



Delft University of Technology

Het model

vehikel voor glorie en schade

van Breugel, K.

Publication date

2019

Document Version

Final published version

Citation (APA)

van Breugel, K. (2019). *Het model: vehikel voor glorie en schade*.

Important note

To cite this publication, please use the final published version (if applicable).
Please check the document version above.

Copyright

Other than for strictly personal use, it is not permitted to download, forward or distribute the text or part of it, without the consent of the author(s) and/or copyright holder(s), unless the work is under an open content license such as Creative Commons.

Takedown policy

Please contact us and provide details if you believe this document breaches copyrights.
We will remove access to the work immediately and investigate your claim.

*This work is downloaded from Delft University of Technology.
For technical reasons the number of authors shown on this cover page is limited to a maximum of 10.*

Het model: vehikel voor glorie en schade

Over de plaats van de infrastructuur in de samenleving en de invloed van klimaatverandering op de levensduur

Prof.Dr.Ir. K. van Breugel

Copyright © 2021 by K. van Breugel

All rights reserved. No part of this publication protected by this copyright notice may be reproduced or utilised in any form or by any means, electronic or mechanical, including photocopying, recording, or by any information storage and retrieval system, without permission from the author or Delft University of Technology.

ISBN: 9789082330410

Contact: K.vanBreugel@tudelft.nl

Web: www.me.citg.tudelft.nl

Druk: DMPlus

Omslagfoto en grafisch ontwerp: Iris Batterham

Het model: vehikel voor glorie en schade

Afscheidsrede

Uitgesproken bij het afscheid als hoogleraar op het gebied van
“Betonmodellering en materiaalgedrag”

bij de sectie Materials & Environment van de Faculteit Civiele Techniek en Geowetenschappen van de Technische Universiteit Delft,
op vrijdag 27 september 2019

door

Prof.Dr.Ir. K. van Breugel

Voorwoord

Op vrijdag 27 september 2019 had ik het genoegen mijn afscheidsrede uit te spreken in de aula van de Technische Universiteit Delft. Het was mijn voornemen om de rede ook in boekvorm uit te geven. Veel andere zaken kregen voorrang, met als gevolg dat het boekje pas nu verschijnt.

De tekst van de uitgesproken rede is in dit boekje op hoofdlijnen gevolgd. Wel wordt in deze geschreven versie extra aandacht geschonken aan de grondgedachte achter deze rede. Kort samengevat is die grondgedachte dat mensen streven naar beheersing van de werkelijkheid. Daartoe hebben zij vrijwel al hun kaarten gezet op wetenschap en techniek. Om grip op de werkelijkheid te krijgen hebben wetenschappers en technici op hun beurt gebruik gemaakt van modellen. Via modellen worden verworven inzichten en kennis ter beschikking gesteld aan de maakindustrie. Het vermogen om de werkelijkheid te beheersen en vorm te geven is vervolgens in dienst gesteld van het streven naar groei. Groeicijfers zijn indrukwekkend. Dat wordt in deze rede geïllustreerd aan de hand van de in de loop der jaren opgebouwde infrastructuur. Steeds nadrukkelijker manifesteren zich echter de schaduwkanten van deze groei. Het aanleggen van de infrastructuur heeft invloed op het leefmilieu en het klimaat. Vervolgens is klimaatverandering weer van invloed op de levensduur van de infrastructuur. Het ontbreken van regie wordt gezien als een van de belangrijkste oorzaken van uit balans geraakte, schadelijke groei. Regie is cruciaal als enerzijds groei wordt nagestreefd, maar anderzijds de aan groei gerelateerde milieu-impact beperkt moet blijven. De taak van de overheid om hier regie-voerend op te treden wordt in deze rede benadrukt. Het gebruik van serious gaming wordt bepleit als instrument om deze regie te ondersteunen.

Het begin en het einde van deze rede zijn meer beschouwend van aard. In het centrale gedeelte wordt dieper ingegaan op het vakgebied van mijn leeropdracht. Beide delen hebben modellen als gemeenschappelijk en verbindend element. Wanneer het de lezer lukt om dit laatste op te merken, dan was het op schrift stellen van deze rede niet alleen een genoegen voor mijzelf, maar heb ik tenminste ook een van mijn doelen bereikt.

Een woord van dank gaat uit naar collega A.Q.C. van der Horst voor het doorlezen van het manuscript, en naar mw. Iris Batterham voor het verzorgen van de omslag van dit boekje.

Delft, oktober 2020

Inhoudsopgave

Voorwoord.....	iii
Inleiding.....	1
Infrastructuur als product van wetenschap en techniek.....	3
De schat.....	3
Het beheersingsmotief.....	4
Reductie en fragmentatie.....	5
Fragmentatie in de bouw.....	6
Infrastructuur in globaal perspectief.....	7
Groei van het bruto nationaal product.....	7
Waarde van de infrastructuur.....	9
Budgetten voor vervanging en groei.....	9
Beton onder vuur.....	10
Bouwen met beton – Een eerste verkenning *).....	11
Het materiaal beton.....	11
Schaalniveaus en de rol van modellen.....	12
Meer over het materiaal beton.....	14
De reactie van cement met water.....	14
Optimaliseren van de mengselsamenstelling – Reductie CO ₂ -emissie.....	15
Langeduurgedrag van brugdekken met oude en moderne betonmengsels.....	17
Modellen voor beton op verschillende schaalniveaus.....	18
Numerieke modellen voor verhardingsprocessen en microstructuurontwikkeling.....	18
Modellen voor scheurvorming in verhardende betonconstructies.....	19
Effect van temperatuur op het verhardingsproces en de duur van de bouwphase.....	20
Klimaatverandering en levensduur van de infrastructuur.....	22
Effect van temperatuurstijging op de levensduur van de infrastructuur.....	22
Effect van temperatuurstijging op vervangingskosten van de infrastructuur.....	25
Besparen op infrastructuur in Nederland - Het nieuwe aardgas.....	26
Besparingen door verlengen van de levensduur van de infrastructuur.....	26
Kentallen voor de bouwsector.....	28
Regie gevraagd.....	29
Opties voor levensduurverlenging en beperking van milieu-impact.....	29
Zelfherstellend beton.....	29
Circulariteit.....	31
Serious gaming voor interdisciplinaire regie in de bouw.....	33
Zonder regie vaart niemand wel.....	35
Als regie ontbreekt.....	35
Naar duurzame groei.....	36
De overheid als regisseur.....	37
Het model: Vehikel voor glorie en schade.....	39
Onderwijs.....	40
Dankwoord.....	41

Het model: vehikel voor glorie en schade

Over de plaats van de infrastructuur in de samenleving en de invloed van klimaatverandering op de levensduur

Mijnheer de Rector Magnificus,
leden van het College van Bestuur,
collegae hoogleraren en andere leden van de universitaire gemeenschap,
zeer gewaardeerde toehoorders,
dames en heren,

Inleiding

Op 15 september 1979 trad ik in dienst bij de sectie Betonconstructies van de faculteit Civiele Techniek¹ van de TU Delft. Met het sectiehoofd, professor A.S.G. Brugge-ling, was een gentlemen's agreement gesloten. Vijftig procent van mijn tijd zou ik besteden aan onderwijs en vijftig procent aan onderzoek. Dat onderzoek zou moeten uitmonden in een promotie. Na vier jaar zou ik de universiteit verlaten en aan het werk gaan. Het is allemaal anders gelopen. Niet vier, maar veertig jaar later verlaat ik de universiteit. Als mijn vader dit nog zou hebben mogen meemaken, dan zou hij waarschijnlijk hebben gezegd dat het mooi is dat ik eindelijk de universiteit verlaat, maar dat het nu echt niet meer de moeite is om nog aan het werk te gaan.

Toch heb ik niet het gevoel dat ik de afgelopen veertig jaar niets heb uitgevoerd. Er is veel gebeurd. Er is onderzoek verricht naar bulkopslag van gevaarlijke stoffen, gedrag van opslagconstructies onder extreme belastingen, vloeistofdichtheid van reservoirs, constructiegedrag onder opgelegde vervormingen, temperatuurontwikkeling en scheurvorming in verhardend beton, levensduurvoorspellingen en modellering van materiaal- en constructiegedrag. Maar toch – de eerlijkheid gebiedt dat te zeggen – is het meeste onderzoek door anderen verricht. En die anderen, dat waren er gelukkig heel veel! Negentig procent van alle wetenschappers die ooit in de wetenschap actief zijn geweest, of nog zijn, leeft nu². Op tal van gebieden is enorme vooruitgang geboekt. Wat weten we nu nog niet? Wat is nog niet verklaard of nog niet opgelost? Vroeger, ja vroeger zaten er nog tal van witte vlekken en zwarte gaten in onze kennis. En als waargenomen verschijnselen niet verklaard konden worden dan werd het 'concept God' er bijgehaald om hiaten in onze kennis op te vullen. Maar die tijd is nu toch echt voorbij. Een waarschijnlijk onware anekdote^{3,4} vertelt dat keizer Napoleon aan de geleerde Laplace ooit de vraag heeft gesteld waarom God niet voorkwam in

¹ Na samenvoeging van de faculteiten Civiele Techniek en Mijnbouwkunde in 2007 is de naam van de faculteit gewijzigd in Civiele Techniek & Geowetenschappen

² E. Gastfriend (2015) 90% of All the Scientists That Ever Lived Are Alive Today. <https://futureoflife.org/2015/11/05/90-of-all-the-scientists-that-ever-lived-are-alive-today/?cn-reloaded=1>

³ Zie: A. van den Beukel (1994). 'Met andere ogen'. Ten Have/Baarn 227 p.

⁴ C. Jongeneel (2008) Het zit in een lab en het heeft gelijk. Veen Magazines B.V. 157 p.



Napoleon Bonaparte*
1767-1821

“Waarom komt God niet voor
in uw boek over kosmologie?”



Pierre-Simon Laplace*
1749 - 1827

“Sire, die hypothese
had ik niet nodig.”

Fig. 1 Napoleon in gesprek met Laplace (1749-1827) over zijn boek over kosmologie.

zijn boek over kosmologie. Laplace zou daarop hebben geantwoord: “Sire, die hypothese had ik niet nodig.” De tijd dat het concept God nog nodig was voor het sluitend maken van een wetenschappelijke theorie was voor Laplace passé.

Met zijn uitspraak liep Laplace misschien wel wat ver voor de troepen uit. Maar nu, een paar eeuwen later, weten wij natuurlijk echt veel meer. In hun boekje ‘Weer en wind’ beschrijven John & Stibbe⁵ op luchtige wijze hoe een aantal wetenschappers tot de overtuiging was gekomen dat de kosmos zo langzamerhand al zijn geheimen wel had prijsgegeven. Voor het opvullen van kennislacunes was het concept God definitief overbodig geworden. Voor hen was ook het moment aangebroken om God hiervan op de hoogte te stellen. Een delegatie reisde af naar het goddelijk paleis en klopte daar aan. Ze werden met alle egards ontvangen en God luisterde aandachtig naar hun verhaal. Hij was zeer onder de indruk van wat ze allemaal hadden bereikt. Aan het einde van hun betoog stelde Hij voor een wedstrijd te houden. Een wedstrijd ‘mensen maken’. Dat was een kolfje naar hun hand. Zij mochten beginnen. Een van de delegatieleden bukte zich en schepte een hand grond. “Nee, nee”, zei God, “je moet wel je eigen grond meenemen.” Toen werd het stil. Ontgoocheld verliet de delegatie de hemelse sferen om terug te keren naar de aarde, waar ze weer met beide benen op de grond kwamen te staan.

