

BETON IN DE KIST

In dit hoofdstuk wordt een aantal aspecten besproken, die van belang zijn bij het storten en verharderen van het beton.

Voor het in model brengen van het beton moet gebruik worden gemaakt van mallen en bekistingen. De vloeibare betonspecie oefent een kracht uit op die mallen en bekistingen. Deze moeten zodanig zijn ontworpen, dat ze die kracht kunnen weerstaan. Een taak voor de constructeur van de mal of bekisting, maar de betontechnoloog kan hierop invloed uitoefenen door keuzes in de betonsamenstelling.

Na het storten zal het beton gaan verharderen als gevolg van de hydratatie van het cement. Hierdoor wordt het beton warmer, wat tot gevolg heeft dat de sterkte toeneemt. Er wordt stilgestaan bij de relatie tussen de temperatuur en de sterkte van het beton.

De temperatuurveranderingen in het beton kunnen leiden tot temperatuurspanningen. Met behulp van rekenprogramma's is het temperatuurverloop en daarmee het spanningsverloop in de constructie te voorspellen. Daarmee is men in staat effectieve maatregelen te nemen om die spanningen te beperken of te voorkomen.

Tijdens het verharderen van het beton moet worden voorkomen dat dit verhardingsproces wordt verstoord. Door middel van een juiste manier van nabehandelen kan het hydratatieproces zo optimaal mogelijk plaatshebben. Alles is daarbij natuurlijk gericht op het voorkomen van vochtverlies uit het beton.

En als het beton uiteindelijk voldoende is verhard, kan de bekisting worden verwijderd of kan het element uit de mal worden gehesen. Daarbij mogen er geen beschadigingen optreden en/of moet het element sterk genoeg zijn om zijn eigen gewicht te kunnen dragen.

INHOUDSOPGAVE

Pag.

4.1	Horizontale betonspeciedruk	4-3
4.1.1	Inleiding.....	4-3
4.1.2	Horizontale belasting algemeen.....	4-4
4.1.3	Invloedsfactoren	4-5
4.1.4	Betontechnologische aspecten.....	4-7
4.2	Gewogen rijpheid van beton.....	4-7
4.2.1	Inleiding.....	4-7
4.2.2	Gewogen rijpheid	4-8
4.2.3	Relatie tussen gewogen rijpheid en druksterkte	4-9
4.2.4	Sterkte uit temperatuurverloop	4-12
4.2.5	Rekenvoorbeeld.....	4-12
4.3	Temperatuurbeheersing	4-14
4.3.1	Hydratatiewarmte	4-14
4.3.2	Adiabatisch temperatuurverloop.....	4-15
4.3.3	Temperatuurverloop in constructie.....	4-17
4.3.4	Temperatuurgradiënten.....	4-18
4.3.5	Voorbeeld van wand op vloer.....	4-19
4.3.6	Verhardingsbeheersing	4-21
4.4	Nabehandeling	4-21
4.4.1	Algemeen.....	4-21
4.4.2	Nabehandelen	4-22
4.4.3	Nabehandelingsklassen.....	4-23
4.4.4	Nabehandelingsduur	4-23
4.5	Ontkisten	4-24
4.5.1	Algemeen.....	4-24
4.5.2	Tijdstip van ontkisten	4-24
4.5.3	Methoden voor bepalen gemiddelde druksterkte voor ontkisten.....	4-25
4.5.4	Tijdstip van ontkisten bepaald uit de verhardingstijd.....	4-26

4.1 Horizontale betonspeciedruk

4.1.1 Inleiding

Beton kan in elke gewenste vorm worden verwerkt. Voor een bepaalde vorm moet een mal of een bekisting worden gemaakt, waarin de betonspecie, met de bijbehorende wapening, kan worden gestort en verdicht. Mallen zijn vooral in gebruik in de prefab-betonindustrie, terwijl bekistingen meestal op de bouwplaats worden gebruikt. Een opvallend verschil in het vullen van een mal of een bekisting is dat een mal meestal van geringe dikte en hoogte is (zoals voor het maken van gevelementen), terwijl een bekisting een zeer grote hoeveelheid beton kan omhullen met vaak de nodige meters hoogte.

De betonspecie oefent een druk uit op een mal of bekisting, die als gevolg van die druk zou kunnen vervormen. Dat is meestal niet de bedoeling, vandaar dat mallen en bekistingen een zekere sterkte en stijfheid moeten hebben. Het ontwerpen van een mal of bekisting is een taak van de ontwerper, maar bepaalde uitgangspunten van het ontwerp kunnen door de betonsamenstelling worden beïnvloed. Het is daarom van belang dat die uitgangspunten bij de betontechnoloog bekend zijn. In deze cursus wordt daarom aandacht besteed aan de invloedsfactoren op de betonspeciedruk.

Om een idee te krijgen hoe de speciedruk werkt, is een vergelijking gemaakt met een waterbak, gevuld met leidingwater. De druk die op de bodem van de waterbak wordt uitgeoefend, is afhankelijk van de hoogte van het water dat in de bak staat. Per meter hoogte is de massa die door de bodem wordt gedragen 1000 kg/m^2 . Deze massa oefent een druk uit van $1000 \times 10 = 10.000 \text{ N/m}^2$ of 10 kN/m^2 . Bij 2 m waterdiepte is de druk $2 \times 10 = 20 \text{ kN/m}^2$.

Op de wanden van de waterbak wordt ook een druk uitgeoefend, die verloopt met de hoogte. Op het laagste punt van de wand is de druk gelijk aan de druk op de bodem. Het verloop van de druk kan worden berekend met de formule:

$$p = 0,01 \times \rho_a \times h \text{ in kN/m}^2$$

waarin:

p is de horizontale waterdruk in kN/m^2

ρ_a is de volumieke massa van het water in kg/m^3

h is de waterdiepte in m

De druk die door het water op een lichaam (dus ook op een wand) wordt uitgeoefend, heet de hydrostatische druk. Deze werkt in alle richtingen en is recht evenredig met de volumieke massa en de waterdiepte, zoals ook uit de formule blijkt.

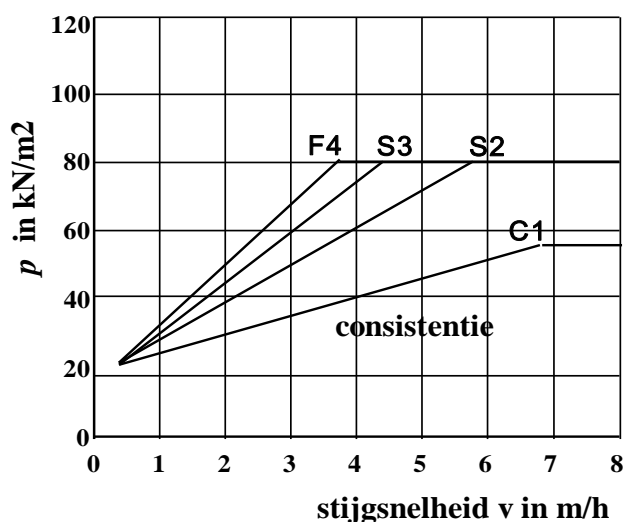
Als betonspecie in (een mal of) een bekisting wordt gestort, zal de specie zich afhankelijk van de mate van plasticiteit als een vloeistof kunnen gedragen. Dat betekent, dat ook met betonspecie een hydrostatisch drukverloop kan worden verwacht. Maar betonspecie bestaat voornamelijk uit korrels (van verschillende grootte en dichtheid) met daaromheen een bepaalde hoeveelheid water. Die korrels zullen bij vloeibare species weinig invloed hebben, maar bij aardvochtige species juist zeer veel. In het laatste geval nemen de korrels een deel van de druk op, waardoor de hydrostatische druk lager wordt. De mate van plasticiteit bepaalt de grootte van de maximale horizontale belasting.

Een ander fenomeen dat een belangrijke rol speelt bij betonspecie, is de chemische reactie van het cement met het water. Zodra de binding van het cement is begonnen, is de specie niet meer vervormbaar. De betonspecie kan zich dan niet meer als een vloeistof gedragen.

Voor het berekenen van de horizontale belasting van het beton op een bekisting zijn inmiddels vele theorieën ontwikkeld. Daarin kunnen vele invloedsfactoren worden meegenomen. Voor deze cursus wordt uitgegaan van de methode zoals die in de NEN 6722¹ is vastgelegd. Van de betontechnoloog wordt niet verwacht dat hij deze methode toepast. Hij moet vooral weten waar hij met de betonsamenstelling invloed kan uitoefenen op de grootte van de speciedruk. Ter illustratie is een voorbeeld opgenomen, dat echter niet door de betontechnoloog moet kunnen worden toegepast.

4.1.2 Horizontale belasting algemeen

De maximale horizontale belasting ten gevolge van de betonspecie moet volgens NEN 6722 met behulp van figuur 4.1 worden bepaald. Daarbij wordt de belasting bepaald bij een gegeven consistentie en stijgsnelheid.



Figuur 4.1 Grafiek voor de bepaling van de maximale horizontale belasting ten gevolge van betonspecie.

De grafiek is gebaseerd op de volgende gegevens:

- de betonspecie wordt verdicht met behulp van trilnaalden, tot op een diepte van maximaal 1 m;
- de temperatuur van de betonspecie en de buitentemperatuur zijn op het moment van storten 15 °C;
- er zijn geen vertragers of hulpstoffen met vertragende werking gebruikt;
- de volumieke massa van de betonspecie (ρ_a) is 2400 kg/m³.

