



**Pelargrund som alternativ
grundkonstruktion –
Finitelement-analys av
värmeförluster**

Magnus Andersson

EXAMENSARBETE	
Arcada	
Utbildningsprogram:	Energi- och miljöteknik
Identifikationsnummer:	8413
Författare:	Magnus Andersson
Arbetets namn:	Pelargrund som alternativ grundkonstruktion – Finitelement-analys av värmeförluster
Handledare (Arcada):	Rene Hermann
Uppdragsgivare:	Arcada
<p>Sammandrag:</p> <p>Syftet med detta arbete var att analysera värmeförlusterna för pelargrunder av betong, och undersöka om de ur denna synvinkel kunde fungera som alternativ till sk. platta på mark -grunder. Den sistnämnda grundkonstruktioner är enkel att utföra, men innebär risker på längre sikt, då det är svårt att kontrollera isoleringsmaterialet under betongplattan. Analysen genomfördes med hjälp av simuleringsprogrammet COMSOL, i vilket 2D- och 3D-modeller för båda grundtyperna skapades. Programmet använder sig av finitelement-analys, och kan inkludera flera fysiska effekter samtidigt i en simulering. Modellerna gjordes med hjälp av parametrar i programmet, vilket betyder att deras mått, materialkonstanter och omgivningens variabler som temperaturer och vindstyrka är lätta att ändra på. Sedan simulerades grunderna med olika dimensioner för bestämning av temperaturer och värmeflöden i olika mätpunkter. Slutresultatet är, att en pelargrund är ett fungerande alternativ till en platta på mark -grund, men den kräver något bättre isolering runt grunden och inne i huset för att uppnå samma värmeisolering som platta på mark -grunden.</p>	
Nyckelord:	FEA, COMSOL, platta på mark, pelargrund, husgrund, fundament, värmeförluster
Sidantal:	
Språk:	Svenska
Datum för godkännande:	

DEGREE THESIS	
Arcada	
Degree Programme:	Energy and environmental technology
Identification number:	8413
Author:	Magnus Andersson
Title:	Pillar foundation as an alternative foundation – Finite element analysis of heat losses
Supervisor (Arcada):	Rene Herrmann
Commissioned by:	Arcada University of Applied Sciences
<p>Abstract:</p> <p>The purpose with this work was to analyze the thermal losses for pillar foundations made of concrete, and to study whether they from this aspect could work as an alternative to so-called plate on ground -foundations. This foundation type is easy to implement, but poses some long-term risks, due to the fact that it is difficult to check the insulation material under the concrete pad. The analysis was performed using the simulation program COMSOL, in which 2D- and 3D-models for both types of foundation were created. The program utilizes finite element analysis, and has the ability to include several physical effects simultaneously in a simulation. The models were realized using parameters in the program, which means that their dimensions, material constants and environmental variables such as temperature and wind speed are easy to change. After this, the foundations were simulated using different dimensions, and the temperatures and thermal flows were determined in different measurement points. The end result is that a pillar foundation is a workable alternative to a plate on ground -foundation, but it needs slightly better insulation around the foundation and inside the house to achieve the same thermal insulation as a plate on ground -foundation.</p>	
Keywords:	FEA, COMSOL, plate on ground, pillar foundation, house foundation, heat losses
Number of pages:	
Language:	Swedish
Date of acceptance:	

OPINNÄYTE	
Arcada	
Koulutusohjelma:	Energia- ja ympäristötekniikka
Tunnistenumero:	8413
Tekijä:	Magnus Andersson
Työn nimi:	Pilarilaattaperusta vaihtoehtoisena perustana - Elementtimenetelmäanalyysi lämpöhäviöistä
Työn ohjaaja (Arcada):	Rene Herrmann
Toimeksiantaja:	Arcada
Tiivistelmä:	
<p>Tämän työn tarkoitus oli analysoida betonirakenteisten pilariperustusten lämpöhäviöitä ja tutkia, voisivatko ne tästä näkökulmasta toimia vaihtoehtona maanvarainen laatta -perustukselle. Viimeksimainittu perustustapa on helppo toteuttaa, mutta sisältää riskejä pitkällä tähtäimellä, koska betonilaatan allaoleva eristysmateriaali on hankala tarkistaa. Analyysi toteutettiin käyttäen COMSOL-simulointiohjelmaa, jossa 2D- ja 3D-mallit molemmille perustustyyppille rakennettiin. Ohjelma käyttää elementtimenetelmää, ja kykenee yhdistämään useita fysikaalisia efektejä samanaikaisesti yhdessä simuloinnissa. Mallit tehtiin käyttäen parametrejä ohjelmassa, mikä tarkoittaa että niiden mittoja, materiaalivakioita ja ympäristön muuttujia kuten lämpötilaa ja tuulen nopeutta on helppo muuttaa. Tämän jälkeen perustuksia simuloitiin käyttäen eri mittoja, jotta lämpötilat ja lämpövuot eri mittauspisteissa voitiin määrittää. Lopputulos on että pilariperustus on toimiva vaihtoehto maanvarainen laatta -perustukselle, mutta se vaati hieman paremman eristyksen perustuksen ympärille ja talon sisällä, jotta se saavuttaisi samantasoisien lämpöeristyksen kuin maanvarainen laatta -perustus.</p>	
Avainsanat:	FEA, COMSOL, maanvarainen laatta, pilarilaatta, taloperustus, lämpöhäviöt
Sivumäärä:	
Kieli:	Ruotsi
Hyväksymispäivämäärä:	

INNEHÅLL

Figurer	6
1 Inledning.....	10
1.1 Bakgrund	10
1.2 Syfte	10
1.3 Metod.....	11
1.4 Förväntade resultat.....	12
1.5 Arbetets uppbyggnad	12
2 Litteraturstudie	13
2.1 Värmetransport.....	13
2.1.1 Konduktion.....	13
2.1.2 Konvektion.....	15
2.1.3 Strålning	17
2.2 Finska grundkonstruktioner	20
2.2.1 Jordarter	20
2.2.2 Tjäle.....	22
2.3 Husfundamentets uppgift och husets investeringshorisont.....	24
2.4 Termisk isolation och standardplaner för fundament	26
2.5 Mekanisk belastning och bärkraft.....	29
2.6 Torkning av pelargrunden	32
2.7 Isoleringsskummets egenskaper.....	34
2.8 Grundens belastning	35
2.9 Finitелеmentanalys för termisk analys	37
2.10 COMSOL Multiphysics	37
3 Metod	37
3.1 COMSOL-modellen för platta på mark -grund	39
3.2 COMSOL-modellen för en pelargrund.....	42
4 Resultat.....	46
4.1 Platta på mark -grund simuleringsresultat.....	46
4.2 Pelargrund simuleringsresultat.....	49
5 Sammandrag.....	51
6 Diskussion.....	52
7 Källor.....	53
Bilagor	57

FIGURER

Figur	Sida
Figur 1. Värmeöverföring genom konduktion i 1 dimension.....	14
Figur 2. Bildningen av gränsskikt vid konvektion.	16
Figur 3. Två ytor utbyter värmestrålning.	17
Figur 4. Solens strålningsenergi i Finland.	19
Figur 5. Frostmängder som upprepas en gång per 2 år och en gång per 5 år.....	23
Figur 6. Injicering av polymerharts under husgrunden	26
Figur 7. Grundmur av block och bottenbjälklag som platta på mark.....	27
Figur 8. Platta på mark -grund med kantförstärkning	28
Figur 9. Betongplattans belastningsarrangemang.....	29
Figur 10. Belastningskraft som funktion av böjning för en armerad betongplatta.....	30
Figur 11. Vattenmängden i luft och betong.....	33
Figur 12. Daggpunkten.....	34
Figur 13. Temperaturen i marken som funktion av djupet och utetemperaturen	38
Figur 14. COMSOL 2D -modell för platta på mark -grund.	39
Figur 15. Detaljförstoring av COMSOL 2D -modell för platta på mark -grund.	40
Figur 16. Placering av mätpunkterna i platta på mark -grunden.	41
Figur 17. COMSOL-simuleringens elementnätverk	41
Figur 18. COMSOL 3D-modell för en pelargrund, betong.....	42
Figur 19. COMSOL 3D-modell för en pelargrund, EPS-isoleringen.....	43
Figur 20. Detaljförstoring av COMSOL 3D -modell för pelargrund.	43
Figur 21. Mätpunkternas placering i 3D-modellen av en pelargrund	45
Figur 22. COMSOL-modell för pelargrund med 9 pelare.....	45
Figur 23. Temperaturer och värmeflöden i mätpunkterna.....	46
Figur 24. Temperaturer i mätpunkterna, köldbryggebrytarens skumtjocklek.	47
Figur 25. Temperaturen i mätpunkt 2, köldbryggebrytaren, vindhastigheter.....	47
Figur 26. Temperaturer i mätpunkterna som funktion av vindhastigheten	48
Figur 27.U-värdet vid mätpunkt 2	48
Figur 28. Temperaturen och värmeflödet i mätpunkt 1.....	49
Figur 29. Pelargrund med extra kantisolering	50
Figur 30. Kantisoleringens effekt på mätpunkt 1	50

Figur 31. Excel-tabell för beräkning av vikten av ett hus.	58
Figur 32. Måttparametrar för 2D COMSOL-modellen för platta på mark -grund.	59
Figur 33. Materialparametrar för 2D COMSOL-modellen för platta på mark -grund.	60
Figur 34. Temperaturer och konvektionskoefficienter för 2D-modellen	60
Figur 35. Måttparametrar för 3D COMSOL-modellen för pelargrund.	61
Figur 36. Materialparametrar för 3D COMSOL-modellen för pelargrund.	62
Figur 37. Temperaturer och konvektionskoefficienter för 3D-modellen	62

TABELLER

Tabell	Sida
Tabell 1. Klassificering av mineraljordarter	20
Tabell 2. Värmeledningsförmåga och värmekapacitet för en del jordarter	21
Tabell 3. Beräknad totalvikt per kvadratmeter av bottenyta för olika hustyper.	36

FORMLER

Formel.....	Sida
(1) Fouriers lag i 1 dimension.....	13
(2) Värmeflödestätheten i jämviktstillstånd.....	14
(3) Värmeflödestätheten i 3 dimensioner.....	14
(4) Värmemotstånd	15
(5) Värmegenomgångskoefficienten.....	15
(6) Värmeflödet uttryckt med värmegenomgångskoefficienten.....	15
(7) Newtons lag om nedkylning	16
(8) Approximativ formel för vindkonvektionens värmeöverföringskoefficient.....	16
(9) Stefan-Boltzmanns lag	17
(10) Strålningen från en verklig kropp	18
(11) Nettoöverföring av strålningsenergi.....	18
(12) Approximativt uttryck för värmestrålningens flödestäthet	18
(13) Approximativt uttryck för värmeöverföringskoefficienten.....	18
(14) Ytornas ömsesidiga strålningstal	18
(15) Frostmängd.....	22
(16) Spännvidden för betongplatta mellan två pelare.....	31
(17) Fick's diffusionslag i 1 dimension	33
(18) Det totala värmeflödet i en mätpunkt i 3D-modellen.....	44

BILAGOR

1. Beräkning av husets vikt
2. COMSOL-parametrar för 2D-modellen
3. COMSOL-parametrar för 3D-modellen

FÖRORD

Detta examensarbete har krävt att jag har fördjupat mig i olika aspekter för husgrunder och deras värmeisolering. Det har varit ett jobbigt men intressant projekt, och jag har också lärt mig mycket om hur COMSOL Multiphysics fungerar.

Jag vill tacka alla min lärare på Yrkeshögskolan Arcada, och speciellt min handledare Rene Herrmann för ett intressant och givande ämne för mitt examensarbete.

Jag vill också tacka mina föräldrar för deras uppmuntran och stöd under mina studier.

Magnus Andersson

Maj 2022

1 INLEDNING

Detta examensarbete jämför grundtyperna pelargrund och platta på mark med varandra ur värmeisoleringens perspektiv. Metoden för detta är teoretisk simulering av grundtyperna för att utreda skillnaderna för värmeisolering. En fördel av att jämföra dessa grundkonstruktioner är att de båda lämpar sig för dåligt bärande mark.

1.1 Bakgrund

I dagens Finland blir det allt mer viktigt att bygga energieffektiva bostäder. Samtidigt håller vårt klimat på att förändras, det blir varmare och regnigare, med kraftigare vindar, vilket ställer hårdare krav på byggnadernas alla delar, inklusive grunden. En mycket använd grundtyp för egnahemshus är platta på mark, dvs. en betongplatta som gjuts direkt på isoleringsmaterial, som ligger på marken. Metoden ställer dock hårda krav på isoleringen, som bär hela husets tyngd, och måste vara fukt- och radontät. Därför är det intressant att undersöka alternativa grundkonstruktioner, varav en är pelargrunden, som inte innebär samma risker med isoleringens hållbarhet.

1.2 Syfte

Motivation till detta temaval härstammar från det egna intresset för mera energieffektiva lösningar i byggnads- och VVS-branschen. Inom inriktningen Energi-och miljöteknik har energieffektivitet studerats ur olika synvinklar och denna kunskap kan därför utnyttjas för att i detta arbete undersöka husgrundens andel av helheten.

Närliggande teman har behandlats av Dan Hedlund och Linus Blom i det byggnadstekniska examensarbetet "Tilläggsisolering och fuktproblem i grundkonstruktionen platta på mark" [1] med syfte att utreda behovet att tilläggsisolering i golvet då grundkonstruktionen platta på mark används. Deras resultat visar att mitten av plattan inte är särskilt utsatt, men att kanten är utsatt för fuktproblem

Ett annat examensarbete, ”Matalaperustusten kylmäsilta- ja lämpövirtatarkastelu COMSOL Multiphysics -ohjelmalla” [2] jämför temperaturmätningar med simuleringsresultat. Skillnaderna i uppmätta och simulerade temperaturer varierade mellan 0.1°C och 1.9°C, och berodde på att det inte var möjligt att beakta snötäckets effekt i simuleringarna. Men resultaten visade också hur viktig placeringen av grundmurens isolering är och hur den påverkar värmeflödet i husgrunden.

Eftersom platta på mark -grundtypen medför risker med isoleringsmaterialets långvariga hållbarhet, som är svår att undersöka i förebyggande syfte, är det viktigt att överväga alternativa grundtyper som saknar dessa risker. Det verkar finnas en brist på publicerade undersökningar där man jämför olika grundtyper, och det syftar detta examensarbete att råda bot på.

1.3 Metod

Metoden för detta examensarbete basera sig på finitelement analys med mjukvaran COMSOL. Arbetets enskilda metodiska delmoment är

- (i) 2D-planering i COMSOL Multiphysics av fundamentelement för ett hussegment med standard platta på mark -grund med isoleringsskum.
- (ii) Termisk jämvikt av distribuerad värmekälla inne i huset, på ett standarddjup i marken och köldkälla utanför grunden, samt genom värmeledning i grunden och marken och konvektion i ute- och inneluften. Beräkning av ett U – värde för fundamentsegmenten. Simuleringarna utförs med COMSOL Multiphysics -simuleringsprogrammet.
- (iii) Alternativ fundamentplan med bärande pelare och kryputrymme utan bärande isoleringsskum. Målsättningen är att fundamentsegmentet har ett U – värde som är minst lika lågt som med isoleringsskummet som underlag.

1.4 Förväntade resultat

De förväntade resultaten baserar sig på den insamlade informationen om olika grundkonstruktioner, använda material och färdiga lösningar från olika företag.

Resultaten är simuleringsresultat för platta på mark och pelargrunder, på basen av vilka man kan se för- och nackdelarna i de olika grundkonstruktionerna ur uppvärmningsperspektiv.

1.5 Arbetets uppbyggnad

Uppbyggnaden av detta arbete är en teoridel som består av litteraturstudier om olika typer av värmeöverföring, husfundamentens uppgift och termiska isolation samt mekaniska belastning. Efter teoridelen beskrivs metoden för arbetet, som består av en finitelement analys med mjukvaran COMSOL. Resultatet av simuleringen presenteras i resultatkapitlet och till slut diskuteras resultatet.

2 LITTERATURSTUDIE

2.1 Värmetransport

Definitionen av värmetransport är en energiöverföring mellan två system som sker på grund av en temperaturdifferens [3]. Värmeöverföringen kan ske genom tre olika mekanismer: Värmeledning eller -konduktion genom ett fast ämne eller en stationär vätska eller gas, strömning eller konvektion i en vätska eller gas, och värmestrålning. Hädanefter används benämningen vätska för både vätskor och gaser, på samma sätt som "fluid" på engelska.

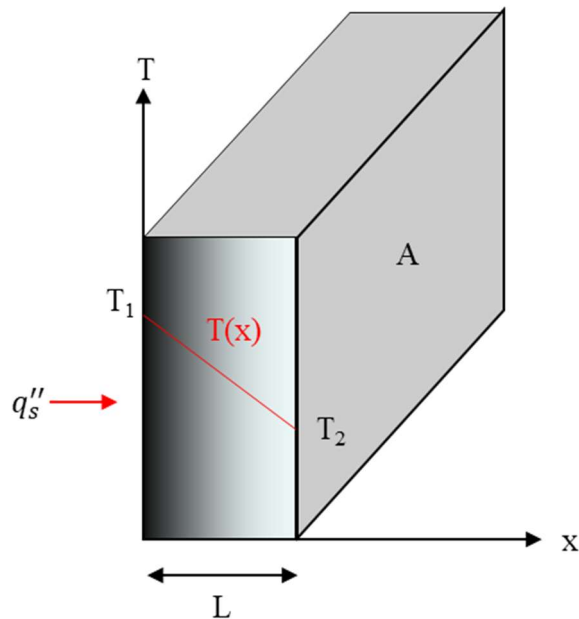
2.1.1 Konduktion

Atom- och molekylvibrationer i ett ämne är beroende av temperaturen, ju högre temperatur, desto mer aktivitet. I vätskor sker konduktionen av denna värmeenergi främst genom direkta kollisioner mellan atomer eller molekyler, medan den sker i fasta material genom vågrörelse i materialets kristallgitter, och även genom fria elektroner i ett strömledande material [3].

Värmeöverföring kan beräknas med hjälp av Fouriers lag, vilken kan uttryckas i 1 dimension som

$$q_x'' = -k \frac{dT}{dx} \quad (1)$$

var värmeflödestätheten q_x'' anger värmeöverföringen i x-riktningen per ytenhet vinkelrätt mot flödet i enheten W/m². Värmeflödestätheten är proportionell till temperaturgradienten $\frac{dT}{dx}$ och värmeledningsförmågan k, som har enheten $\frac{W}{mK}$ och varierar beroende på materialet eller mediet som värmeflödet går igenom. Minustecknet i formeln beror på att värmeflödet är i riktning mot den lägre temperaturen. Värmeflödet Q som har enheten W fås genom att multiplicera värmeflödestätheten med ytan på materialet. Figur 1. nedan visar situationen.



Figur 1. Värmeöverföring genom konduktion i 1 dimension [3].