Wetenschappers moeten het doen met wat voorhanden is. Zij onderzoeken wat *is*. Einstein zegt in dit verband dat de wetenschap kan vaststellen *wat is*, maar niet *wat*

⁵ J. John, M. Stibbe (2009) Weer en wind. Ark Media. 190 p.

* Foto's: Wikipedia

het zou moeten zijn. Voor de vraag *waarom* de dingen zijn zoals ze zijn, waarom er *überhaupt* dingen zijn, daarvoor moet je bij de religie zijn⁶. De wetenschapsfilosoof Wittgenstein⁶ zou zeggen: “Waarover je niet spreken kunt daarover moet je zwijgen.”

Wat John & Stibbe, Einstein en Wittgenstein gemeen hebben is dat ze oproepen tot een zekere mate van bescheidenheid. Wij moeten het doen met wat voorhanden is. Waarom er iets is, en waarom wij er zijn, dat zijn vragen waarop het antwoord niet is te vinden achter een koolstofatoom of een ver verwijderd hemellichaam. Koolstofatomen en hemellichamen, en alles wat daartussen zit, oftewel alles wat voorhanden is, daar hebben wij onze handen meer dan vol aan. Dat geldt ook voor de betonwetenschapper. Een hand grond, mits selectief genomen, bevat alle ingrediënten voor het maken van beton. Van dat beton bouwt hij sluizen, wegen, bruggen, stuwdammen en wolkenkrabbers. Dat ziet er glorieus uit. Maar al dat bouwen heeft ook schaduwkanten. De laatste jaren staan vooral de schaduwkanten in de schijnwerpers. In het vervolg van deze rede gaan wij daar dieper op in. Wij doen dat vanuit de gedachte dat wie last heeft van de schaduw, en daar iets aan wil veranderen, zich zal moeten richten op het object dat de schaduw veroorzaakt. Weglopen uit de schaduw verandert de schaduw niet. Ingrijpen op het schaduw-gevende object, teneinde haar schaduw te veranderen, vereist wel *kennis* van dat object. Het object waar het in deze rede over gaat is de infrastructuur. Hoe kwam die tot stand en wat bepaalt de schaduwkanten? Ik zou het nadenken over deze vragen willen inleiden met een verhaal waarmee ik de afgelopen jaren menige voordracht ben begonnen. Het verhaal van ‘de schat’.

Infrastructuur als product van wetenschap en techniek

De schat

Een vader had drie zonen. Kort voor zijn sterven riep hij hen bij zich. Hij vertelde hun dat er in het stuk land aan de zee een schat verborgen lag. Nadat hij dit had gezegd stierf hij. De zonen gingen naar de aangegeven locatie bij de zee en begonnen te graven. Eerst stenen ruimen. Na het verwijderen van de stenen bleef een laag vruchtbare aarde over. Ze begonnen met het verbouwen van groenten, en van de stenen metselden ze een schuurtje. Maar de schat hadden ze nog niet gevonden. Ze groeven dieper. De laag vruchtbare grond was inmiddels dik genoeg om grote struiken te planten en een wijngaard aan te leggen. Van de stenen metselden ze een paar huizen en gingen daarin wonen. Voortaan hoefden ze niet meer elke dag terug naar het dorp

⁶ L. Wittgenstein (1921) Tractatus Logico-Philosophicus. (Zie A. van den Beukel³ in “Met andere ogen”).

om daar te overnachten. Maar de schat hadden ze nog niet gevonden. Ze groeven nog dieper. Ze legden een bos aan en bouwden een veestapel op. Van de stenen bouwden ze een stad. Ze legden wegen, bruggen en tunnels aan. Ja, het werd een bruisende stad waar het goed toeven was. Alleen de schat hadden ze nog steeds niet gevonden. Maar de waarde van alles wat ze hadden opgebouwd was vele malen groter dan de schat waar ze naar zochten. Ja, dat alles wás de schat!

Dit verhaal is gebaseerd op een paar korte zinnen uit het boek 'De mechanisering van het wereldbeeld' van E.J. Dijksterhuis⁷, een groot wetenschapper uit de vorige eeuw. Het verhaal illustreert hoe werken vanuit een bepaald ideaal uiteindelijk iets op kan leveren dat de waarde van het oorspronkelijke ideaal ver overtreft. Dijksterhuis verwijst in dit verband naar de alchemisten. Eeuwenlang deden zij verwoede pogingen om goud te maken, slaagden daar nooit in, maar hebben wel een enorme bijdrage geleverd aan de ontwikkeling van de moderne chemie!

Het beheersingsmotief

De schat, waarvoor in deze rede aandacht wordt gevraagd, is die van de fysieke infrastructuur. Wij zullen dadelijk zien dat de infrastructuur een enorm kapitaal vertegenwoordigt, en met recht een schat genoemd mag worden. Maar voordat wij ingaan op de waarde van deze schat stellen wij ons eerst de vraag welk ideaal men ooit voor ogen heeft gehad dat aan de totstandkoming van de moderne infrastructuur vooraf is gegaan. Van de mogelijke antwoorden op deze vraag kies ik hier voor het motief 'beheersing'. Beheersing als ideaal en drijvende kracht achter ontwikkelingen in de bouw en, in meer algemene zin, in wetenschap en techniek. Het thema beheersing wordt op boeiende wijze aan de orde gesteld door Staudinger en Behler⁸ in hun boek 'Chance und Risiko der Gegenwart'. Daarin wordt geschetst hoe door de eeuwen heen mensen hebben geprobeerd om grip te krijgen op de hun omringende wereld. Achter verschijnselen in de zichtbare werkelijkheid veronderstelde men het handelen van geesten en goden. Dat was hun 'model' van de werkelijkheid. Om de onzichtbare wereld van geesten en goden te beïnvloeden wendde men zich tot sjamanen en toverdokters. Die werden in staat geacht om met bijzondere spreuken en rituelen door te dringen in de onzichtbare werkelijkheid achter de zichtbare werkelijkheid, om die vervolgens te kunnen beïnvloeden en beheersen.

De moderne mens heeft al lang afscheid genomen van dit oude, metafysische concept. Achter alledaagse verschijnselen zitten geen geesten of goden, maar natuurwetten. Met name in de periode van de Verlichting zijn op het terrein van de ontmy-

⁷ E.J. Dijksterhuis (1950) De mechanisering van het wereldbeeld. Meulenhoff. 594 p.

⁸ H. Staudinger, W. Behler (1976) Chance und Risiko der Gegenwart. Deutsches Institut für Bildung und Wissen. Paderborn. F. Schöningh, 385 p.

thologisering van ons wereldbeeld forse stappen gezet. De eerder aangehaalde quote van Laplace, dat hij voor zijn kosmologie de hypothese God niet meer nodig had, kenmerkte een nieuwe tijd. De werkelijkheid laat zich niet sturen door toverspreuken en rituelen, maar volgt natuurwetten. Wie de werkelijkheid wil beheersen en naar zijn hand wil zetten, die wende zich tot de wetenschap. Kennis van fundamentele natuurwetten verschaft ons de mogelijkheid om de werkelijkheid te manipuleren en een nieuwe wereld te creëren.

Reductie en fragmentatie

De werkwijze, die in de wetenschap wordt gehanteerd om totale beheersing van de werkelijkheid te bereiken, is die van reductie, decompositie en re-compositie. De eerste fasen van deze werkwijze zijn schematisch weergegeven in Fig. 2. In de eerste reductiestap wordt de complexe werkelijkheid teruggebracht tot een werkelijkheid, waarin alles meet- en weegbaar is. Deze stap wordt hier gesymboliseerd door het vervangen van een bol door een kubus. De kubus staat nu 'model' voor de bolvormige werkelijkheid. Op metaforische wijze wordt zo afstand genomen van de claim dat het model een één-op-één representatie van de werkelijkheid zou zijn. Het metaforische element zit onder andere in het bijzondere karakter van het getal π , dat nodig is om het volume van een bol te bepalen. Roos⁹ memoreert in zijn uittreerede dat het aantal bekende decimalen van het getal π inmiddels 5.000.000.000.000 bedraagt. Hij merkt daarbij op dat dit aantal nog betrekkelijk gering als we bedenken dat het aantal ontbrekende decimalen nog steeds oneindig groot is. Zo herinnert het getal π ons aan een wereld waarin nog plaats was voor het oneindige en ongrijpbare, maar dat met het adopteren van een gereduceerde werkelijkheid verloren is geraakt. In de kubus is alles exact. Alleen een kubus is geen bol! Wie dat vergeet, en het model houdt voor de werkelijkheid die het representeert, kiest niet alleen voor een vorm van vrijwillige armoede, maar overschat ook de reikwijdte van het concept 'model'.

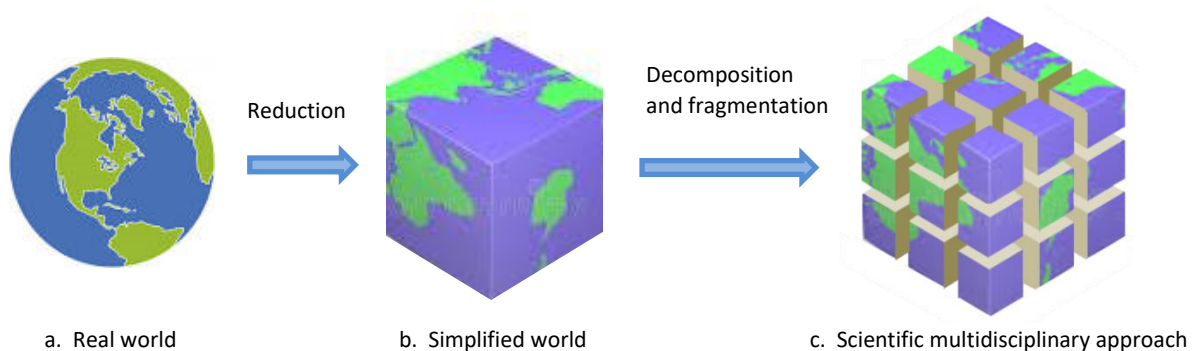


Fig. 2 Schematische voorstelling van de methode van reductie en fragmentatie in de wetenschap.

⁹ C. Roos (2010) Komt onvermoeide arbeid alles te boven? Uittreerede TU Delft, MailSupport, 56 p.

Om dieper in de gereduceerde werkelijkheid door te kunnen dringen wordt de kubus vervolgens opgedeeld in kleinere eenheden (Fig. 2c). We spreken van vakgebieden of disciplines. Binnen deze vakgebieden vindt verdere reductie plaats. De werkelijkheid wordt afgepeld tot op het niveau van moleculen en atomen, of nog kleiner. In Fig. 3 is dit schematisch weergegeven. De winst van deze werkwijze is dat binnen individuele vakgebieden grote diepgang kan worden bereikt. Deze winst valt ons echter niet zomaar ten deel. Er wordt een stevige prijs voor betaald. De prijs is fragmentatie van de werkelijkheid, en het ontstaan van een groot aantal 'interfaces' tussen vakgebieden en schaalniveaus. Daarnaast bestaat ook het gevaar van *verabsolutering* van individuele vakgebieden. Dat gevaar neemt toe naarmate een bepaald vakgebied geschikt wordt geacht om als voertuig te dienen voor het realiseren van welvaart en groei. Hoe excessieve groei van individuele disciplines de harmonie binnen het geheel van de werkelijkheid kan verstoren zal later nog uitvoerig aan de orde komen.

