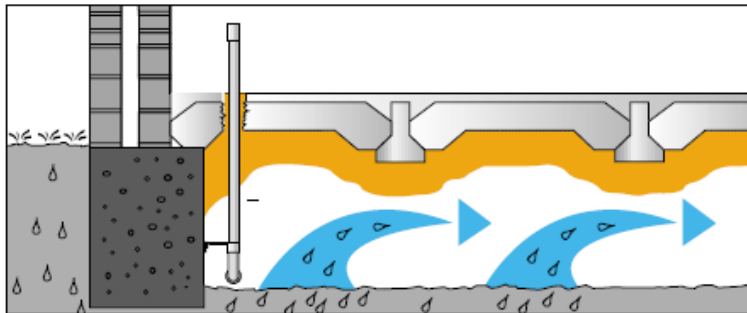
Bij montage van vloerisolatie tussen de vloerbalken kan de gemiddelde R-waarde iets lager zijn. Dit effect is hier verder niet meegenomen omdat het effect klein is en in de praktijk de afstand en dikte van balken varieert.

Tegelijk met vloer- of bodemisolatie kan ook de funderingsmuur geïsoleerd worden.

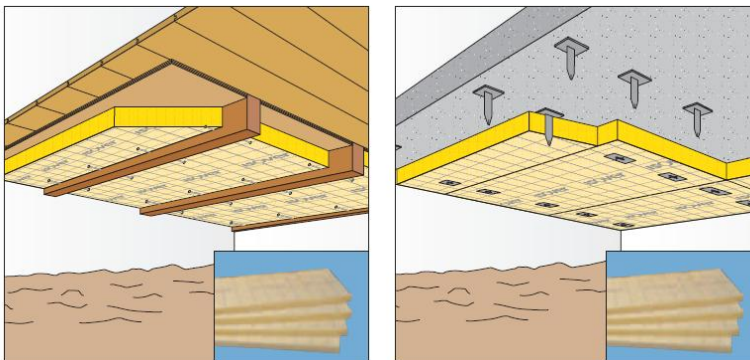
Bij vloerisolatie met gespoten PUR (I.b) en bodem-hygrolatie (III.d) wordt doorgaans de wand van de kruipruimte tegelijk meegeïsoleerd. Zie tabel 2.2. en figuur 2.6 voor de aanvullende isolatieopties.

Groep I. isolatie tegen onderzijde bestaande vloerconstructie


Systeem I.a Thermokussens (bron Tonzon)



Systeem I.b Gespoten PUR isolatie (bron Technisol)



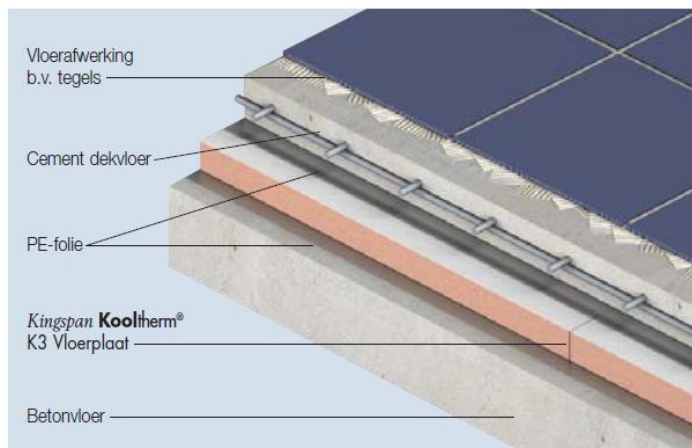
Systeem I.c Isolatieplaten tegen onderzijde vloer (bron Isover)

Figuur 2.1 Systemen voor vloerisolatie tegen de onderzijde van de vloer

Groep II Isolatie op de bestaande vloerconstructie



Systeem II.a Geïsoleerde afwerkvloer, droog systeem (bron Fermacell)



Systeem II.b Isolatieplaat op vloerconstructie met dekvloer (bron Kingspan)

Figuur 2.2 Systemen voor vloerisolatie op de vloer

Groep III isolatie op de bodem van de kruipruimte

Systeem III.a Bodemisolatie met zeeschelpen (bron Isoschelp)



Systeem III.b/c Bodemisolatie met polystyreen schelpen of parels (bron DroCom)

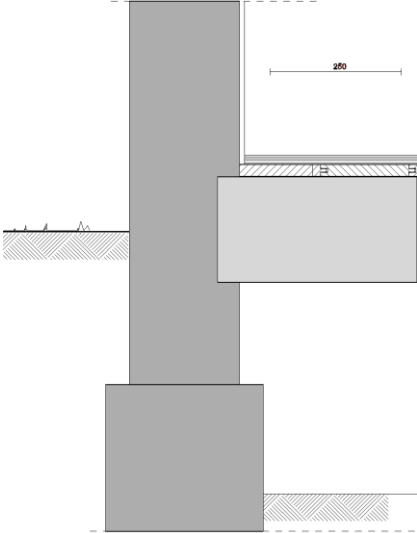
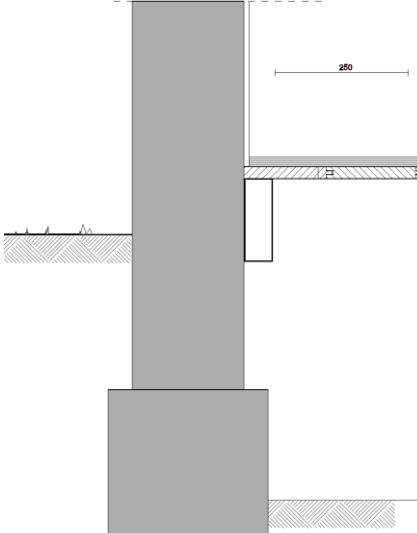
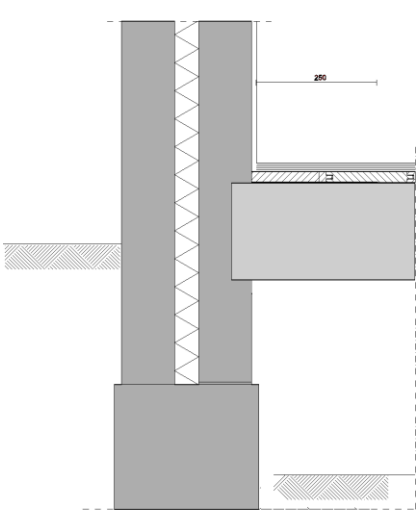
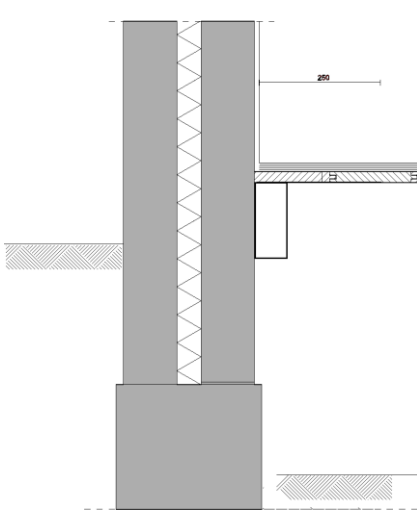


Systeem III.d Bodemhygrolatie (bron Termokomfort)

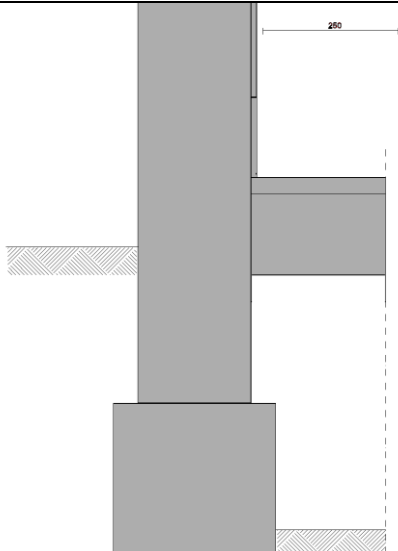
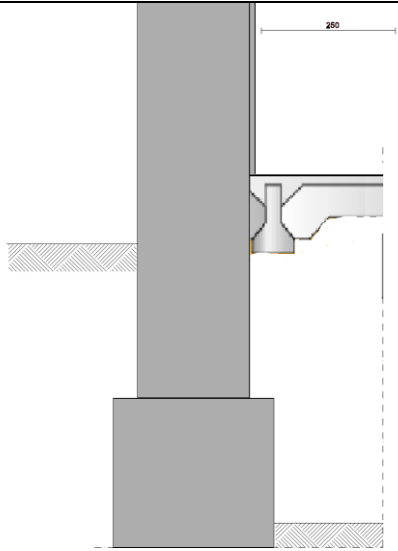
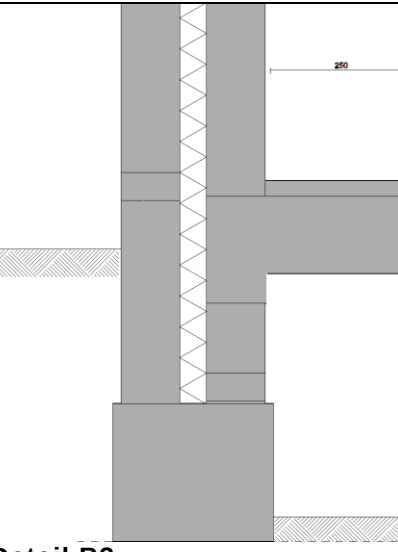
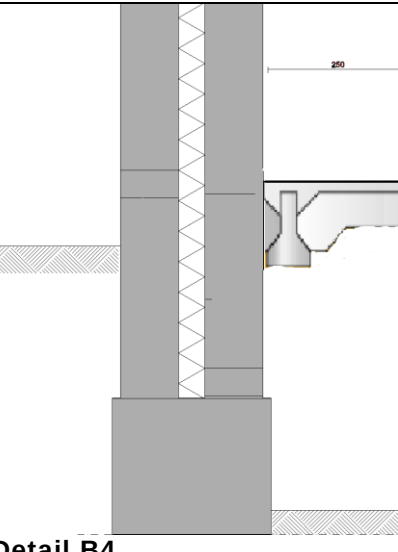
Figuur 2.3 Systemen voor bodemisolatie

2.5 Te berekenen varianten

Voor de bij bestaande woningen meest voorkomende houten en betonnen vloeren is elk een viertal referentiedetails genomen, zie figuur 2.4 en 2.5. De varianten met een ongeïsoleerde muur (H1/H2/B1/B2) zijn ook representatief voor een situatie met een ongeïsoleerde spouwmuur.

Basisdetails houten vloerconstructie	Vloerbalk opgelegd in wand	Vloerbalk evenwijdig aan wand
Steens muur	 Detail H1	 Detail H2
Spouwmuur	 Detail H3	 Detail H4

Figuur 2.4 Basisdetails houten vloerconstructie

Basisdetails betonnen vloerconstructie	Vlakke plaatvloer	Combinatievloer
Steens muur	 Detail B1	 Detail B2
Spouwmuur	 Detail B3	 Detail B4

Figuur 2.5 Basisdetails betonnen vloerconstructie

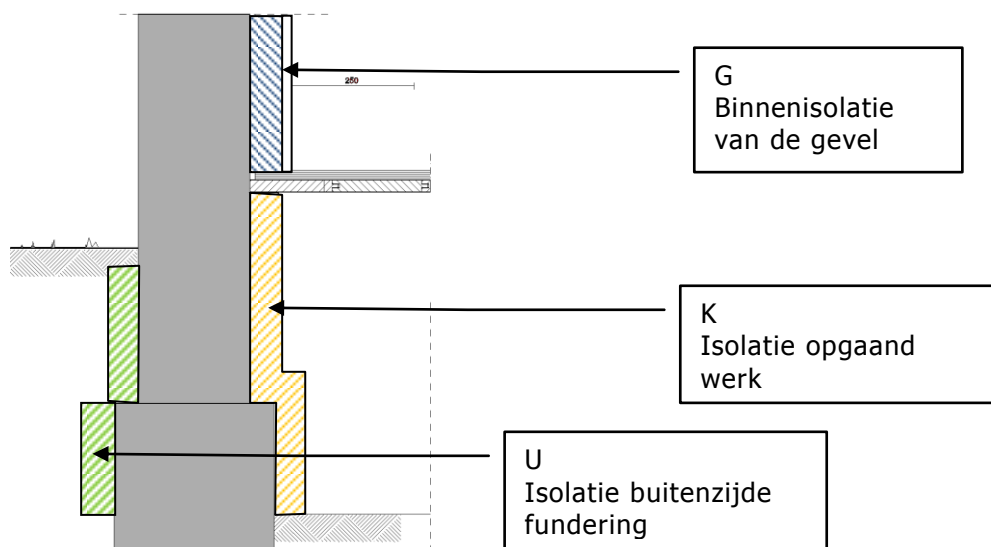
In tabel 2.2 is aangegeven welke combinaties van isolatiesystemen en constructiedetails worden doorgerekend. De extra isolatieopties zijn weergegeven in figuur 2.6.

Bij elk van deze varianten wordt de hoeveelheid kruipruimteventilatie gevarieerd door de kruipruimteventilatieopeningen aan te nemen op 100, 400 en 1000 mm² per m² vloeroppervlakte.

Tabel 2.2 Berekende combinaties van constructies en isolatiesystemen

detail systeem	H1	H2	H3	H4	B1	B2	B3	B4
	Zie figuur 2.4				Zie figuur 2.5			
Ia	B	BG	B	B	BG	BG	B	B
Ib	BK	BKG	BK	BK	BKG	BKG	BK	BK
Ic	B	BG	B	B	BG	-	B	-
IIa	BG		B		BG		B	
IIb	-				BG		B	
IIIa/b/c	BU		BU		BUG		BU	
IIId	BK		BK		BKG		BK	

B Basisvariant vloer/bodemisolatie zonder aanvullende isolatie
 G Binnenisolatie gevel $R_c = 2,5 \text{ m}^2\text{K/W}$
 K Isolatie opgaand werk kruipruimte $R_c = 1,5 \text{ m}^2\text{K/W}$
 U Isolatie buitenzijde fundering $R_c = 1,5 \text{ m}^2\text{K/W}$



Figuur 2.6. Extra isolatieopties bij variantberekeningen

Overige uitgangspunten bij de berekeningen:

- Buitentemperatuur voor gemiddeld jaar conform NEN 5128/NEN 7120
- Gemiddelde binnentemperatuur begane grond in stookseizoen $19 \text{ }^\circ\text{C}$, zie 3.2.1
- Berekening warmteverlies van oktober t/m april, zie 3.2.6
- Warmteopwekking met HR107 ketel
- Breedte * diepte van de tussenwoning 5×9 meter
- Gemiddelde kruipruimteventilatie $400 \text{ mm}^2/\text{m}^2$

3 Berekening van de energiebesparing door vloer- en bodemisolatie

3.1 Warmtetransport door de begane grondvloer

Het warmtetransport door een buitenwand van een verwarmde ruimte is vrij nauwkeurig te benaderen met een eenvoudige transmissieberekening. Op basis daarvan kan de energiebesparing bij toename van de isolatie goed worden ingeschat, zie 3.3.1.

Voor een begane grondvloer ligt het gecompliceerder omdat de vloer al dan niet via een kruipruimte grenst aan het grondpakket dat op een diepte circa 10 meter een temperatuur heeft die gelijk is aan de gemiddelde jaartemperatuur (circa 10 °C). Aan de rand van de vloer is een zone die min of meer direct in contact staat met de buitentemperatuur. Daarnaast wordt de kruipruimte ook nog in meer of mindere mate geventileerd met buitenlucht. Het warmteverlies door een begane grondvloer boven een kruipruimte is daardoor afhankelijk van:

- De afmetingen van de vloer
- Het vloerisolatiesysteem:
 - o De plaats van de isolatie (op of onder tegen de vloer of op de bodem van de kruipruimte)
 - o Hoeveelheid isolatie
 - o Soort isolatie
 - o Detaillering van de aansluiting op de fundering
- De ligging van het maaiveld ten opzichte van de begane grondvloer en de bodem van de kruipruimte
- De mate van kruipruimteventilatie
- De verdamping van vocht in de kruipruimte
- De thermische traagheid van het grondpakket
- De temperatuur in de woning
- De aanwezigheid van verwarmingsleiding in de kruipruimte
- De aanwezigheid van vloerverwarming.

In de volgende paragraaf wordt nader ingegaan op een aantal van deze invloedsfactoren.

Beschikbare rekenmethoden

De hierboven omschreven complexiteit van het warmtetransport door de begane grondvloer maakt dat het niet mogelijk is om bij begane grondvloeren eenvoudig een kengetal voor de gasbesparing bij isolatie af te leiden. In 3.3.2 en 3.3.4 zijn twee benaderingen beschreven die echter beide hun specifieke tekortkomingen hebben.

Als een meer geavanceerde genormeerde rekenmethode wordt tot op heden in Nederland NEN 1068:2001 gebruikt, zie 3.3.3. In internationaal verband is gewerkt aan een nieuwe norm EN-ISO 13370, gebaseerd op het toonaangevende onderzoek van Hagentoft [6]. Deze methode die binnenkort zal worden geïmplementeerd in de nieuwe NEN 1068, is beschreven in 3.3.5. Daarnaast is door TNO een rekenmodel ontwikkeld dat is vastgelegd in SBR Richtlijn 4 [10]. Dit is het enige beschikbare rekenmodel dat het effect van verdamping in de kruipruimte meeneemt, zie 3.2.5 en 3.3.6.

3.2 Invloedsfactoren

3.2.1 Gemiddelde temperatuur in de woning

Bij de epc-berekening volgens NEN 5128 en de standaard EPA-W berekening wordt een gemiddelde binnentemperatuur van 18 °C voor woningen aangehouden. Dit komt overeen met het standaardpatroon voor de temperatuurinstelling zijnde 19° overdag, 20° 's avonds en 16° 's nachts [13].

Uit een analyse van de KWR-gegevens [14] volgt een gemiddelde binnentemperatuur voor de gehele woningvoorraad van 16,5 °C. Dit is de seizoensgemiddelde binnentemperatuur over alle ruimtes in de woning. In veel woningen en vooral bij minder goed geïsoleerde woningen is de gemiddelde temperatuur in de slaapvertrekken lager dan in de woonkamer. De gemiddelde temperatuur in de woonkamer kan enkele graden boven de gemiddelde temperatuur in de woning liggen. In dit onderzoek wordt uitgegaan van een gemiddelde temperatuur in de woonkamer op de begane grond van 19 °C.

3.2.2 Comforttemperatuur in woonkamer

Als de begane grondvloer wordt geïsoleerd zal de gemiddelde vloertemperatuur stijgen waardoor het thermisch comfort verbetert. Bij ongeïsoleerde vloeren zal vaak een hogere setpointtemperatuur ingesteld worden op de thermostaat. In hoofdstuk 5 is dit verder uitgewerkt.

Als in woningen met ongeïsoleerde vloeren de thermostaat gemiddeld 1 graad hoger wordt ingesteld dan bij woningen met geïsoleerde vloeren dan leidt dit tot een verhoging van het totale energieverbruik voor verwarming met 3 tot 6%. Vloerisolatie kan hierdoor een extra besparing opleveren van circa 1 m³ aeq/m² vloeroppervlakte.

Zie verder hoofdstuk 5.

3.2.3 CV leidingen in de kruipruimte

Als er in de kruipruimte CV leidingen aanwezig zijn is dat uiteraard van invloed op het effect van vloer- en bodemisolatie.

Als er *ongeïsoleerde* leidingen in een kruipruimte aanwezig zijn dienen deze als het enigszins mogelijk is altijd te worden geïsoleerd voordat vloer- of bodemisolatie wordt aangebracht.

De aanwezigheid van *geïsoleerde* CV-leidingen vermindert de te bereiken besparing bij vloerisolatie met circa 10% en verhoogt de besparing bij bodemisolatie met circa 20% [11].

In dit onderzoek wordt het effect van CV-leidingen verder buiten beschouwing gelaten.

3.2.4 Vloerverwarming

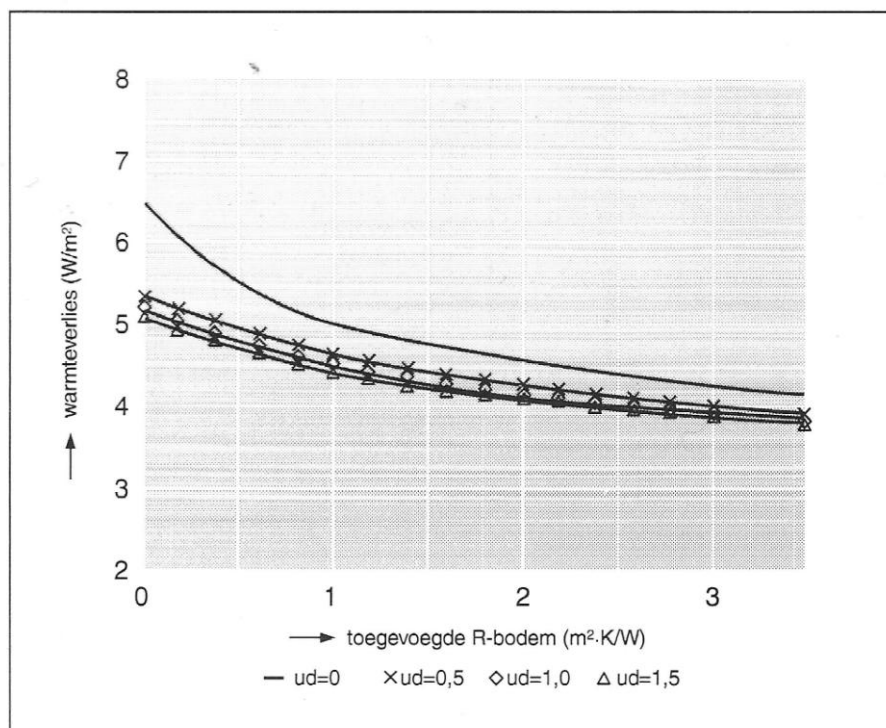
Bij vloerverwarming neemt het warmteverlies door de begane grondvloer toe vanwege de hogere vloertemperatuur. Daar staat tegenover dat bij vloerverwarming het effect van verlaging van de setpointtemperatuur ook bij ongeïsoleerde vloeren optreedt. In hoofdstuk 5 wordt verder ingegaan op het effect van verlaging van de setpointtemperatuur.

De te bereiken besparing bij vloer- en bodemisolatie is bij aanwezigheid van vloerverwarming circa 20% hoger [11].

3.2.5 Verdamping in de kruipruimte

Als water verdampt is daarvoor verdampingsenergie nodig. Door verdamping van vocht in de kruipruimte in combinatie met ventilatie van de kruipruimte wordt dus warmte aan de kruipruimte onttrokken. Dit is van invloed op de kruipruimtetemperatuur en het warmteverlies naar de kruipruimte.

In SBR 4[10] is dit effect onderzocht voor bodemisolatie in combinatie met een dampremmende laag op de bodem, zie figuur 3.1



Figuur 3.1 Warmteverlies via de begane grondvloer als functie van de toegevoegde R-waarde aan de bodem in combinatie met de μd -waarde van de bodembedekking. Bron SBR 4 [10]

Hieruit blijkt dat door de verdamping het warmteverlies bij een ongeïsoleerde vloer 20 tot 25% hoger is dan wanneer de verdamping niet wordt meegerekend. Bij een geïsoleerde vloer is het effect van verdamping zowel absoluut als relatief een stuk kleiner (circa 10 %). Dat laatste is de reden dat bij alle gebruikelijke rekenmodellen voor het warmteverlies de verdamping buiten beschouwing wordt gelaten.

Verdamping heeft dus vooral bij goed geventileerde vochtige kruipruimtes een niet te verwaarlozen effect op de te bereiken energiebesparing. Dit effect vormt een mogelijke verklaring voor de discrepantie tussen berekeningen en praktijkmetingen (zie hoofdstuk 6).

3.2.6 Zon en interne warmte

De verwarmingsbehoefte volgt uit de balans tussen warmteverliezen en warmtebronnen, zoals interne warmte door personen en binnenkomende zonnewarmte.

Met name in de tussenseizoenen is de zontoetreding sterk bepalend voor de verwarmingsbehoefte. Een verbetering van de thermische isolatie leidt dan tot een afname van de benutting van binnenkomende zonnewarmte. Per saldo is het effect van thermische isolatie in de tussenseizoenen dus gering bij ruime aanwezigheid van zon en interne warmte.

Alleen met een dynamische balansberekening van de begane grond van een woning kunnen deze effecten nauwkeurig in rekening worden gebracht.

Voor een gemiddelde woning kan dit effect worden verdisconteerd door bij het bepalen van de energiebesparing door vloer- en bodemisolatie alleen het warmteverlies in de maanden oktober t/m april te beschouwen. Bij woningen met weinig zontoetreding geeft deze benadering een onderschatting van de te bereiken besparing.

3.3 Beschikbare modellen voor berekening energiebesparing

3.3.1 Besparingskentallen uitwendige scheidingsconstructies

Een uitwendige scheidingsconstructie van een verwarmde ruimte die rechtstreeks aan de buitenlucht grenst, heeft een jaarlijks warmteverlies per m² van:

$$Q = U \cdot \Sigma(\Delta T \cdot t) \approx U \cdot 238 \quad (1)$$

waarbij:

Q	is het warmtetransport door transmissie in het stookseizoen in MJ/m ²
U	is de warmtedoorgangcoëfficiënt van de constructie in W/(m ² K)
$\Sigma(\Delta T \cdot t)$	is het in de tijd geaccumuleerde temperatuurverschil binnen-buiten in K.Ms, waarvoor bij woningen een gemiddelde waarde van 238 K.Ms wordt aangehouden [bron NEN 5128:2001], uitgaande van een gemiddelde binnentemperatuur van 18 °C en een gemiddelde buitentemperatuur van 5 °C.