I jämviktstillstånd och med en linjär temperaturdistribution kan uttrycket för värmeflödestätheten förenklas till

$$q_s'' = -k \frac{T_2 - T_1}{L} \quad (2)$$

var T_1 och T_2 är start- och sluttemperaturen, och L sträckan mellan dem. Här gäller alltså att temperaturerna T_1 och T_2 är konstanta och oberoende av tiden. Därmed är värmeflödestätheten en konstant som gäller för en viss temperaturskillnad.

Ett allmännare uttryck för värmeflödestätheten i 3 dimensioner kan skrivas med kartesiska koordinater som

$$\vec{q}'' = -k \left(\vec{i} \frac{\partial T}{\partial x} + \vec{j} \frac{\partial T}{\partial y} + \vec{k} \frac{\partial T}{\partial z} \right) \quad (3)$$

där \vec{i} , \vec{j} och \vec{k} är enhetsvektorerna i koordinatsystemet, och de partiella derivatorna $\frac{\partial T}{\partial x}$, $\frac{\partial T}{\partial y}$ och $\frac{\partial T}{\partial z}$ anger värmeflödets komponenter i x-, y- och z-riktningarna. Ett viktigt antagande här är att materialet är isotropiskt, dvs. att värmeledningsförmågan inte varierar utan är lika i alla riktningar.

På liknande sätt kan man skriva Fouriers lag i ett cylindriskt eller sfäriskt koordinatsystem, beroende på formen av de objekt som värmeflödet skall beräknas för.

I byggbranschen används ofta storheten värmemotstånd, som beräknas enligt

$$R_T = \frac{L}{k} \quad (4)$$

och har enheten $\text{m}^2\text{K}/\text{W}$. Fördelen med det är att i en konstruktion med flera olika materialskikt kan man addera skiktens värmemotstånd för att få den totala konstruktionens värmemotstånd, och sedan kan värmeflödet beräknas genom hela konstruktionen. En annan ofta använd enhet är värmegenomgångskoefficienten U , som är inversen av värmemotståndet

$$U = \frac{1}{R_T} \quad (5)$$

Värmeflödet Q genom en konstruktionsdel fås då genom att multiplicera U med temperaturdifferensen och ytan A ,

$$Q = U(T_1 - T_2)A \quad (6)$$

Här är förutsättningen att värmeflödet kan förenklas till 1 dimension.

2.1.2 Konvektion

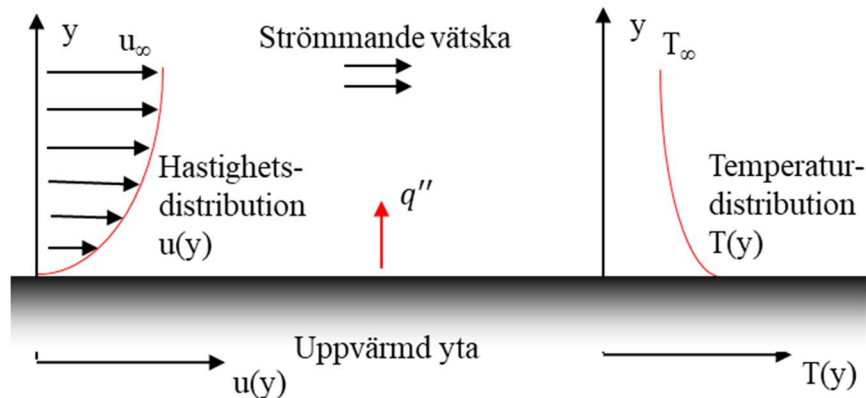
Värmeöverföring genom konvektion i en vätska består av två olika mekanismer. Dels sker det en energiöverföring genom diffusion, som utgörs av slumpmässig rörelse av atomer eller molekyler, och dels leder temperaturskillnader till skillnader i vätskans densitet, vilket orsakar strömningar i vätskan [3]. Detta är naturlig konvektion, men om strömningarna drivs av en fläkt eller pump, eller av vind, talar man om påtvingad konvektion.

Värmeöverföringen mellan en strömmande vätska med en viss temperatur och en fast yta med en annan temperatur är av speciellt intresse, eftersom denna situation är vanlig i olika konstruktioner och maskiner.

Värmeflödestätheten hos en konvektionsprocess följer Newtons lag om nedkylning

$$q'' = h(T_s - T_\infty) \quad (7)$$

var T_s och T_∞ är ytans respektive gasens eller vätskans temperaturer, och h är konvektionens värmeöverföringskoefficient med enheten $\frac{W}{m^2K}$. Dess värde beror på förhållandena i gränsskiktet, typen av vätskans strömning, samt av olika egenskaper hos vätskan. Detta är illustrerat i Figur 2.



Figur 2. Bildningen av gränsskikt vid konvektion [3].

Genom ytans och den strömmande vätskans samverkan bildas det ett så kallat hydrodynamiskt gränsskikt i vätskan, där strömningshastigheten varierar från noll vid ytan, till värdet u_∞ som motsvarar strömningshastigheten. Om dessutom ytans och flödets temperaturer är olika, uppstår också ett termiskt gränsskikt, i vilket temperaturen varierar från ytans T_s vid $y = 0$, till T_∞ längre ute i vätskeflödet. Storleken av dessa gränsskikt är inte nödvändigtvis lika, men om $T_s > T_\infty$ förekommer värmeöverföring genom konvektion mellan ytan och vätskeflödet.

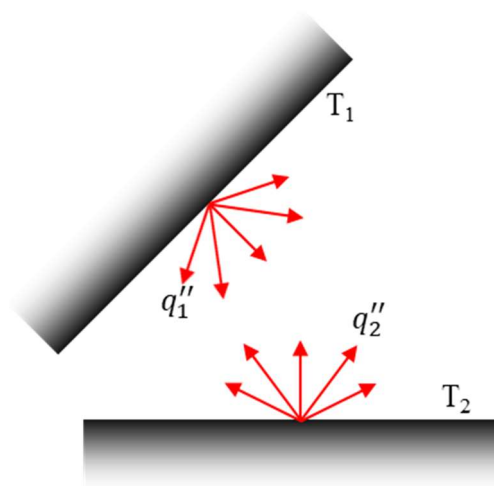
Hastighet- och temperaturdistributionerna i gränsskikten bestäms av ytans och vätskans egenskaper, såsom friktion, densitet, viskositet, värmeledningsförmåga och specifik värme. Konvektionens värmeöverföringskoefficient h beror på alla dessa faktorer, och detta gör att konvektionsberäkningar är mycket komplicerade. För byggnader kan värmeförluster via konvektion vara betydande, om konstruktionerna inte skyddas från vindens påverkan. I [4] ges en approximativ formel för vindkonvektionens värmeöverföringskoefficient för utomhusytor enligt

$$h = 4 + 4 \cdot v \quad (8)$$

var v är vindhastigheten i m/s nära väggytan. Som jämförelse ges också värdet för h för olika inomhusytor som $0.7 - 5.0 \text{ W/m}^2\text{K}$, så det är klart att redan en moderat vind kan ge upphov till mycket större värmeväxlingskoefficient, och därmed stora värmeförluster. Därför strävar man till att skydda stora byggnadsytor från direkt vind, tex. genom att ha en luftspalt mellan det yttersta vägglaget, där luften inte kommer åt att röra sig på grund av vinden.

2.1.3 Strålning

Värmestrålning är elektromagnetisk strålning som emitteras av materia som har en temperatur större än absoluta nollpunkten, vilket betyder att alla ytor utbyter värmestrålning som i Figur 3. Strålningens energi kommer från förändringar i elektronkonfigurationerna i materiales atomer. Strålningen kräver inget medium, utan framskrider allra bäst i vakuum [3].



Figur 3. Två ytor utbyter värmestrålning [3].

För ett idealiskt objekt (så kallat svartkropp, black body på engelska) gäller Stefan-Boltzmanns lag, som sätter en övre gräns för strålningseffekten

$$E_b = \sigma T_s^4 \quad (9)$$

där T är absoluta temperaturen i Kelvin för objektets yta, och σ är Stefan-Boltzmanns konstant ($\sigma = 5.67 \cdot 10^{-8} \frac{\text{W}}{\text{m}^2\text{K}^4}$).

Ett verkligt objekt emitterar mindre strålning än en svartkropp, och för det gäller

$$E = \varepsilon \sigma T_s^4 \quad (10)$$

där ε är emissiviteten för kroppens yta, och dess värde ligger mellan 0 och 1. På samma sätt kan man definiera absorptionsförmågan α som anger hur stor del av inkommande strålningsenergi per ytenhet som ett objekt absorberar. Dess värde beror både på den elektromagnetiska strålningens våglängd och på ytans egenskaper.

Ett ofta förekommande specialfall är strålningsutbyte mellan en liten yta som har temperaturen T_s , och en mycket större isotermisk yta som fullständigt omger den mindre ytan, med temperaturen T_{sur} . Ett exempel är ett föremål inne i en ugn.

Om den större isotermiska ytans emissivitet är lika stor som dess absorptionsförmåga, $\varepsilon = \alpha$, kan nettoöverföringen av strålningsenergi uttryckas som

$$q''_{rad} = \varepsilon \sigma (T_s^4 - T_{sur}^4) \quad (11)$$

Detta uttryck anger skillnaden mellan värmeenergi som frigörs genom emission av värmestrålning, och värmeenergi som mottas genom absorption av värmestrålning.

Exakta beräkningar av värmestrålning i reella omgivningar kompliceras av olika våglängder hos strålningen, infallsvinkeln som påverkar reflektionen, och genomskinligheten hos materialen. I byggbranschen används följande approximativa och lätthanterliga uttryck för värmestrålningens flödestäthet mellan två parallella ytor [4]:

$$q'' = a_r \cdot (T_1 - T_2) \quad (12)$$

$$a_r = 4 \cdot \varepsilon_{\delta} \cdot \sigma \cdot T_{medel}^3 \quad (13)$$

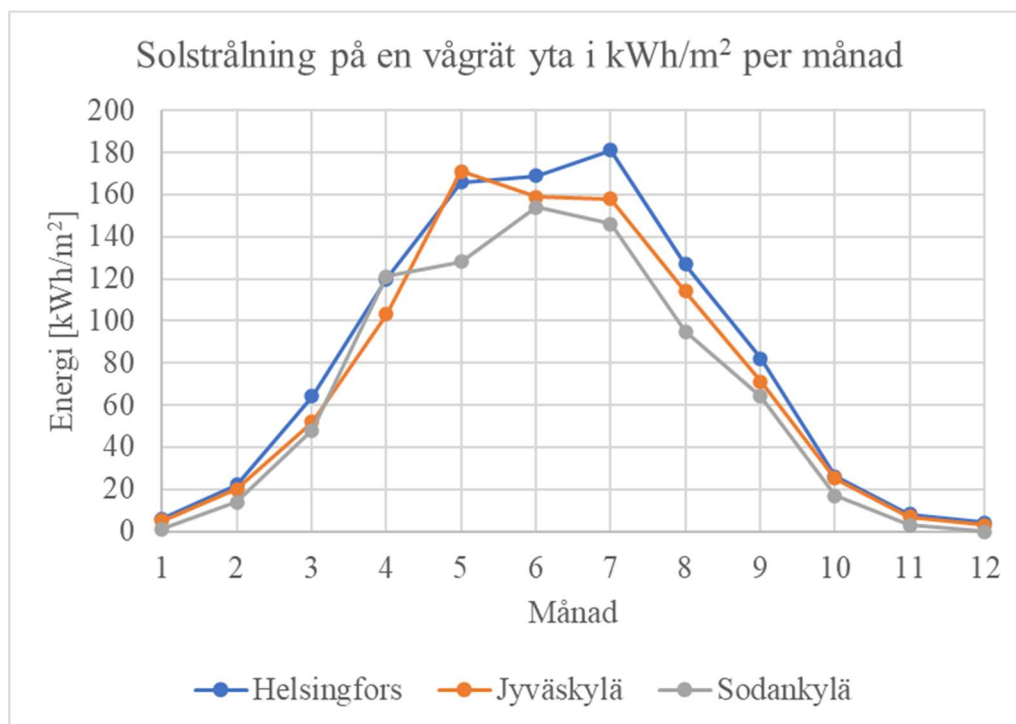
$$\frac{1}{\varepsilon_{\delta}} = \frac{1}{\varepsilon_1} + \frac{1}{\varepsilon_2} - 1 \quad (14)$$

var a_r är värmeöverföringskoefficienten, ε_{δ} ytornas ömsesidiga strålningsstal, ε_1 och ε_2 ytornas emissivitet, och T_{medel} medeltemperaturen mellan ytorna. Strålningsstalet ε_{δ} är omkring 0.9 för de flesta byggnadsmaterial, med undantag för blanka ytor, tex. $\varepsilon_{\delta} = 0.2$ för galvaniserade metaller. Genom att använda dessa

uttryck kan man beräkna den approximativa strålningsöverföringen i luftspalter och andra håligheter i byggnader.

Värmestrålning har också betydelse för byggnaders nedkylning på natten och uppvärmning på dagen. Under kalla, molnfria nätter kan himlavalvets temperatur vara betydligt lägre än lufttemperaturen. Det innebär att strålningsutbytet för byggnaders ytor som vetter mot himlen medför att ytorna förlorar mer energi än de tar emot, vilket gör att ytornas temperaturer blir lägre än vad enbart lufttemperaturen skulle orsaka. I [4] presenteras också en approximativ ekvation för nattutstrålningen, men den kan inte användas direkt, eftersom byggnadsytans temperatur som ingår inte är känd. I praktiken måste man anta en viss temperatur och iterera tills ekvationen ger samma svar som utgångsvärdet.

Solens strålningsenergi varierar i Finland beroende på årstiden och orten enligt följande graf [5] i Figur 4.



Figur 4. Solens strålningsenergi i Finland [5].

Totalenergin under ett års tid är i Helsingfors ca. 975 kWh/m², som jämförelse är den motsvarande solenergin vid ekvatorn ungefär 2 gånger så stor [6].

Solstrålningens inverkan måste beaktas då kylningsbehovet beräknas för tex. kontorsbyggnader med stora fönsterytor.

2.2 Finska grundkonstruktioner

2.2.1 Jordarter

Jordarter kan indelas i mineraljordarter och organiska jordarter. Den senare kategorin duger inte som underlag för byggnader, utan måste grävas bort och ersättas med lämplig mineraljordart, vanligen sand, grus eller lättgrus. Mineraljordarter kan klassificeras enligt nedanstående tabell.

RT-klassificering		Granulat-diameter [mm]	GEO-klassificering	
Jordart	Sortering		Sortering	Jordart
block	block	> 600	block	block
		600 - 200	stora stenar	stenar
stenar	stora stenar	200 - 60	små stenar	
	små stenar	60 - 20	grovt grus	grus
grus	grovt grus	20 - 6	mellangrus	
	fint grus	6 - 2	fint grus	
sand	grov sand	2 - 0.6	grov sand	sand
	fin sand	0.6 - 0.2	mellansand	
mo	grov mo	0.2 - 0.06	fin sand	
	fin mo	0.06 - 0.02	grovt silt	silt
mjäla	grov mjäla	0.02 - 0.006	mellansilt	
	fin mjäla	0.006 - 0.002	fint silt	
lera	lera	< 0.002	lera	lera

Tabell 1. Klassificering av mineraljordarter [7]. RT står för byggnadsteknisk (fi rakennustekninen) och GEO för geoteknisk klassificering.

Morän är den allmännaste mineraljordarten i Finland. Den består av osorterad avlagring av bergmaterial, som har bildats under istiden. Den nämns inte i tabellen ovan, eftersom den kan innehålla alla partikelstorlekar från lera till stenblock.

De flesta kommuner i Finland kräver att man måste ha en grundundersökningsrapport för att få bygga. Det finns ingenjörbyråer som utför grundundersökningar genom att borra hål i marken vid den planerade byggplatsen för att ta reda på hur

långt det är till berg eller fast morän. Alternativt kan sk. statisk plattbelastning användas för att utreda markens bärförmåga. I metoden placeras en stålplatta av bestämd storlek på marken, och sedan belastas den med successivt större kraft samtidigt som man avläser hur mycket den sjunker in. Ur resultaten kan markens elasticitetsmodul E beräknas [8]. I Finland följer man den tyska standarden [9] med en del modifieringar [10].

I [11] har dimensioneringen av ett platta på mark -fundament beskrivits i detalj utgående från markens bärförmåga och punktbelastningarna som plattan kommer att utsättas för. Den största osäkerhetsfaktorn i beräkningarna konstateras vara markens bärförmåga, som helst borde mätas på plats och dessutom på flera punkter av fundamentets omfattning.

Beroende på jordarten har marken olika värmeledningsförmåga och värmekapacitet, vilka inverkar på husgrundens värmeisoleringsgenskaper. Följande tabell anger dessa materialstorheter för olika jordarter.

Material	Värmeledningsförmåga [W/mK]	Värmekapacitet [kJ/kg°C]	Volymvärmekapacitet [kWh/m³°C]
Granit	2.9 - 4.2	830	0.62
Sandsten	3.0 - 5.0	730	0.55
Lerskiffer	1.7 - 3.5	850	0.66
Kalksten	1.7 - 3.0	840	0.63
Kvartsit	5.0 - 7.0	790	0.58
Sand, grus ¹	1.6 - 2.0		0.81
Sand, grus ²	0.7 - 0.9		0.398
Lera	0.85 - 1.1		0.83 - 1.0
Gyttja	1.5 - 2.5		0.61 - 0.83
Sandig gyttja	0.6 - 1.8		0.36 - 0.53
Vatten	0.62	4180	1.18

¹ under grundvattennivån, ² ovanför grundvattennivån

Tabell 2. Värmeledningsförmåga och värmekapacitet för en del jordarter [12]

2.2.2 Tjäle

En annan faktor som måste beaktas är tjälen, som orsakas av att vattnet i marken fryser till is och expanderar, och orsakar rörelse i marken. Den förekommer i alla jordarter, men är kraftigast i löst packade jordarter, tex. silt, med liten partikelstorlek, eftersom de kan suga upp vatten genom kapillärkraften. När vatten fryser, ökar dess volym med 9% [13], vilket betyder att markhöjningen orsakad av tjäle är minst lika stor, tom. större om islagret som bildas får ett tillskott av vatten djupare ur marken.