Als van de hierboven genoemde gegevens wordt afgeweken, moet de in de grafiek gevonden waarde worden aangepast. In de volgende paragrafen wordt hierop nader ingegaan. De maximale horizontale belasting behoeft echter nooit een waarde groter dan de hydrostatische druk te worden, zoals berekend met de formule van 4.1.1.

Voor het ontwerpen van bekistingen voor kolommen worden andere formules gebruikt, omdat daarbij – in verband met de geringe afmetingen – met silowerking kan worden gerekend. Hierop wordt in deze cursus niet ingegaan.

¹ Binnenkort verschijnt naar verwachting een herziene versie van de NEN 6722, de NEN 8670, als Nationale bijlage bij de Europese Uitvoeringsnorm NEN-EN 13670.

4.1.3 Invloedsfactoren

Andere wijze van verdichten

Indien wordt gewerkt met trilapparatuur die op de buitenzijde van de bekisting wordt aangebracht, moet over de hoogte waarop de trillers werkzaam zijn met een hydrostatische drukverdeling worden gerekend.

Indien met de trilnaad dieper dan 1 m wordt getrild, moet over het diepere gedeelte eveneens met een hydrostatische drukverdeling worden gerekend.

Andere temperatuur van de betonspecie

Indien de temperatuur van de betonspecie tijdens het storten lager is dan 15 °C of indien deze temperatuur niet gehandhaafd kan blijven, al dan niet door bewust koelen van het beton, moet de volgens paragraaf 4.1.2 gevonden horizontale belasting ten gevolge van de betonspecie voor elke °C onder 15 °C met 3% worden verhoogd.

Tenzij een vertrager wordt gebruikt mag, indien de temperatuur van de betonspecie tijdens het storten hoger dan 15 °C is, de horizontale belasting ten gevolge van de betonspecie voor elke °C boven 15 °C met 3% worden verminderd, met een maximum van 30 %. Daarbij moet deze hogere temperatuur tot het tijdstip van het einde van de binding gehandhaafd blijven. De gevonden correctiecoëfficiënt moet bij een eventuele coëfficiënt volgens volgende paragraaf worden opgeteld.

Bedenk, dat de temperatuur van betonspecie het tijdstip van begin van de binding, en daardoor de horizontale belasting door de betonspecie, beïnvloedt.

Andere buitentemperatuur

Indien de buitentemperatuur lager dan 15 °C is, moet de volgens paragraaf 4.1.2 gevonden horizontale belasting ten gevolge van de betonspecie voor elke °C onder 15 °C met 3% worden verhoogd, tenzij maatregelen zijn genomen om de temperatuur van het beton constant te houden. De horizontale belasting ten gevolge van de betonspecie mag niet op grond van het verwarmen van de bekisting worden verminderd.

Indien de buitentemperatuur hoger dan 15 °C is, mag de invloed hiervan op de horizontale belasting ten gevolge van de betonspecie niet in rekening worden gebracht. Ook deze correctiecoëfficiënt moet bij een eventuele coëfficiënt volgens vorige paragraaf worden opgeteld.

Gebruik van vertragers of hulpstoffen met vertragende werking

Indien een vertrager of een hulpstof met vertragende werking wordt gebruikt, moet de volgens paragraaf 4.1.2 gevonden horizontale belasting ten gevolge van de betonspecie met de in tabel 4.1 gegeven waarde worden vermenigvuldigd, nadat de eventuele correctiecoëfficiënten volgens de vorige paragrafen zijn verwerkt.

Tabel 4.1 Vermenigvuldigingsfactor bij gebruikmaking van vertragers of hulpstoffen met vertragende werking.

Consistentieklasse	Vermenigvuldigingsfactor	
	5 h vertraging	15 h vertraging
S2	1,15	1,45
F3 of S3	1,25	1,80
F4 of S4	1,40	2,15

De invloed van andere hulpstoffen zoals plastificeerders en luchtbelvormers wordt door middel van de in figuur 4.1 aan te houden consistentie verwerkt.

Andere volumieke massa van betonspecie

Indien de volumieke massa anders dan 2400 kg/m^3 is, moet de volgens paragraaf 4.1.2 gevonden horizontale belasting ten gevolge van de betonspecie, waarin voorgaande correctiecoëfficiënten zijn verwerkt, worden vermenigvuldigd met de factor $\frac{\rho_a}{2400}$.

Voorbeeld:

Bepaling van de maximale horizontale belasting ten gevolge van de betonspecie voor een 3 m hoge wandbekisting.

Gegeven:

stijgsnelheid v	2 m/h
consistentieklasse van de betonspecie	S2
temperatuur van de betonspecie	12 °C
buitentemperatuur	10 °C
vertragingstijd van de gebruikte vertrager	10 h
volumieke massa van het beton ρ_a	2000 kg/m^3

Uit de grafiek volgt bij $v = 2 \text{ m/h}$ en consistentieklasse S2 dat $p_{\max} = 38 \text{ kN/m}^2$.

Verwerking van de coëfficiënten:

– temperatuur van de betonspecie:	$3 \times 3 \% =$	9 %
– buitentemperatuur:	$5 \times 3 \% =$	<u>15 %</u>
– totaal		24 %

p_{\max} wordt in dit geval $1,24 \times 39 = 48,4 \text{ kN/m}^2$.

Verwerking van de vermenigvuldigingsfactor voor de vertrager:

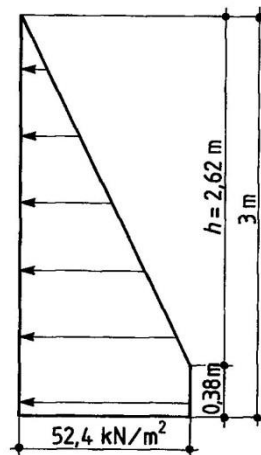
$$\frac{1,15 + 1,45}{2} \times 48,4 \text{ kN/m}^2 = 62,9 \text{ kN/m}^2$$

Verwerking van de andere volumieke massa van de betonspecie:

$$\frac{2000}{2400} \times 62,9 \text{ kN/m}^2 = 52,4 \text{ kN/m}^2$$

De hydrostatische druk is: $p = 0,01 \times 2000 \times 3 = 60 \text{ kN/m}^2$.

De aan te houden waarde is dus: $p_{\max} = 52,4 \text{ kN/m}^2$ (zie ook figuur 4.2).



Figuur 4.2 Verloop van de horizontale belasting ten gevolge van de betonspecie over de wandhoogte.

4.1.4 Betontechnologische aspecten

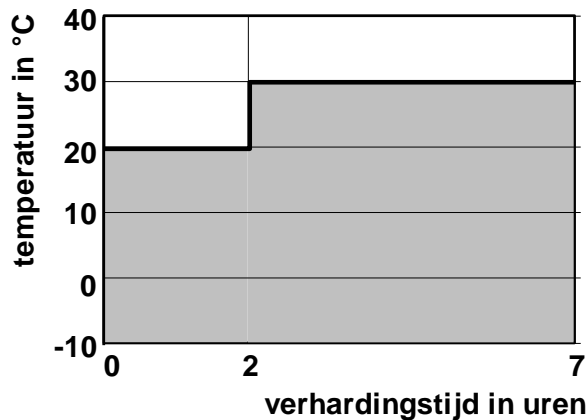
Het berekenen van de horizontale betonspeciedruk is een taak voor de ontwerper van de bekisting. Belangrijk is wel, dat hij op de tekening laat vastleggen welke uitgangspunten hij heeft gehanteerd. De uitvoerder op de bouwplaats of in de fabriek kan dan beoordelen of hij bij veranderde omstandigheden maatregelen moet nemen. Eén van die maatregelen kan zijn dat in de winter, als de buitentemperatuur beduidend lager is, de stijgsnelheid van de betonspecie moet worden verlaagd. In dat geval kan de keuze voor een extra plastificeerder erg ongunstig zijn. De betontechnoloog moet daarentegen weten, dat hij niet zonder overleg met de uitvoerder de samenstelling van de specie kan wijzigen. Het gebruik van een plastificeerder of een vertrager kan niet zonder instemming van de uitvoerder. Om het stortproces te versnellen is het gebruik van een cement met een hogere sterkteklasse te overwegen.

4.2 Gewogen rijpheid van beton

4.2.1 Inleiding

De sterkteontwikkeling van beton wordt beïnvloed door het verloop van de temperatuur van het beton. Bij een hoge temperatuur (zoals in de zomer) is het beton eerder op sterkte dan bij een lage temperatuur (zoals in de winter). Het is dus begrijpelijk dat vele onderzoekers gezocht hebben naar de relatie tussen het verloop van de temperatuur en het verloop van de sterkte. Deze relatie is door Saul de rijpheid van het beton genoemd.

Volgens de benadering van Saul is de rijpheid het product van de verhardingstemperatuur gemeten vanaf $-10\text{ }^{\circ}\text{C}$ en de verhardingstijd in uren. De eenheid is dus $^{\circ}\text{Ch}$ (graad-uur). Dus als het beton gedurende 2 uur verhardt bij $20\text{ }^{\circ}\text{C}$ en daarna gedurende 5 uur bij $30\text{ }^{\circ}\text{C}$, bedraagt de rijpheid $2 \times 30 + 5 \times 40 = 260\text{ }^{\circ}\text{Ch}$ (figuur 4.3).



