
DUURZAAM HERGEBRUIK VAN THERMISCHE ENERGIE

Een verkenning tot hergebruik van de thermische energie welke vrij komt bij de hydratatie van heipalen
bij de IJB Groep te Lemmer.



Halbert Taekema, s0123137
16 augustus 2012
Universiteit Twente

ijb groep
UNIVERSITEIT TWENTE.

VOORWOORD

Het verslag wat voor u ligt is geschreven in het kader van mijn Bachelor Opdracht. De Bachelor Opdracht is de afsluitende opdracht van de bachelor Civiele Techniek aan de Universiteit Twente. Voor de opdracht heb ik onderzoek verricht naar de mogelijkheden tot hergebruik van de thermische energie welke beschikbaar is in de productiefaciliteiten van betonnen heipalen. Het onderzoek heeft plaats gevonden in het vierde kwartiel van het collegejaar 2011-2012 bij het bedrijf IJB Groep BV. Tijdens dit proces ben ik begeleid door ir. Bram Entrop vanuit de universiteit, en door ing. Folkert de Haan vanuit de IJB Groep.

Ik wil Bram en Folker van harte bedanken voor de begeleiding gedurende deze opdracht. Jullie input wanneer ik niet verder kwam heeft er mede voor gezorgd dat dit verslag er ligt in de vorm welke het heeft. Tevens wil ik de IJB Groep bedanken voor het faciliteren van mijn onderzoek. Ik heb het enorm naar mijn zin gehad. Gedurende de opdracht heb ik tijdelijk weer bij mijn ouders gewoond. Wietze en Aaltje heel erg bedankt voor de goede zorg. Als laatste wil ik mijn vriendin Gaby bedanken. Jij hebt me altijd ondersteund en ik zou niet weten wat ik zonder je moest.

INHOUDSOPGAVE

Voorwoord	5
Samenvatting	9
1 Inleiding.....	11
1.1 Onderzoeksopzet.....	11
1.2 Onderzoeksmodel.....	12
1.3 Leeswijzer	12
2 Energieproductie Heipalen.....	15
2.1 Hydratatie in beton.....	15
2.2 Uitgangspunten	17
2.2.1 De productiefaciliteiten.....	17
2.2.2 De betonmengsels.....	20
2.2.3 Productiecyclus	22
2.3 Theoretische verwachting	22
2.4 Meetopstelling.....	25
2.5 Meetresultaten.....	27
2.6 Analyse	29
2.6.1 Dormante periode.....	29
2.6.2 Werkdagen	30
2.6.3 Weekend	32
2.6.4 Vrij gekomen energie	33
2.7 Deelconclusie.....	34
3 Invloed van de natuurlijke omgeving	35
3.1 Indicatoren	36
3.2 Uitgangspunten	36
3.3 Theretische verwachting	37
3.4 Meetopstelling.....	39
3.4.1 Materiaal en meetlocaties	39
3.4.2 Meetdata en productieloze dagen.....	40
3.5 Meetresultaten en analyse.....	41
3.5.1 Omgevingstemperatuur	41
3.5.2 Zonnestraling.....	44
3.6 Deelconclusie.....	46
4 Beschikbare energie	47
4.1 Huidige situatie.....	47
4.2 Eisen beïnvloedingsmaatregelen	48

4.3	Preventieve maatregelen	49
4.4	Reactieve maatregelen	50
4.5	Deelconclusie.....	50
5	Discussies	51
6	Conclusies.....	53
7	Aanbevelingen.....	55
	Bibliografie	57
	Bijlage A – Meetcodex.....	59

SAMENVATTING

IJB Groep is een producent van betonnen heipalen. Er zijn in het verleden grote temperatuurswisselingen waargenomen in de productiehallen van deze betonnen heipalen. Hierbij de wens is uitgesproken om de energie uit deze temperatuurswisselingen te hergebruiken, en daarmee de temperatuurswisselingen te beperken.

In dit onderzoek is eerst onderzocht in welke mate er energie vanuit de hydratatie van de heipalen beschikbaar komt alsmede hoe de natuurlijke omgeving van invloed is op de thermische gesteldheid van de productiehallen. Na een meetperiode van vier weken blijkt dat er gemiddeld 23.5 GJ aan energie over een periode van 12 uur per dag wordt geleverd als gevolg van hydratatie van het beton. Uit de metingen aan de haltemperatuur is gebleken dat er, gedurende een meetperiode van een maand, 152 uren zijn geweest waarin de haltemperatuur volgens de arbo als warm kon worden bestempeld. Wanneer de overvloedige warmte uit de lucht zou worden afgevangen levert dit gemiddeld 241 MJ aan energie op.

De gegevens over de beschikbare energie leveren handvaten op basis waarvan de derde onderzoeksvraag is beantwoord. Als antwoord op de vraag welke maatregelen er beschikbaar zijn om de thermische discrepanties te beperken danwel op te heffen zijn twee verschillende oplossingsrichtingen aangedragen. Ten eerste wordt het advies gegeven om preventieve maatregelen te nemen. Deze beïnvloeden de bronnen welke de thermische energie leveren of juist onttrekken aan de productiehallen. Als tweede wordt het advies gegeven om reactief de betontemperatuur te oogsten. Het beton is de grootste potentiële bron van energie welke benut kan worden. Voor het oogsten van de warmte zouden bijvoorbeeld de matten gebruikt kunnen worden of afdekmaten zoals die welke nu in de winter gebruikt worden.

1 INLEIDING

De IJB Groep is de grootste producent in Nederland van betonnen heipalen en draagbalken. Eén van de werkmaatschappijen van de IJB Groep, IJB Heipalen, is gespecialiseerd in de productie van voorgespannen heipalen, en IJB Heipalen heeft een warmteoverschot vastgesteld in haar productiefaciliteiten. Dit warmteoverschot is met name merkbaar in de hoge temperatuur die regelmatig in de hal wordt waargenomen. Eén van de veroorzakers van deze temperatuur toename is het hydratatieproces tijdens het uitharden van de heipalen. Bij de chemische hydratatiereactie komt in korte tijd thermische energie vrij waardoor de temperatuur van beton tot 50 graden Celsius of meer kan toenemen (de Vree, Hydratie, 2012). De thermische energie wordt aan de randen van het beton afgegeven aan de omgeving, waardoor de temperatuur in de productiefaciliteiten van de heipalen oploopt. Dit is niet alleen een probleem voor de medewerkers die in de hal werken, maar ook voor de kwaliteit van de heipalen. Bij een te hoge waarde van de temperatuur kan de kwaliteit van het geproduceerde beton niet meer worden gewaarborgd. Hierbij geldt; hoe hoger de temperatuur tijdens het hydratatieproces, hoe lager de uiteindelijke sterkte (ENCI, 2001).

Naast het warmteoverschot in de zomerperiode heeft IJB Heipalen op koude (winter)dagen een warmte tekort. Gedurende de eerste uren na het storten zijn er problemen om het beton op temperatuur te houden. Het water mag tijdens het mengen, storten en uitharden niet te koud zijn. Daarom wordt gedurende deze dagen het mengwater voorverwarmd. Er wordt flink gestookt om het water, en dus ook de betonmortel, op de juiste temperatuur te krijgen. Mocht de temperatuur teveel zakken voor aanvang van het hydratatieproces dan kan ook hier de kwaliteit van het product niet langer worden gewaarborgd (de Haan, 2012). Zowel het overschot aan warmte in de zomer, als het gebrek aan warmte in de winter, zijn dus bedreigend voor de kwaliteit van de betonnen heipalen.

1.1 ONDERZOEKSOPZET

IJB Heipalen is zich bewust van de hierboven beschreven problemen, zij is op zoek naar een manier om het overschot aan energie uit de zomerse periode op te slaan, zodat deze in de winter gebruikt kan worden. Het is hierbij aannemelijk dat in ieder geval een gedeelte van de opgeslagen thermische energie gebruikt kan worden in het productieproces van de heipalen of binnen het bedrijf zelf kan worden gebruikt, om bijvoorbeeld kantoren op te warmen. In het ideale geval kan het overschot aan thermische energie in de zomerperiode worden gebruikt om het tekort in de winter periode volledig op te vullen. Zodoende is het doel van dit onderzoek als volgt:

Het reduceren van temperatuurschommelingen in een productiehal voor heipalen door het voorstellen van fysieke maatregelen op basis van een thermische analyse.

Om het doel te realiseren zijn drie onderzoeksvragen opgesteld. Deze luiden als volgt:

1. Hoeveel thermische energie komt er beschikbaar bij de hydratatie van betonnen heipalen?
2. Welke invloed heeft de natuurlijke omgeving op de thermische gesteldheid van de productiefaciliteiten voor heipalen?
3. Welke maatregelen zijn er beschikbaar om de thermische discrepanties te beperken dan wel op te heffen?

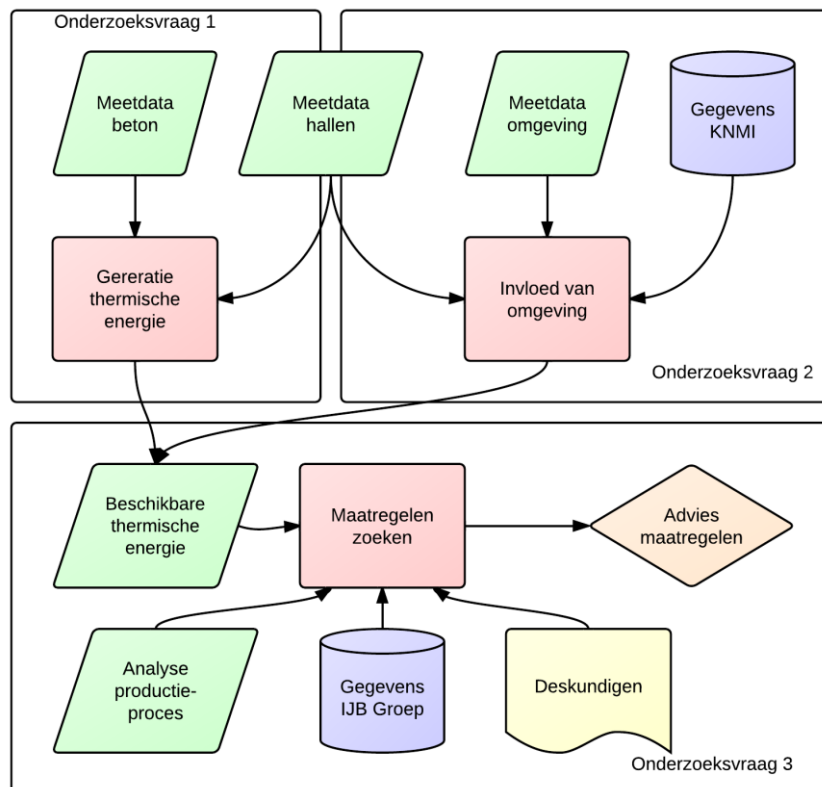
De eerste twee onderzoeksvragen worden kwantitatief bepaald. Hiervoor worden metingen verricht. In het beton en de productiefaciliteiten voor heipalen worden temperatuursmetingen uitgevoerd. Daarnaast wordt ook de buitentemperatuur en de zonnestraling gemeten. De resultaten worden gebruikt in de beantwoording van de derde onderzoeksvraag. Hier wordt met behulp van de meetgegevens, gegevens van het productieproces, gegevens van het energieverbruik van de IJB Groep en interviews met deskundigen gezocht naar maatregelen.

1.2 ONDERZOEKSMODEL

In onderstaande figuur worden de verschillende gegevensbronnen visueel weergegeven. Ook is er in de figuur aangegeven welke gegevensbronnen gecombineerd worden om tot beantwoording van de onderzoeksvragen te komen.

Voor de beantwoording van de eerste twee onderzoeksvragen worden metingen verricht. De meetdata van het beton en de hal in de eerste onderzoeksvraag wordt gebruikt om de generatie van thermische energie vanuit de heipalen te bepalen. Vervolgens wordt de invloed van de omgeving op de thermische gesteldheid van de productiefaciliteiten bepaald. Dit gebeurt door de meetgegevens uit de hallen en van de omgeving samen met gegevens van het KNMI te analyseren. Beantwoording van de eerste twee onderzoeksvragen leidt tot een conclusie over de beschikbare hoeveelheid thermische energie in de productiefaciliteiten als functie van de tijd.

De beschikbare hoeveelheid thermische energie wordt gebruikt als basis voor het zoeken naar maatregelen welke de temperatuurschommelingen reduceren in een productiehal voor heipalen. Hiernaast worden drie andere databronnen gebruikt. De eerste databron bestaat uit een analyse van het productieproces. Als tweede is er een energiescan uitgevoerd bij de IJB Groep. Deze scan heeft als doel inzicht te verkrijgen in het energieverbruik van de totale IJB Groep. Tenslotte worden deskundigen op het gebied van installaties en energie geraadpleegd. Dit alles mondt uit in een advies omtrent maatregelen voor IJB Heipalen.



FIGUUR 1: SCHEMATISCHE WEERGAVE VAN GEGEVENSBRONNEN EN DE ONDERLINGE KOPPELING VAN DE ONDERZOEKSVRAGEN.

1.3 LEESWIJZER

Heipalen zijn het beste te vergelijken met vloerverwarming of een kachel. Vloerverwarming verwarmt een ruimte over een groot oppervlak met behulp van laagwaardige warmte gedurende een lange periode. Wanneer je de heipalen in een grote productiehal voorstelt, doen de heipalen hetzelfde. Ze verwarmen de productiehal over een groot oppervlak, met laagwaardige warmte over een lange periode. De hoeveelheid energie die vrijkomt bij het produceren van betonnen heipalen, wordt beschreven in Hoofdstuk 2.

Wanneer je stelt dat de productie van heipalen fungeert als vloerverwarming, kun je stellen dat de productiehal als kas fungeert. De temperatuur in een kas wordt beïnvloed door de zon. Hoe meer de zon op de kas schijnt hoe hoger de temperatuur in de kas oploopt. Daarnaast zal een kas de warmte weer afstaan aan de omgeving. De invloed van de zon en de buitentemperatuur wordt beschreven in Hoofdstuk 3.

Samengevat hebben de heipalen als de productiehal elk hun eigen invloed op de beschikbare energie. Ze hebben echter ook invloed op elkaar. De maatregelen die op IJB Heipalen van toepassing zijn, zijn hier dan ook van afhankelijk. In Hoofdstuk 4 wordt vanuit de beschikbare energie naar mogelijke maatregelen wordt gezocht.

2 ENERGIEPRODUCTIE HEIPALEN

In dit hoofdstuk wordt een antwoord gegeven op de eerste onderzoeksvraag. Deze vraag luidt:

Welke hoeveelheid thermische energie komt er beschikbaar bij de hydratatie van betonnen heipalen?

In deze vraag staat het beschikbaar komen van thermische energie uit betonnen heipalen centraal. Bij het maken van beton vindt er een chemische reactie plaats tussen de klinkerbestanddelen uit cement, en water. Dit proces wordt hydratatie genoemd en is verantwoordelijk voor de sterkte van het beton. Bij beton is dit proces exotherm, waardoor er als bijproduct warmte vrij komt. De warmteontwikkeling is echter afhankelijk van vele variabelen. De hoeveelheid variabelen maakt het helaas onmogelijk om één allesomvattende formule te beschrijven voor de warmteproductie bij de hydratatie van beton.

In de beschrijving van de variabelen die van belang zijn bij de warmteontwikkeling is uitgegaan van een adiabatische ruimte waarin het beton zich bevindt. Tussen het beton en de ruimte vindt dus wel warmte-uitwisseling plaats, maar tussen de ruimte en de omgeving niet.

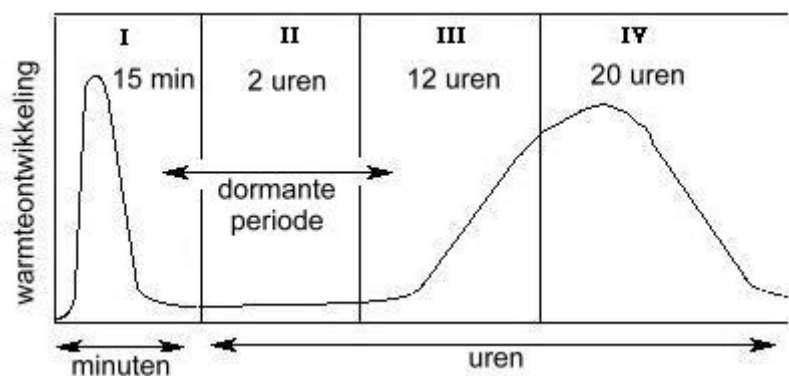
Twee voorbeelden van variabelen die invloed hebben op de warmteontwikkeling bij hydratatie zijn de warmteproductie en warmteafvoer. De veranderingen in de betontemperatuur zijn afhankelijk van de warmteproductie en afvoer van het beton (ENCI, 2011). Bij hogere concentraties cement in een m³ beton zal meer en sneller warmte vrijkomen. Dit heeft te maken met het oppervlak van het cement wat met water kan reageren. Bij een hogere concentratie is het totale contactoppervlak met water ook groter. Verschillende betonmengsels zullen dus verschillende hoeveelheden warmte produceren en de ontwikkeling van warmte zal per mengsel verschillen.

Warmte in de heipalen wordt overgedragen middels conductie. Hierbij geldt dat de weerstand welke de warmte ondervindt, groter is, naarmate de afstand welke moet worden overbrugd ook groter is. De hoeveelheid energie die kan worden afgedragen aan de omgeving wordt beperkt door het contactoppervlak tussen de heipalen en de omgeving. De afmetingen van de heipalen zijn zodoende van belang voor de totale temperatuursontwikkeling in het beton. Bij grotere afmetingen worden zowel de afstand welke de thermische energie moet afleggen groter, als het contactoppervlak met de omgeving groter.

In de volgende paragraaf wordt een introductie gegeven over hydratatie van beton. Vervolgens worden de processen en omstandigheden rondom de hydratatie verder toegelicht. Vanuit de literatuur wordt hierna een hypothese gevormd over de te verwachten hoeveelheid thermische energie bij de hydratatie van heipalen. Hierna worden de meetresultaten en wordt er een deelconclusie gegeven met betrekking tot de hoeveelheid thermische energie welke vrijgekomen is.

2.1 HYDRATATIE IN BETON

Hydratatie van cement is het proces waardoor beton zijn sterkte krijgt. Zodra cement met water gemengd wordt begint het reactieproces. In het eerste stadium wordt kalk opgelost en uit C₃A en gips ettringiet gevormd. Ettringiet vormt hierbij een laag om de cementkorrels heen welke de toetreding van water aan het cement bemoeilijkt. Hierdoor staat het hydratatieproces tijdelijk stil. Dit wordt de dormante periode genoemd. Deze periode wordt gebruikt om het beton te kunnen verwerken. Gaandeweg dringt er water door laag ettringiet heen en gaat het hydratatieproces verder (Reinhardt, 1998). De duur van de dormante periode bedraagt normaal enkele uren, zoals ook te zien is in Figuur 2. De duur kan worden beïnvloed door aanpassing van de hoeveelheid gips in het betonmengsel (de Vree, Dormante periode, 2012).



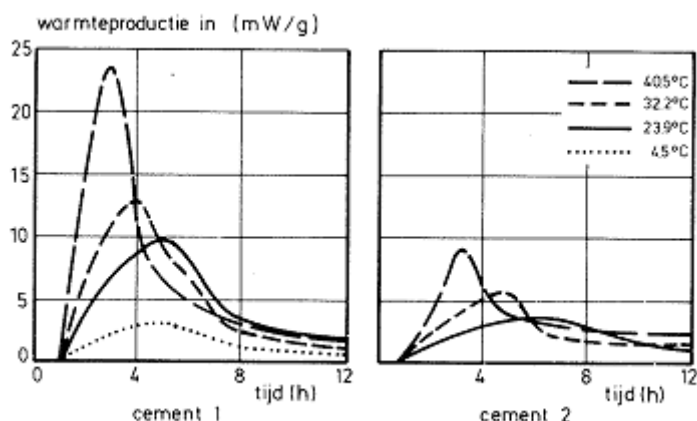
FIGUUR 2: SCHEMATISCHE WEERGAVE VAN DE WARMTEONTWIKKELING VAN BETON. BRON: (DE VREE, DORMANTE PERIODE, 2012)

Bij de reactie van de klinkerbestanddelen uit cement met water ontstaat warmte. Verschillende klinkerbestanddelen produceren verschillende hoeveelheden thermische energie. Tabel 1 toont een overzicht van de warmteproductie van verschillende klinkerbestanddelen bij hydratatie. Uit deze tabel blijkt dat C_3A veruit de meeste thermische energie oplevert (1340 Joule per gram), en C_2S de minste energie oplevert (250 Joule per gram). Als de exacte samenstelling van het cement bekend is, kan de theoretische hoeveelheid thermische energie, als gevolg van volledige hydratatie, worden berekend. Desondanks wordt de hydratatiwarmte meestal experimenteel vastgesteld met behulp van een adiabatische proefopstelling.

TABEL 1: WARMTEPRODUCTIE BIJ HYDRATATIE VAN VERSCHILLENDE KLINKERBESTANDDELEN (REINHARDT, 1998, P. 35)

Bestandsdeel	C_3S	C_2S	C_3A	C_2AF	C_4AF
J/g	500	250	1340	420	400

Volledige hydratatie van beton duurt circa vier weken, maar het verloop van de hydratatie gedurende deze weken, met name in de eerste dagen, kan sterk verschillen. Het verloop van de hydratatie is sterk afhankelijk van de aanvangstemperatuur van het beton. Hoe hoger de betontemperatuur, hoe sneller het hydratatieproces verloopt (ENCI, 2011). Dit is ook te zien in Figuur 3. Bij een hogere aanvangstemperatuur is de warmteproductie meer gecentreerd en hoger dan bij een lagere aanvangstemperatuur. Dit is vooral goed te zien bij cement 1 met een starttemperatuur van $40,5^\circ$, deze levert ongeveer 5x meer warmteproductie op dan cement 2 met een starttemperatuur van $4,5^\circ$.



FIGUUR 3: VOORBEELD VAN DE WARMTEPRODUCTIE VAN TWEE CEMENTSOORTEN BIJ VERSCHILLENDE AANVANGSTEMPERATUREN. CEMENT 1 BEVAT 60% C_3S , 13% C_2S EN 10% C_3A . CEMENT 2 BEVAT 25% C_3S , 48% C_2S EN 6% C_3A . (REINHARDT, 1998, P. 37)

Zolang de warmteproductie hoger is dan de warmteafvoer, stijgt de temperatuur in het beton. Echter, bij een hogere betontemperatuur neemt ook de warmteafvoer toe. Hierdoor koelt het beton ook weer sneller af.

Samengevat wordt de warmteproductiebepaald door onder andere de cementsoort, het cementgehalte, de water-cementfactor en de specieteratuur. De warmteafvoer is afhankelijk van het thermisch geleidend vermogen van het beton, de afmetingen van het betonnen element, de bekisting en de omgevingsomstandigheden (zie betonpocket 2012 en Beton (Reinhardt, 1998)).

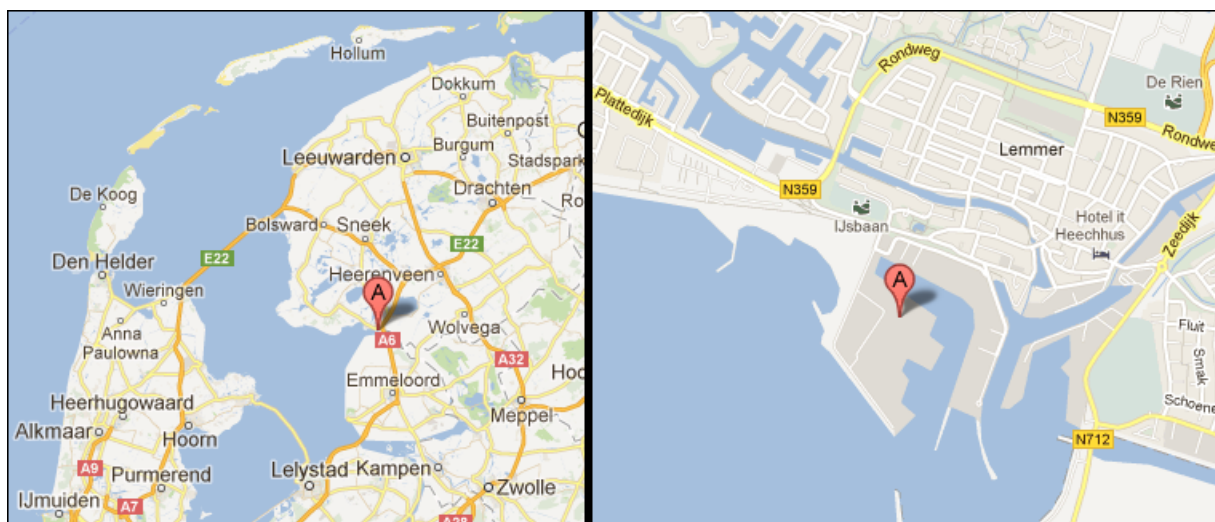
2.2 UITGANGSPUNTEN

Voor het bepalen van de energieproductie uit de heipalen worden allereerst enkele vaste waarden en omstandigheden besproken en uitgerekend. De waarden die hier worden bepaald, dienen ter ondersteuning van het gehele verslag en zullen ook in de overige hoofdstukken terug komen.