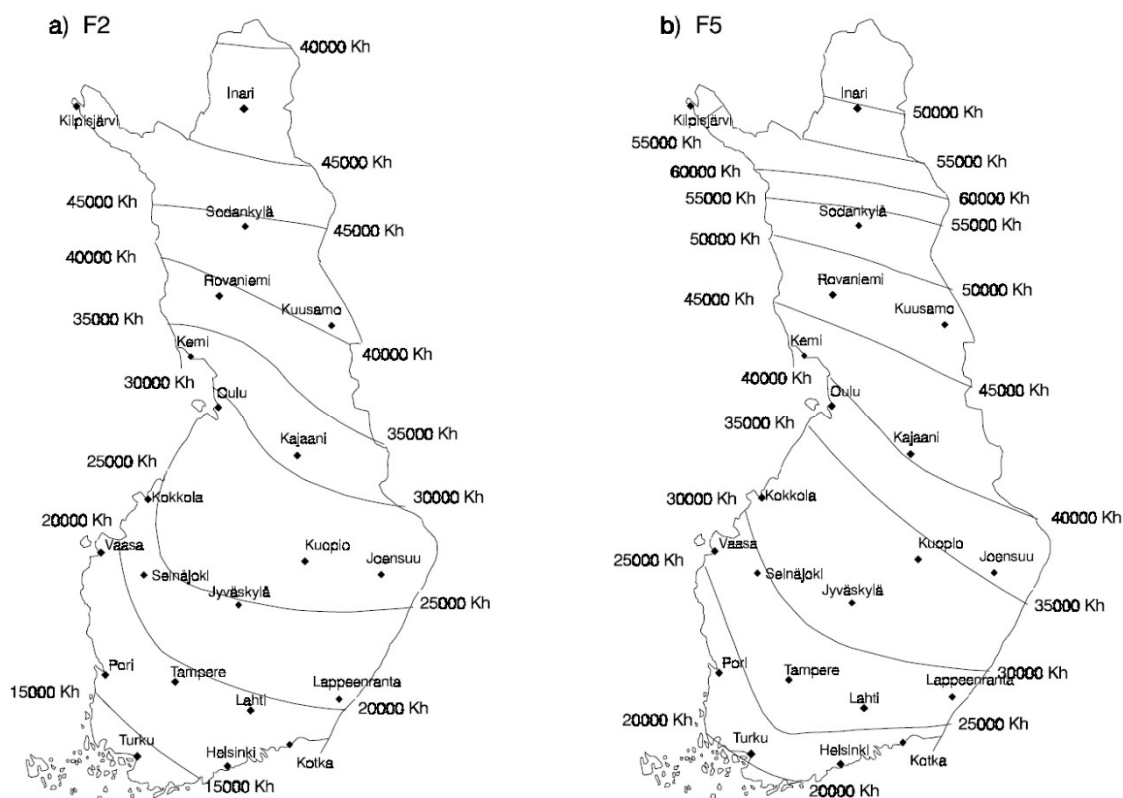
Tjäldjupet varierar mellan 80cm i södra Finland till över 2m i norra Finland, och beror på vintertemperaturerna och snölagrets tjocklek [14]. Klimatförändringen förutspås minska betydligt på djupet, men i nuläget måste man använda sig av de fastslagna normerna för tjäldjupet.

Tjäldjupet kan beräknas ur den sk. frostmängden, som varierar beroende på hur sträng vintern är på en viss plats. Formeln som används för frostmängden är [15]

$$F = 24 \cdot \sum_j (T_f - T_{d,j}) \quad (15)$$

var F är frostmängden i enheter av Kelvintimmar (Kh, ibland används $h^\circ C$), T_f är fryspunkten = $0^\circ C$, och $T_{d,j}$ är dygnets medeltemperatur för dagen j . Summeringen startas från den höstdag då dygnets medeltemperatur har sjunkit under fryspunkten, och den efterföljande kalla perioden har en större gradsumma än eventuella senare varma perioder. På samma sätt iakttar man gradsummorna på våren, och avslutar summeringen då medeltemperaturen har stigit över fryspunkten, och gradsumman har stigit över tidigare korta kalla perioder.

Man har fört statistik över observerade frostmängder genom tiderna, och man kan då presentera frostmängden på olika orter enligt hur ofta de har förekommit. Detta visas i Figur 5.



Figur 5. Frostmängder som upprepas en gång per 2 år (F2) och en gång per 5 år (F5) [15]

Tjäldjupet kan estimeras på basen av frostmängden, och det finns olika approximativa formler som har utvecklats för ändamålet. Den vanligaste metoden är att skydda grundkonstruktionerna mot tjäle genom värmeisolering, en sk. låg grund. Tjälskyddet hindrar marken under grunden att frysa. Till låga grunder räknas sådana som vilar på en grundsula eller platta. Med lättgrund avses de fall, där marken är dåligt bärande och måste grävas bort och ersättas med lättgrus. Alternativet till dess grunder är pelargrunder, där pelare av armerad betong eller stål drivs in i marken till ett större djup än tjälens när. Denna metod är dyrare än en låg grund.

För betongplattor på mark, måste man försäkra sig om att det inte förekommer kapillärsugning av fukt från marken [4]. Detta kan hindras genom att använda ett kapillärbrytande skikt under plattans isolering, tex. av grovt grus som inte innehåller mindre partiklar. Samma gruslager kan fungera som dräneringsskikt för att få bort fukt under grunden.

2.3 Husfundamentets uppgift och husets investeringshorisont

Fundamentet för ett hus har många funktioner. De främsta och viktigaste funktionerna är:

- Stabiliserande funktion: Ett hus måste stå på en stadig stomme. På vintern, när marken fryser kan den röra på sig, det kallas för tjälskjutning. Också andra fenomen, tex. rikligt regn kan orsaka sättningar i marken, och fundamentet måste klara av det och inte röra sig ojämnt eller spricka.
- Fuktavvisande funktion: Fukt i marken får inte sprida sig till husets andra konstruktioner, för det kan leda till röta och mögel. Idag är fukt ett allt större problem pga. klimatförändringen som orsakar mer regn, så detta är en mycket viktig funktion.
- Isolerande funktion: Husfundamentet skall isolera resten av huset från kylan i marken och luften. Detta är också alltmer viktigt, när kraven på bostäders energieffektivitet ökar.
- Utjämnande funktion: Om man bygger i en sluttande tomt kan man använda husfundamentet för att ta upp nivåskillnader i omgivningen, istället för att bygga huset med flera nivåer.
- Radonskydd: Om fundamentet är byggt på rätt sätt kan det hindra att radongasen tränger in i huset och utgör en hälsorisk. Hus med källare löper den största risken att släppa in radon på sådana orter i landet där det förekommer.
- Utseendet: Historiskt sett har husfundamentet haft en viktig estetisk funktion. Utseendet påverkas om man har huset upplyft på ett högt fundament.

Fundamentet måste klara av alla mekaniska krafter som husets utsätts för, eftersom de fortskrider genom konstruktionerna och belastar fundamentet i sista hand. Hit hör bland annat

- Husets egen tyngd
- Den omkringliggande markens tryck, speciellt för källargrunder
- Vindbelastning
- Snöbelastning

Ett husfundament kan haverera antingen mekaniskt eller genom att släppa in fukt så att röta och mögel får fotfäste i husets konstruktioner. Om marken eller isoleeringen under fundamentet ger efter, kan det uppstå sprickor i konstruktionerna som kräver reparation. Fukten kan i sig själv också skada betongfundament, eftersom den kan påskynda korrosionen av armeringsjärnen ([16], kapitel 4.4) i betongen, och genom det försvaga fundamentet. Om vatten kommer in i grunden i stora mängder kan det också frysa på vintern och orsaka skador. Därför är fundamentets fuktisolering samt dräneringen som läggs in i marken i byggnadsskedet av yttersta vikt.

I byggbranschens instruktionskort KH 90-00403 [17] anges medellivslängden och kontrollintervall för olika delar av fundamentet, men i många fall finns det inte ett specifikt antal år, utan det antas att delarna håller lika länge som själva huset, dvs livslängden bestäms av husets övriga konstruktioner. Dock anges livslängden för isoleringsskum under ett betongfundament som 50 år, i belastningsklass 1 (svår). Kontrollintervallen för de flesta delarna i ett fundament är 5 år [17].

Ofta utgår man från en livslängd av 50 år när man planerar olika delar av ett egnehemshus. Detta betyder förstås inte att huset håller i bara 50 år, med regelbundna kontroller, bra underhåll och nödvändiga reparationer kan det hålla betydligt längre. Å andra sidan är det mycket svårt att upptäcka belastningsskador i skummet före de har orsakat sprickor i betongplattan, vilket innebär att grundtypen platta på mark medför större risker än andra grundlösningar som är lättare att inspektera.

Reparation av husgrunder, speciellt av typen platta på mark, är inte lätta att utföra, men det har utvecklats metoder för detta. Företaget Geobear [18] använder en metod, där man injicerar polymerharts i marken. Polymeren sväller och fyller alla porer i marken, som blir hård och vattentät. Eftersom trycket som genereras när polymeren härdar och sväller kan uppgå till 10Mpa, har den tillräckligt med kraft för att lyfta också vägar och järnvägsspår som har skadats av att marken har satt sig. Volymökningen, och därmed trycket, kan regleras på kemisk väg från 2- till

30-faldig. Husgrunder kan repareras genom att borra små hål i golvet för injicering av polymeren under husgrunden.



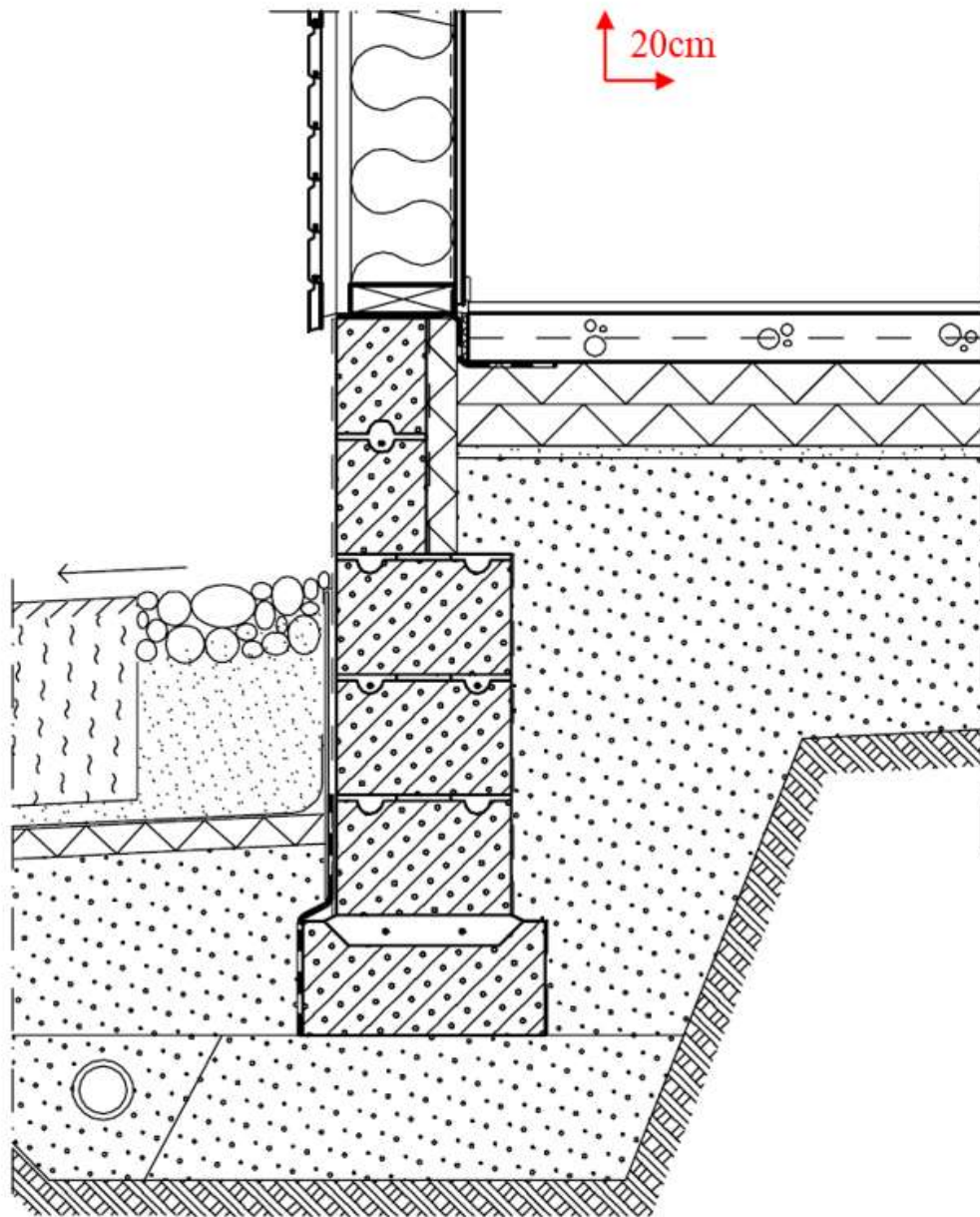
Figur 6. Injicering av polymerharts under husgrunden genom hål i golvet (www.geobear.fi)

Andra företag har utvecklat liknande metoder, tex. Suomen Uretaanipalvelu [19] använder sig av polyuretan, dvs. samma material som platta på mark -grunden vanligen vilar på.

2.4 Termisk isolation och standardplaner för fundament

Grundtypen platta på mark kan förverkligas på två olika sätt, beroende på hur väl bärande den underliggande marken är. Om marken är tillräckligt bärande, kan grundmuren utföras med murade block, och betongplattan kan gjutas separat innanför grundmuren.

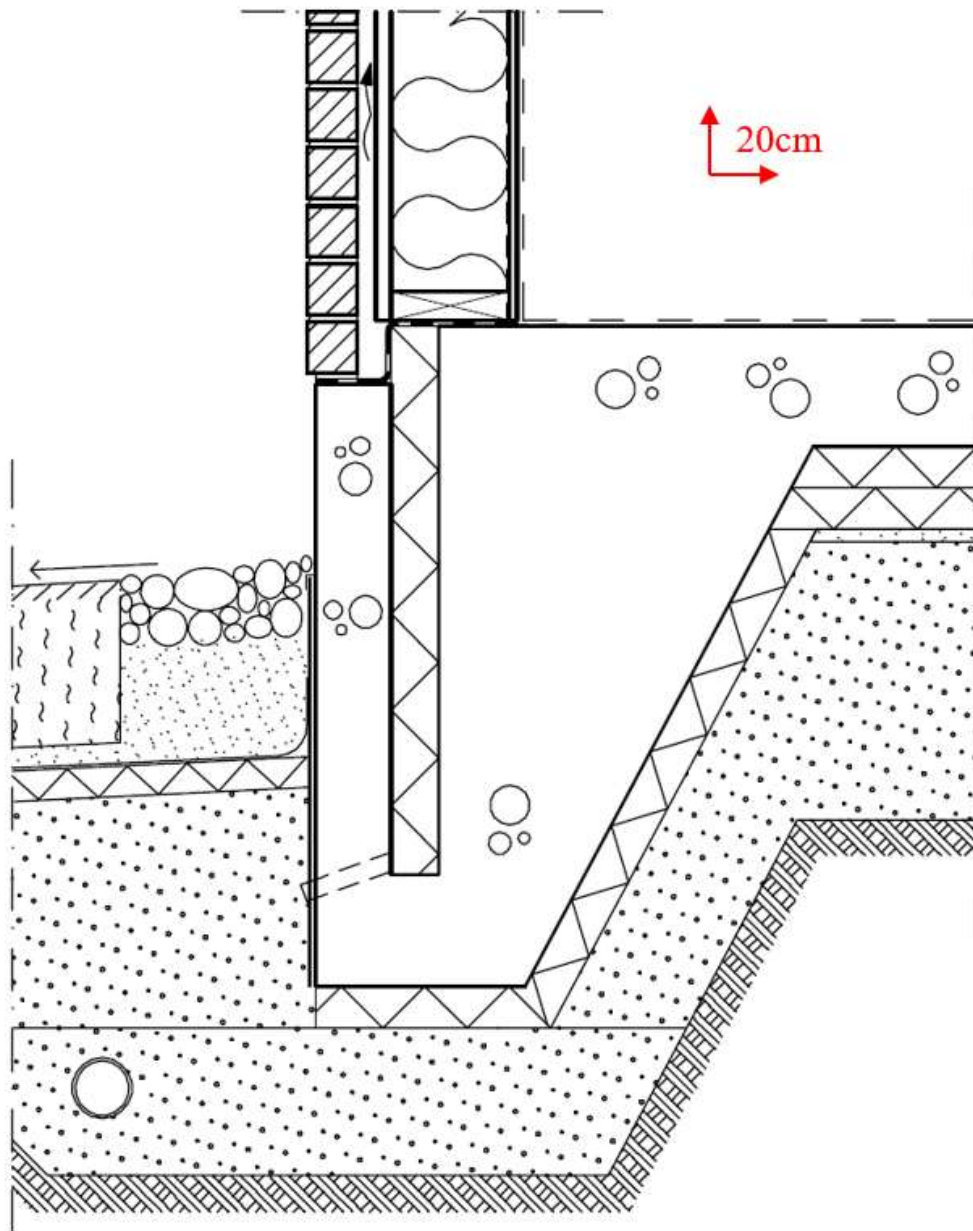
Mittakaava 1:20



Figur 7. Grundmur av block och bottenbjälklag som platta på mark [20]. OBS: Dimensionerna med röd färg är endast riktgivande, ritningen är inte exakt.

Om marken inte är tillräckligt bärande för en separat grundmur, så måste man gjuta en bred kantbalk och golvplattan samtidigt, så att man får en enhetlig konstruktion. Denna konstruktion har simulerats i detta slutarbete.

Mittakaava 1:20



Figur 8. Platta på mark -grund med kantförstärkning [20]. OBS: Dimensionerna med röd färg är endast riktgivande, ritningen är inte exakt.

I båda fallen spelar isoleringen mellan betongen och marken en viktig roll, både som värmeisolering och fuktspärr.

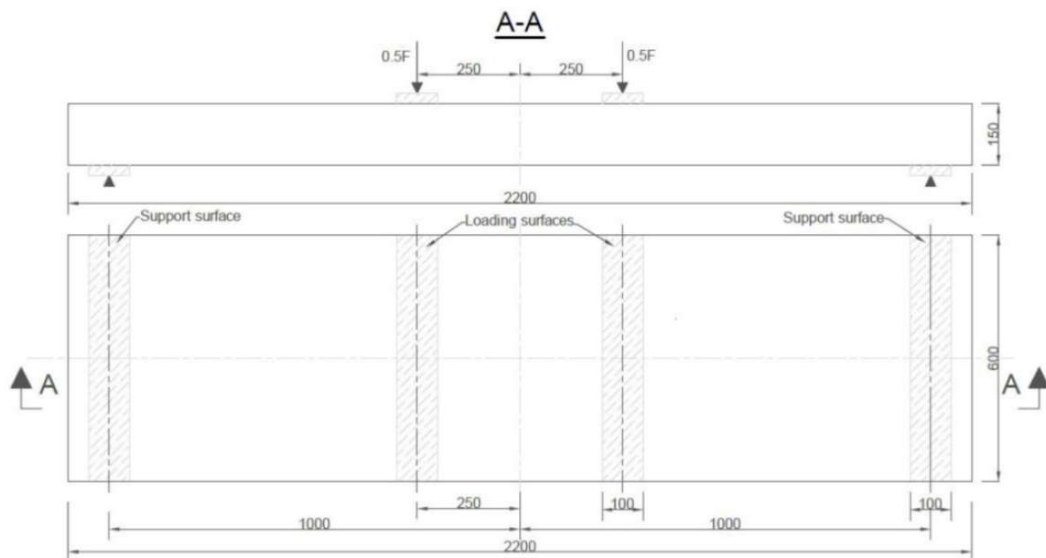
En alternativ grundlösning är en pelargrund, där betongplattan vilar på betong- eller metallpelare, med ett mellanrum mellan betongplattan och marken.