Figuur 4.3 Rijpheid volgens Saul.

Het is duidelijk dat beton van dezelfde samenstelling met een hogere rijpheid een hogere sterkte zal ontwikkelen, maar inmiddels is gebleken dat de betonsterkte toch niet betrouwbaar te voorspellen is op basis van de benadering van Saul. In twee aspecten blijkt deze regel niet te voorzien en is daardoor ondeugdelijk om bijvoorbeeld een nauwkeurige ontkistingssterkte te bepalen:

- hogere temperaturen hebben een grotere invloed op de sterkteontwikkeling dan de regel aangeeft;
- het ene cement is qua sterkteontwikkeling gevoeliger voor veranderingen in de temperatuur dan het andere. Het verschil in sterkteontwikkeling tussen hoogoven- en portlandcement bij hoge, maar ook bij lage temperaturen is daarvan een voorbeeld.

Er bestaan rijpheidsregels waarin beide effecten wel worden meegenomen. De met behulp van deze regels berekende rijpheid wordt de *gewogen rijpheid* genoemd. Het woord 'gewogen' heeft betrekking op het feit dat bij het berekenen van de rijpheid de invloed van temperaturen hoger dan 20 °C relatief zwaarder weegt dan die van lagere. In Nederland wordt gewerkt met een methode die door R. de Vree is afgeleid van de rijpheidsregel van Papadakis en Bresson. De methode is bruikbaar voor het temperatuurgebied van 5 °C tot circa 80 °C.

4.2.2 Gewogen rijpheid

Voor het werken met de methode van de gewogen rijpheid is vele jaren gebruik gemaakt van CUR-Aanbeveling 9. Inmiddels is de aanbeveling omgezet in de norm NEN 5970.

De gewogen rijpheid kan worden berekend met de formule

$$R_g = 10 \times \frac{(C^{(0,1T-1,245)} - C^{-2,245})}{\ln C}$$

Hierin is:

R_g de gewogen rijpheid in °Ch over een periode van 1 uur;

T de specietemperatuur in °C;

C een factor die de temperatuurgevoeligheid van het cement vertegenwoordigt.

De waarde van de factor C is afhankelijk van het gebruikte cement. Over het algemeen hebben een portland- en een portlandvliegascement een C -waarde van ongeveer 1,25. Voor

een hoogovencement is deze waarde afhankelijk van het klinkergehalte en kan variëren tussen 1,35 en 1,65. Een C -waarde van 1,65 hoort bij een hoogovencement met 20 à 25 % klinker.

In de praktijk wordt gebruik gemaakt van een tabel waarin per uur de rijpheid is berekend als functie van de temperatuur variërend van 1 tot 95 °C bij een C -waarde variërend van 1,05 tot 1,95. Tabel 4.2 is overgenomen uit NEN 5970 en is in dit dictaat beperkt tot een maximum van 55 °C en $C = 1,80$ (in de verstrekte "Algemene Gegevens Betontechnologie" is de gehele tabel tot 95 °C opgenomen en $C = 1,95$).

De gewogen rijpheid kan worden berekend uit het verloop van de temperatuur van het beton in de tijd. Het meten van de temperatuur volstaat dus om de gewogen rijpheid op een willekeurig tijdstip te bepalen. De industrie heeft hierop ingespeeld door een rijpheidscomputer te ontwikkelen. Dit is een apparaat waarmee de temperatuur constant wordt gemeten. Na het instellen van de C -waarde van het gebruikte cement kan op elk moment de gewogen rijpheid worden afgelezen.

4.2.3 Relatie tussen gewogen rijpheid en druksterkte

Een gemeten of berekende rijpheid van beton zegt nog niets over de druksterkte van het beton. Er moet dus ook informatie over de sterkteontwikkeling van dat beton bij een bekend temperatuurverloop in de tijd aanwezig zijn.

Naast de temperatuur en de gebruikte cementsoort zijn er andere factoren die de sterkteontwikkeling beïnvloeden zoals de water-cementfactor.

Bijvoorbeeld: beton met een lage water-cementfactor zal bij elke temperatuur een hogere sterkte hebben dan beton met een hoge water-cementfactor. Deze factoren zijn niet in de formule van de gewogen rijpheid opgenomen. Dat is ook de reden dat een ijkgrafiek geldig is voor één bepaalde betonsamenstelling.

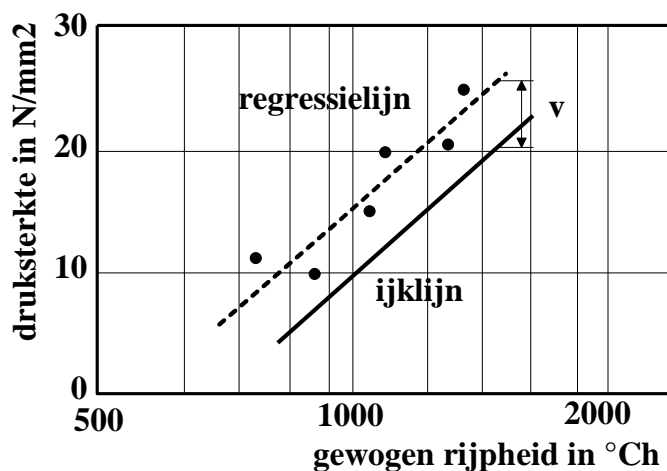
Bij gebruik van de methode van gewogen rijpheid voor het bepalen van de sterkte van jong beton, moet daarom altijd worden uitgegaan van een bekende relatie tussen verhardingstijd, temperatuur en de sterkteontwikkeling van het beton.

Uit deze gegevens kan dan een grafiek worden getekend die de relatie tussen de gewogen rijpheid en de sterkte van dat beton aangeeft.

Deze grafiek wordt *ijkgrafiek* genoemd (figuur 4.4). Op de x -as wordt de logaritme van de gewogen rijpheid uitgezet en op de y -as de betonsterkte. Het verband tussen de sterkteontwikkeling van jong beton en de logaritme van de gewogen rijpheid is meestal weer te geven als een rechte lijn. We maken een ijkgrafiek voor een nieuwe betonsamenstelling door vijf kubusmallen met betonspecie direct na het vullen in de waterbak bij 20 °C te bewaren. De volgende dag kunnen de mallen worden ontlast, waarna de kubussen direct weer in de waterbak worden geplaatst. Op verschillende tijdstippen kan van één kubus de kubusdruksterkte te bepalen.

Op het tijdstip dat de eerste kubus wordt beproefd, heeft het beton in die kubus een bepaalde rijpheid en sterkte bereikt. De gewogen rijpheid kan dan worden berekend op grond van de verstreken tijd, de temperatuur (van het water en dus ook van de kubus) en de C -waarde van het gebruikte cement. De sterkte wordt bepaald door de kubus op druksterkte te beproeven. Door de volgende kubus enige tijd later te beproeven, vinden we een hogere druksterkte en berekenen we een hogere gewogen rijpheid. De wachttijd tussen de

verschillende kubussen moeten we zo kiezen, dat de druksterkten goed verdeeld in het gewenste sterktebereik liggen.



Figuur 4.4 Voorbeeld van een ijkgrafiek.

Op grond van de vijf druksterkten en de vijf gewogen rijpheden kunnen we de regressielijn tekenen. De regressielijn is de rechte lijn die het dichtst de gevonden waarden benadert. Deze lijn kan worden gezien als de gemiddelde waarde van de meetresultaten.

Maar om een veilige voorspelling van de sterkte te kunnen doen moet evenwijdig aan de regressielijn de ijklijn worden getrokken, die lager ligt dan de regressielijn en over een bepaalde waarde is verschoven. In NEN 5970 is aangegeven dat die verschuiving afhankelijk is van de spreiding van het productieproces van de leverancier. De waarde waarover we de lijn moeten verschuiven wordt berekend met de formule:

$$v = a \times s$$

waarin:

v = mate van verschuiving in N/mm^2 ;

a = overeen te komen constante, afhankelijk van de omstandigheden;

s = standaardafwijking van de resultaten.

Het sterktebereik van één ijkgrafiek moet bij voorkeur niet meer dan 8 N/mm^2 hoger of lager dan de beoogde waarde bedragen. Een voorbeeld: als mag worden voorgespannen bij 30 N/mm^2 , kiezen we bij voorkeur een ijkgrafiek met een sterktebereik tussen 22 en 38 N/mm^2 .

Meestal wordt voor het beproeven van de kubussen gekozen voor 1, 2, 3, 4 en 7 dagen.

Als betonspecie waarvoor een ijkgrafiek is gemaakt, op de bouwplaats of in de fabriek wordt verwerkt en men begint direct na het storten de specietemperatuur te meten, kan op elk moment de gewogen rijpheid worden berekend en dus de betonsterkte met behulp van de ijkgrafiek worden afgelezen.

De C -waarde van een cement kan worden opgevraagd bij de cementfabrikant. In NEN 5970 is opgenomen hoe de C -waarde moet worden bepaald als we geen informatie van de fabrikant beschikbaar hebben. Dit kan bijvoorbeeld het geval zijn als we buitenlands cement gebruiken, uit een land waar het begrip gewogen rijpheid niet bekend is.

Tabel 4.2 Gewogen rijpheid na 1 h verharden bij x °C, voor verschillende C-waarden.