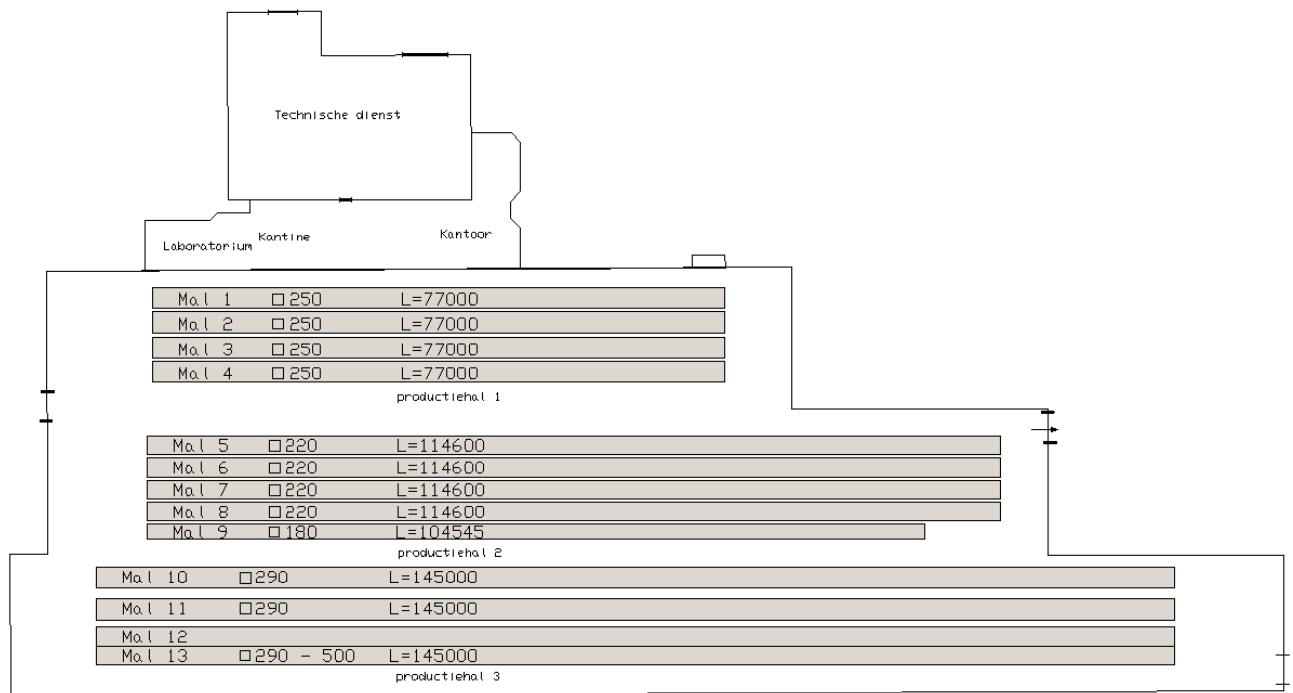
2.2.1 DE PRODUCTIEFACILITEITEN

De productiefaciliteiten voor heipalen van de IJB Groep is gelegen op het industrieterrein van Lemmer. Zoals in figuur 4 is te zien is dit industrieterrein gelegen aan het IJsselmeer. Zodoende kunnen de grondstoffen voor beton via schepen aan de IJB Groep worden geleverd.

In de hallen staan gezamenlijk dertien mallen. Figuur 5 toont een overzicht van hoe de mallen over de productiehallen verdeeld zijn. Mallen 1 tot en met 4 liggen in productiehal 1. Mallen 4 tot en met 9 liggen in productiehal 2. De mallen 10 tot en met 13 in productiehal 3. De afmetingen van de mallen verschillen, maar hebben allemaal dezelfde opbouw. Bij alle mallen zijn er stalen t-profiel balken tegen elkaar aan gelegd zoals weergegeven in figuur 6. Hierdoor ontstaat er tussen twee balken een vierkante schacht waar het beton in gestort kan worden. Per mal zijn er acht tot twaalf van deze schachten. Mal 12-13 is de enige uitzondering. De t-profiel balken van deze mal kunnen bewegen om zodoende heipalen met een ongebruikelijk profiel op maat te kunnen maken. De gaten tussen de balken worden opgevuld met houten platen om zo wel een vlakke zijde te krijgen. De t-balken staan in een frame welke ze bij elkaar houdt. De balken worden aan de onderkant elke vier tot zes meter ondersteund met een dwarsbalk.



FIGUUR 4: LOCATIE VAN DE PRODUCTIEFACILITEITEN VAN DE HEIPALEN VAN DE IJB GROEP



FIGUUR 5: LOCATIEOVERZICHT VAN DE MALLEN IN DE PRODUCTIEHALLEN



FIGUUR 6: VOORAANZICHT VAN DE MALLEN

Naast beton wordt er ook wapening gebruikt in de heipalen. Deze bestaat uit twee delen; voorgespannen staaldraden en kopwapening op de kop en voet van de heipaal. Op de kop en de voet van de mallen zijn platen gesitueerd waartussen staaldraden worden voorgespannen. De hoeveelheid voorgespannen wapening varieert met het profiel van de heipalen en de specificaties van de aannemer. Het aantal staaldraden is meestal vier of vijf. De plek van de staaldraden in een heipaal is te vergelijken met de ogen op een dobbelsteen.

De breedte en hoogte van een paal staat in alle mallen vast, met uitzondering van mal 12-13. De lengte van de heipalen is echter wel variabel. Voor de lengtebepaling van de heipalen worden blokken gebruikt, welke tussen de opstaande delen van een schacht ingeklemd kunnen worden. Deze worden voor het storten van het beton, zowel tussen afzonderlijke palen als op de kop en staart van de mal geplaatst. De blokken bestaan uit een stalen geraamte omsloten met rubber matten. De blokken mogen de voorgespannen staalkabels niet onderbreken. Daarom zitten er in de blokken sleuven, zodat de kabels daar in kunnen schuiven. De blokken zijn vierkant en verschillen per mal in grootte.

Een overzicht van de specificaties van de mallen is weergegeven in Tabel 2. De totale inhoud van de mallen bedraagt 781,71 m³. De mallen worden echter nooit volledig met beton gevuld. De wapening en de blokken nemen een bepaalde hoeveelheid ruimte in. Daarnaast kan het voorkomen dat de heipalen gezamenlijk met de blokken niet de volledige mallengte benutten. Er wordt in dit onderzoek van een maximale hoeveelheid beton uitgegaan. Het verlies aan het uiteinde wordt derhalve in dit onderzoek buiten beschouwing gelaten.

TABEL 2: SPECIFICATIES VAN DE VERSCHILLENDE MALLEN

	Aantal schachten (-)	Profiel van de heipalen (mm)	Afmeting per schacht [hxbxl] (mm)	Totale inhoud (m ³)
Mal 1	10	250	250x250x77000	48.18
Mal 2	10	250	250x250x77000	48.18
Mal 3	10	250	250x250x77000	48.18
Mal 4	10	250	250x250x77000	48.18
Mal 5	10	220	220x220x114600	55.47
Mal 6	10	220	220x220x114600	55.47
Mal 7	10	220	220x220x114600	55.47
Mal 8	10	220	220x220x114600	55.47
Mal 9	12	180	180x180x104545	40.65
Mal 10	8	290	290x290x145000	97.56
Mal 11	8	290	290x290x145000	97.56
Mal 12-13	3	290-550	550x550x145000	131.59 ¹

TABEL 3: BEPALING VAN HET MINIMALE VOLUME VAN DE BLOKKEN. DE GEGEVENS GELDEN PER MAL.

	Minimaal aantal heipalen/schacht (-)	Blokken/schacht (-)	Totaal aantal blokken (-)	Blokafmetingen [hxbxl] (mm)	Inhoud van de blokken (m ³)
Mal 1-4	4	5	50	250x250x250	0.78
Mal 5-8	6	7	280	220x220x220	0.75
Mal 9	7	8	96	180x180x180	0.56
Mal 10-11	6	7	112	290x290x290	1.37
Mal 12-13	5	6	18	550x550x550	2.99

Het aantal blokken verschilt bij verschillende lengtes van de heipalen. Voor elk profiel geldt een andere maximale lengte. Omdat bij een maximale lengte de minste hoeveelheid blokken nodig zijn, wordt er aangenomen dat er heipalen met een maximale lengte worden geproduceerd. De maximale lengtes van de heipalen bedragen respectievelijk 16, 20, 21, 27 en 36 meter voor de profielen 180, 220, 250, 290 en 550 (IJB Groep, 2012). Zodoende kan het minimale aantal heipalen worden bepaald waarmee de mal volledig gevuld wordt. Per schacht per mal is er altijd een blok meer nodig dan het aantal heipalen. Tenslotte kan vanuit het aantal schachten en de afmetingen van een blok het volume worden bepaald welke de blokken innemen. Tabel 3 geeft een overzicht van het volume van de blokken per mal. Het totale volume wat de blokken innemen bedraagt 12.39 m³.

De hoeveelheid kopwapening wordt in dit onderzoek niet meegenomen, maar de hoeveelheid voorspanwapening wel. De IJB Groep gebruikt voor de heipalen de volgende wapening;

- Hal 1: ø6.9 mm en ø9.3 mm, maximaal 5 draden per paal;
- Hal 2: ø6.9 mm en ø9.3 mm, maximaal 4 draden per paal;
- Hal 3: ø9.3 mm en ø12.5 mm, type 29, max. 7 draden per paal en de grotere schachtdiameters maximaal 13 draden per paal.

Het verschil in diameter is afhankelijk van de lengte van de paal. Bij een maximale lengte van de palen wordt de dikste wapening gebruikt. Tevens wordt het maximaal aantal draden per paal gebruikt. De wapening die in de

¹ De profielafmetingen van mal 12-13 zijn variabel. Het minimum profiel is 290 mm en het maximum profiel van de heipalen wat nog in de mal kan worden gemaakt is 550 mm. De heipalen van 550 mm nemen echter wel meer ruimte in dan die van 290 mm waardoor er slechts drie schachten beschikbaar blijven. Zodoende wordt een inhoud van 131.59 m³ bereikt.

blokken zit wordt niet meegenomen, omdat deze ruimte al ingenomen wordt door de blokken. De staaldraden met een diameter van 9.3 mm hebben een oppervlak van 52 mm^2 en die met een diameter van 12.5 mm hebben een oppervlak van 93 mm^2 (Stoeten, 2012). Tabel 4 geeft het volume van de wapening per mal. Het totale volume wat ingenomen wordt door de wapening bedraagt $3,99 \text{ m}^3$.

TABEL 4: BEPALING VAN HET VOLUME VAN DE VOORGESPANNEN WAPENING. DE GEGEVENS GELDEN PER MAL.

	Oppervlak schachtdoorsnede (mm^2)	Oppervlak wapening per schacht (mm^2)	Inhoud van de wapening (m^3)
Mal 1-4	62500	260	0.197
Mal 5-8	48400	208	0.235
Mal 9	32400	208	0.257
Mal 10-11	84100	651	0.745
Mal 12-13	302500	1209	0.514

De hoeveelheid beton kan nu worden berekend. Door het volume van de blokken en het volume van de wapening van het malvolume af te trekken kan deze worden berekend. Tabel 5 geeft een overzicht van de verdeling van de inhoud van de verschillende mallen. De inhoud van de mallen bedraagt in totaal 781.71 m^3 . De blokken nemen 12.39 m^3 in en de wapening $3,99 \text{ m}^3$. De totale hoeveelheid beton in de productiefaciliteiten is zodoende $765,33 \text{ m}^3$.

TABEL 5: OVERZICHT VAN DE INHOUDSVERDELING VAN DE VERSCHILLENDE MALLEN IN KUBIEKE METER PER MAL

	Inhoud mal (m^3)	Volume blokken (m^3)	Volume wapening (m^3)	Volume beton (m^3)
Mal 1-4	48.18	0.78	0.197	47.15
Mal 5-8	55.47	0.75	0.235	54.49
Mal 9	40.65	0.56	0.257	39.83
Mal 10-11	97.56	1.37	0.745	95.45
Mal 12-13	131.59	2.99	0.514	128.08

2.2.2 DE BETONMENGSELS

Voor de productie van heipalen bij de IJB Groep worden in de regel vier verschillende betonmengsels gebruikt; 8, 105, 163 en 167. Deze bestaan uit een combinatie van toeslag (bestaande uit zand en grind), cement, vulstof, hulpstof en water. Een overzicht van deze mengsels wordt getoond in Tabel 6 en Tabel 7. De vulstof en hulpstof zijn altijd gelijk. De vulstof is poederkoolvliegias van het merk Wilhelmshaven. Dit wordt gebruikt om de sterkteontwikkeling van het beton te bevorderen. Als hulpstof wordt Glenium ACE 30 30% van BASF gebruikt (BASF). Glenium is een versneller en zorgt ervoor dat het verhardingsproces sneller verloopt. Daarnaast zorgt het voor een sterker beton.

TABEL 6: EIGENSCHAPPEN VAN DE DOOR DE IJB GROEP GEBRUIKTE BETONMENGSELS VOOR DE PRODUCTIE VAN HEIPALEN (IJB MORTEL LEMMER, 2012)

	8	105	163	167
Sterkteklasse:	C45/55	C45/55	C35/45	C45/55
Milieuklasse:	XC4 XA2	XC4 XA2	XC4 XA1	XC4 XA2
Consistentieklasse:	Schud. 420-550	Schud. 420-550	Schud. 420-550	Schud. 420-550
Cementtype:	4 CEM I 52.5 R	4 CEM I 52.5 R	6 CEM I 52.5 R	6 CEM I 52.5 R

Het cement is afkomstig van twee verschillende leveranciers. Dit zijn HeidelbergCement en Schwenk Bernburg. 4 CEM I 52.5 R is afkomstig van HeidelbergCement en 6 CEM I 52.5 R is afkomstig van Schwenk Bernburg. In de

opgegeven recepten wordt een mengsel gemaakt met cement van een specifieke leverancier, echter wordt cement van beide leveranciers uitwisselend voor alle mengsels gebruikt (Norbruis, 2012). Er wordt dan ook aangenomen, dat het cement van beide leveranciers gelijk is.

TABEL 7: SAMENSTELLINGEN VAN DE VERSCHILLENDE BETONMENGSELS GEBRUIKT VOOR DE PRODUCTIE VAN HEIPALEN (IJB MORTEL LEMMER, 2012)

Mengsel	Zand (kg/m ³)	Grind (kg/m ³)	Cement (kg/m ³)	Vulstof (kg/m ³)	Hulpstof (kg/m ³)	Water (l/m ³)	Vol. Massa (kg/m ³)	Soortelijke warmte (kJ/kg.K)
8	725	1134	330	20	1.15	149	2358.9	1.050
105	710	1110	350	20	1.75	158	2349.4	1.064
163	715	1119	325	20	1.5	160	2340.2	1.067
167	724	1132	335	15	1.68	151	2358.4	1.053

Vanuit de samenstelling van de betonmengsels is de soortelijke warmte bepaald. Dit is gedaan aan de hand van formule (2.1). Door de producten van de soortelijke warmte c en de massa m van alle onderdelen van een mengsel bij elkaar op te tellen en vervolgens te delen door het soortelijk gewicht van dit mengsel kan de soortelijke warmte van dit mengsel worden berekend. Hierbij zijn de soortelijk warmte van zand, grind en cement aan elkaar gelijk en bedragen 0.84 kJ/kg.K (ENCI, 2011). De soortelijke warmte van het poederkoolvliegias bedraagt 0.75 kJ/kg.K (Sear, 2001) (ScotAsh, 2012) en die van water bedraagt 4.184 kJ/kg.K (ENCI, 2011). De soortelijke warmte van de Glenium ACE 30 30% is onbekend. Omdat de hulpstof voor elk betonmengsel minder dan 0.75% van het totaal uitmaakt, wordt deze buiten beschouwing gelaten.

$$c_b = \frac{c_z \cdot m_z + c_g \cdot m_g + c_c \cdot m_c + c_v \cdot m_v + c_w \cdot m_w}{\rho_b} \quad (2.1)$$

Welk betonmengsel in een mal wordt gestort is allereerst afhankelijk de malafmetingen. Mal 1 tot en met 8 gebruiken mengsel 163 of 167. Mal 9 gebruikt mengsel 105 en mallen 10, 11 en 12-13 gebruiken mengsel 8. De verdeling van de mengsels over de mallen is zo gekozen dat de volgende dag altijd kan worden ontlast. De keuze van het betonmengsel voor mallen 1 tot en met 8 is verder afhankelijk van het tijdstip van de storting en de benodigde sterkteklasse. Hoe later op de dag wordt gestort, desto eerder voor mengsel 167 wordt gekozen ten opzichte van mengsel 163. Mengsel 167 bevat meer cement en is daardoor reactiever dan mengsel 163 en heeft als gevolg daarvan eerder de benodigde sterkte bereikt welke nodig is om te kunnen ontlasten (Norbruis, 2012).

De gegenereerde warmte is afhankelijk van de samenstelling van het beton. Met behulp van de warmteproductie van de verschillende klinkerbestanddelen uit Tabel 1 is de hydratatiwarmte van het cement bepaald. De uitwerking hiervan is te zien in Tabel 8. Hierbij dient te worden opgemerkt dat de reactieve bestanddelen van het cement gezamenlijk 96% van het cement vormen. De overige 4% bestaat uit niet reactieve bestanddelen. Het cement zal bij volledige hydratatie 480 J/g afgeven.

De betonmengsels verschillen wat betreft de hoeveelheid cement niet veel van elkaar. Daaruitvolgend zal ook de warmteproductie van de verschillende mengsels elkaar niet veel ontlopen. Dit is ook te zien in Tabel 9 waarin de warmteproductie van de verschillende mengsels bij volledige hydratatie is gegeven.

TABEL 8: HYDRATATIEWARMTE VAN HET CEMENT

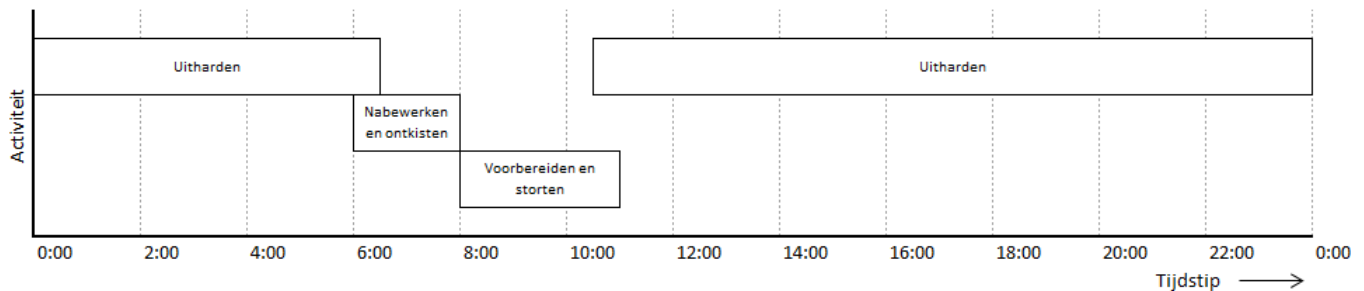
Bestandsdeel	C ₃ S	C ₂ S	C ₃ A	C ₂ AF	C ₄ AF	Totaal
Aandeel	63%	18%	7.7%	0%	4.1%	96%
J/g	500	250	1340	420	400	480

Tabel 9: Warmteproductie van de verschillende mengsels bij volledige hydratatie

Mengsel	8	105	163	167
Cement (kg/m ³)	330	350	325	335
Warmteproductie (kJ/m ³)	158261	167853	155864	160659

2.2.3 PRODUCTIECYCLUS

In de inleiding werd voor de productie van heipalen de vergelijking gemaakt met vloerverwarming in een huis. Een verwarming staat niet altijd aan. Dat geldt ook voor de warmteproductie van de heipalen. De periode waarin warmte wordt afgegeven is afhankelijk van de productiecyclus van de heipalen. Volledige hydratatie duurt ongeveer vier weken, waarbij het gros van de thermische energie in de eerste 3 dagen vrij komt. Bij de productie van heipalen bij de IJB Groep worden de heipalen op doordeweekse dagen echter al na 20 uur ontlast. Ze worden hierna naar buiten gebracht om verder uit te harden. De heipalen zijn dus minder dan één dag aanwezig in de productiefaciliteiten. Gedurende deze periode kan slechts een gedeelte van de totale hydratatiwarmte vrijkomen en worden afgestaan aan de hal. Daarnaast is er nog de dormante periode waarin het beton geen warmte produceert.



FIGUUR 7: TIJDSSHEMA VAN DE EERSTE MAL WELKE ONTKIST WORDT

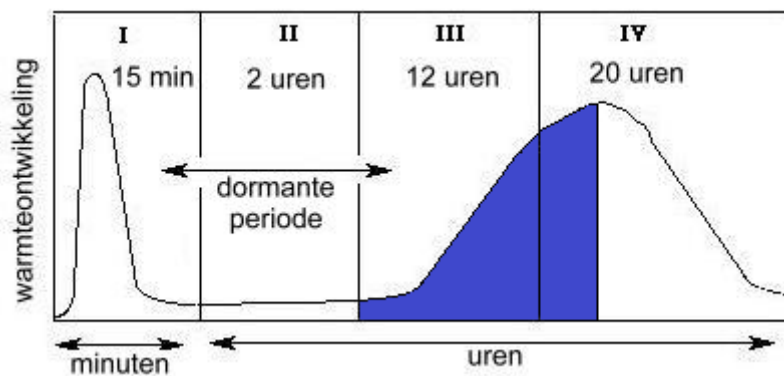
Figuur 7 laat het tijdsschema zien van de eerste mal welke 's ochtends wordt ontlast. 's Ochtends om zes uur wordt er begonnen met het nabewerken van de heipalen en met het ontlasten. De heipalen welke als eerste gestort zijn worden ook als eerste ontlast. Tijdens het ontlasten zitten de heipalen dus nog midden in het hydratatieproces. De palen zijn echter al wel sterk genoeg voor transport. Na het ontlasten en transport wordt de mal schoongemaakt en worden er voorbereidingen getroffen voor een nieuwe partij heipalen. Na het storten heeft de nieuwe partij heipalen vervolgens weer 20 uur om uit te harden voordat de cyclus zich de volgende dag opnieuw herhaalt.

De mallen worden per hal één voor één ontlast. De cycli voor de mallen in een hal welke later worden ontlast zijn gelijk aan Figuur 7 met als enige verandering dat de tijden zijn opgeschoven. Rond 5 uur is men klaar met het storten van de laatste heipalen.

2.3 THEORETISCHE VERWACHTING

De hoeveelheid vrijgekomen thermische energie is afhankelijk van vele factoren. Gezien de dormante periode van het beton en de productiecyclus is er maar een kort tijdsspan waarin het beton zijn warmte af kan staan. De dormante periode duurt meestal 1 tot 3 uur (de Vree, Dormante periode, 2012). Er wordt van een gemiddelde dormante periode van 2 uur uit gegaan. Hierdoor zal gedurende 18 uur warmte worden geproduceerd in de heipalen. Wanneer de schematische weergave van de warmteontwikkeling in Figuur 2 beton opnieuw wordt bekeken, dan blijkt ongeveer de helft van de totale warmte te worden ontwikkeld gedurende deze periode. Zie ook het blauw gearceerde gedeelte in Figuur 8. Er wordt in verdere berekeningen

aangenomen dat de helft van de totale warmteproductie van de heipalen gedurende het verblijf in de productiefaciliteiten tot ontwikkeling komt.



FIGUUR 8: AFGIFTE VAN THERMISHE ENERGIE DOOR DE HEIPALEN

Voor het maken van een schatting van de hoeveelheid beschikbaar gekomen thermische energie vanuit de heipalen wordt verder van de volgende situatie uit gegaan:

- Alle mallen worden volledig gebruikt voor de productie van heipalen;
- In mal 1, 2, 5 en 6 wordt mengsel 163 gestort en in mal 3, 4, 7, 8 wordt mengsel 167 gestort. In mal 9 wordt mengsel 105 gestort en in mal 10, 11, 12-13 wordt mengsel 8 gestort;
- Alle mengsels hebben een gelijk verloop wat betreft de warmte ontwikkeling;
- Naast de mallen zijn er geen objecten in de hallen aanwezig.

Met deze voorwaarden bedraagt de totale hoeveelheid warmte die vrij komt 60755 MJ of afgerond 61 GJ. Een overzicht van de productie per mal wordt gegeven in Tabel 10. Deze hoeveelheid energie zal het beton en de hal verwarmen. Er wordt aangenomen dat er geen andere processen in of buiten de hal zijn welke de thermische gesteldheid van het beton en de hal beïnvloeden. Op deze manier zal elke temperatuursverandering in het beton en de hal volledig veroorzaakt zijn door het vrij komen van warmte uit het cement.