Rekening houdend met een rendement van 90% op bovenwaarde is de te bereiken gasbesparing bij een vermindering van de U-waarde:

$$B = \Delta U \cdot 238 / (0,9 \cdot 35,2) = 7,5 \cdot \Delta U \quad (2)$$

Waarbij:

B	is de jaarlijkse gasbesparing in m ³ aeq/m ²
ΔU	is de vermindering van de warmtedoorgangscoefficient in W/m ² K
0,9	praktijkrendement op bovenwaarde van de gasketel
35,2	energie-inhoud aardgas op bovenwaarde in MJ/m ³

3.3.2 Model EPA-W

De volgende eenvoudige benadering voor de U-waarde van vloeren U_{vloer} werd vroeger gebruikt in NEN 1068:1991 en NEN 5128:1994 en wordt nog steeds toegepast in de huidige EPA-W berekening [16]. Hierbij wordt de U-waarde van de vloer vermenigvuldigd met een weegfactor voor de kruipruimtetemperatuur, die weer afhankelijk is van de U-waarde van de vloer.

$$U_{vloer} = a \cdot U_c \quad (3)$$

waarbij:

a = weegfactor voor kruipruimtetemperatuur = $1/(U_c + 1)$

$U_c = 1/(R_c + 0,26)$

R_c = de warmteweerstand van de vloerconstructie

Uitgaande van deze benadering heeft een ongeïsoleerde vloer ($R_c = 0,1$) een $U_{vloer} = 0,73$ W/m²K. Bij toevoeging van isolatie met $R = 2,5$ m²K/W wordt $U_{vloer} = 0,26$ W/m²K.

De vermindering van de U waarde is dus $\Delta U = 0,73 - 0,26 = 0,47$ W/m²K en daaruit volgt met formule (2) een energiebesparing van 3,5 m³ aeq/m².

Dit komt overeen met het besparingskental dat Milieu Centraal voor vloerisolatie aanhoudt, te weten 190 m³ aeq bij een vloeroppervlakte van 50 m².

Dit model houdt geen rekening met vloerafmeting, kruipruimteventilatie en maakt bovendien geen onderscheid tussen vloerisolatie en bodemisolatie.

3.3.3 Model NEN1068:2001

De stationaire warmteverliescoëfficiënt via de grond (L_S) voor een vloer boven een kruipruimte of direct op de ondergrond (vloer op staal) wordt in NEN 1068 bepaald met de volgende formule:

$$L_S = a \left(A_{T,rand} \cdot U_{vl+gr;rand} + A_{T,midden} \cdot U_{vl+gr;midden} + \sum_i P_i \cdot \psi_{gr;i} \right) + \sum_i P_i (\psi_{e;i} + 180\epsilon) \quad (4)$$

Waarbij:

L_S is de warmteverliescoëfficiënt via de grond, in W/K;

- a is een weegfactor, voor woningen en woongebouwen te stellen op 0,6 gedurende het stookseizoen ¹⁾ en op 2,0 gedurende een zomermaand (koeling) ²⁾. Voor utiliteitsgebouwen wordt de waarde van a gegeven in 6.4.2 van NEN 2916;
- $A_{T;rand}$ is de (binnenwerkse) oppervlakte van de 5 m brede randzone van de vloer, in m²;
- $U_{vl+gr;rand}$ is de warmtedoorgangscoefficiënt van het samenstel van de in de randzone gelegen vloerconstructie, (eventuele) kruipruimte (exclusief ventilatieverlies) en de ondergrond tot een diepte D_{gr} (= 10 m), in W/(m² × K);
- $A_{T;midden}$ is de oppervlakte van het gedeelte van de vloer, dat grenst aan de binnenzijde van de randzone van de vloer, in m²;
- $U_{vl+gr;midden}$ is de warmtedoorgangscoefficiënt van het samenstel van de niet in de randzone gelegen vloerconstructie, (eventuele) kruipruimte (exclusief ventilatieverlies) en de ondergrond tot een diepte D_{gr} (= 10 m), in W/(m² × K);
- P_i is deel i van de (binnenwerkse) omtrek van de vloer waarover de doorsnede van het rekenmodel constant blijft en voor zover hij grenst aan een buitenwand, in m;
- $\psi_{gr;i}$ is de lineaire warmtedoorgangscoefficiënt naar de grond van deel i van het rekenmodel, in W/(m × K);
- $\psi_{e;i}$ is de lineaire warmtedoorgangscoefficiënt naar de buitenlucht van deel i van het rekenmodel, in W/(m × K);
- ε is de oppervlakte van de ventilatieopeningen per meter omtrek lengte van de kruipruimte, in m²/m; indien de werkelijke oppervlakte niet bekend is geldt $\varepsilon = 0,0012$ m²/m.

Met deze methode wordt per maand de stationaire verliescoëfficiënt berekend.

Het warmteverlies door de vloer wordt gekarakteriseerd door een U-waarde voor de randzone en een U-waarde voor de middenzone. Deze U-waarden kunnen eenvoudig worden berekend uit de warmteweerstand van de vloerconstructie inclusief het grondpakket tot 10 meter diepte.

$$U_{vl+gr} = \frac{1}{R_{c;vl} + (D_{gr} - h_{kr}) / \lambda_{gr} + h_{kr} / \lambda_{eq} + R_{si}} \quad (5)$$

waarin:

U_{vl+gr} is de warmtedoorgangscoefficiënt van het samenstel van vloerconstructie, kruipruimte en ondergrond, in W/(m² · K);

$R_{c;vl}$ is de warmteweerstand van de (vrijdragende) vloer, berekend volgens 7.1.1 c.q. 7.2.4, in W/(m² · K);

D_{gr} is de in rekening te brengen diepte onder het maaiveld van het grondlichaam, te stellen op $D_{gr} = 10$ m;

h_{kr} is de hoogte van de kruipruimte, in m;

λ_{gr} is de warmtegeleidingscoëfficiënt van de grond, te stellen op 2,0 W/(m · K);

¹⁾ gebaseerd op $\theta_i = 18$ °C (gemiddelde binnentemperatuur over het stookseizoen), $\theta_e = 5$ °C (gemiddelde buitentemperatuur over het stookseizoen) en $\theta_{gr;10} = 10$ °C (grondtemperatuur op 10 m diepte, ongeveer corresponderend met de jaargemiddelde waarde van de buitentemperatuur).

²⁾ gebaseerd op $\theta_i = 24$ °C, $\theta_e = 18$ °C en $\theta_{gr;10} = 10$ °C.

Het effect van de randaansluiting wordt verdisconteerd met twee lineaire doorgangscoefficienten ψ_{gr} en ψ_e , respectievelijk voor het lineaire warmteverlies naar de grond en naar de buitenlucht. Doorgaans is ψ_{gr} negatief en ψ_e positief.

De U-waarde wordt in NEN 1068 zeer eenvoudig eendimensionaal berekend, waarbij bijvoorbeeld het effect van de grootte van het vloerveld niet wordt meegerekend. De afwijking die hierdoor ontstaat, wordt gedeeltelijk verdisconteerd in de berekende ψ_{gr} en ψ_e . De fysische en praktische betekenis van ψ_e en ψ_{gr} is daarom niet eenvoudig te zien.

Naarmate er een grotere koudebrug in de aansluiting aanwezig is wordt ψ_e groter. Een ontwerper kan door isoleren van de koudebruggen de ψ_e omlaag brengen. Een dergelijk verband is bij ψ_{gr} niet aanwezig en een ontwerper kan er dus niet op sturen.

In NEN 1068:2001 is de volgende opmerking over het onderscheid tussen vloer- en bodemisolatie opgenomen:

OPMERKING De waarde $180 \text{ W}/(\text{m}^2 \times \text{K})$ is afgeleid door een forfaitaire waarde van 0,6 aan te houden voor de temperatuurverhouding in de kruipruimte. Deze waarde lijkt een redelijk veilige aanname te zijn voor het geval dat de isolatielaag deel uitmaakt van de vrijdragende vloerconstructie. Is de isolatie echter in hoofdzaak op de bodem van de kruipruimte aangebracht dan levert die waarde waarschijnlijk een duidelijke onderschatting op van het warmteverlies door ventilatie. In dat geval zou de waarde $180 \text{ W}/(\text{m}^2 \times \text{K})$ moeten worden vervangen door $300(2\theta_{bk} + 2\theta_{ok} - \theta_e)/(\theta_i - \theta_e)$,

Deze opmerking maakt geen onderdeel uit van de genormeerde berekening en is daarom ook niet geïmplementeerd in de EPN-berekening NEN 5128.

3.3.4 Model EPN (forfaitaire methode NPR5129)

Het EPN-programma NPR5129 berekent het warmteverlies door de vloer met een vereenvoudigde methode conform NPR2068, welke is afgeleid van NEN 1068:2001.

De warmtedoorgang door de vloer wordt berekend met:

$$L_s = a(A \cdot U_{vl+gr} + P \cdot \psi_{gr}) + P(\psi_e + 180\epsilon) \quad (6)$$

Dit is een iets vereenvoudigde versie van formule (4) conform NEN 1068, met verder dezelfde parameters als beschreven in 3.3.3.

De U-waarde van de vloer wordt ook hier bepaald door de warmteweerstand van een grondpakket van 10 meter dikte mee te rekenen volgens formule (5).

Bij de forfaitaire rekenmethode volgens NPR2068 worden ψ_{gr} en ψ_e vastgehouden een forfaitaire waarde van -0,1 resp 0,9. Het effect van vloerisolatie komt dan in de berekening alleen tot uitdrukking in U_{vl+gr} .

Zonder vloerisolatie is U_{vl+gr} circa 0,2, met een R_c van 2,5 wordt dit circa 0,13. Met de factor a van 0,6 levert dit een rekentechnische besparing op van:

$$B = a \cdot \Delta U \cdot 7,5 = 0,6 \cdot 0,07 \cdot 7,5 = 0,3 \text{ m}^3 \text{ aeq} / \text{m}^2.$$

De aldus berekende besparing is dus ruim een factor 10 lager dan de besparing volgens model EPA-W. De oorzaak hiervoor is dat de forfaitaire methode volgens NPR 5129/NPR2068 niet geschikt is voor ongeïsoleerde vloeren. Bij ongeïsoleerde vloeren wijken de forfaitaire waarden voor ψ_{gr} en ψ_e te veel af van de werkelijk waarden.

3.3.5 NEN-EN-ISO 13370

Door Hagentoft [6] is uitgebreid onderzoek gedaan naar warmteverlies via de begane grondvloer. Op basis van zijn onderzoek is er een semi-analytisch model voor het warmteverlies ontwikkeld, dat is geïmplementeerd in NEN-EN-ISO 13370.

Het gaat in het kader van dit rapport te ver om dit model in detail te beschrijven. Lichtveld [9] heeft het model beschreven in een artikel in Bouwfysica. Dit artikel is integraal opgenomen in bijlage 1.

In informatieblad P94 "Information paper for the series of EN ISO standards on thermal transmission properties of building components and building envelope" zijn de nieuwe En ISO normen voor thermische eigenschappen op een rij gezet. Daarin wordt bijzondere aandacht besteed aan de nieuwe berekeningmethode volgens EN ISO 13370. De nieuwe elementen van deze rekenmethode zijn in P94 op een rij gezet, zie figuur B1.1 in bijlage 1.

De belangrijkste elementen zijn:

- Een verfijnde methode voor de berekening van de U-waarde gebaseerd op een analytische berekening van het tweedimensionale stromingsveld in de bodem. Hierdoor wordt het effect van de afmeting van het vloerveld in de U-waarde verdisconteerd.
- Een methode om de traagheid van het grondpakket in rekening te brengen, waardoor de jaarlijkse fluctuatie in de bodemtemperatuur in rekening wordt gebracht.

Het effect van de randaansluiting wordt verdisconteerd in een lineaire doorgangscoefficiënt ψ_g bepaald volgens ISO 10211.

Net als bij NEN 1068 is ψ_g voor een deel een sluitpost in de berekening waar het verschil wordt verdisconteerd tussen de numerieke 2D-berekening en de analytische berekening van de U-waarde. Afhankelijk van de situatie kan ψ_g positief of negatief worden en hangt sterk af van de mate van isolatie van de vloer

3.3.6 SBR 4 model

Door TNO is mede op basis van praktijkmetingen een rekenmodel voor het warmteverlies in kruipruimten ontwikkeld. Dit model is vastgelegd in SBR Richtlijn 4 [10].

Dit model brengt de meeste relevante effecten in rekening, waaronder ook het effect van verdamping in de kruipruimte. De lineaire warmtedoorgang bij de aansluiting van vloer en wand/fundering wordt bij dit model niet in rekening gebracht.

Het model is toegespitst op woningen met kruipruimte in de Nederlandse situatie. Het model is niet of minder geschikt voor woningen zonder kruipruimte en gebouwen met grote vloervelden.

3.3.7 Gedetailleerde numerieke berekening (Trisco)

Het programma TRISCO van Physibel is een numeriek rekenmodel waarmee het warmtetransport in een constructie driedimensionaal wordt berekend. De berekening is gebaseerd op de eindige differentiemethode.

Het programma rekent met warmtegeleiding door materialen en met convectieve en stralingsoverdracht aan oppervlakken (d.m.v. de RADCON-module).

Trisco wordt in dit onderzoek op twee manieren ingezet:

- Voor de bepaling van de lineaire warmtedoorgangscoefficienten ψ conform NEN 1068 en EN-ISO 13370/10211
- Voor het gedetailleerd onderzoeken van effecten die niet in de normberekeningen zitten:
 - De exacte vorm van de vloer
 - Effect van kruipruimteventilatie op de ψ –waarden
 - De stralingsoverdracht in de kruipruimte
 - Het verloop van de oppervlaktetemperatuur van de begane grondvloer

Het Trisco-model is stationair en kan dus niet de bufferwerking van het grondpakket in rekening brengen.

Het Trisco-model is vooral geschikt om te onderzoeken hoe nauwkeurig de term L_s door de verschillende modellen wordt benaderd. Voor de omrekening naar een maandelijks of jaarlijks warmteverlies wordt de methode volgens NEN 1068 of EN-ISO 13370 gebruikt.

3.4 Vergelijking van benaderingsmodellen

In tabel 3.1 zijn de bovengenoemde reken- en benaderingsmodellen voor het warmteverlies door de begane grondvloer vergeleken.

Daaruit kan worden geconcludeerd dat het model EN-ISO13370 de meest relevante aspecten die bepalend zijn voor het warmteverlies door de begane grondvloer in zich heeft. Alleen de invloed van verdamping in de kruipruimte wordt niet in rekening gebracht. Het SBR-4-model brengt als enige verdamping wel in rekening, maar is minder geschikt als algemeen toepasbare genormeerde rekenmethode voor woningen en utiliteitsgebouwen.

Het model NEN 1068 schiet in vergelijking met EN-ISO 13370 met name te kort in het maken van het onderscheid tussen vloer- en bodemisolatie en het in rekening brengen van kruipruimteventilatie.

Tabel 3.1 Vergelijking rekenmodellen voor warmtetransport via de begane grondvloer

	EPA-W	NEN5128 forfaitair	NEN1068 2001	EN-ISO 13370	SBR -4	Numeriek model Trisco
Vorm en afmeting vloer	n	j/n	j	j	j/n	j
Aansluiting vloer/fundering	n	n	j	j	n	j
Ligging vloer t.o.v. maaiveld en kruipruimtebodan	n	n	j	j	j	j
Kruipruimteventilatie	n	n	j/n	j	j	j
Verdamping	n	n	n	n	j	n
Plaats van de isolatie ¹⁾	n	n	n ¹⁾	j	j	j
Thermische traagheid bodan	n	n	n	j	j	n
Warmteverlies per maand	n	j/n	j	j	j	n
Temperatuurverloop in bodan en constructie / lokale temperatuurverschillen	n	n	n	n	n	j
Praktisch bruikbaar voor bepaling energiebesparing	j	n	j/n	j	j	n

j = wordt in rekening gebracht / goed mogelijk

j/n = wordt deels in rekening gebracht / is gedeeltelijk of onder voorwaarden mogelijk

n = wordt niet in rekening gebracht / niet mogelijk

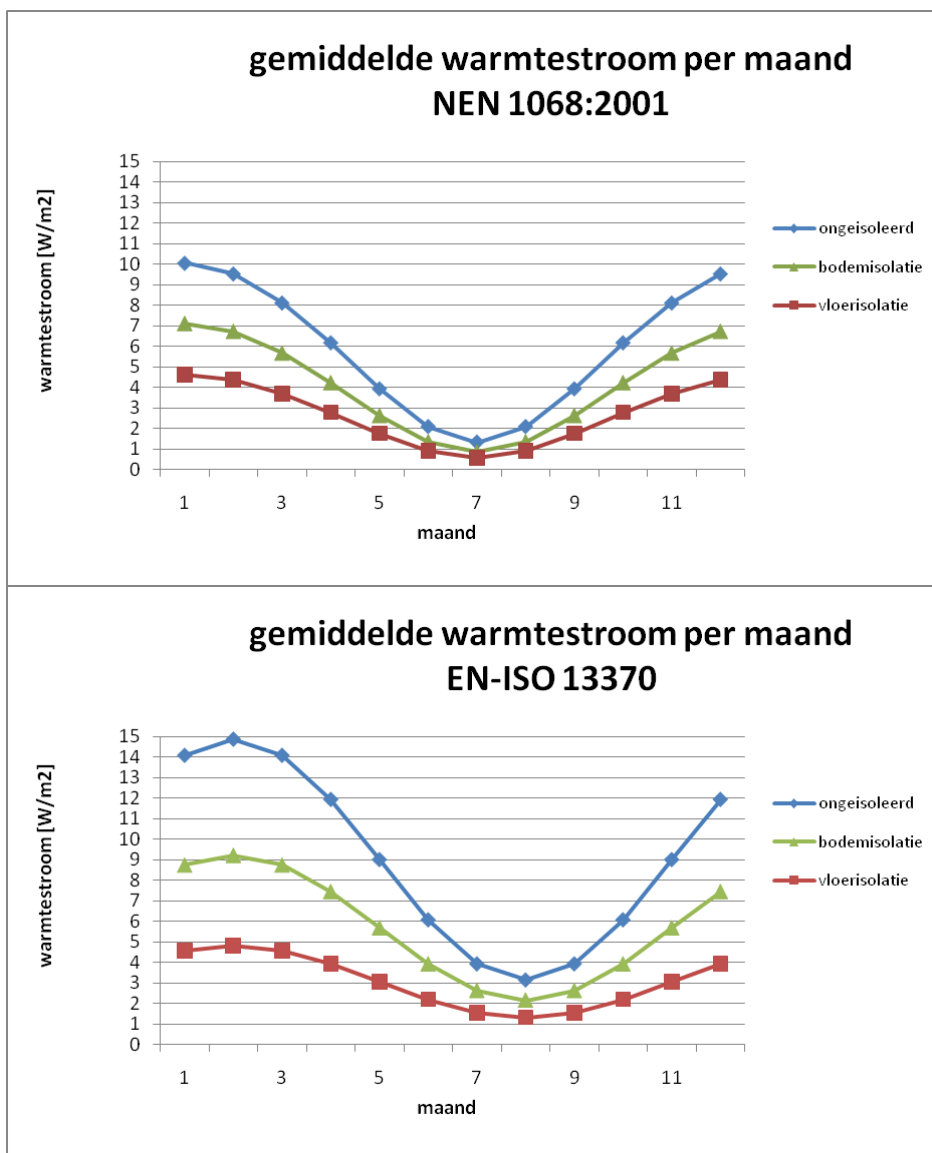
1) met name het onderscheid tussen vloerisolatie en bodemisolatie, bij NEN 1068: 2001 wordt dit onderscheid wel benoemd maar is niet in de genormeerde rekenmethode opgenomen.

4 Berekeningsresultaten

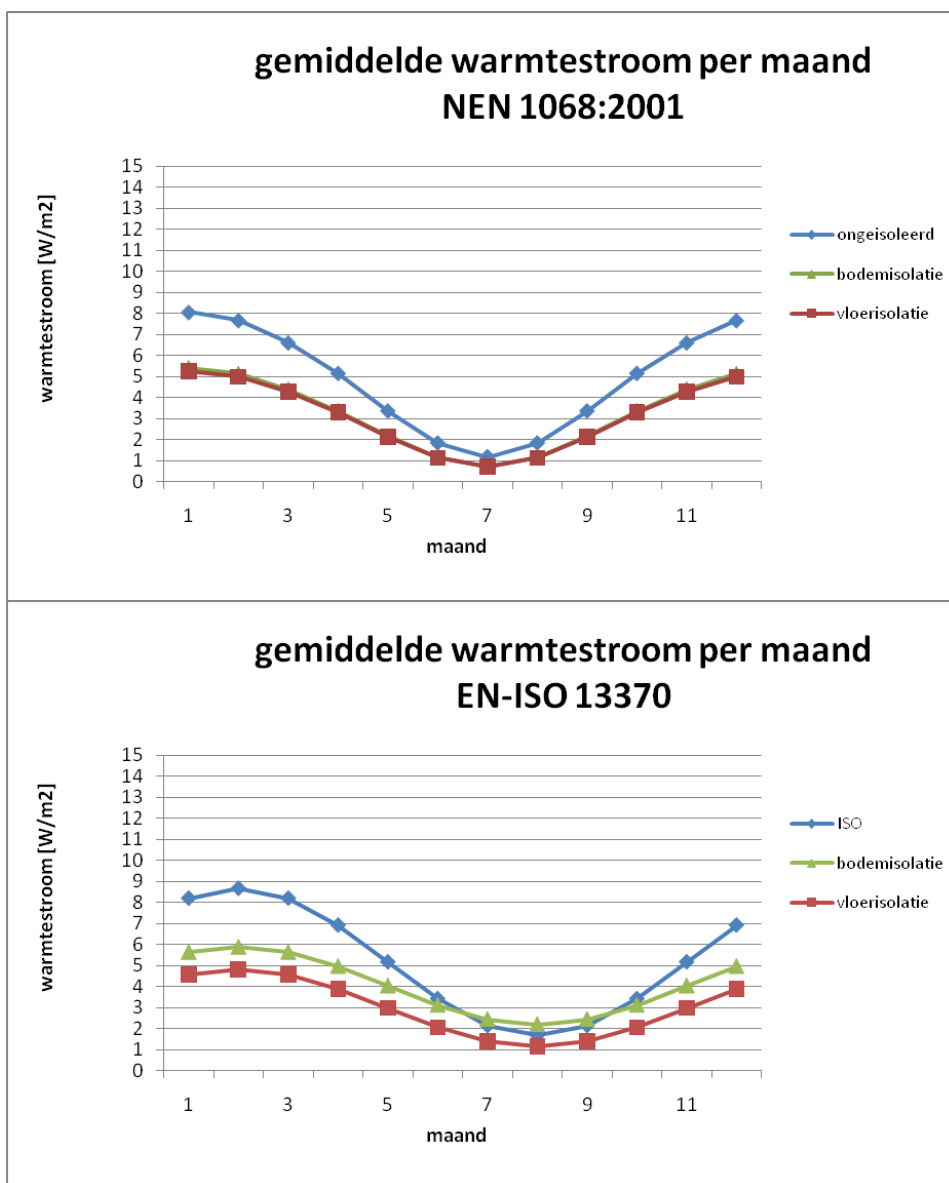
4.1 Vergelijkende berekeningen NEN 1068 – ISO 13370

4.1.1 Vergelijking warmtestroom per maand

In figuur 4.1 en 4.2 zijn voor de details H1 en B3 de berekeningsresultaten volgens NEN 1068 en EN-ISO 13370 vergeleken.



Figuur 4.1 Vergelijking maandelijks warmteverlies NEN 1068 – EN-ISO 13370
Detail H1 Houtenvloer ongeïsoleerde funderingsstrook



*Figuur 4.2 Vergelijking maandelijks warmteverlies NEN 1068 – EN-ISO 13370
Detail B3 Betonvloer geïsoleerde spouwmuur tot in de fundering*

Zoals op basis van de rekenmethode te verwachten was zijn de volgende verschillen waarneembaar:

- Door het in rekening brengen van de thermische traagheid is de piek in het warmteverlies bij EN-ISO een maand later
- Bij een geïsoleerde funderingsstrook is er bij NEN 1068 geen verschil tussen bodem en vloerisolatie.

4.1.2 Vergelijking jaarlijkse energiebesparing

Voor de details H1 en B3 is de berekende gasbesparing voor de verschillende isolatiesystemen weergegeven in tabel 4.1.

Tabel 4.1 Vergelijking warmteverlies en gasbesparing volgens NEN 1068 en EN-ISO 13370

kruipruimteventilatie $A_{vent} = 100\text{mm}^2/\text{m}^2$

	NEN 1068			ISO 13370		
	m3 aeq	besparing m3 aeq	%	m3 aeq	besparing m3 aeq	%
H1-0	5,0			7,7		
H1-Ia	2,4	2,6	53%	2,6	5,1	66%
H1-IIa	2,8	2,2	43%	3,4	4,3	56%
H1-IIIa	3,4	1,7	33%	4,4	3,3	42%
B3-0	3,9			4,5		
B3-Ia	2,4	1,5	39%	2,4	2,1	47%
B3-IIa	2,2	1,7	44%	2,6	1,9	43%
B3-IIIa	2,5	1,4	37%	3,1	1,4	30%

kruipruimteventilatie $A_{vent} = 400\text{mm}^2/\text{m}^2$

	NEN 1068			ISO 13370		
	m3 aeq	besparing m3 aeq	%	m3 aeq	besparing m3 aeq	%
H1-0	5,5			8,0		
H1-Ia	2,8	2,6	48%	2,6	5,3	67%
H1-IIa	3,3	2,2	40%	3,5	4,5	57%
H1-IIIa	3,8	1,7	30%	4,8	3,2	40%
B3-0	4,4			4,5		
B3-Ia	2,9	1,5	35%	2,4	2,0	46%
B3-IIa	2,7	1,7	40%	2,7	1,8	41%
B3-IIIa	2,9	1,4	33%	3,3	1,2	26%

De berekeningen laten het volgende beeld zien:

- De berekening volgens ISO 13370 geeft hogere verbruiken en besparingen dan NEN 1068.
- Het effect van kruipruimteventilatie op de besparing is bij NEN 1068 nihil. Dit is verklaarbaar vanuit de gebruikte rekenmethode.
- Bij ISO 13370 heeft kruipruimteventilatie een klein effect op de berekende besparing. Dit is te verklaren vanuit het feit dat het transmissieverlies via de kruipruimtetwand doorgaans veel groter is dan het ventilatieverlies.
- Het verschil tussen ISO 13370 en NEN 1068 is vooral zichtbaar bij ongeïsoleerde vloerconstructies, waar ISO 13370 een substantieel hoger verbruik te zien geeft.

4.2 Variantberekeningen ISO 13370

4.2.1 Tussenwoningen

Met de rekenmethode ISO 13370 is een groot aantal variantberekeningen uitgevoerd. In bijlage 3 zijn de berekeningsresultaten gegeven voor een tussenwoning. Voor de kruipruimteventilatie is de standaardwaarde conform ISO 13370 van $\varepsilon = 0,0012 \text{ m}^2 \text{ per m}^2$ aangehouden, overeenkomend met circa 400 mm² per m² vloeroppervlakte.