°C	waarde van C															
	1,05	1,10	1,15	1,20	1,25	1,30	1,35	1,40	1,45	1,50	1,55	1,60	1,65	1,70	1,75	1,80
1	10	9	9	8	8	7	7	6	6	6	5	5	5	5	4	4
2	11	10	10	9	8	8	7	7	7	6	6	6	5	5	5	5
3	12	11	10	10	9	9	8	8	7	7	7	6	6	6	5	5
4	13	12	11	11	10	9	9	8	8	8	7	7	7	6	6	6
5	14	13	12	11	11	10	10	9	9	8	8	8	7	7	7	6
6	15	14	13	12	12	11	10	10	9	9	9	8	8	8	7	7
7	16	15	14	13	13	12	11	11	10	10	9	9	9	8	8	8
8	17	16	15	14	13	13	12	12	11	11	10	10	9	9	9	9
9	18	17	16	15	14	14	13	12	12	12	11	11	10	10	10	9
10	19	18	17	16	15	15	14	13	13	12	12	12	11	11	10	10
11	20	19	18	17	16	16	15	14	14	13	13	12	12	12	11	11
12	21	20	19	18	17	17	16	15	15	14	14	13	13	13	12	12
13	22	21	20	19	18	18	17	16	16	15	15	14	14	14	13	13
14	23	22	21	20	19	19	18	17	17	16	16	15	15	15	14	14
15	24	23	22	21	20	20	19	18	18	17	17	16	16	16	15	15
16	25	24	23	22	21	21	20	20	19	19	18	18	17	17	17	16
17	26	25	24	23	22	22	21	21	20	20	19	19	19	18	18	18
18	27	26	25	24	24	23	22	22	21	21	21	20	20	20	19	19
19	28	27	26	25	25	24	24	23	23	22	22	22	21	21	21	20
20	29	28	27	27	26	25	25	24	24	24	23	23	23	22	22	22
21	30	29	28	28	27	27	26	26	25	25	25	24	24	24	24	24
22	31	30	29	29	28	28	27	27	27	26	26	26	26	26	25	25
23	32	31	31	30	30	29	29	28	28	28	28	28	27	27	27	27
24	33	32	32	31	31	30	30	30	30	29	29	29	29	29	29	29
25	34	34	33	33	32	32	32	31	31	31	31	31	31	31	31	31
26	35	35	34	34	33	33	33	33	33	33	33	33	33	33	33	33
27	36	36	35	35	35	35	35	35	35	35	35	35	35	35	35	35
28	37	37	37	36	36	36	36	36	36	36	37	37	37	37	38	38
29	39	38	38	38	38	38	38	38	38	38	39	39	39	40	40	40
30	40	39	39	39	39	39	39	40	40	40	41	41	42	42	43	43
31	41	41	40	40	41	41	41	42	42	42	43	43	44	45	45	46
32	42	42	42	42	42	43	43	43	44	45	45	46	47	47	48	49
33	43	43	43	43	44	44	45	45	46	47	48	48	49	50	51	52
34	44	44	44	45	45	46	47	47	48	49	50	51	52	53	55	56
35	45	45	46	46	47	48	49	50	51	52	53	54	55	57	58	59
36	46	47	47	48	49	50	51	52	53	54	56	57	58	60	62	63
37	47	48	49	49	50	51	53	54	55	57	58	60	62	64	66	67
38	48	49	50	51	52	53	55	56	58	60	61	63	65	67	70	72
39	50	50	51	53	54	55	57	59	60	62	65	67	69	71	74	76
40	51	52	53	54	56	57	59	61	63	65	68	70	73	76	78	81
41	52	53	54	56	58	59	62	64	66	69	71	74	77	80	83	87
42	53	54	56	58	59	62	64	66	69	72	75	78	81	85	88	92
43	54	56	57	59	61	64	66	69	72	75	79	82	86	90	94	98
44	55	57	59	61	63	66	69	72	75	79	82	86	90	95	99	104
45	57	58	60	63	65	68	72	75	79	82	86	91	95	100	105	111
46	58	60	62	65	68	71	74	78	82	86	91	96	101	106	112	118
47	59	61	64	67	70	73	77	81	85	90	95	101	106	112	118	125
48	60	63	65	68	72	76	80	84	89	94	100	106	112	119	126	133
49	61	64	67	70	74	78	83	88	93	99	105	111	118	125	133	141
50	62	65	69	72	76	81	86	91	97	103	110	117	124	132	141	150
51	64	67	70	74	79	84	89	95	101	108	115	123	131	140	149	159
52	65	68	72	76	81	86	92	98	105	113	121	129	138	148	158	169
53	66	70	74	78	84	89	96	102	110	118	126	136	146	156	168	180
54	67	71	76	81	86	92	99	106	114	123	132	143	153	165	178	191
55	69	73	77	83	89	95	102	110	119	129	139	150	162	174	188	203

Een ijkgrafiek hoort bij één bepaalde mengselsamenstelling en kan worden gebruikt zolang de samenstelling niet verandert.

De blijvende geschiktheid van de ijkgrafiek moet daarom periodiek worden gecontroleerd. In de cursus Basiskennis Betontechnologie is duidelijk gemaakt dat de sterkteontwikkeling van beton afhankelijk is van de sterkte van de cementsteen, de eigenschappen van het toeslagmateriaal en de samenwerking tussen toeslagmateriaal en cementsteen. Bij het beoordelen van de blijvende geschiktheid van een ijkgrafiek over een langere periode, moeten we met deze factoren terdege rekening houden. Om de betrouwbaarheid van de ijklijn vast te stellen, moeten met regelmatige tussenpozen extra kubussen worden beproefd en moeten de resultaten in de grafiek worden aangevuld. Wanneer de afwijking groter is dan de berekende spreiding s , moet een nieuwe ijklijn worden bepaald.

4.2.4 Sterkte uit temperatuurverloop

Het werken met de methode van de gewogen rijpheid toont aan dat door het meten van de temperatuur een betrouwbaar beeld kan worden verkregen van de sterkteontwikkeling van het beton. Als er in een constructie verschillende temperaturen worden gemeten, betekent dit dat ter plaatse van de betreffende meetpunten de sterkte verschillend is. Dat betekent dat als wordt gekozen voor het bepalen van de sterkte door middel van temperatuurmeting, de plaats van de meetpunten van essentieel belang is.

Voor het meten van de gemiddelde sterkte in een constructie moet dus niet worden gekozen voor de kern, omdat daar de temperatuur het hoogste is en daarmee ook de sterkte, en ook niet voor de buitenschil, omdat daar de temperatuur en dus ook de sterkte meestal het laagste is. De plaats van de meetpunten moet een gemiddelde waarde van een constructie-deel kunnen geven.

4.2.5 Rekenvoorbeeld

Het gebruik van de methode van gewogen rijpheid en het toepassen van een ijkgrafiek is met een praktijkvoorbeeld goed uit te leggen.

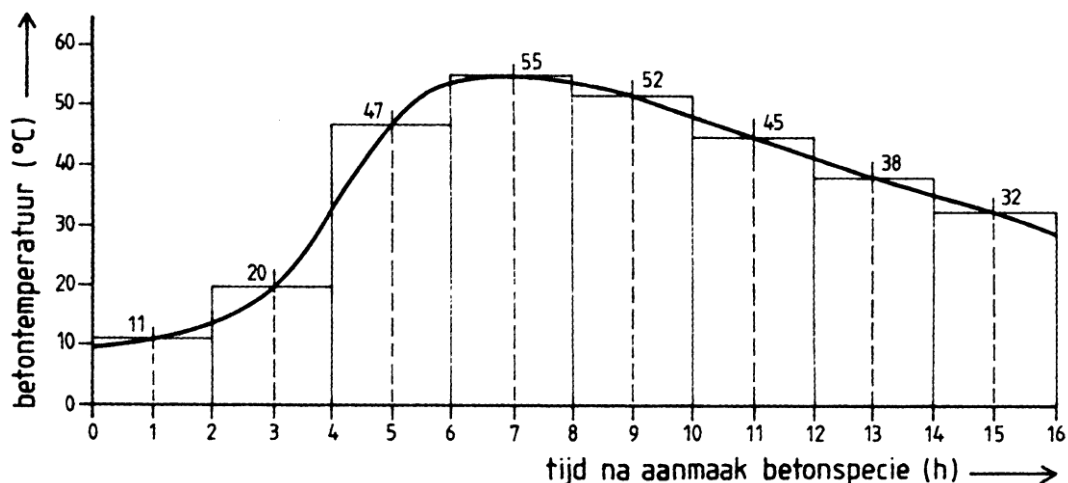
Voor het vervaardigen van wanden en vloeren in beton van bijvoorbeeld eengezinswoningen wordt in Nederland veel gebruik gemaakt van een uitvoeringstechniek die bekend staat onder de naam 'warme gietbouw'.

Met een tunnelbekisting worden de wanden en vloeren van een verdieping in één keer gestort. Verhogen van de betontemperatuur door verwarmingssystemen die in de tunnels zijn geplaatst, versnelt de verharding van het beton zodanig dat reeds de volgende morgen, ongeveer 16 uur na het storten, de bekisting kan worden verwijderd. Uiteraard moet het beton dan sterk genoeg zijn. De behaalde sterkte moet voldoende zijn om het eigen gewicht van de constructie te kunnen dragen. De constructeur moet die sterkte aangeven en bij voorkeur op de tekening vermelden.