2.5 Mekanisk belastning och bärkraft

I Finlands byggbestämmelsesamling [21] finns riktgivande gränsvärden för byggnaders totalsättning. För en betongplatta på mark är kravet att den underliggande marken packas så bra att plattan sätter sig högst 5 mm mer än byggnaden som helhet.

Betongplattans hållfasthet beror på många olika faktorer, som tex. armeringstätheten, armeringsstålets dimensioner och materialegenskaper, samt förstås betongens kvalitet och gjutningsarbetets utförande.

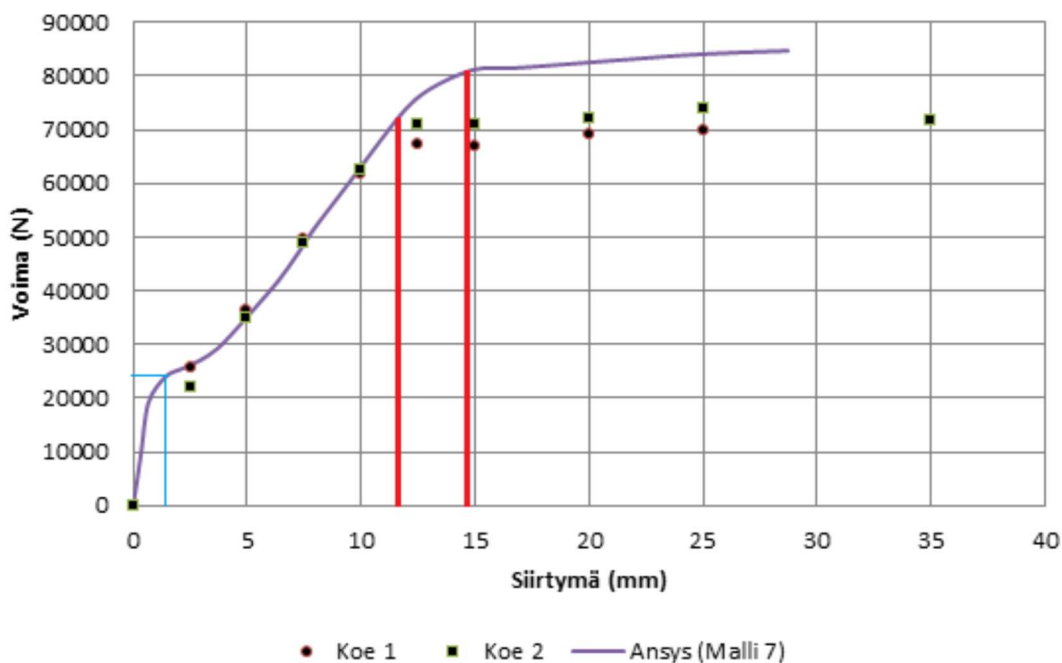
I [22] har man utfört belastningsmätningar av en 150mm tjock armerad betongplatta, och även utfört simuleringar av testet med ANSYS-simuleringsprogrammet. Plattans ytdimensioner var 200 x 60cm, och den var stödd vid ändorna.



Figur 9. Betongplattans belastningsarrangemang [22].

Belastningen applicerades symmetriskt mitt på plattan längs med två linjer med 50cm avstånd från varandra. Då uppstår ett konstant vridmoment på området mellan belastningslinjerna. Belastningskraften uppgick ända till 85 kN, och böjningen av plattan mättes vid varje belastningspunkt.

I Figur 10 visas resultaten av både mätningarna och ANSYS-simuleringarna. Den blå linjen markerar var den första sprickan uppstod, den första röda linjen var armeringsstålets sträckgräns överskrids i en punkt på plattan, och den andra röda linjen anger var sträckgränsen har överskridits överallt inom området mellan plattans belastningslinjer. Simuleringen ger nästan identiska resultat som mätningarna ända tills sträckgränsen, och orsaken antogs vara att armeringsstålets elasticitet inte hade exakt rätt värde i simuleringarna.



Figur 10. Belastningskraft som funktion av böjning för en armerad betongplatta [22].

Eftersom de första sprickorna i det här fallet uppstod vid en kraft av ungefär 25 kN, så utgör detta en gräns för plattans belastning, eftersom fukt kan tränga in i betongen via sprickor och orsaka korrosion av armeringsstålet, vilket ytterligare minskar plattans bärförmåga på lång sikt [16]. Eftersom plattans bredd var 60cm, så betyder det att en sådan betongplatta klarar av linjebelastningen 41.7 kN/m, då den inträffar 0.75m från stödpunkten. Uttryckt i vridmoment blir det 31.3 kNm.

Eftersom den testade plattan var 150mm tjock, så kan man anta att en 200mm platta klarar av åtminstone en 25% större belastning, dvs. 52 kN/m eller ett vridmoment på 39 kNm.

För en pelargrund är betongens hållfasthet av större vikt än en för en platta på mark -grund, eftersom plattan vilar på isoleringsskummet, medan pelargrundens betongplatta endast har stöd av pelarna, som också måste klara av belastningen.

I Finlands byggbestämmelsesamling [23] fastställs att armerade betongpelare bör ha en tvärsnittsytta på minst 28000 mm². För en rund pelare innebär detta en diameter på 200mm, medan en fyrkantig skulle ha en bredd av 167mm. Bärkraften av en armerad pelare beror delvis på tjockleken av armeringsstålet, men i [24] presenteras provresultat för betongpelare med samma tvärsnittsytta och olika tjocklekar för armeringsstålet. Även den klenaste armeringen 4T12 ger en pelare som kan bära upp ett lodrätt tryck av 73 MPa, dvs. 73 MN/m². Då kan vi beräkna kraften genom att multiplicera med tvärsnittsytan, och den blir ca. 2MN.

I kapitel 2.7 har vikten av ett hus beräknats, och den kan variera mellan 6 kN/ m² och 34 kN/ m². för ett hus med ytan 100m² kan tyngden variera mellan 0.6MN och 3.4MN. Detta betyder, att 4 pelare skulle kunna bära upp hela huset, så avgörande för pelarnas antal blir inte pelarnas bärkraft, utan den maximala spännvidden för betongplattan, som vilar på dem.

En platta med tjockleken 200m klarar av ett vridmoment på 39kNm för varje meter av bredd. Eftersom det maximala vridmomentet τ mellan två pelare inträffar på mittpunkten mellan pelarna, kan man beräkna spännvidden S som

$$\tau = \frac{S}{2} \cdot Vikt \Rightarrow S = \frac{2 \cdot \tau}{Vikt} \quad (16)$$

Då blir resultatet att spännvidden varierar mellan 13m och 2.3m för det lättaste och tyngsta huset.

Men för en 200mm betongplatta rekommenderas en spännvidd på högst 4.5m [25], så för simuleringen av pelargrunder begränsas mellanrummet mellan pelarna till 2 – 4m.

2.6 Torkning av pelargrunden

I Miljöministeriets förordning om byggnaders fukttekniska funktion står det att höjden på kryputrymmet under en ny byggnad ska vara i genomsnitt minst 0.8 meter [26]. Detta gäller dock bara för en ”riktig” krypgrund där den inneslutande grundkonstruktionen är bärande. För en pelargrund som enbart omsluts av isoleringsmaterial kan mellanrummet vara mindre, tex. 0.4 meter.

En pelargrund med värmeisolering på sidorna av grunden kan få fuktproblem precis som en krypgrund. Dessutom finns det en risk att radongas samlas i kryputrymmet och tränger upp genom betongplattan in i huset. Enligt Finlands Byggbestämmelsesamling [27] krävs det alltid radonteknisk planering vid ett nybygge, om inte en radonundersökning har visat att radonhalten i bostäder på orten ligger under den maximala tillåtna radonhalten, som är 200 Bq/m³.

Detta betyder, att kryputrymmet måste ventileras. Problematiken kring maskinell ventilering av kryputrymmen har behandlats i [28]. Ett tillräckligt luftombyte för krypgrunder av betong under uppvärmningsperioden anges som 0.5 m³/h per m². Ventilationen kan utrustas med termostat, så att luftombytet justeras automatiskt beroende på temperaturen i kryputrymmet. Kryputrymmet kan också utrustas med maskinell avfuktning, som avlägsnar fukten ur kryputrymmet.

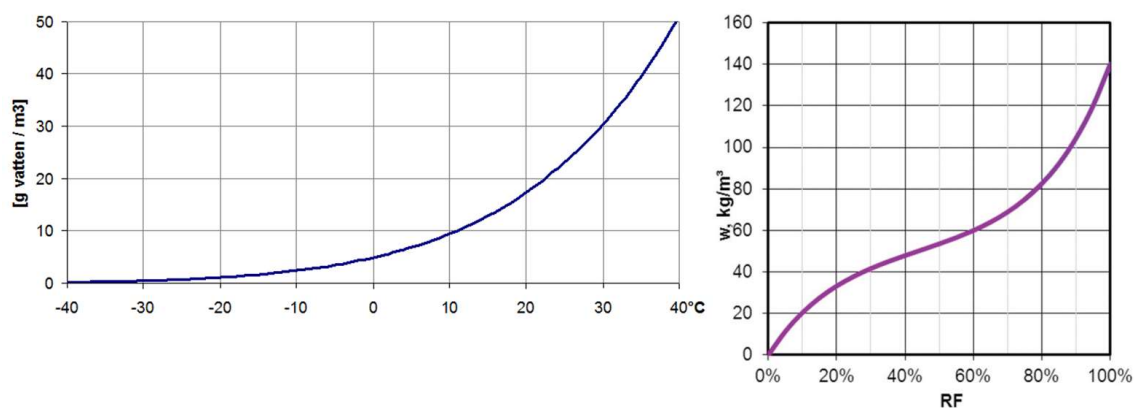
I [29] behandlas också olika aspekter av krypgrunders fuktproblem, och här nämns iden om att ta värme från husets vind eller takfot och använda den för att värma upp och därigenom torka krypgrunden. Men här finns risken att luftens fuktighet är större än betongens, eller att temperaturen i krypgrunden är så låg att det uppstår kondensation på betongytorna.

I det första fallet gäller Fick's diffusionslag [3], sida 882. Den behandlar en koncentrationsgradient av ett ämne som medför att ämnet diffunderar från ställen med högre koncentration till ställen med lägre koncentration tills en jämvikt har uppstått. Lagen gäller för olika system, tex. saltlösningar, eller som i detta sammanhang, för vatten i form av fukt i byggmaterial, och kan i 1 dimension skrivas som

$$J = -D \frac{dc}{dx} \quad (17)$$

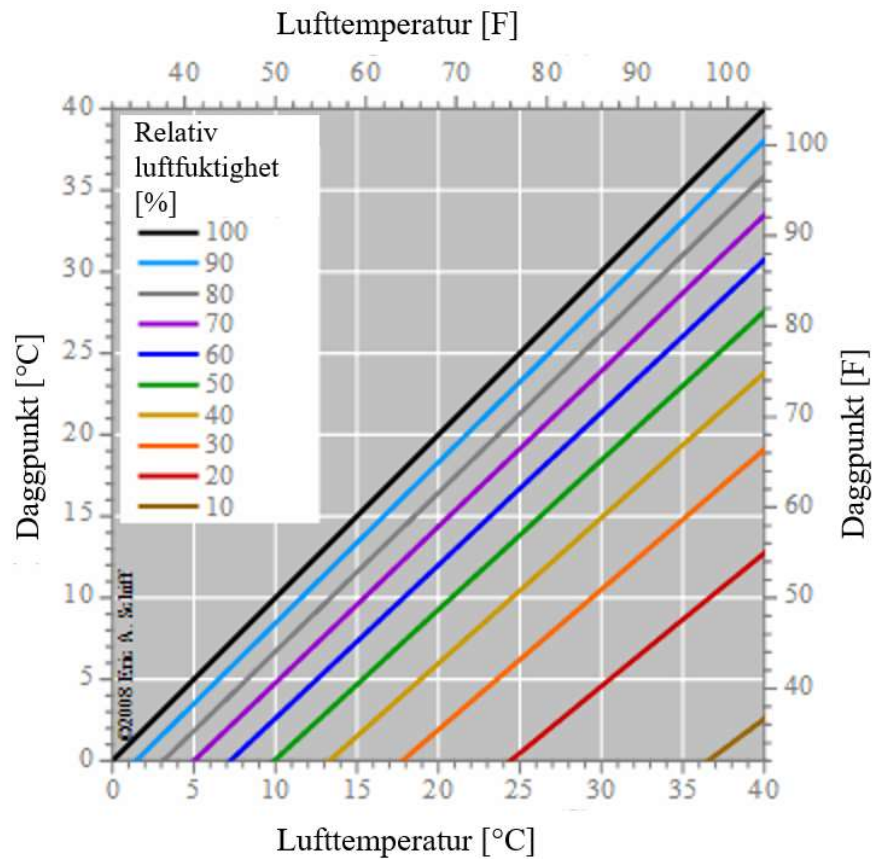
där J är flödet uttryckt i substansmängd per area och tid, D är diffusionskoefficienten, c är koncentrationen av ämnet, och x är positionen. Flödets riktning mot en lägre koncentration bestäms av minustecknet.

Men eftersom betongens kapacitet att lagra fukt är betydligt större än luftens, vilket är illustrerat i Figur 11, är det ytterst osannolikt att luftens absoluta fuktighetskoncentration skulle vara större än betongens absoluta fuktighetskoncentration. Därför sker det knappast någon ytterligare diffusion av fukt från luften till betongen.



Figur 11. Kurvan till vänster anger den maximala vattenmängden i luft som funktion av temperaturen [30]. Kurvan till höger anger vattenmängden i betong som funktion av den relativa luftfuktigheten [31].

I det andra fallet kan en låg temperatur i kryppgrunden leda till kondensation, om luften som kommer in har hög fuktighet, och kryppgrundens temperatur är lägre än daggpunkten, dvs. temperaturen vid vilken vattnet kondenserar för en viss relativ luftfuktighet. Den största risken för detta sker på sommaren, eftersom varm luft kan innehålla mer fukt än kall luft. Simuleringarna som beskrivs i stycke 4.2 visar, att kryppgrundens marktemperatur är nästan konstant, och är 5.4°C då uttemperaturen är 20°C.



Figur 12. Daggpunkten som funktion av lufttemperaturen och den relativa luftfuktigheten [32].

Figur 12 visar, att en relativ luftfuktighet på 40% vid lufttemperaturen 20°C ger en daggpunkt på ungefär 5°C. Det betyder, att kryppgrunden måste utrustas med maskinell avfuktning, som hindrar den relativa luftfuktigheten från att stiga över 40%. I annat fall kan mögel börja växa på kryppgrundens ytor.

2.7 Isoleringskummets egenskaper

För platta på mark -fundament används vanligen EPS (Expanderad PolyStyren) som värme- och fuktisolering. EPS tillverkas genom att små kulor av polystyrenplast expanderas med hjälp av vattenånga och bildar block med luftfyllda celler.

Blocken kapas sedan till skivor. I Finland har vi 4 tillverkare av EPS-isoleringsmaterial: BEWi M-Plast Oy [33], Jackon [34], Finnfoam [35] och Inora (fd. UK-Muovi) [36].

Eftersom EPS-materialet placeras underst i fundamentet, och betongplattan gjuts ovanpå EPS-skivorna, är materialets trycktålighet en viktig egenskap. Tillverkarna har olika EPS-produkter vars långvariga trycktålighet varierar mellan 100 och 500kPa. Eftersom $1 \text{ Pa} = 1 \text{ N/m}^2$, betyder detta att EPS-skivornas bärkraft är 10 – 50 ton per kvadratmeter.

En annan viktig parameter för isoleringsmaterialet är sk. belastningskrympning vilken anger i procent hur mycket materialet krymper under 50 år med maximi-belastning. Typiska värden är $\leq 2\%$.

2.8 Grundens belastning

För att kunna beräkna belastningen på grunden, måste man veta vikten av huset. Enligt [37] kan man använda följande utgångsvärden för att beräkna husets tyngd:

- Vägghöjden av ett 1-våningshus är 4m
- Vägghöjden av ett 2-våningshus är 8m
- Väggarnas tjocklek i ett trähus är 0.35m, vikt 1.5kN/m^3
- Väggarnas tjocklek i ett hus av lättblock är 0.42m, vikt 7.5kN/m^3
- Väggarnas tjocklek i ett hus av betongelement är 0.45m, vikt 15kN/m^3
- Bottenbjälklagets vikt för alla konstruktionstyper är 5kN/m^2 . Detta har dock ingen betydelse i platta på mark -grunder, där plattan själv är bottenet
- Mellanbjälklagets vikt för ett trähus är 2kN/m^2
- Mellanbjälklagets vikt för ett hus av lättblock eller betongelement är 5kN/m^2
- Takets vikt är 1.2kN/m^2
- Snöbelastningen är 2kN/m^2
- Nyttovikten för botten- och mellanbjälklaget är 2kN/m^2

Ur dessa värden kan man beräkna vikten av ett hus per kvadratmeter (Bilaga 1). Som resultat får man följande tabell:

Beräknade totalvikter /m ²	Vikt	Enhet
1-vånings trähus	5.92	kN/m ²
2-vånings trähus	10.64	kN/m ²
1-vånings lättblockhus	10.24	kN/m ²
2-vånings lättblockhus	22.28	kN/m ²
1- vånings betongelementhus	16.00	kN/m ²
2-vånings betongelementhus	33.80	kN/m ²

Tabell 3. Beräknad totalvikt per kvadratmeter av bottenyta för olika hustyper.

För platta på mark -grunder måste ännu totalbelastningen på värmeisoleringen under den gjutna betongplattan beräknas. För armerad betong används vanligen en densitet på 2500 kg/m³ [38]. Eftersom en typisk tjocklek för betongplattan är 200mm, blir dess vikt per kvadratmeter då 500 kg/m², eller 5kN/m².

Minimi- och maximibelastningen av värmeisoleringen blir då, beroende på hustyp, 11 – 39 kN/m². Här gäller förstas antagandet, att vikten fördelar sig jämnt över hela grunden, i praktiken kan belastningen längs husets ytterväggar vara en aning större än mitt i huset. Belastningen måste beaktas då man väljer isoleringsmaterialet, så att det har tillräcklig trycktålighet för att kunna bära upp huset utan att deformeras.

Maximal belastning kan beräknas om man tar ett 100m² 2-vånings betongelementhus, som tillsammans med den gjutna plattan kommer att ha totalvikten 39kN/m². Om man antar att belastningen enbart fördelar sig på ytterväggarna, och att dessa har en tjocklek på 45cm, så blir den totala belastningsytan 40m·0.45m = 18m², och då måste isoleringsmaterialet under plattan klara av 217kN/m². För ett 1-vånings trähus av samma storlek, med väggjockleken 30cm, blir belastningen endast 92kN/m². Men eftersom platta på mark -grunden vanligen gjuts med en kantbalk som är mycket tjockare än själva plattan, så bär den upp största delen av husets tyngd, och belastningen på isoleringsmaterialet blir betydligt mindre.