Op basis van deze berekeningen is in tabel 4.2 de te bereiken besparing gegeven afhankelijk van de warmteweerstand R van het isolatiepakket voor een situatie met ongeïsoleerde kruipruimtemwand en bij later toegevoegde isolatie van de kruipruimtemwand.

Tabel 4.2 Berekende besparing conform ISO 13370 voor een tussenwoning

Type isolatie	Warmte- weerstand van de isolatie R [m ² K/W] 1)	Gemiddelde besparing m ³ aeq/m ² vloer voor tussenwoningen	
		kruipruimtemwand ongeïsoleerd ²⁾	kruipruimtemwand geïsoleerd tegelijk met aanbrengen vloer/bodemisolatie
vloerisolatie	1,0	2,0	2,2
isolatie op of onder tegen de vloerconstructie	2,0	2,7	2,8
	2,5	3,0	3,1
	3,0	3,2	3,3
	3,5	3,4	3,5
	4,0	3,6	3,7
bodemisolatie	2,5	1,9	2,6
isolatie op de bodem van de kruipruimte	3,0	2,0	2,7
	3,5	2,2	2,9
	4,0	2,3	3,0
	4,5	2,4	3,1

1) Voor tussenliggende waarden van R mag worden geïnterpoleerd.

2) Voor een situatie waarbij de kruipruimtemwand al geïsoleerd is (zoals details B3 en H3/H4) is de te bereiken besparing bij vloerisolatie lager dan bij een ongeïsoleerde kruipruimtemwand en bij bodemisolatie hoger dan bij een ongeïsoleerde kruipruimtemwand.

Deze besparingsgetallen gelden voor een gemiddelde situatie uitgaande van een correcte uitvoering, waarbij eventuele bestaande gebreken zoals grote luchtlekken in de begane grondvloer of open verbinding tussen kruipruimte en de spouw zijn hersteld.

4.2.2 Hoekwoningen en vrijstaande woningen

In figuur 4.3 en 4.4 is de berekende energiebesparing uitgezet tegen de R-waarde van het isolatiepakket. Daarbij is ook gekeken naar vrijstaande woningen en hoekwoningen.

Op basis hiervan kan voor hoekwoningen en tussenwoningen een toeslag op de besparing worden gerekend, zie tabel 4.3.

Tabel 4.3 Toeslag op berekende besparing voor hoekwoningen en vrijstaande woningen

	Vloerisolatie $R > 2,5$	Bodemisolatie $R > 3$
Hoekwoningen of 2-onder-1-kap	1,0 m ³ aeq/m ²	0,7 m ³ aeq /m ²
Vrijstaande woningen	2,0 m ³ aeq/m ²	1,5 m ³ aeq /m ²

4.2.3 Effect kruipruimteventilatie

De te bereiken energiebesparing is mede afhankelijk van de hoeveelheid kruipruimteventilatie voor en na het aanbrengen van de vloerisolatie.

In 7.1.1 en 7.1.2 wordt nog verder ingegaan op de wenselijkheid van kruipruimteventilatie.

In bijlage 4 zijn de resultaten van variantberekeningen met variërende kruipruimteventilatie gegeven. Daarbij is berekend hoeveel de extra te bereiken besparing is als de kruipruimteventilatie tegelijk met het aanbrengen van de vloerisolatie wordt beperkt.

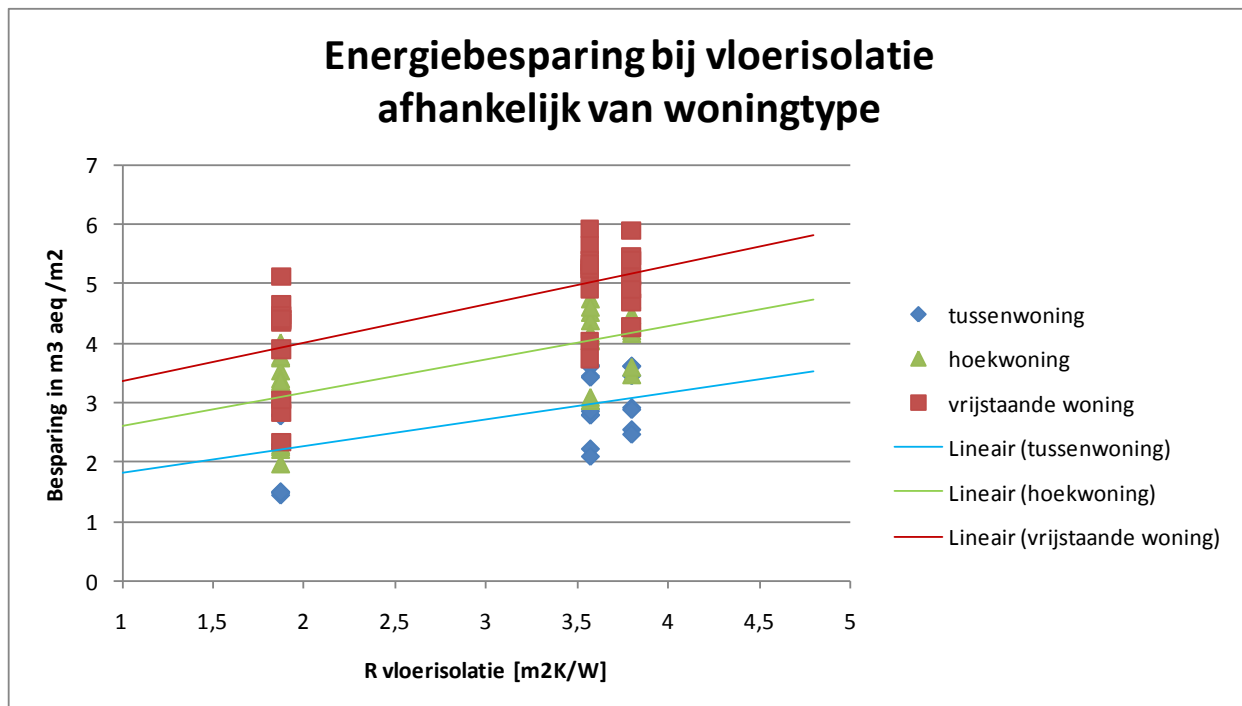
Er zijn drie niveaus van kruipruimteventilatie vergeleken uitgedrukt in de hoeveelheid ventilatieopening ε in m² per m' gevellengte

1. matige kruipruimteventilatie $\varepsilon = 0,003$ m² per m' gevellengte
komt overeen met circa 100 mm² opening per m²
2. gemiddelde kruipruimteventilatie $\varepsilon = 0,012$ m² per m' gevellengte
komt overeen met circa 400 mm² opening per m²
3. sterke kruipruimte ventilatie $\varepsilon = 0,035$ m² per m' gevellengte
komt overeen met circa 1000 mm² opening per m²

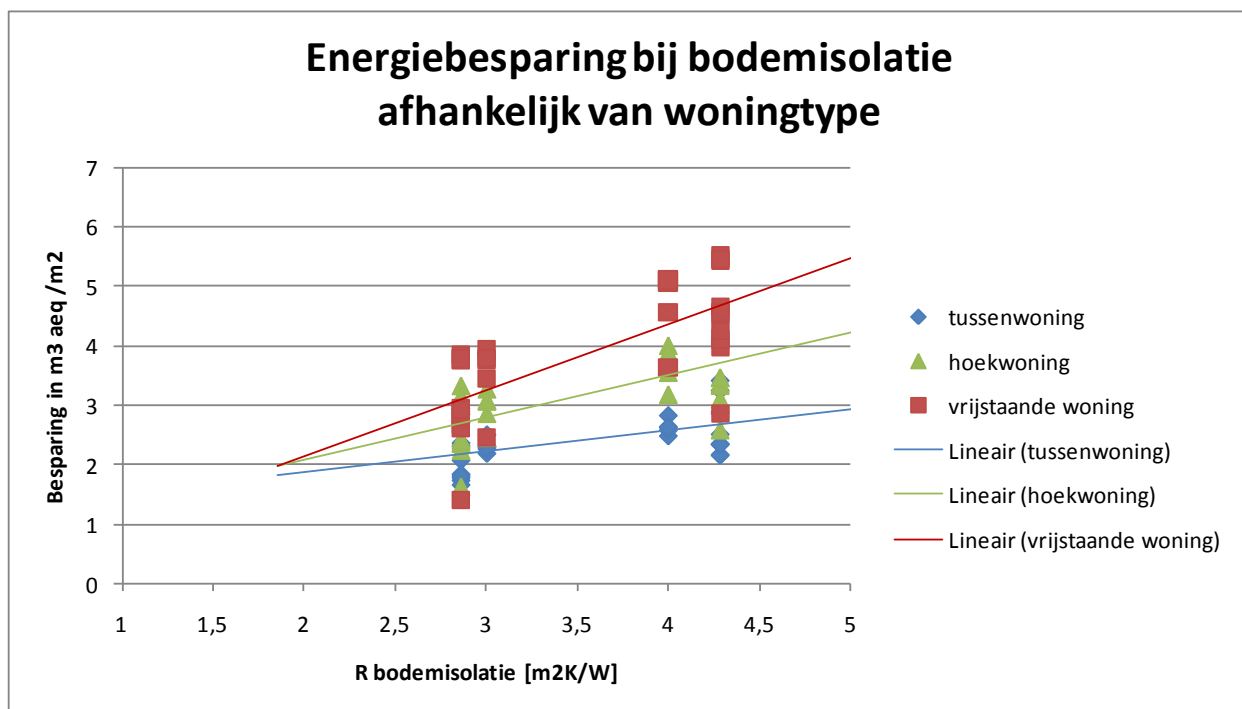
Op basis van deze berekeningen kan een toeslag op de te bereiken besparing worden gerekend als weergegeven in tabel 4.4.

Tabel 4.4 Toeslag op berekende besparing bij afname kruipruimteventilatie

	Vloerisolatie $R > 2,5$	Bodemisolatie $R > 3$
Afname van niveau 3 naar niveau 1	0,7 m ³ aeq/m ²	1,0 m ³ aeq /m ²
Afname van niveau 3 naar niveau 2	0,6 m ³ aeq/m ²	0,7 m ³ aeq /m ²
Afname van niveau 2 naar niveau 1	0,1 m ³ aeq/m ²	0,3 m ³ aeq /m ²



Figuur 4.3 Berekende jaarlijkse energiebesparing bij vloerisolatie afhankelijk van woningtype

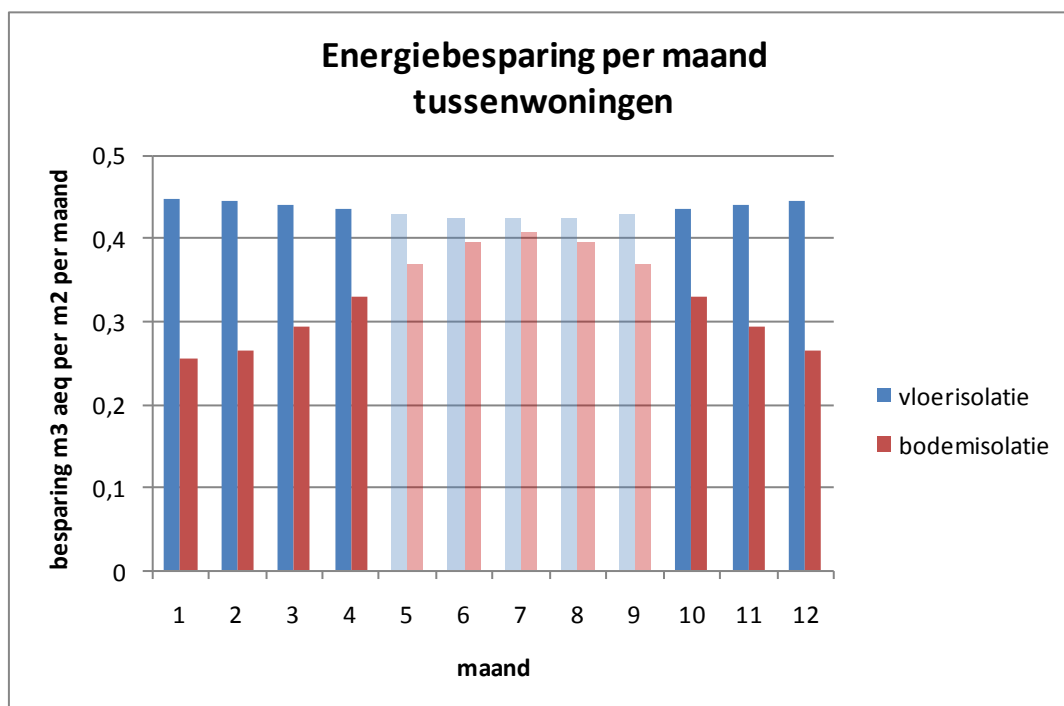


Figuur 4.4 Berekende jaarlijkse energiebesparing bij bodemisolatie afhankelijk van woningtype

4.2.4 Energiebesparing per maand

In figuur 4.5 is voor tussenwoningen de energiebesparing per maand gegeven voor vloerisolatie en bodemisolatie.

Met name in de koudste maanden is bodemisolatie minder effectief dan vloerisolatie.



Figuur 4.5 Energiebesparing per maand voor vloerisolatie en bodemisolatie (stookseizoen oktober t/m april)

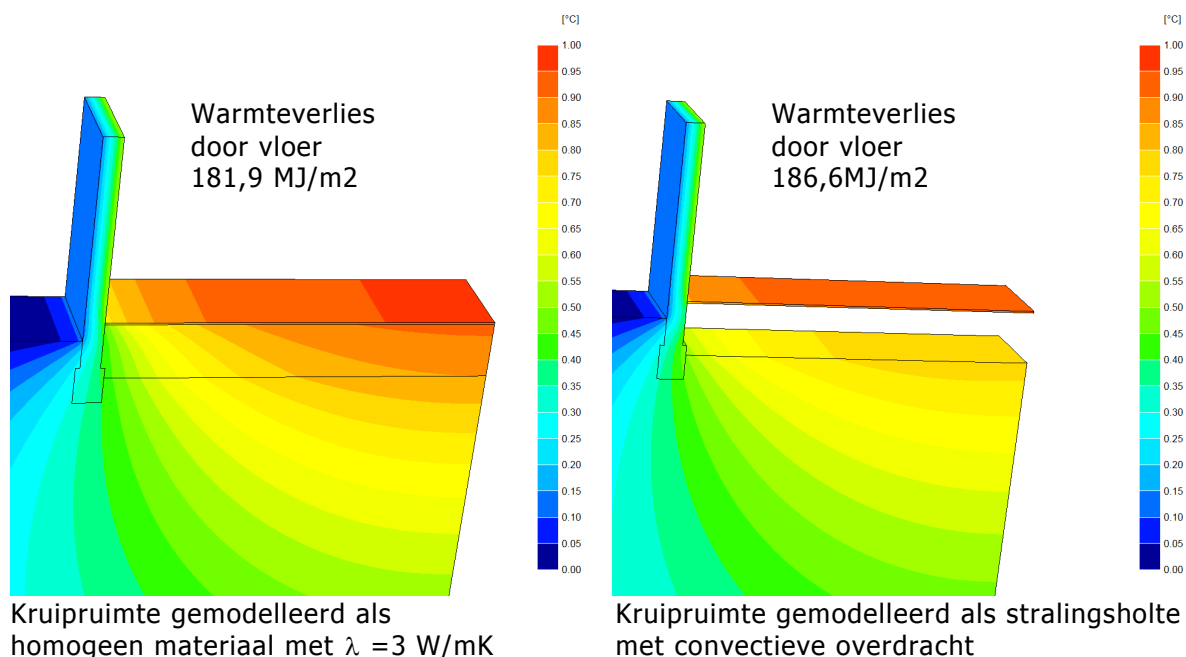
4.3 Vergelijking op onderdelen met gedetailleerde berekeningen (TRISCO)

4.3.1 Schematisering kruipruimte

De kruipruimte wordt volgens EN-ISO 13370 gemodelleerd door een homogeen materiaal met een warmtegeleidingscoëfficiënt van 3 W/mK. Dit is uiteraard een sterk vereenvoudigde representatie van de werkelijke situatie waarin stralingsuitwisseling tussen verschillende vlakken plaatsvindt en convectiestromen als gevolg van temperatuurverschillen ontstaan.

In Trisco wordt met de Radcon module de warmte-uitwisseling gedetailleerd bepaald, rekening houdend met stralingsuitwisseling en convectie, conform NEN-EN-ISO 6946 [17].

In figuur 4.6 is de standaardberekening vergeleken met de gedetailleerde Trisco berekening.



Figuur 4.6 Vergelijking berekening met vereenvoudigd kruipruimte model en gedetailleerd kruipruimte model.

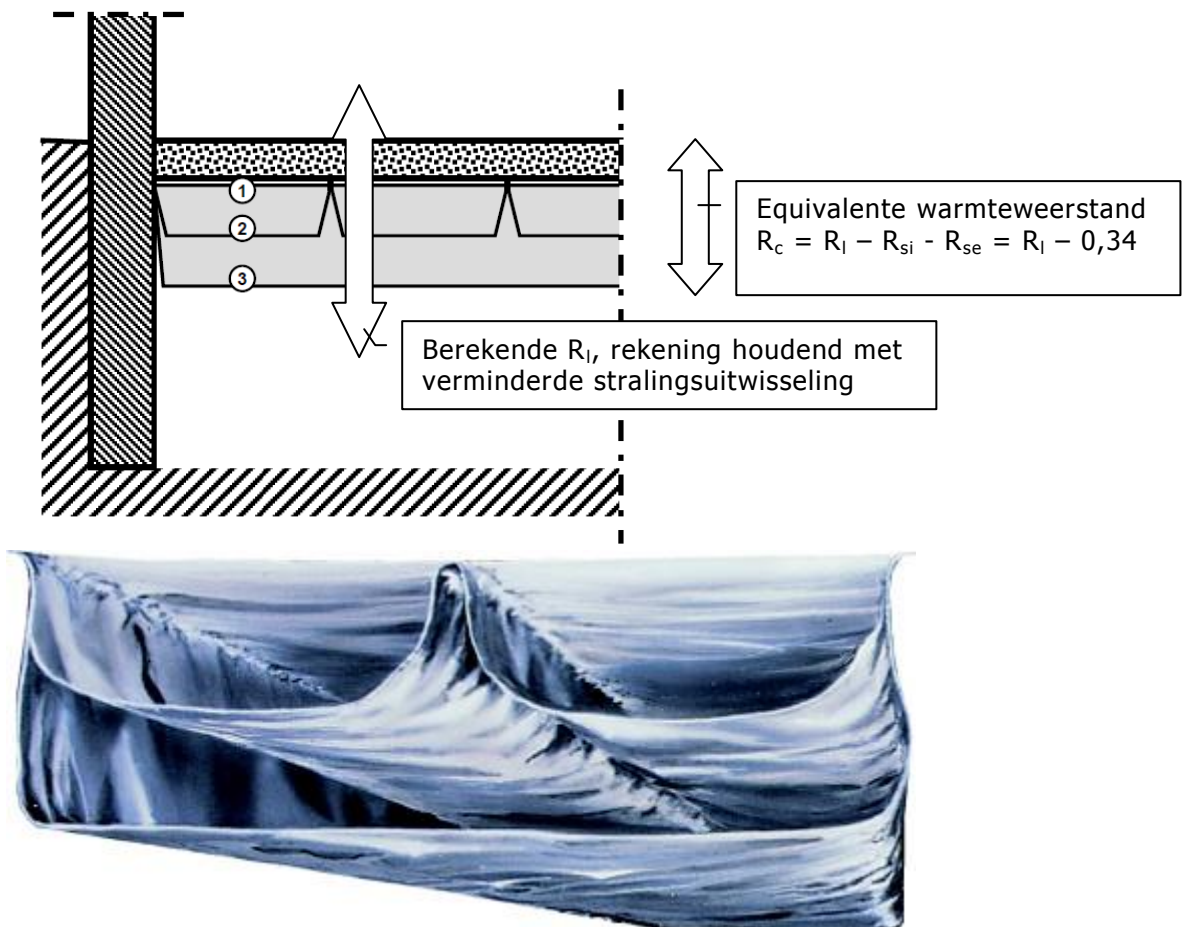
Lokaal zijn er duidelijk verschillen in temperatuur tussen beide berekeningen. Bij het gedetailleerde kruipruimte model is de kruipruimtetemperatuur meer uniform evenals de oppervlaktetemperatuur van de vloer. Voor het uiteindelijke energieverlies is het verschil kleiner dan 3 %. Geconcludeerd wordt dat de vereenvoudigde modellering van de kruipruimte voor het bepalen van het warmteverlies en de energiebesparing voldoende accuraat is.

4.3.2 Schematisering thermoskussens

De isolerende werking van Tonzon thermoskussens is voor een groot deel gebaseerd op onderbreking van de warmte-uitwisseling door straling. Voor het thermoskussen met drie kamers, zie figuur 4.7, wordt bij de bepaling van het energielabel een Rc-waarde van 3,8 m²K/W aangehouden (kwaliteitsverklaring 20100001GKBKUW).

Met een gedetailleerde berekening in Trisco is nagegaan in hoeverre dit een redelijke benadering is. Bij een emissiecoëfficiënt van de thermoskussens van 0,05 wordt met de gedetailleerde Trisco berekening een equivalente Rc-waarde van 4,6 m²K/W berekend. Hierbij is ook de verminderde stralingsoverdracht tussen de onderzijde van de thermoskussens en de kruipruimtebodembodem in rekening gebracht.

De gecertificeerde Rc-waarde van 3,8 m²K/W voor de thermoskussens is dus een veilige waarde rekening houdend met mogelijke toename van de emissiecoëfficiënt door vervuiling en veroudering.



Figuur 4.7 Dwarsdoorsnede Tonzon thermoskussen met drie reflecterende folies met afgesloten niet geventileerde tussenliggende luchtlagen

5 Effect van vloerisolatie op setpointtemperatuur

5.1 Uitgangspunten

In de huidige NEN 5128 en de in ontwikkeling zijnde nieuwe NEN 7120 wordt gerekend met een gemiddelde binnentemperatuur, die mede afhangt van de mate van isolatie van de woning.

Als bij een bestaande woning de gevel en het dak wel zijn nageïsoleerd maar de vloer niet, dan heeft in de berekening het isoleren van de vloer het effect dat de gemiddelde binnentemperatuur iets stijgt, waardoor de berekende besparing door vloerisolatie kleiner wordt.

In werkelijkheid heeft vloerisolatie tot gevolg dat de vloertemperatuur stijgt en de setpointtemperatuur van de verwarming in de woonkamer lager gezet wordt.

Om een reëel beeld te krijgen van de energiebesparing door vloerisolatie moet dit effect in de berekening worden meegenomen.

De vloertemperatuur wordt berekend aan de hand van een warmtebalansmodel van de kruipruimte conform SBR 4 [10]. Daarbij is de gemiddelde temperatuur van de vloer berekend. Ter plaatse van de randzone is de vloertemperatuur doorgaans lager.

De comforttemperatuur wordt als volgt bepaald:

$$T_{\text{comf}} = 5/8 \cdot T_s + 3/8 \cdot T_l$$

waarbij:

T_{comf} = de comforttemperatuur in °C

T_s = de gemiddelde stralingstemperatuur in °C

T_l = de gemiddelde luchttemperatuur in °C

De gemiddelde stralingstemperatuur T_s is mede afhankelijk van de vloertemperatuur.

Er is berekend welke luchttemperatuur nodig is om een comforttemperatuur van 20 °C te bereiken.

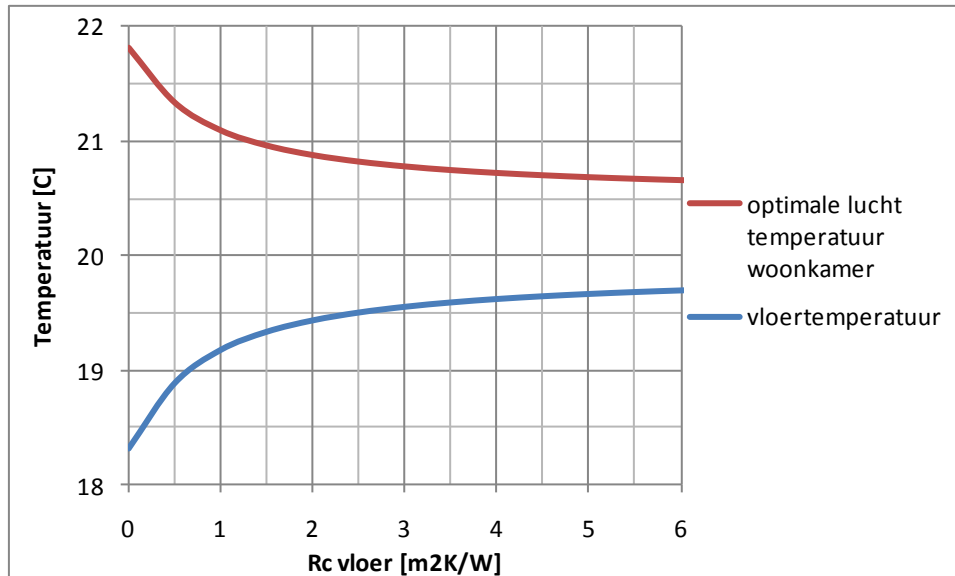
Deze luchttemperatuur wordt dan als setpointtemperatuur voor de ruimtethermostaat aangehouden.

5.2 Berekeningsresultaten

In figuur 5.1 is voor een gemiddelde situatie in het stookseizoen (buitentemperatuur 5 °C) als voorbeeld het berekende effect van vloerisolatie op de vloertemperatuur en de gewenste luchttemperatuur gegeven.