Bij het verwarmen van het beton kunnen storingen in de verwarmingsapparatuur optreden. Een gevolg daarvan is dat het beton onvoldoende verhardt en de druksterkte veel lager zal zijn dan de bedoeling was. Als dan toch wordt ontkist, kan ernstige scheurvorming, doorbuiging of zelfs bezwijken van de constructie optreden. Het is dus noodzakelijk een redelijk betrouwbaar beeld te hebben van de sterkte van het beton op het tijdstip dat men wil ontkisten. De sterkte, afgeleid van de gewogen rijpheid, kan daarbij de gewenste informatie leveren.

Om de gewogen rijpheid van het beton op het moment van ontkisten te kennen, moet vanaf het tijdstip waarop de betonspecie is gestort, de temperatuur worden gemeten en geregistreerd. Uit het verkregen temperatuurverloop wordt de gewogen rijpheid berekend en met behulp van de ijkgrafiek, die voor het desbetreffende beton is opgesteld, wordt de sterkte in de constructie bepaald. De afgelezen waarde bepaalt of veilig kan worden ontkist of niet.

Figuur 4.5 geeft het beeld van het temperatuurverloop van het beton (met hoogovencement met een C-waarde van 1,60) in een tunnelbekisting.



Figuur 4.5 Voorbeeld van het temperatuurverloop in beton bij warme gietbouw.

Om uit figuur 4.5 de gewogen rijpheid te berekenen, gaan we als volgt te werk:

1. Schematiseer de temperatuurlijn in rechte lijnen, die de gemeten lijn zo dicht mogelijk benaderen. Met een geschematiseerd temperatuurverloop is het oppervlak van de grafiek sneller te berekenen. In dit voorbeeld is de figuur verdeeld in verticale stroken van twee uur. Verdeling in kortere perioden mag natuurlijk ook, maar dit levert meestal alleen naar meer rekenwerk op, terwijl de berekening van de gewogen rijpheid niet nauwkeuriger wordt.
Verdeling in langere perioden heeft alleen zin wanneer de temperatuur slechts geringe veranderingen laat zien. Dat is in deze grafiek niet het geval.
2. Bepaal de gemiddelde temperatuur gedurende deze twee uur. Dat is in dit soort grafieken meestal de temperatuur die werd gemeten op het tijdstip dat overeenkomt met het midden van de strook.
3. Bereken de gewogen rijpheid bij deze temperatuur of lees hem af in de tabel.
4. Sommeer de verkregen waarden over de totale periode: in dit geval 16 uur.

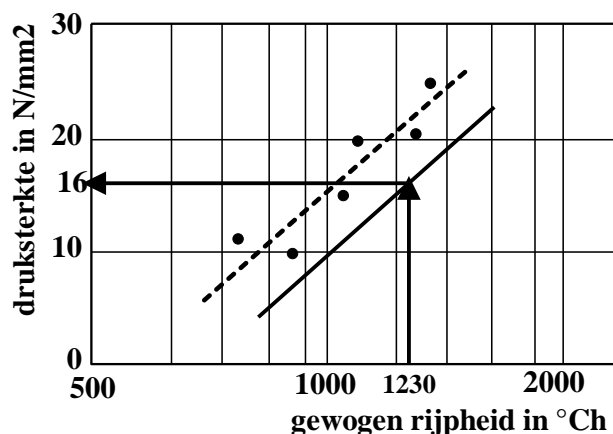
De resultaten van de vier stappen staan in tabel 4.3.

Uit de derde kolom van deze tabel blijkt duidelijk dat de verharding bij hoge temperatuur een veel groter aandeel levert in de gewogen rijpheid (en daarmee in de sterkte).

Tabel 4.3 Uitgewerkt voorbeeld van de berekening van de gewogen rijpheid na 16 uur verharden.

tijdstip van uur tot uur [h]	gemiddelde temperatuur [°C]	gewogen rijpheid na 2 uur bij deze temperatuur [°Ch]
0 - 2	11	24
2 - 4	20	46
4 - 6	47	202
6 - 8	55	300
8 - 10	52	258
10 - 12	45	182
12 - 14	38	126
14 - 16	32	92
totale gewogen rijpheid na 16 uur verharden		1230

Uit een ijkgrafiek moeten we nu de sterkte bepalen die hoort bij deze 1230 °Ch (figuur 4.6). In dit voorbeeld levert dit een veilige schatting van de sterkte op van 16 N/mm².



Figuur 4.6 Bepaling van de druksterkte uit de gewogen rijpheid.

Het is noodzakelijk de gebruikte ijkgrafieken steeds bij te houden. Door bijvoorbeeld veranderingen in de cementeigenschappen of de overige toegepaste grondstoffen, kan een wezenlijk andere sterkteontwikkeling worden gevonden. Dit verschil in sterkteontwikkeling moet ook in de gebruikte ijkgrafiek terug te vinden zijn door regelmatig nieuwe meetresultaten toe te voegen.

4.3 Temperatuurbereiding

4.3.1 Hydratatie warmte

De chemische reactie van het cement met water heeft tot gevolg dat er warmte vrijkomt. Dit heet een exotherme reactie. In de basis cursus is besproken welke cementmineralen verantwoordelijk zijn voor die reactie.

Door die vrijkomende warmte wordt de chemische reactie versterkt. Hoe meer warmte er vrijkomt, des te sneller verloopt het hydratatieproces. De sterkteontwikkeling van het beton wordt hierdoor versneld.

Deze eigenschap wordt bij de productie in zowel de prefab-betonelementen industrie als bij gietbouw op de bouwplaats regelmatig gebruikt als het beton snel moet verharden. Door verwarming van het beton en/of de omgeving verloopt de reactie sneller en daarmee ook de toename van de sterkte, waardoor per mal kan worden gewerkt met cycli van een dag.

De hoeveelheid vrijkomende warmte en de snelheid waarmee deze vrijkomt, verschillen per cementsoort en zijn niet alleen afhankelijk van de cementsamenstelling en de fijnheid, maar ook van de water-cementfactor van het betreffende betonmengsel. De hydratatie-warmte van cement kan zowel worden bepaald bij constante temperatuur (NEN-EN 196-8) als onder (semi-) adiabatische omstandigheden (NEN-EN 196-9). In tabel 4.4 zijn richtwaarden gegeven voor de hydratatiwarmte van enkele veelgebruikte cementen in Nederland.

Tabel 4.4 Richtwaarden hydratatiwarmte van enkele veelgebruikte cementen in Nederland (na 7 dagen en getoetst volgens NEN-EN 196-8).

CEM I 52,5 R	350 J/g
CEM II/B-V 32,5 R	275 J/g
CEM III/B 42,5 N	245 J/g
CEM III/A 52,5 N	305 J/g

Naast deze "standaardcementen" zijn er ook speciale cementsoorten met een zeer lage hydratatiwarmte. Voor deze cementen geldt de norm NEN-EN 14216 "Cement – Samenstelling, specificaties en conformiteitscriteria voor bijzondere cementsoorten met erg lage hydratatiwarmte". Cementen die aan deze norm voldoen, worden in afwijking van de normale cementen niet aangeduid met CEM, maar met VLH. Een VLH-cement heeft een hydratatiwarmte < 220 J/g na 7 dagen en getoetst volgens NEN-EN 196-8.

Het verloop van de temperatuur wordt al vele jaren gemeten. Hierover is in de literatuur uitgebreid gerapporteerd en met die kennis is het mogelijk betrouwbare berekeningen van het verloop van de temperatuur in de tijd te maken. Diverse rekenprogramma's maken het mogelijk een goed beeld van het verloop van de temperatuur te maken, rekening houdend met de afmetingen van de constructie, de vormgeving van de bekisting en de verschillende stappen in het productieproces.

4.3.2

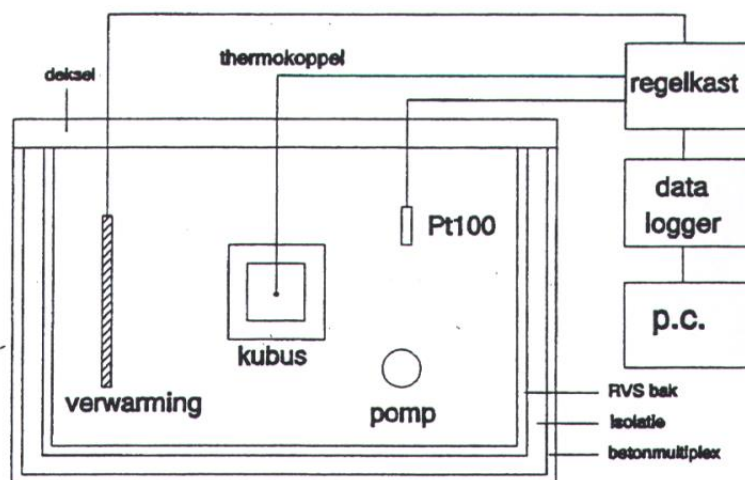
Adiabatisch temperatuurverloop

De basis voor de rekenprogramma's is het verloop van de temperatuur, zonder dat er warmte aan de omgeving wordt afgestaan. Dit heet het adiabatische temperatuurverloop of in het kort de 'adiabaat'.

Deze adiabaat is specifiek voor een bepaalde betonsamenstelling en moet dan ook altijd worden bepaald zodra de betonsamenstelling bekend is. Bij veranderingen in de samenstelling moet de adiabaat opnieuw worden bepaald.