Normaal gesproken wordt het beton gestort met een temperatuur van 20 graden Celsius (Norbruis, 2012). Er wordt geschat dat de gemiddelde betontemperatuur tot het ontkisten met 20 graden toeneemt tot 40 graden Celsius. Bij het ontkisten van het beton worden de warme palen naar buiten gebracht. Alle energie en warmte die dan nog in de palen zit wordt naar buiten gebracht en is niet langer beschikbaar in de productiehallen. De vrijgekomen hoeveelheid thermische energie Q welke nog in de heipalen zit en naar buiten gedragen wordt kan berekend worden met formule (2.2). Hierin is de ρ de soortelijke massa van het beton in kg/m^3 , c de soortelijke warmte van het beton in kJ/kg.K , V de hoeveelheid beton in m^3 en ΔT de temperatuursverandering van het beton in K.

$$Q = \rho \cdot V \cdot c \cdot \Delta T \quad (2.2)$$

Door de hoeveelheid beton te vermenigvuldigen met de soortelijke massa van het mengsel in de mal kan de massa bepaald worden. Massa vermenigvuldigd met de soortelijke warmte en de temperatuursverandering geeft de hoeveelheid geproduceerde warmte welke nog in de heipalen zit. De hoeveelheid, soortelijke massa en de soortelijke warmte van het beton is per mal is in paragraaf 2.2.2 berekend. De temperatuursverandering bedraagt 20 graden Celsius wat gelijk is aan 20 graden Kelvin. De totale hoeveelheid thermische energie welke naar buiten wordt meegenomen in de verwarmde heipalen bedraagt 38047 MJ (afgerond 38 GJ). Meer dan de helft van de totale hoeveelheid warmte zit dus nog in de heipalen. De overige 23 GJ is afgestaan aan de hal.

TABEL 10: TOTALE WARMTEPRODUCTIE PER MAL EN DE BENODIGDE WARMTE OM DE GEMIDDELDE BETONTEMPERATUUR MET 25 GRADEN CELSIUS TOE TE LATEN NEMEN

	Mengsel	Beton (m ³)	Warmteproductie (MJ/m ³)	Warmteproductie (MJ)	Verwarming met 20 °C (MJ)
Mal 1	163	47,15	77,9	3674	2356
Mal 2	163	47,15	77,9	3674	2356
Mal 3	167	47,15	80,3	3788	2342
Mal 4	167	47,15	80,3	3788	2342
Mal 5	163	54,49	77,9	4247	2722
Mal 6	163	54,49	77,9	4247	2722
Mal 7	167	54,49	80,3	4377	2706
Mal 8	167	54,49	80,3	4377	2706
Mal 9	105	39,83	83,9	3343	1991
Mal 10	8	95,45	79,1	7553	4729
Mal 11	8	95,45	79,1	7553	4729
Mal 12-13	8	128,08	79,1	10135	6346

De hoeveelheid lucht in de productiehallen bedraagt, na aftrek van het totaalvolume van de mallen, afgerond 62400 m³. De soortelijke massa van lucht is 1,29 kg/m³ en een soortelijke warmte van lucht is 1,005 kJ/kg.K. Dit betekenen dat met 23 GJ aan thermische energie en perfecte isolatie de lucht in de productiehallen met 281 °C (!) zou toenemen.

De 23 GJ aan energie komt vrij over een periode van 20 uur. Gemiddeld over deze periode is het vermogen 315 kW. Als aangenomen wordt dat in de dormante periode geen energie vrij komt is het gemiddelde vermogen 350 kW. Om dit in perspectief te zetten; het gemiddelde vermogen van boiler is 2,2 kW. De hoeveelheid energie welke door het beton aan de hal wordt afgedragen in 18 uur zou dan gelijk zijn aan 160 boilers.

Er is geschat dat 50% van de totale hoeveelheid energie in het beton vrijkomt binnen 20 uur na storting. Het is de vraag of dit een realistische schatting is. Omdat de dormante periode onbekend is, net zoals de warmteontwikkeling van de verschillende mengsels, kan de schatting zowel aan de lage als aan de hoge kant zijn. Beide zullen moeten blijken uit metingen.

De soortelijke warmte en massa van de betonmengsels liggen erg dicht bij elkaar, het verschil tussen de hoogste en laagste waarde in warmteproductie per kubieke meter beton bedraagt slechts 7.6%. Hierbij is de warmteproductie per m³ in mal 9 veruit het hoogst, maar dit is tevens de mal met de kleinste inhoud. De invloed van mal 9 blijft dus beperkt.

De soortelijke warmtes van lucht en beton liggen dicht bij elkaar, maar omdat de soortelijke massa van beton ongeveer 1800 keer zo groot is als die van lucht is er gemiddeld 1920 keer zoveel energie nodig om het beton op te warmen ten opzichte van de lucht. In de productiehallen is de verhouding beton-lucht afgerond 1:82. Zodoende is er gemiddeld 24 keer zoveel energie nodig om al het beton in de hal een graad in temperatuur te laten toenemen ten opzichte van alle lucht in de hal. Als bij een gelijke totale hoeveelheid beschikbaar gekomen energie de temperatuur in het beton niet met 20, maar met 21 graden toeneemt wordt er nog maar 21 GJ aan energie aan de hal afgestaan. Een verschil van ruwweg 10%.

Voor de metingen is het van belang om een realistische waarde voor de gemiddelde betontemperatuur te vinden. Tevens is het van belang om het temperatuurverloop van het beton in te monitoren. Omdat niet bekend is welk gedeelte van de totale potentiële hoeveelheid thermische energie er vrijkomt is ook het verloop van de haltemperatuur van belang. Wijzigingen in de beton- en haltemperatuur geven gezamenlijk een indicatie van de hoeveelheid thermische energie welke is vrijgekomen uit het beton en welke benut zou kunnen worden.

De verwachting is dat de warmteproductie per kubieke meter beton voor de verschillende mengsels dicht bij elkaar zal liggen. Het blijft echter onbekend of alle mengsels even snel de warmte afgeven en of dit verloop per mengsel gelijk is bij verschillende malafmetingen. Gezien het tijdsbestek van dit onderzoek is er onvoldoende tijd om al deze verschillen te bepalen. Er zal genoeg moeten worden genomen met een schatting van de gemiddelde betontemperatuur aan de hand van enkele metingen.

2.4 MEETOPSTELLING

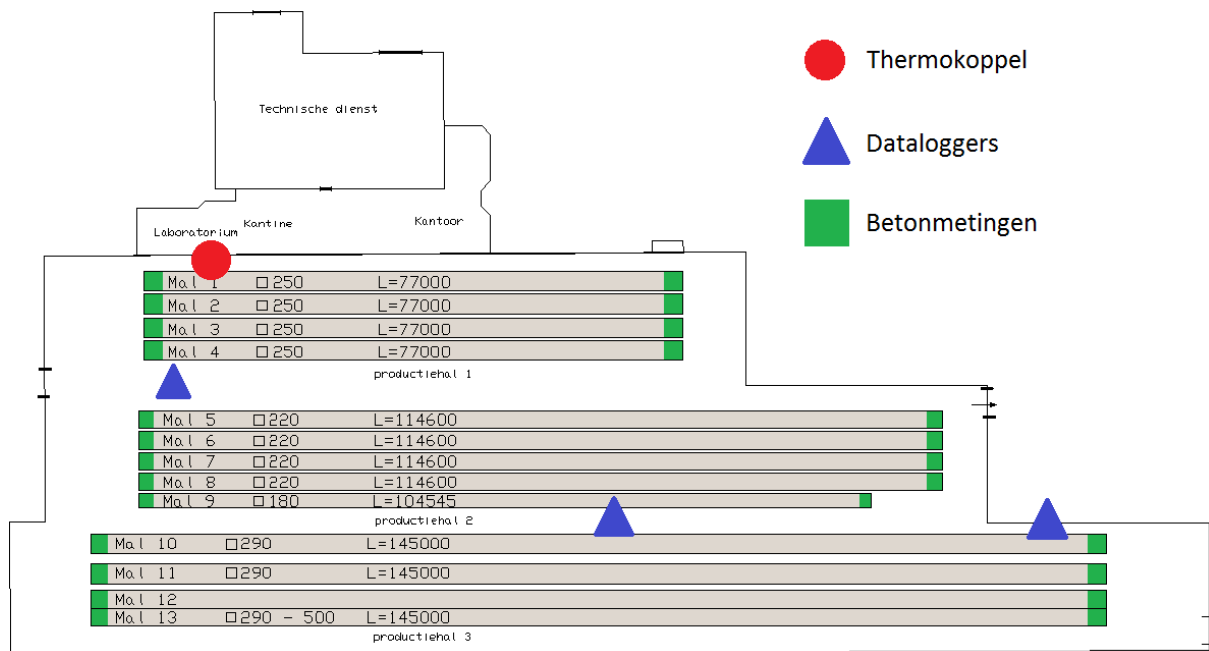
Voor de bepaling van de beschikbare hoeveelheid thermische energie zijn twee temperaturen van belang. De haltemperatuur en de temperatuur van het beton. Voor elk van deze temperaturen wordt een ander instrument gebruikt. Hieronder alle instrumenten behandeld, waarna er een overzicht van de meetlocaties getoond wordt. Deze zijn ook zichtbaar in Figuur 9 en Figuur 10. Tenslotte wordt in Tabel 12 een overzicht getoond van de gebruikte meetinstrumenten.

De haltemperatuur wordt op twee manieren gemonitord. Allereerst wordt er vanuit het laboratorium met een USB TC-08 Thermocouple Data Logger van Pico Technology gemeten. Hierop is een thermokoppel type T aangesloten welke met een betrouwbaarheid van 1 graad Celsius de temperatuur meet (PicoTech). Het meetinterval van de TC-08 is ingesteld op 1 minuut. Het meetpunt van de thermokoppel bevindt zich aan de rand van hal 1, naast het laboratorium op een hoogte van 2 meter. Een grote beperking van de TC-08 is dat deze continu aan een pc verbonden dient te zijn. Een computer in een productieomgeving neerzetten is suboptimaal omdat de kans op schade aan de apparatuur aanzienlijk is. Daarom is er voor gekozen om de TC-08 aan te sluiten op een computer in het laboratorium. Deze bevindt zich naast de productiefaciliteiten waardoor de lengte van de thermokoppel kan worden beperkt. Deze is ook aangegeven in Figuur 9.

Om metingen in de rest van de productiehallen uit te kunnen voeren is naast de TC-08 gebruik gemaakt van drie temperatuur dataloggers type EL-USB-1-PRO van Lascar Electronics. Deze hebben Pt100 sensoren en zijn ingesteld op een meetinterval van 1 minuut. De betrouwbaarheid van deze loggers is een half graad Celsius (Lascar Electronics). Het grote voordeel van deze loggers is dat ze op batterijen werken. Ze kunnen tot ruim 32 duizend metingen per keer loggen.

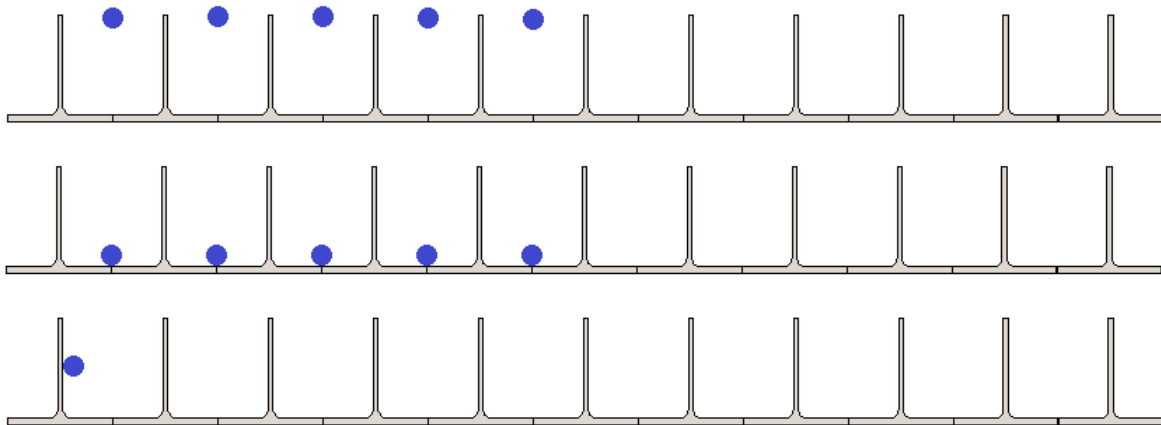
De locaties van de dataloggers zijn weergegeven in Figuur 9. Alle dataloggers hangen op ooghoogte. Er is voor deze locaties aan weerszijden van de individuele hallen gekozen omdat daar een mogelijkheid was ze op te hangen. Logger 1 is gepositioneerd voor een buitendeur. Zodoende kan de invloed van een openstaande deur mee genomen worden in het onderzoek. Logger 2 is in het midden van de productiefaciliteiten geplaatst om zo een betrouwbare temperatuur te meten welke over de hele hal kan gelden. Logger 3 is aan de rand van de productiefaciliteiten geplaatst en kan op deze manier inzicht bieden op de invloed van de omgevinstemperatuur op de temperatuur in de hal.

Om de warmteproductie vanuit het beton te bepalen wordt de temperatuur van de vers gestorte heipalen gemeten. Voor deze metingen wordt gebruik gemaakt van twee rijpheidscomputers van het type MC-21-M van Verboom Techniek. Op elke rijpheidscomputer kunnen vier thermokoppels worden aangesloten. Zodoende kan er over een enkele mal een goed warmteprofiel gemaakt worden of kunnen twee variabelen, zoals de malgrootte of betonmengsel, onder gelijke omstandigheden met elkaar vergeleken worden. De rijpheidscomputer heeft een meetfrequentie van 1 minuut en een meetinterval van 10 minuten. De thermokoppels hebben een nauwkeurigheid van een half graad Celsius (Verboom Techniek, 2012).



FIGUUR 9: LOCATIES VAN DE TEMPERATUURMETINGEN VAN DE HAL EN DIE VAN HET BETON

De meetlocaties van de betontemperatuur bevinden zich aan de uiteindes van de mallen. Er zijn geen openingen aan de onderzijdes en zijkanten van de mallen waar de thermokoppels gebruik van kunnen maken. De thermokoppels over de rand van de mal hangen is ook niet mogelijk, want over de mallen rijden verscheidende machines welke de thermokoppels zouden beschadigen. Via de kop en staart van de mallen kunnen de thermokoppels wel worden bevestigd op een zodanige manier dat ze niet beschadigd raken. De mogelijke locaties waar de metingen worden uitgevoerd zijn te zien in Figuur 9.



FIGUUR 10: MOGELIJKE MEETLOCATIES IN DE MAL; BOVENIN, ONDERIN EN AAN DE ZIJKANT

De mogelijke meetlocaties van de thermokoppels bevinden zich aan de rand van de mal; bovenin, onderin en aan de zijkanten van de mal. In Figuur 10 wordt driemaal een doorsnede van een mal weergegeven waarbij de mogelijke meetlocaties aan de rand van de mal zijn aangegeven. Bovenin wordt in het midden van een baan gemeten, onderin wordt ook in het midden van een baan gemeten en aan de zijkant wordt halverwege de hoogte van een baan gemeten. De meetlocaties kunnen op verschillende dieptes in de mal liggen. Elke individuele meetlocatie kan zodoende worden uitgerukt in een baannummer en een breedte-, hoogte- en diepte coördinaat. De gebruikte coördinatencodex voor de metingen is gegeven in Tabel 11 en is ook onderdeel van Bijlage A – Meetcodex. Er wordt aangenomen dat een er spiegelwerking op de mallen van kracht

is. Zodoende maakt het niet uit of er in banen aan de linker of de rechterkant van een mal wordt gemeten. Met dit in het achterhoofd is het baannummer het getal van de baan ten opzichte van de dichtst bij zijnde buitenkant. Als Figuur 10 als voorbeeld wordt genomen dan zijn de baannummers achtereenvolgens 1-2-3-4-5-5-4-3-2-1. Meer uitleg over de codex wordt gegeven in Bijlage A – Meetcodex.

Er wordt aan de rand van de mal gemeten, omdat op deze manier het thermisch geleidend vermogen van het beton uit de berekeningen geëlimineerd kan worden als variabele. Onderwerp van dit onderzoek is de vrijgekomen thermische energie uit de heipalen. Ofwel de energieflex uit het beton over een bepaalde tijd. Om deze te bepalen voldoen de temperaturen aan de rand van de heipalen en die van de omgeving. Meten in de kern van de heipalen is dus niet nodig.

TABEL 11: CODEX VOOR DE GEBRUIKTE MEET COÖRDINATEN IN HET BETON

Locatie (BHd)		
Breedte	Outer	O
	Middle	M
	Inwards	I
Hoogte	Top	T
	Center	C
	Bottom	B
Diepte	Kop van de heipaal	.
	Één breedte diep	i
	Twee breedtes diep	ii
	Drie breedtes diep	iii

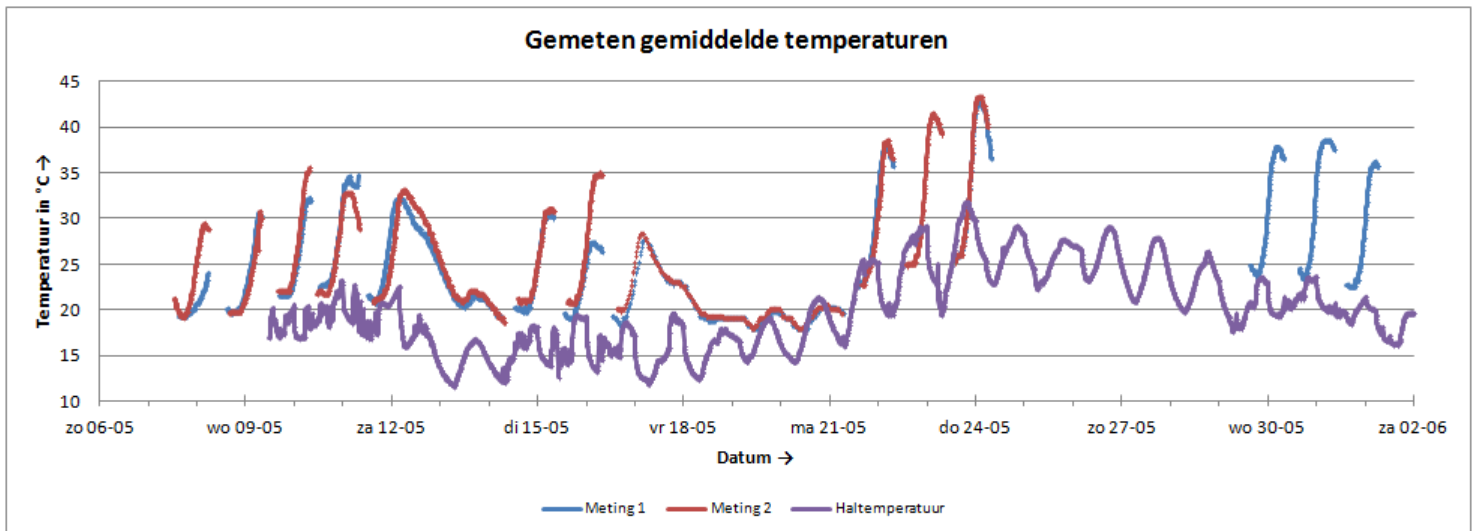
In Tabel 12 wordt een overzicht getoond van de gebruikte meetinstrumenten:

TABEL 12: OVERZICHT VAN DE GEBRUIKTE MEETINSTRUMENTEN

Instrument	Manier	Aantal meetpunten	Meet interval	Betrouwbaarheid in °C
Thermokoppel	Monitor	1	1 minuut	± 1,0
Datalogger	Monitor	3	1 minuut	± 0.5
Rijpheidscomputer	Monitor	8	10 minuten	± 0.5

2.5 MEETRESULTATEN

Er zijn in de periode van 7 mei 2012 tot en met 31 mei 2012 in totaal 25 metingen aan het beton verricht. Hiervan is er één mislukt omdat werknemers vroegtijdig de meting verstoord hebben. Er zijn dus 24 bruikbare metingen. Op 11 mei en 16 mei zijn er metingen geweest die langer dan een dag duurden omdat er in de dagen hierna geen nieuwe heipalen werden geproduceerd. De gemiddelde duur van de overige metingen bedraagt 17 uur en 46 minuten. Dit is minder dan de gestelde 20 uur welke de heipalen hebben om uit te harden vanwege twee redenen. Enerzijds zijn de metingen pas gestart nadat alle machines klaar waren op de mal. Anderzijds zijn de metingen gedurende of zelfs voor het nabewerken gestopt. In beide gevallen is dit gedaan ter voorkoming van schade aan de meetapparatuur en het niet in de weg zitten van de werkzaamheden aan de productie van de heipalen.



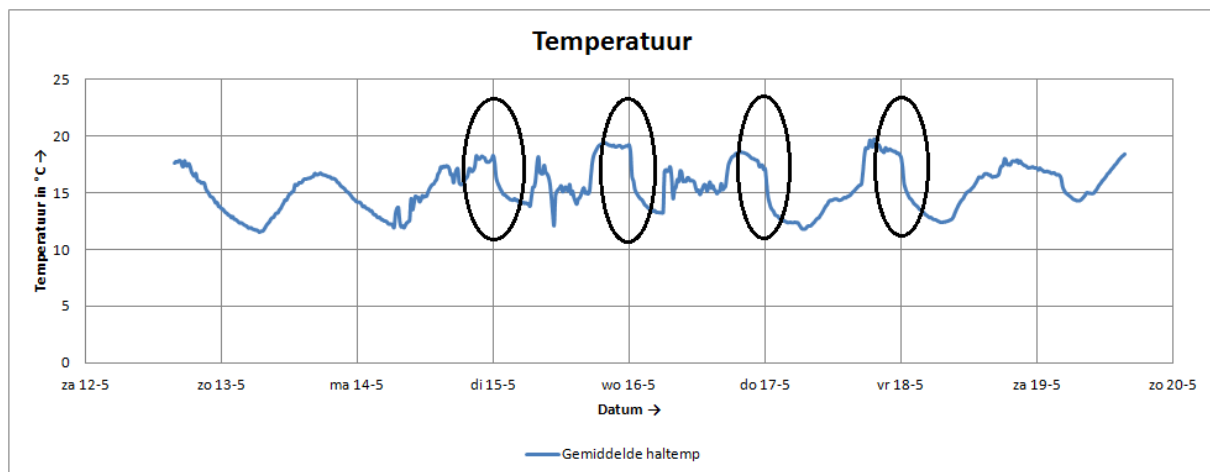
FIGUUR 11: OVERZICHT VAN DE GEMETEN TEMPERATUREN IN HET BETON EN DE HAL TUSSEN 7 MEI EN 31 MEI 2012. SIMULTANE METINGEN AAN HET BETON ZIJN OPGESPLITST IN METING 1 EN METING 2. VAN ELKE METING ZIJN DE MEETWAARDEN VAN DE VIER THERMOKOPPELS GEMIDDELD.

Figuur 12 toont de gemeten waarden van de gemiddelde temperatuur in de hal en de temperatuur van het beton. De gemiddelde temperatuurstijging van het beton bedraagt 12.8 °C. De standaardafwijking van de gemiddelde temperatuurstijging is $\pm 3,34$ °C. De laagste temperatuurstijging van het beton is gemeten bij de metingen gestart op 15 en 16 mei. Dit zijn tevens de twee meetdagen met de laagste gemiddelde haltemperaturen. De laagste temperatuurstijging in het beton op 15 mei bedraagt slechts 8.25 °C. Op 16 mei is dit 8.5 °C. De gemiddelde haltemperaturen waren op 15 en 16 mei respectievelijk 9.7 en 8.7 °C. Het grootste verschil in haltemperatuur op een dag is gemeten op 23 mei en bedraagt 12.4 °C.

De hoogste stijging in betontemperatuur is bereikt op de dagen waarin in de hallen ook de hoogste temperaturen zijn gemeten. In de nacht van 23 op 24 mei steeg de betontemperatuur gemiddeld 17.5 °C. De gemiddelde haltemperatuur was gedurende deze meting 28.2 °C. De hoogst gemeten waarde van de haltemperatuur was ook gedurende deze meting en bedraagt 31.8 °C. Deze resultaten worden ondersteund door de theorie. Hydratatie is immers een proces wat zichzelf versterkt. Bij hogere temperaturen verloopt de hydratatie sneller waardoor energie sneller vrij komt.

De meetresultaten tussen 19 mei en 24 mei lijken de invloed van de haltemperatuur op de betontemperatuur verder te benadrukken. De temperatuur van het beton in de metingen gestart op 16 mei lijkt op 18 mei gestabiliseerd op 19°C. In de twee dagen erna begint de temperatuur van het beton echter weer te schommelen, met een net wat hogere maximale temperatuur op 21 mei (20.5 °C) ten opzichte van 20 mei (20 °C). De gemiddelde haltemperatuur op 21 mei is met 21.2 °C ook net wat hoger dan op 20 mei toen de gemiddelde haltemperatuur 17.8 °C was.

Dat het beton ook de haltemperatuur beïnvloed wordt ondersteund door de volgende twee periodes; 21 tot en met 23 mei en 29 tot en met 31 mei. De betonmetingen gestart op 21, 22 en 23 mei laten dag op dag een hogere aanvangs- en maximale temperatuur zien. De gemiddelde aanvangstemperaturen zijn respectievelijk 22.6, 24.75 en 25.5 °C. De gemiddelde maximale waarden voor de betonmetingen zijn 38.1, 41.5 en 43 °C. De haltemperatuur volgt op deze dagen de stijging in de beton temperatuur met een gemiddelde temperatuur van respectievelijk 21.2, 24.5 en 26.1 °C. De maximale temperatuur in de hal stijgt van 25.3 °C op 21 mei tot 31.8 °C op 23 Mei. Als tweede worden de maximale betontemperaturen, van de metingen gestart op 29, 30 en 31 mei, ook gevolgd door de haltemperatuur. De temperaturen op 30 mei zijn, met maximale temperaturen van 23.0 en 37.75 °C voor de hal en het beton, net wat hoger dan op 29 mei toen de maximale temperaturen van de hal en het beton 23.7 en 38.5 °C bedroegen. Op 31 mei zijn de temperaturen juist een fractie langer dan op 29 mei met maximale temperaturen van 21.4 en 36.25 °C.