2.9 Finiteelementanalys för termisk analys

Finita elementmetoden (FEM) eller finiteelementanalys (FEA) är en allmän benämning på kalkylmetoder som används inom många olika tekniska branscher. Grundidén är den samma i alla användningsområden, där konstruktionerna är så komplexa att en direkt analys inte är möjlig. Istället delar man upp konstruktionen i mindre delar, dvs. element, i vilka de partiella differentialekvationerna som beskriver de aktuella fysikaliska fenomenen löses. Elementen är förbundna med varandra via noder, och tillsammans bildar de ett elementnätverk. Nätverket kan innehålla olika fysiska storheter som temperatur, värme- och vätskeflöde, materialegenskaper etc. som har de korrekta fysikaliska kopplingarna till varandra. I fall av tvådimensionella simulationer är elementen vanligen triangelformade och har då tre noder i varje hörn av triangeln.

Det har utvecklats många olika matematiska metoder för analysen och lösningen av dessa nätverk, och det görs med effektiva dataprogram. Lösningen är numerisk och därför en approximation, men genom att göra elementen mindre och därmed nätverket större, kan man öka på lösningens precision.

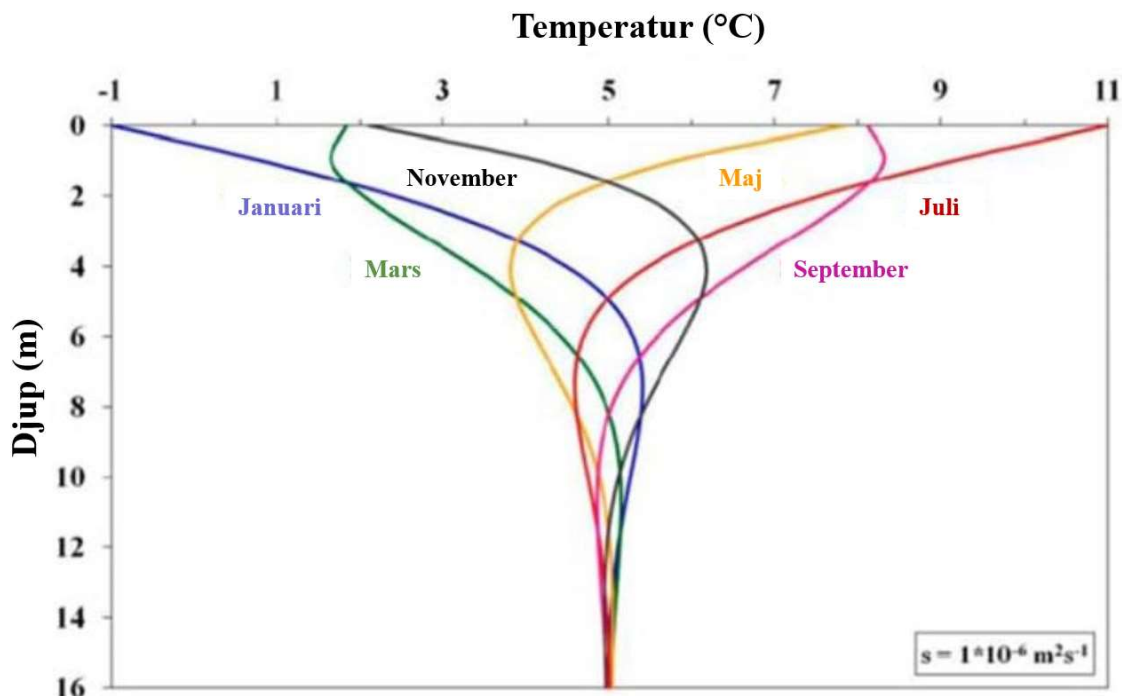
2.10 COMSOL Multiphysics

COMSOL Multiphysics är en mjukvara för modellering och simulering med hjälp av finita elementmetoden. Mjukvaran kan simulera olika sorters fysik och även kopplade fenomen, så kallat multifysik. Därför lämpar den sig bra för bl.a. simulering av sådana fenomen som förekommer inom värme-, ventilation- och sanitetsplanering.

3 METOD

Grundernas värmeisolation har undersökts genom simulering med COMSOL.

I simuleringarna har den underliggande marken beaktats till ett djup av 15m. På detta djup i Finland är marklagrets temperatur konstant $+5^{\circ}\text{C}$ oberoende av årstiden enligt [39], förutsatt att markens sammansättning är homogen. Detta visas i Figur 13.



Figur 13. Temperaturen i marken som funktion av djupet och utetemperaturen [39].

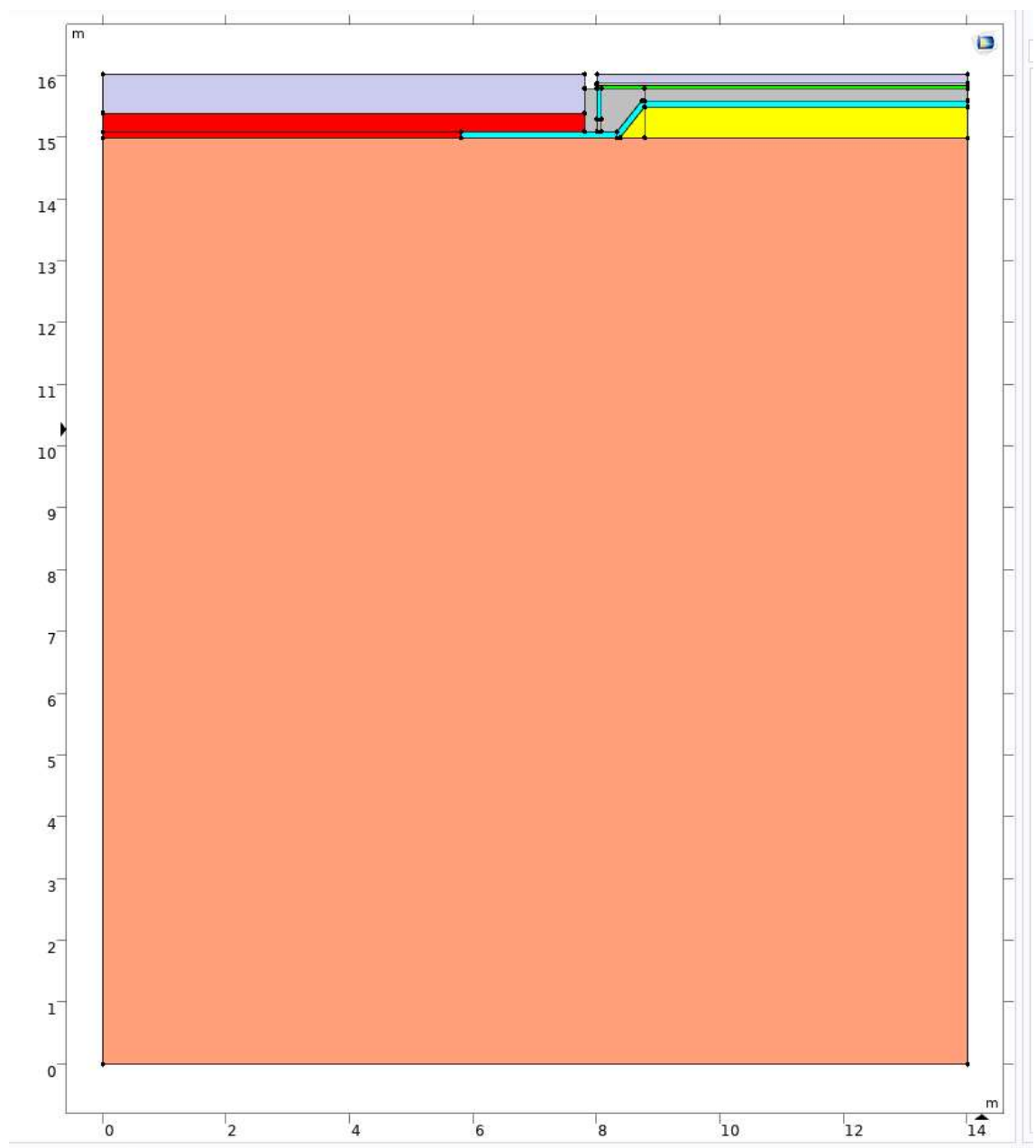
Temperaturen är konstant vid ett visst djup pga. ett geotermiskt värme flöde, som för upp värmeenergi som alstras av radioaktivt sönderfall i djupare jord- och berglager.

Värmeöverföringen mellan ute- och inneluften sker förutom konduktion också via konvektion, och här har värden för konvektionskoefficienten h ur [4] använts, $h = 5$ för golvytor inne, och ute enligt ekvation (8) i vilken vindhastighetens inverkan beaktas.

Värmestrålning beaktas inte i simuleringarna. Den främsta orsaken är att det finns hundratals ytor i grunderna som borde beaktas både som emitterande och absorberande, och modellen skulle bli för komplex. Dessutom är materialens emissivitet och absorptionsförmåga inte kända med tillräcklig precision för att resultaten skulle bli trovärdiga.

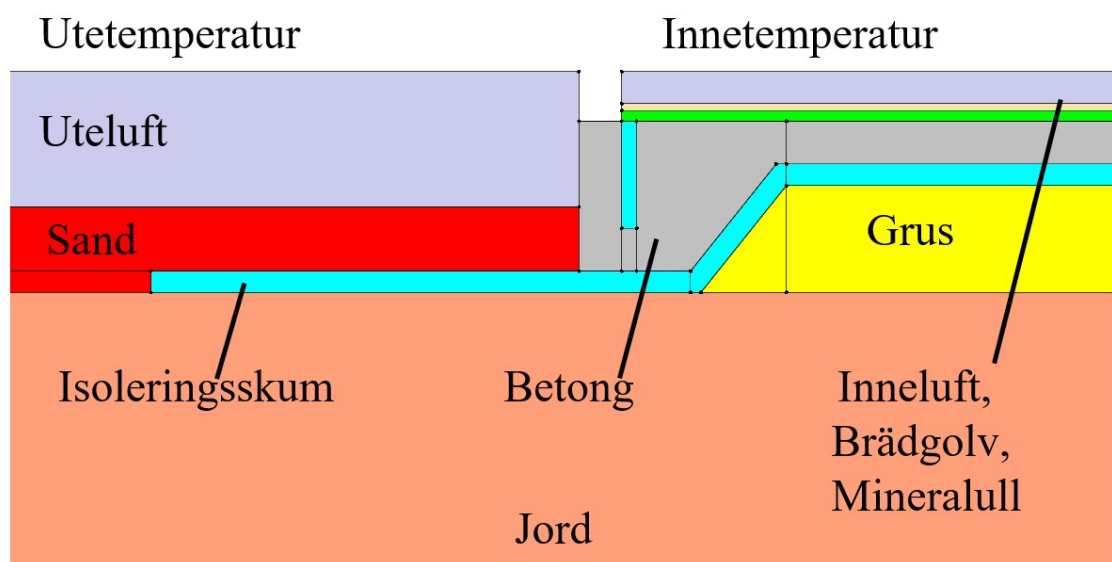
3.1 COMSOL-modellen för platta på mark -grund

Figur 14 nedan visar den uppbyggda 2D-grundkonstruktionen i COMSOL.



Figur 14. COMSOL 2D -modell för platta på mark -grund.

I modellen är alla mått och materialparametrar utförda med variabler, vilket gör det mycket lätt att ändra på modellen och se effekten av olika ute- och innetemperaturer, tjockleken på isoleringsskummet eller innergolvs mineralull etc. De använda parametrarna finns i Bilaga 2.



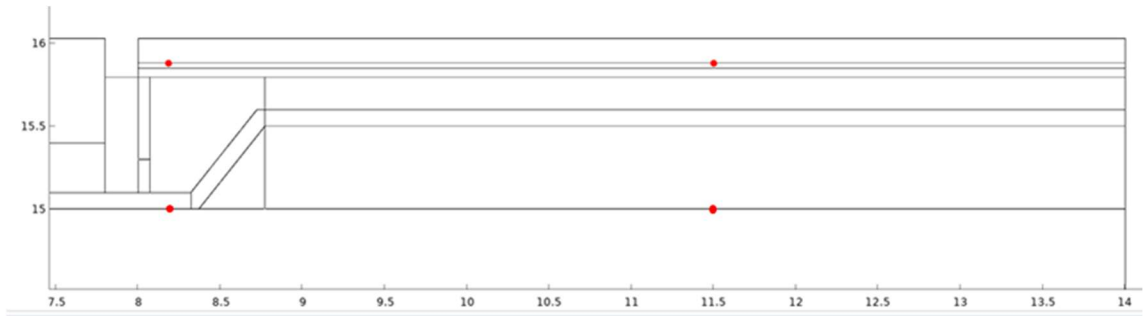
Figur 15. Detaljförstoring av COMSOL 2D -modell för platta på mark -grund.

I Figur 15 visas detaljerna i 2D-modellen. Betonggrunden har förverkligats med en kantbalk för att ta upp största delen av husets belastning. Isolerings-skummet går under kantbalken och fortsätter 2m utanför grunden som tjälskydd. Kantbalken innehåller även en vertikal platta av isolerings-skum, en sk. köldbryggebrytare, för att minska på värmeförlusten genom kantbalken. Avståndet mellan köldbryggebrytarens nedre kant och det horisontella lagret av isolerings-skum är detsamma som tjockleken av betongplattan.

Innergolvet består av träplankor ovanpå ett lager av tät mineralull. I ett riktigt golv skulle det också finnas en fuktspärr av tex. plast, men eftersom den har en mycket liten påverkan av värmeförlusterna, har den lämnats bort i modellen.

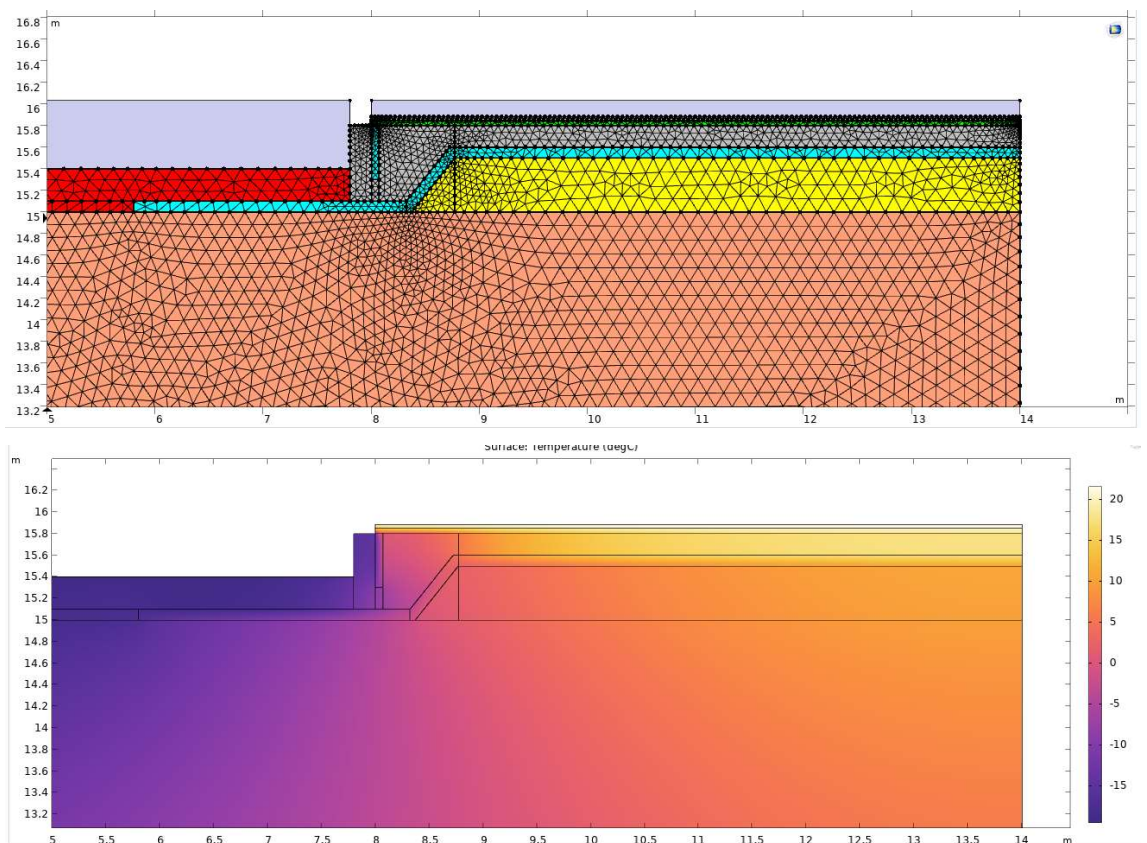
Ytterväggen beaktas inte i simuleringen, och därför finns det ett tomt mellanrum mellan ute- och inneluften. I mellanrummet har det också placerats ett lager av termisk isolering, så att ingen värmeledning sker där. Samma isoleringslager har placerats längs med vänstra och högra kanten av hela modellen.

Simuleringen ger värmefördelningen genom hela strukturen och dessutom kan man placera ut mätpunkter vid vilka värmetransporten kan ”mätas” i W/m^2 . Här har fyra mätpunkter placerats enligt följande bild.



Figur 16. Placering av mätpunkterna (röda) för värmetransport och temperatur i platta på mark-grunden.

Två av mätpunkterna är på golvnivå, punkt 1 ca. 2.5m från kantbalken, och punkt 2 ovanför kantbalkens djupaste punkt. Vid punkterna mäts temperaturerna $T1$ och $T2$, och värmeöverföringarna $q1$ och $q2$. De två övriga mätpunkterna 3 och 4 vid marknivå används som temperaturreferenser. Figur 17 visar det använda elementnätverket för en simulering, samt resultatet efter simuleringen i form av en temperaturkarta över grunden.