Voor het bepalen van de adiabaat van een betonsamenstelling is een proefopstelling ontwikkeld, die is beschreven in CUR-Aanbeveling 67 en schematisch is weergegeven in figuur 4.7. Het te onderzoeken beton wordt in een rondom geïsoleerde kubusmal aangebracht en deze kubusmal wordt in een geïsoleerde waterbak geplaatst. Met behulp

van een zeer gevoelige thermometer wordt de temperatuur van het verhardende beton gemeten. In het water is ook een zeer gevoelige thermometer opgehangen en beide meters zijn aangesloten op een regelunit. Met behulp van een computer worden de temperaturen continu met elkaar vergeleken en zodra de temperatuur van het beton hoger dreigt te worden dan die van het water wordt een verwarmingselement aangestuurd. Op deze wijze krijgt de omgeving hetzelfde temperatuurverloop als de kubus en kan er geen warmte verdwijnen. De proef kan worden beëindigd als de temperatuur van het beton constant blijft.



Figuur 4.7 Adiabatische proefopstelling (schematisch).

Met de warmteontwikkeling van het cement kan in theorie ook de adiabatische temperatuurontwikkeling $\Delta T_{h(t)}$ van beton worden berekend. Bedenk hierbij wel dat de thermische eigenschappen van alle in beton aanwezige componenten vaak niet voldoende nauwkeurig bekend zijn om een echt betrouwbare berekening te kunnen maken.

Voor de berekening kan de volgende formule worden gebruikt:

$$\Delta T_{h(t)} = \frac{C \times \Delta Q_{h(t)}}{c \times \rho}$$

Waarin:

- $\Delta T_{h(t)}$ = adiabatische temperatuurverhoging beton op tijdstip t
- C = cementhoeveelheid per m³ beton (kg)
- $\Delta Q_{h(t)}$ = hydratatiewarmte op tijdstip t (kJ/kg)
- c = specifieke warmte van het beton [kJ/(kg·K)]
- ρ = volumieke massa van het beton (kg/ m³)

De formule geeft aan welke invoergegevens voor de berekening nodig zijn. De belangrijkste zijn: de warmteontwikkeling van het gebruikte cement, de hoeveelheid cement en de volumieke massa van het beton (de op te warmen massa).

4.3.3 Temperatuurverloop in constructie

Op de bouwplaats kan de sterkteontwikkeling worden versneld door de specieteratuur te verhogen. Daarnaast kunnen isolerende maatregelen voorkomen dat het beton tijdens de verharding te snel afkoelt.

Om de temperatuur van de constructie te verhogen kan warmte worden toegevoegd. Hiervoor zijn verschillende mogelijkheden met elk een specifiek toepassingsgebied.

Enkele voorbeelden:

- opslag in een verhardings- of klimaatkamer; de temperatuur kan worden ingesteld en de relatieve vochtigheid wordt hoog gehouden;
- stomen van beton; deze methode wordt nog toegepast in de betonproductenindustrie. Groot voordeel is dat het beton niet uitdroogt, het is tegelijk een vorm van nabehandeling;
- convectiewarmte/gasverwarming op propaan of waar mogelijk (stedelijke omgeving) op aardgas.

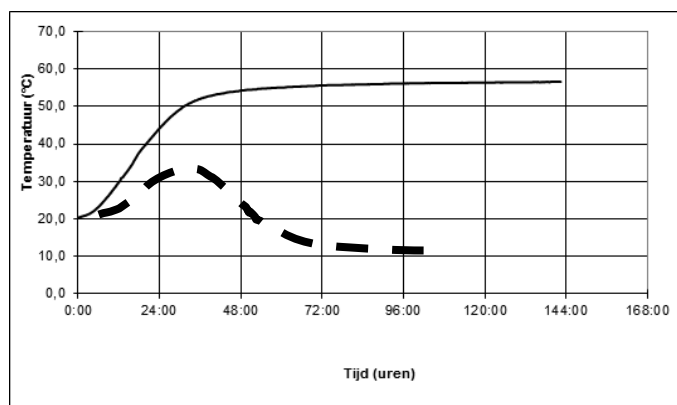


Figuur 4.8 Convectiekachel in tunnelgietbouw

- hete luchtverwarming; hiermee kan de temperatuur in een afgesloten ruimte worden verhoogd. De nabehandeling van het beton vergt extra aandacht om uitdroging te voorkomen;
- verwarmen van de ingestorte (voorgespannen) draden door er een elektrische spanning op te zetten; deze methode is bruikbaar in de betonproductenindustrie voor bijvoorbeeld de productie van kanaalplaatvloeren in een lange-banksysteem;
- verwarmen met een dubbelwandige bekisting waar warm water, olie of stoom doorheen wordt gevoerd.

Het effect van het verhogen van de verhardingstemperatuur wordt mede bepaald door de cementsoort. Hoogovencement is gevoeliger voor temperatuurveranderingen dan portlandcement. Een hogere verhardingstemperatuur heeft dus méér effect bij hoogovencement dan bij portlandcement.

In de verhardende constructie wordt zelden of nooit een adiabatisch temperatuurverloop gemeten. Door het verwarmen van het beton ontstaat een warmtestroom van binnen naar buiten, waardoor de temperatuur in de constructie gaat afwijken van de adiabaat. Bij een dunne wand wordt meestal een geringe temperatuurverhoging vastgesteld, terwijl in een dikke wand de temperatuur aanzienlijk kan toenemen. De dikte van de constructie heeft een isolerende werking op het beton in de kern (zie figuur 4.9).



Figuur 4.9 Temperatuurverloop: adiabatisch en in constructie.

Daarnaast speelt de vormgeving van de bekisting een belangrijke rol. Een stalen plaatbekisting heeft weinig weerstand, waardoor het beton aan het oppervlak weinig zal afwijken van de omgevingstemperatuur. Een houten bekisting of een stalen bekisting met isolatie zal meer warmte vasthouden, waardoor het betonoppervlak warmer zal worden.

Het moment van ontkisten zal ook invloed hebben op het verloop van de temperatuur. Dat ontkisten zal in de meeste gevallen pas na het bereiken van de hoogste temperatuur plaatshebben. De temperatuur neemt dan af en dat zal versneld worden door het verwijderen van de (isolerende) bekisting.

4.3.4 Temperatuurgradiënten

In de vorige paragraaf is aangegeven dat er in het verhardende beton verschillen in temperatuur ontstaan tussen de kern en de buitenschil van een constructie. Dat heeft tot gevolg dat het deel van de constructie met de hoogste temperatuur (de kern) meer moet afkoelen dan het deel met een lagere temperatuur (de buitenschil). Uiteindelijk wil de betonconstructie na het verharden in zijn geheel de gemiddelde omgevingstemperatuur aannemen. Beton wil tijdens het afkoelen krimpen en bij een hogere temperatuur zal het beton meer willen krimpen dan bij een lagere temperatuur. De kern van de constructie zal meer willen krimpen dan de buitenschil; omdat dat echter niet kan, ontstaan er inwendige trekspanningen. Als de temperatuurverschillen groot genoeg zijn kunnen de spanningen de treksterkte van het beton overschrijden, waardoor scheurvorming ontstaat.

Met behulp van de rekenprogramma's kan worden vastgesteld wanneer te grote temperatuurverschillen tot onacceptabele spanningen leiden en welke maatregelen kunnen worden genomen om die spanningen te verlagen. Denk daarbij aan het isoleren van de buitenzijde.

Ook als beton wordt gestort op reeds verhard beton, zoals een wand die op een vloer wordt gestort, treden er temperatuurverschillen op. Het nieuwe beton wordt als gevolg van de

hydratatie warmer, terwijl de vloer reeds een constante temperatuur heeft bereikt. Dit probleem is bij dikke constructies groter dan bij dunne. Juist bij dikke constructies wordt de temperatuur in de kern van de wand hoger, hetgeen leidt tot een grotere gradiënt met de vloer. Hier heeft isoleren van de wand een averechts effect, omdat dan de verschillen tussen wand en vloer alleen maar groter worden.

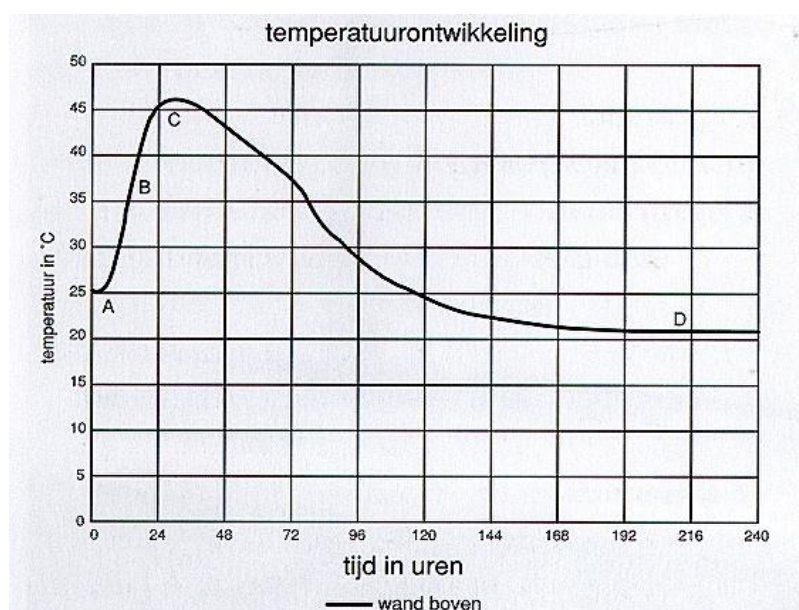
De meest toegepaste methode is het koelen van het beton in de te storten wand. Dat kan door middel van ingestorte buizen, waar koud water doorheen wordt gevoerd, of door gekoelde bekistingsplaten. Het koelen begint direct bij aanvang van het verwerken van de betonspecie en eindigt zodra het beton de hoogste temperatuur heeft bereikt. Ook het verwarmen van de bestaande vloer via ingestorte buizen kan de verschillen verkleinen, maar dit is in de praktijk nauwelijks toegepast.