FIGUUR 12: MYSTERIEUZE DALING VAN DE HALTEMPERATUUR STIPT OM 0:00

Wat opvalt bij de haltemperaturen is dat de temperatuur op dinsdag tot en met vrijdag altijd stipt om 0:00 naar beneden schiet. Dit fenomeen is uitvergroot in Figuur 12. Deze temperatuursdaling wordt veroorzaakt door de ventilatoren in de productiehallen. Deze stonden verkeerd ingesteld waardoor ze eerder aan gingen dan wenselijk. De temperatuursdaling is al snel opgemerkt, echter kon de oorzaak niet worden achterhaald, voordat de meetperiode was afgelopen. Op dit moment gaan de ventilatoren pas om 3:00 aan. De beschikbaar gekomen hoeveelheid thermische energie zal ten tijde van het schrijven van dit rapport hoger zijn, dan dat gedurende dit onderzoek werd bepaald. Als gevolg van de temperatuursdalingen kunnen de betontemperatuur en de haltemperatuur na 0:00 niet met elkaar worden vergeleken.

2.6 ANALYSE

Voor de verdere analyse van de meetgegevens worden enkele situaties uitgelicht. Als eerste wordt de dormante periode van de mengsels bepaald. Vervolgens wordt gekeken naar het temperatuursverloop op werkdagen. Hierbij worden twee situaties uitgelicht. Dagen waarop de betontemperatuur hoger was dan de haltemperatuur en dagen waarop de haltemperatuur een gedeelte van de dag hoger was dan de betontemperatuur. Daarna wordt het temperatuursverloop in de weekenden nader geanalyseerd. Tenslotte wordt de hoeveelheid energie welke uit het beton is vrij gekomen bepaald.

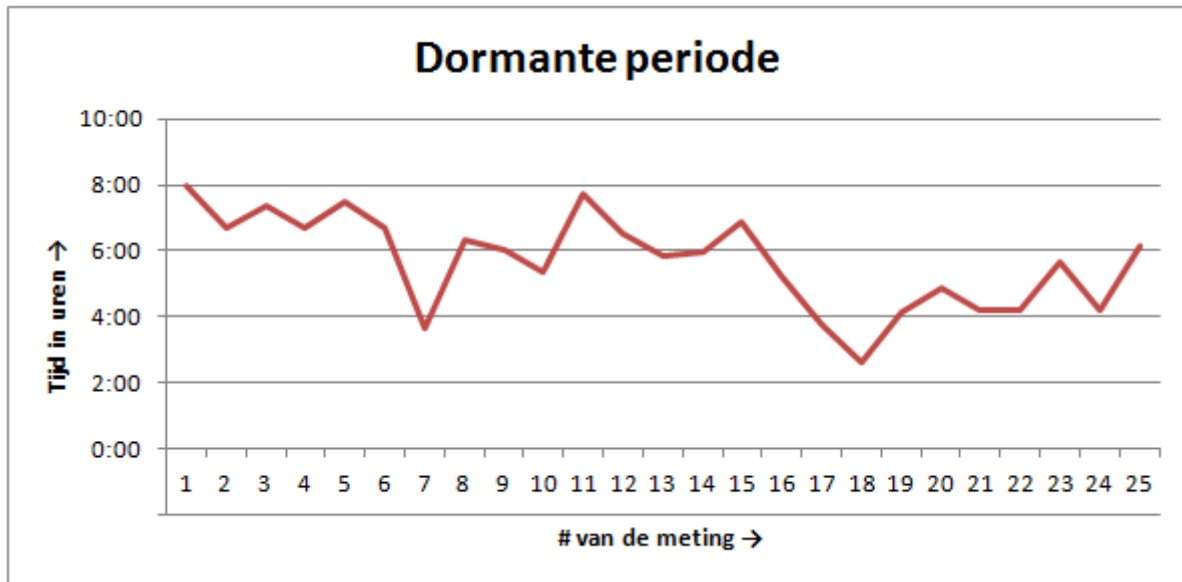
2.6.1 DORMANTE PERIODE

Om de dormante periode te bepalen is het volgende aangehouden; de dormante periode is de duur tussen het tijdstip van storten en het tijdstip waarop de gemiddelde temperatuur van de meting tenminste een graad Celsius is toegenomen. De toename is ten opzichte van de laagste gemiddelde temperatuur gedurende de dormante periode. Dus mocht de temperatuur eerst dalen van 20 naar 19 graden dan eindigt de dormante periode zodra de gemiddelde temperatuur weer 20 graden is.

De duur van de dormante periode verschilt van meting tot meting en lijkt te worden beïnvloed door de temperatuur in de hal. Met de beperkte hoeveelheid metingen kan dit echter niet met zekerheid worden gezegd. De duur van de dormante periode per meting is in Figuur 13 weergegeven. De duur bedraagt gemiddeld 5 uur en 44 minuten. Als de dormante periode wordt uitgesplitst naar de verschillende mengsels, zoals in Tabel 13, dan valt op dat mengsel 167 een duidelijke langere dormante periode heeft dan de overige mengsels. Dit kan tevens een gevolg zijn van de haltemperatuur, maar zoals hiervoor ook genoemd kan dat niet met zekerheid worden gezegd.

TABEL 13: GEMIDDELDE DUUR VAN DE DORMANTE PERIODE PER MENGSEL

Mengsel	8	105	163	167
Gemiddelde duur van de dormante periode in uren	5:19	5:13	5:28	6:12



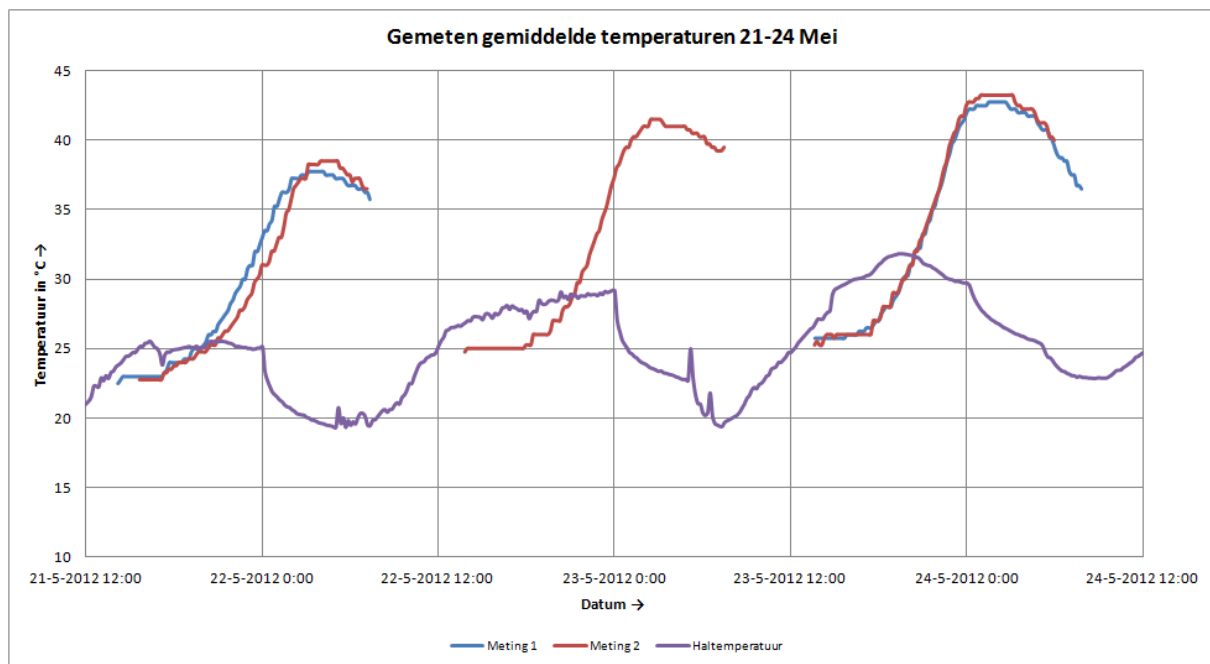
FIGUUR 13: DUUR VAN DE DORMANTE PERIODE PER METING

2.6.2 WERKDAGEN

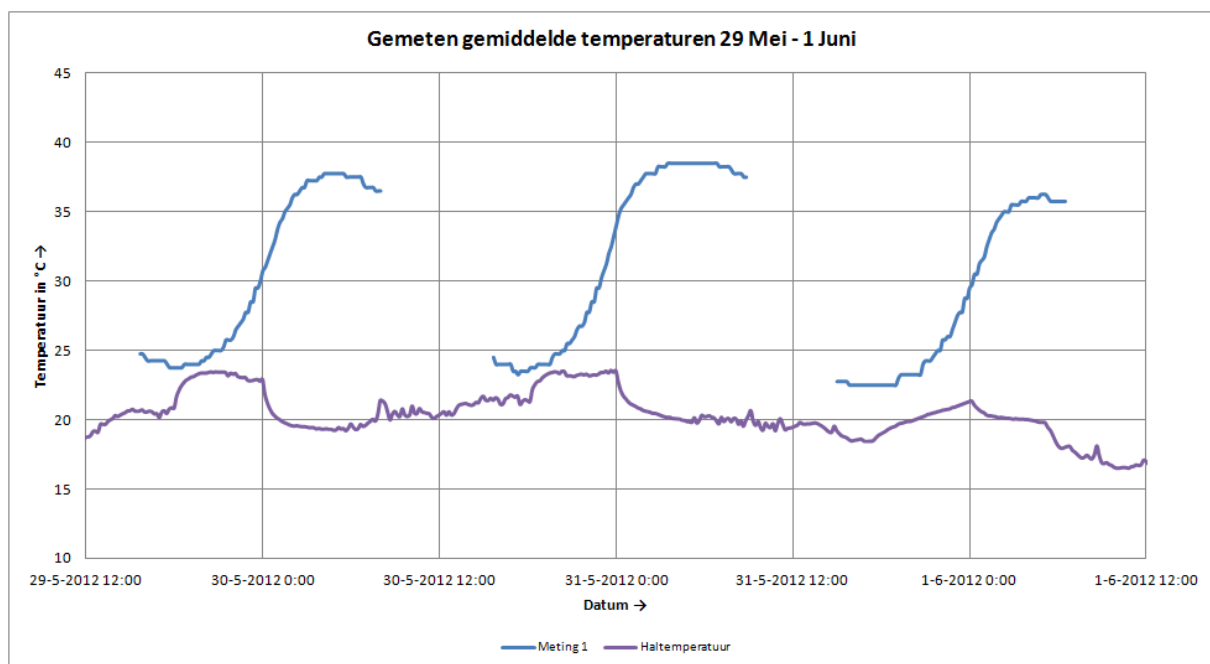
Er zijn twee situaties op werkdagen welke interessant zijn voor verdere analyse. Dagen waarop de haltemperatuur hoger dan wel lager is dan de aanvangstemperatuur van het beton. Tussen maandag 21 mei en donderdag 24 mei lag de haltemperatuur hoger dan de aanvangstemperatuur van het beton. Er zijn in deze periode 5 metingen aan het beton verricht. De meetgegevens worden vergeleken met de metingen gemaakt tussen dinsdag 29 mei en vrijdag 1 juni. In deze periode zijn 3 metingen aan het beton verricht.

Figuur 14 toont een overzicht van de temperaturen tussen 21 en 24 mei. De storttijden van de eerste vijf metingen liggen op één na allemaal binnen 10 minuten van 13:30. Alleen het beton in meting 2 op 21 mei is later gestort. Dit is ook duidelijk terug te zien in het verloop van de beide metingen op deze dag. Het duurt langer voordat de hydratatie bij meting 2 op gang is gekomen, maar verloopt daarna wel harder dan bij meting 1. Voor beide metingen is een ander mengsel gebruikt, 167 voor meting 1 en 163 voor meting 2, wat naast het later starten, een verklaring voor het verschil in temperatuursverloop kan zijn. De dormante periode van de vijf metingen duurde gemiddeld 3 uur en 55 minuten.

Tussen 21 en 24 mei lijkt de temperatuur in de hal, als gevolg van de hydratatie, nauwelijks toe te nemen. Op 23 mei zakt de temperatuur zelfs met enkele graden. De haltemperatuur lijkt in dit geval nauwelijks te worden beïnvloed door de ontwikkelde warmte in het beton. Wel lijkt de hydratatie te worden beïnvloed door de haltemperatuur. De hoogst gemeten temperatuur van de eerste twee metingen wordt gemiddeld na 13 uur bereikt. Bij meting 1 op 22 mei wordt de hoogst gemeten temperatuur na 12 uur en 50 minuten bereikt, maar op 23 mei al na gemiddeld 11 uur en 45 minuten. Ook de toename in betontemperatuur is groter bij een hogere haltemperatuur. Respectievelijk 15.5, 16.75 en 17.5 °C voor de drie dagen.



FIGUUR 14: TEMPERATUURMETING VAN HET BETON EN DE HAL VAN 21 TOT 24 MEI



FIGUUR 15: TEMPERATUURMETING VAN HET BETON EN DE HAL VAN 29 MEI TOT 1 JUNI

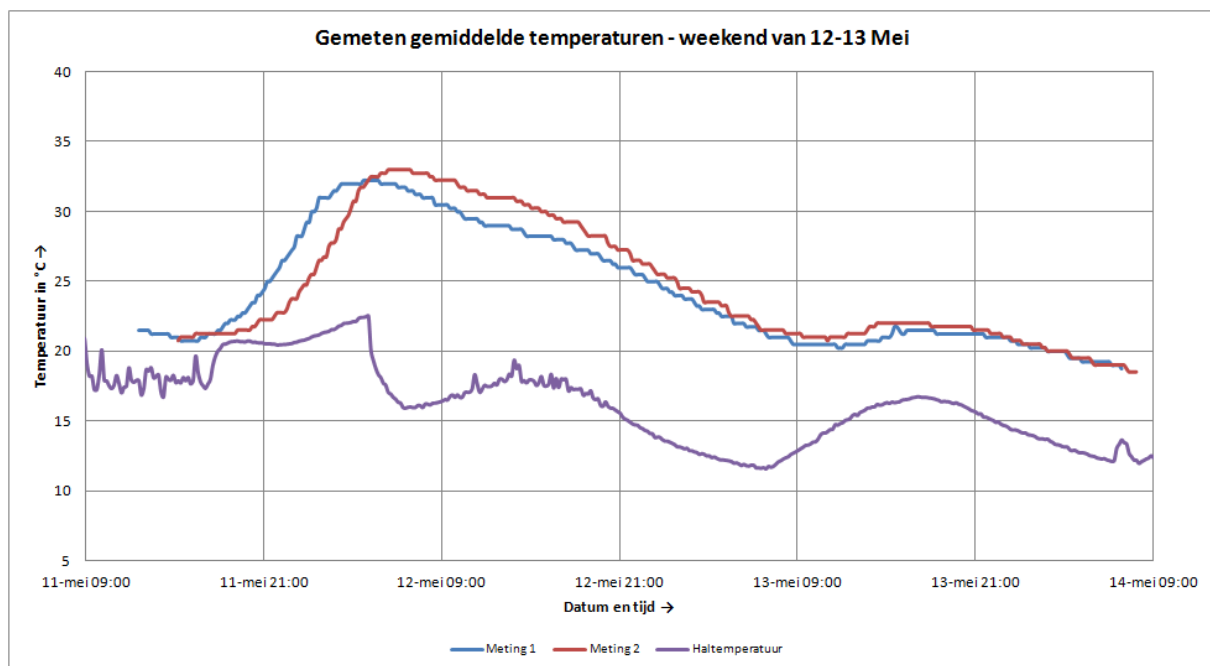
De storttijden van de drie metingen tussen 29 mei en 1 juni liggen rond 15:00. De dormante periode van de drie metingen duurde gemiddeld 5 uur en 19 minuten. Bij de metingen tussen 29 mei en 1 juni zakt de betontemperatuur gedurende de dormate periodes. De omgevingstemperatuur is lager waardoor het beton warmte afstaat aan de omgeving en afkoelt. De haltemperatuur maakt op 29 en 30 mei een sprong bij de eerste tekenen van een temperatuursstijging van het beton op deze dagen. Het is onbekend waardoor deze plotselinge temperatuursstijgingen veroorzaakt worden, maar een verklaring hiervoor kan zijn dat eerdere stortingen al begonnen zijn met het afgeven van de hydratatiwarmte. Dit is echter onzeker omdat gedurende de metingen de haltemperatuur nauwelijks lijkt te worden beïnvloed door het warm wordende beton.

Na het storten duurde het gemiddeld 13 uur en 10 minuten voordat de hoogst gemeten temperatuur werd bereikt. Deze periode is langer dan wanneer de haltemperatuur boven die van de aanvangstemperatuur van het beton ligt. De toenames in betontemperaturen tussen 29 mei en 1 juni bedragen 14.0, 15.25 en 13.75 °C voor respectievelijk de eerste, tweede en derde meting in deze periode. Gemiddeld genomen 2.2 °C minder dan tussen 21 en 24 mei.

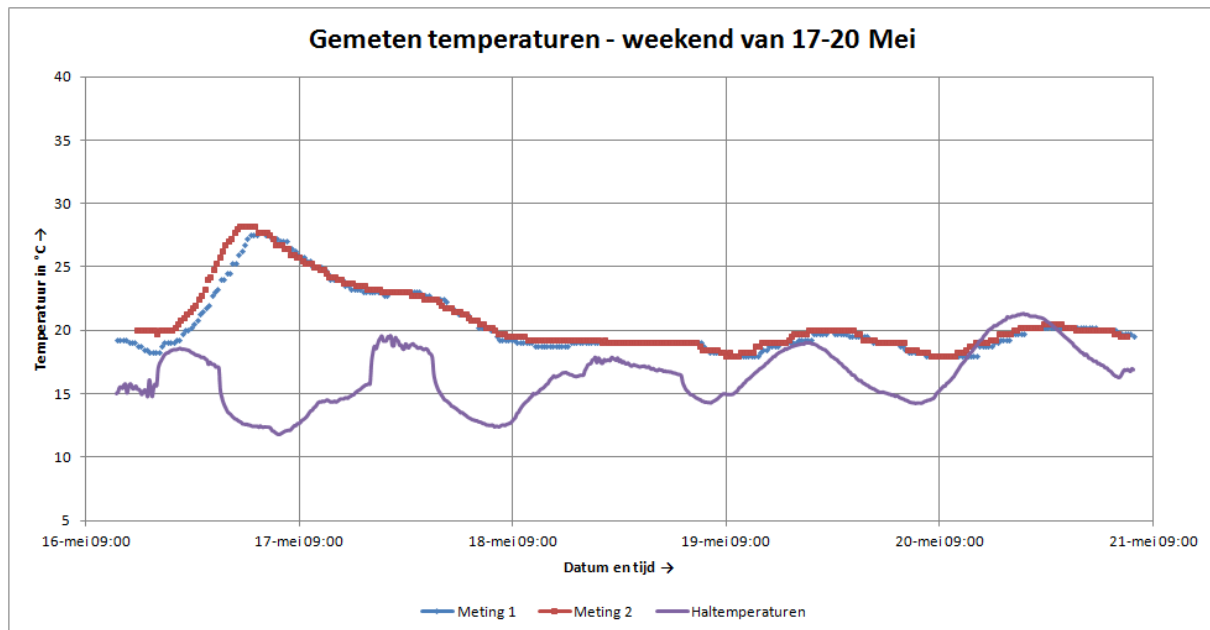
2.6.3 WEEKEND

Om het effect van de vrijgekomen thermische energie uit de heipalen te onderzoeken kan gebruik worden gemaakt van metingen welke doorlopen in het weekend. Er zijn in de meetperiode twee van zulke weekenden geweest. Het weekend van 12 en 13 mei en het hemelvaartsweekend van 17 tot en met 20 mei. De meetresultaten van deze weekenden zijn te zien in Figuur 16 en Figuur 17.

Nadat de hoogste betontemperaturen zijn bereikt neemt de betontemperatuur langzaam af. Vooral in Figuur 17 is duidelijk te zien dat de veranderingen in de betontemperatuur groter zijn naarmate het verschil tussen de haltemperatuur en de betontemperatuur groter is. De haltemperatuur lijkt in het weekend een dag-nacht ritme aan te nemen en alleen de eerste dag van het weekend nog te worden beïnvloed door de hydratatie van het beton. Op de eerste dag van het weekend is de haltemperatuur nog grillig. Dit is een indicatie dat er nog steeds energie wordt afgestaan als gevolg van hydratatie van de heipalen. Vanaf de tweede dag in het weekend is het temperatuursverloop in de hal vloeiend.



FIGUUR 16: DE GEMETEN TEMPERATUREN VAN HET WEEKEND VAN 12 EN 13 MEI



FIGUUR 17: DE GEMETEN TEMPERATUREN VAN HET WEEKEND VAN 17 TOT EN MET 20 MEI

2.6.4 VRIJ GEKOMEN ENERGIE

De hoeveelheid energie welke vrij gekomen is uit de heipalen kan worden berekend met behulp van de temperatuursveranderingen in het beton en de hal. Dit wordt gedaan met de volgende formule;

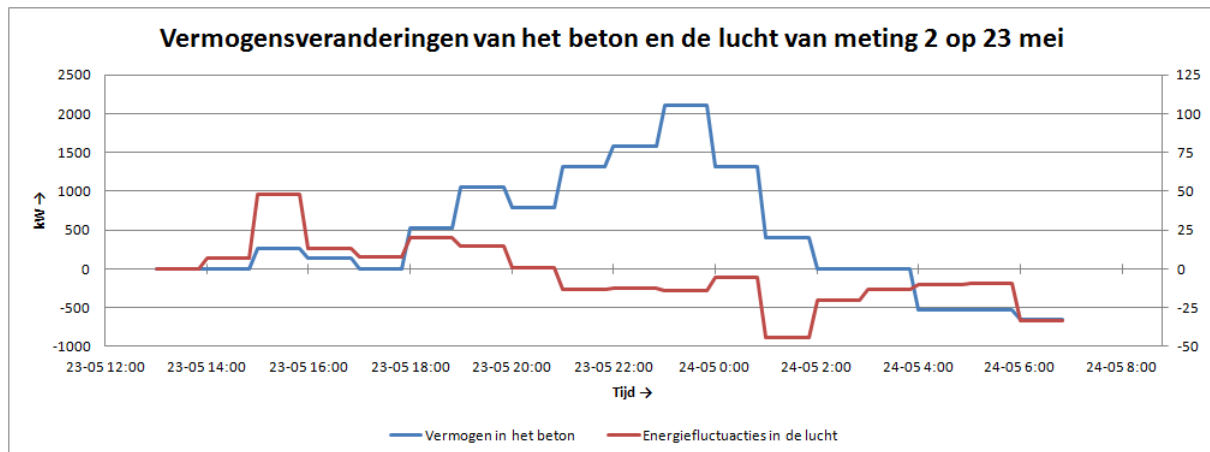
$$Q = \frac{\rho \cdot V \cdot c \cdot \Delta T}{3600} \quad (2.3)$$

Hierin is Q de energieproductie in kW, ρ de dichtheid in kg/m^3 , V het volume in m^3 , c de soortelijke warmte in kJ/kg en ΔT de temperatuursverandering per uur. Door vervolgens nog te delen door 3600, het aantal secondes in een uur, kan de energieproductie worden berekend. De dichtheid, het volume en de soortelijke warmte van het beton en lucht zijn hiervoor bepaald. De temperatuursverandering per uur van het beton en de lucht in de hal kan uit de resultaten worden gehaald. De veranderingen in de haltemperatuur zijn echter beïnvloed door ventilatoren in het dak. Uit de metingen kan geen conclusie worden geformuleerd over de energie welke aan de hal is afgedragen uit het beton, alleen over de aanwezige hoeveelheid energie in de hal.

De gemiddelde duur van de metingen bedroeg 17 uur en 46 minuten. De gemiddelde duur van de dormante periode was 5 uur en 44 minuten. Zo blijft er periode 12 uur en 2 minuten over waarin er actief energie wordt geproduceerd in het beton. Gemiddeld genomen over de metingen neemt de temperatuur van het beton met 12.34°C toe. De gemiddelde temperatuurstijging van het beton in de actieve periode bedraagt dus $1,03^\circ\text{C}$ per uur. Het gemiddelde soortelijk gewicht van het beton is 2351.7 kg/m^3 , de gemiddelde dichtheid van het is 1.059 kJ/kg en een totale hoeveelheid beton is 765.3 m^3 . Het beton in de productiehallen levert zodoende een gemiddeld vermogen van 544 kW over een periode van 12 uur per dag. Dit is een totale hoeveelheid energie van 23.5 GJ.