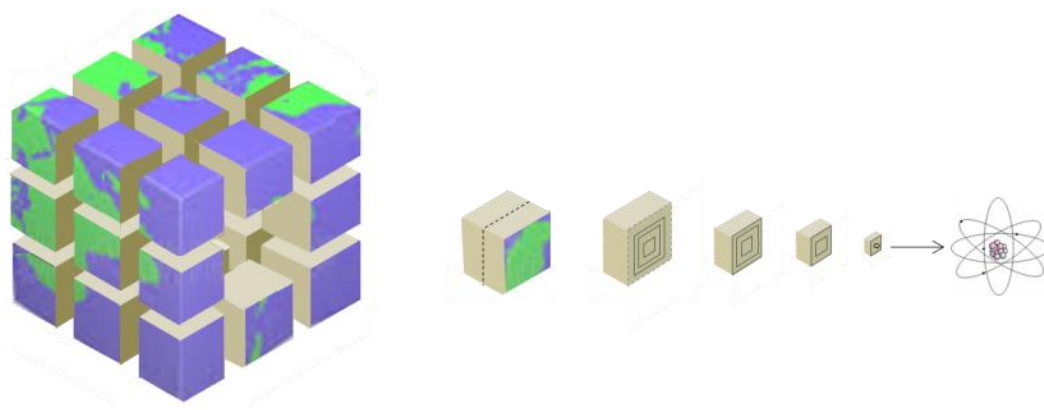


Fig. 3 Schematische voorstelling van steeds verdergaande reductie binnen een vakgebied.

Fragmentatie in de bouw

De bouw is niet immuun gebleken voor het hier geschetste fragmentatieproces. Om dit te illustreren kijken wij eerst naar een oorspronkelijke definitie van architectuur:

'Architecture is the art and science of designing and constructing buildings and other physical structures for human shelter or use'.

Het sterke van deze definitie zit in de verbinding tussen kunst en wetenschap enerzijds, en een duidelijk afgebakend doel anderzijds. Het doel van bouwen is het treffen van voorzieningen om mensen te beschermen, en het samen wonen en samen leven mogelijk te maken. Bescherming is nodig tegen weer en wind, hitte en koude, was-send water, wilde dieren en vijandige naties. Wegen en bruggen zijn nodig voor ver-voer van mensen en goederen. Naast kennis, die nodig is voor het realiseren van con-structies (science), omvat architectuur ook kunst (art). Toen bouwprojecten qua om-

vang nog te overzien waren lagen zowel art als science in handen van de bouwer. De bouwer wist alles, ontwierp alles en overzag alles. Maar die tijd is al lang voorbij. Reeds rond het jaar nul verzuchtte Vitruvius, de samensteller van een klassiek tiendeelig werk over de bouwkunst, dat bouwwerken zo complex waren geworden dat het onmogelijk was dat één persoon alle disciplines van het bouwen nog zou kunnen beheersen¹⁰. Fragmentatie van de bouw deed zijn intrede. Ook de sterke verbondenheid tussen art en science ging meer en meer verloren. Tussen partijen ontstonden interfaces, met onvermijdelijke hindernissen en uitdagingen voor communicatie en samenwerking. In weerwil van deze voor de bouw in feite ongunstige ontwikkeling is door de eeuwen heen toch enorm veel tot stand gekomen. Daarbij zijn de bouw, en de door haar gerealiseerde infrastructuur, vaak cruciaal geweest voor ontwikkelingen in tal van sectoren en voor de groei van regionale en nationale economieën.

Infrastructuur in globaal perspectief

Groei van het bruto nationaal product

Ontwikkelingen in wetenschap en techniek worden vaak gezien als een noodzakelijke voorwaarde voor groei. Deze groei kan worden uitgedrukt in het bruto nationaal product, of GDP (Gross Domestic Product). Roser¹¹ analyseerde de groei van het *mondiale* GDP (World GDP, of WGDG) vanaf het jaar 0 tot het jaar 2000. In Fig. 4 is deze groei

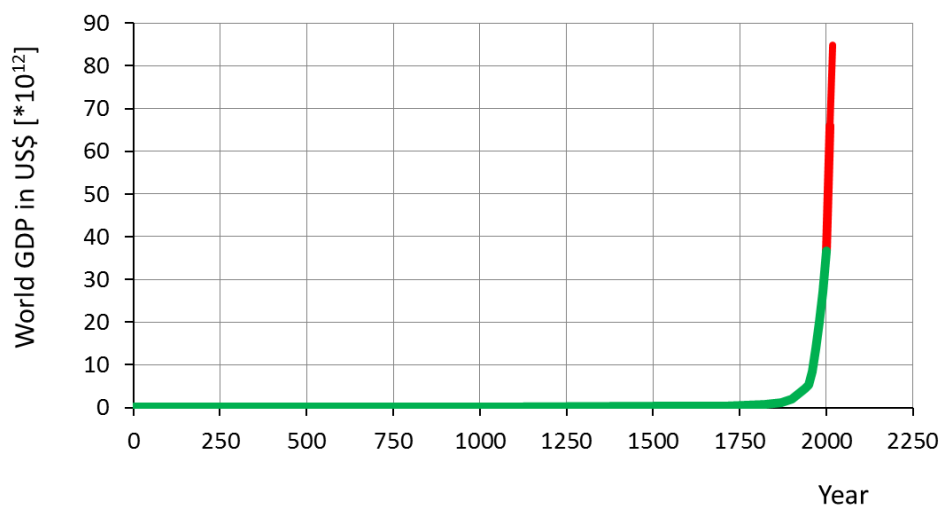


Fig. 4 Verloop mondiaal GDP in de periode 0 tot 2018 (Naar Roser¹¹ (groene curve) en Wereldbank¹² (rode deel van de curve)).

¹⁰ T. Peters (1999) Vitruvius, Handboek Bouwkunde. Athenaeum – Polak & Van Gennip. 393 p.

¹¹ M. Roser (2017) Economic Growth. Our world in data. <https://ourworldindata.org/economic-growth>. Zie ook: The Maddison Project. <http://www.ggdc.net/maddison/maddison-project/home.htm>, 2013 version.

weergegeven met een groene lijn. De groei van het WGDP in de aansluitende periode 2000-2018 is weergegeven met een rode lijn¹². De curve laat zien dat in de eerste achttienhonderd jaar van de beschouwde periode de groei van het WGDP volledig in het niet valt bij de groei in de laatste tweehonderd jaar. De enorme groei zet in ten tijde van de industriële revolutie, zo rond het einde van de achttiende en het begin van de negentiende eeuw. In de zestiger jaren van de vorige eeuw zijn wetenschappers zich wel zorgen gaan maken over de vraag of de aarde deze enorme groei wel aan kan. Waarschuwingen kwamen onder andere van de Club van Rome met het bekende rapport 'Grenzen aan de groei'¹³. Er is ook zeker gereageerd op dat rapport, maar dat heeft niet geleid tot een afname van de groei. Integendeel! Zoals de curve in Fig. 4 laat zien is de groei in de afgelopen decennia onverminderd doorgegaan.

In Fig. 5 wordt ingezoomd op de groei van het WGDP vanaf 1950. Deze groei, aangegeven met de rode lijn, laat zich verklaren door de groei van de wereldbevolking (blauwe lijn), en een nog sterkere toename van de consumptie per hoofd van de bevolking (groene lijn). Naast de groei van het WGDP toont de figuur ook de toename van de cementproductie. Wij zien dat in de beschouwde periode de cementproductie nog sneller is toegenomen dan het WGDP. Dat hoeft ons ook niet te verbazen. Groei van het WGDP vereist een goede infrastructuur en daarvoor is veel beton nodig. We mogen gerust stellen dat het materiaal beton, als het om materiele welvaart en groei gaat, er toe heeft gedaan en nog steeds toe doet!

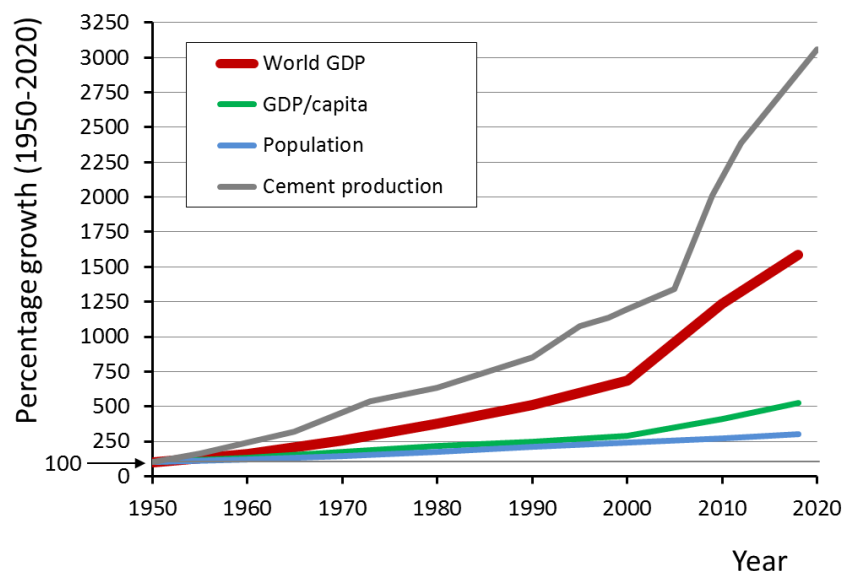


Fig. 5 Procentuele groei van World GDP, wereldbevolking, GDP per persoon en cementproductie in de periode 1950-2018 (zie ook Van Breugel⁵⁰).

¹² Data van World Bank https://en.wikipedia.org/wiki/List_of_countries_by_total_wealth

¹³ Club van Rome (1972). Grenzen aan de groei (The Limits to Growth)

Waarde van de infrastructuur

De groei van het WGDGP is gepaard gegaan met een toename van het nationale kapitaal. Het wereldwijd geaggregeerde nationale kapitaal (Global Gross National Wealth, GNW) in 2018 is geschat op US\$ 320 biljoen¹² (Eng. trillion). De fysieke infrastructuur maakt daarvan ongeveer de helft uit¹⁴, dus US\$ 160 biljoen. Daarvan zit US\$ 90 biljoen in woningen en US\$ 70 biljoen in de civiele infrastructuur. Ter vergelijking: de totale waarde van de infrastructuur is ongeveer twintig keer zo groot als die van al het goud – ongeveer 190.000 ton - dat ooit is gedolven (prijsspeil 2019). Het is dan ook echt niet overdreven om de infrastructuur te zien als een schat! Een schat die een enorm kapitaal vertegenwoordigt. Dat laatste bepaalt ons bij onze verantwoordelijkheid om zorgvuldig met deze schat om te gaan. Die zorgvuldigheid is vooral geboden als wij ons realiseren dat deze schat continu onderhevig is aan veroudering.

Budgetten voor vervanging en groei

Als gevolg van veroudering (ageing) is de levensduur van de infrastructuur beperkt. De ontwerp levensduur van bouwwerken ligt tussen de 50 en 100 jaar, met uitschieters naar 150 en 200 jaar. In uitzonderlijke gevallen wordt een levensduur geëist van wel 1000 jaar, bijvoorbeeld voor constructies voor opslag van radioactief afval. Om deze infrastructuur in stand te houden zal, uitgaande van een waarde van de infrastructuur van US\$ 160 biljoen en een gemiddelde levensduur van 50 jaar, jaarlijks voor een bedrag van US\$ 3,2 biljoen aan vervanging moeten plaatsvinden.