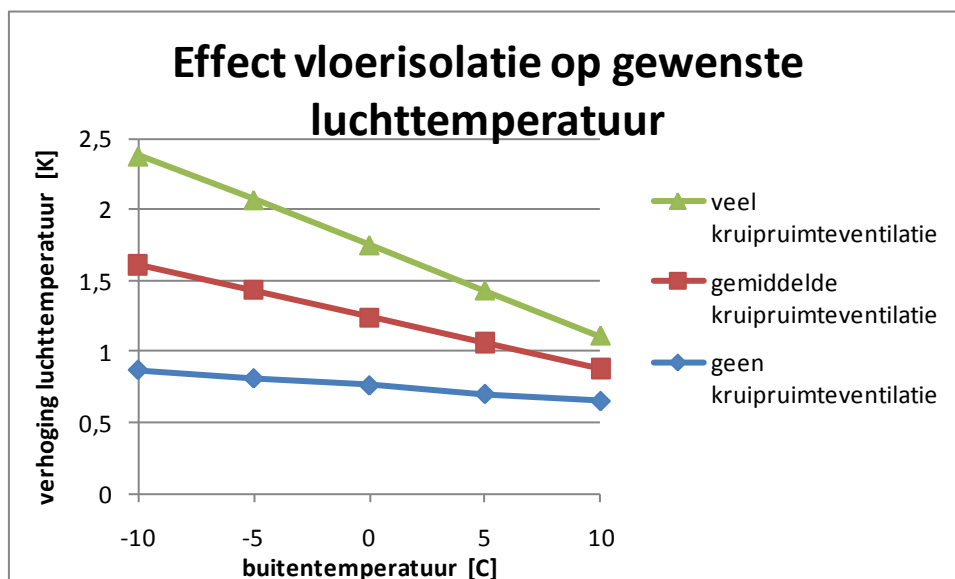
In dit voorbeeld is te zien dat de gemiddelde oppervlaktetemperatuur van de vloer 1 tot 1,5 °C stijgt als de vloer wordt geïsoleerd. Door deze stijging kan de luchttemperatuur circa 1 °C lager zijn bij gelijkblijvende comforttemperatuur.

Het effect van de vloerisolatie doet zich vooral voor bij een R_c -waarde tot 1,5 à 2 m²K/W. Verder vergroten van de R_c -waarde heeft weinig effect op de gewenste luchttemperatuur.

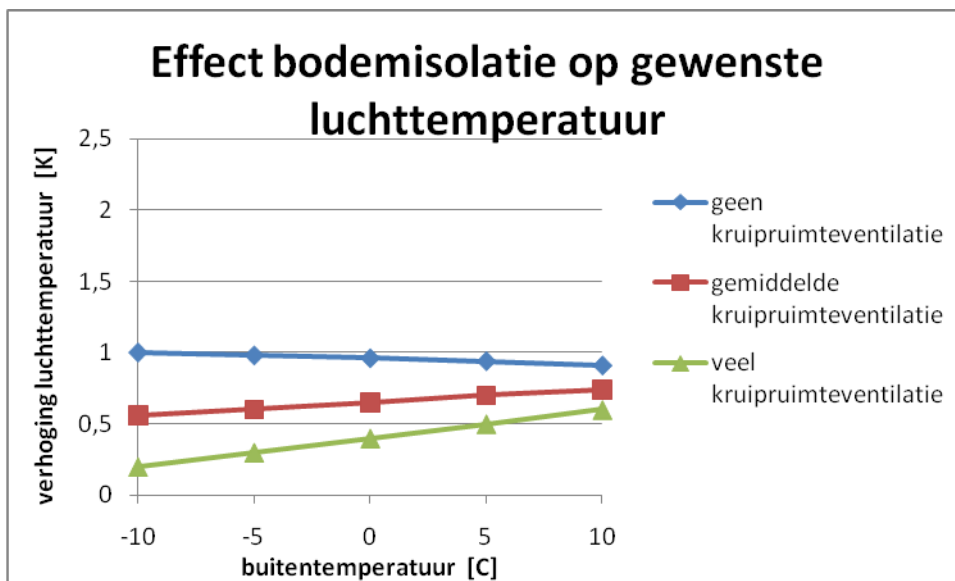


Figuur 5.1 Effect vloerisolatie op gewenste luchttemperatuur bij gemiddelde buitentemperatuur in stookseizoen (comforttemperatuur 20 °C)

In de figuren 5.2 en 5.3 is de mogelijke verlaging van de luchttemperatuur berekend afhankelijk van de kruipruimteventilatie. Bij vloerisolatie met een R-waarde van circa 2,5 m²K/W is het effect op de gewenste luchttemperatuur gemiddeld in het stookseizoen circa 1 °C, zie figuur 5.2. Het effect neemt toe naarmate de kruipruimteventilatie groter is. Bij bodemisolatie met een R-waarde van circa 3 m²K/W is het effect op de gewenste luchttemperatuur bij gemiddelde kruipruimteventilatie circa 0,5 °C, zie figuur 5.3.



Figuur 5.2 Effect vloerisolatie ($R = 2,5 \text{ m}^2\text{K/W}$) op gewenste luchttemperatuur (tussenwoning)



Figuur 5.3 Effect bodemisolatie ($R = 3 \text{ m}^2\text{K/W}$) op gewenste luchttemperatuur (tussenwoning)

5.3 Voorstel voor aanpassing rekenmethode NEN 7120

Ten tijde van het tot stand komen van dit rapport lag de Ontwerp NEN 7120 ter commentaar. Aan de rapporteurs van NEN 7120 is het volgende wijzigingsvoorstel voorgelegd om het effect van vloerisolatie op de setpointtemperatuur te verdisconteren:

Onder 13.1 wijzigen:

De ongecorrigeerde setpointtemperatuur van de rekenzone voor verwarming, $\theta_{\text{int;set;H;high}}$, in graden Celsius, bedraagt 21°C voor woningen met een ongeïsoleerde begane grond vloer ($R_c < 1 \text{ m}^2\text{K/W}$) en 20°C in alle overige gevallen.

5.4 Effect setpointtemperatuur op energieverbruik

Een verlaging van de setpointtemperatuur in de woonkamer leidt tot lagere transmissie en ventilatieverliezen in de woonkamer, maar voor een deel ook in de rest van de woning.

De afname van het energieverbruik voor verwarming is afhankelijk van de indeling van de woning (eengezinswoning of appartement op de begane grond), van de mate van isolatie van de woning en van de temperatuurregeling in de overige vertrekken.

De te bereiken extra energiebesparing door het verlagen van de setpointtemperatuur bij vloer- en bodemisolatie kan als volgt worden ingeschat:

$$B_{\text{set}} = Q \cdot \Delta T_{\text{set}} \cdot f / (13 \cdot A_{\text{bg}})$$

Waarbij:

B_{set} = de extra energiebesparing in m^3 aeq per m^2 begane grondvloer per jaar
 Q = het energieverbruik voor verwarming in m^3 aeq/jaar
 ΔT_{set} = de verlaging van de setpointtemperatuur in K
 f = deel van de woning waarvan de ruimtetemperatuur wordt beïnvloed door de setpointtemperatuur
 13 = gemiddeld temperatuurverschil binnen/buiten in K
 A_{bg} = de oppervlakte van de begane grondvloer

Tabel 5.1 Voorbeeld van te bereiken extra energiebesparing B_{set} in m^3 aeq per m^2 bij vloerisolatie als gevolg van verlaging van de setpointtemperatuur in de woonkamer

		eengezinswoning		appartement bg	
		slecht geïsoleerd $Q=3000 m^3$ $f=0,4$ $A_{bg}=50 m^2$	goed geïsoleerd $Q=1500 m^3$ $f=0,4$ $A_{bg}=50 m^2$	slecht geïsoleerd $Q=1500 m^3$ $f=0,7$ $A_{bg}=65 m^2$	goed geïsoleerd $Q=800 m^3$ $f=0,7$ $A_{bg}=65 m^2$
$\Delta T_{set} =$	0,5	0,9	0,5	0,6	0,3
$\Delta T_{set} =$	1	1,8	0,9	1,2	0,7
$\Delta T_{set} =$	1,5	2,8	1,4	1,9	1,0

Bij slecht geïsoleerde woningen is de extra besparing 1 tot 2 m^3 aeq per m^2 vloer. Bij geïsoleerde woningen is de extra besparing 0,5 tot 1 m^3 aeq per m^2 .

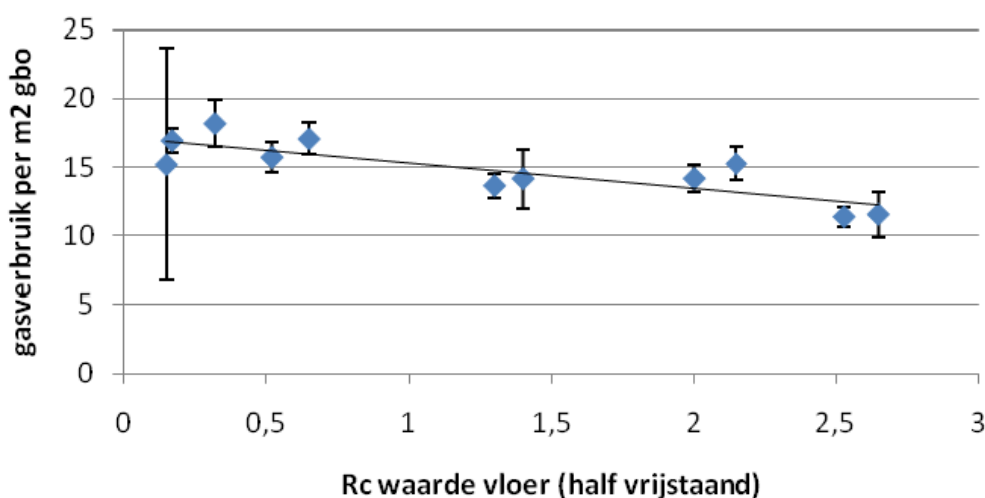
6 Vergelijking met praktijkmetingen

6.1 Beschikbare gegevens van praktijkmetingen

Er zijn weinig gegevens beschikbaar van praktijkmetingen van het effect van vloer- en bodemisolatie op het jaarlijks energiegebruik. In het eerdere onderzoek van Cauberg-Huijgen [2] is een inventarisatie gemaakt en daarbij zijn de gegevens van vier projecten met vloerisolatie naar boven gekomen. Door Dubotech zijn gegevens beschikbaar gesteld over enkele projecten met DroWa bodemisolatie. Verder zijn geen gegevens van gemeten jaarlijkse energiebesparing bij vloer- of bodemisolatie beschikbaar ¹.

Daarnaast zijn in het kader van het Woononderzoek Nederland WoON statistische gegevens beschikbaar van woningkenmerken en gasverbruiken [12]. In figuur 6.1 is de gevonden relatie tussen de R_c -waarde van de vloer en het gasverbruik per m^2 gbo (gebruiksoppervlakte) gegeven voor half vrijstaande woningen (hoekwoningen/ 2-onder-1-kap). Deze gegevens zijn gebaseerd op waarnemingen bij 909 woningen, waarbij moet worden opgemerkt dat er geen onderscheid tussen vloer- en bodemisolatie is gemaakt en dat de R_c -waarde in de meeste gevallen is geschat op basis van het bouwjaar.

Hieruit kan bij een R_c van $2,5 \text{ m}^2\text{K/W}$ een besparingskental van 3 tot $5 \text{ m}^3 \text{ aeq/m}^2$ gbo worden afgeleid. Teruggerekend naar de oppervlakte van de begane grondvloer en gecorrigeerd voor het gemiddelde ketelrendement is dit 5 tot $9 \text{ m}^3 \text{ aeq/m}^2$.



Figuur 6.1 Relatie tussen geschatte R_c -waarde van de vloer en gasverbruik per m^2 gbo voor half vrijstaande woningen (bron [12])

¹ Er zijn door TNO diverse metingen uitgevoerd in kruipruimtes met verschillende isolatiesystemen en vloerafdichtingssystemen. Deze metingen waren gericht op het inzicht krijgen in het thermisch-hygrisch gedrag van een kruipruimte en vormen de basis van het SBR-4 model [10]. De uitgevoerde metingen geven echter geen direct inzicht in de jaarlijks te bereiken energiebesparing.

De bovengenoemde besparingskentallen uit praktijkgegevens zijn verzameld in tabel 6.1.

Gewogen naar steekproefgrootte komen uit de praktijkmetingen de volgende gemiddelde besparingscijfers:

Vloerisolatie	7,4 m ³ aeq/m ²
Bodemisolatie	3,8 m ³ aeq/m ²
Gemiddelde van vloer- en bodemisolatie	6,7 m ³ aeq/m ²

Gezien het beperkte aantal beschikbare gegevens uit verschillende bronnen, waarbij de meetmethode mogelijk verschillend is geweest, mogen deze gemeten besparingscijfers slechts als een indicatie worden beschouwd.

Tabel 6.1 Overzicht van beschikbare besparingskentallen uit praktijkgegevens

	R _c [m ² K/W]	Jaar van meting	Maatregel	besparingsgetal [m ³ aeq/m ²]	aantal woningen
Praktijkproject Boekelo ¹⁾	2,2	1986	Vloerisolatie	7,8	17
Praktijkproject Arnhem ¹⁾	3,3	1986	Vloerisolatie	9,6	20
9 tussenwoningen en 2 hoekwoningen Schuberthof Waddinxveen ²⁾	2,7	2002	18cm DroWa bodemisolatie	3,5	11
Tussenwoning Boslaan Zevenhuizen ²⁾	2	nb	13cm DroWa bodemisolatie	3,7	1
Tussenwoning Hazeveld Zevenhuizen ²⁾	2	nb	13cm DroWa bodemisolatie	5	1
Hoekwoning Vinkenlaan Lisse ²⁾	2,7	nb	18cm DroWa bodemisolatie + beperking kruipruimteventilatie	8,8	1
Half vrijstaande woningen ³⁾	variabel	2006	vloerisolatie of bodemisolatie	5 - 9	909

Bronnen: 1) Tonzon, i.s.m. woningbouwverenigingen en energiebedrijven

2) DuboTech

3) WoOn

6.2 Verklaring van verschil tussen praktijkmetingen en berekeningen

De gemiddeld gemeten besparingen liggen 2 à 3 m³ aeq/m² boven de berekende besparingen.

Dit verschil kan voor een belangrijk deel worden verklaard door de volgende twee effecten:

- Als beschreven in hoofdstuk 5 is het bijkomende effect van de setpointtemperatuur gemiddeld 1 m³/m², maar in individuele gevallen kan het oplopen tot 3 m³/m².
- Zoals beschreven in 3.2.3. wordt bij een geventileerde vochtige kruipruimte door verdamping warmte uit de kruipruimte onttrokken. Hierdoor kan het warmteverlies naar de kruipruimte bij een ongeïsoleerde vloer 20 tot 25 % hoger zijn dan volgens de berekening. De besparing kan hierdoor in de praktijk 1 à 1,5 m³/m² hoger zijn.

Door deze twee effecten kan de werkelijke besparing 2 tot 4 m³/m² hoger liggen dan de berekende besparing.

Andere effecten die in de praktijk tot hogere besparingen kunnen leiden zijn:

- Bij vrijstaande woningen en hoekwoningen is het effect van vloerisolatie groter omdat daar een grotere verhouding is tussen perimeter (buitenomtrek) en vloeroppervlakte.
- Vlak na het aanbrengen van de isolatie is het grondpakket nog enigszins opgewarmd. In het eerste stookseizoen na het aanbrengen van de isolatie kan het schijnbare besparingseffect daarom iets hoger zijn,
- Het bij de berekening aangehouden warmteopwekkingsrendement (met HR107-ketel) is hoger dan bij de praktijkmeting.

Alles bij elkaar genomen kan worden geconcludeerd dat er weliswaar een grote spreiding zit in de metingen en de berekeningen, maar dat de geconstateerde verschillen tussen metingen en berekeningen goed verklaarbaar zijn. Bij de berekende besparingen is met de setpointtemperatuur en verdamping geen rekening gehouden. In situaties waarin deze effecten optreden is de berekende besparing structureel 2 à 3 m³ aeq /m² lager dan de gemeten besparing.

7 Onderlinge vergelijking isolatiesystemen

7.1 Vergelijking vloerisolatiesystemen

In hoofdstuk 5 en 6 is ingegaan op de te bereiken energiebesparing bij de verschillende systemen voor vloer- en bodemisolatie. In dit hoofdstuk worden de overige aspecten belicht die mede bepalend kunnen zijn voor de keuze voor een bepaald isolatiesysteem.

7.1.1 Effect van kruipruimteventilatie

Voorheen werd via de Modelbouwverordening geëist dat er kruipruimteventilatie aanwezig was, maar sinds de invoering van het Bouwbesluit is kruipruimteventilatie niet meer verplicht. Het Garantieinstituut Woningbouw GIW vereist overigens nog steeds wel de aanwezigheid van kruipruimteventilatie ter grootte van 100 mm² per m² vloeroppervlakte.

Over nut en noodzaak van kruipruimteventilatie kan het volgende gezegd worden:

- De vochtigheid in de kruipruimte wordt nauwelijks beïnvloed door de hoeveelheid kruipruimteventilatie [10].
- Het ontstaan van zwammen op houten vloerconstructies wordt in verband gebracht met te weinig kruipruimteventilatie. Bij weinig of geen kruipruimteventilatie zullen bij ongeïsoleerde vloeren optimalere groeiomstandigheden ontstaan voor zwammen, dit komt waarschijnlijk voornamelijk door de hogere kruipruimtetemperatuur bij het ontbreken van voldoende ventilatie. Zoals hierboven genoemd is het effect van kruipruimteventilatie op de vochtigheid beperkt, dus dat is geen afdoende verklaring voor het verband tussen zwamvorming en ventilatie.
- In de kruipruimtelucht kunnen zich stoffen verzamelen die geuroverlast geven of schadelijk zijn voor de gezondheid. Een van die schadelijke stoffen is radon [18]. Door de kruipruimte te ventileren kunnen deze stoffen worden afgevoerd, maar het verbeteren van de luchtdichtheid van de begane grondvloer, zie 7.1.3, is een minstens even effectieve maatregel. In het kader van onderzoek naar mogelijk maatregelen ter vermindering van de radonconcentratie in woningen is praktijkonderzoek uitgevoerd naar het effect van kruipruimteventilatie [19]. Uit dit onderzoek is gebleken dat vergroten van de ventilatieopeningen effectief is om de radonconcentratie in de kruipruimte te verminderen, maar dat er slechts een beperkt effect is op de totale stralingsbelasting in de woning.

Concluderend kan worden gesteld dat matige kruipruimteventilatie (circa 100 mm² per m²) in alle gevallen wenselijk is, maar dat meer kruipruimteventilatie niet noodzakelijk is en uit het oogpunt van energiebesparing onwenselijk is.

7.1.2 Vochtbeheersing in de kruipruimte

Het is met name bij houten vloeren van belang dat de vochtigheid in de kruipruimte beheerst wordt en daarvoor zijn de volgende middelen beschikbaar:

- Het aanbrengen van een *bodemaafsluiting* in de vorm van een dampdichte folie
In dit geval wordt de vochtbron zoveel mogelijk afgesloten, als bovendien de kruipruimtetemperatuur wordt verlaagd door de vloer te isoleren, zal de absolute en relatieve vochtigheid in de kruipruimte sterk afnemen.
- Het aanbrengen van *bodemisolatie* in de vorm van schelpen, EPS-chips of los gestorte EPS-parels.
Hierbij wordt gebruik gemaakt van het feit dat de bodemtemperatuur onder de isolatielaag meestal lager is dan de kruipruimtetemperatuur. De vochtige warme lucht uit de kruipruimte diffundeert door de bodemisolatie en condenseert op de kruipruimtebodem. Dit principe werkt over het algemeen goed, maar als de bodemtemperatuur onder de isolatielaag hoger is dan de kruipruimte temperatuur werkt het averechts. Dat kan zich voordoen bij het invallen van het najaar na een warme zomer.
- Bij *bodemhygrolatie* worden in zakken PE-folie verpakte EPS-parels op de bodem van de kruipruimte gelegd. Hierbij wordt tegelijk een bodemafdichting en bodemisolatie aangebracht.

Bij vloerisolatie wordt de vloerconstructie warmer, waardoor de relatieve vochtigheid in de constructie afneemt. Bij een houten vloerconstructie neemt daardoor de kans op aantasting door vocht af, mits deze volledig is geïsoleerd. Als de isolatie tussen de houten vloerbalken is aangebracht wordt de vochtconditie van de balken slechter. Het is daarom van belang dat vloerisolatie bij houten vloeren altijd wordt gecombineerd met een bodemaafsluiting.

Uit berekeningen van TNO blijkt dat zowel de absolute als de relatieve vochtigheid in de kruipruimte afneemt als gevolg van bodemisolatie [4]. Dit heeft een gunstig effect op de vochtconditie van houten vloeren. In de buurt van ventilatieopeningen kan er nog steeds plaatselijk condens tegen de houten vloer ontstaan, maar de kans hierop vermindert wel door het aanbrengen van de bodemisolatie.

7.1.3 Luchtdichtheid van de begane grondvloer

Als de kruipruimte vochtig is kan vochtige lucht via lekken in de begane grondvloer de woning binnenkomen en daar voor vochtproblemen zorgen. Als er een mechanische afzuiging in de woning is wordt dit effect nog verder versterkt.

Het is daarom van groot belang dat de begane grondvloer zo goed mogelijk luchtdicht wordt gemaakt, met name bij de leidingdoorvoeren, het kruipluik en de vloerranden. Bij betonnen vloeren is het goed mogelijk om een voldoende luchtdichtheid te krijgen, maar bij houten vloeren is dit moeilijker. Bovendien is het bij houten vloeren van belang dat de vochtigheid in de kruipruimte niet te hoog wordt in verband met aantasting van het hout.

7.1.4 Risico van koudebruggen

In het ideale geval wordt thermische isolatie in een ononderbroken lijn aan de koude zijde van een constructie aangebracht zodat de hele constructie opwarmt. In dat geval kan er nooit in of op de constructie condensatie ontstaan. In de praktijk lukt dat echter meestal niet. Bij de funderingsaansluiting wordt de isolatielaag altijd onderbroken en het is ook niet altijd mogelijk om isolatie aan de buitenzijde aan te brengen. De thermisch-hygrische eigenschappen van de constructie zijn dan niet optimaal en onder sommige omstandigheden kan dan oppervlaktecondensatie of inwendige condensatie ontstaan.

Het risico van vochtproblemen bij de verschillende vloerisolatiesystemen en details is beoordeeld aan de hand van de temperatuurfactor f .

$$f = (T_{io} - T_e) / (T_i - T_e)$$

waarbij:

T_{io} = de laagste binnenoppervlaktetemperatuur van de vloerconstructie inclusief aansluitingen

T_e = de buitentemperatuur

T_i = de binnentemperatuur

De temperatuurfactor kan als volgt worden geïnterpreteerd:

temperatuurfactor	Risico op vochtproblemen (vochtplekken/schimmelgroei/loslatend stucwerk)
$f > 0,75$	verwaarloosbaar risico
$0,65 < f < 0,75$	acceptabel risico
$0,5 < f < 0,65$	matig risico
$f < 0,50$	groot / onacceptabel risico

In bijlage 3 is de berekende temperatuurfactor voor de verschillende varianten gegeven.

In een aantal gevallen leidt het aanbrengen van vloerisolatie of bodemisolatie tot onacceptabele verlaging van de temperatuurfactor. Dat is het geval bij:

- Isolatie van de vloer aan de boven of onderzijde bij een ongeïsoleerde gevel, detail H1 en B1. De temperatuurfactor was in dat geval al rond 0,5, maar daalt door het aanbrengen van de vloerisolatie tot een onacceptabel laag niveau.
- Bodemisolatie bij een ongeïsoleerde gevel in combinatie met isolatie van het opgaande werk in de kruipruimte. Dit effect treedt het sterkst op bij houten vloeren, detail H1 en H2.

De grootste risico's doen zich voor bij ongeïsoleerde gevels (steensmuur of ongeïsoleerde spouwmuur), in het bijzonder in combinatie met houten vloeren. In deze gevallen moet tegelijk met de vloerisolatie of bodemisolatie de buitenwand geïsoleerd worden, bij voorkeur aan de buitenzijde of in de spouw, als dat niet mogelijk is aan de binnenzijde.

7.1.5 Samenvattende vergelijking

In tabel 7.1 zijn de verschillende vloer- en bodemisolatiesystemen vergeleken op de hierboven genoemde aspecten.

Tabel 7.1 Onderlinge vergelijking vloer- en bodemisolatiesystemen

Isolatiesysteem	aantasting houten vloeren	vochtbeheersing in de kruipruimte	luchtdichtheid begane grondvloer	temperatuurfactor / koudebruggen
<i>I. Isolatie tegen de onderzijde van de bestaande vloerconstructie</i>				
- I.a vloerisolatie onder de vloer met thermoskussens+ bodemfolie ¹⁾	+	+ ¹⁾	o	o/+
- I.b vloerisolatie onder de vloer met gespoten PUR	²⁾	o	+	-/+ ⁵⁾
- I.c vloerisolatie onder de vloer met plaatmateriaal + bodemfolie ¹⁾	o ³⁾	+ ¹⁾	o	o/+
<i>II. Isolatie op de bestaande vloerconstructie</i>				
- II.a droog systeem, combinatiesysteem met vloerplaat en isolatie	-	o	o	-
- II.b nat systeem met isolatieplaat en ter plaatse vervaardigde dekvloer	-	o	+	-
<i>III. Isolatie op de bodem van de kruipruimte</i>				
- III.a bodemisolatie met zeeschelpen	o/+	+	o	o
- III.b/c bodemisolatie met kunststof-schelpen of los gestorte EPS-parels	o/+	+	o	o
- III.d bodem-hygrolatie	o/+	+ ⁴⁾	o	-/o ⁵⁾

- + gunstig
 o neutraal
 - ongunstig

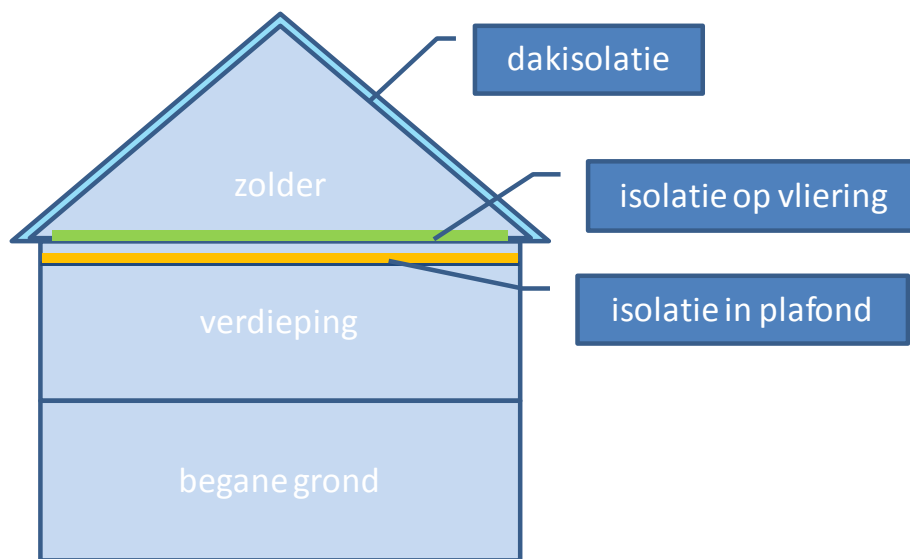
- 1) Ia en Ic in combinatie met bodemafluitende folie
 2) Onduidelijk is onder welke voorwaarden gespoten PUR probleemloos kan worden toegepast bij een houten vloer
 3) Als de houten balken volledig zijn geïsoleerd is de beoordeling in combinatie met bodemafluitende folie gunstig (+)
 4) Bij bodem-hygrolatie is het van belang dat de pakketten goed sluitend worden aangebracht
 5) Indien het opgaande werk aan de binnenzijde van de kruipruimte wordt geïsoleerd is bij ongeïsoleerde buitenwanden de situatie ongunstig (-)

7.2 Vergelijking met dakisolatie

7.2.1 Besparingskental dakisolatie

De te bereiken besparing bij dakisolatie is sterk afhankelijk van de temperatuur onder het dak. Hier wordt onderscheid gemaakt tussen een normaal verwarmde zolder, een matig verwarmde zolder en een onverwarmde zolder. Er is uitgegaan van een eengezinswoning met een hellend dak op de zolderverdieping. Er wordt onderscheid gemaakt tussen isolatie van het dak en isolatie van de zoldervloer (op de vloering of in het plafond), zie figuur 7.1. Bij al deze vormen van dakisolatie dient een adequate dampremming te worden aangebracht om vochtproblemen in de dakconstructie of op de zolderverdieping te voorkomen.