Naast de gemiddelde waardes is het ook interessant om de hoogste waardes te bekijken. Uit de meetdata blijkt dat de hoogste temperatuursveranderingen in het beton plaats vond gedurende de tweede meting gestart op 23 mei. De temperatuursveranderingen gedurende deze meting zijn, op dezelfde manier als de gemiddelde waardes hiervoor, omgerekend naar het vermogen. In Figuur 18 **Error! Reference source not found.** zijn de resultaten hiervan te zien. Tussen 23:00 en 0:00 is het vermogen op zijn hoogst met een waarde van 2112 kW. Wanneer de meting representatief is en wordt opgeschaald naar de volledige productie dan is er tussen 18:00

en 2:00 in totaal 32.8 GJ aan energie nodig geweest om de temperatuursveranderingen te bewerkstelligen. Het gemiddelde gegenereerde vermogen is gedurende deze periode 1138 kW.



FIGUUR 18: VERMOGENSVERANDERING VAN HET BETON EN DE LUCHT GEDURENDE METING 2 OP 23 MEI. DE SCHAAL VAN HET BETON IS LINKS WEERGEGEVEN, DIE VAN DE LUCHT RECHTS.

2.7 DEELCONCLUSIE

Hydratatie is een exotherm proces, hier komt dus energie bij vrij. Energie welke vrij komt uit beton bij volledige hydratatie is bij de cementproducenten normaliter bekend of kan berekend worden uit de samenstelling van het cement. In het geval van IJB wordt het beton echter al na gemiddeld 17 uur en 45 minuten ontkist. Het beton zit dan nog midden in het hydratatieproces en er is slechts een gedeelte van de totale hoeveelheid energie vrij gekomen. In dit hoofdstuk is een antwoord gevonden op de vraag hoeveel energie er dan wel vrij komt bij de hydratatie van betonnen heipalen bij de IJB Groep.

De betontemperatuur neemt met gemiddeld 12.8 °C toe en verblijft op doordeweekse dagen gemiddeld 17 uur en 46 minuten in de productiefaciliteiten. De dormante periode bedraagt gemiddeld 5 uur en 44 minuten. Zodoende komt er over een periode van 12 uur gemiddeld 544 kW aan energie vrij in de betonnen heipalen. Ofwel 23,5 GJ aan energie per productiedag.

In de nacht van 23 op 24 mei is de hoogste toename in betontemperatuur gemeten. De temperatuur van het beton steeg gedurende die meting met 18 °C. Dit gebeurde in een tijdsbestek van 8 uur. Opgeschaald naar de volledige productie zou dit betekenen dat er 32.8 GJ aan energie vrij zou komen in het beton. Of een gemiddelde van 1138 kW gedurende een tijdsbestek van 8 uur. Gedurende de meting in de nacht van 23 op 24 mei nam alleen al tussen 23:00 en 0:00 de temperatuur met 4 °C toe. Wanneer deze temperatuurstijging voor de volledige productie zou gelden zouden de heipalen gedurende een uur 2112 kW aan energie genereren.

Dit is de energie welke voor een temperatuursverandering in de heipalen zorgt. Gedurende dit tijdsbestek staan de heipalen ook energie af aan de omgeving. De energie welke afgestaan wordt aan de omgeving leidt tot een verandering van de haltemperatuur. Uit de meetdata van het beton en de hal kan echter geen conclusie met betrekking tot de hoeveelheid afgestane energie geformuleerd worden. Wel is bekend dat er voor een temperatuursverandering van 1 °C 81 MJ aan energie nodig is. De grootste verandering in haltemperatuur is gemeten op 23 mei en bedraagt 12.4 °C. Hiervoor was 1005 MJ aan energie nodig.

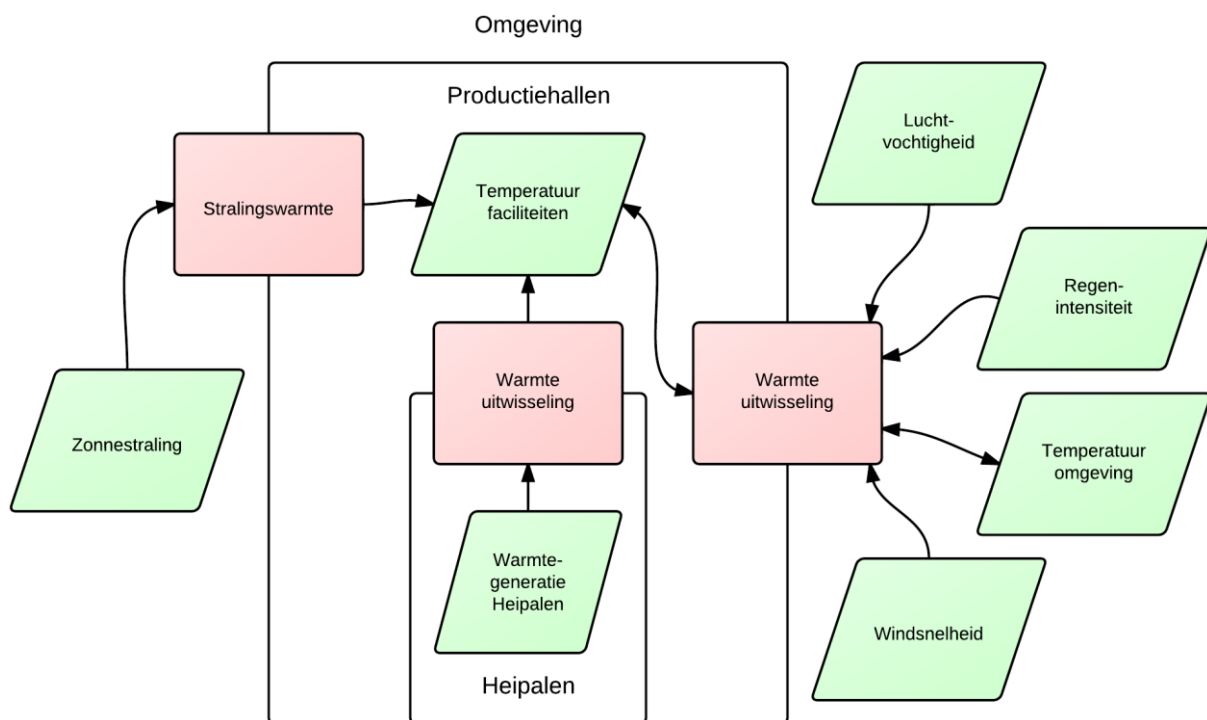
3 INVLOED VAN DE NATUURLIJKE OMGEVING

In dit hoofdstuk wordt de tweede onderzoeksvraag behandeld en beantwoord. Deze onderzoeksvraag luidt:

Welke invloed heeft de natuurlijke omgeving op de thermische gesteldheid van de productiefaciliteiten voor heipalen?

Aan de productiefaciliteiten kan volgens architectenbureau Van Diepen & Smelt in de periode 2000-2001 een R_c -waarde van $2,0 \text{ m}^2\text{K/W}$ aangehouden worden. Tevens neemt de R-waarde van isolatie in de loop van de tijd altijd geleidelijk af (IkLeefGroen, 2010). Het is dus aannemelijk dat de natuurlijke omgeving van aanzienlijke invloed is op de thermische gesteldheid van de productiefaciliteiten. Voor de beantwoording van de onderzoeksvraag wordt gekeken naar de invloeden van buitenaf die de temperatuur in de productiefaciliteiten beïnvloeden.

Vanzelfsprekend is de buitentemperatuur van invloed op de thermische gesteldheid van de productiefaciliteiten, maar de buitentemperatuur is slechts één van vele externe (weers)variabelen. Ook andere weersomstandigheden kunnen van invloed zijn op de thermische gesteldheid in productiefaciliteiten van de heipalen. Zo zal een regenbui de productiehallen afkoelen en zonneschijn de hal verder verwarmen. Zoals ook in Figuur 19 te zien is zijn er in totaal vijf variabelen van de natuurlijke omgeving gemeten; de buitentemperatuur, de luchtvochtigheid, de regenintensiteit, de windsnelheid en de zonnestraling. Voor dit onderzoek is echter, vanwege de haalbaarheid, alleen de invloed door de buitentemperatuur en de zonnestraling bekeken.



FIGUUR 19: OVERZICHT VAN DE PROCESSEN WELKE VAN INVLOED ZIJN OP DE THERMISCHE GESTELDHEID VAN DE PRODUCTIEHALLEN. DE EXTERNE PROCESSEN WARMEN DE HAL OP OF BEVORDEREN DE AFDRACHT VAN WARMTE. DE PIJLEN IN DE FIGUUR GEVEN AAN IN WELKE RICHTING DE OVERDRACHT, DANWEL DE BIJDRAGE VAN EEN VARIABLEE PLAATS VINDT.

De zonnestraling, de buitentemperatuur en de haltemperatuur zijn tussen 10 mei en 9 juni gemeten. Door de temperatuursverlopen tegen elkaar uit te zetten en met elkaar te vergelijken wordt inzicht verkregen over de invloed van de buitentemperatuur op de thermische gesteldheid van de productiehallen. Op dezelfde manier worden ook de zonnestraling en de haltemperatuur tegen elkaar uitgezet en met elkaar vergeleken.

Met name de dagen waarop er geen productie plaats vond zijn interessant voor de beantwoording van de onderzoeksvraag. De haltemperatuur wordt op deze dagen minimaal beïnvloed door de hydratatie van het beton. Zodoende geven de gemeten waardes op de productieloze dagen een beter inzicht in de invloed van de natuurlijke omgeving op de temperatuur in de hallen.

In dit hoofdstuk wordt eerst naar indicatoren uit de literatuur gezocht. Vervolgens worden de uitgangspunten voor dit hoofdstuk behandeld. Hierna wordt met behulp van gegevens van het KNMI naar de weersomstandigheden gekeken welke de productiehallen de afgelopen jaren hebben moeten verduren. In deze paragraaf wordt ook een verwachting uitgesproken over de invloed van de natuurlijke omgeving op de temperatuur in de productiefaciliteiten. Vervolgens wordt de meetopstelling besproken waarna de resultaten worden getoond en deze direct worden geanalyseerd. Tenslotte wordt er een tussenconclusie geformuleerd.

3.1 INDICATOREN

Het primaire doel van een gebouw is meestal om de omsloten ruimte droog en warm te houden. Doordat de ruimte door het gebouw omsloten is wordt weerstand geboden op de warmteoverdracht tussen de temperatuur binnen het gebouw en de temperatuur buiten het gebouw. De wanden fungeren hierin als membraan tussen de binnen- en buitenruimte. Het volledig afsluiten van de binnenruimte is echter niet wenselijk. Er dient nog wel enigzinds licht en verse lucht toe te kunnen treden in de ruimte. Ook dienen mensen en materieel in en uit het gebouw te kunnen gaan. De kenmerken van de wanden, met name de transparante en open gedeelten, hebben significante invloed op de interactie tussen de twee ruimtes. Zonnestraling en de buitentemperatuur zijn essentiële factoren die de thermische omstandigheden in een gebouw beïnvloeden, via thermische winst/verlies en binnenstromend licht (Kristl, Košir, Lah, & Krainer, 2008). Tussen de gemiddelde buitentemperatuur en de maximale binnentemperatuur bestaat een lineair verband. De gradient van dit verband verschilt echter per gebouw (Coley & Kershaw, 2010).

De productiefaciliteit van heipalen is niet anders. De productiefaciliteit houdt de heipalen warm en droog. Om er te kunnen werken wordt zonlicht toegelaten via ramen en dakkoepels. Via ventilatoren in het dak wordt lucht uit de hallen afgevoerd naar buiten. Verse lucht wordt toegelaten via de deuren en kieren in de faciliteit.

3.2 UITGANGSPUNTEN

De productiefaciliteiten waar de IJB Groep heipalen produceert is gelegen op het industrieterrein van Lemmer. Dit industrieterrein is gelegen aan het IJsselmeer. Zodoende kunnen de grondstoffen voor beton via schepen aan de IJB Groep worden geleverd. De ligging aan het IJsselmeer zorgt ervoor dat de wind op de productiefaciliteiten aan de zuid en west zijde vrij spel heeft. Aan de noord en oost zijde biedt bebouwing enigzinds bescherming tegen de wind.

Zoals in het vorige hoofdstuk ook besproken bestaan de productiefaciliteiten voor de heipalen uit drie aaneengesloten hallen. Gezamenlijk hebben de hallen een inhoud van 63178 m^3 . De hallen worden op het beton na als leeg beschouwd. De inhoud van het beton bedraagt 782 m^3 waardoor er afgerond 62400 m^3 lucht in de hallen aanwezig is.

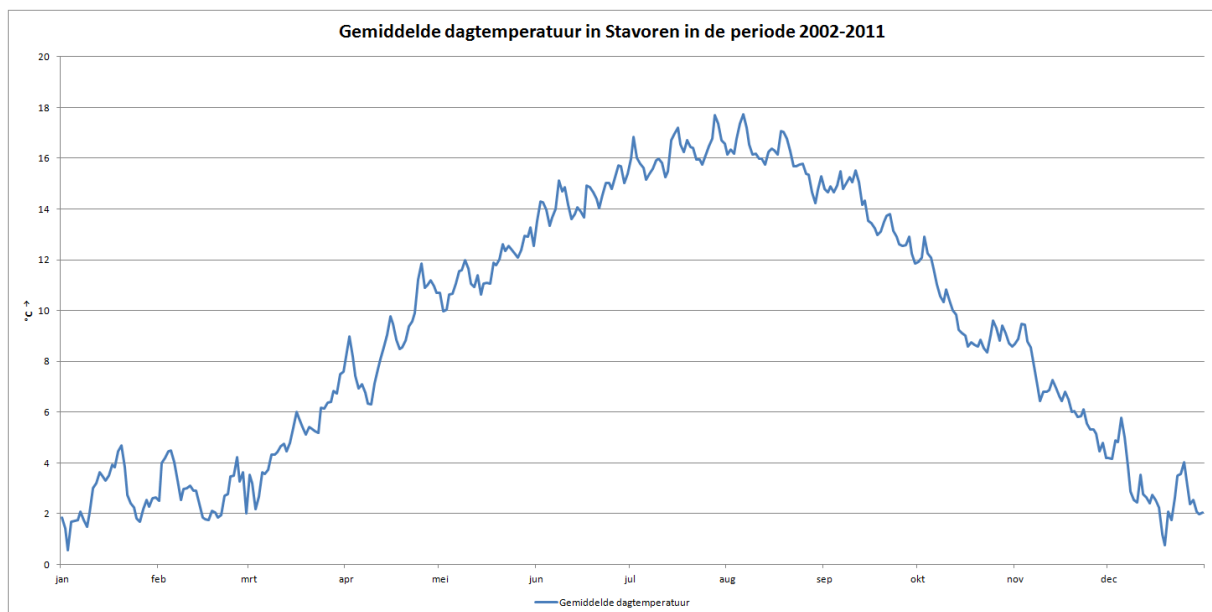
De omtrek van de buitenwanden van de productiefaciliteiten bedraagt 457,1 meter. Hiervan grenst ongeveer 50 meter aan een bijgebouw. De overige 407 meter is een buitenwand. De wanden zijn 7,6 meter hoog, zodoende bedraagt het oppervlak van de buitenwanden 2707 m^2 . Een gedeelte van de buitenwanden bestaat uit deuren en ramen. In het totaal zijn er zeven deuren aanwezig welke elk een breedte hebben van 3,9 meter. De deuren reiken tot aan het dak. De deuren hebben een totaal oppervlak van $207,5 \text{ m}^2$. De ramen hebben een geschat gezamenlijk oppervlak van $77,9 \text{ m}^2$. Het totale oppervlak aan buitenkant bestaat dus 89,5% uit muur, 7,7% uit deuren en 2,9% uit ramen. Wanneer er een wind van twee meter per seconde direct op de deuren zou staan dan zou alle lucht in de productiefaciliteiten in twee en een halve minuut kunnen worden ververs.

Het dak heeft een totaal oppervlak van 7766 m². Hiervan bestaat circa 1700 m² uit lichtkoepels. Hiernaast zitten in het dak in totaal 34 ventilatoren. De ventilatoren hebben een diameter van circa 50 cm en bevatten elk 4 rotorbladen. Het is echter onbekend wat de volumestroom per ventilator is.

3.3 THERETISCHE VERWACHTING

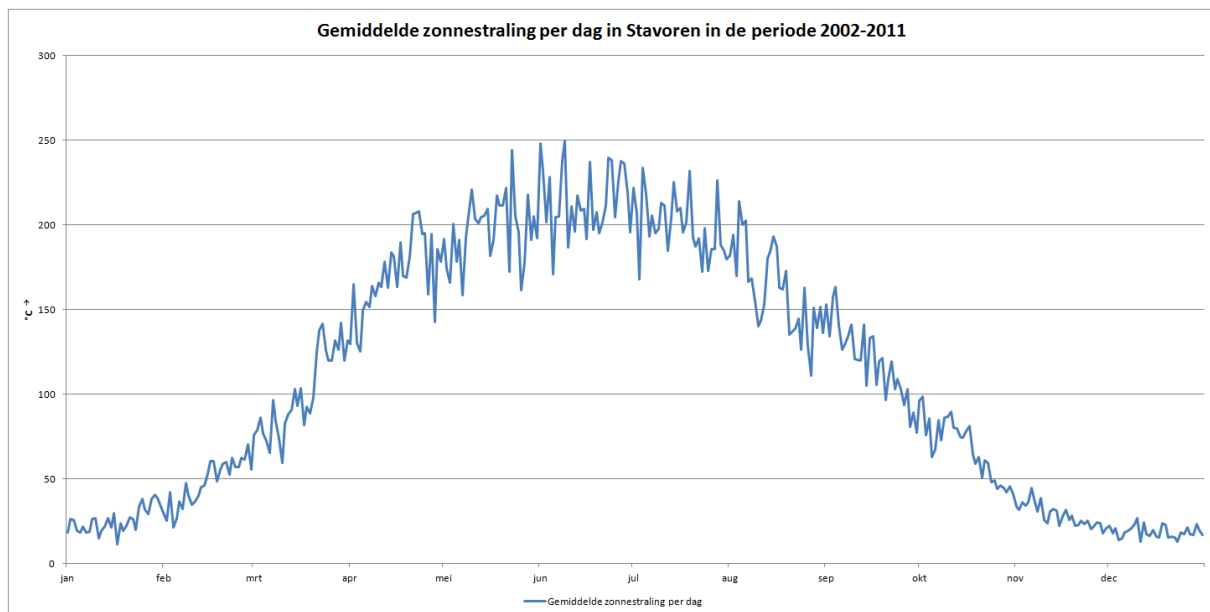
Door te kijken naar de historische data kan een inschatting van de weersomstandigheden gemaakt worden. Dus welke temperaturen en hoeveel zonnestraling kan verwacht worden in Lemmer. Hiervoor wordt data van het KNMI gebruikt. Lemmer ligt aan het IJsselmeer. Daarom wordt verwacht dat de weersomstandigheden in Lemmer anders zijn dan verder land inwaards. Van de KNMI weerstations lijken de omstandigheden in Lemmer nog het meest op die van Stavoren. Bij beide plaatsen heeft de wind aan één kant van het dorp vrij spel over het IJsselmeer. Daarnaast liggen beide plekken dicht bij elkaar. Hemelsbreed ongeveer 25 kilometer. Er wordt aangenomen dat de historische meetgegevens van het KNMI in Stavoren een representatief beeld vormen van de omstandigheden in Lemmer.

In de afgelopen 10 jaar varieerde de gemeten gemiddelde dagelijkse temperatuur van 0.6 °C tot 17.7 °C. De gemiddelde dagelijkse zonnestraling varieerde van 11,2 W/m² tot 249,6 W/m². Zie hiervoor ook figuur 20 en figuur 21. Gedurende deze jaren was de hoogste gemiddelde uurtemperatuur 32,5 °C. De gemiddelde dagtemperatuur over de gehele periode is 9,3 °C. Over de periode van 10 jaar bedraagt de gemiddelde zonnestraling 112,6 W/m². De hoogst gemeten gemiddelde hoeveelheid zonnestraling op een dag bedraagt 354,8 W/m².



FIGUUR 20: GEMIDDELTE DAGTEMPERATUUR (°C) IN STAVOREN IN DE PERIODE 2002-2011 (KNMI, 2012)

De metingen worden verricht in mei en juni. Dit is normaliter, volgens de gegevens van het KNMI, een periode waarin de temperatuur continu aan het stijgen is van ongeveer 10 tot 15 °C. Daarnaast is de zonnestraling in deze periode op zijn maximum met waarden van rond de 200 W/m² en uitschieters van 250 W/m² of meer (KNMI, 2012).



FIGUUR 21: GEMIDDELTE ZONNESTRALING (W/M^2) PER DAG IN STAVOREN IN DE PERIODE 2002-2011 (KNMI, 2012)

Via de ramen, deuren, wanden en het dak van de productiehallen vindt warmteuitwisseling plaats tussen de lucht in de hal en de omgeving. De warmteoverdracht zal plaats vinden van de warmste van de twee naar de koudste. Het is dus goed mogelijk dat de temperatuur in de hal lager is dan buiten of juist andersom. Zodoende zijn er drie situaties welke interessant zijn voor verdere analyse. Wat gebeurt er wanneer;

- $T_{\text{hal}} > T_{\text{buiten}}$; de temperatuur in de hal hoger is dan de buitentemperatuur. Warmte uit de productiehallen wordt afgedragen naar buiten. Vooral de manier waarop de haltemperatuur reageert op een temperatuursdaling buiten is interessant.
- $T_{\text{hal}} < T_{\text{buiten}}$; de temperatuur in de hal lager is dan de buitentemperatuur. De productiehallen worden dragers van warmte af naar buiten of worden zelfs verwarmd door de buitenlucht. Zal de haltemperatuur mee stijgen of blijft deze achterlopen op de buitentemperatuur?
- $T_{\text{hal}} = T_{\text{buiten}}$; de temperatuur in de hal gelijk is aan de buitentemperatuur of hier dicht tegenaan ligt. Vooral de manier waarop de een op een verandering van de ander reageert is interessant.

De invloed van de zonnestraling zal voornamelijk plaats vinden op het dak. Hier heeft de zon vrij spel. Tegen de zuidelijke wand van hal 1 is namelijk het bijgebouw gesitueerd waarin de kantoren, kantine en het laboratorium gevestigd zijn. Hierdoor wordt een groot gedeelte van de zuidelijke wanden nooit beschenen door de zon. De rest van het oppervlak van de zuidelijke wanden van de hallen staan grote delen van de dag in de schaduw van de opgeslagen heipalen. Ook de westelijke wanden staan in de schaduw van de opgeslagen heipalen. De oostelijke wanden staan op hun beurt in de schaduw van de betoncentrale en de opslag van het toeslag.

Geabsorbeerde zonneënergie in het dak wordt aan zowel de boven als de onderkant afgedragen aan de omgeving middels convectie. Er zijn twee soorten convectie, vrije en gedwongen. De energieoverdracht via gedwongen convectie is vele malen hoger dan middels vrije convectie. Aan de onderkant van het dak wordt de energie afgedragen aan de lucht in de hal waarvan aangenomen wordt dat deze stil staat. Hier vindt natuurlijke convectie plaats. Aan de bovenkant van het dak heeft de wind vrij spel. Hier kan de lucht wel bewegen. Zodra er wind staat, wordt de energie middels gedwongen convectie afgedragen.

Als er veel wind staat kan het zomaar zo zijn dat meer dan 90% van de energie aan de buitenlucht wordt afgedragen. Bij windstille omstandigheden gaat dit percentage richting de 50%. Het omgekeerde geldt voor het percentage wat naar de hal wordt afgedragen. Voor het bepalen van de invloed van zonnestraling op de

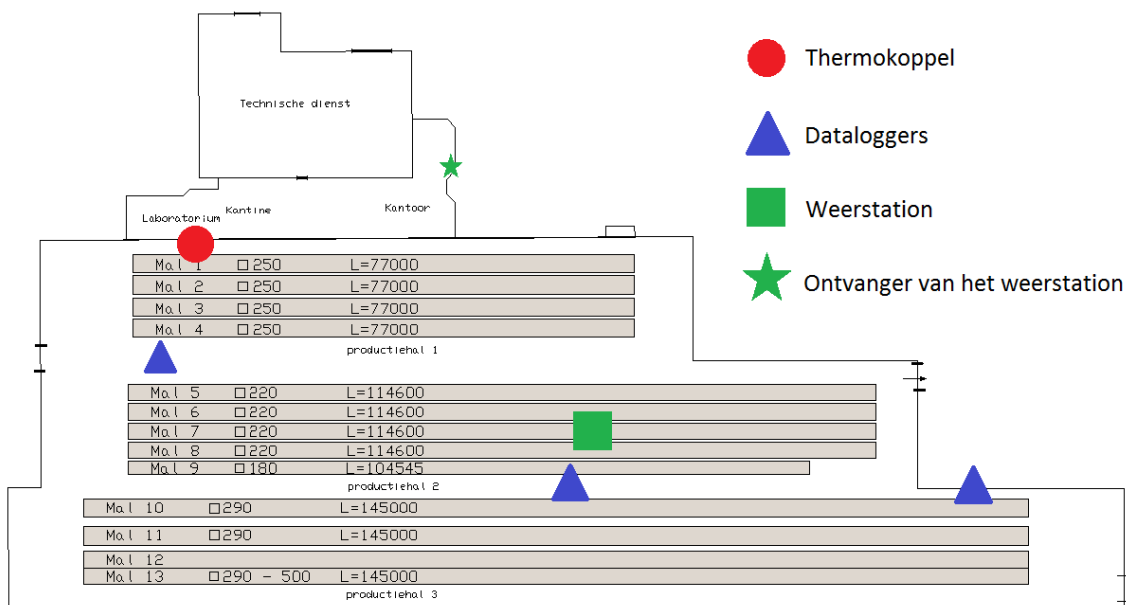
productiefaciliteiten is het dus van belang om naar een dag met veel wind te kijken alsmede een dag waarop er geen wind staat.