4.3.5 Voorbeeld van wand op vloer

In de volgende figuren is aangegeven hoe het temperatuurverloop en spanningverloop in een betonwand kunnen optreden. De gevonden waarden zijn door middel van berekening vastgesteld. Daarbij is uitgegaan van het adiabatische temperatuurverloop volgens figuur 4.9 en is rekening gehouden met verlies aan warmte door de bekisting.

In de figuren 4.10 tot en met 4.14 is vervolgens weergegeven hoe het temperatuurverloop in de wand is en op welke wijze deze wand zal (willen) vervormen. Door verhinderen van vervormen ter plaatse van de stortnaad tussen wand en vloer - met name in de afkoelingsfase na het bereiken van de hoogste temperatuur in de wand - treden er hoge trekspanningen op onder in de wand. Als deze groter zijn dan de treksterkte van het beton, treden er verticale scheuren op. Dit is vervolgens visueel gemaakt in figuur 4.15.

Uit de figuur blijkt dat de scheuren in de wand het gevolg zijn van het overschrijden van de treksterkte van het beton. De scheurvorming kan worden voorkomen door onder in de wand koelbuizen te plaatsen. Door koud water door de buizen te spoelen houden we de temperatuur onder in de wand laag, waardoor de trekspanningen tot onder de treksterkte kunnen worden verlaagd. Dit is niet verder uitgewerkt.



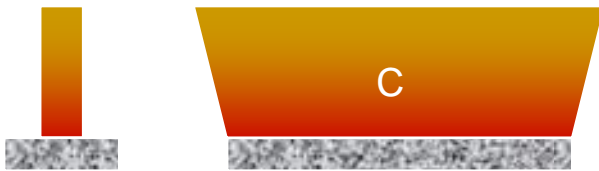
Figuur 4.10 Temperatuurverloop van de wand.



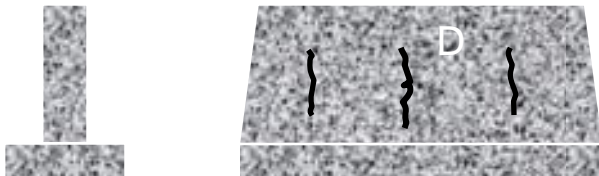
Figuur 4.11 Wand direct na storten op de vloer.



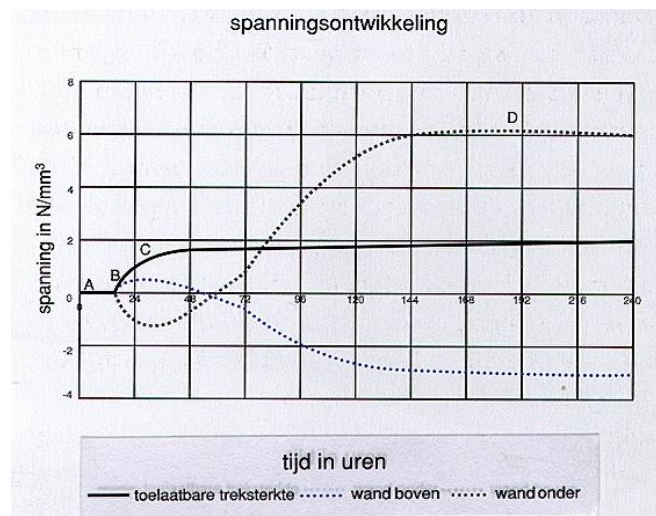
Figuur 4.12 Wand in opwarmingsfase.



Figuur 4.13 Wand bereikt hoogste temperatuur.



Figuur 4.14 Wand is afgekoeld.



Figuur 4.15 Spanningsverloop in de wand.

4.3.6 Verhardingsbeheersing

In het vorige voorbeeld van een wand op een vloer is getoond hoe de verschillen in temperatuur tussen wand en vloer zodanige trekspanningen veroorzaken, dat scheurvorming in de wand optreedt. Door in het rekenmodel uit te gaan van koeling van de wand, kan worden nagegaan of de hoge trekspanningen kunnen worden voorkomen. Tevens kan worden bepaald hoe die koeling dan moet worden vormgegeven.

Keuze in de soort bekisting, de temperatuur van de betonspecie, de betonsamenstelling en het tijdstip van ontkisten heeft invloed op het verloop van de temperaturen en dus ook van de spanningen. Met deze factoren kan door middel van berekeningen de meest optimale keuze voor de uitvoering worden gedaan. Dit is duidelijk omvangrijker dan het beheersen van de temperaturen. Daarom voldoet het woord verhardingsbeheersing beter. Dit instrument kan worden gebruikt voor het maken van een projectplanning.

4.4 Nabehandeling

4.4.1 Algemeen

Als gevolg van de kringloop van het water treedt er in de natuur altijd verdamping op. Deze verdamping is niet altijd gelijk. In de winter zie je vaak dat er plassen water op de akkerlanden staan, doordat de grond verzadigd is met water en de grondwaterstand hoog is. In de zomer zal je dit zelden zien. De hogere luchttemperatuur zorgt ervoor dat het water verdampt. Hierdoor daalt de grondwaterspiegel en zijn plassen op het land nog zelden te zien. En het kan nog erger: na teveel dagen met zeer hoge luchttemperatuur (en geen regen) kan de grond uitdrogen.

Het beton bevat kort na het verwerken veelal een overmaat aan water (meer dan voor de hydratatie nodig is). Het water wordt voor een belangrijk deel gebonden door de chemische reactie met het cement, maar dat kost tijd. De omgeving kan ervoor zorgen dat een deel van

het water vroegtijdig verdampt, waardoor er onvoldoende water beschikbaar is voor de verharding van het cement.

Bij veel betonwerken vormt zich vlak na het storten en verdichten een laag bleedingwater op het oppervlak. Zolang dit water niet kan verdampen, is het geen probleem voor het betonoppervlak. Het water wordt na verloop van de tijd (soms enige uren) opgezogen door het verhardende beton en zal meestal geheel verdwijnen. Maar als de verdampingsnelheid groter is dan de bleedingsnelheid kan het betonoppervlak opdrogen. Dit kan aanleiding zijn voor (plastische) krimpscheuren.

De snelheid van verdampen is afhankelijk van:

- zonbestraling: door zonbestraling wordt de temperatuur verhoogd, waardoor de snelheid van verdampen wordt verhoogd;
- temperatuur: bij een hogere temperatuur zal de verdamping sneller gaan dan bij een lage temperatuur;
- relatieve vochtigheid van de lucht: bij een lage relatieve vochtigheid kan de lucht meer vocht opnemen dan bij een hoge relatieve vochtigheid
- windsnelheid: een harde (en vooral droge) wind kan de verdamping versnellen.

Het is dus belangrijk dat zoveel mogelijk wordt voorkomen, dat water in de betonspecie in een te vroeg stadium verdampt. Om het verdampen van water tegen te gaan, wordt gewezen op het belang van nabehandelen van beton.

4.4.2

Nabehandelen

Met het nabehandelen van jong beton wordt het verdampen van water uit het beton zoveel mogelijk beperkt. Dit is van belang voor de kwaliteit van het jonge beton. Juist in de eerste dagen van de verhardingsfase moet ervoor worden gezorgd dat er geen water verdwijnt.

De belangrijkste redenen voor het nabehandelen zijn dan ook:

- verdamping van water van het beton voorkomen;
- plastische krimpscheuren voorkomen;
- voldoende sterkte van het betonoppervlak verzekeren;
- voldoende duurzaamheid van het betonoppervlak verzekeren.

Nabehandelingstechnieken

Er bestaan meerdere methoden van nabehandeling, elk met hun eigen voor- en nadelen:

- Het langer laten staan van de bekisting.
Dit is de beste en meest gebruikte methode van nabehandelen van wanden. Het bekistingsmateriaal is dicht van structuur, waardoor er geen water aan het beton kan worden onttrokken. Als de cyclustijd van de bekisting korter is dan de benodigde tijdsduur van nabehandelen, kan de bekisting direct na het verwijderen worden vervangen door isolatiepanelen;
- Het afdekken van het oppervlak met dampdichte folie.
Deze methode is speciaal van toepassing voor vlakke elementen, zoals vloeren. Extra aandacht is nodig voor de afdichting van randen en hoeken opdat er geen tocht kan ontstaan. Plooiën in de folie kunnen in het betonoppervlak zichtbaar blijven. Om dat te voorkomen moet de folie vrij van de vloer worden gehouden, bijvoorbeeld door gebruik te maken van ondersteuningsbalken;
- Het afdekken van het oppervlak met (blijvend) natte bekleding.

Deze methode is vergelijkbaar met die van de folie, alleen moet men zorg dragen voor het constant nat houden van de bekleding.