De vervangingsopgave speelt met name in geïndustrialiseerde landen met een min of meer voldragen infrastructuur. In opkomende economieën wordt vooral geïnvesteerd in infrastructuur die nodig is voor het realiseren van groei. In de periode 2013 - 2030 is voor groei, wereldwijd, een bedrag nodig van US\$ 57 biljoen¹⁵. Dat komt neer op een bedrag van US\$ 3,2 biljoen per jaar. Hiervoor zagen wij dat jaarlijks een even groot bedrag nodig is voor vervanging van bestaande infrastructuur. In de periode tot 2030 is dus voor groei *én* instandhouding van de mondiale infrastructuur een bedrag nodig van US\$ 6,4 biljoen per jaar. Om dit grote bedrag terug te brengen tot een menselijke maat kunnen we het delen door de wereldbevolking van 7,7 miljard (2019). Dan zien we dat een wereldburger jaarlijks US\$ 830 kwijt is voor instandhouding en groei van de infrastructuur. Op het eerste gezicht lijkt dit mee te vallen. Een paar kanttekeningen zijn echter wel op zijn plaats. In de eerste plaats is een jaarlijks bedrag van US\$ 830 per persoon inderdaad betrekkelijk klein als het wordt vergeleken met het bruto nationaal product per inwoner in de rijke landen. In de tien rijkste landen van de wereld varieert het GDP per inwoner tussen US\$ 54000 en US\$ 114000

¹⁴ A.E. Long, Sustainable bridges through innovative advances. Institution of Civil Engineers, presented at Joint ICE and TRF Fellows Lecture. 23, 2007.

¹⁵ R. Dobbs, et al. (2013) Infrastructure productivity: How to save \$ 1 trillion a year. McKinsey Global Inst., 88 p.

Tabel 1 Bruto Nationaal Product (Gross Domestic Product) per inwoner in rijke en arme landen¹⁶

Landen	Aantal inwoners	GDP/inw/jaar US\$
10 rijkste landen	49 miljoen	54000 – 114000
10 armste landen	210 miljoen	303 - 544

per jaar^{16,17} (Tabel 1). Dit is fors meer dan in de tien armste landen. Daar varieert het GDP per inwoner van US\$ 303 tot US\$ 544 per jaar. Het is duidelijk dat in deze landen een jaarlijks bedrag van US\$ 830 per inwoner voor de infrastructuur niet kan worden opgebracht. Hierbij moet wel worden opgemerkt - en dat is dan de tweede kanttekening -, dat de waarde van de infrastructuur per hoofd van de bevolking in de rijke landen vele malen groter is dan in de arme landen. In de rijke landen is het bedrag dat jaarlijks moet worden opgebracht voor instandhouding van de infrastructuur dan ook een veelvoud van US\$ 830 per inwoner.

De hier genoemde getallen en bedragen geven ons een indruk van de waarde van de infrastructuur. Maar ze confronteren ons ook met de – wereldwijd gezien - ongelijke verdeling van kapitaalgoederen. Dit is natuurlijk geen nieuw gegeven. Het laat wel zien dat een beschouwing over de infrastructuur en de daaraan gekoppelde budgetten voor vervanging en groei niet mogelijk is *zonder* het vraagstuk van rechtvaardige verdeling van goederen en bezit onder ogen te zien. In het vervolg zal blijken dat dit een terugkerend thema is zodra het aspect duurzaamheid ter sprake komt.

Beton onder vuur

Beton is het meest toegepaste bouw materiaal op aarde. Per hoofd van de bevolking wordt jaarlijks ongeveer 1,0 m³ beton geproduceerd¹⁸. Zonder beton geen infrastructuur, en zonder een goede infrastructuur geen florerende economie. Toch is het imago van het materiaal beton niet best. Watts¹⁹ noemt beton zelfs het meest destructieve materiaal op aarde. Vidal²⁰ doet er nog een schepje bovenop en zegt dat beton ons in een klimaatcatastrofe dompelt. “Beton vult onze afvalbergen, warmt onze ste-

¹⁶ Gegevens Wereld Bank. 2018

¹⁷ Het gaat hier niet om de absolute waarde van de genoemde bedragen. De bedragen worden hier getoond om de verschillen tussen arme en rijke landen te illustreren.

¹⁸ Meyer, C. (2020) Concrete Materials and Sustainable Development in the United States

¹⁹ J. Watts (2019) Concrete: the most destructive material on earth. The Guardian Concrete Week.
<https://www.theguardian.com/cities/2019/feb/25/concrete-the-most-destructive-material-on-earth>

²⁰ J. Vidal (2019) Concrete is tipping us into climate catastrophe. It's payback time. The Guardian.
<https://www.theguardian.com/cities/2019/feb/25/concrete-is-tipping-us-into-climate-catastrophe-its-payback-time-cement-tax>

den op, veroorzaakt overstromingen, doodt duizenden mensen en is verantwoordelijk voor een fundamentele verandering van onze relatie met de aarde.” Nu is het wel bekend dat er mensen zijn die beton geen warm hart toedragen. Maar wat Vidal hier zegt gaat natuurlijk wel erg ver. Toch kunnen we deze uitspraken niet zomaar naast ons neerleggen. Ze zijn niet gedaan door beroepsklagers in een uithoek van de wereld. Deze uitspraken zijn gedaan tijdens de Guardian Concrete Week, een platform waar mensen samenkomen die echt wel weten wat er speelt. Wat Watts en Vidal beweren verdient dan ook een gedegen evaluatie. Daarbij gaat het om zowel de *inhoud* van hun uitspraken als de *context* waarin zij hun uitspraken deden. Wat dat laatste betreft: de context was die van de klimaatproblematiek.

Het negatieve imago van beton is vooral te wijten aan de CO₂-uitstoot waarmee de productie van cement gepaard gaat. De cementproductie is goed voor 5 à 8 procent van de globale CO₂-uitstoot. De CO₂-uitstoot van de hele betonsector bedraagt ca. 10% van de mondiale CO₂-uitstoot. De productie van staal gaat met een vergelijkbare uitstoot gepaard. Samen zijn de productie en verwerking van beton en staal goed voor de uitstoot van 6,7 miljard ton CO₂²¹ per jaar. De vraag is nu welke opties de bouwsector heeft om de CO₂-uitstoot en, meer algemeen, de milieu-impact van de bouw te reduceren. In deze rede beperk ik mij tot de opties die de betonsector heeft. Wij kijken dan eerst naar het materiaal beton zelf. Hoe wordt het gemaakt? Waar bestaat cement uit en hoe krijgt beton zijn sterkte? Vervolgens richten wij ons op het bouwproces. Waar zitten mogelijkheden om de milieu-impact van de bouw terug te dringen, wat levert ons dat op, en wat is bij dat alles de rol van modellen.

Bouwen met beton – Een eerste verkenning ^{*)}

Het materiaal beton

Beton is een complex, heterogeen materiaal. De hoofdbestanddelen van beton zijn cement, zand, grind en water. Cement is een fijn poeder, met een korrelgrootte van 0,5 tot 100 µm. Als cement met water reageert ontstaan reactieproducten. Samen met nog niet-gereageerde cementkorrels vormen deze reactieproducten cementsteen, waarmee zand- en grindkorrels aan elkaar worden ‘gekit’. Bij de reactie van cement met water komt warmte vrij en stijgt de temperatuur van het beton. Gaandeweg de reactie wordt het beton stijver en sterker. De sterkte van beton wordt ge-

²¹ K. van Breugel (2017) Ageing infrastructure and circular economy: challenges and risks Proceedings of the 2nd World Congress on Civil, Structural, and Environmental Engineering (CSEE’17), Barcelona, 12p.

^{*)} De nu volgende tekst is meer vaktechnisch van aard. Het meer beschouwende deel van deze rede wordt hervat bij de paragraaf “Besparen op infrastructuur in Nederland – Het nieuwe aardgas” op blz. 26.

karacteriseerd met de druksterkte na 28 dagen, bereikt na verharding bij een temperatuur van ca. 20°C. Tachtig tot negentig procent van het in Nederland gebruikte beton heeft een druksterkte tussen 25 en 45 N/mm². De treksterkte van beton is veel lager dan de druksterkte, meestal slechts 10% daarvan. Vanwege de relatief lage treksterkte wordt in betonelementen wapening toegepast. Als bij belasten van een betonconstructie de treksterkte van het beton lokaal wordt overschreden, dan neemt de wapening de rol van het beton over. Het beton is dan wel gescheurd. De kunst van het construeren in gewapend beton is om de wapening zo te dimensioneren dat de scheurwijdte binnen toelaatbare waarden blijft. Zolang dat lukt worden scheuren niet gezien als schade, maar ‘horen’ ze bij een gezond ontwerp in gewapend beton.

Grootschalige toepassing van het materiaal beton dateert uit het begin van de twintigste eeuw. Er werden indrukwekkende kunstwerken gebouwd zoals stuwdammen, bruggen en viaducten. Bij dit soort bouwwerken gaat het vaak om grote afmetingen. We spreken dan van *massabeton*. In deze grote betonvolumes kan de temperatuur tijdens het verharden flink oplopen. Wanneer later afkoeling plaatsvindt kan dat tot scheurvorming leiden. Ernstige scheurvorming is ongewenst, en is al decennia lang een belangrijke reden voor intensief onderzoek naar factoren die op het verhardingsproces en de kans op scheurvorming van invloed zijn. Om deze factoren goed in beeld te krijgen moeten we afdalen tot het niveau van atomen en moleculen. Daarna kan de figuurlijke brug worden geslagen naar het gedrag van concrete betonconstructies, met afmetingen van tientallen tot wel honderden meters.

Schaalniveaus en de rol van modellen

In Fig. 6 zijn de lengteschalen aangegeven die bij het bestuderen en maken van beton en betonconstructies in beeld zijn. Materiaalwetenschappers en betontechnologen bestuderen het gedrag van beton op lengteschalen van 10⁻¹⁰ m (1 Ångström) tot 10⁻² m (1 cm). Dat is een range van acht ordes van grootte. Betonconstructeurs richten zich op het gedrag van betonconstructies met afmetingen tot honderden meters, en kijken daarbij naar scheurwijdtes tot op tienden van millimeters. Dat is een range van zes ordes van grootte. Op al deze schaalniveaus is in de loop der jaren een enorme hoeveelheid kennis ontwikkeld en ingebracht in het ontwerp- en bouwproces. Modellen speelden daarbij een cruciale rol. Modellen maken het mogelijk om kennis op opeenvolgende schaalniveaus te koppelen en te ontsluiten voor de praktijk. Bij toepassingen in de praktijk kunnen wij denken aan constructies voor ‘human shelter or use’, maar ook aan tal van andere constructies. Deze constructies zullen meer tot de verbeelding spreken als ze het resultaat zijn van een harmonieus samenspel van wetenschappelijke kennis (science) en kunst (art). Een voorbeeld van een constructief en architectonisch gezien bijzondere creatie is het appartementencomplex Habitat 67 in Montreal (Fig. 7a). Dit complex is gebouwd in de zeventiger jaren van de vorige eeuw.