Bij een ongeïsoleerd hellend dak zijn doorgaans grote luchtlekken aanwezig. Wanneer het dak wordt geïsoleerd verbetert dan ook de luchtdichtheid. Dit effect wordt hier verder niet in rekening gebracht.



Figuur 7.1 Verschillende vormen van isolatie van de dakverdieping

Verwarmde zolder / geen zolder

Bij een *verwarmde zolder* met een gemiddelde temperatuur van 18 °C is de te bereiken besparing te bepalen met de formules die in 3.3.1 zijn gegeven voor uitwendige scheidingsconstructies:

$$B = 7,5 \cdot \Delta U$$

Waarbij:

B is de jaarlijkse energiebesparing in m³ aeq/m²

ΔU is de vermindering van de warmtedoorgangscoefficiënt in W/m²K

Matig verwarmde zolder

In de praktijk worden zolders vaak niet of beperkt verwarmd waardoor de te bereiken besparing lager wordt. Indien een zolder niet wordt verwarmd maar wel met een open trap in verbinding staat met de ondergelegen verdiepingen, is ook sprake van een matig verwarmde zolder.

Bij een matig verwarmde zolder is de te bereiken besparing:

$$B = 7,5 \cdot \Delta U \cdot (T_z - 5) / 13$$

Waarbij:

B is de jaarlijkse gasbesparing in m³/m²

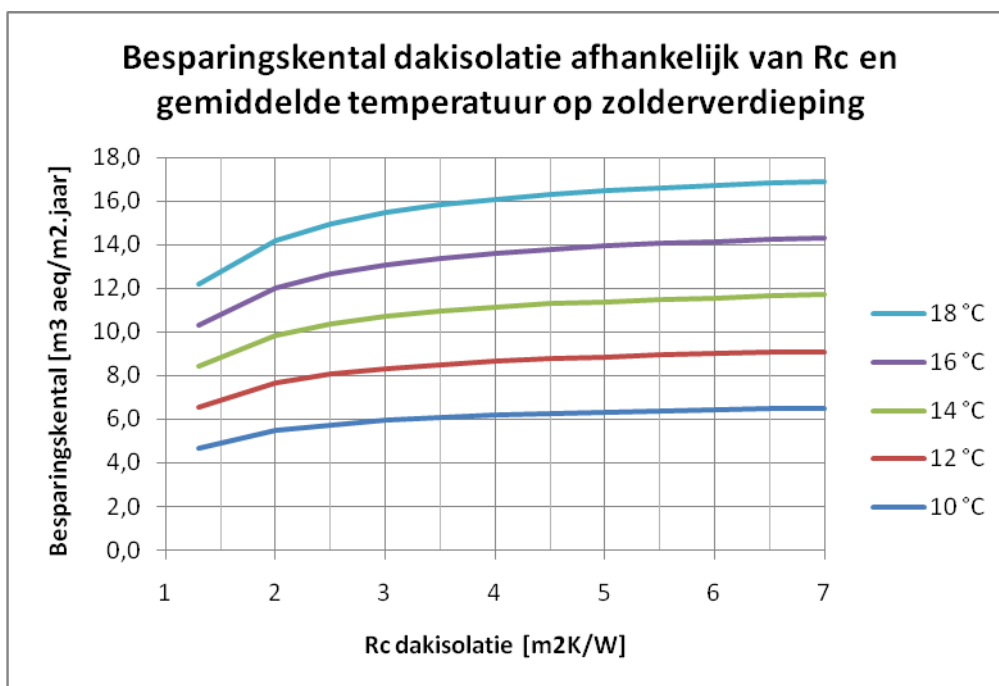
ΔU is de vermindering van de warmtedoorgangscoefficiënt

T_z is de gemiddelde temperatuur op de zolder in het stookseizoen

In figuur 7.1 is het besparingskental gegeven afhankelijk van de gemiddelde temperatuur op de zolderverdieping en de R_c -waarde van de dakisolatie. Uitgangspunt daarbij is een R_c -waarde van 0,22 m²K/W voor het ongeïsoleerde dak.

Voor een R_c -waarde van 2,5 m²K/W van het geïsoleerde dak loopt het besparingskental uiteen van 5,8 m³ aeq/m² bij een temperatuur van 10 °C tot 15 m³ aeq /m² bij een temperatuur van 18°C.

In bijlage 5 zijn de gedetailleerde berekeningsresultaten gegeven.



Figuur 7.1 Besparingskental dakisolatie afhankelijk van gemiddelde temperatuur op zolderverdieping

Onverwarmde zolders (zonder open verbinding met onderliggende ruimte)

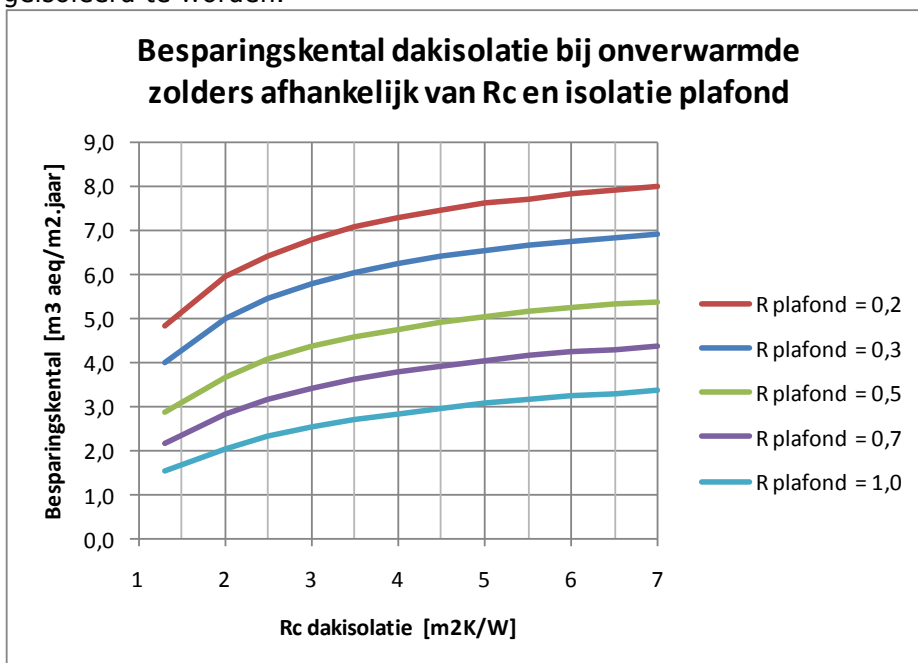
Bij een onverwarmde zolder is de te bereiken besparing onder meer afhankelijk van de warmteweerstand van de zoldervloer en de gemiddelde temperatuur van de verdieping onder de zolder.

Met een warmtebalansmodel is het warmteverlies bij verschillende situaties en isolatiepakketten berekend. De resultaten daarvan zijn in bijlage 5 gegeven.

In figuur 7.2 is het besparingskental gegeven afhankelijk van de R-waarde van de dakisolatie en de R-waarde van de isolatie op de vloering of in het plafond.

Voor een R_c -waarde van $2,5 \text{ m}^2\text{K/W}$ van het geïsoleerde dak loopt het besparingskental uiteen van $2,3 \text{ m}^3 \text{ aeq/m}^2$ bij een matig geïsoleerde vloering tot $6,4 \text{ m}^3 \text{ aeq/m}^2$ bij ongeïsoleerde vloering, uitgaande van een gemiddelde temperatuur van $16,5^\circ\text{C}$ op de bovenverdieping.

In tabel B5.5 in bijlage 5 is de besparing door isolatie van het plafond of de vloeringvloer vergeleken met de besparing door isolatie van het dak van de onverwarmde zolder. Het blijkt dat bij onverwarmde zolders het isoleren van plafond/vloering per m^2 effectiever is dan dakisolatie. Bovendien hoeft bij isolatie van plafond/vloering een minder groot oppervlak geïsoleerd te worden.



Figuur 7.2 Besparingskental dakisolatie bij onverwarmde zolders afhankelijk van de reeds aanwezige isolatie in het plafond of op de vloering

7.2.2 Vergelijking besparing vloerisolatie en dakisolatie

De te bereiken besparing door dakisolatie heeft een nog grotere spreiding dan die door vloerisolatie. In het algemeen kan met dakisolatie meer bespaard worden dan met vloerisolatie, behalve bij onverwarmde zolders met een matig geïsoleerd plafond. Deze situatie komt veel voor bij vooroorlogse meergezinswoningen in de grote steden.

Bij onverwarmde zolders is isolatie in het plafond van de bovenste verdieping of op de vloering effectiever dan dakisolatie.

8 Conclusie en aanbevelingen

8.1 Conclusies

8.1.1 Vergelijking rekenmethoden

- De nieuwe genormeerde rekenmethode op basis van EN-ISO 13370 is een internationaal erkende methode. Deze methode wordt op dit moment gezien als de meest betrouwbare praktisch hanteerbare genormeerde rekenmethode voor de bepaling van het maandelijkse warmteverlies door begane grond vloeren.
- Als de energiebesparing door vloerisolatie wordt berekend met NEN 5128/NPR 5127 leidt dit tot een zeer lage besparing van circa $0,3 \text{ m}^3 \text{ aeq/m}^2$. Dit wordt veroorzaakt doordat forfaitaire waarden voor ψ volgens NPR 2068 worden gebruikt, die niet geschikt zijn voor toepassing bij ongeïsoleerde vloeren. De methode NEN 5128 / NPR 2068 geeft daardoor een sterke onderschatting van de te bereiken besparing bij ongeïsoleerde vloeren.
- Geen van de genormeerde rekenmethoden brengt het warmtetransport als gevolg van verdamping in de kruipruimte in rekening. Bij ongeïsoleerde vloeren boven geventileerde kruipruimtes is het effect op het energieverlies door de vloer substantieel. Bij geïsoleerde vloeren en/of zwak geventileerde kruipruimtes is dit effect verwaarloosbaar.
- De methode EN-ISO 13370 heeft ten opzichte van de huidige NEN 1068 de volgende verfijningen:
 - o het dynamisch gedrag als gevolg van de traagheid van het grondpakket wordt in rekening gebracht bij de berekening van het maandelijks warmteverlies
 - o de plaats van de vloerisolatie in relatie tot de kruipruimteventilatie wordt in rekening gebracht.
- Uit een vergelijking op onderdelen met een meer gedetailleerde berekening m.b.v. Trisco blijkt dat de berekening volgens EN-ISO 13370 voldoende nauwkeurig is voor het bepalen van de warmteverliezen via de begane grondvloer.

8.1.2 Effect setpointtemperatuur

- Het effect van verhoging van de setpointtemperatuur bij ongeïsoleerde vloeren leidt tot een verhoging van energiegebruik voor verwarming van 5 tot 10% voor de gehele woning. Voor slecht geïsoleerde woningen komt dat omgerekend neer op 2 m^3 aardgas per m^2 vloer, bij goed geïsoleerde woningen is dat circa $0,5$ à 1 m^3 aardgas per m^2 vloer.
- Een ander daarmee samenhangend effect is dat de gemiddelde temperatuur in de gehele woning doorgaans lager ligt dan de gemiddelde temperatuur op de begane grond. Het warmteverlies door de begane grondvloer kan hierdoor tot 10% hoger liggen dan op basis van de gemiddelde woningtemperatuur van 18°C wordt berekend.
- De twee bovengenoemde effecten zijn afhankelijk van de woningeigenschappen (mate van isolatie, aantal bouwlagen) en het bewonersgedrag.

- In 5.3 is een voorstel geformuleerd om Ontwerp NEN 7120 aan te passen zodat het effect van verhoging van de setpointtemperatuur bij ongeïsoleerde vloeren in rekening wordt gebracht.
- Het effect van de setpointtemperatuur kan ook in het maatwerkadvies EPW [15] worden opgenomen.

8.1.3 Berekende besparing vloerisolatie

- De berekende besparing bij vloerisolatie met een R_c van $2,5 \text{ m}^2\text{K/W}$ loopt uiteen van $2,5 \text{ m}^3 \text{ aeq per m}^2$ bij een tussenwoning tot $4,5 \text{ m}^3 \text{ aeq /m}^2$ bij een vrijstaande woning.
- Als gevolg van de verlaging van de setpointtemperatuur kan daar nog $0,5$ tot $2 \text{ m}^3 \text{ aeq per m}^2$ bij komen, zie 5.4.
- Bij een zeer vochtige kruipruimtebodemp kan de besparing nog circa $1 \text{ m}^3 \text{ aeq /m}^2$ toenemen vanwege het effect van de verdamping, zie 3.2.3.
- Als de kruipruimteventilatie wordt beperkt, tegelijk met het aanbrengen van de isolatie, kan de besparing tot $0,7 \text{ m}^3 \text{ aeq per m}^2$ toenemen, zie 4.2.3.

8.1.4 Berekende besparing bodemisolatie

- De berekende besparing bij bodemisolatie met een R van 3 à $4 \text{ m}^2\text{K/W}$ loopt uiteen van $2 \text{ m}^3 \text{ aeq per m}^2$ bij een tussenwoning tot $3,5 \text{ m}^3 \text{ aeq /m}^2$ bij een vrijstaande woning. Als ook het de kruipruimtetewand wordt geïsoleerd is de besparing circa $0,7 \text{ m}^3 \text{ aeq/m}^2$ hoger. Zie 4.2.1. De kruipruimtetewand dient bij voorkeur in de spouw of aan de buitenzijde te worden geïsoleerd.
- Als gevolg van de verlaging van de setpointtemperatuur kan daar nog $0,5$ tot $1,0 \text{ m}^3 \text{ aeq per m}^2$ bij komen, zie 5.4.
- Bij een zeer vochtige kruipruimtebodemp kan de besparing nog circa $1 \text{ m}^3 \text{ aeq /m}^2$ toenemen vanwege het effect van de verdamping, zie 3.2.3.
- Als de kruipruimteventilatie wordt beperkt, tegelijk met het aanbrengen van de isolatie, kan de besparing tot $1,0 \text{ m}^3 \text{ aeq per m}^2$ toenemen, zie 4.2.3.

8.1.5 Vergelijking berekende besparingen vloer- en bodemisolatie

- Bij gelijke warmteweerstand R van de isolatie bespaart vloerisolatie meer dan bodemisolatie, indien de kruipruimtetewand ongeïsoleerd is, maar ook als de kruipruimtetewand tegelijk met het aanbrengen van de vloer- of bodemisolatie geïsoleerd wordt. Als de kruipruimtetewand al geïsoleerd is, is deze conclusie niet te trekken.

8.1.6 Vergelijking met praktijkmetingen

- Gewogen naar steekproefgrootte komen uit de praktijkmetingen de volgende gemiddelde besparingscijfers:

Vloerisolatie	$7,4 \text{ m}^3 \text{ aeq/m}^2$
Bodemisolatie	$3,8 \text{ m}^3 \text{ aeq/m}^2$
Gemiddelde van vloer- en bodemisolatie	$6,7 \text{ m}^3 \text{ aeq/m}^2$
- Als het effect van de setpointtemperatuur en verdamping in rekening wordt gebracht is de gemiddeld berekende besparing bij vloerisolatie 4 tot $7 \text{ m}^3 \text{ aeq per m}^2$ en bij

bodemisolatie 3 tot 5 m³ aeq per m² en dat ligt binnen de bandbreedte van de gemeten besparingen bij de praktijkmetingen.

8.1.7 Vergelijking met dakisolatie

- In het algemeen kan met dakisolatie meer bespaard worden dan met vloer- of bodemisolatie, behalve bij onverwarmde zolders met een matig geïsoleerd plafond.
- Bij onverwarmde zolders is isolatie in het plafond van de bovenste verdieping of op de vliering effectiever dan dakisolatie.

8.2 Voorstel voor aan te houden besparingskentallen

Uit de variantberekeningen volgens NEN-EN-ISO 13370 zijn voor tussenwoningen de volgende gemiddelde besparingskentallen afgeleid:

Type isolatie	Warmte- weerstand van de isolatie R [m ² K/W] 1)	Gemiddelde besparing m ³ aeq/m ² vloer	
		kruipruimtetwand ongeïsoleerd	kruipruimtetwand geïsoleerd tegelijk met aanbrengen vloer/bodemisolatie 2)
vloerisolatie isolatie op of onder tegen de vloerconstructie	1,0	2,0	2,2
	2,0	2,7	2,8
	3,0	3,2	3,3
	4,0	3,6	3,7
bodemisolatie isolatie op de bodem van de kruipruimte	2,5	1,9	2,6
	3,0	2,0	2,7
	3,5	2,2	2,9
	4,0	2,3	3,0
	4,5	2,4	3,1

1) Voor tussenliggende R-waarden mag worden geïnterpoleerd.

2) Het isoleren van de kruipruimtetwand aan de binnenzijde kan bij een ongeïsoleerde buitenwand/fundering de koudebrugwerking fundering versterken, zie 7.1.4.

Deze besparingsgetallen gelden voor een gemiddelde situatie uitgaande van een correcte uitvoering, waarbij eventuele bestaande gebreken zoals grote luchtlekken in de begane grondvloer of open verbinding tussen kruipruimte en de spouw zijn hersteld.

Toeslag voor hoekwoningen en vrijstaande woningen

Voor hoekwoningen en vrijstaande woningen kan de volgende toeslag op de besparing worden gerekend in $\text{m}^3 \text{ aeq}/\text{m}^2$:

woningtype	Vloerisolatie	Bodemisolatie
Hoekwoningen of 2-onder-1- kap	+1,0	+0,7
Vrijstaande woningen	+2,0	+1,5

Toeslag voor verhoging setpointtemperatuur

Voor besparingseffect als gevolg van de mogelijke verlaging van de setpointtemperatuur kan de volgende toeslag worden gerekend in $\text{m}^3 \text{ aeq}/\text{m}^2$:

woningtype	Vloerisolatie	Bodemisolatie
eengezinswoning	+1,0	+0,5
appartement	+0,7	+0,3

Toeslag voor verdamping in vochtige kruipruimtes

Als in de huidige situatie de kruipruimte vochtig is en geventileerd wordt kan voor het effect van de verdamping een extra besparing van $1 \text{ m}^3 \text{ aeq}/\text{m}^2$ in rekening worden gebracht.

Toeslag bij vermindering kruipruimteventilatie

De besparingskentallen zijn er op gebaseerd dat de kruipruimteventilatie zowel voor als na het isoleren gelijk zijn aan de gemiddelde waarde van $400 \text{ mm}^2/\text{m}^2$. Als in de huidige situatie de kruipruimte sterk wordt geventileerd ($1000 \text{ mm}^2/\text{m}^2$ of meer) en dit na isolatie wordt teruggebracht tot $400 \text{ mm}^2/\text{m}^2$ of minder dan kan bij vloer- en bodemisolatie een extra besparing van $0,5 \text{ m}^3 \text{ aeq}/\text{m}^2$ in rekening worden gebracht. Als de kruipruimteventilatie nog verder wordt teruggebracht tot $100 \text{ mm}^2/\text{m}^2$ kan bij bodemisolatie nog een extra besparing van $0,3 \text{ m}^3 \text{ aeq}/\text{m}^2$ in rekening worden gebracht.

8.3 Aanbevelingen voor nader onderzoek

Praktijkmetingen

Om een einde te kunnen maken aan het grondige verschil van mening tussen de leveranciers van verschillende isolatiesystemen over de effectiviteit van vloer- en bodemisolatie en de aanhoudende discussies over de betrouwbaarheid van de beschikbare rekenmethoden zijn nieuwe praktijkmetingen noodzakelijk. Deze praktijkmetingen dienen grootschalig te worden opgezet, waarbij het jaarlijks energiegebruik met en zonder vloer- of bodemisolatie wordt gemeten volgens een vooraf door de verschillende brancheorganisaties goedgekeurde methodiek.

Hierbij dienen verschillende vloer- en bodemisolatiesystemen te worden vergeleken bij verschillende woningtypes.

Verder is behoefte aan meer gedetailleerde praktijkmetingen gericht op de volgende specifieke aspecten:

- Het effect van verdamping in de kruipruimte
- Het effect van verlaging van de setpointtemperatuur
- De werkelijke kruipruimteventilatie voor en na het aanbrengen van isolatie

Aanbevelingen voor aanpassing EN-ISO 13370 en NEN 7120

Het verdient aanbeveling de genormeerde berekeningsmethode EN-ISO 13370 ten behoeve van bestaande woningen aan te vullen met een bepalingmethode voor het effect van verdamping in de kruipruimte.

Het verdient aanbeveling in de berekening van het energieverbruik volgens NEN 7120 voor bestaande woningen met ongeïsoleerde vloeren het effect van de verhoogde setpointtemperatuur als gevolg van de koude vloertemperatuur gedurende gebruiksuren op te nemen.

Literatuur

1. NEN 1068:2001 Thermische isolatie van gebouwen
2. Rapport "Besparing door bodem- en vloerisolatie bij woningen" Cauberg-Huijgen in opdracht van SenterNovem, 2007
3. Ontwerpnorm NEN 7120 Energieprestatie van gebouwen EPG
4. NEN-EN-ISO 13370:2008 Thermische eigenschappen van gebouwen - Warmte-overdracht via de grond – Berekeningsmethoden
5. NEN-EN-ISO 10211 :2008 Koudebruggen in gebouwen - Warmtestromen en oppervlakte-temperaturen - Gedetailleerde berekeningen
6. Hagentoft. C. Heat loss to the ground from a building. Lund Institute of Technology, Sweden, 1988
7. Rapport Aanpassing berekening vloerverliezen NEN 1068, CDC, 2009
8. J.J. van Waaij. Afstudeerverslag vloerverliezen. Hogeschool Utrecht , 2009
9. Lichtveld , W.J. Warmtetransport via de grond. Artikel Bouwfysica 1999-1 pp 18-25.
10. Castenmiller, C.J.J. Maatregelen in kruipruimten. Thermische en hygrische afscherming. SBR Richtlijn 4. 1993
11. Castenmiller, C.J.J. Het effect van bodem of vloerisolatie in de kruipruimte op het warmteverlies via de begane grondvloer. TNO-rapport 2001-BT -HT -RO191
12. Menkveld M. e.a. Besparingskentallen voor besparing in de bestaande woningbouw, ECN/RIGO ECN-E--09-074 November 2009
13. Energiegedrag in de woning. Aanknopingspunten voor de vermindering van het energiegebruik in de woningvoorraad. Ministerie van VROM
14. DGMR/SenterNovem. Binnentemperatuur bij EPA-W berekeningen. 2006
15. ISSO Publicatie 82.2 Handleiding EPA-W "Maatwerkadvies", 2007
16. ISSO Publicatie 82.3 Handleiding EPA-W "Formulestructuur", 2009
17. NEN-EN-ISO 6946 Componenten en elementen van gebouwen - Warmteweerstand en warmtedoorgangscoefficient – Berekeningsmethode
18. Ham, E.R. van den en J.G. Ackers. Radon in het binnenmilieu. Bouwfysica, vol 3 1992-1.
19. Schaap, L.E.J.J. Stratego 17. Een praktijkonderzoek naar maatregelen tegen radontoevoer uit de kruipruimte. Bouwfysica Vol. 9 1998-2.

Bijlagen:

1. Artikel Warmtetransport via de grond

Lichtveld , W.J. Warmtetransport via de grond. Artikel Bouwfysica 1999-1 pp 18-25,
inclusief rectificatie figuur 8 (Bouwfysica 1999/2 pp 4)

WETENSCHAPPELIJKE ARTIKEL EN

Warmtetransport via de grond

ir. W. J. Lichtveld

Inleiding

In Bouwfysica 98/3 [1] ging ik kort in op de internationale norm NEN EN ISO 13370 [2], die binnenkort verschijnt. Hierin worden de berekeningsmethoden gegeven voor het warmtetransport via de aan de grond grenzende uitwendige scheidingsconstructie van een gebouw. Omdat deze norm sterk afwijkt van de in ons land toegepaste berekening van de gemiddelde U -waarde voor vloeren [3,4] is een uitvoeriger bespreking op zijn plaats. Het warmtetransport in de grond is 3-dimensionaal en niet-stationair. Een daarbij passende berekening is echter dermate omvangrijk dat ze ongeschikt is om onderdeel te vormen van een transmissieberekening. Er zijn daarom enkele vereenvoudigingen noodzakelijk die elk voor zich om een rechtvaardiging vragen. Achtereenvolgens worden de numerieke 3D-methode, de numerieke 2D-methode en de handrekenmethoden besproken. In dit artikel wordt veelvuldig verwezen naar [5]. Mijn werkzaamheden in het kader van de Europese normalisatie werden mogelijk gemaakt door NOVEM bv. LBP te Utrecht was zo vriendelijk de voor het rekenvoorbeeld noodzakelijke numerieke berekeningen voor mij uit voeren.