3.4 MEETOPSTELLING

Voor het bepalen van de invloed van de natuurlijke omgeving op de thermische gesteldheid van de productiehallen worden beide gemonitord. Hiervoor is het noodzakelijk om de natuurlijke omgeving te meten op een locatie welke niet wordt beïnvloed door omringende gebouwen. Daarnaast moet deze locatie representatief zijn voor de omstandigheden welke de productiefaciliteiten ondervinden.

3.4.1 MATERIAAL EN MEETLOCATIES

Voor het in beeld brengen van het temperatuurverloop in de hal is dezelfde meetdata gebruikt als in het voorgaande hoofdstuk. De meetdata is afkomstig van een drietal dataloggers type EL-USB-1-PRO van Lascar Electronics. Deze hebben een Pt100 sensoren en zijn ingesteld op een meetinterval van 1 minuut. De betrouwbaarheid van deze loggers is een half graad Celsius (Lascar Electronics). Daarnaast is de temperatuur naast het laboratorium met een USB TC-08 Thermocouple Data Logger van Pico Technology gemeten. Hierop is een thermokoppel type T aangesloten welke met een betrouwbaarheid van 1 graad Celsius de temperatuur meet (PicoTech). Het meetinterval van de TC-08 is ingesteld op 1 minuut. De meetlocaties zijn hieronder aangegeven in figuur 22.



FIGUUR 22: MEETLOCATIES VAN DE HALMETINGEN EN HET WEERSTATION

Voorafgaande aan dit onderzoek zijn de buitentemperatuur, de zonnestraling, de luchtvochtigheid, de regenintensiteit en de windsnelheid geïdentificeerd als variabelen welke de temperatuur in hal beïnvloeden. Deze zijn gemeten met behulp van een weerstation. Het weerstation is van het type Vantage Pro2 van Davis Instruments met als toevoeging een zonnestralingssensor (Davis Instruments, 2012). Vanwege de haalbaarheid van het onderzoek wordt alleen de invloed van de buitentemperatuur en de zonnestraling onderzocht. De overige variabelen zijn wel gemeten, maar met de meetgegevens is niets gedaan. Een overzicht van de gebruikte sensoren is te zien in Tabel 14.

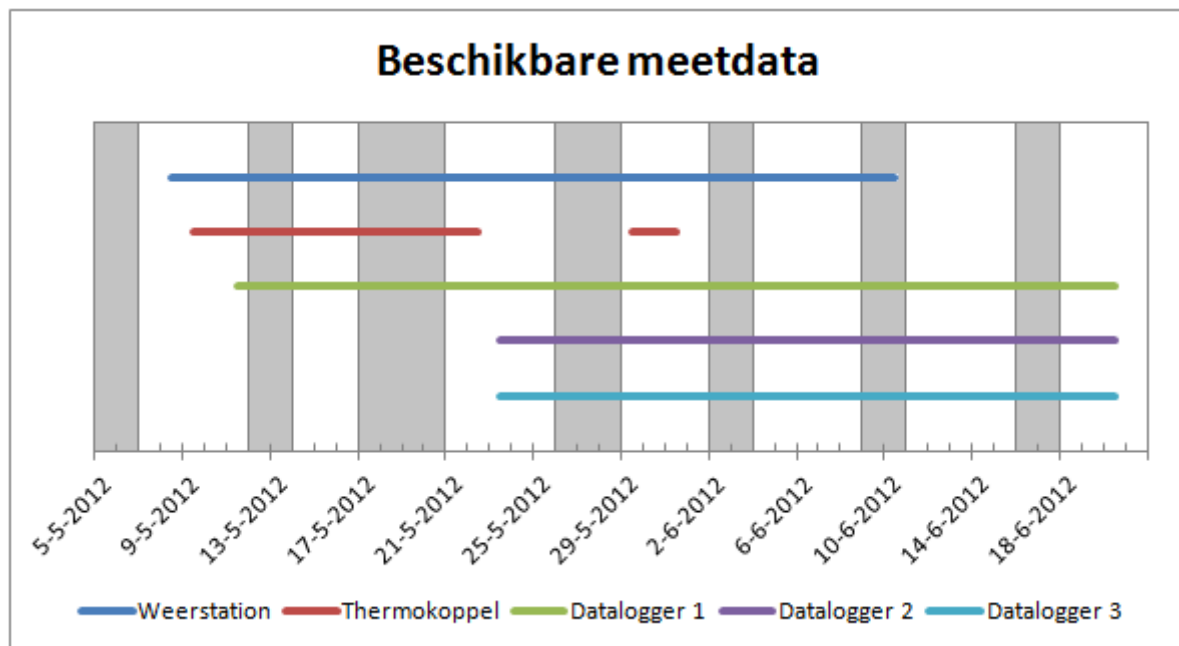
Bij de locatiekeuze van het weerstation moet rekening worden gehouden met de aanwezigheid van de betoncentrale naast de productiehallen van de heipalen. Deze zou de windsnelheid en richting kunnen beïnvloeden mocht het weerstation te dicht bij de centrale staan. Tevens mag de locatie van het weerstation

zich niet te ver van de ontvanger bevinden. De ontvanger bevindt zich in het kantoor. Het bereik van de Vantage Pro2 bedraagt door muren 60 tot 120 meter (Davis Instruments, 2012).

TABEL 14: GEBRUIKTE SENSOREN

Variabele	Symbool	Sensor	Dimensie	Betrouwbaarheid	Meetinterval
Haltemperatuur	T_h	Thermokoppel type T	°C	±1.0 °C	1 min
		EL-USB-1-PRO	°C	±0.5 °C	1 min
Buitentemperatuur	T_b	Vantage Pro2	°C	±0.5 °C	1 min
Zonnestraling	I	Vantage Pro2	W/m ²	±5%	1 min

Het weerstation is geïnstalleerd bovenop de punt van het dak van hal 2. De locatie is ook aangegeven in figuur 22. De afstand tussen het weerstation en de ontvanger is op dit punt ongeveer 60 meter en dus binnen de range van het weerstation. Metingen op het punt van het dak zijn daarnaast representatief voor de omstandigheden van de productiehallen. Op het dak geen bevestigingsmogelijkheid voor het weerstation, daarom is een installatie gemaakt bestaande uit een verzwaarde voet waaraan een paal is gelast. Met behulp van beugels is het weerstation aan de paal bevestigd. Zodoende hangt de basis van het weerstation op 0,8 meter boven de punt van het dak en de windvaan op 1.5 meter boven de punt van het dak, waarbij de punt van het dak een hoogte heeft van 8.8 meter.



FIGUUR 23: OVERZICHT VAN DE BESCHIKBARE MEETDATA. GRIJS GEARCEERDE BLOKKEN ZIJN PRODUCTIELOZE DAGEN

3.4.2 MEETDATA EN PRODUCTIELOZE DAGEN

De weersvariabelen zijn gemeten in de periode 8 mei tot 10 juni. De meting met de thermokoppel vond plaats van van 9 mei tot en met 31 mei. Tussen 23 mei en 29 mei is het meetprogramma vastgelopen waardoor er over die periode geen meetgegevens zijn. Hetzelfde geldt voor de periode na 31 mei. Op 11 mei is de eerste datalogger in de hal geïnstalleerd. De overige twee loggers zijn pas op 23 mei geïnstalleerd. Er zijn meetgegevens beschikbaar van de dataloggers tot 20 juni. De periode waarin zowel meetdata beschikbaar is van de haltemperatuur als van de natuurlijke is 10 mei tot en met 9 juni. In deze periode zijn er 13 dagen waarop er geen heipalen worden geproduceerd. Drie normale weekenden, hemelvaarsweekend en paasweekend. In Figuur 23 wordt een overzicht getoond van de beschikbare meetdata en de productieloze dagen.

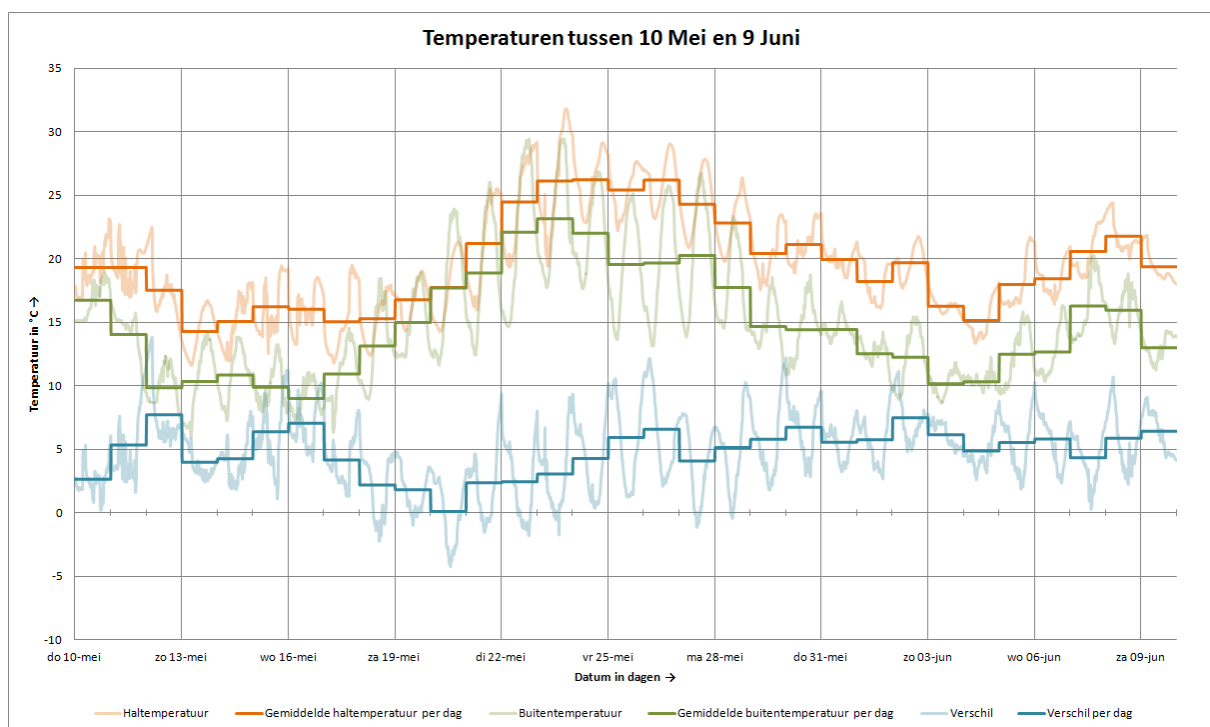
3.5 MEETRESULTATEN EN ANALYSE

Zoals ook eerder gemeld zijn er in de periode van 10 mei tot en met 9 juni metingen verricht. De metingen aan de haltemperatuur en de natuurlijke omgeving hebben een enorme hoeveelheid data opgeleverd welke inzicht geeft in de invloed van de natuurlijke omgeving op de thermische gesteldheid van de hal. De resultaten van de metingen zijn op te delen in twee onderwerpen; zonnestraling en omgevingstemperatuur. De resultaten worden eerst globaal besproken, waarna specifieke kenmerken van de metingen worden uitgelicht. Voordat de data wordt geanalyseerd, is het goed om te herhalen welke 4 situaties nader bekeken worden:

- $T_{\text{hal}} > T_{\text{buiten}}$; de temperatuur in de hal is hoger dan de buitentemperatuur
- $T_{\text{hal}} < T_{\text{buiten}}$; de temperatuur in de hal is lager dan de buitentemperatuur
- $T_{\text{hal}} = T_{\text{buiten}}$; de temperatuur in de hal is gelijk aan de buitentemperatuur of ligt hier dicht tegenaan
- $V_{\text{wind}} = 0$ of $V_{\text{wind}} = \text{maximaal}$; het is windstil of er staat een stevige wind

3.5.1 OMGEVINGSTEMPERATUUR

In figuur 24 wordt een overzicht gegeven van de gemiddelde gemeten haltemperatuur, de gemeten buitentemperatuur en het verschil tussen de beide.

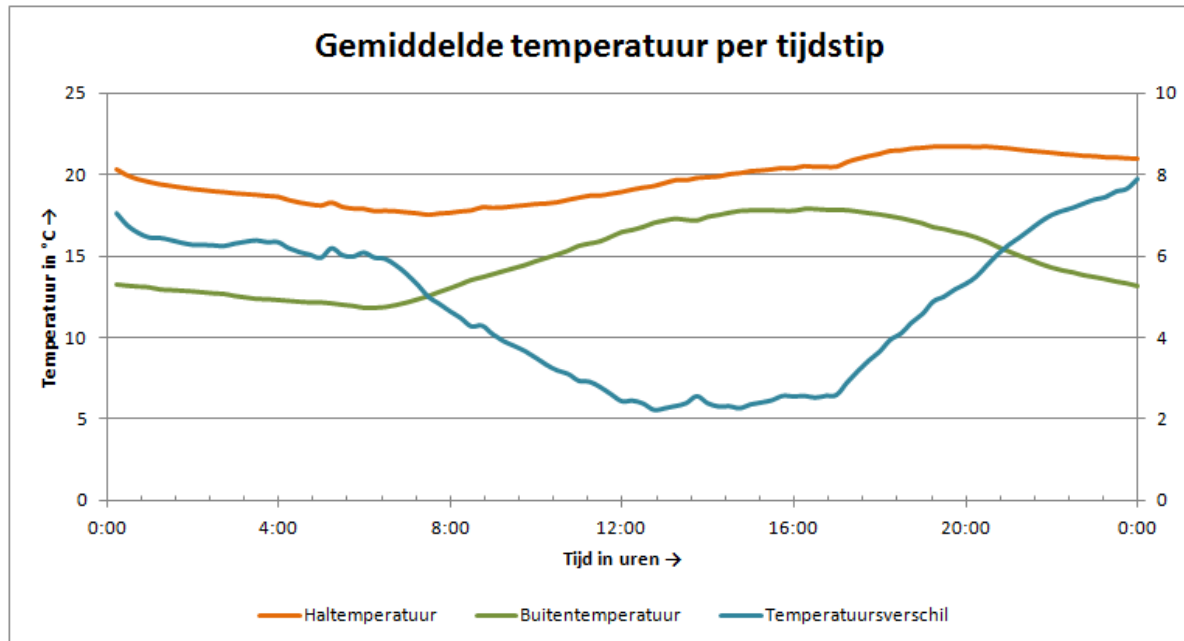


FIGUUR 24: OVERZICHT VAN DE GEMIDDELTE GEMETEN HALTEMPERATUREN (ORANJE), BUITENTEMPERATUREN (GROEN) EN HET VERSCHIL TUSSEN DE GEMETEN WAARDEN (BLAUW). DE DOORZICHTIGE LIJNEN REPRESENTEREN DE GEMETEN WAARDEN PER 15 MINUTEN. DE DIKKE LIJNEN ZIJN DE GEMIDDELTE WAARDEN PER DAG.

Kijkende naar het verschil tussen de hal- en de buitentemperatuur dan valt gelijk op dat er slechts enkele momenten zijn geweest waarop de buitentemperatuur hoger was dan de binnentemperatuur. Alleen op 20 mei was de buitentemperatuur gedurende een langere periode hoger dan in de hal. Tussen 8:45 en 20:15 was de temperatuur buiten tot 4.3 °C hoger dan in de hal. Over de hele dag bekeken waren de gemiddelde temperatuur op 20 mei in de hal en buiten aan elkaar gelijk. Het grootste temperatuurverschil is gemeten op 12 mei. Gemiddeld over de hele dag was de temperatuur in de hal 7.7 °C hoger dan buiten. Dit is 1.9 °C hoger dan het gemiddelde temperatuursverschil tussen de hal en de omgeving.

Het gemiddelde temperatuursverschil was 4.8 °C. In figuur 25 is het gemiddelde temperatuursverschil verdeeld over de dag te zien. Tussen 0:00 en 6:00 is het verschil stabiel. Buiten wordt het kouder, maar de

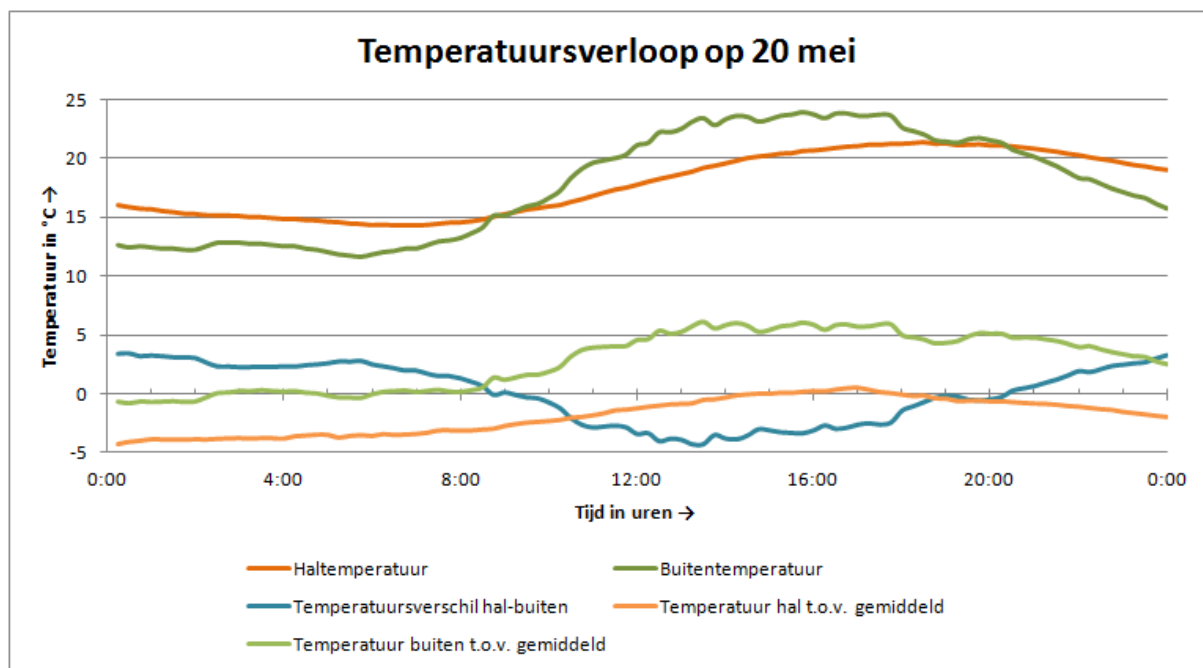
ventilatoren zorgen ook voor een daling in de haltemperatuur. Na 6:00 wordt het buiten warmer. De haltemperatuur reageert een uur later, maar de temperatuur buiten neemt sneller toe dan binnen waardoor het verschil tussen de beide af neemt. Na 12:00 lijkt het verschil te stabiliseren. Vanaf 17:00 neemt het verschil weer toe. Buiten zakt de temperatuur en in de hal neemt deze juist toe en stabiliseert daarna. De stijging in de haltemperatuur is waarschijnlijk het gevolg van de hydratatie van de heipalen, het uit gaan van de ventilatie of een combinatie van de twee. Het temperatuursverschil neemt toe tot 0:00 wanneer de ventilatoren weer aan gaan en de haltemperatuur ook af neemt.



FIGUUR 25: DE GEMIDDELTE HAL- EN BUITENTEMPERATUUR VERDEELD OVER DE DAG. HET TEMPERATUURSVCHIL IS GEPLT OP DE RECHTER VERTICALE AS.

3.5.1.1 $T_{\text{HAL}} < T_{\text{BUITEN}}$

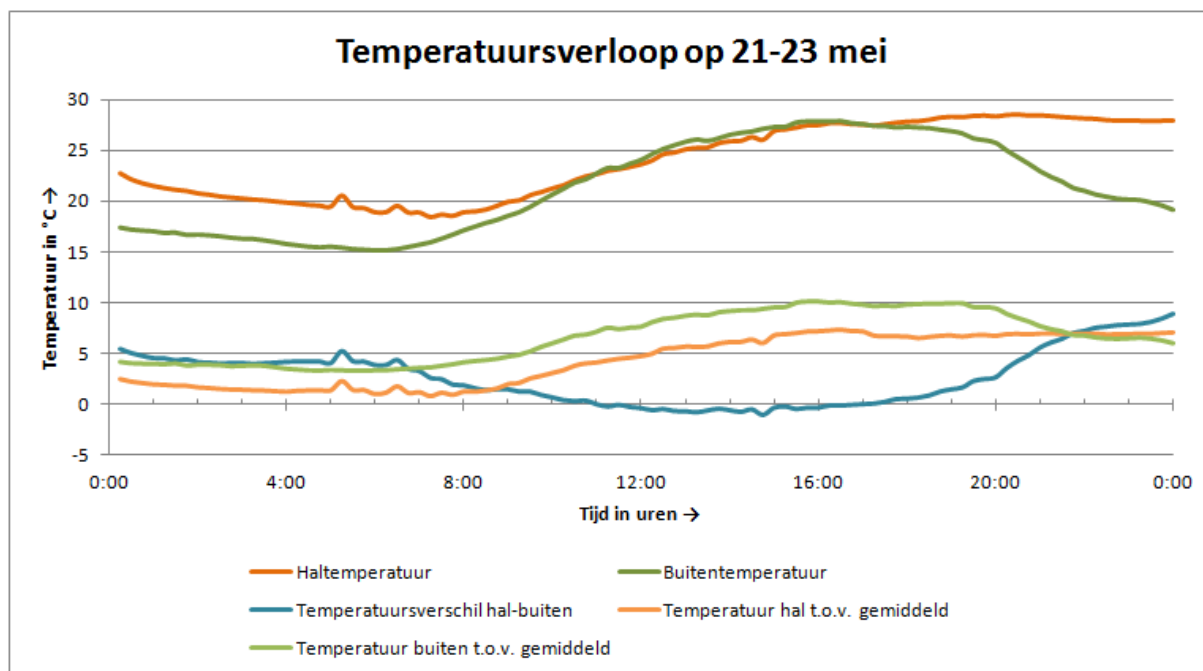
Zoals hiervoor ook genoemd is er slechts 1 dag waarop de buitemtemperatuur gedurende een langere periode hoger lag dan de binnentemperatuur. Dit was 20 mei, een zondag. Het temperatuursverloop van de buitemtemperatuur, de haltemperatuur en het verschil tussen de beide is in figuur 26 uitgezet. Daarnaast is het verschil in de haltemperatuur ten opzichte van de gemiddelde waarden van de haltemperatuur geplot. De haltemperatuur lijkt onder invloed van een hogere buitemtemperatuur meer te verwarmen dan normaal. Dit is terug te zien in de stijgende lijn van “temperatuur hal t.o.v. gemiddeld” wanneer de buitemtemperatuur hoger is dan de haltemperatuur. Omdat 20 mei een zondag was is de karakteristieke verspringing van de haltemperatuur rond 17:00 niet te zien. Dit versterkt het vermoeden dat deze veroorzaakt wordt door een proces wat in de weekenden niet speelt.



FIGUUR 26: TEMPERATUURSVERLOOP OP 20 MEI

3.5.1.2 $T_{\text{HAL}} = T_{\text{BUITEN}}$

Op 21, 22 en 23 mei is gedurende een lange periode de temperatuur in de hal gelijk aan de buitentemperatuur. Op elk van deze dagen werden er heipalen geproduceerd. In de onderstaande figuur zijn de wederom de temperatuursverlopen van de omgeving en de hal uitgezet. Met daarbij het verschil tussen de beide en de verhouding van het temperatuursverloop ten opzichte van de gemiddelde gemeten waardes.

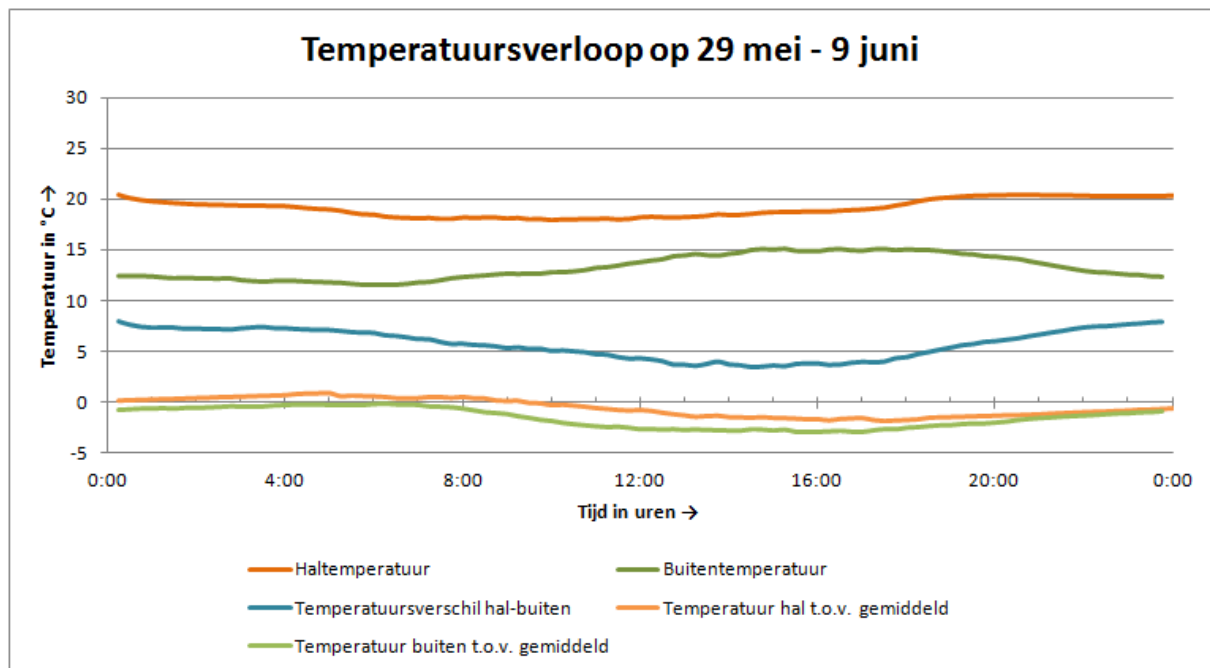


FIGUUR 27: GEMIDDELD TEMPERATUURSVERLOOP OP 21, 22 EN 23 MEI

Net als in de situatie waarbij de buitentemperatuur hoger is dan de haltemperatuur lijkt het erop dat de haltemperatuur van het gemiddelde verloop af wijkt en toe neemt. Waar de haltemperatuur voor 8:00 nog een gemiddelde waarde heeft neemt deze bovengemiddelde waarden aan onder invloed van de buitentemperatuur.