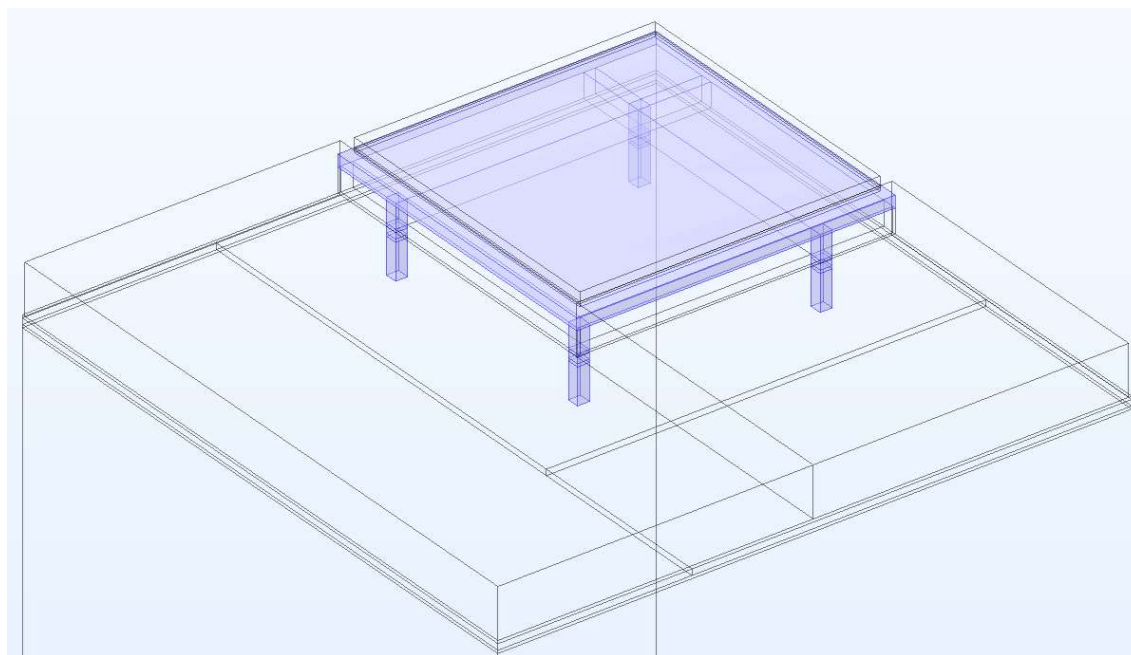


Figur 17. COMSOL-simuleringens elementnätverk och den resulterande temperaturfördelningen i grunden.

3.2 COMSOL-modellen för en pelargrund

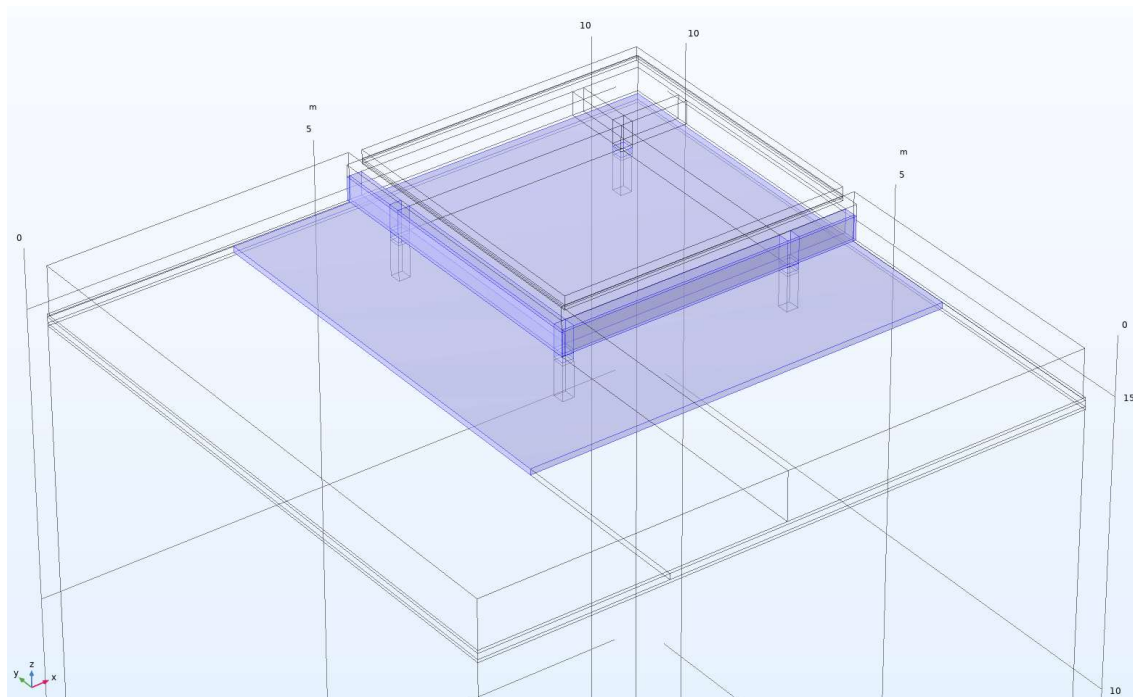
Modellen för en pelargrund är mer komplicerad än för platta på mark -grund, eftersom den måste förverkligas som en 3D-modell. Pelarna utgör en betydande värmeledningsväg från betongplattan till marken, och deras placering och antal inverkar på slutresultatet. Därför räcker det inte med en 2D-genomsnitt, utan modellen måste vara i 3 dimensioner. På samma sätt som i 2D modellen, är 3D-modellen gjord med parametrar, så att dimensionerna och måtten är möjligast lätta att ändra. De använda parametrarna finns i Bilaga 3.

Tyvärr är 3D-modellen trots parametrarna inte lika lätt att ändra som 2D-modellen, eftersom luftgapet mellan betongplattan och marken måste byggas upp i COMSOL av flera block, beroende på pelarnas antal och tjockleken av EPS-isoleringen mellan de yttersta pelarna. Detta medför en hel del manuellt arbete när man ändrar på modellen. Figur 18 visar en modell med 4 pelare, med 4m mellanrum.



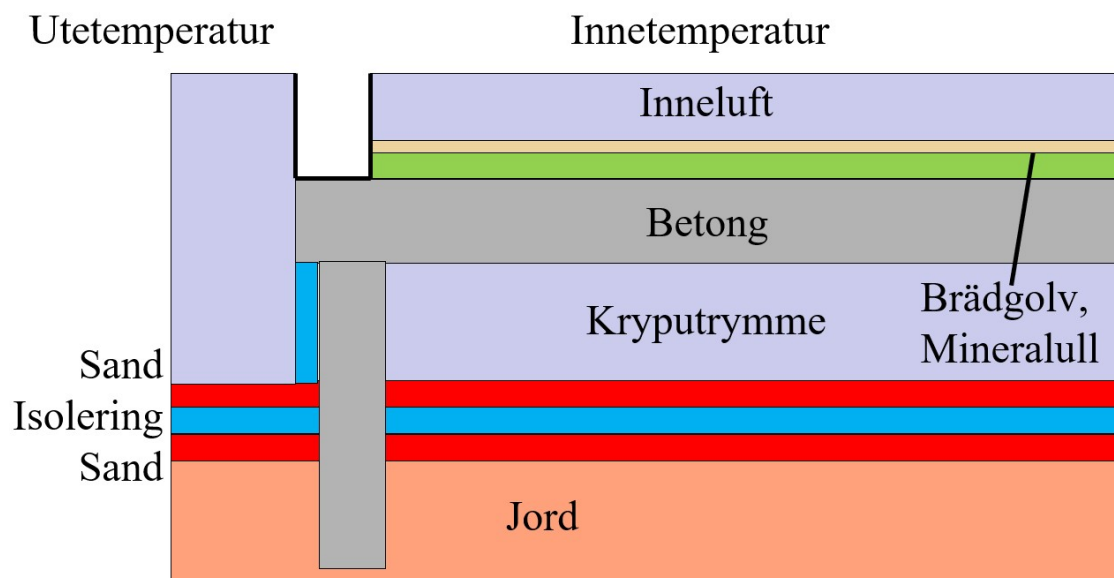
Figur 18. COMSOL 3D-modell för en pelargrund. Betongdelarna är valda och färgade blå.

Isoleringskummet placeras på utsidan av de yttersta pelarna, mellan dem, och under marken som tjälskydd. Figur 19 illustrerar detta.



Figur 19. COMSOL 3D-modell för en pelargrund. EPS-isoleringens delar är valda och färgade blå.

En xz-genomsnitt av pelargrundens hörn visas i Figur 20.



Figur 20. Detaljförstoring av COMSOL 3D -modell för pelargrund.

På samma sätt som i 2D-modellen, har termisk isolering placerats där väggarna skulle finnas, och också vid ytterkanterna av modellen. I pelargrunden används fyrkantiga pelare med en sidolängd av 20cm. Pelarnas avstånd från kanten av betongplattan är 5cm, och utrymmet fylls upp av en platta av isoleringsskum. Dessutom är mellanrummen mellan pelarna också fyllt med isolering, vars tjocklek kan varieras i simuleringarna. Betongplattans avstånd från marken är 0.4m, och som tjälskydd fungerar två 5cm tjocka lager av sand, mellan vilka ett 10cm tjockt lager av isoleringsskum har placerats.

Alla mått kan varieras genom att ändra på COMSOL-modellens parametrar, men om man ändrar på tjockleken av isoleringen mellan pelarna, eller antalet pelare, måste man lägga till några luftblock till kryputrymmet för att modellen skall fungera.

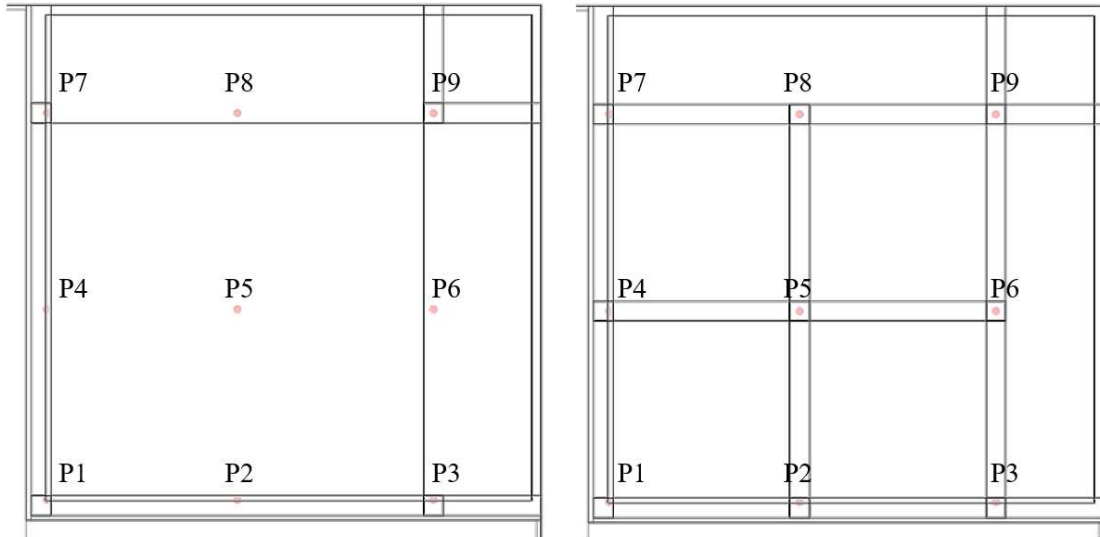
På samma sätt som i 2D-modellen har det lagts ut ett antal mätpunkter, i vilka temperaturen och värmeflödet kan mätas.

- Punkterna P1 – P9 är på golvnivå inomhus, och placerade så att de befinner sig ovanför betongpelarna som bär upp betongplattan. Vid kant- och hörnpelarna är mätpunkterna inte exakt ovanför pelarna, utan 1cm från väggen.
- Dessutom finns det några mätpunkter på marknivån i kryputrymmet, på mitten och vid kanten. Dessa punkter är speciellt intressanta, eftersom de mäter temperaturen i kryputrymmet som bör hållas tillräckligt hög för att undvika fuktproblem.

Mätpunkterna P1 - P9 placering visas i Figur 21. Resultaten kompliceras av att det är fråga om en 3D-modell, så värmeflöden har x-, y- och z-komponenter, vilka alla måste beaktas. Det totala värmeflödet vid en mätpunkt kan beräknas som

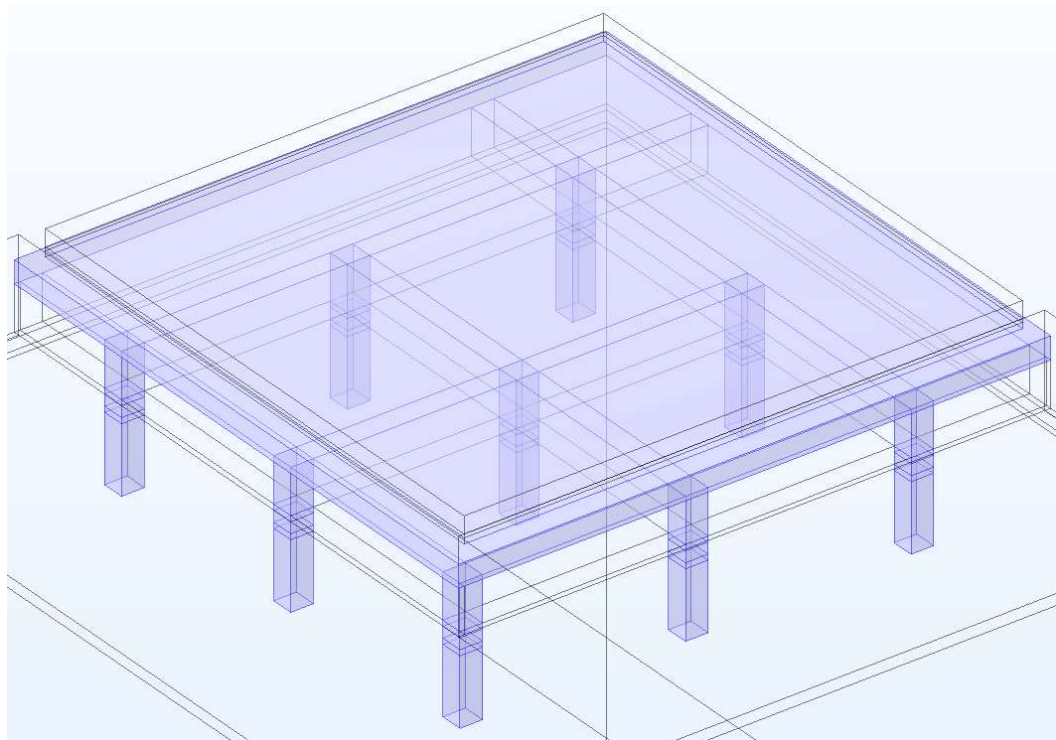
$$q_{tot} = \sqrt{q_x^2 + q_y^2 + q_z^2} \quad (18)$$

Betongpelarnas längd i modellen är 1m, så de går ned 0.6m i marken eftersom krypgrundens höjd är 0.4m. I verkligheten beror pelarnas längd på markens bärfkraft, men eftersom modellen bara undersöker värmeledning så är inverkan av pelarnas längd obetydlig.



Figur 21. Mätpunkternas placering i 3D-modellen av en pelargrund med 4 och 9 pelare. Punkterna är på golvnivån inomhus.

En modell för en pelargrund med 2m mellan pelarna istället för 4m konstruerades också. Den har samma mått som grunden med 4 pelare, men innehåller istället 9 pelare, se Figur 22.



Figur 22. COMSOL-modell för pelargrund med 9 pelare.

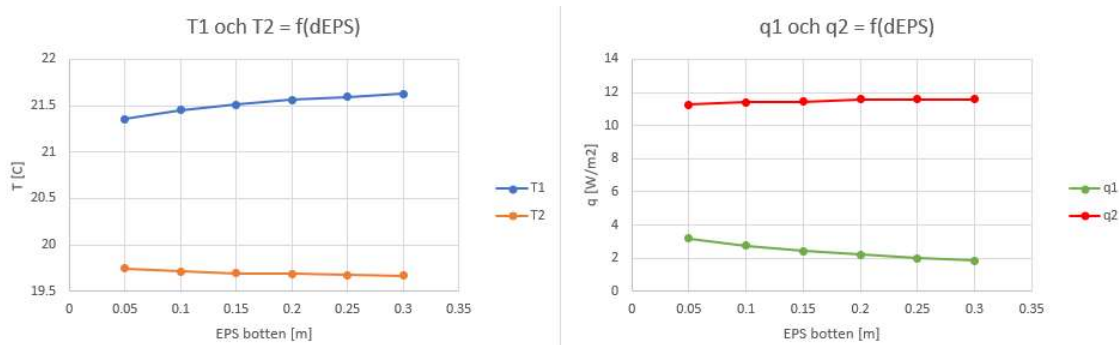
4 RESULTAT

4.1 Platta på mark -grund simuleringsresultat

Ett stort antal simuleringar utfördes med olika mått på grundens delar, och dessutom vid olika vindhastigheter. För varje simulering sparades $T1$, $q1$, $T2$ och $q2$ in i en Excel-tabell, och av dessa värden ritades olika grafer. Standardmåttens är angivna i Bilaga 2, så om inget annat anges gäller de.

Innetemperaturen var 22°C och utomhustemperaturen -20°C i alla simuleringar. Denna kombination utgör en värsta fall -situation, som gör det lätt att se grundens värmeförluster i olika situationer.

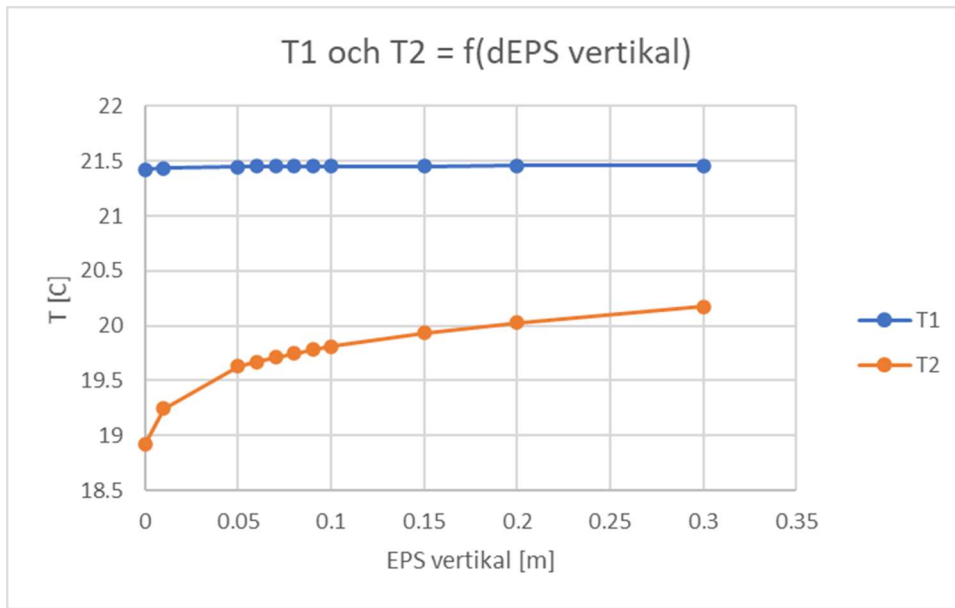
Om man håller alla andra parametrar konstanta och simulerar grunden med olika tjocklekar av isoleringsskummet under betongen, får man följande grafer:



Figur 23. Temperaturer och värmeflöden i mätpunkterna som funktion av isoleringsskummets tjocklek.