Beperkingen van het stationaire model*Niet-stationaire effecten*

Aangezien de warmtetransportvergelijkingen lineair zijn, kunnen de oplossingen van de stationaire en de periodieke component gesuperponeerd worden. Voor de berekening van de stationaire component moet voor de buitenlucht de gemiddelde jaartemperatuur worden aangehouden. De vraag is welk effect de niet-stationaire component op de warmteverliezen gedurende een stookseizoen heeft.

De grond onder het gebouw heeft een dermate grote thermische traagheid dat zich in de bodem nooit een stationaire temperatuurverdeling voor kan doen. Voor een sinusvormige variatie van de buitentemperatuur wordt in het vrije veld de periodieke indringdiepte d_0 , de diepte waar de temperatuuramplitude met een factor 0,37 (e^{-1}) is gedaald, gegeven door:

$$d_0 = \sqrt{\frac{a \cdot t_0}{\pi}} \quad (m) \quad (1)$$

met:

a is de temperatuurvereffeningscoëfficiënt (ca. $10^{-6} \text{ m}^2/\text{s}$);
 t_0 is de periode van de sinus (s).

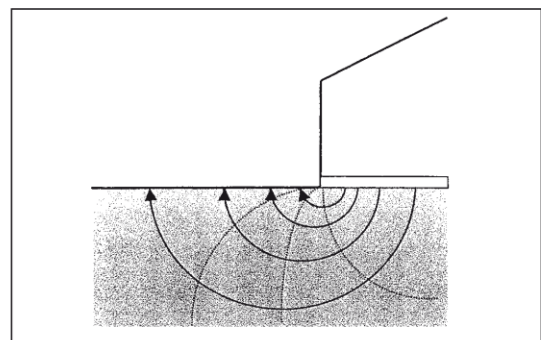
De grootste periodieke indringdiepte in het vrije veld wordt veroorzaakt door de variatie in de gemiddelde maandtemperaturen gedurende een jaar en bedraagt ca. $d_0 = 3 \text{ (m)}$, waarbij een faseverschuiving van ongeveer 2 maanden optreedt. In de horizontale richting onder de vloer treedt een sterkere demping van de temperatuuramplitude op dan verticaal in het vrije veld, omdat er een zijdelingse warmte-uitwisseling met de vloer optreedt. De invloedzone van de periodieke component blijft daardoor tot een vrij smalle randstrook beperkt [5].

Hoewel de periodieke component over een jaar gemiddeld geen netto effect heeft op de warmteverliezen, is dat anders wanneer het stookseizoen langer of korter duurt dan 6 maanden. Ook kortdurende extreem lage buitentemperaturen (pulsen) worden niet volledig gecompenseerd door zomerse hittegolven zodat het jaarlijks warmteverlies ten gevolge van niet-stationaire effecten met enkele procenten kan worden verhoogd [5]. Een éénmalig effect is de optredende opwarming van de grond onder het gebouw tijdens de eerste stookseizoenen. Het duurt voor vloervelden met een kleinste afmeting van ca. 10 m ongeveer een jaar, en voor veel grotere vloervelden tot ongeveer 3 jaar alvorens een min of meer stationaire temperatuurverdeling onder de vloer is bereikt. De hiermee gemoeide extra warmteverliezen, vergeleken met de stationaire warmteverliezen gedurende één stookseizoen bedragen voor kleinere vloervelden ca. 10%. Voor grotere vloervelden is de invloed uiteraard groter en kunnen zij tot ca. 20% oplopen. Deze effecten zijn binnen de levensduur van een gebouw echter verwaarloosbaar klein.

Deze korte introductie maakt duidelijk waarom in NEN EN ISO 10211-1 [6] een onderscheid moest worden gemaakt tussen de berekening van de minimale binnenoppervlaktetemperatuur, waarbij de randzone in de winter het meest kritisch is, en de warmteverliesberekening, waarbij de gemiddelde warmteverliezen van de gehele vloer over een stookseizoen bepaald moeten worden.

Randvoorwaarden voor het stationaire geval

Voor de stationaire berekening moet als buitenluchttemperatuur de gemiddelde jaartemperatuur worden genomen ($9,3^\circ\text{C}$). Op voldoende afstand van het warmtedoorlatende vloerveld heersen dan nagenoeg adiabatische condities (figuur 1). Er zijn dus maar twee randtemperaturen in het geding, de binnentemperatuur θ_i en de jaargemiddelde buitentemperatuur θ_e . Dit maakt het mogelijk de thermische eigenschappen van een vloer inclusief de grond uit te drukken in grootheden die onafhankelijk zijn van het temperatuurverschil ($\theta_i - \theta_e$). De belangrijkste grootheden zijn de thermische koppelingcoëfficiënt L_s (overeenkomend met de specifieke warmteverliesfactor in W/K) en de gemiddelde warmtedoorgangcoëfficiënt U_g ($\text{W/m}^2\cdot\text{K}$) van de vloer.



Figuur 1 De warmtestroomlijnen in de grond

De stationaire driedimensionale numerieke berekening

De quasi-adiabatische grenzen in de grond

Bij de toepassing van een eindige elementenmethode moet de half-oneindige bodem vervangen worden door een eindig volume grond. Aangezien in het model de grenzen in de grond adiabatisch zijn, moeten deze grenzen op voldoende afstand van het warmtedoorlatende vloerveld blijven. Buitensporig grote afstanden zijn in een stedelijke omgeving echter ook niet realistisch. In figuur 1 vormen de warmtestroomlijnen adiabatische grenzen. Uit de figuur blijkt, dat het vervangen van de half-oneindige bodem door een eindig volume grond slechts invloed heeft op de warmtestroom vanuit het midden van de vloer, waar de warmtestroomdichtheid het laagst is. Teneinde de fout in de berekende warmtestroom ten gevolge van de eindige afmetingen van de grond tot minder dan 0,5% te beperken, zijn in NEN EN ISO 10211-1 [6] de onderstaande minimale afmetingen voor het grondvolume voorgeschreven (zie figuur 2):

- in horizontale richting binnen het gebouw: $0,5 B'$;
- in horizontale richting buiten het gebouw: $2,5 B'$;
- in verticale richting buiten het gebouw: $2,5 B'$.

waarbij:

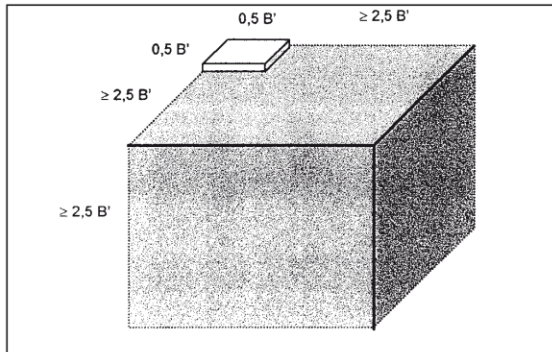
$$B' = \frac{2A}{P} \quad (2a)$$

met:

B' is de karakteristieke vloerafmeting (m);

A is de (binnenwerkse) oppervlakte van de vloer (m^2);

P is de (binnenwerkse) omtrek van het vloerveld (m).



Figuur 2 Afmetingen van het rekenmodel

De quasi-adiabatische vlakken in de constructie

In navolging van NEN EN ISO 13370 [2] ligt de grens van het in aanmerking te nemen deel van de uitwendige scheidingsconstructie horizontaal ter hoogte van de bovenkant van de vloer. Dit afsnijvlak is echter in werkelijkheid verre van adiabatisch. Het geometrische model dient daarom een deel van de gevels te omvatten. Vervolgens wordt de onderstaande correctie toegepast (zie ook figuur 6):

$$L_s = L^{3D} - h_w \cdot P \cdot U_w \quad (W/K) \quad (3)$$

met:

L_s is de thermische koppelingcoëfficiënt van de vloer (W/K);

L^{3D} is de berekende thermische koppelingcoëfficiënt van het model (W/K);

h_w is de hoogte van de in het model opgenomen deel van de gevel (m);

P is de omtrek van het vloerveld (m);

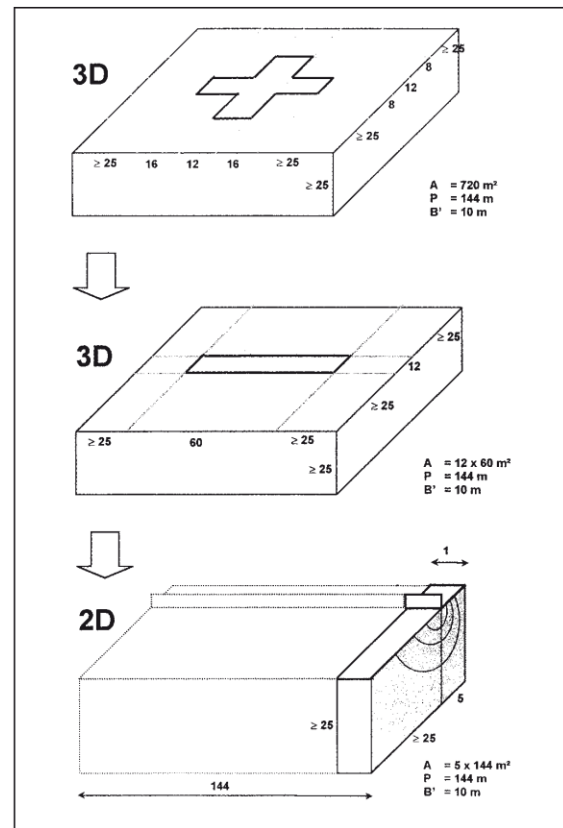
U_w is de warmtetransmissiecoëfficiënt van de boven de vloer liggende gevel ($W/m^2 \cdot K$).

Op deze wijze wordt de lineaire thermische brug tussen gevel en vloer toegerekend aan de berekende waarde van L_s .

Bruikbaarheid van NEN EN ISO 10211-1

NEN EN ISO 10211-1 [6] beschrijft de stationaire numerieke 3D-berekening. Omdat met deze norm de thermische prestatie van bouwkundige details met grote nauwkeurigheid wordt bepaald, dient de bouwkundige constructie zeer gedetailleerd in een geometrische model te worden omgezet. Voor een geheel vloerveld ontstaat er dan een verfijnd, maar onhanteerbaar groot geometrisch model. Voor de bepaling van de gemiddelde U -waarde van een vloer is die procedure dus ongeschikt. De numerieke 3D-methode kan daarom vooral een functie hebben als referentie-methode voor andere rekenmethoden. Dit heeft echter alleen zin wanneer het geometrische 3D-model kan worden gestileerd tot hetzelfde niveau als voor de vereenvoudigde methoden van toepassing is.

Voor het vormen van een gestileerd 3D-model kwam de vraag aan de orde of de vloervorm is te vereenvoudigen zonder noemenswaardige gevolgen voor het resultaat.



Figuur 3 Boven naar midden: de transformatie van het 3D-model. Midden naar onder: de transformatie van het 3D-model naar het 2D-model. $B' = 10$ (m).

Vereenvoudiging van de vloervorm

Figuur 1 laat zien dat de warmteverliezen via de grond kwalitatief zijn te scheiden in een randcomponent, waarbij de relatieve invloed van de warmteweerstand van de bodem beperkt is, en een oppervlaktecomponent waarbij de invloed ervan vrij groot is. Wil men de fout ten gevolge van een vereenvoudiging van de vloervorm minimaal houden dan dient zowel de omtrek P (m) als de oppervlakte A (m²) van de vloer ongewijzigd te blijven. De werkelijke vloervorm wordt dan getransformeerd in een rechthoek. Figuur 3 geeft (bovenste naar middelste afbeelding) een voorbeeld van de transformatie van het 3D-model.

In [5] wordt uitvoerig op deze transformatie ingegaan. Op grond van de semi-analytische oplossing voor de transmissie door een rechthoekige vloerplaat met adiabatische randen en afmetingen $l \times B$ (m²) ontstaan de volgende uitdrukkingen voor L_s , respectievelijk U_g :

$$L_s = \lambda \cdot l \cdot h_s \quad (\text{W/K}) \quad (4)$$

$$U_g = \frac{\lambda \cdot h_s}{B} \quad (\text{W/m}^2 \cdot \text{K}) \quad (5)$$

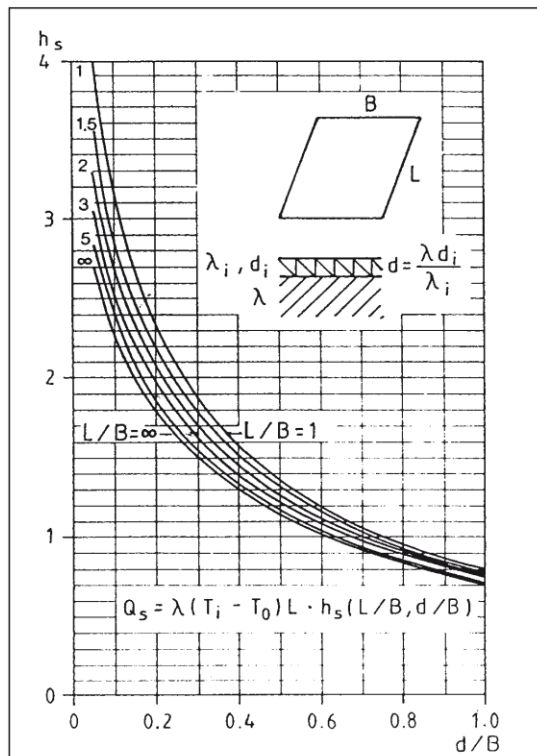
met:

λ is de warmtegeleidingscoëfficiënt van de grond (W/m.K);

l is de grootste afmeting van de plaat (m);

B is de kleinste afmeting van de plaat (m);

h_s is een dimensieloze warmteverliesfactor (figuur 4).



Figuur 4 Warmteverliesfactor h_s (l/B , d/B), $R_{se}=0$, $d=\lambda(R_{vi}+R_{si})$ [5]

Figuur 4 geeft dimensieloze parameters en is gebaseerd op de numerieke oplossing van analytische vergelijkingen. In de figuur stelt d (m) de dikte voor van een fictieve grondlaag met een warmteweerstand die gelijk is aan die van de vloer inclusief de overgangweerstand R_{si} . Aangezien dit enigszins verwarrend is splitsen wij deze warmteweerstand en schrijven wij voor d in het vervolg d_i :

$$d_i = \lambda (R_{vi} + R_{si}) \quad (\text{m}) \quad (6)$$

Tabel 1 geeft een indruk van het effect van de vloervorm op U_g voor een vloer op staal met $d_i = 5,7$ m. Dit komt bijvoorbeeld overeen met $\lambda = 2$ (W/m.K) en $(R_{vi} + R_{si}) = 2,85$ (m².K/W). In de tweede kolom is de karakteristieke vloerafmeting B' vermeld:

$$B' = \frac{2A}{P} = \frac{l \times B}{l + B} \quad (\text{m}) \quad (2b)$$

Tabel 1 U_g als functie van de vloervorm

($A = 1600$ m², $d_i = 5,7$ m) volgens de 3D-berekening

$l \times B$ (m ²)	B' (m)	d_i/B	l/B	h_s (figuur 4)	L_s (W/K)	U_g (W/m ² · K)
40 × 40	20	0,143	1	2,75	220	0,138
80 × 20	16	0,285	4	1,65	264	0,165
120 × 13,3	12	0,428	9	1,30	312	0,195

Uit tabel 1 blijkt dat bij gelijkblijvende oppervlakte van de plaat, de waarde van het totale specifieke warmteverlies L_s , toeneemt naarmate de vorm sterker afwijkt van het vierkant. De waarde van U_g is ongeveer omgekeerd evenredig met $(B')^{0,5}$. Verder zal uit figuur 5 blijken, dat alle mogelijke waarden van U_g voor identieke vloeren met een gelijke karakteristieke vloerafmeting B' , binnen een marge van ca. 10% vallen. De meeste vloeren hebben een grillige vorm, waardoor er na transformatie een langgerekte rechthoek ontstaat. De gemaakte fout is dan ruimschoots minder dan 10%. In het aan het eind van dit artikel gegeven rekenvoorbeeld (tabel 2) blijkt de berekende fout ten gevolge van de transformatie volgens figuur 3 ca. 4% te bedragen.

De stationaire tweedimensionale numerieke berekening

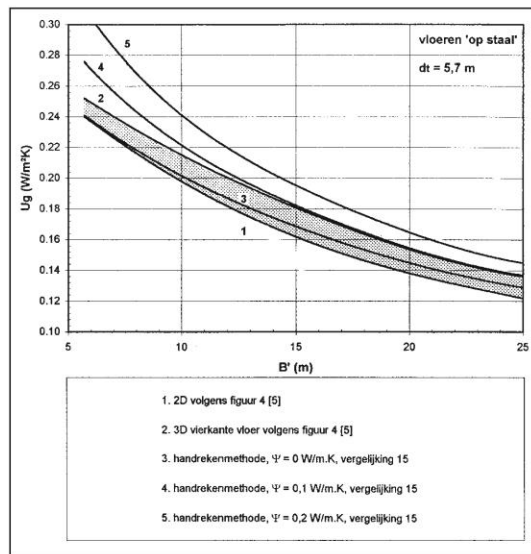
Transformatie van rechthoek naar strook

Voor de toepassing van een numerieke 2D-berekening wordt het rechthoekige veld omgezet in een strook met lengte P en breedte $0,5 B'$, zodat de oppervlakte van de vloer ongewijzigd blijft. Deze transformatie is in figuur 3 (onderste afbeelding) weergegeven.

Hierboven is al aangetoond dat de berekende waarden van L_s respectievelijk U_g toenemen wanneer het vloerveld na transformatie langwerpiger wordt. De met een 2D-model berekende waarden van U_g zijn dus altijd hoger dan de met een 3D-model berekende waarden. Ze vormen het limietgeval voor een zeer langwerpig 3D-model. In figuur 4 zijn de met een numerieke 2D-berekening gevonden waarden van h_s aangegeven met de curve $l/B = \infty$.

Figuur 5 is afgeleid van figuur 4 en geeft de waarden van U_g als functie van B' voor de limietgevallen van een vierkante (curve 2), respectievelijk een tot 2D-strook getransformeerde vloer (curve 1) met $d_i = 5,7$ m. De resultaten van de 3D-berekeningen

voor alle mogelijke vloervormen moeten dus tussen beide curven liggen. De 2D-berekeningen geven de “veilige waarden”. Een blok eengezinswoningen, een woongebouw en de meeste kantoorgebouwen hebben na transformatie een langwerpige vorm, zodat een 2D-berekening doorgaans slechts een geringe overschatting van U_g veroorzaakt. Dit blijkt ook uit het rekenvoorbeeld (tabel 2): de fout ten gevolge van deze tweede transformatie bedraagt minder dan 0,4%.



Figuur 5 U_g als functie van B' voor vloeren op staal ($d_t = 5,7$ m) volgens figuur 4 [5] en volgens de handrekenmethode [2]

Het 2D-rekenmodel

In het 2D-model zijn alle grenzen adiabatisch behalve naar de binnen- en buitenlucht. Naar analogie van het 3D-rekenmodel moet gecorrigeerd worden voor het deel van de gevel dat in het model is opgenomen (zie ook figuur 6). Voor een funderingsrand bestaande uit secties met verschillende doorsneden vinden we:

$$L_s = \Sigma P_i (L_i^{2D} - h_w \cdot U_{w,i}) \quad (W/K) \quad (7)$$

met:

- L_s is de thermische koppelingcoëfficiënt van de vloer (W/K);
- P_i is het deel van de omtrek met uniforme doorsnede (m);
- L_i^{2D} is de lineaire koppelingcoëfficiënt voor de doorsnede, berekend met het 2D-model (W/m.K);
- h_w is de hoogte van het in het model opgenomen deel van de gevel (m);
- $U_{w,i}$ is de warmtetransmissiecoëfficiënt van de boven de vloer liggende gevel (W/m².K).

Voor de minimale afmetingen van de grond gelden dezelfde criteria als gegeven zijn in figuur 2. Uit (7) berekenen we (voor een homogeen randdetail) de gemiddelde warmte-doorgangcoëfficiënt U_g van de vloer volgens:

$$U_g = \frac{L_s}{A} = \frac{2 (L_i^{2D} - h_w \cdot U_{w,i})}{B'} \quad (W/m^2.K) \quad (8)$$

De funderingskoudebrug

Tot nu toe is het effect van transformaties voor vloervelden met adiabatische randen besproken. De bijdrage van de transmissie via het concrete funderingsdetail is daarbij genegeerd. Zoals hiervoor is opgemerkt, is de transmissie via de randen vrijwel evenredig met de omtrek P van het vloerveld, zodat de getrokken algemene conclusies over het effect van de transformaties op de berekende waarde van U_g ook geldig blijven voor reële vloerconstructies.

Het grote voordeel van de numerieke 2D-berekening ten opzichte van de handrekenmethode is de mogelijkheid om het concrete funderingsdetail in de berekening op te nemen. Ook wanneer de omtrek uit secties met verschillende funderingsdetails bestaat, is de berekening goed uit te voeren.

De geventileerde kruipruimte

Lange tijd was het een probleem om een holte binnen een constructie thermisch correct in het geometrisch rekenmodel op te nemen. Voor spouwen kan worden volstaan met een equivalente λ -waarde. Voor een holte met rechthoekige doorsnede zou men al moeten werken met anisotrope λ -waarden. Holten met een grillige vorm of een lage emissiecoëfficiënt, zoals in raamprofielen voorkomen, maken een andere aanpak noodzakelijk. Er moet dan een warmtebalans voor de holte worden opgesteld, die gebaseerd is op de stralingsuitwisseling tussen de begrenzingen en de convectieve warmteoverdracht naar de lucht binnen de holte. De luchttemperatuur in de holte wordt daarbij verondersteld homogeen te zijn. Uit de warmtebalans volgen de oppervlaktetemperaturen van de holte, c.q. de warmtestroomverdeling. Daarmee is de holte in het geometrisch model geïntegreerd. Inmiddels bestaat er een 2D-programma dat deze operaties binnen een subroutine uitvoert [8].

Voor een geventileerde kruipruimte moet in de warmtebalans een negatieve warmtebron worden opgenomen. Voor de stationaire situatie en een homogene kruipruimtetemperatuur bedraagt de bronsterkte:

$$Q_v = -p \cdot c_p \cdot V' (\theta_k - \theta_e) \approx -1230 V' (\theta_k - \theta_e) \quad (W) \quad (9)$$

met:

- V' is het ventilatievoud van de kruipruimte (m³/s);
- θ_k is de jaargemiddelde kruipruimtetemperatuur (°C);
- θ_e is de jaargemiddelde buitentemperatuur (°C).

NEN EN ISO 13370 [2] geeft voor een natuurlijk geventileerde kruipruimte:

$$V' = 0,59 \cdot \varepsilon \cdot v \cdot f_w \cdot P \quad (m^3/s) \quad (10)$$

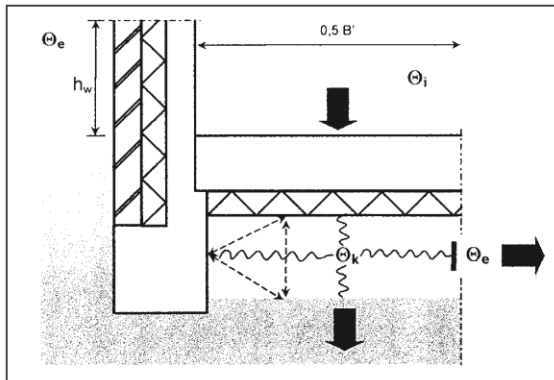
met:

- ε is de oppervlakte van de ventilatie openingen per strekkende meter van de buitenwand (m²/m);
- v is de gemiddelde windsnelheid op 10 m hoogte (m/s);
- f_w is de beschuttingsfactor (gemiddeld 0,05);
- P is de omtrek van de kruipruimte (m).

Gezien de onzekerheden in de parameters zal men met forfaitaire waarden moeten werken. De bronsterkte bedraagt dan ongeveer (zie getallenvoorbeeld in het kader):

$$Q_v = -0,2P (\theta_k - \theta_e) \quad (W) \quad (11)$$

Deze bron is in een 2D-berekening op eenvoudige wijze in de warmtebalans van een kruipruimte te simuleren door een virtuele strip met vaste hoogte h , gedacht aan de adiabatische achterzijde van de kruipruimte (zie figuur 6). Deze virtuele strip krijgt de buitentemperatuur θ_e opgedrukt en wordt thermisch door een convectieve warmte-overgangscoefficiënt van (in dit voorbeeld) $0,2/h$ ($W/m.K$) aan de kruipruimtelucht gekoppeld. Door de virtuele strip een emissiecoëfficiënt $\epsilon = 0$ te geven beïnvloedt dit element slechts de (homogene) luchttemperatuur en niet de stralingsuitwisseling binnen de holte. Hiermee is de gewenste “thermal sink” aangebracht. Omdat de virtuele strip slechts een functie heeft binnen de subroutine ter berekening van θ_k , vormt hij geen onderdeel van het geometrisch model.



Figuur 6 Warmtebalans in een kruipruimte (2D) met temperatuur θ_k . De virtuele strip (rechts) met hoogte h en temperatuur θ_e simuleert het extra warmteverlies door ventilatie.

Hanteerbaarheid van de 2D numerieke methode

Sinds enkele jaren bestaan er numeriek manipuleerbare koudebrugcatalogi [7]. Men hoeft dan voor het verkrijgen van het correcte rekenmodel slechts het gewenste randdetail in de catalogus op te roepen en vervolgens de afmetingen van het detail aan te passen aan de in het concrete geval geldende waarden van B' . De juiste waarde van L^{2D} wordt vervolgens automatisch met het ingebouwde numerieke 2D-programma berekend. In principe is het ook niet moeilijk in zo'n programma de correctie volgens vergelijking (7) op te nemen, zodat men direct de waarde van L_s verkrijgt. Ook de subroutine [8] voor het simuleren van een kruipruimte kan worden toegevoegd. Wanneer deze subroutine de met vergelijking (11) beschreven aanpassing krijgt, is ook de geventileerde kruipruimte gesimuleerd. De gebruiker van het programma hoeft daarvoor geen extra invoer te verzorgen. De hier besproken 2D-bepalingsmethode is, gezien de eenvoudige toepasbaarheid, een aantrekkelijk alternatief voor de handrekenmethode.