3.5.1.3 $T_{\text{HAL}} > T_{\text{BUITEN}}$

In de periode van 29 mei tot en met 9 juni ligt de haltemperatuur continu boven de buitentemperatuur. Gedurende drie van de twaalf dagen vond er geen productie plaats in de hallen. Het gemiddelde temperatuursverloop is hieronder in figuur 28 uitgezet. Alle temperaturen zijn gedurende deze dagen opvallend stabiel. Zowel de haltemperatuur als de buitentemperatuur zijn overdag lager dan gemiddeld. De lichte daling in de haltemperatuur ten opzichte van de gemiddelde haltemperatuur laat zien dat een lagere buitentemperatuur de haltemperatuur doet matigen. Hiernaast is rond 18:00 is ook weer een lichte sprong in de haltemperatuur te zien. Dit is later dan gemiddeld.

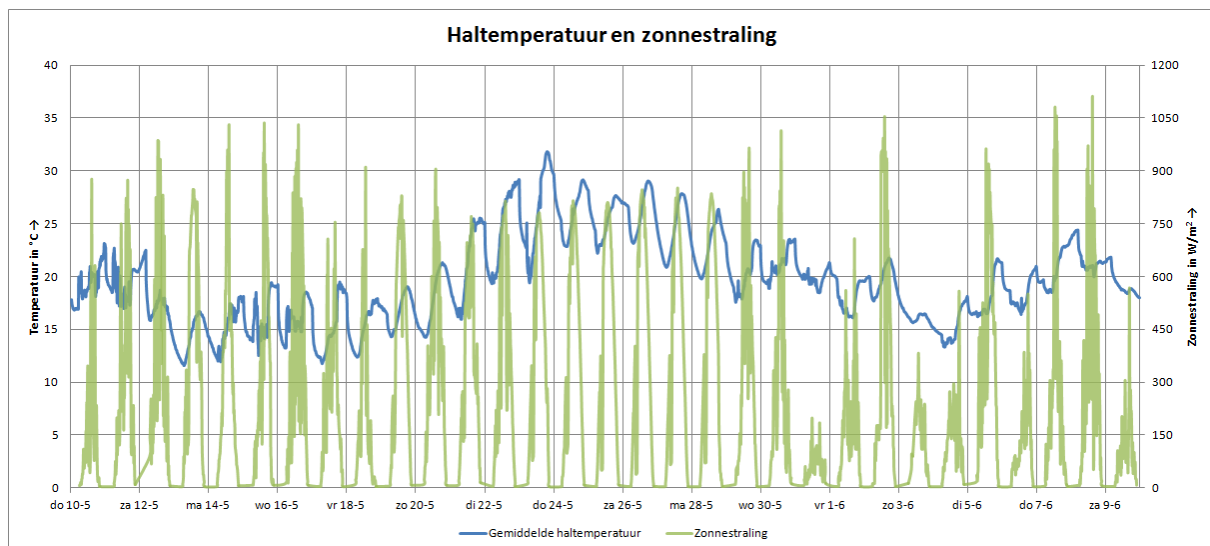


FIGUUR 28: GEMIDDELD TEMPERATUURVERLOOP OP 29 MEI TOT EN MET 9 JUNI

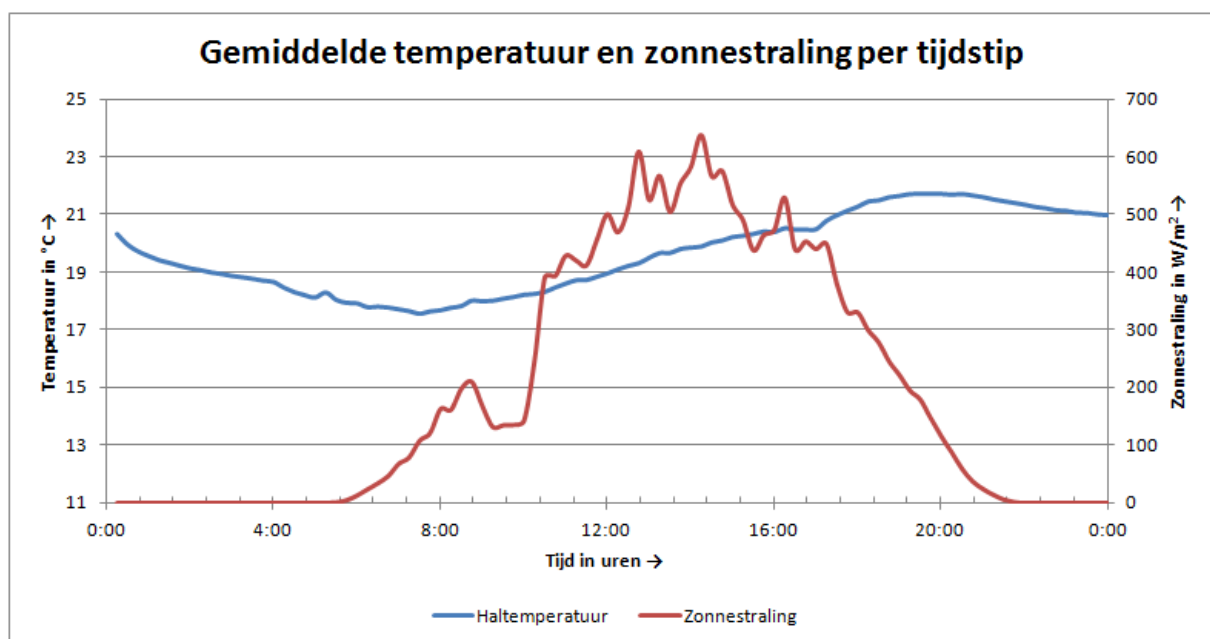
3.5.2 ZONNESTRALING

De gemiddelde hoeveelheid zonnestraling tussen 10 mei en 9 juni bedraagt 197 W/m^2 . Dit is zo goed als gelijk aan de theoretische verwachtingen. Zoals ook te zien is in figuur 29 was het tussen 23 en 28 mei erg zonnig. Deze dagen scheen de zon bijna de gehele dag. Dit is terug te zien haltemperaturen alsmede de buitentemperaturen, welke overigens niet in figuur 29 zijn geplot. De hoogste haltemperaturen zijn ook in deze periode gemeten.

Wat gelijk opvalt in de figuur is dat de pieken in de haltemperatuur altijd later op de dag zijn ten opzichte van de pieken in de zonnestraling. Dit wordt benadrukt in figuur 30. Vermoedelijk wordt 's ochtends tussen 9:00 en 11:00 de zon afgeschermd door de betoncentrale. Deze staat ten oosten van het weerstation en zet het weerstation tijdelijk in de schaduw. Na 10:30 begint de zon gemiddeld genomen pas echt kracht te krijgen. De temperatuur in de hal lijkt te stijgen als gevolg van de straling van de zon. Tussen 10:00 en 17:30 is ze kracht van de zon op zijn hoogst met een waarde boven de 400 W/m^2 .

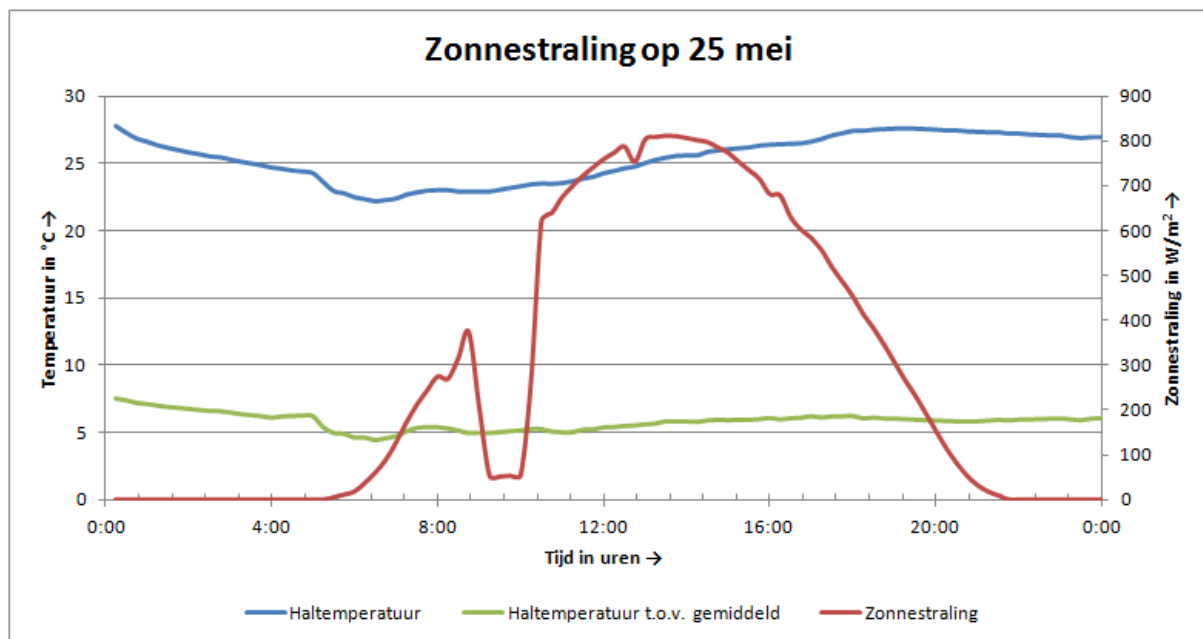


FIGUUR 29: GEMETEN WAARDES VAN DE GEMIDDELDE HALTEMPERATUUR EN DE ZONNESTRALING VAN 10 MEI TOT EN MET 9 JUNI



FIGUUR 30: DE GEMIDDELDE ZONNESTRALING EN TEMPERATUUR VERDEELD OVER DE DAG

De ligging van de productiehallen heeft er waarschijnlijk voor gezorgd dat er geen dagen zijn geweest waarop het windstil was. De laagst gemeten gemiddelde windsnelheid bedroeg 1.3 m/s. Er kan dus niet veel gezegd worden over de invloed van de wind op de productiefaciliteiten en de geabsorbeerde zonnestraling. Op vrijdag 25 mei stond er echter een harde wind. De wind waaide die dag met gemiddeld met 4.8 m/s er stond geen wolkje aan de lucht. De gemiddelde windsnelheid over de totale meetperiode bedraagt 3.3 m/s. De wind blies deze dag dus 45% harder dan gemiddeld. Omdat er geen wolken aanwezig waren bedraagt de gemiddelde zonnestraling op 25 mei 283 W/m². Dit is 43 % meer dan gemiddeld. Desondanks stijgt de haltemperatuur deze dag maar met 31% meer dan gemiddeld. De haltemperatuur neemt namelijk met 5.5 °C toe waar een toename 4.2 °C de gemiddelde waarde is.

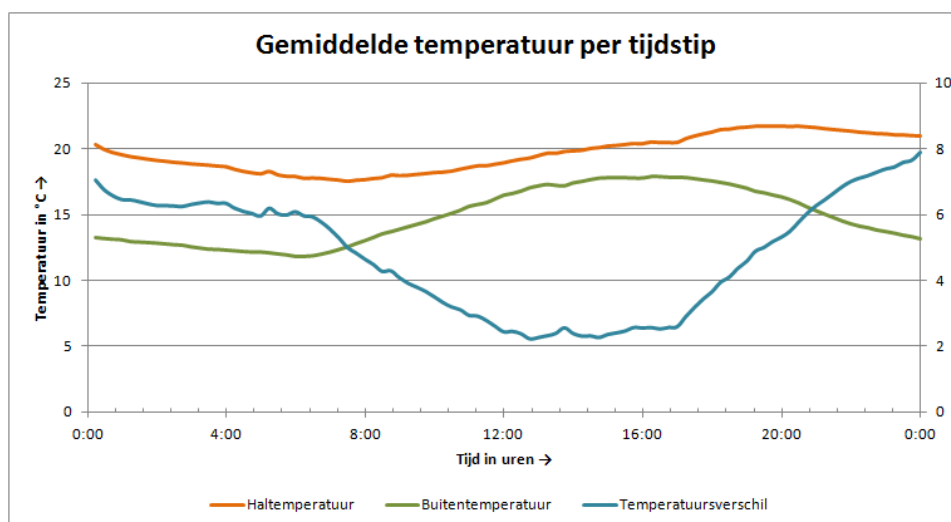


FIGUUR 31: ZONNESTRALING EN VARIATIE IN DE HALTEMPERATUUR OP 25 MEI

3.6 DEELCONCLUSIE

In dit hoofdstuk is de invloed van de natuurlijke omgeving op de thermische gesteldheid van de productiefaciliteiten onderzocht. Er zijn twee variabelen nader bekeken; de buitentemperatuur en de zonnestraling. Vanwege een isolatiewaarde van de productiefaciliteiten van 2.0 werd verwacht dat de buitentemperatuur nogal een invloed zou kunnen hebben op de temperatuur in de hal. De invloed van de zonnestraling werd verwacht groter te zijn bij windstille omstandigheden ten opzichte van dagen met veel wind.

Uit de meetdata blijkt dat haltemperatuur gemiddeld $4.3\text{ }^{\circ}\text{C} \pm 1.7\text{ }^{\circ}\text{C}$ hoger ligt dan de buitentemperatuur. Het temperatuursverschil loopt daarbij 's avonds op tot gemiddeld $7.9\text{ }^{\circ}\text{C}$ en is overdag het laagst met een gemiddelde waarde van $2.3\text{ }^{\circ}\text{C}$. De temperatuur in de productiehallen neemt met gemiddeld $4.2\text{ }^{\circ}\text{C}$ toe wanneer de zon op de productiehallen schijnt.



FIGUUR 32: DE GEMIDDELTE HAL- EN BUITENTEMPERATUUR VERDEELD OVER DE DAG.

4 BESCHIKBARE ENERGIE

Er is in de voorgaande hoofdstukken bepaald hoeveel thermische energie er beschikbaar is in de productiefaciliteiten van de heipalen. Maar hoe kan deze energie worden benut? Dat is het onderwerp van dit hoofdstuk. Er wordt gezocht naar een antwoord op de volgende onderzoeksvraag:

Welke maatregelen zijn er beschikbaar om de thermische discrepanties te beperken danwel op te heffen?

De beschikbare energie in de productiefaciliteiten is in de vorige twee hoofdstukken bepaald. In dit hoofdstuk worden maatregelen aangedragen welke de beschikbare thermische energie in de productiefaciliteiten beïnvloeden. Hiervoor is gebruik gemaakt van de verkregen data uit de metingen van de voorgaande hoofdstukken. Hiernaast is gesproken met Prof. dr. ir. T.H. van der Meer en ir. A.G. Entrop. Twee deskundigen op het gebied van thermische energie. Samen met de literatuur vormen deze gesprekken de basis waarop de maatregelen geformuleerd zijn.

In de productiefaciliteiten van de heipalen is in de zomermaanden een overschot aan warmte. De hydratatiwarmte uit de heipalen gezamenlijk met de warme buitenlucht en zonnestraling op het dak van de hallen zorgen voor hoge temperaturen in de hal. Temperaturen van meer dan 23 °C gedurende werktijden zijn niet wenselijk. In de winter is er juist een tekort aan warmte. Gedurende deze periode bestaat het gevaar dat het beton te koud wordt waardoor het hydratatieproces niet of te langzaam op gang komt.

In dit hoofdstuk wordt eerst gekeken naar de huidige situatie. Hoeveel energie is er beschikbaar en wat kan hieruit geconcludeerd worden. Vervolgens de eisen voor de beïnvloedingsmaatregelen uitgelicht. Tenslotte worden enkele maatregelen aangedragen en richtingen waarin verdere maatregelen dienen te worden gezocht.

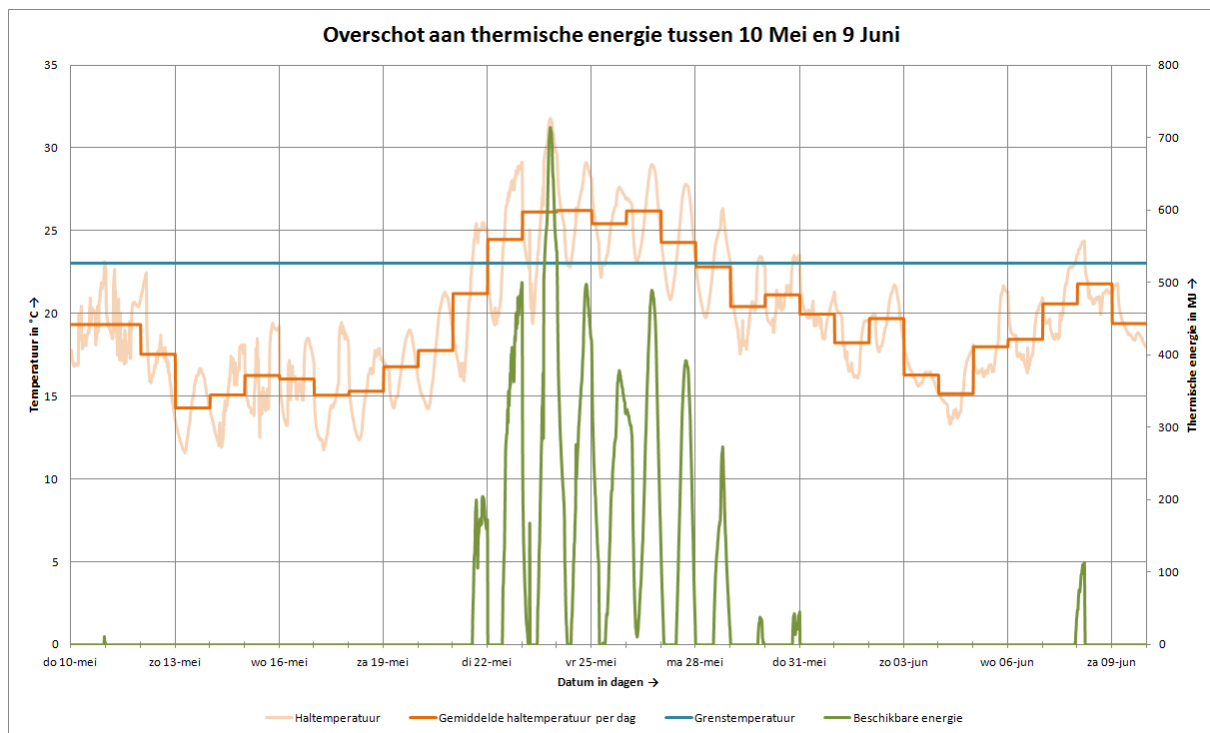
4.1 HUIDIGE SITUATIE

Er is in de voorgaande twee hoofdstukken bepaald hoeveel energie er in de heipalen beschikbaar komt en wat de invloed van de natuurlijke omgeving op de thermische gesteldheid van de productiefaciliteiten is. Door deze data te combineren kan een voorspelling gemaakt worden over de hoeveelheid energie welke in de productiehallen aanwezig is.

In het beton komt er over een periode van 12 uur gemiddeld 544 kW aan energie vrij in de betonnen heipalen. Ofwel 23,5 GJ aan energie per productiedag. De hoeveelheid thermische energie welke beschikbaar is in de productiehallen is nog wel onbekend. De temperatuur in de productiehallen gedurende de metingen is wel bekend en er is bepaald dat de temperatuur in de productiefaciliteiten gemiddeld 4.3 °C hoger is dan de omgevingstemperatuur.

De wens is om de hoge temperaturen in de productiehallen terug te dringen. De hallen mogen onder werktijden niet te warm zijn. De arbo spreekt over te warmte werkomstandigheden bij temperaturen vanaf 23 °C voor lichamelijk zeer inspannend werk (Ministerie van Sociale Zaken en Werkgelegenheid). Deze waarde is gedurende de halmetingen 11 dagen overschreden gedurende een totale duur van 152 uur. De maximale hoeveelheid excessieve energie welke in de productiehallen aanwezig was gedurende deze periode bedraagt 713 MJ. Gemiddeld was er gedurende deze periode 241 MJ aan energie beschikbaar.

De beschikbare hoeveelheid energie in de lucht valt bijna in het niet in vergelijking met de energie in de heipalen. Wanneer de energie uit de lucht in de hal gelijkmatig over de 152 uur zou worden afgegeven levert dit een vermogen op van 440 Watt.



FIGUUR 33: BESCHIKBARE THERMISCHE ENERGIE IN DE LUCHT BIJ EEN WENSELIJKE TEMPERATUUR VAN 23 °C

4.2 EISEN BEINVLOEDINGSMAATREGELEN

Er zijn verschillende redenen te bedenken om maatregelen te treffen om zodoende de thermische discrepanties te beperken. De maatregelen kunnen echter ook met verschillende doelen toegepast worden. Voor de IJB Groep geldt de volgende volgorde van belangrijkheid voor de doelen van een maatregel;

1. Het hergebruik van de thermische energie voor eigen gewin;
2. Het inperken van de extremen met betrekking tot de temperatuur in de productiehallen;
3. Het verlagen van de piekwaarden in de haltemperatuur.

Het eerste doel is er op gericht om de thermische energie uit de productiefaciliteiten te hergebruiken om zodoende het eigen energieverbruik terug te dringen. Ook zou de thermische energie afgevoerd en verkocht kunnen worden aan externen. Op de een of de andere manier moet de maatregel op de lange termijn geld opleveren. Het eerste doel sluit overigens de andere twee niet uit. Sterker nog het hergebruik van de thermische energie houdt ook automatisch in dat er aan één van de andere twee doelen wordt voldaan.

Het tweede doel richt zich op de opslag en hergebruik van de thermische energie om zodoende de temperatuur in de productiefaciliteiten te reguleren. Dit kan zowel aan de boven als de onderkant van het temperatuurspectrum in de productiehallen zijn. De regulatie is niet alleen ten gunste van de werkomstandigheden van de werknemers maar ook voor de kwaliteit van het product. Bij beter gereguleerde of minder variërende omstandigheden kan de kwaliteit van het product beter gewaarborgd worden en hoeft er minder veranderd te worden aan bijvoorbeeld de mengsels.

Het derde doel richt zich enkel op het inperken van de hoogste temperaturen in de productiefaciliteiten. Wederom ten gunste van de werknemers en de productkwaliteit. Maatregelen dienen temperaturen in de hal van meer dan 23 °C te voorkomen.

In theorie kan de temperatuur in de productiehallen met maatregelen op twee manieren worden veranderd. Preventief of reactief. Het preventief verlagen of verhogen van de haltemperatuur kan gebeuren door de bron

van de warmte of kou aan te pakken. Reactief kan dit gebeuren door de aanwezige hoeveelheid thermische energie te veranderen.

De preventieve toevoeging of onttrekking van thermische energie aan de productiehallen moet op een structurele manier worden aangepakt. Thermische energie wordt structureel aan de productiehallen toegevoegd middels bijvoorbeeld de zonnestraling en de hydratatie van de heipalen. Zij vormen een bronnen welke thermische energie aan de hallen toevoegen. Een preventieve maatregel zou bijvoorbeeld de absorptie van de zonnestraling in het dak reduceren of de benodigde hoeveelheid cement in het beton verlagen. De structurele onttrekking van thermische energie uit de productiehallen kan voornamelijk gedurende de winterperiode een probleem zijn. De buitentemperatuur is in de winter een bron van kou. Middels een verbeterde of gerichte isolatie kan het onttrekken van thermische energie uit de hal structureel aangepakt worden.

Het reactief verlagen of verhogen van de haltemperatuur kan gebeuren door de thermische energie in de hal passief of actief te veranderen. Het actief verlagen of verhogen van de haltemperatuur kan door actief thermische energie uit de hallen te onttrekken of juist toe te voegen. Er zijn ook passieve manieren om dit te doen. Ontrokken thermische energie kan op een later tijdstip ook weer worden toegevoegd. Dit vereist dat de thermische energie op de een of de andere manier wordt opgeslagen. De opslag zou voor korte termijn kunnen zijn of voor lange termijn. Door actief of passief te koelen en verwarmen met een korte termijn opslag kan bijvoorbeeld de temperatuursverandering tussen dag en nacht beïnvloed worden. Met een lange termijn opslag zouden ook de verschillen tussen de seizoenen opgevangen kunnen worden.