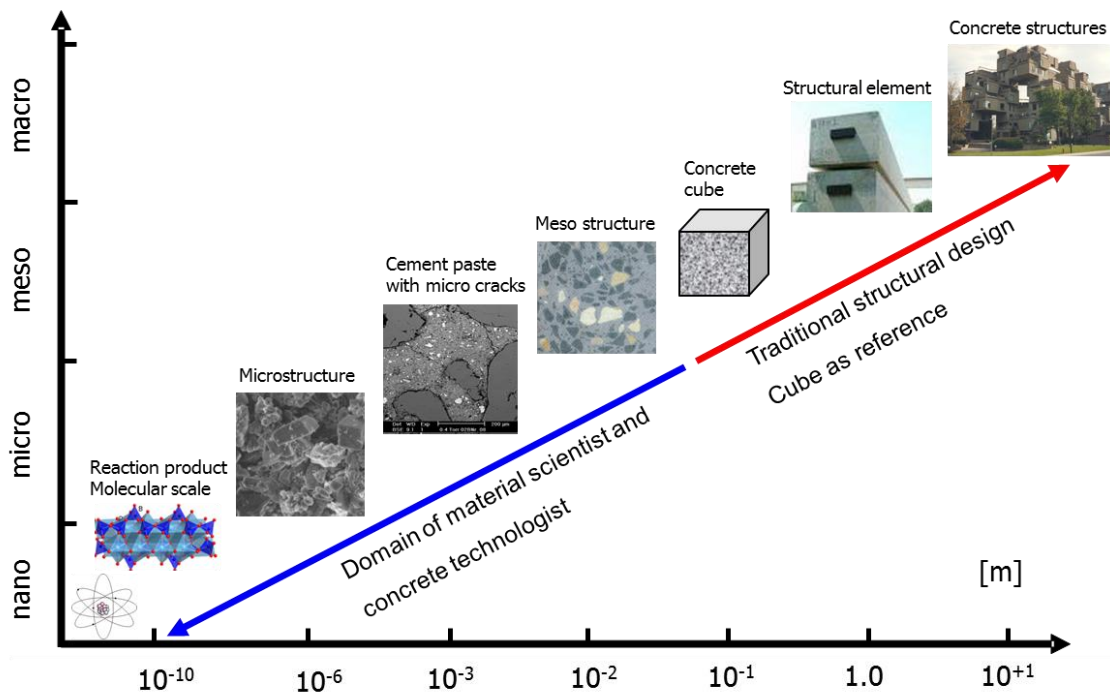
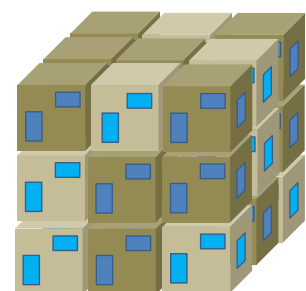


Fig. 6 Schematische weergave van meerschalligheid in materiaal- en constructiedomein.

Het is aansprekend vanwege zijn bijzondere architectuur en de keuze om het beton volledig in het zicht te houden. De appartementen zijn als aparte units geplaatst en onderling verbonden. Constructief gezien vormen de verbindingen tussen de kubusvormige units een grote uitdaging. Het zou veel gemakkelijker zijn geweest om de units te plaatsen in een regelmatig stramien, zoals geschetst in Fig. 7b. Maar daarvoor is bij



a. Architecture = Science + Art



b. Only science

Fig. 7 Appartementencomplex Habitat 67, Montreal, Canada.

dit complex nadrukkelijk niet gekozen. In figuurlijke zin zou je het appartementencomplex kunnen zien als het resultaat van *decompositie* van een samengestelde kubus, gevolgd door een creatief proces van *re-compositie* en *verbinden* van de afzonderlijke units. Het sterk afwijken van een eenvoudig samengestelde kubus heeft een aansprekend resultaat opgeleverd. Maar hiervoor is wel een forse prijs betaald! De 'interfaces' tussen de kubussen zijn gecompliceerd. Bedenk daarbij dat dit complex is blootgesteld aan grote temperatuurverschillen: 's winters tot -30°C en 's zomers $+30^{\circ}\text{C}$. Grote temperatuurverschillen leiden tot grote krachten in de constructie. Al met al een enorme opgave voor constructeurs om scheurvorming als gevolg van opgelegde temperatuur- en krimpverschillen in de hand te houden!

Meer over het materiaal beton

De reactie van cement met water

Het verhardingsproces van beton is een complex chemisch-fysisch proces. Genoemd is al dat bij de reactie van cement met water, ook hydratatie genoemd, warmte vrijkomt. De hoeveelheid warmte die wordt geproduceerd, en de snelheid waarmee de warmte vrijkomt, hangen af van de chemische samenstelling en de fijnheid van het cement. Dat zijn ook de factoren waarmee de betontechnoloog kan spelen om het verhardingsproces te sturen. Om dat duidelijk te maken kijken wij nu meer in detail naar de samenstelling van een klassiek Portland cement. Fig. 8a toont – schematisch – een cementkorrel met de vier hoofdbestanddelen waaruit cement is opgebouwd: di- en tricalciumsilicaat (C_2S en C_3S), tricalciumaluminaat (C_3A) en tetracalciumalumi-naatferriet (C_4AF). De belangrijkste reactieproducten die ontstaan als cement met water reageert zijn calciumsilicaathydraat (CSH) en calciumhydroxide (CH). Het volume van de reactieproducten is groter dan van het oorspronkelijke cement. Dit betekent dat een reagerende cementkorrel als het ware groeit. Rond de cementkorrel

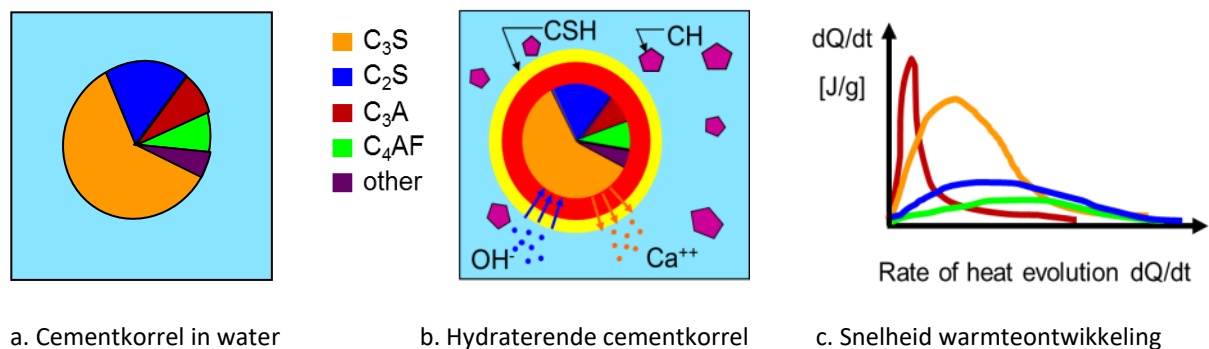


Fig. 8 Schematische weergave van een fase in het reactieproces en snelheid van warmteontwikkeling.

vormt zich een schil van reactieproducten (Fig. 8b). Reactieproducten die binnen de oorspronkelijke contouren van de cementkorrel worden gevormd worden 'inner product' genoemd (Fig. 8b, rode schil). Reactieproducten buiten deze contouren worden aangeduid met de term 'outer product' (Fig. 8b, gele schil).

De snelheid waarmee afzonderlijke cementbestanddelen met water reageren is verschillend. C_3A en C_3S reageren relatief snel. De snelheid waarmee warmte vrijkomt, dQ/dt , is grafisch weergegeven in Fig. 8c. Ook de fijnheid van het cement heeft invloed op de reactiesnelheid. Een fijn gemalen cement heeft een groot oppervlak dat met water kan reageren. De reactie verloopt dan snel, en ook neemt de snelheid toe waarmee warmte vrijkomt en betoneigenschappen zich ontwikkelen.

Optimaliseren van de mengselsamenstelling – Reductie CO_2 -emissie

Met zijn keuze voor een bepaalde chemische samenstelling en fijnheid van het cement kan de betontechnoloog verschillende doelen voor ogen hebben. Het kan zijn dat hij de temperatuur van het beton tijdens het verharden laag wil houden. Hij kan dan kiezen voor een grof cement met een laag gehalte aan C_3S en C_3A . Dat zal resulteren in een *langzame* sterkteontwikkeling. Het kan ook zijn dat hij juist een *snelle* sterkteontwikkeling wenst. In dat geval zal hij kiezen voor een fijn cement met een hoog gehalte aan C_3S en C_3A . Tegenwoordig zal hij ook streven naar een zo laag mogelijke CO_2 -uitstoot per kubieke meter beton. Hoe dat kan worden bereikt kan worden geïllustreerd aan de hand van een drietal mengsels. De mengsels zijn schematisch weergegeven in Fig. 9. Mengsel A is gemaakt met een grof cement, mengsel B met een fijn cement, en mengsel C met een fijn cement waarvan een deel is vervangen door een inerte (niet-reactieve) vulstof.

Het grove mengsel A zal, vanwege het geringe specifieke oppervlak van het cement, traag reageren. Langzaam worden zandkorrels aan elkaar gekit door de 'groeïende' cementkorrel. De grove cementkorrel zal deels ongehydrateerd achterblijven (Fig. 9d). Het fijne cement in mengsel B heeft een groot specifiek oppervlak, zal snel reageren en levert een snelle sterkteontwikkeling. Al het cement reageert (Fig. 9e), wat tot een flinke warmteontwikkeling zal leiden. Het vrijkomen van veel warmte betekent een hoge temperatuur van het beton en, bij afkoelen, een aanzienlijke kans op scheurvorming. Bovendien zal een hoge reactietemperatuur een cementsteen opleveren met een relatief grof poriënsysteem en lagere eindsterkte. Een wat lagere eindsterkte is meestal geen probleem, maar een grof poriënsysteem mogelijk wel. De weerstand van het beton tegen het binnendringen van agressieve stoffen neemt dan af, en de constructie zal minder duurzaam zijn. Voor een snelle sterkteontwikkeling, met als doel snel te kunnen bouwen, wordt dus wel een prijs betaald!