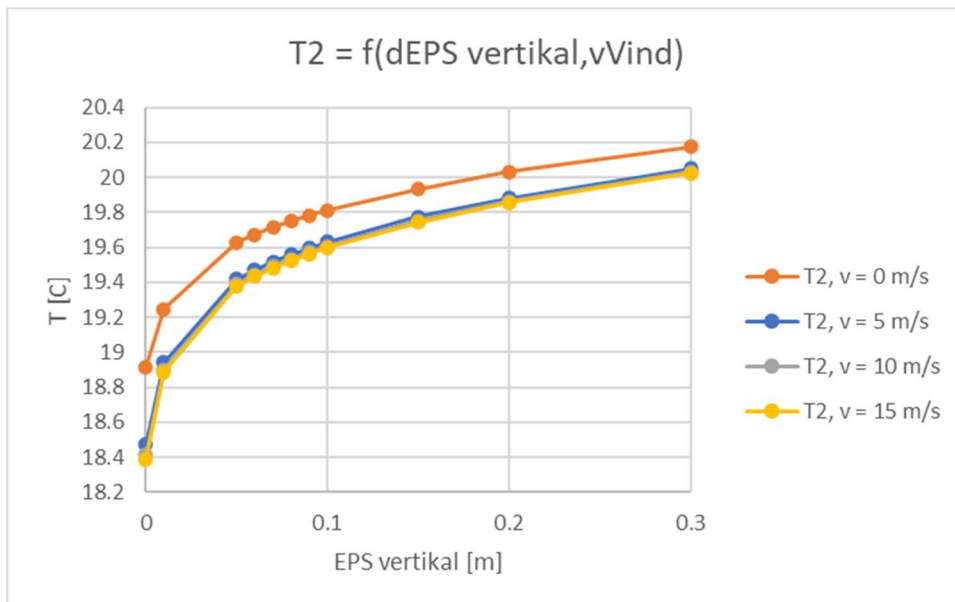
Temperaturen i punkt 1 mitt på golvet ökar med tjockare skum, men temperaturen i punkt 2 nära kantbalken påverkas nästan inte alls. Vid skumtjockleken 10cm har grunden i denna punkt ett U-värde på 0.22, vilket sjunker till 0.1 om skumtjockleken ökas till 30cm.

Däremot om man varierar den vertikala köldbryggebrytarens skumtjocklek, så påverkas simuleringsresultaten för punkt 2 kraftigt, medan punkt 1 är så gott som oförändrad. Följande grafer visar detta.



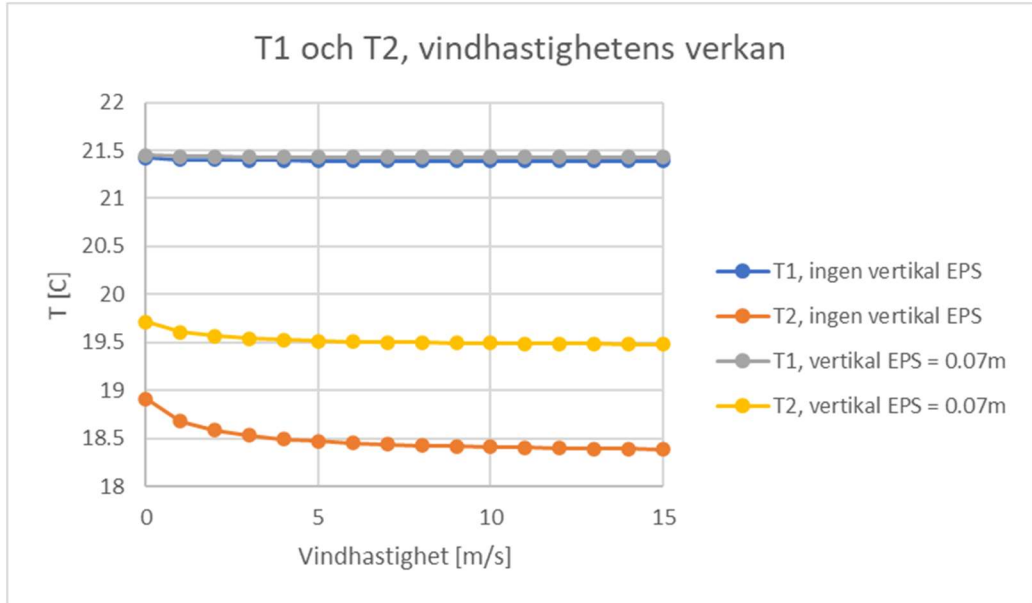
Figur 24. Temperaturer i mätpunkterna som funktion av köldbryggebrytarens skumtjocklek.

Värmeförlusten genom kantbalken är alltså avgörande för en platta på markgrund, vilket också har bekräftats i andra källor, tex. [40]. Detta innebär också att vindens påverkan av konvektionen vid kantbalkens yttre yta har betydelse för värmeförlusten.



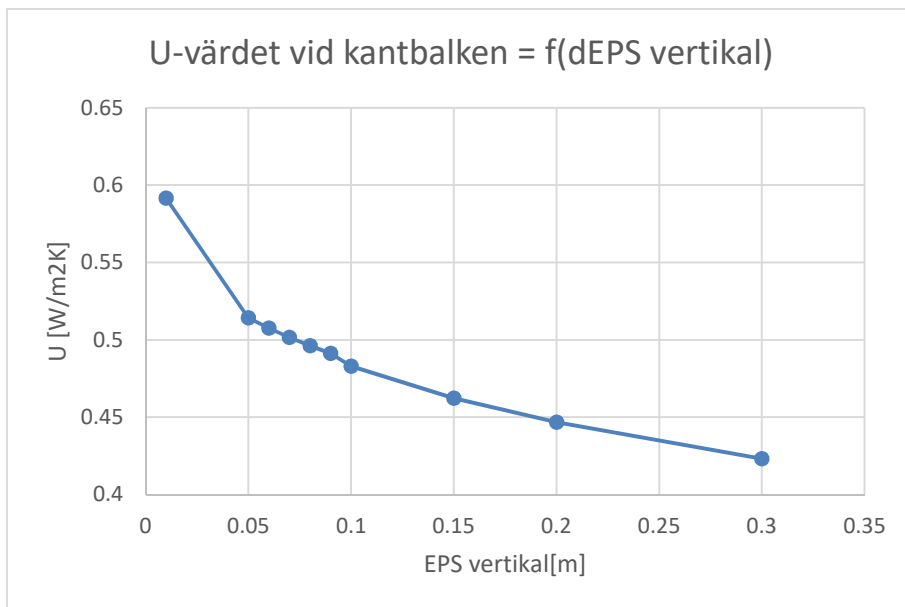
Figur 25. Temperaturen i mätpunkt 2 som funktion av köldbryggebrytarens skumtjocklek, vid olika vindhastigheter.

Värmeförlusten ökar med vindhastigheten, men når ett maximivärde, eftersom kantbalkens värmeledningsförmåga inte är oändlig. Detta är lättare att se om man ritat temperaturerna $T1$ och $T2$ som funktioner av vindhastigheten.



Figur 26. Temperaturer i mätpunkterna som funktion av vindhastigheten, helt utan köldbryggebrytare och med en som är 7cm tjock.

U-värdet uppmätt i mätpunkt 2 visas i som funktion av köldbryggebrytarens skumtjocklek.



Figur 27. U-värdet vid mätpunkt 2 som funktion av köldbryggebrytarens skumtjocklek.

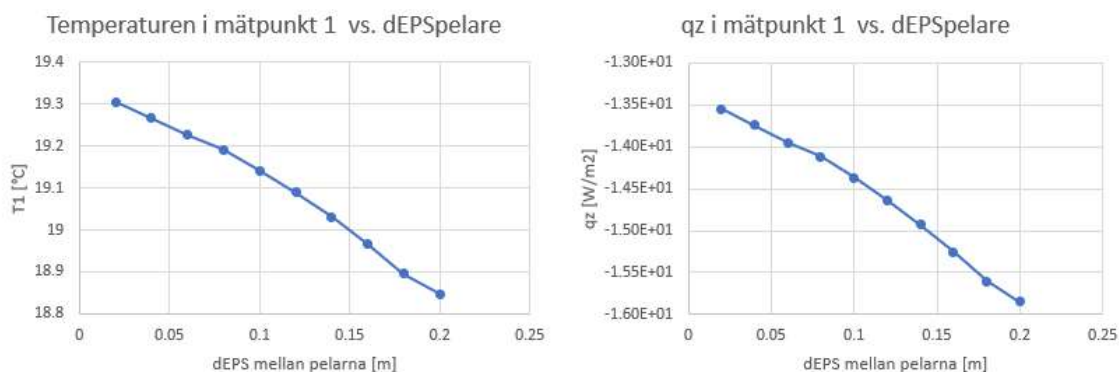
U-värdet vid mätpunkt 2, dvs. på inngolvet nära väggen, är mycket sämre än längre från väggen. Tilläggsisolering av kantbalken på utsidan, mot sandlagret och uteluften skulle förmodligen förbättra U-värdet.

Dessa simuleringsvärden kan nu jämföras med motsvarande värden för pelargrun- den.

4.2 Pelargrund simuleringsresultat

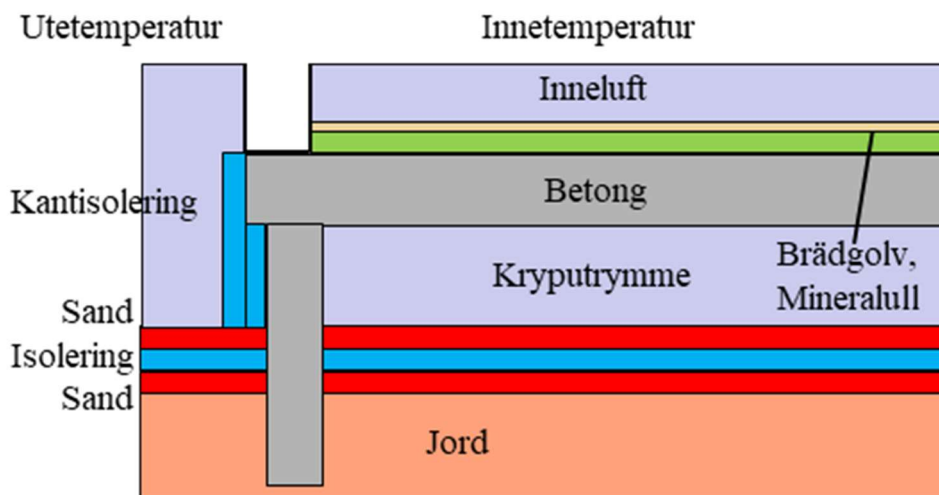
3D-simuleringarna av pelargrunnen tyder på att de viktigaste värmeledningsvä- garna är rakt nedåt i z-axelns riktning genom betongpelarna, och för hörn- och kantpelarna i x- och y-riktningarna, genom isoleringen av kryputrymmets sidor. Både temperaturerna i mätpunkterna och värmeflödets x-, y- och z-komponenter visar detta.

Att placera extra isolering mellan pelarna visade sig inte minska på värmeförlus- terna. Detta beror på, att den huvudsakliga värmeledningen är nedåt mot marken, och för en hörn- eller kantpelare mot den yttre sidan. Isoleringen mellan pelarna hindrar bara den relativt varma luften i kryputrymmet från att nå pelarna. Detta visas i Figur 28.



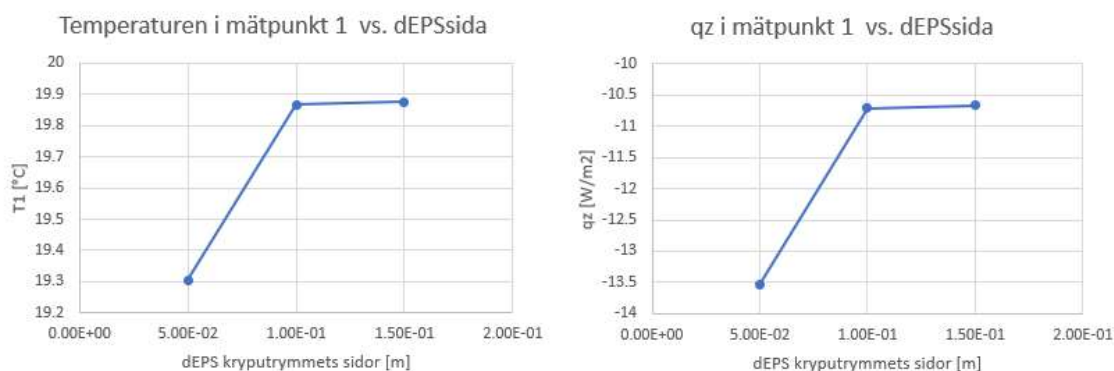
Figur 28. Temperaturen och värmeflödet i mätpunkt 1 som funktion av skum- tjockleken mellan betongpelarna.

Däremot påverkas temperaturerna och värmeflödet i hörn- och kantpelarna av tilläggsisolering på sidan av krypgrunden, och speciellt på kanten av betongplattan enligt Figur 29.



Figur 29. Pelargrund med extra kantisolering.

Den ursprungliga kantisoleringen runt kryptrymmet har tjockleken 5cm, och dessutom har modeller med 10cm och 15cm simulerats. Steget från 5cm till 10cm har den största effekten, eftersom man då lägger till isolering också på betongplattans kant. Figur 30 visar detta.



Figur 30. Kantisoleringens effekt på mät punkt 1.

Temperaturen på markytan i kryptrymmet är enligt simuleringarna nästan konstant, och varierar enbart med utetemperaturen. Vid $T_{ute} = -20^\circ\text{C}$ är $T_{kryp} = 4.4^\circ\text{C}$, vid $T_{ute} = 10^\circ\text{C}$ är $T_{kryp} = 5.1^\circ\text{C}$, och vid $T_{ute} = 20^\circ\text{C}$ är $T_{kryp} = 5.4^\circ\text{C}$.

En ökning av tjockleken på isoleringsskummet under krypgrunden och i tjälskyddet som sträcker sig 2m utanför grunden har obetydlig inverkan på temperaturen i kryputrymmet.

Man kan beräkna U-värdet ur det totala värmeflödet och temperaturdifferensen mellan en mätpunkt och kryputrymmet enligt Ekvation (6). Då man tillämpar detta på en pelargrund med 4 pelare och 15cm isolering på sidorna, får man ett medelvärde av de 9 mätpunkterna som är $0.566 \text{ W/m}^2\text{K}$. Detta är mycket sämre än platta på mark -grundens värde $0.22 \text{ W/m}^2\text{K}$.

U-värdet kan dock förbättras genom att öka på tjockleken av innergolvet mineralull. Om tjockleken fördubblas från 5cm till 10cm, så förbättras medelvärdet av U till $0.321 \text{ W/m}^2\text{K}$. Om man lägger till ytterligare 5cm så att tjockleken blir 15cm, så uppnår man ett U-värde av $0.223 \text{ W/m}^2\text{K}$, som är jämförbart med platta på mark -grundens värde.

För en liknande pelargrund, men med ett pelaravstånd av 2m istället för 4m, blir medelvärdet av U för de 9 mätpunkterna en aning sämre, $0.244 \text{ W/m}^2\text{K}$. Detta beror på att det finns 9 pelare i modellen istället för 4, och då leds mer värme ned till marken.

5 SAMMANDRAG

I detta examensarbete har värmeisolationen för pelargrunder och platta på markgrunder analyserats genom finitelementmetoden. Slutsatsen är att pelargrunderna utgör ett fungerande alternativ till platta på mark -grunden, förutsatt att den utförs med tillräcklig isolering runt kryputrymmet och inomhus mellan trägolvet och betongplattan. En pelargrund är mer komplicerad än en platta på mark -grund, men håller med säkerhet en längre tid, och är mycket lättare att granska, så ur investeringssynpunkt kan den vara ett bättre alternativ.

Det verkar inte finnas andra källor där man har undersökt alternativa fundamentgeometrier i detalj, så detta examensarbete fyller ett behov på den punkten.

6 DISKUSSION

Analysmetoden för grundernas värmeisolering var arbetsdryg, speciellt 3D-modellen tog länge att göra och hitta fel som hade uppstått. Men eftersom modellerna var parametriserade, var det relativt lätt att testa olika variationer efter att modellerna var färdiga.

Resultaten från simuleringarna verkade trovärdiga och logiskt korrekta. Det hade förstås varit idealiskt att kunna jämföra dem med mätningar av motsvarande verkliga grunder, men för det fanns det inte någon möjlighet i detta examensarbete. Fördelen med FEA-simuleringar är förstås den, att man har möjlighet att undersöka temperaturer och värmeflöden inne i grunderna på ställen, där man inte kan komma åt dem i verkligheten.

En möjlighet att ytterligare förbättra resultatens noggrannhet skulle vara att ha noggrannare materialparametrar, som exakt skulle motsvara egenskaperna hos de material som används i grunderna. Också en noggrannare modellering av konvektionen, samt medtagande av värmestrålningens inverkan skulle öka simuleringarnas realism.

Slutsatserna av examensarbetet är inte begränsade geografiskt till Finland, utan gäller för alla områden där vintrarna är kalla och grundkonstruktionernas isoleringsegenskaper är viktiga. En tillräckligt isolerad pelargrund kan vara ett bra alternativ för ett hus där hållbarheten värderas högre än konstruktionens enkelhet och låga kostnader.

7 KÄLLOR

- [1] D. Hedlund and L. Blom, "Tilläggsisolering och fuktproblem i grundkonstruktionen platta på mark," Högskolan i Gävle, Gävle, 2014.
- [2] M. Auvinen, "Matalaperustusten kylmäsilta- ja lämpövirtatarkastelu COMSOL Multiphysics -ohjelmalla," Oulun seudun ammattikorkeakoulu, Oulu, 2012.
- [3] F. P. Incropera, D. P. DeWitt, T. L. Bergman and A. S. Lavine, Fundamentals of Heat and Mass Transfer, John Wiley & Sons, 2006, p. 1070.
- [4] B.-Å. Petersson, Tillämpad byggnadsfysik, Lund: Studentlitteratur AB, 2019.
- [5] I. Heimonen, "Aurinko-opas 2012. Aurinkolämmön ja –sähkön energiantuoton laskennan opas," Sitra, 2011.
- [6] "ModelE AR5 Simulations: Past Climate Change and Future Climate Predictions," National Aeronautics and Space Administration, [Online]. Available: <https://data.giss.nasa.gov/modelE/ar5plots/srlocat.html>. [Accessed 20 12 2021].
- [7] M. Haavisto-Hyvärinen and H. Kutvonen, "Maaperäkartan käyttöopas," Geologiska forskningscentralen, 2007.
- [8] T. Koppana, "Pudotuspainolaitteen ja levykuormituskokeen vertailu," Tampereen Teknillinen Yliopisto, Tampere, 2017.
- [9] "Soil-Testing procedures and testing equipment - Plate load test, English translation of DIN 18134:2012-04," Building and Civil Engineering Standards Committee, 2012.
- [10] "Rakentamisen laadunvarmistus. Alusrakenne ja päällysrakenteen sitomattomat kerrokset," Tielaitos, Helsinki, 1994.