De handrekenmethode

Behandelde typen

In de handrekenmethoden van NEN EN ISO 13370 [2] worden algebraïsche benaderingen gegeven, die zijn afgeleid uit figuur 4 [5]. De norm geeft de algebraïsche uitdrukkingen voor de stationaire en de periodieke warmteverliezen voor de volgende gevallen:

- 1 een 'op staal' gefundeerde vloer met homogene thermische isolatie;
- 2 een 'op staal' gefundeerde vloer met een strook isolatiemateriaal langs de omtrek, horizontaal onder de vloer respectievelijk verticaal langs de fundering;
- 3 een vloer boven een kruipruimte;
- 4 een verwarmde kelder;
- 5 een onverwarmde kelder.

In de nu volgende bespreking beperk ik mij tot de stationaire transmissie voor de gevallen 1 en 3.

De belangrijkste verschillen met de gebruikte parameters in figuur 4 zijn:

- toepassing van de karakteristieke vloerafmeting B' , in plaats van de waarden van l en B ;
- een nadere specificatie van de equivalente grondlaagdikte d_t uit figuur 4 volgens:

$$d_t = w + \lambda (R_{si} + R_{vl} + R_{se}) \quad (m) \quad (12)$$

met:

w is de dikte van de gevel (m);

λ is de warmtegeleidingscoëfficiënt van de grond ($W/m.K$);

R_{si} is de warmteovergangswaarde aan de binnenzijde van de vloer (in de norm [2]: $0,17 \text{ m}^2.K/W$);

R_{se} is de warmteovergangswaarde buiten ($0,04 \text{ m}^2.K/W$);

R_{vl} is de warmteovergangswaarde van de vloer ($\text{m}^2.K/W$).

De dikte w van de gevel representeert het thermisch niemandsland tussen de binnenwerkse vloerrand en de buitenwerkse gevelrand.

Vloeren “op staal”

Hier geeft de norm [2]:

$$U_g = \frac{L_s}{A} = U_0 + \frac{2\Psi}{B'} \quad (W/m^2 \cdot K) \quad (13)$$

met:

U_0 is de gemiddelde warmtetransmissiecoëfficiënt van het vloerveld ($W/m^2.K$);

Ψ is de lineaire warmtetransmissiecoëfficiënt van de funderingsrand ($W/m.K$).

Indien $d_t \geq B'$ (goed geïsoleerde vloer, kleine vloerafmetingen), geldt de uitdrukking:

$$U_0 = \frac{\lambda}{0,475B' + d_t} \quad (W/m^2 \cdot K) \quad (14)$$

Indien $d_t < B'$ (meestal voorkomend), geldt de uitdrukking:

$$U_0 = \frac{2\lambda}{\pi B' + d_t} \ln \left[\frac{\pi B'}{d_t} + 1 \right] \quad (W/m^2 \cdot K) \quad (15)$$

Vloeren boven kruipruimten

Omdat de warmtestroom van de binnenruimte naar de kruipruimte zich splitst in een warmtestroom via de bodem en een warmtestroom die via ventilatie en transmissie via de eventueel boven het maaiveld uitstekende uitwendige constructie ontwijkt, leidt de warmtebalans tot de uitdrukking:

$$U = \frac{U_{vl}(U_{gr} + U_x)}{U_{vl} + U_{gr} + U_x} \quad (W/m^2 \cdot K) \quad (16)$$

met:

U_{vl} is de warmtetransmissiecoëfficiënt van de vloer ($W/m^2.K$);
 U_{gr} is de equivalente warmtetransmissiecoëfficiënt via de grond ($W/m^2.K$);
 U_x is de equivalente warmtetransmissiecoëfficiënt via ventilatie en directe transmissie ($W/m^2.K$).

Voor de verschillende bijdragen gelden de volgende uitdrukkingen:

$$U_{vl} = \frac{1}{2R_{si} + R_{vl}} \quad (W/m^2 \cdot K) \quad (17)$$

$$U_{gr} = \frac{2\lambda}{\pi B' + d_{gr}} \ln \left[\frac{\pi \cdot B'}{d_{gr}} + 1 \right] \quad (15b)$$

$$d_{gr} = w + \lambda (R_{si} + R_{gr} + R_{sc}) \quad (m) \quad (12b)$$

$$U_x = \frac{2h U_w + 1450 \varepsilon v f_w}{B'} \quad (W/m^2 \cdot K) \quad (18)$$

met:

R_{gr} is de warmteweerstand van de eventueel op de bodem van de kruipruimte aangebrachte isolatielaag ($m^2.K/W$);
 h is het hoogteverschil tussen de bovenzijde van de vloer en het maaiveld (m);
 U_w is de warmtetransmissiecoëfficiënt van de boven het maaiveld uitstekende wanden van de kruipruimte ($W/m^2.K$).

Voor ε , v , f_w zie (10).

Rekenvoorbeeld voor een vloer "op staal", respectievelijk boven een geventileerde kruipruimte

De kruipruimte heeft natuurlijke ventilatie; er ligt geen isolatielaag op de bodem;

$R_{si} = 0,17 \text{ (m}^2.K/W\text{)}$	$h = 0,10 \text{ (m)}$;
conform de norm [2];	$U_w = 0,5 \text{ (W/m}^2.K\text{)}$;
$\lambda = 2,0 \text{ (W/m.K)}$;	$\varepsilon = 0,001 \text{ (m}^2/m\text{)}$;
$R_{vl} = 2,5 \text{ (m}^2.K/W\text{)}$;	$v = 5 \text{ (m/s)}$;
$w = 0,3 \text{ (m)}$;	$f_w = 0,05$.
$R_{gr} = 0,0 \text{ (m}^2.K/W\text{)}$;	

Vloer op staal volgens (13):

$$U_0 = \frac{4}{\pi B' + 5,72} \ln \left[\frac{\pi B'}{5,72} + 1 \right] \quad (W/m^2 \cdot K)$$

Het resultaat is uitgezet in figuur 5, curve 3.

Vloer met kruipruimte volgens (15),(13b) en (16):

$$U_{vl} = 0,352 \quad (W/m^2 \cdot K)$$

$$U_{gr} = \frac{4}{\pi B' + 0,72} \ln \left[\frac{\pi B'}{0,72} + 1 \right] \quad (W/m^2 \cdot K)$$

$$U_x = \frac{0,46}{B'} \quad (W/m^2 \cdot K)$$

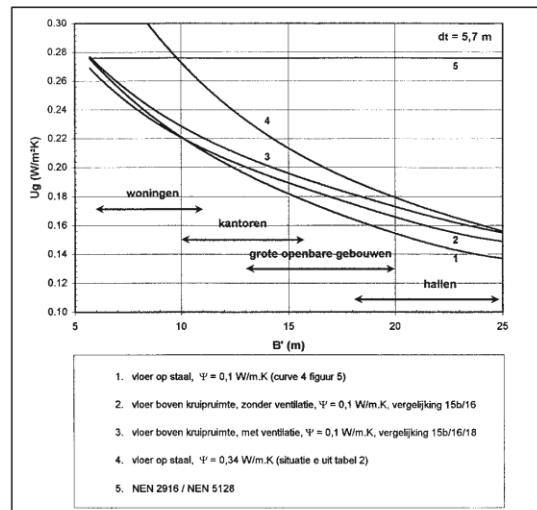
Het resultaat is uitgezet in figuur 7, curve 3 (met $\Psi = 0,1 \text{ W/m.K}$)

Uitkomsten voor vloeren op staal

De resultaten van de handrekenmethode worden in figuur 5 vergeleken met de uitgangspunten volgens figuur 4. De handrekenmethode geeft curve 3. Deze curve ligt tussen curve 2 (vierkante vloeren in figuur 4) en curve 1 (het limietgeval van zeer langwerpige vloeren in figuur 4). De handberekening geeft dus een goed gemiddelde voor alle vloervormen, doch geen "veilige waarden". Ook zonder de invloed van het concrete funderingsdetail in aanmerking te nemen zou al een correctieterm volgens vergelijking (13) moeten worden toegepast. Deze minimale correctieterm ($\Psi = 0,1 \text{ W/m.K}$), is met curve 4 in figuur 5 aangegeven.

Uitkomsten voor vloeren boven kruipruimten

In figuur 7 worden de met de handrekenmethode [2] berekende waarden voor een vloer 'op staal' vergeleken met die voor een vloer boven een ongeventileerde, respectievelijk een natuurlijk geventileerde kruipruimte ($\Psi = 0,1 \text{ W/m.K}$).



Figuur 7

U_g als functie van B' voor een vloer op staal (curve 1 en 4) en een vloer boven een geventileerde (curve 3) en een ongeventileerde (curve 2) kruipruimte volgens de norm [2] ($d_t = 5,7 \text{ m}$, $R_{vl} = 2,5 \text{ m}^2.K/W$)

Voor de meest voorkomende vloergrootten ($B' < \text{ca. } 15 \text{ m}$) blijkt de volgens de norm [2] berekende waarde van U_g voor een ongeventileerde kruipruimte (figuur 7, curve 2) maar weinig af te wijken van die voor een vloer op staal (figuur 7, curve 1). Bovendien blijft het effect van de natuurlijke ventilatie in de kruipruimte (figuur 7, curve 3) bij een goed geïsoleerde vloer beperkt tot ca. 4%.

In figuur 7 geeft curve 4 het resultaat van berekening e) uit tabel 2 en de horizontale lijn ("curve" 5) het resultaat volgens NEN 5128/2916, dat onafhankelijk is van B' en Ψ .

De invloed van het funderingsdetail

Al tijdens de eerste ontwerpen van NEN EN ISO 13370 [2] kregen wij op grond van door ons uitgevoerde berekeningen de indruk dat de handrekenmethode te gunstige waarden opleverde. Zowel in het uitgangspunt [5] als in de norm [2] werd de rand die onder de gevel ligt, als ideaal isolerend beschouwd (zie figuur

8, onder). Toevoeging van een Ψ -waarde voor de lineaire thermische brug volgens vergelijking (13) was dus noodzakelijk. In de norm [2] wordt aangegeven hoe deze Ψ -waarde met de numerieke 2D-methode kan worden berekend.

Het zou dwaasheid zijn om de benodigde Ψ -waarden per geval numeriek te berekenen. Met een numerieke 2D-berekening bepaalt men immers al rechtstreeks L_s van de vloer, zodat een handberekening dan overbodig is. Wij stelden daarom voor om in de handrekenmethode forfaitaire waarden voor Ψ op te nemen, en wel zo dat de handrekenmethode veilige waarden oplevert. NEN EN ISO 13370 [2] vermeldt de volgende forfaitaire Ψ -waarden:

- gevelisolatie sluit aan op vloerisolatie: $\Psi = 0$ (W/m.K);
- gevelisolatie sluit niet aan op vloerisolatie doch steekt tenminste tot 200 mm beneden de vloerisolatie: $\Psi = 0,1$ (W/m.K);
- gevelisolatie sluit niet aan op vloerisolatie en steekt minder dan 200 mm beneden de vloerisolatie: $\Psi = 0,2$ (W/m.K).

Volgens onze controleberekeningen zijn deze waarden te optimistisch. Bij de bespreking van figuur 5 constateerden we immers dat er ook zonder thermische brug al een veiligheidsterm met $\Psi = 0,1$ W/m.K vereist is. Globaal dienen de vermelde waarden met ten minste 0,1 te worden verhoogd. Het rekenvoorbeeld (zie tabel 2) onderstreept dit. Gelukkig biedt de norm elk land de vrijheid om zelf de forfaitaire Ψ -waarden voor specifieke details vast te stellen.

Het effect van de toeslagen is voor vloeren op staal en voor vloeren boven een (on)geventileerde kruipruimte in de figuren 5 en 7 aangegeven.

Voorbeeld

In het voorbeeld worden de kwantitatieve effecten van de verschillende hierboven beschreven vereenvoudigingen berekend. Het voorbeeld betreft een kantoorgebouw met een plattegrond volgens figuur 3 ($A = 720$ m², $P = 144$ m, $B' = 10$ m, $R_{v1} = 2,5$ m². K/W, $d_t = 5,7$ m). Figuur 8 geeft het funderingsdetail waarbij een kruipruimte ontbreekt (fundering op staal).

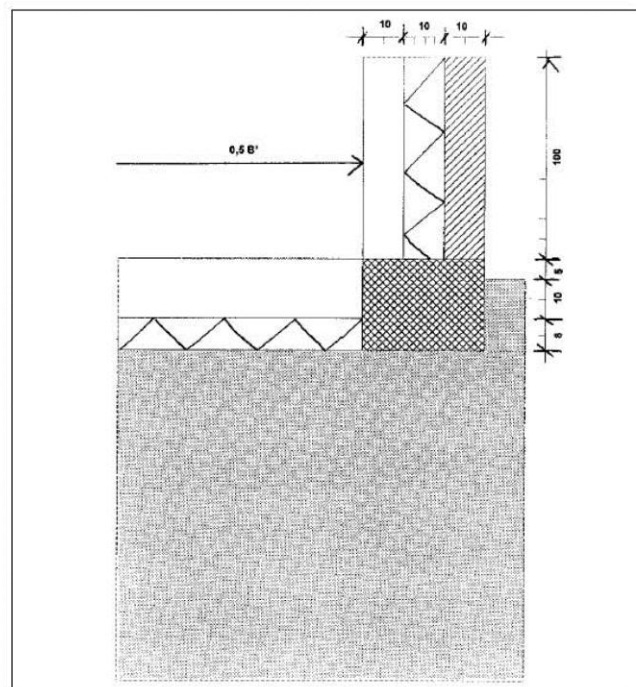
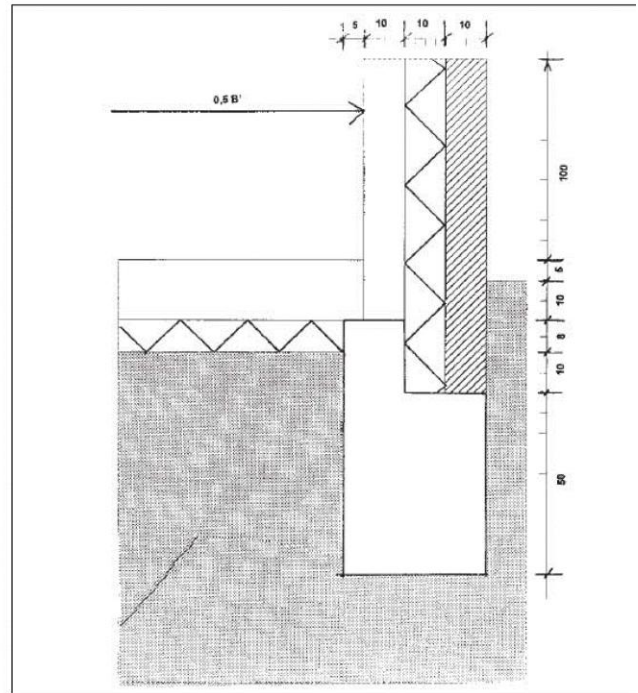
De Ψ -waarde van het funderingsdetail is berekend door volgens figuur 8 (beneden) de fundering te vervangen door een materiaalblok met $\lambda = 0,001$ (W/m.K). Uit het verschil tussen beide berekeningsresultaten volgt met behulp van (13): $\Psi = 0,34$ (W/m.K). De volgens NEN 2778 berekende temperatuurfactor van het detail bedraagt $f_{n, Rsi} = 0,63$.

Volgens [2] zou voor dit detail de forfaitaire waarde $\Psi = 0,2$ (W/m.K) moeten worden toegepast (de gevelisolatie reikt tot minder dan 200 mm beneden de vloerisolatie). Volgens onze berekening is dat dus een te gunstige waarde.

U_g van de vloer is achtereenvolgens berekend met de:

- numerieke 3D-berekening voor de werkelijke vloervorm (ca. 120.000 knooppunten);
- numerieke 3D-berekening voor de tot rechthoek getransformeerde vloer (ca. 52.000 knooppunten);
- numerieke 2D-berekening voor de tot strook getransformeerde vloer;
- handrekenmethode volgens NEN EN ISO 13370 met $\Psi = 0,20$ (W/m.K);
- handrekenmethode volgens NEN EN ISO 13370 met $\Psi = 0,34$ (W/m.K);
- handrekenmethode volgens NEN 5128 [3] en NEN 2916 [4].

De resultaten zijn gegeven in tabel 2.



Figuur 8 Doorsnede van de vloer in het rekenvoorbeeld ($d_t = 5,7$ m). Boven: het werkelijke detail: $U_g = 0,274$ (W/m².K). Beneden: het fictieve detail waarin de thermische brug is opgeheven: $U_g = 0,206$ (W/m².K).

Tabel 2

Resultaten van de met verschillende rekenmethoden berekende waarden van U_g ($d_t=5,7$ m). Vloer op staal.

Ber.	Soort	Transformatie vloervorm	B' (m)	U_g (W/m ² .K)
a	numeriek 3D	Nee	10	0,262
b	numeriek 3D	60 x 12	10	0,273
c	numeriek 2D	144 x 5	10	0,274
d	hand ($\Psi=0,2$)	Ja	10	0,242
e	hand ($\Psi=0,34$)	Ja	10	0,270
f	hand NEN [3,4]	Ja	-	0,276

Uit tabel 2 blijkt dat:

- * de numerieke 2D-methode (c), vergeleken met de numerieke 3D-methode (a), een “veilig” en bovendien een voldoende nauwkeurig resultaat oplevert;
- * de handrekenmethode [2] met de daarbij voorgeschreven forfaitaire Ψ -waarde $\Psi=0,2$ (W/m.K) een te gunstig resultaat geeft (d);
- * de handrekenmethode [2] met de correct berekende Ψ -waarde $\Psi=0,34$ (W/m.K) een vrijwel correct resultaat geeft (e);
- * de Nederlandse handrekenmethode [3,4] bij de gekozen waarde van B' een vrijwel correct resultaat geeft (f). Dit is blijkens figuur 7 echter toeval. Curve 4 voor een vloer op staal met $\Psi=0,34$ (W/m.K) snijdt curve 5 (NEN 5128/2916) ongeveer bij $B'=10$ m.

Een zelfde vergelijking kan worden gemaakt voor vloeren boven geventileerde kruipruimten. Er is geen reden om aan te nemen dat dit tot andere conclusies zou leiden t.a.v. de geschikte bepalingmethoden. Met de numerieke 2-D methode is een goed hanteerbaar, voldoende veilig en voldoende nauwkeurig instrument beschikbaar om de waarde van U_g , inclusief de invloed van het concrete randdetail te bepalen.

De numerieke 2-D methode is ook geschikt om een lijst van forfaitaire Ψ -waarden op te stellen, waarvan gebruik kan worden gemaakt in de handmethode volgens de Europese norm [2]. De forfaitaire Ψ -waarden volgens [2] zijn echter te laag. Voor de forfaitaire Ψ -waarden kan onderscheid worden gemaakt tussen details die voldoen aan $f_{n,Rsi} \geq 0,65$ (woningen) en details die slechts voldoen aan $f_{n,Rsi} \geq 0,50$ (utiliteitsgebouwen).

De handrekenmethode geeft een goed inzicht in het effect van verbeteringen. Zou men in dit voorbeeld R_{vi} verhogen van 2,5 naar 3,0 (m².K/W) dan zou U_g dalen met 0,02 (W/m².K). Een even grote winst is echter te bereiken door het randdetail thermisch te verbeteren van $\Psi=0,34$ naar $\Psi=0,24$ (W/m.K). De eerste maatregel heeft betrekking op 720 m² vloer en de tweede maatregel heeft betrekking op 144 m² van de randfundering. Er is dan een kostenafweging mogelijk. Het is daarom zowel uit het oogpunt van bouwkosten als uit het oogpunt van energiebesparing juister om een eis te stellen aan U_g dan aan R_{vi} . Daarom moet de Ψ -waarde van de lineaire thermische brug opgenomen worden in de bepalingmethode van U_g . Vooral voor gebouwen met een relatief grote karakteristieke afmeting B' en een vrij lage eis aan de thermische isolatie van de rand ($f_{n,Rsi} \geq 0,50$), d.w.z. utiliteitsgebouwen, is deze wijziging gewenst.

Conclusies

Voor de bepaling van de gemiddelde warmtetransmissiecoëfficiënt U_g van een vloer bestaan in principe drie methoden.

De numerieke 3D-methode is veel te bewerkelijk en daarom ongeschikt om als primaire methode door het Bouwbesluit te worden aangestuurd.

De numerieke 2D-methode is voldoende veilig en voldoende nauwkeurig om als primaire methode te dienen. Deze methode is ook geschikt om in een manipuleerbare catalogus te worden opgenomen, zodat ook niet-specialisten de bepalingmethode snel en eenvoudig kunnen toepassen.

De handrekenmethode volgens NEN EN ISO 13370 [2] is geschikt om als vereenvoudigde methode te dienen, mits forfaitaire Ψ -waarden worden voorgeschreven, die hoger zijn dan de forfaitaire Ψ -waarden volgens de norm [2].

De huidige Nederlandse bepalingmethode volgens NEN 5128 en NEN 2916 [3,4] geeft voor kleine vloervelden mogelijk te gunstige en voor grote vloervelden te ongunstige waarden. Vermindering van het warmteverlies via de vloer kan in vele gevallen beter worden bereikt door verbetering van de randisolatie dan door verdere verhoging van de eisen aan de vloerisolatie. Dit geldt met name voor utiliteitsgebouwen.

Literatuur

- [1] Lichtveld, W., De Europese en Nederlandse normen voor warmteverliezen, Bouwfysica 98/3
- [2] NEN EN ISO 13370 Thermal performance of buildings - Heat transfer via the ground - Calculation methods (1998?)
- [3] NEN 5128:1998, Energieprestatie van woningen en woongebouwen - Bepalingmethode
- [4] NEN 2916:1998, Energieprestatie van utiliteitsgebouwen - Bepalingmethode
- [5] Hagetoft, C., Heat loss to the ground from a building, Lund Institute of Technology, Sweden, april 1988
- [6] NEN EN ISO 10211-1 Thermal bridges in building construction - Heat flows and surface temperatures - Part 1: General calculation methods (1997)
- [7] Eurokobra, computerprogram to query an atlas of building details on their thermal behaviour, Physibel/WTCB, België
- [8] Radcom-module, Physibel, Maldegem (B)

2. Achtergrond informatie EN ISO 13370

Special attention is paid to EN ISO 13370, heat transfer via the ground, because the new version of this standard has some important new features:

- › **Monthly thermal transmission properties** enabling the calculation of the thermal transmission for heating season, but also for cooling.
- › Addition of new procedures to use the calculated properties as basis for modelling the dynamic heat flow through the ground floor and ground in **hourly simulation programs**.
- › Separation of plane elements and ground floor junctions, enabling the separation of **ground floor product** properties (U -value) and the properties (Ψ -values) of **connections** between ground floor and wall(s).

Monthly properties, for heating and for cooling

For steady state heat transmission between indoor and outdoor environments, the heat flow is proportional with the indoor-outdoor temperature difference. Consequently, for conventional building elements we may assume constant thermal properties, such as a U -value. For the heat transmission through the ground floor the situation is more complicated: the monthly heat flow through the ground is strongly affected by the large inertia of the ground and consequently not a linear function of the monthly mean indoor-outdoor temperature difference. The edge of the floor, close to the wall separating the building from the external environment is affected the least by this inertia, the parts more distant from the wall are affected the most.

The integrated effect for the whole floor is determined by two non-linear equations:

- › Equation to determine the annual average heat flow per m^2 of floor area through floor and ground. Output: steady state U -value of floor including the effect of the ground 'package', being a function of e.g. U -value and size of the floor itself and the thermal characteristics of the ground).
- › Equation to determine the periodic heat flow. Output: monthly values of the overall heat transfer coefficient through the ground floor, $H_{g,m}$ (W/K).

Modelling the dynamic heat flow through the ground floor and ground in hourly simulation programs

Problem

The algorithms to calculate the heat transmission through the floor and ground in dynamic simulation tools are very different, ranging from a strong simplification (such as a fixed temperature under the floor) to a detailed two or three dimensional dynamic calculation. Normally it will be difficult to compare and/or merit such tools against simplified (quasi-steady state) procedures. This is in particular a problem if such a tool is used in the context of energy performance regulations: it is not always clear if the same boundary conditions are used; it is not always evident that thermal bridges (e.g. wall-floor connection) are included in a similar way as is prescribed in standards like the ones we present in this paper.

Solution

Annex D (normative) of EN ISO 13370:2007 contains a simple procedure for dynamic simulation programs that links the input for the dynamic model to the properties gathered for the simplified (e.g. monthly) calculations.

The floor construction together with the ground is modelled as a single component, consisting of each layer in the floor construction plus 0,5 m depth of ground plus a virtual layer. The thermal resistance of the virtual layer is included so that the steady state thermal properties are respected. The boundary condition at the bottom of the virtual layer is a virtual temperature, based on the steady state and periodic heat transfer properties (including edge effects) as derived for the quasi-steady state methods. In this way the annual average and periodic heat flows are fully consistent with the quasi-steady state methods.

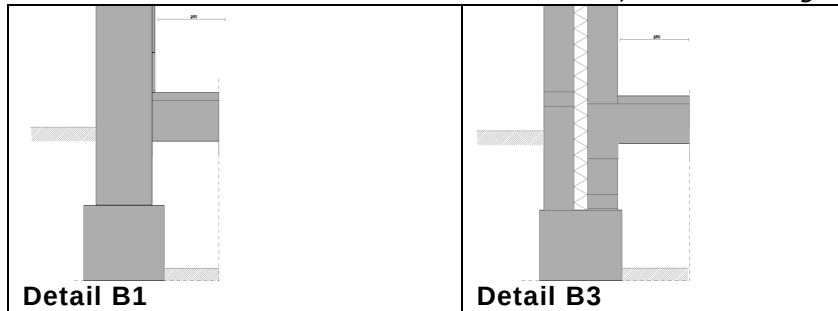
Separation of plane and beam ground floor elements

In EN ISO 13370:2007 the approach becomes similar to the approach in the other standards of this suite of international standards. For manufacturers of ground floor elements and for designers it is important to be able to have a specification of the floor product properties which is independent of the floor size and independent of the details of the floor-wall junction. The floor size comes in as a logarithmic equation, because the effect of the inertia of the ground is a function of the distance from the floor edge.