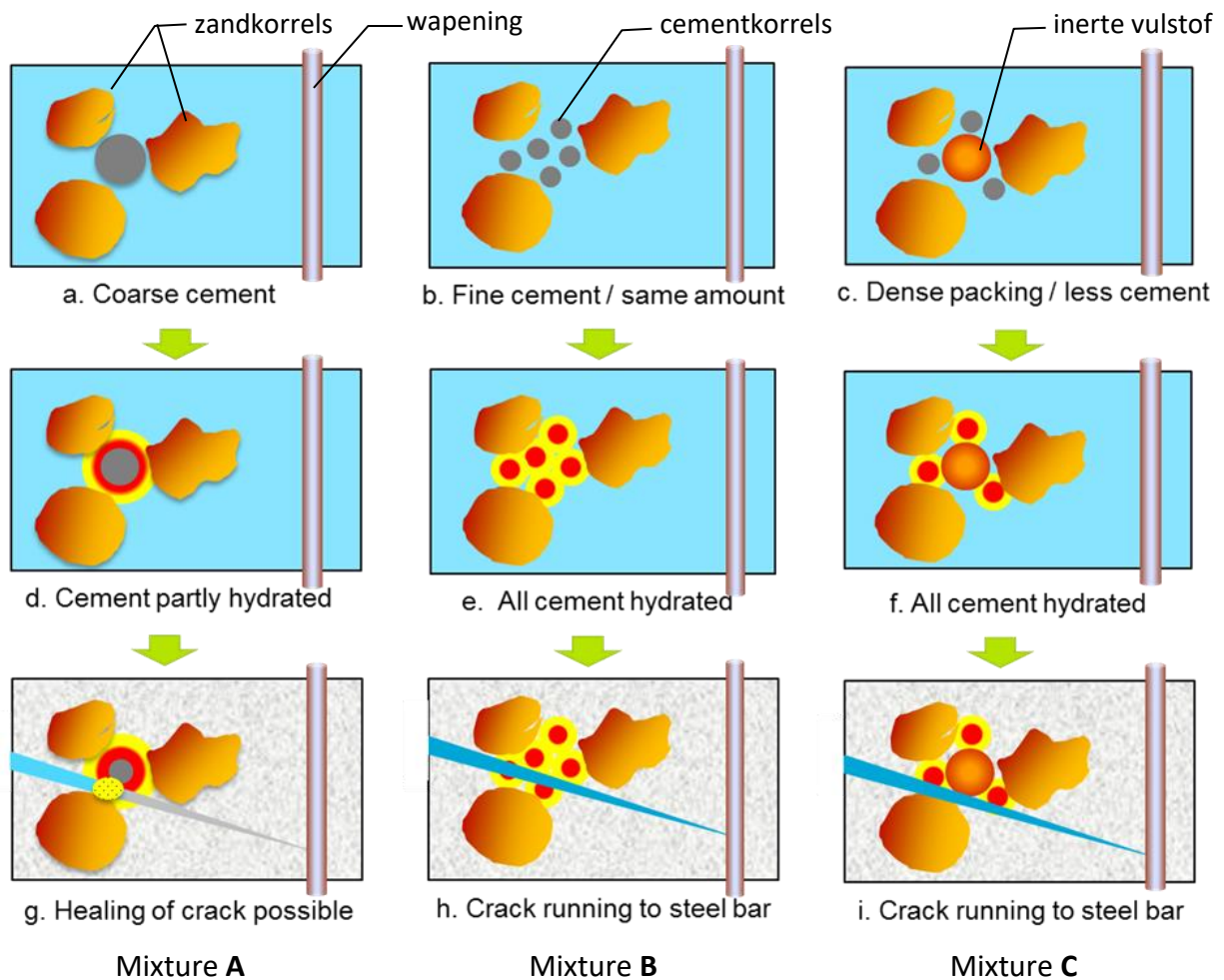


Fig. 9 Karakteristieken van betonmengsels. A) Mengsel met grof cement; B) Mengsel met fijn cement; C) Fijn cement met dichte korrelepakking van toeslagmateriaal en en/of inerte vulstof (bijvoorbeeld zeer fijn zand). (● cement; ● inner product; ● outer product; ► scheur)

Het betontechnologische antwoord op de nadelen van mengsel B is, althans voor een deel, het optimaliseren van de *korrelepakking* van het cement en het toeslagmateriaal. Bij een grote pakkingsdichtheid van het toeslagmateriaal resteert een kleiner volume dat nog door cementsteen hoeft te worden opgevuld. Bijgevolg kan met een lager cementgehalte worden volstaan (mengsel C, Fig. 9c). Met minder cement kan toch een goede sterkte worden bereikt, omdat de 'groeierende' cementkorrels kleinere afstanden tussen de toeslagkorrels hoeven te overbruggen (Fig. 9f). Zo worden twee vliegen in een klap geslagen. Minder cement betekent minder CO₂-uitstoot per kubieke meter beton, en dus een kleinere milieu-impact. Daarnaast betekent minder cement ook minder warmteontwikkeling en een kleinere kans op scheurvorming in de afkoelfase van het verhardingsproces.

Als wij nu de mengsels A, B en C met elkaar vergelijken, dan tendeert mengsel C naar het ideale mengsel. Minder cement, minder warmteontwikkeling, een relatief snelle

sterkteontwikkeling en ook een goede, soms zelfs zeer hoge eindsterkte. Omdat cement veel duurder is dan zand en grind levert een dichte korrelpakking ook nog een economisch voordeel op. Maar toch een kanttekening. Beton is een bros materiaal, en is daardoor gevoelig voor scheurvorming. Als in het beton een scheur ontstaat, dan heeft mengsel A een voordeel ten opzichte van de mengsels B en C. Immers, in het grove mengsel A is nog een hoeveelheid niet-gehydrateerd cement aanwezig (Fig. 9d). Wanneer water een scheur binnendringt dan kan dat met het nog aanwezige cement reageren en wordt de scheur weer gedicht (Fig. 9g). Het beton herstelt zichzelf! De mengsels B en C hebben dat zelfherstellende vermogen niet meer (Fig. 9h en 9i). Anders gezegd, het trage mengsel A is robuuster dan de snellere mengsels B en C.

Langeduurgedrag van brugdekken met oude en moderne betonmengsels

Het vermoeden dat het grove en trage mengsel A robuuster is dan de snellere mengsels B en C vindt steun in een uitgebreid onderzoek in de Verenigde Staten naar het gedrag van betonnen brugdekken. Mehta c.s.²² onderzocht het langgeduurgedrag van brugdekken, vervaardigd in vier opeenvolgende perioden in de vorige eeuw. De perioden zijn aangegeven in Fig. 10 op de horizontale as. Mehta vond dat oude brugdekken, gemaakt vóór 1930, minder problemen gaven dan brugdekken vervaardigd met modernere betonmengsels. De duurzaamheidsproblemen namen toe bij toename van de fijnheid van het cement, hogere gehalten aan het sneller reagerende C_3A en C_3S , en een lage water-cement factor (toegepast om hoge sterktes te bereiken). Deze

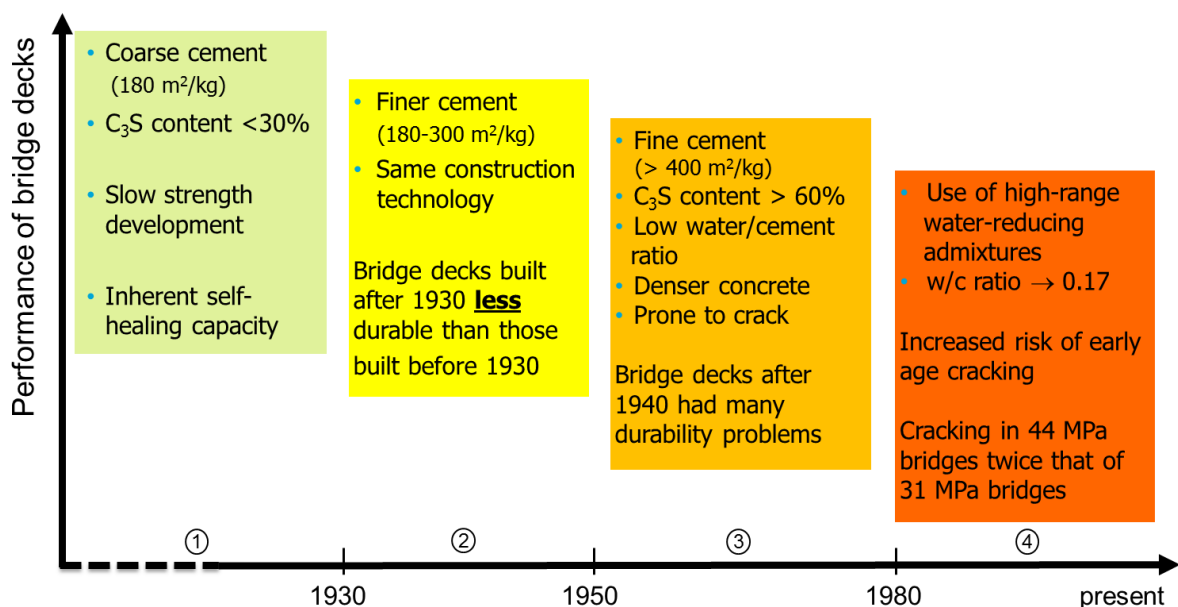


Fig. 10 Ranking van lange termijn gedrag van betonnen brugdekken, gebouwd in de periode voor 1930 tot begin 21^{ste} eeuw. Verticale as: performance (naar Mehta et al²²).

²² K. Mehta et al. (2001) Building Durable Structures in the 21st Century. Concrete Int., Vol. 23 (3) pp. 57-63

ontwikkeling in betonmengsels was het antwoord op de wens om sneller, groter en hoger te kunnen bouwen. Oftewel, de drijvende kracht achter deze ontwikkeling was de economie! Tegenwoordig komt daar de milieueis bij om de CO₂-uitstoot te beperken. Verminderen van de hoeveelheid cement in het beton is dan een korte slag om aan zowel de economische als de milieueisen te voldoen. Maar wanneer deze korte slag leidt tot scheurgevoelige constructies met minder zelfherstellend vermogen en daardoor een kortere levensduur, dan kan het beoogde economische en milieuvoordeel op den duur volledig verdampen en zelfs, zo blijkt, in zijn tegendeel verkeren!

Modellen voor beton op verschillende schaalniveaus

Numerieke modellen voor verhardingsprocessen en microstructuurontwikkeling

In het voorgaande stonden wij stil bij de reactie van afzonderlijke cementkorrels met water. In werkelijkheid bevat beton miljoenen cementkorrels. Wanneer die allemaal gaan reageren komen ze met elkaar in contact en vormen samen cementsteen. Voor het simuleren van de vorming van cementsteen is een aantal numerieke modellen ontwikkeld. Een daarvan is het zogenaamde pixel model²³, weergegeven in Fig. 11a. In dat model worden cementkorrels opgebouwd gedacht uit kleine kubusjes, voxels genoemd, ter grootte van 1 μm^3 . Aan deze voxels worden bepaalde eigenschappen meegegeven. Ze maken 'random walks' door de cementpasta, gaan reageren met andere voxels en vormen zo een microstructuur. Een ander model is bekend onder de naam HYMOSTRUC²⁴, en is ontwikkeld aan de TU Delft. In dit model worden cementkorrels voorgesteld als kleine bolletjes die langzaam groeien en zo met elkaar in contact komen. Dit model stamt uit de tachtiger jaren van de vorige eeuw, en is later verder ontwikkeld door Koenders²⁵, Ye²⁶ en Peng²⁷. Fig. 11b toont een virtuele microstructuur, gegenereerd met het programma HYMOSTRUC3D.EXD²⁷. Een virtuele microstructuur kan worden gebruikt voor het beschrijven van, bijvoorbeeld, de ontwikkeling van materiaaleigenschappen van verhardend beton²⁴, of onderzoek naar microscheurvorming in cementsteen onder een externe trekkracht²⁸ (Fig. 11c). Daarnaast vormen geavanceerde hydratatie- en microstructuurmodellen ook de basis

²³ Bentz, D.P., Garboczi E.J. (1989) A digitized simulation model for microstructural development. *Advances in Cementitious Materials*, Ed. S. Mindess, Westerville, Ohio, USA, Am. Ceramic Society, pp. 211-226.

²⁴ K. van Breugel (1991) Simulation of hydration and formation of microstructure in hardening cement-based materials. PhD Thesis, TU Delft, 305 p.

²⁵ E.A.B. Koenders (1997) Simulation of volume changes in hardening cement-based materials. PhD Thesis, TU Delft, 171 p.

²⁶ G. Ye. (2003) The Microstructure and Permeability of Cementitious Materials. PhD Thesis, TU Delft, 186 p.