- Het betonoppervlak zichtbaar nat houden met geschikt water.
Dit kan bijvoorbeeld met behulp van een vernevelingsinstallatie.
- Het aanbrengen van een curing compound.
De curing compound vormt een gesloten film op het betonoppervlak, maar deze is niet voor 100% dampdicht. De minimale dampdichtheid moet 70% zijn. Daarnaast is een curing compound alleen effectief als hij over het gehele oppervlak gelijkmatig wordt aangebracht.
Een curing compound op het betonoppervlak vermindert de aanhechting van daarop gestort beton, zoals bij stortnaden van monoliet-constructies en cementgebonden dekvloeren.

Het gebruik van water voor nabehandeling kan in de winter bij temperaturen onder 0 °C problemen geven. Door bevriezing van het water kan aan het betonoppervlak vorstschade ontstaan.

4.4.3 Nabehandelingsklassen

In NEN-EN 13670 zijn nabehandelingsklassen gedefinieerd. In de projectspecificatie zal de vereiste nabehandelingsklasse moeten zijn benoemd. De opdrachtgever bepaalt dus hoe lang moet worden nabehandeld. In hoeverre de nabehandelingsklasse gekoppeld is aan de uitvoeringsklasse is (nog) niet duidelijk. Daarnaast is in NEN-EN 13670 ook nog niet aangegeven hoe met de nabehandelingsklassen in relatie tot de uitvoeringsklassen moet worden omgegaan.

4.4.4 Nabehandelingsduur

Per nabehandelingsklasse is in NEN-EN 13670 aangegeven tot hoe lang moet worden nabehandeld. De nabehandelingsduur is een functie van de ontwikkeling van de betonkwaliteit van het betonoppervlak, waarbij de betonkwaliteit wordt gemeten als de kubusdruksterkte. Daarom staan in tabel 4.5 eisen met betrekking tot de druksterkte.

Tabel 4.5 Nabehandelingsklassen.

Nabehandelingsklasse	Periode	Percentage van de gespecificeerde karakteristieke druksterkte na 28 dagen
1	12 uren	nvt
2	nvt	35 %
3	nvt	50 %
4	nvt	70 %

Voor het meten van de druksterkte heeft het gebruik van de methode van gewogen rijpheid de voorkeur. Daarbij moet het meetpunt tot maximaal 10 mm onder het betonoppervlak zijn geplaatst.

De nabehandelingsduur is ook vastgelegd in verhardingsdagen, als wordt afgezien van het meten van de druksterkte. In de informatieve bijlage van NEN-EN 13670 zijn daarvoor drie tabellen opgenomen, die betrekking hebben op de nabehandelingsklassen 2 tot en met 4.

Tabel 4.6 Minimale nabehandeldingsduur voor beton voor nabehandelingsklasse 3

Temperatuur van het betonoppervlak °C	Periode van nabehandeling ^{a)}		
	Sterkte-ontwikkeling beton ^{c,d)} $f_{cm2}/f_{cm28} = r$		
	snel $r \geq 0,50$	gemiddeld $0,50 > r \geq 0,30$	traag $0,30 > r \geq 0,15$
$T \geq 25$	1,5	2,5	2,0
$25 > T \geq 15$	2,0	4	3,5
$15 > T \geq 10$	2,5	7	7
$10 > T \geq 5$ ^{b)}	3,5	9	10

a) Plus een eventuele periode na zetting indien deze langer duurt dan 5h.
b) Bij temperaturen lager dan 5 °C behoort de duur te worden verlengd met een periode gelijk aan de tijd waarin de temperatuur lager was dan 5 °C.
c) De ontwikkeling van de betonsterkte is de verhouding tussen de gemiddelde druksterkte na 2 dagen en de gemiddelde druksterkte na 28 dagen, bepaald uit initiële beproevingen of gebaseerd op bekende prestaties van beton met vergelijkbare samenstelling (zie NEN-EN 206).
d) Voor een zeer trage ontwikkeling van de betonsterkte behoren speciale eisen te worden gegeven in de uitvoeringsspecificatie.

In tabel 4.6 zijn de nabehandelingstijden aangegeven, zoals die in NEN-EN 13670 voor nabehandelingsklasse 3 zijn vermeld.

In paragraaf 4.5 is aangegeven tot hoelang het beton in de bekisting moet blijven. Het kan voorkomen dat het beton mag worden ontkist, maar dat de nabehandelingsperiode nog niet is verstreken. Het beton moet dan zo snel mogelijk na het ontkisten worden nabehandeld. De methode die dan het meest voor de hand ligt, is het aanbrengen van een laag curing compound. Dit heeft het voordeel dat het beton is beschermd en dat de uitvoering ongehinderd verder kan werken.

4.5 Ontkisten

4.5.1 Algemeen

Nadat het beton voldoende is verhard, kan de bekisting worden verwijderd. Dat betekent, dat het beton voldoende sterkte heeft om het eigen gewicht te kunnen dragen en dat er geen ontoelaatbare vervormingen mogen optreden. Voor prefab-betonelementen moet de sterkte van het beton zodanig zijn dat de elementen uit de mal kunnen worden gehesen. Het beton rondom ingestorte hijspunten moet dan ook voldoende sterk zijn.

Als bij het ontkisten een bepaalde volgorde moet worden aangehouden, moet dit bij voorkeur op de bekistingstekeningen zijn aangegeven.

4.5.2 Tijdstip van ontkisten

Het tijdstip van ontkisten is afhankelijk van de druksterkte van het beton. Daarom zijn er in de NEN 6722 eisen aan de druksterkte vastgelegd. Onderscheid wordt gemaakt in bekistingen die een dragende functie hebben en bekistingen die niet-dragend zijn.

Voor niet-dragende bekistingen is de eis dat het beton een druksterkte van ten minste 3,5 N/mm² moet hebben. Denk daarbij aan een wandbekisting van een vloer.

Voor dragende bekistingen geldt als eis dat de ontkistingssterkte door de constructeur moet zijn bepaald, met als minimum 14 N/mm^2 . De sterkte voor ontkisten moet op de tekening zijn aangegeven. Als de vereiste druksterkte niet bekend is, moet worden uitgegaan van de waarde volgens tabel 4.7.

Tabel 4.7 Vereiste minimale gemiddelde kubusdruksterkte bij ontkisten, als gemiddelde van drie kubussen, verhard volgens bouwwerkomstandigheden.

betonsterkteklasse $C_{f_{ck,cyl}/f_{ck,cube}}$ [N/mm ²]	minimale gemiddelde ontkistingssterkte $f_{cm,j}$ [N/mm ²]
C12/15	18
C20/25	25
C30/37	35
C35/45	40
C45/55	47
C55/67	56

4.5.3

Methoden voor bepalen gemiddelde druksterkte voor ontkisten

Voor het bepalen van de gemiddelde druksterkte zijn de volgende methoden te gebruiken:

- methode van gewogen rijpheid, waarbij de gemiddelde druksterkte uit ten minste 3 temperatuurmetingen moet worden afgeleid;
- verhardingsproef met temperatuurregeling, waarbij de gemiddelde druksterkte van ten minste 3 kubussen moet zijn bepaald;
- verhardingsproef, waarbij de gemiddelde druksterkte van ten minste 3 kubussen moet zijn bepaald.

Afhankelijk van de omstandigheden is een van de voorgaande methoden favoriet. Voor dunne wanden en vloeren kunnen de verhardingskubussen worden gebruikt, omdat dergelijke constructies weinig in temperatuur zullen verschillen met de kubussen. Voor dikke constructiedelen, waarin relatief hoge temperaturen kunnen ontstaan, heeft de methode van gewogen rijpheid de voorkeur, alhoewel de verhardingskubussen met temperatuurregeling ook goed te gebruiken zijn.

Methoden die slechts ter indicatie van de druksterkte mogen worden gebruikt, zijn:

- met behulp van terugslagwaarde bepalen van de gemiddelde druksterkte uit ten minste 30 afgeleide waarnemingen;
- met behulp van ultrasoonmeting bepalen van de gemiddelde druksterkte uit ten minste 30 afgeleide waarnemingen;
- met behulp van gecombineerde meetwaarden van terugslagwaarde en ultrasoonmeting bepalen van de gemiddelde druksterkte uit ten minste 30 afgeleide gecombineerde waarnemingen.

Vooral in de prefab-betonindustrie, waar dagelijks eenzelfde betonsamenstelling wordt verwerkt onder nagenoeg dezelfde omstandigheden, hebben de laatste methoden hun bruikbaarheid bewezen.

4.5.4

Tijdstip van ontkisten bepaald uit de verhardingstijd

Het tijdstip van ontkisten kan ook worden bepaald aan de hand van de verhardingstijd van het beton. Er wordt dan dus niet gekozen voor het meten van de gemiddelde kubusdruksterkte. Dit kan het geval zijn als de voortgang van een project niet nadelig wordt beïnvloed door het lang laten staan van de bekisting. In dat geval moet volgens NEN 6722 worden uitgegaan van de verhardingstijd volgens tabel 4.8.

Tabel 4.8 Verhardingstermijnen voor ontkisten (volgens NEN 6722 bij etmaaltemperaturen van gemiddeld + 4 °C of hoger).

sterkteklasse cement	niet-dragende bekistingen [dagen]	dragende bekistingen	
		overspanning ≤ 3 m [dagen]	overspanning > 3 m [dagen]
32,5 (N en R)	3	8	20
42,5 (N en R)	2	5	10
52,5 (N en R)	1	3	6

Dagen waarop de temperatuur lager is dan 4 °C, mogen niet worden meegerekend.