- [11] A. Poutiainen, "Maanvaraisen teräsbetoni-laatan mitoitus," Jyväskylän ammattikorkeakoulu, Jyväskylä, 2016.
- [12] R. Alanen, T. Koljonen, S. Hukari and P. Saari, "Energian varastoinnin nykytila," VTT, Espoo, 2003.
- [13] A. Berglund, "Tjäle - en litteraturstudie med särskilt fokus på tjällossning," Luleå tekniska universitet, Luleå, 2009.
- [14] H. Gregow, K. Ruosteenoja, I. Juga, S. Näsman, M. Mäkelä, M. Laapas and K. Jylhä, "Lumettoman maan routaolojen mallintaminen ja ennustettavuus muuttuvassa ilmastossa," Meteorologiska institutet, Helsingfors, 2011.
- [15] H. Kivikoski and S. Saarelainen, "ILMASTORASITUS Pakkasmäärän ja sulamiskauden pituuden määrittäminen," VTT Yhdyskuntatekniikka, Espoo, 2000.
- [16] B. A. Ali and S. Ahmadiyan, "Livslängdsdimensionering av korrosionsutsatta betongkonstruktioner," Kungliga Tekniska Högskolan, Stockholm, 2019.
- [17] Rakennustieto Oy, "KH 90-00403: Kiinteistön tekniset käyttöiät ja kunnossapitokaudet," 2008.
- [18] Ramboll Finland Oy, "Pohjanvahvistuspäivä 2021, Geopolymeeriinjektoinnin ohjeistuksesta," 2021.
- [19] Suomen Urethanipalvelu Oy, "Suomen Urethanipalvelu Oy," 2021. [Online]. Available: <https://suomenurethanipalvelu.fi/>. [Accessed November 2021].
- [20] Rakennustietosäätiö, "Pientalon perustukset ja alapohjien liittymät RT 81-10854," 2005.
- [21] Miljöministeriet, "Konstruktioners hållfasthet och stabilitet. Projektering av geokonstruktioner," Miljöministeriet, 2018.
- [22] J. Pietilä, *Raudoitettujen betonilaatan taivutuksen mallintaminen ANSYS-ohjelmalla*, Tampere: Tampereen Teknillinen Yliopisto, 2014.

- [23] Miljöministeriet, "Finlands Byggbestämmelsesamling, Betongkonstruktioner," Miljöministeriet, 2005.
- [24] L. Uotinen, "Hoikan teräsbetonipilarin mitoittaminen," Tekniliinen Korkeakoulu, Espoo, 2008.
- [25] T. Toriseva, "Pilarilaattojen suunnittelu eurokoodien mukaan," Tampereen Teknillinen Yliopisto, Tampere, 2014.
- [26] Miljöministeriet, "Miljöministeriets förordning om byggnaders fukttekniska funktion," 24 November 2017. [Online]. Available: <https://www.finlex.fi/sv/laki/alkup/2017/20170782>. [Accessed 28 April 2022].
- [27] Miljöministeriet, "B3 Finlands Byggbestämmelsesamling, Geokonstruktioner," Miljöministeriet, Helsingfors, 2004.
- [28] R. Vuori, "Koneellisesti tuulettuvan ryömintätilan olosuhteet ja kehittäminen," Jyväskylän ammattikorkeakoulu, Jyväskylä, 2016.
- [29] T. Hansson, "Torrare krypgrunder genom uppvärmning, Rapport P 9211075," Institutet för träteknisk forskning, Stockholm, 1992.
- [30] "Luftfuktighet," Sveriges meteorologiska och hydrologiska institut, 11 Februari 2022. [Online]. Available: <https://www.smhi.se/kunskapsbanken/meteorologi/luftfuktighet>. [Accessed 15 Maj 2022].
- [31] A. Kumlin, "Fuktmätning i betong," *Bygg & teknik*, no. 7, pp. 27 - 31, 2015.
- [32] W. Churchill, "How humid is it? Why dew point is a superior measure of humidity," Memphis Weather, 12 Augusti 2013. [Online]. Available: <https://www.memphisweather.blog/2013/08/how-humid-is-it-why-dew-point-is.html>. [Accessed 15 Maj 2022].
- [33] "BEWI Insulation products," [Online]. Available: <https://bewi.com/insulation/products>. [Accessed 23 12 2021].

- [34] "Jackon Finland," Jackon, [Online]. Available: <https://www.jackon.fi/>. [Accessed 23 12 2021].
- [35] "Finnfoam," Finnfoam, [Online]. Available: <https://www.finnfoam.fi/>. [Accessed 23 12 2021].
- [36] "Inora rakentaminen," Inora, [Online]. Available: <https://www.inora.fi/rakentaminen>. [Accessed 23 12 2021].
- [37] "Pientalojen perustukset. Anturoiden suunnitteluohje RR®- ja RD®-paaluille," Rautaruukki Oyj, 2021.
- [38] LKAB Minerals Oy, "Raskasta asiaa betonista - Raskasbetoni," *Betoni*, no. 2, p. 4, 2015.
- [39] N. Leppäharju, "Kalliolämmön hyödyntämiseen vaikuttavat geofysikaaliset ja geologiset tekijät," Uleåborgs Universitet, Uleåborg, 2008.
- [40] L. Dahlin and M. Hedman, "Undersökning av värmeförluster genom kantbalk vid användning av golvvärme," Högskolan i Gävle, Gävle, 2018.

BILAGOR

1. Beräkning av husets vikt.

Enligt [37] kan man använda följande utgångsvärden för att beräkna husets tyngd:

- Vägghöjden av ett 1-våningshus är 4m
- Vägghöjden av ett 2-våningshus är 8m
- Väggarnas tjocklek i ett trähus är 0.30m, vikt 1.5kN/m^3
- Väggarnas tjocklek i ett hus av lättblock är 0.42m, vikt 7.5kN/m^3
- Väggarnas tjocklek i ett hus av betongelement är 0.45m, vikt 15kN/m^3
- Bottenbjälklagets vikt för alla konstruktionstyper är 5kN/m^2
- Mellanbjälklagets vikt för ett trähus är 2kN/m^2
- Mellanbjälklagets vikt för ett hus av lättblock eller betongelement är 5kN/m^2
- Takets vikt är 1.2kN/m^2
- Snöbelastningen är 2kN/m^2
- Nyttovikten för botten- och mellanbjälklaget är 2kN/m^2

Dessa värden har matats in i en Excel-tabell, som visas på nästa sida i Figur 31. Som slutresultat får man totalvikten per kvadratmeter för de 6 olika husalternativen.

Utgångsdata	Dimension	Enhet	Vikt	Enhet
Vägghöjden av ett 1-våningshus	4.00	m		
Vägghöjden av ett 2-våningshus	8.00	m		
Väggarnas tjocklek/vikt i ett trähus	0.30	m	1.5	kN/m3
Väggarnas tjocklek/vikt i ett hus av lättblock	0.42	m	7.5	kN/m3
Väggarnas tjocklek/vikt i ett hus av betongelement	0.45	m	15.0	kN/m3
Bottenbjälklagets vikt för alla konstruktionstyper (ingår inte i platta på mark)			5.0	kN/m2
Mellanbjälklagets vikt för ett trähus			2.0	kN/m2
Mellanbjälklagets vikt för ett hus av lättblock eller betongelement			5.0	kN/m2
Takets vikt			1.2	kN/m2
Snöbelastningen			2.0	kN/m2
Nyttovikten för botten- och mellanbjälklaget			2.0	kN/m2
Husets yta	100	m2		
Beräkning av ytterväggarnas totala längd (omkretsen av huset)	40.00	m		
Beräkning av de olika konstruktionsdelarnas vikt	Vikt	Enhet		
Beräkning av ytterväggarnas vikt i 1-vån trähus	72.00	kN		
Beräkning av ytterväggarnas vikt i 2-vån trähus	144.00	kN		
Beräkning av ytterväggarnas vikt i 1-vån lättblockhus	504.00	kN		
Beräkning av ytterväggarnas vikt i 2-vån lättblockhus	1008.00	kN		
Beräkning av ytterväggarnas vikt i 1-vån betongelementhus	1080.00	kN		
Beräkning av ytterväggarnas vikt i 2-vån betongelementhus	2160.00	kN		
Beräkning av bottenbjälklagets vikt (ingår inte i platta på mark)	0.00	kN		
Beräkning av mellanbjälklagets vikt för ett 2-våningshus av trä	200.00	kN		
Beräkning av mellanbjälklagets vikt för ett 2-våningshus av lättblock/betong	500.00	kN		
Beräkning av takets vikt	120.00	kN		
Beräkning av snöbelastningens vikt	200.00	kN		
Beräkning av nyttovikten för ett 1-våningshus	200.00	kN		
Beräkning av nyttovikten för ett 2-våningshus	400.00	kN		
Beräknade totalvikter / m2	Vikt	Enhet		
1-vånings trähus	5.92	kN/m2		
2-vånings trähus	10.64	kN/m2		
1-vånings lättblockhus	10.24	kN/m2		
2-vånings lättblockhus	22.28	kN/m2		
1-vånings betongelementhus	16.00	kN/m2		
2-vånings betongelementhus	33.80	kN/m2		
OBS: Husgrundens vikt är inte inkluderad				

Figur 31. Excel-tabell för beräkning av vikten av ett hus.

2. COMSOL-parametrar för 2D-modellen

De följande figurerna föreställer parametergrupperna för COMSOL platta på mark -modellen. Parametrarna X1 – X9 och Y1 – Y9 används för att rita kantförstärkningen av betongen och det underliggande isoleringsskummet korrekt.

Label:

Parameters

Name	Expression	Value	Description
Markdjup	15	15	Djupet i marken där T=5C [m]
dPlatta	0.2	0.2	Betongplattans tjocklek [m]
dEPS	0.1	0.1	EPS tjocklek [m]
Markbredd	14	14	Bredden av hela simuleringsområdet [m]
VertikalEPS	0.07	0.07	EPS tjocklek vertikalt [m]
dYtjord	0.3	0.3	Ytjordlagrets tjocklek [m]
dGolvmate...	0.032	0.032	Innergolvets tjocklek [m]
Innebredd	6	6	Inneluftlagrets bredd [m]
dGrus	0.5	0.5	Gruslagrets tjocklek under plattan [m]
Kanteleme...	0.3+dPlatta+VertikalEPS	0.57	Kantelementets bas [m]
Kanteleme...	0.4	0.4	Kantelement triangelbas [m]
InneHojd	0.15	0.15	Inneluftlagrets höjd [m]
Tjalskydd	2	2	EPS utanför grunden [m]
LitenBas	$dEPS/\tan(0.5*\pi - 0.5*\text{atan}(dGrus/KantelementSned))$	0.048062	Extra EPS längd vid sneda delen [m]
UteBredd	Markbredd-Innebredd-dPlatta	7.8	Uteluftlagrets bredd [mm]
X1	UteBredd+dPlatta+VertikalEPS	8.07	X-koordinat 1
Y1	Markdjup+dEPS+dGrus+dPlatta	15.8	Y-koordinat 1
X2	UteBredd+KantelementBas+KantelementSned	8.77	X-koordinat 2
Y2	Y1	15.8	Y-koordinat 2
X3	X2	8.77	X-koordinat 3
Y3	Y1-dPlatta	15.6	Y-koordinat 3
X4	X2-LitenBas	8.7219	X-koordinat 4
Y4	Y3	15.6	Y-koordinat 4
X5	X2-KantelementSned-LitenBas	8.3219	X-koordinat 5
Y5	Markdjup+dEPS	15.1	Y-koordinat 5
X6	X1	8.07	X-koordinat 6
Y6	Y5	15.1	Y-koordinat 6
X7	X2	8.77	X-koordinat 7
Y7	Y3-dEPS	15.5	Y-koordinat 7
X8	X7-KantelementSned	8.37	X-koordinat 8
Y8	Markdjup	15	Y-koordinat 8
X9	X8-LitenBas	8.3219	X-koordinat 9
Y9	Y8	15	Y-koordinat 9
dMineralull	0.05	0.05	Mineralull tjocklek [m]

Figur 32. Måttparametrar för 2D COMSOL-modellen för platta på mark -grund.

Label: Materialparametrar

▼ Parameters

Name	Expression	Value	Description
Luft_tc	0.024	0.024	Luftens värmeledningsförmåga [W/mK]
Luft_rho	1.225	1.225	Luftens densitet [kg/m ³]
Luft_cp	1	1	Luftens värmekapacitet [J/kgK]
EPS_tc	0.033	0.033	Isoleringsskum värmeledningsförmåga [W/mK]
EPS_rho	35	35	Isoleringsskum densitet [kg/m ³]
EPS_cp	1450	1450	Isoleringsskum värmekapacitet [J/kgK]
Tra_tc	0.12	0.12	Trä värmeledningsförmåga [W/mK]
Tra_rho	600	600	Trä densitet [kg/m ³]
Tra_cp	500	500	Trä värmekapacitet [J/kgK]
Betong_tc	2	2	Betong värmeledningsförmåga [W/mK]
Betong_rho	2500	2500	Betong densitet [kg/m ³]
Betong_cp	1000	1000	Betong värmekapacitet [J/kgK]
Jord_tc	0.715	0.715	Jord värmeledningsförmåga [W/mK]
Jord_rho	1650	1650	Jord densitet [kg/m ³]
Jord_cp	1700	1700	Jord värmekapacitet [J/kgK]
Grus_tc	1.5	1.5	Grus värmeledningsförmåga [W/mK]
Grus_rho	2000	2000	Grus densitet [kg/m ³]
Grus_cp	1000	1000	Grus värmekapacitet [J/kgK]
Sand_tc	1.5	1.5	Sand värmeledningsförmåga [W/mK]
Sand_rho	1500	1500	Sand densitet [kg/m ³]
Sand_cp	2000	2000	Sand värmekapacitet [J/kgK]
Ull_tc	0.036	0.036	Mineralull värmeledningsförmåga [W/mK]
Ull_rho	35	35	Mineralull densitet [kg/m ³]
Ull_cp	800	800	Mineralull värmekapacitet [J/kgK]

Figur 33. Materialparametrar för 2D COMSOL-modellen för platta på mark - grund.

Label: TempOchCoeff

▼ Parameters

Name	Expression	Value	Description
Tute	-20[degC]	253.15 K	Utetemperatur
Tinne	22[degC]	295.15 K	Rumstperatur
Tmark	5[degC]	278.15 K	T i marken på 15m djup
vWind	0	0	Vindhastighet [m/s]
Ute_hconv	4+4*vWind	4	Konvektionskoefficient ute [W/m ² K]
Inne_hconv	5	5	Konvektionskoefficient inne [W/m ² K]

Figur 34. Temperaturer och konvektionskoefficienter för 2D COMSOL-modellen för platta på mark -grund. Observera konvektionens beroende av vindhastigheten.

3. COMSOL-parametrar för 3D-modellen

De följande figurerna föreställer parametergrupperna för COMSOL pelargrund 3D-modellen. De skiljer sig från 2D-modellens parametrar bara i måttparametrarna, materialparametrarna och temperaturerna och konvektionskoefficienterna är lika som för 2D-modellen.

Label:

▼ Parameters

Name	Expression	Value	Description
Platthojd	0.2	0.2	Betongplattans tjocklek
Plattdjup	5.2	5.2	Betongplattans y-dimension
Plattbredd	5.2	5.2	Betongplattans x-dimension
Kant	0.05	0.05	Pelarkantens avstånd från betongplattans kant
Pelaravst	4	4	Avståndet mellan pelarnas mittpunkter
Pelardjup	1	1	Pelarens längd
PelarRad	0.2	0.2	Pelarens bredd/djup
Luftgap	0.4	0.4	Höjden på kryputrymmet
Markhojd	15	15	Markblockets z-dimension
dInne	0.15	0.15	Inneluftlagrets tjocklek
dute	Luftgap+Platthojd+dInne	0.75	Uteluftlagrets tjocklek
Markdjup	10.4	10.4	Markblockets y-dimension
Markbredd	10.4	10.4	Markblockets x-dimension
dVagg	0.2	0.2	Väggens tjocklek (tomt utrymme)
Sandhojd	0.05	0.05	Sandlagrets tjocklek
Sandshojd	0.1	0.1	Isoleringslagrets (mellan sanden) tjocklek
Golvhojd	0.032	0.032	Trägolvet tjocklek
dMineralull	0.05	0.05	Mineralullens tjocklek
Tjalskydd	2	2	EPS utanför grunden
dEPspelare	0.2	0.2	EPS mellan pelarna

Figur 35. Måttparametrar för 3D COMSOL-modellen för pelargrund.

Label: Materialparametrar

Parameters

Name	Expression	Value	Description
Luft_tc	0.024	0.024	Luftens värmeledningsförmåga [W/mK]
Luft_rho	1.225	1.225	Luftens densitet [kg/m ³]
Luft_cp	1	1	Luftens värmekapacitet [J/kgK]
EPS_tc	0.033	0.033	Isoleringsskum värmeledningsförmåga [W/mK]
EPS_rho	35	35	Isoleringsskum densitet [kg/m ³]
EPS_cp	1450	1450	Isoleringsskum värmekapacitet [J/kgK]
Tra_tc	0.12	0.12	Trä värmeledningsförmåga [W/mK]
Tra_rho	600	600	Trä densitet [kg/m ³]
Tra_cp	500	500	Trä värmekapacitet [J/kgK]
Betong_tc	2	2	Betong värmeledningsförmåga [W/mK]
Betong_rho	2500	2500	Betong densitet [kg/m ³]
Betong_cp	1000	1000	Betong värmekapacitet [J/kgK]
Jord_tc	0.715	0.715	Jord värmeledningsförmåga [W/mK]
Jord_rho	1650	1650	Jord densitet [kg/m ³]
Jord_cp	1700	1700	Jord värmekapacitet [J/kgK]
Grus_tc	1.5	1.5	Grus värmeledningsförmåga [W/mK]
Grus_rho	2000	2000	Grus densitet [kg/m ³]
Grus_cp	1000	1000	Grus värmekapacitet [J/kgK]
Sand_tc	1.5	1.5	Sand värmeledningsförmåga [W/mK]
Sand_rho	1500	1500	Sand densitet [kg/m ³]
Sand_cp	2000	2000	Sand värmekapacitet [J/kgK]
Ull_tc	0.036	0.036	Mineralull värmeledningsförmåga [W/mK]
Ull_rho	35	35	Mineralull densitet [kg/m ³]
Ull_cp	800	800	Mineralull värmekapacitet [J/kgK]

Figur 36. Materialparametrar för 3D COMSOL-modellen för pelargrund.

Label: TempOchCoeff

Parameters

Name	Expression	Value	Description
Tute	-20[degC]	253.15 K	Utetemperatur
Tinne	22[degC]	295.15 K	Rumstperatur
Tmark	5[degC]	278.15 K	T i marken på 15m djup
vVind	0	0	Vindhastighet [m/s]
Ute_hconv	4+4*vVind	4	Konvektionskoefficient ute [W/m ² K]
Inne_hconv	5	5	Konvektionskoefficient inne [W/m ² K]

Figur 37. Temperaturer och konvektionskoefficienter för 3D COMSOL-modellen för pelargrund. Observera konvektionens beroende av vindhastigheten.