4.3 PREVENTIEVE MAATREGELEN

Zoals hiervoor ook gezegd beïnvloeden preventieve maatregelen de bron waardoor thermische energie aan de productiehallen wordt toegevoegd of onttrokken. Er zijn bij het bepalen van de beschikbare thermische energie drie bronnen geïdentificeerd welke als een dergelijke bron werken. De heipalen, de zonnestraling en de buitentemperatuur.

De heipalen fungeren als warmtebron welke thermische energie toe voegt aan de productiehallen. Door de receptuur aan te passen kan de hoeveelheid energie aangepast worden en de snelheid waarmee deze vrij komt. Door continu kennis te vergaren over nieuwe technieken en het blijven uitvoeren van metingen en proeven kan de vrij gekomen thermische energie terug gedwongen worden.

Zonnestraling fungeert eveneens als warmtebron welke thermische energie toe voegt aan de productiehallen. De mate waarin de zonnestraling de thermische gesteldheid van de hal beïnvloed kan op drie manieren worden aangepast. Allereerst kan de hoeveelheid zonnestraling welke het dak bereikt worden aangepast door bijvoorbeeld de hoek en vorm van het dak aan te passen. Als tweede kan de zonnestraling kan worden afgevangen voordat het dak bereikt wordt, met bijvoorbeeld zonnecellen of collectoren van zonneboilers. Een bijkomend voordeel van beide is dat bij zonnecellen of zonnecollectoren de zonnestraling opgevangen wordt met als doel dit te hergebruiken. Electriciteit uit zonnecellen kan overal worden hergebruikt binnen de IJB Groep en het verwarmde water uit een zonneboiler kan gebruikt worden in de centrale als mengwater. Als laatste kan het reflecterend en absorberend vermogen van het dak worden aangepast. Wordt er meer zonnestraling geabsorbeerd dan wordt de hal ook meer verwarmd.

De buitentemperatuur is bijna altijd lager dan de haltemperatuur. Uit de meetdata blijkt dat de haltemperatuur gemiddeld 4.3 °C hoger ligt dan de buitentemperatuur. Via de wanden, het dak, de ramen, de deuren en via de ventilatoren wordt warmte uit de hal uitgewisseld met de omgeving. Het veranderen van de isolatiewaarde van de hal kan er voor zorgen dat het gemiddelde temperatuursverschil tussen de twee verandert. Het vervangen van de ventilatoren is de makkelijkste manier waarop dit op dit moment kan gebeuren. De ventilatoren kunnen aan of uit staan, de effecten hiervan zijn wel duidelijk geworden in dit onderzoek. Echter wanneer de ventilatoren uit staan vormen zij nog steeds gaten in het dak waar lucht vrij door kan stromen. Door een

systeem toe te voegen waarbij de doorgang afgesloten wordt na uitschakeling zou de isolatiewaarde van de hal verhogen. Voor de winterperiode kan dit zomaar een paar graden schelen in de hal.

4.4 REACTIEVE MAATREGELEN

Voor het gebruik van de meeste reactieve maatregelen is het nodig om de thermische energie eerst te oogsten. De thermische energie welke uit de lucht in de hal gewonnen kan worden is relatief laag. Uit de metingen blijkt dat de heipalen een veel groter potentiaal aan energie kunnen leveren. Echter zijn de temperaturen welke in het beton en de hal bereikt worden relatief laag.

Energieoverdracht tussen twee media vindt plaats van degene met de hoogste temperatuur naar degene met de laagste temperatuur. Hoe hoger het temperatuursverschil tussen deze twee media is hoe hoger de energieoverdracht zal zijn. Een temperatuursverschil van enkele honderden graden is bij overdracht van thermische energie niet ongebruikelijk. De overdracht van thermische energie uit de heipalen of de hal zal als een gevolg van de lage temperaturen laag zijn. Door gebruik te maken van een groot contactoppervlak kan de langzame energieoverdracht gedeeltelijk opgevangen worden. Het te verwarmen medium kan echter niet warmer worden dan de bron welke het medium verwarmd. Een andere mogelijkheid om het oogsten van thermische energie te versnellen is door gebruik te maken van gedwongen convectie. Hierbij vloeit een gas of vloeistof geforceerd over een oppervlak. Voor het vloeien is echter vaak nog wel extra energie nodig wat het rendement van een maatregel beperkt of zelfs nullificeert. Om laagwaardige warmte te oogsten is dus een groot contactoppervlak, gedwongen convectie of een lang tijdsspan nodig. Daarnaast is het wenselijk om te oogsten bij een zo hoog mogelijke brontemperatuur.

In de productiehallen levert het beton de hoogste brontemperatuur. De tijdsspan om de energie te oogsten is enigzinds beperkt omdat de heipalen gemiddeld maar gedurende 12 uur op een werkdag energie produceren. Het contactoppervlak kan relatief groot zijn als er een manier gevonden kan worden waarbij de mallen worden gebruikt voor de oogst. Als alternatief zou na het storten van de heipalen ook een 'oogstdeken' over de heipalen uitgerold kunnen worden. In de winter worden nu al isolerende dekens gebruikt om de heipalen te beschermen tegen overmatige afkoeling gedurende de dormate periode. Een deken met een systeem erin waardoor vloeistof of lucht stroomt zou zo de energie kunnen opvangen. Hierna kan deze worden opgeslagen voor later gebruik of direct worden hergebruikt.

Een andere plek om te oogsten is bij de ventilatoren. Hier wordt een hoog debiet gegenereerd. Ze kunnen gebruikt worden om de (verwarmde) lucht langs een oogstopoppervlak te lijden. Dit vergt wel een aanpassing van het dak en de ventilatoren. Hiernaast is het de vraag of de ventilatoren de lucht niet te snel langs dit oppervlak zouden forceren. Als laatste zou er thermische energie in de de wanden geoogst kunnen worden. Met behulp van leidingen in een wand kan een vloeistof geleidelijk verwarmd worden waarna deze of hergebruikt wordt of opgeslagen wordt.

Phase changing materials (PCM) kunnen gebruikt worden om het aantal warme dagen te reduceren, waarbij de haltemperatuur boven de 23 °C stijgt. PCM's veranderen van vast naar vloeibaar bij een specifieke temperatuur. Voor deze faseverandering is thermische energie nodig. Wanneer ze later weer afkoelen en vast worden staan ze deze thermische energie weer af. Door PCM's in bijvoorbeeld wandelementen te gebruiken welke van fase veranderen bij 22 °C kan de piekwarmte in de hal worden gereduceerd.

4.5 DEELCONCLUSIE

Vanwege de relatief lage waarden van de temperaturen wordt geadviseerd om vooral naar preventieve maatregelen te zoeken. Wanneer toch iets met de thermische energie in de hallen wordt gedaan moet als eerste gezocht worden naar manieren waarop de warmte uit de heipalen kan worden geoogst om zodoende de thermische energie te hergebruiken.

5 DISCUSSIES

In dit hoofdstuk worden de gebruikte methodes en materialen geëvalueerd. Hierbij wordt ook de invloed van de methodes en de materialen op de conclusies aangehaald. Vervolgens wordt de betekenis van de deelconclusies kort besproken.

Voor de realisatie van het hoofddoel zijn verschillende methodes gebruikt. Elke onzoeksvraag vereiste een eigen aanpak. De vooraf gekozen methode om de ontwikkeling van thermische energie kwantitatief te berekenen middels een zelf te ontwikkelen model bleek te ambitieus. De metingen zijn echter wel verricht met deze methode in gedachten. Hierbij is het van belang om aan de rand van de heipalen te meten. De heipalen zullen in de kern echter hogere temperaturen bereiken dan aan de rand. Hierdoor is de daadwerkelijke hoeveelheid thermische energie welke vrij komt bij hydratatie van beton waarschijnlijk hoger dan in dit onderzoek aangetoond.

Naast de locaties in de heipalen waar gemeten is waren de metingen aan het beton onregelmatig. Vanwege de productiecycclus van het beton en het continu veranderen van de variabelen (onder andere het mengsel, de locatie, het tijdstip en duur van het storten, en de externe omstandigheden) is het onmogelijk geweest een compleet en volledig beeld te genereren van de warmte in het beton. In het meest ideale geval zou de temperatuur van het beton in elke mal dagelijks gemonitord dienen te worden.

De metingen van de haltemperatuur in dit onderzoek zijn niet geheel zonder problemen verlopen. Het programma waarmee de thermokoppel uitgelezen werd is tot tweemaal toe vast gelopen. Een geluk bij een ongeluk is dat dezelve dag de dataloggers zijn geïnstalleerd. Het is alleen wel spijtig dat de dataloggers niet eerder konden worden opgehangen door een gebrek aan bevestigingsmateriaal. In dit onderzoek is er voor gekozen om te werken met een gemiddelde temperatuur, onafhankelijk van de hoeveelheid en de plek van de sensoren. Hierdoor kunnen de resultaten van de metingen van de temperatuur in de hal een vertekend beeld geven.

Minder ernstige technische problemen waren er met het weerstation. Het is enkele malen voorgekomen dat de metingen vanwege een verslechterde receptie niet aan kwamen bij de ontvanger. Hierdoor ontbreekt er af en toe data. Het weerstation heeft echter een hoge meetfrequentie. Voor het onderzoek zijn de metingen gemiddeld per kwartier, uur of dag. Zodoende wordt de invloed van het ontbreken van enkele meetgegevens opgevangen.

Met behulp van de gevonden conclusies in dit verslag kan direct, met behulp van vervolgonderzoek of na verdieping in de maatregelen begonnen worden de thermische discrepanties in de productiehal te verminderen. Er zijn genoeg aanknopingspunten gevonden waarmee de IJB Groep aan de slag kan.

De temperatuur in de productiefaciliteiten van betonnen heipalen wordt overdag met name beïnvloed door factoren van buitenaf en 's avonds door de hydratatie van beton en de ventilatoren. Uit de meetdata is gebleken dat de dormante periode van het beton langer duurt dan gevonden in de literatuur. Hierdoor wordt de scheiding tussen overdag en 's avonds verder benadrukt. De temperatuurschommelingen als gevolg van de thermische energie welke uit de heipalen vrij komt was extremer verwacht. Veel energie uit de heipalen is via de lucht snel afgedragen aan de omgeving. Dit is waarschijnlijk een gevolg van de minimale isolatie van de productiefaciliteiten en het grote volume wat de ventilatoren afzuigen.

6 CONCLUSIES

Dit onderzoek is uitgevoerd met het volgende hoofddoel;

Het reduceren van temperatuurschommelingen in een productiehal voor heipalen door het voorstellen van fysieke maatregelen op basis van een thermische analyse.

Om het doel te realiseren zijn drie onderzoeksvragen opgesteld. Deze worden hieronder één voor één herhaald en beantwoord. Het antwoord op de eerste twee onderzoeksvragen geeft een antwoord op de hoeveelheid thermische energie welke vrij komt bij de productie van betonnen heipalen in de productiehallen van de IJB Groep. Het antwoord op de derde onderzoeksvraag geeft een antwoord op de manier waarop deze energie benut kan worden. Zo wordt door middel van beantwoording van de drie onderzoeksvragen het doel van dit onderzoek bereikt.

De eerste onderzoeksvraag ging over de hoeveelheid thermische energie welke beschikbaar komt bij de hydratatie van betonnen heipalen. Uit de metingen blijkt dat de betontemperatuur met gemiddeld 12.8 °C toe neemt en op doordeweekse dagen gemiddeld 17 uur en 46 minuten in de productiefaciliteiten verblijft. De dormante periode bedraagt gemiddeld 5 uur en 44 minuten. Zodoende komt er over een periode van 12 uur gemiddeld 544 kW aan energie vrij in de betonnen heipalen. Ofwel 23,5 GJ aan energie per productiedag.

De tweede onderzoeksvraag ging over de invloed van de natuurlijke omgeving op de thermische gesteldheid van de productiefaciliteiten voor heipalen. Uit de meetdata blijkt dat haltemperatuur gemiddeld 4.3 °C ±1.7 °C hoger ligt dan de buitentemperatuur. Het temperatuursverschil loopt daarbij 's avonds op tot gemiddeld 7.9 °C en is overdag het laagst met een gemiddelde waarde van 2.3 °C. Het verloop is hieronder nogmaals weergegeven. De temperatuur in de productiehallen neemt met gemiddeld 4.2 °C toe wanneer de zon op de productiehallen schijnt.

De gegevens uit de voorgaande onderzoeksvragen leveren handvaten op basis waarvan de derde onderzoeksvraag is beantwoord. Als antwoord op de vraag welke maatregelen er beschikbaar zijn om de thermische discrepanties te beperken danwel op te heffen zijn twee verschillende oplossingsrichtingen aangedragen. Ten eerste wordt het advies gegeven om preventieve maatregelen te nemen. Deze beïnvloeden de bronnen welke de thermische energie leveren of juist onttrekken aan de productiehallen. Als tweede wordt het advies gegeven om reactief de betontemperatuur te oogsten. Het beton is de grootste potentiële bron van energie welke benut kan worden. Voor het oogsten van de warmte zouden bijvoorbeeld de mallen gebruikt kunnen worden of afdekmaten zoals die welke nu in de winter gebruikt worden.

7 AANBEVELINGEN

In dit hoofdstuk worden enkele aanbevelingen gedaan voor de IJB Groep en voor eventuele vervolgonderzoeken. De aanbevelingen voor de IJB Groep hebben betrekking op de te nemen maatregelen of de richting waarin maatregelen gezocht dienen te worden. De aanbevelingen voor een vervolgonderzoek richten zich op onderbelichte delen in dit onderzoek.

Ik zou de IJB Groep willen adviseren om hoe dan ook verder te gaan met het zoeken naar duurzame toepassingen en maatregelen. Voor het reduceren van de hoge temperaturen in de productiehallen lijkt mij het wit schilderen van het dak een goedkope en makkelijk te realiseren optie.

Daarnaast zou ik hen willen adviseren om de meetdata te gebruiken bij het inwinnen van advies bij gespecialiseerde bedrijven. Dergelijke bedrijven kunnen exact doorrekenen hoeveel een maatregel zou opleveren. Desbetreffende bedrijven hebben ook gespecialiseerde kennis in huis om de maatregelen te selecteren en toe te passen. Hierbij adviseer ik de IJB Groep om vooral naar manieren te zoeken waarbij de energie uit de heipalen kan worden geoogst. De heipalen lijken namelijk de voornaamste bron van thermische energie te zijn welke nu nog onbenut is.

Het bepalen van de hoeveelheid thermische energie welke vrij komt bij hydratatie van beton is in dit onderzoek bepaald aan de hand van de soortelijke massa en warmte. Zodoende is er een schatting gemaakt van de hoeveelheid thermische energie. Er zou ook een methode ontwikkeld kunnen worden waarmee de afdracht van thermische energie uit beton aan de omgeving berekend kan worden. Wanneer de temperatuur van het beton en de omgeving bekend zijn, alsmede de samenstelling van de mal, dan zou de overdracht van thermische energie aan de omgeving middels convectie ook berekend kunnen worden. Dit kan leiden tot een model waarmee de warmteafdracht uit beton kan worden voorspeld.

In dit onderzoek zijn als externe factoren de buitentemperatuur en de zonnestraling meegenomen. Andere factoren van de natuurlijke omgeving zijn niet behandeld. Het kan interessant zijn om de invloed van deze factoren alsnog te onderzoeken. Hierbij lijkt de invloed van de wind de belangrijkste. Vanwege het grote contactoppervlak met een productiefaciliteit kan wind ervoor zorgen dat natuurlijke convectie om slaat naar een turbulente convectie. De warmteoverdracht verandert hierdoor dramatisch. Eventuele openstaande deuren en ramen zorgen voor een luchtstroom in de productiefaciliteit van beton. Hierdoor kan ook de convectie van het beton aan de lucht in de hal omslaan van natuurlijke naar gedwongen. Hoe het beton hierop reageert en de mate waarop dit de temperatuursontwikkeling in het beton beïnvloed zijn allemaal onderzoeken welke interessant zijn.

In de derde onderzoeksvraag in dit rapport worden enkele voorstellen gedaan voor maatregelen welke de thermische discrepanties in een productiehal van betonnen heipalen kunnen verminderen. Hierbij is slechts een korte verkenning gemaakt wat betreft de maatregelen. Er zou een heel (bachelor)onderzoek aan het onderwerp kunnen worden geweid. Daarnaast kunnen de maatregelen ook worden doorgerekend.

Tenslotte verdient het onderwerp van warmteterugwinning uit beton in het algemeen meer aandacht en onderzoek. In dit onderzoek is het potentieel aan thermische energie uit beton naar voren gekomen. Wanneer deze energie op een rendabele manier kan worden geoogst en hergebruikt is de productie van beton niet alleen een stuk rendabeler, maar vooral ook duurzamer. De technieken welke hiervoor gebruikt worden zijn waarschijnlijk op vele andere plekken toepasbaar. Beton is in vele gevallen al het fundament waarop de wereld gebouwd is en levert de noodzakelijke ondersteuning haar overeind te houden. Meer onderzoek naar warmteterugwinning uit beton kan naast ondersteuning de wereld ook in beweging zetten en haar vooruit helpen.

BIBLIOGRAFIE

BASF. (sd). *Glenium ACE 30 con.30%*. Opgeroepen op 05 17, 2012, van BASF: http://www.basf-cc.be/nl/Producten/Hulpstoffen/Hulpstoffenvoorbeton/Waterdichtingsmiddelenindemassa/GleniumAce30con30/Documents/PN_GLENIUM%20ACE%2030%20CON%2030.pdf

CE Delft/ECN/DCMR. (2011). *Energiebesparingspotentieel onder de Wet milieubeheer*. Delft: CE Delft.

Coley, D., & Kershaw, T. (2010). Changes in internal temperatures within the built environment as a response to a changing climate. *Building and Environment* , 89-93.

Davis Instruments. (2012, 04 17). *Wireless Vantage Pro2 (tm)*. Opgehaald van Davisnet: http://www.davisnet.com/weather/products/weather_product.asp?pnun=06152

de Haan, F. (2012, 04 03). Eerste overleg met de IJB Groep. (H. Taekema, Interviewer)

de Vree, J. (2012). *Dormante periode*. Opgeroepen op 07 05, 2012, van Joost de Vree: http://www.joostdevree.nl/shtmls/dormante_periode.shtml

de Vree, J. (2012, 04 16). *Hydratatie*. Opgehaald van Joost de Vree's bouwencyclopedie: <http://www.joostdevree.nl/shtmls/hydratatie.shtml>

ENCI. (2011). *Betonpocket 2012*. 's-Hertogenbosch: Bowprint.

ENCI. (2001, 12). *Warmteontwikkeling van cement en beton*. Opgehaald van Joost de Vree: http://www.joostdevree.nl/bouwkunde2/jpgb/beton_warmteontwikkeling_hydratatie_www_enci_nl.pdf

Fluke. (2012). *Fluke 62 Mini Infrared Thermometer, Infrared Thermometer Gun*. Opgeroepen op 06 01, 2012, van Fluke: <http://www.fluke.com/fluke/usen/Electrical-Test-Tools/Thermometers/Fluke-62.htm?PID=56096>

Ghojel, J. (2002). Application of Inverse Analysis to Thermal Contact Resistance between very Rough Nonconforming Surfaces. *Inverse Problems in Engineering* , 323-334.

IJB Groep. (2012). *Producten - Heipalen*. Opgeroepen op 07 02, 2012, van IJB Groep: <http://ijbgroep.nl/producten-en-diensten/heipalen>

IJB Mortel Lemmer. (2012, 05 22). Korrelverdeling en betonsamenstelling. Lemmer.

IkLeefGroen. (2010). *R-waarde*. Opgeroepen op 07 07, 2012, van Ik leef groen: <http://www.ikleefgroen.nl/isolatie/r-waarde/>

Janssen, H., Blocken, B., & Carmeliet, J. (2007). onservative modelling of the moisture and heat transfer in building components under atmospheric excitation. *International Journal of Heat and Mass Transfer* , 1128-1140.

KNMI. (2012). *Daggegevens van het weer in Nederland - Stavoren*. Opgeroepen op 07 14, 2012, van <http://www.knmi.nl/klimatologie/daggegevens/download.html>

Kristl, Ž., Košir, M., Lah, M. T., & Krainer, A. (2008). Fuzzy control system for thermal and visual comfort in building. *Renewable Energy* , 694-702.

Lascar Electronics. (sd). *EL-USB-1-PRO*. Opgeroepen op 06 12, 2012, van Lascar Electronics: <http://www.lascarelectronics.com/temperaturedatalogger.php?datalogger=382>

Long, C., & Sayma, N. (2009). *Heat Transfer*. London: BookBoon.

Ministerie van Sociale Zaken en Werkgelegenheid. (sd). *Wat is te warm?* Opgeroepen op 07 14, 2012, van Arboportaal.nl: <http://www.arboportaal.nl/vragen/wat-is-te-warm.html?onderwerpen/fysische-factoren/klimaat>

Nedri. (2010, 07 22). *Voorspanstaal Strengen*. Opgeroepen op 07 02, 2012, van Nedri: <http://www.nedri.nl/docs/voorspanstaal%20streng.pdf>

Norbruis, P. (2012, 04 17). Procesbesprekingen. (H. Taekema, Interviewer)

PicoTech. (sd). *Precautions and Considerations for Using Thermocouples*. Opgeroepen op 05 28, 2012, van PicoTech: <http://www.picotech.com/applications/thermocouple.html>

Reinhardt, H. (1998). *Beton als constructiemateriaal*. Delft: Delftse Universitaire Pers.

ScotAsh. (2012). *Properties of Ash*. Opgeroepen op 06 22, 2012, van ScotAsh: http://www.scotash.com/more_about_ash.html

Sear, L. K. (2001). *Properties and Use of Coal Fly Ash: A Valuable Industrial By-product*. London: Ice Publishing.

Sloet, P. (2012, 04 18). *Bijlage 1 - Extra info Beton*. Opgehaald van Scheikunde in bedrijf: <http://www.scheikundeinbedrijf.nl/content/Modules/Modulenaam/Files/Bijlage%201%20Extra%20info%20beton.pdf>

Stoeten, C. (2012). *Stabilized strands for prestressed concrete*. Opgeroepen op 07 05, 2012, van Voorspanstaal: <http://voorspanstaal.nl/strengen.html>

The Engineering ToolBox. (2012). *Air Properties*. Opgeroepen op 06 02, 2012, van Engineering ToolBox: http://www.engineeringtoolbox.com/air-properties-d_156.html

USAID. (2007, 09 27). *An Introduction To Cool Roof*. Opgeroepen op 07 14, 2012, van Energy Seal: http://energy-seal.com/UserDyn/ACS/pdfs/crr_cool_roof_technology_guide.pdf

Velux. (sd). *Velux Lichtkoepel*. Opgeroepen op 07 14, 2012, van Lichtkoepel: <http://www.lichtkoepel.com/velux-lichtkoepel>

Verboom Techniek. (2012, 04 17). *Infoblad MC21M*. Opgehaald van Verboom Techniek: <http://www.verboomtechniek.nl/wp-content/uploads/Infoblad-MC21M.pdf>

Wolfram Alpha. (2012). *Thermal conductivity of moist air*. Opgeroepen op 06 3, 2012, van Wolfram Alpha: http://www.wolframalpha.com/input/?i=thermal+conductivity+of+moist+air&f1=25+%C2%B0C&f=ThermalConductivityMoistAir.Tdb_25+%C2%B0C&f2=1+bar&f=ThermalConductivityMoistAir.P_1+bar&f3=50+%25&f=ThermalConductivityMoistAir.RH_50+%25&a=*FVarOpt.1-_*ThermalCond

WolframAlpha. (2012). *Viscosity of moist air*. Opgeroepen op 01 06, 2012, van Wolfram Alpha: <http://www.wolframalpha.com/input/?i=viscosity+of+moist+air>

BIJLAGE A – MEETCODEX

NAAM		CODE
Betonsamenstelling (C-waarde)		
105 C...		C...
163 C35/45 XC4 XA1 B52 f34 Polyflow		C35/45
167 C45/55 XC4 XA2 B52 f34 Polyflow		C45/55
Malgrootte (xMalprofiel)		
180x180		x180
220x220		x220
250x250		x250
290x290		x290
290-550x290-550		y###
Hoeveelheid banen (totaal-baan)		
8 banen		
	8 banen, eerste baan	8-1
	8 banen, tweede baan	8-2
	8 banen, derde baan	8-3
	8 banen, vierde baan	8-4
10 banen		
	10 banen, eerste baan	10-1
	10 banen, tweede baan	10-2
	10 banen, derde baan	10-3
	10 banen, vierde baan	10-4
	10 banen, vijfde baan	10-5
12 banen		
	12 banen, eerste baan	12-1
	12 banen, tweede baan	12-2
	12 banen, derde baan	12-3
	12 banen, vierde baan	12-4
	12 banen, vijfde baan	12-5
	12 banen, zesde baan	12-6
Locatie (BHd)		
Breedte		
	Outer	O
	Middle	M
	Inwards	I
Hoogte		
	Top	T
	Center	C
	Bottom	B
Diepte		
	Kop van de heipaal	.
	Één breedte diep	i
	Twee breedtes diep	ii
	Drie breedtes diep	iii
Uitwerking:	<i>betonsamenstelling_malgrootte_baannummer_locatie</i>	
Voorbeeld:	<i>C35/45 x220 10-4 OCi</i>	
	<i>C45/55 x180 12-1 MBii</i>	