²⁷ G. Peng (2018) Simulation of hydration and microstructure development of blended cement. PhD Thesis, TU Delft, 223 p.

²⁸ Z. Qian (2012) Multiscale modelling of fracture processes in cementitious materials. PhD Thesis. TU Delft, 151 p.

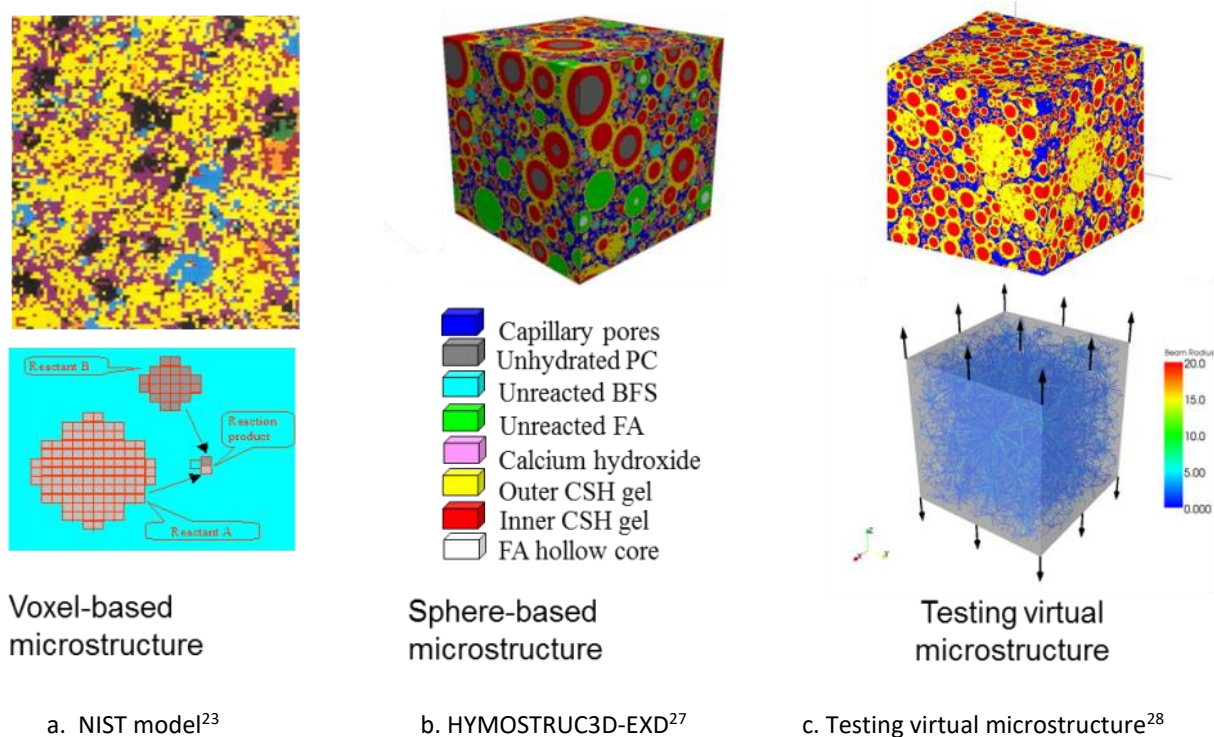


Fig. 11 Voorbeelden van numeriek gegenereerde virtuele microstructuur van cementsteen.

voor computerprogramma's die in de bouw worden toegepast voor het simuleren van het gedrag van complete betonconstructies in de verhardingsfase.

Modellen voor scheurvorming in verhardende betonconstructies

Geavanceerde numerieke modellen voor het beschrijven van het verhardingsproces vinden hun weg naar de praktijk via zogenoemde verhardingsbeheerssystemen. Deze systemen worden gebruikt om het verhardingsproces in betonconstructies te simuleren als functie van de samenstelling van het beton, de constructieafmetingen, type bekisting, stortvolgorde en weersomstandigheden. Een voorbeeld van een praktische toepassing van een verhardingsbeheerssysteem betreft de simulatie van de temperatuur- en spanningsontwikkeling in een verhardende betonwand die wordt gestort op een starre funderingsplaat (zie Fig. 12). In de wand kunnen scheuren optreden aan het oppervlak wanneer de wand aan de buitenzijde afkoelt terwijl de kern van de wand nog warm is. Deze oppervlaktescheuren kunnen nadelig zijn voor de duurzaamheid van de constructie. Behalve oppervlaktescheuren kunnen ook zogenaamde 'doorgaande' scheuren optreden. Deze scheuren zijn ongewenst omdat ze de waterdichtheid van de constructie in gevaar brengen. Doorgaande scheuren ontstaan als na verloop van tijd ook de kern van de wand afkoelt. De wand wil dan krimpen, maar de stijve funderingsplaat zal dat verhinderen en het beton kan gaan scheuren. Met behulp van een verhardingsbeheerssysteem kan het verhardingsproces zo worden

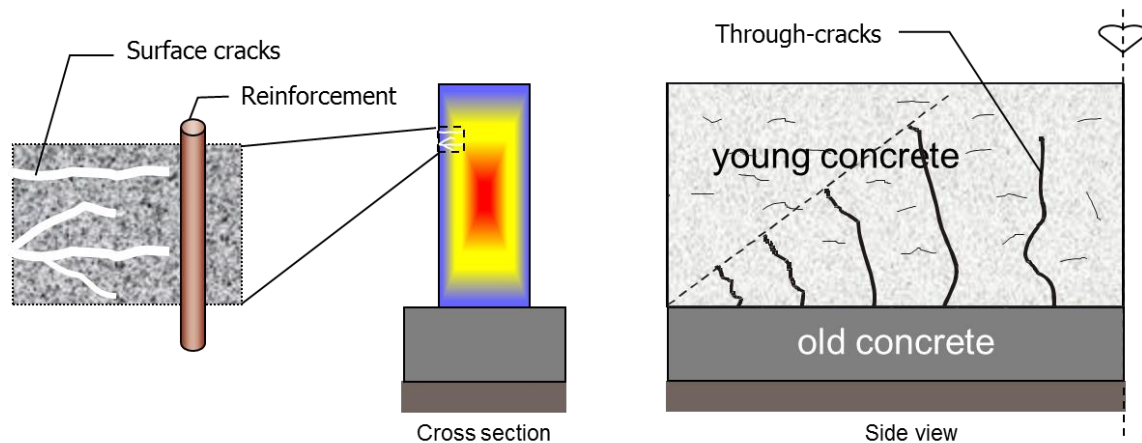


Fig. 12 Betonwand gestort op verharde funderingsplaat. Kans op vorming van oppervlaktescheuren en doorgaande scheuren (naar Sule²⁹).

gestuurd dat de kans op scheurvorming minimaal is. Een cruciale rol speelt daarbij de betontemperatuur. Met het oog op wat volgt zullen wij bij de invloed van de temperatuur op het verhardingsproces nog wat langer moeten stilstaan. Met name de *snelheid* waarmee het verhardingsproces verloopt heeft daarbij onze aandacht.

Effect van temperatuur op het verhardingsproces en de duur van de bouwphase

De snelheid waarmee het verhardingsproces verloopt bepaalt, althans voor een deel, de *duur* van de bouwphase van een betonconstructie. De bouwphase omvat het maken van de bekisting, het aanbrengen van de wapening, het maken en storten van het beton, het verhardingsproces, het ontkisten van de constructie en het afwerken van het betonoppervlak. Het bovenste deel van Fig. 13 toont een aantal illustraties van deze handelingen. In het onderste deel van de figuur is de zogenoemde 'performance curve' van een constructie weergegeven. Deze curve toont, naast de bouwphase, ook de daarop volgende gebruiksfase (service life) en de degradatiefase. Om economische redenen zal men de bouwphase zo kort mogelijk willen houden. De snelheid waarmee het beton verhardt speelt daarbij een belangrijke rol. De verhardingssnelheid is afhankelijk van de temperatuur. Het effect van de temperatuur op de snelheid van het verhardingsproces kan worden beschreven met een Arrheniusfunctie³⁰. Deze formule beschrijft de snelheid $S(T)$ van chemisch-fysische processen als functie van een experimenteel te bepalen constante A , de temperatuur T [K], de activeringsenergie E_A [J/mol] en de universele gasconstante R [J/mol.K]. In formulevorm:

$$S(T) = A \cdot e^{-\frac{E_A}{RT}}$$

²⁹ M. Sule (2003) Effect of reinforcement on early-age cracking in high strength concrete, PhD Thesis, TU Delft, 143 p.

³⁰ Zie S. Glasstone et al. (1941) The theory of rate processes. McGraw Hill Book Comp. NY.

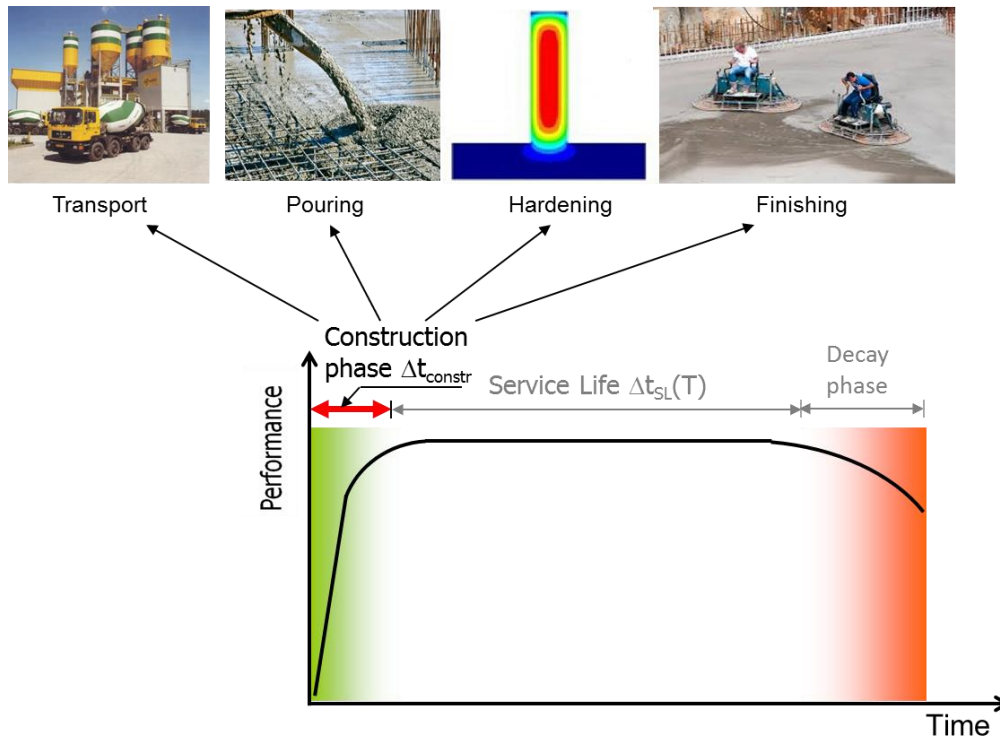


Fig. 13 Performance curve van een betonconstructie, met opeenvolgende stadia in de levensduur van de constructie met focus op de bouwfase.