Citaat uit P94 Informatieblad EN-ISO standards

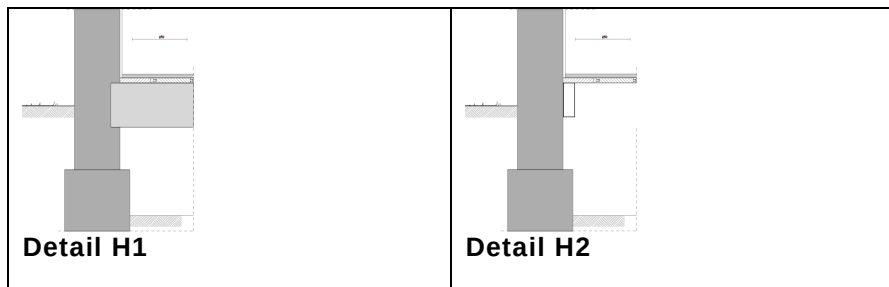
3. Berekeningsresultaten gemiddelde situatie

Tabel B3.1 Betonnen vloeren details B1 en B3, tussenwoningen



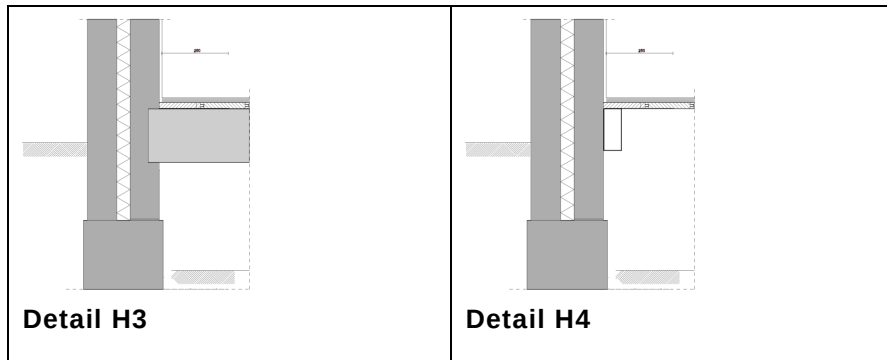
hoofdvar	vloervar	wandvar	L2d	temp.factor	Verlies MJ/m ²	m ³ aeq/m ²	besparing	ε	R _{variant}
B1	0	B	10,0633	0,52	202,47	6,75		0,0012	0,00
B1	0	G	3,6459	0,56	149,21	4,97		0,0012	0,00
B1	0	U	9,8684	0,52	206,49	6,88		0,0012	0,00
B1	Ia	B	8,7944	0,51	126,12	4,20	2,55	0,0012	3,80
B1	Ia	G	2,3557	0,56	71,14	2,37	2,60	0,0012	3,80
B1	Ib	B	9,2808	0,51	157,41	5,25	1,50	0,0012	1,88
B1	Ib	G	2,8074	0,57	99,60	3,32	1,65	0,0012	1,88
B1	Ib	K	9,2211	0,51	157,99	5,27	1,48	0,0012	1,88
B1	Ic	B	8,9220	0,51	135,82	4,53	2,22	0,0012	3,57
B1	Ic	G	2,4421	0,57	77,48	2,58	2,39	0,0012	3,57
B1	Ila	B	9,0869	0,41	130,31	4,34	2,41	0,0012	0,61
B1	Ila	G	2,6479	0,84	75,29	2,51	2,46	0,0012	0,61
B1	Ilb	B	8,7660	0,39	108,57	3,62	3,13	0,0012	1,00
B1	Ilb	G	2,3352	0,87	54,23	1,81	3,17	0,0012	1,00
B1	Illa	B	9,2519	0,51	136,53	4,55	2,20	0,0012	3,00
B1	Illa	G	2,8301	0,56	82,92	2,76	2,21	0,0012	3,00
B1	Illa	U	9,1123	0,52	149,67	4,99	1,89	0,0012	3,00
B1	IIlb	B	9,1607	0,51	127,68	4,26	2,49	0,0012	4,00
B1	IIlb	G	2,7389	0,56	74,06	2,47	2,51	0,0012	4,00
B1	IIlb	U	9,0230	0,52	140,87	4,70	2,19	0,0012	4,00
B1	IIlc	B	9,2730	0,52	137,15	4,57	2,18	0,0012	4,29
B1	IIlc	G	2,8537	0,56	83,73	2,79	2,18	0,0012	4,29
B1	IIlc	K	8,8451	0,52	126,86	4,23	2,52	0,0012	4,29
B1	IIId	B	9,4214	0,52	150,10	5,00	1,75	0,0012	2,86
B1	IIId	G	3,0027	0,56	96,74	3,22	1,75	0,0012	2,86
B1	IIId	K	8,9963	0,52	139,98	4,67	2,08	0,0012	2,86
B3	0	B	3,3953	0,84	148,70	4,96		0,0012	0,00
B3	Ia	B	2,3716	0,84	74,71	2,49	2,47	0,0012	3,80
B3	Ib	B	2,8104	0,84	105,39	3,51	1,44	0,0012	1,88
B3	Ib	K	2,7804	0,85	104,02	3,47	1,49	0,0012	1,88
B3	Ic	B	2,5145	0,83	85,86	2,86	2,09	0,0012	3,57
B3	Ila	B	2,9539	0,75	112,81	3,76	1,20	0,0012	0,61
B3	Ilb	B	2,7788	0,73	99,81	3,33	1,63	0,0012	1,00
B3	Illa	B	2,1298	0,69	50,93	1,70	3,26	0,0012	3,00
B3	Illa	U	2,0976	0,70	51,77	1,73	3,23	0,0012	3,00
B3	IIlb	B	2,0479	0,70	42,72	1,42	3,53	0,0012	4,00
B3	IIlb	U	2,0179	0,70	43,72	1,46	3,50	0,0012	4,00
B3	IIlc	B	1,9563	0,70	35,71	1,19	3,77	0,0012	4,29
B3	IIlc	K	1,7817	0,67	24,98	0,83	4,12	0,0012	4,29
B3	IIId	B	2,2323	0,69	58,98	1,97	2,99	0,0012	2,86
B3	IIId	K	2,0492	0,67	47,56	1,59	3,37	0,0012	2,86

Tabel B3.2 Houten vloeren details H1 en H2, tussenwoningen



hoofdvar	vloervar	wandvar	L2d	temp.factor	Verlies MJ/m ²	m ³ aeq/m ²	besparing	ε	R _{variant}
H1		0 B	9,8423	0,48	182,80	6,09		0,0012	0,00
H1		0 G	3,9718	0,65	173,97	5,80		0,0012	0,00
H1		0 U	9,7058	0,50	187,94	6,26		0,0012	0,00
H1	Ia	B	8,1547	0,39	74,47	2,48	3,61	0,0012	3,80
H1	Ia	K	8,1305	0,39	74,37	2,48	3,61	0,0012	3,80
H1	Ib	B	8,4911	0,40	94,00	3,13	2,96	0,0012	1,88
H1	Ib	K	8,4378	0,39	94,42	3,15	2,95	0,0012	1,88
H1	Ic	B	8,1559	0,39	73,91	2,46	3,63	0,0012	3,57
H1	Ic	K	8,1392	0,38	74,62	2,49	3,61	0,0012	3,57
H1	IIa	B	9,0865	0,41	132,02	4,40	1,69	0,0012	0,61
H1	IIa	G	3,1166	0,84	115,12	3,84	1,96	0,0012	0,61
H1	IIb	B	8,8244	0,39	114,61	3,82	2,27	0,0012	1,00
H1	IIb	G	2,2981	0,88	52,50	1,75	4,05	0,0012	1,00
H1	IIIa	B	8,9133	0,48	114,63	3,82	2,27	0,0012	3,00
H1	IIIa	U	8,8522	0,50	130,30	4,34	1,92	0,0012	3,00
H1	IIIb	B	8,8131	0,49	105,15	3,51	2,59	0,0012	4,00
H1	IIIb	U	8,7555	0,50	120,97	4,03	2,23	0,0012	4,00
H1	IIIc	B	8,9643	0,49	117,81	3,93	2,17	0,0012	4,29
H1	IIIc	K	8,2467	0,40	80,10	2,67	3,42	0,0012	4,29
H1	IIId	B	9,1386	0,48	132,70	4,42	1,67	0,0012	2,86
H1	IIId	K	8,4471	0,40	97,10	3,24	2,86	0,0012	2,86
H2		0 B	9,7453	0,45	179,52	5,98		0,0012	0,00
H2	Ia	B	8,1732	0,40	75,97	2,53	3,45	0,0012	3,80
H2	Ia	G	1,5743	0,82	7,96	0,27	5,53	0,0012	3,80
H2	Ib	B	8,5103	0,40	95,56	3,19	2,80	0,0012	1,88
H2	Ib	G	1,9276	0,83	28,87	0,96	4,84	0,0012	1,88
H2	Ib	K	8,4608	0,39	96,28	3,21	2,77	0,0012	1,88
H2	Ic	B	8,1829	0,39	76,11	2,54	3,45	0,0012	3,57
H2	Ic	G	1,5814	0,84	7,90	0,26	5,54	0,0012	3,57
H2	Ic	K	8,1662	0,39	76,81	2,56	3,42	0,0012	3,57
H2	IIa	B	9,0587	0,40	129,77	4,33	1,66	0,0012	0,61
H2	IIa	G	2,5244	0,87	67,01	2,23	3,57	0,0012	0,61
H2	IIb	B	8,8081	0,39	113,29	3,78	2,21	0,0012	1,00
H2	IIb	G	2,2593	0,89	49,35	1,65	4,15	0,0012	1,00
H2	IIIa	B	8,7838	0,44	104,11	3,47	2,51	0,0012	3,00
H2	IIIa	U	8,7239	0,45	119,88	4,00	2,27	0,0012	3,00
H2	IIIb	B	8,6811	0,44	94,43	3,15	2,84	0,0012	4,00
H2	IIIb	U	8,6250	0,45	110,37	3,68	2,59	0,0012	4,00
H2	IIIc	B	8,8522	0,44	108,70	3,62	2,36	0,0012	4,29
H2	IIIc	K	8,2670	0,40	81,74	2,72	3,26	0,0012	4,29
H2	IIId	B	9,0318	0,44	124,03	4,13	1,85	0,0012	2,86
H2	IIId	K	8,4574	0,41	97,93	3,26	2,72	0,0012	2,86

Tabel B3.3 Houten vloeren details H3 en H4, tussenwoningen



hoofdvar	vloervar	wandvar	L2d	temp.factor	Verlies MJ/m ² m ³	aeq/m ²	besparing	ε	R _{variant}
H1		0 B	9,8423	0,48	182,80	6,09		0,0012	0,00
H3		0 B	3,4379	0,80	152,19	5,07		0,0012	0,00
H3	la	B	2,2478	0,73	64,71	2,16	2,92	0,0012	3,80
H3	lb	B	2,5631	0,71	85,40	2,85	2,23	0,0012	1,88
H3	lb	K	2,5263	0,74	83,24	2,77	2,30	0,0012	1,88
H3	lc	B	2,2975	0,69	68,29	2,28	2,80	0,0012	3,57
H3	lc	K	2,2578	0,73	65,47	2,18	2,89	0,0012	3,57
H3	IIa	B	2,9942	0,73	116,20	3,87	1,20	0,0012	0,61
H3	IIb	B	2,8156	0,71	102,92	3,43	1,64	0,0012	1,00
H3	IIb	G	1,8675	0,91	72,55	2,42	3,38	0,0012	1,00
H3	IIIa	B	2,5036	0,82	83,04	2,77	2,30	0,0012	3,00
H3	IIIa	U	2,4595	0,83	82,15	2,74	2,33	0,0012	3,00
H3	IIIb	B	2,4003	0,83	73,16	2,44	2,63	0,0012	4,00
H3	IIIb	U	2,3604	0,83	72,60	2,42	2,65	0,0012	4,00
H3	IIIc	B	2,5001	0,82	81,73	2,72	2,35	0,0012	4,29
H3	IIIc	K	2,2626	0,77	65,12	2,17	2,90	0,0012	4,29
H3	IIId	B	2,6965	0,81	98,43	3,28	1,79	0,0012	2,86
H3	IIId	K	2,4488	0,77	80,99	2,70	2,37	0,0012	2,86
H4		0 B	3,4306	0,81	151,59	5,05		0,0012	0,00
H4	la	B	2,2529	0,74	65,12	2,17	2,88	0,0012	3,80
H4	lb	B	2,5576	0,73	84,95	2,83	2,22	0,0012	1,88
H4	lb	K	2,5297	0,75	83,52	2,78	2,27	0,0012	1,88
H4	lc	B	2,2942	0,71	68,02	2,27	2,79	0,0012	3,57
H4	lc	K	2,2637	0,74	65,96	2,20	2,85	0,0012	3,57
H4	IIa	B	2,9835	0,75	115,34	3,84	1,21	0,0012	0,61
H4	IIb	B	2,8015	0,73	101,77	3,39	1,66	0,0012	1,00
H4	IIb	G	1,8630	0,91	72,18	2,41	3,39	0,0012	1,00
H4	IIIa	B	2,4917	0,82	82,08	2,74	2,32	0,0012	3,00
H4	IIIa	U	2,5881	0,74	92,60	3,09	1,97	0,0012	3,00
H4	IIIb	B	2,3879	0,82	72,16	2,41	2,65	0,0012	4,00
H4	IIIb	U	2,3490	0,82	71,68	2,39	2,66	0,0012	4,00
H4	IIIc	B	2,4918	0,82	81,05	2,70	2,35	0,0012	4,29
H4	IIIc	K	2,2660	0,77	65,40	2,18	2,87	0,0012	4,29
H4	IIId	B	2,6781	0,81	96,93	3,23	1,82	0,0012	2,86
H4	IIId	K	2,4583	0,78	81,76	2,73	2,33	0,0012	2,86

4. Berekeningen effect kruipruimte ventilatie

In tabel B4.1 zijn de resultaten gegeven van de vloerverliezen en de te bereiken besparingen bij verschillende hoeveelheden kruipruimteventilatie.

ε = hoeveelheid kruipruimteventilatie in m² per m' gevellengte

$\varepsilon = 0,035$ komt overeen met circa 1000 mm² opening per m²

$\varepsilon = 0,012$ komt overeen met circa 400 mm² opening per m²

$\varepsilon = 0,003$ komt overeen met circa 100 mm² opening per m²

DB1 = extra besparing als bij vloerisolatie de kruipruimteventilatie wordt verminderd van $\varepsilon = 0,035$ naar 0,003

DB2 = extra besparing als bij vloerisolatie de kruipruimteventilatie wordt verminderd van $\varepsilon = 0,012$ naar 0,003

Tabel B4.1 Effect kruipruimteventilatie op berekende energiebesparing

hoofdvar	vloervar	wandvar	energieverbruik m ³ aeq/m ²			besparing m ³ aeq/m ²			extra besparing m ³ aeq/m ²	
			$\varepsilon=0,035$	$\varepsilon=0,012$	$\varepsilon=0,003$	b1	b2	b3	DB1	DB2
B1	Ia	B	4,25	4,20	4,18	3,19	2,55	2,56	0,65	0,02
B1	Ib	B	5,35	5,25	5,20	2,18	1,50	1,55	0,67	0,04
B1	Ic	B	4,57	4,53	4,51	2,87	2,22	2,24	0,65	0,02
B1	IIa	B	4,62	4,34	4,22	3,15	2,41	2,52	0,75	0,12
B1	IIb	B	3,80	3,62	3,54	3,84	3,13	3,21	0,71	0,08
B1	IIIa	B	5,26	4,55	4,25	3,12	2,20	2,50	0,93	0,30
B1	IIIb	B	4,97	4,26	3,96	3,42	2,49	2,79	0,93	0,30
B1	IIIc	B	5,29	4,57	4,27	3,11	2,18	2,48	0,93	0,30
B1	IIId	B	5,71	5,00	4,71	2,67	1,75	2,04	0,93	0,30
B3	Ia	B	2,56	2,49	2,46	3,23	2,47	2,50	0,76	0,03
B3	Ib	B	3,67	3,51	3,44	2,24	1,44	1,52	0,80	0,07
B3	Ic	B	2,94	2,86	2,82	2,86	2,09	2,13	0,76	0,04
B3	IIa	B	4,14	3,76	3,59	2,09	1,20	1,37	0,90	0,17
B3	IIb	B	3,60	3,33	3,20	2,48	1,63	1,75	0,85	0,13
B3	IIIa	B	2,53	1,70	1,35	4,34	3,26	3,61	1,08	0,35
B3	IIIb	B	2,26	1,42	1,07	4,61	3,53	3,89	1,08	0,35
B3	IIIc	B	2,03	1,19	0,83	4,85	3,77	4,12	1,08	0,36
B3	IIId	B	2,79	1,97	1,62	4,07	2,99	3,34	1,08	0,35
H1	Ia	B	2,53	2,48	2,46	4,25	3,61	3,63	0,64	0,02
H1	Ib	B	3,23	3,13	3,09	3,62	2,96	3,01	0,66	0,05
H1	Ic	B	2,51	2,46	2,44	4,27	3,63	3,65	0,64	0,02
H1	IIa	B	4,67	4,40	4,28	2,43	1,69	1,81	0,74	0,12
H1	IIb	B	4,01	3,82	3,74	2,97	2,27	2,36	0,70	0,08
H1	IIIa	B	4,53	3,82	3,52	3,19	2,27	2,57	0,92	0,30
H1	IIIb	B	4,22	3,51	3,20	3,51	2,59	2,89	0,92	0,30
H1	IIIc	B	4,65	3,93	3,62	3,09	2,17	2,47	0,92	0,30
H1	IIId	B	5,13	4,42	4,13	2,59	1,67	1,97	0,92	0,30
H3	Ia	B	2,23	2,16	2,12	3,66	2,92	2,95	0,75	0,03
H3	Ib	B	3,01	2,85	2,77	3,01	2,23	2,30	0,78	0,07
H3	Ic	B	2,35	2,28	2,24	3,54	2,80	2,83	0,75	0,04
H3	IIa	B	4,25	3,87	3,71	2,08	1,20	1,37	0,88	0,17
H3	IIb	B	3,70	3,43	3,31	2,48	1,64	1,77	0,83	0,12
H3	IIIa	B	3,59	2,77	2,42	3,37	2,30	2,65	1,06	0,35
H3	IIIb	B	3,28	2,44	2,08	3,70	2,63	2,99	1,07	0,35
H3	IIIc	B	3,56	2,72	2,37	3,42	2,35	2,70	1,07	0,36
H3	IIId	B	4,11	3,28	2,93	2,85	1,79	2,14	1,06	0,35

5. Besparingskentallen dakisolatie

Matig verwarmde zolder

Tabel B5.1 Besparingskental in $m^3 \text{ aeq}/m^2$ afhankelijk van R_c -dakisolatie in m^2K/W en gemiddelde temperatuur op de zolderverdieping in $^{\circ}C$.

Rc dak	gemiddelde binnentemperatuur								
	10	11	12	13	14	15	16	17	18
1,3	4,7	5,6	6,6	7,5	8,4	9,4	10,3	11,2	12,2
2	5,5	6,6	7,6	8,7	9,8	10,9	12,0	13,1	14,2
2,5	5,8	6,9	8,1	9,2	10,4	11,5	12,7	13,8	15,0
3	5,9	7,1	8,3	9,5	10,7	11,9	13,1	14,3	15,5
3,5	6,1	7,3	8,5	9,7	10,9	12,2	13,4	14,6	15,8
4	6,2	7,4	8,7	9,9	11,1	12,4	13,6	14,8	16,1
4,5	6,3	7,5	8,8	10,0	11,3	12,5	13,8	15,0	16,3
5	6,3	7,6	8,9	10,1	11,4	12,7	13,9	15,2	16,5
5,5	6,4	7,7	8,9	10,2	11,5	12,8	14,0	15,3	16,6
6	6,4	7,7	9,0	10,3	11,6	12,9	14,1	15,4	16,7
6,5	6,5	7,8	9,0	10,3	11,6	12,9	14,2	15,5	16,8
7	6,5	7,8	9,1	10,4	11,7	13,0	14,3	15,6	16,9

Onverwarmde zolder, temperatuur bovenverdieping 18°C

Tabel B5.2 Besparingskental in $m^3 \text{ aeq}/m^2$ afhankelijk van R_c -dakisolatie in m^2K/W en warmteweerstand R van reeds aanwezige isolatie plafond/vliering in m^2K/W .

Rc dak	R plafond/vliering								
	0,2	0,3	0,4	0,5	0,6	0,7	0,8	0,9	1
1,3	5,5	4,5	3,8	3,3	2,8	2,5	2,2	1,9	1,7
2	6,7	5,6	4,8	4,2	3,6	3,2	2,9	2,6	2,3
2,5	7,3	6,1	5,3	4,6	4,0	3,6	3,2	2,9	2,6
3	7,7	6,5	5,6	4,9	4,3	3,9	3,5	3,1	2,9
3,5	8,0	6,8	5,9	5,2	4,6	4,1	3,7	3,3	3,1
4	8,2	7,0	6,1	5,4	4,8	4,3	3,9	3,5	3,2
4,5	8,4	7,2	6,3	5,6	4,9	4,4	4,0	3,7	3,3
5	8,6	7,4	6,4	5,7	5,1	4,6	4,1	3,8	3,5
5,5	8,7	7,5	6,6	5,8	5,2	4,7	4,3	3,9	3,6
6	8,8	7,6	6,7	5,9	5,3	4,8	4,3	4,0	3,6
6,5	8,9	7,7	6,8	6,0	5,4	4,9	4,4	4,0	3,7
7	9,0	7,8	6,9	6,1	5,5	4,9	4,5	4,1	3,8

Onverwarmde zolder, temperatuur bovenverdieping 16,5°C

Tabel B5.3 Besparingskental in m3 aeq/m2 afhankelijk van Rc-dakisolatie in m2K/W en warmteweerstand R van reeds aanwezige isolatie plafond/vliering in m2K/W.

Rc dak	R plafond/vliering								
	0,2	0,3	0,4	0,5	0,6	0,7	0,8	0,9	1
1,3	4,8	4,0	3,4	2,9	2,5	2,2	1,9	1,7	1,5
2	5,9	5,0	4,3	3,7	3,2	2,8	2,5	2,3	2,0
2,5	6,4	5,4	4,7	4,1	3,6	3,2	2,8	2,6	2,3
3	6,8	5,8	5,0	4,4	3,8	3,4	3,1	2,8	2,5
3,5	7,1	6,0	5,2	4,6	4,1	3,6	3,3	3,0	2,7
4	7,3	6,2	5,4	4,8	4,2	3,8	3,4	3,1	2,8
4,5	7,5	6,4	5,6	4,9	4,4	3,9	3,6	3,2	3,0
5	7,6	6,5	5,7	5,0	4,5	4,0	3,7	3,3	3,1
5,5	7,7	6,7	5,8	5,1	4,6	4,1	3,8	3,4	3,2
6	7,8	6,7	5,9	5,2	4,7	4,2	3,8	3,5	3,2
6,5	7,9	6,8	6,0	5,3	4,8	4,3	3,9	3,6	3,3
7	8,0	6,9	6,1	5,4	4,8	4,4	4,0	3,6	3,4

Onverwarmde zolder, temperatuur bovenverdieping 15,0°C

Tabel B5.4 Besparingskental in m3 aeq/m2 afhankelijk van Rc-dakisolatie in m2K/W en warmteweerstand R van reeds aanwezige isolatie plafond/vliering in m2K/W.

Rc dak	R plafond/vliering								
	0,2	0,3	0,4	0,5	0,6	0,7	0,8	0,9	1
1,3	3,8	3,1	2,6	2,3	1,9	1,7	1,5	1,3	1,2
2	4,6	3,9	3,3	2,9	2,5	2,2	2,0	1,8	1,6
2,5	5,0	4,3	3,7	3,2	2,8	2,5	2,2	2,0	1,8
3	5,3	4,5	3,9	3,4	3,0	2,7	2,4	2,2	2,0
3,5	5,5	4,7	4,1	3,6	3,2	2,8	2,6	2,3	2,1
4	5,7	4,9	4,2	3,7	3,3	3,0	2,7	2,4	2,2
4,5	5,8	5,0	4,4	3,8	3,4	3,1	2,8	2,5	2,3
5	5,9	5,1	4,5	3,9	3,5	3,2	2,9	2,6	2,4
5,5	6,0	5,2	4,6	4,0	3,6	3,2	2,9	2,7	2,5
6	6,1	5,3	4,6	4,1	3,7	3,3	3,0	2,7	2,5
6,5	6,2	5,3	4,7	4,2	3,7	3,4	3,1	2,8	2,6
7	6,3	5,4	4,7	4,2	3,8	3,4	3,1	2,9	2,6

Vergelijking effect dakisolatie en plafond/vliering isolatie

In tabel 5.5 is berekend wat de te bereiken besparing is bij dakisolatie in vergelijking met plafond/vliering isolatie. Hierbij is uitgegaan van een volledig verwarmde bovenverdieping ($T_i = 18\text{ °C}$) en een onverwarmde zolderverdieping.

De in tabel gegeven besparing is ten opzichte van een situatie waarbij zowel dak als plafond/vliering ongeïsoleerd zijn. Uit de berekeningen blijkt dat in een dergelijke situatie isolatie van plafond/vliering effectiever is dan dakisolatie, daar komt bij dat bij isolatie van plafond/vliering een kleiner oppervlak geïsoleerd hoeft te worden.

Tabel B5.5 Besparingskental in $m^3\text{ aeq}/m^2$ afhankelijk van R_c -dakisolatie in m^2K/W en warmteweerstand R van plafond/vliering in m^2K/W bij onverwarmde zolder

R dak	R plafond/vliering								
	0,2	0,5	1	1,5	2	2,5	3	3,5	4
0,22	0,0	3,0	5,4	6,6	7,3	7,8	8,2	8,4	8,6
1,3	5,5	6,3	7,1	7,7	8,1	8,4	8,6	8,8	8,9
2	6,7	7,2	7,7	8,1	8,4	8,6	8,8	8,9	9,0
2,5	7,3	7,6	8,0	8,3	8,5	8,7	8,9	9,0	9,1
3	7,7	7,9	8,3	8,5	8,7	8,8	9,0	9,1	9,2
3,5	8,0	8,2	8,4	8,6	8,8	8,9	9,1	9,2	9,2
4	8,2	8,4	8,6	8,8	8,9	9,0	9,1	9,2	9,3
4,5	8,4	8,6	8,7	8,9	9,0	9,1	9,2	9,3	9,3
5	8,6	8,7	8,9	9,0	9,1	9,2	9,3	9,3	9,4
5,5	8,7	8,8	9,0	9,1	9,2	9,2	9,3	9,4	9,4
6	8,8	8,9	9,0	9,1	9,2	9,3	9,4	9,4	9,5
6,5	8,9	9,0	9,1	9,2	9,3	9,3	9,4	9,5	9,5
7	9,0	9,1	9,2	9,3	9,3	9,4	9,4	9,5	9,5