Voor de duur van het verhardingstraject Δt_{constr} , gerekend vanaf het moment van storten van het beton tot het bereiken van de vereiste sterkte, kan op basis van de Arrheniusfunctie worden afgeleid:

$$\Delta t_{\text{constr}}(T_{\text{real}}) = \Delta t_{\text{constr}}(T_{\text{ref}}) \cdot e^{-\frac{E_A}{R} \cdot \left(\frac{T_{\text{real}} - T_{\text{ref}}}{T_{\text{real}} \cdot T_{\text{ref}}} \right)}$$

Hierin is $\Delta t_{\text{constr}}(T_{\text{real}})$ de verhardingstijd bij de werkelijke temperatuur van het beton T_{real} [K], en $\Delta t_{\text{constr}}(T_{\text{ref}})$ de verhardingstijd bij een referentietemperatuur T_{ref} [K] (vaak 20°C, 293 K)³¹. Waarden voor de activeringsenergie E_A hangen af van het type cement en de betonsamenstelling. Gangbare waarden liggen tussen 20 en 60 kJ/mol.

Ofschoon het verharden van beton een bijzonder complex proces is blijkt het effect van de temperatuur op de verhardingstijd met deze relatief eenvoudige Arrheniusformule goed te kunnen worden beschreven. Voor gangbare waarden van de activeringsenergie zal bij een 10°C hogere reactietemperatuur de verhardingstijd bijna worden gehalveerd! Dat levert dan een kortere bouwtijd op. Economisch gezien is dat gunstig, althans op de korte termijn. Een hogere betontemperatuur tijdens het

³¹ De werkelijke temperatuur T_{real} en de referentietemperatuur T_{ref} kunnen ook functies van de tijd zijn, dus $T_{\text{real}}(t)$ en $T_{\text{ref}}(t)$

verharden betekent echter wel dat de kans op scheurvorming tijdens het afkoelen toeneemt, wat juist weer ongunstig is voor de kwaliteit van de constructie. Met behulp van een geavanceerd verhardingsbeheerssysteem kan het verhardingsproces nu zo worden gestuurd dat een optimum wordt bereikt tussen de *bouwsnelheid* enerzijds en de *kwaliteit* van de constructie anderzijds. Om een hoge *initiële* kwaliteit te realiseren is een relatief *lage* verhardingstemperatuur vaak gunstig. De bouwtijd zal dan iets langer zijn (ordegrootte dagen), maar de winst aan levensduur kan vele jaren bedragen! De bouwer heeft hier dus echt wat te kiezen!

Klimaatverandering en levensduur van de infrastructuur

Effect van temperatuurstijging op de levensduur van de infrastructuur

Zojuist hebben wij gezien dat de duur van de *bouwfase* van een constructie mede bepaald wordt door de temperatuur van het beton tijdens het verharden. Wij vragen ons nu af of er ook iets te zeggen valt over het effect van de temperatuur op de duur van de fase die op de bouwfase volgt, te weten de *gebruiksfase* van een constructie. In het verleden werd daar vrijwel nooit naar gekeken. De huidige discussie over klimaatverandering en opwarming van de aarde maakt deze vraag echter actueel.

Om iets te kunnen zeggen over het effect van de temperatuur op de duur van de gebruiksfase moeten we eerst weten welke factoren het einde van deze fase bepalen. Processen en mechanismen die in dit verband moeten worden genoemd zijn indringing van chloride in het beton, carbonatie van beton en degradatie als gevolg van microscheurvorming door temperatuur- en vochtwisselingen. Schematisch is dit weergegeven in het bovenste deel van Fig. 14. Wanneer chloride-ionen, afkomstig van bijvoorbeeld dooizouten of zeewater, de wapening bereiken kan deze gaan corroderen. Corrosie van de wapening kan ook het gevolg zijn van *carbonatie* van beton. Carbonatie is het reageren van CO₂ uit de lucht met reactieproducten in het beton. Hierdoor neemt de zuurgraad van het beton toe en daalt de pH van ca. 13 tot waarden beneden 9. Bij een pH lager dan 9 neemt de kans op corrosie van de wapening sterk toe. Bij een hoog CO₂-gehalte in de lucht verloopt het carbonatieproces sneller, en zal de kritische pH-waarde ter plaatse van de wapening eerder worden bereikt. Vaak wordt het begin van corrosie van de wapening aangemerkt als ‘einde levensduur’.

De hier genoemde aantastingsmechanismen van beton betreffen chemisch-fysische processen. Bij toename van de temperatuur zal de snelheid van deze processen toenemen. In principe kan ook hier de Arrheniusfunctie worden toegepast. De levensduur van een constructie kan dan worden berekend met de formule:

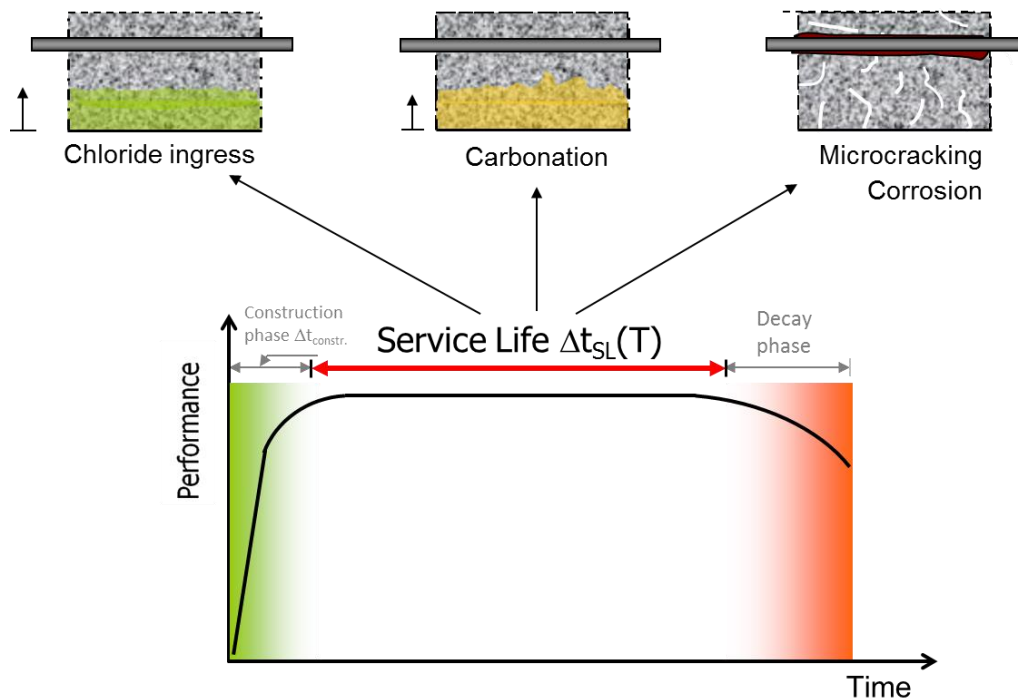


Fig. 14 Performance curve van een betonconstructie, met diverse degradatiemechanismen in de gebruiksfase, die bepalend zijn voor de levensduur van een constructie.

$$\Delta t_{SL}(T_{climate}) = \Delta t_{SL}(T_{ref}) \cdot e^{-\frac{E_A}{R} \cdot \left(\frac{T_{climate} - T_{ref}}{T_{climate} \cdot T_{ref}} \right)}$$

Hierin is $\Delta t_{SL}(T_{climate})$ de levensduur bij de werkelijk optredende gemiddelde buiten-temperatuur $T_{climate}$, en $\Delta t_{SL}(T_{ref})$ de levensduur bij de referentietemperatuur T_{ref} . Als referentietemperatuur kan de gemiddelde jaartemperatuur worden aangehouden³².

De vraag is nu wat een gemiddelde temperatuurstijging door opwarming van de aarde betekent voor de levensduur van de infrastructuur. Het IPCC (International Panel on Climate Change) rekent met een verwachte temperatuurstijging van 2,5°C. Daarnaast wordt ook rekening gehouden met een pessimistisch scenario met een temperatuurstijging van 6,5°C. In Fig. 15 is het effect van temperatuurstijging op de levensduur van de infrastructuur grafisch weergegeven. Op de horizontale as staat de temperatuur, en op de verticale as de levensduur in procenten ten opzicht van de levensduur bij de referentietemperatuur. De berekeningen zijn uitgevoerd voor een referentietemperatuur van 15°C en een activeringsenergie van 25, 35 en 45 kJ/mol. Bij

³² De gemiddelde jaartemperatuur in Nederland ligt tussen 10°C en 12°C. In de periode 2010-2018 bedroeg de gemiddelde temperatuur per continent: Europa 8,6°C; Noord Amerika 12,2°C; Azië 16,6°C; Afrika 21,9°C; Australië 14,9°C; Oceanië 23,9°C. Bron: World Data Info - <https://www.worlddata.info/global-warming.php>

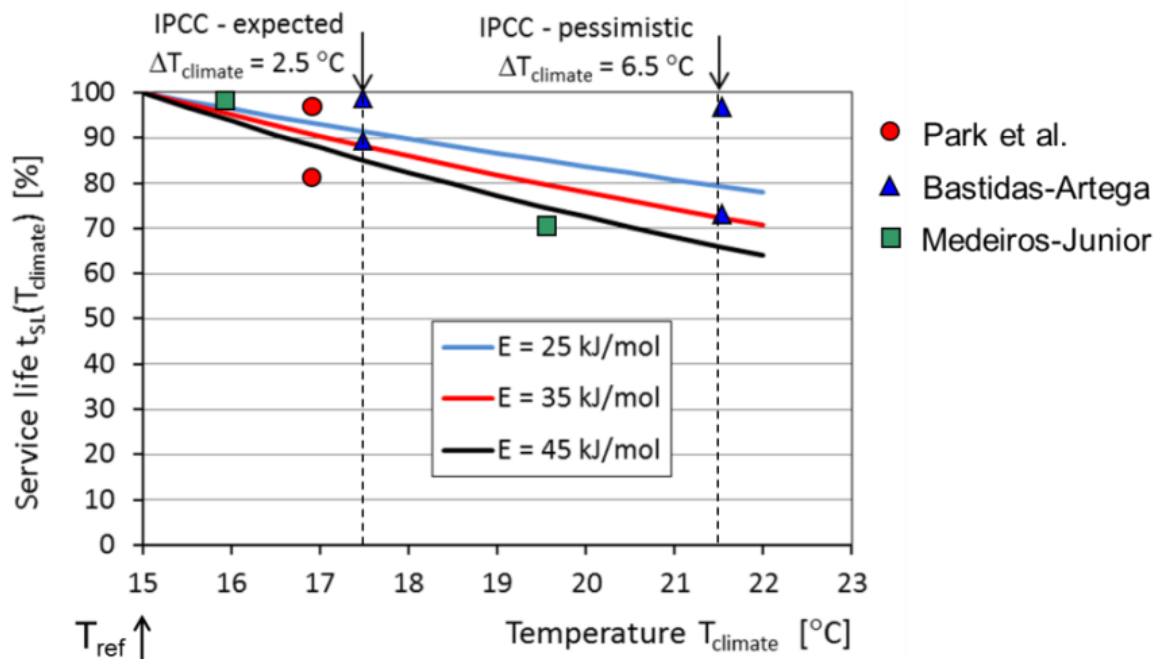


Fig. 15 Afname levensduur van de (mondiale) infrastructuur bij toename van de gemiddelde temperatuur op aarde.

een temperatuurstijging van 2,5°C zal de levensduur afnemen met 9% à 15%. Bij een pessimistisch scenario bedraagt de afname 20% tot wel 30%. Ter vergelijking zijn in de figuur ook resultaten weergegeven van andere onderzoekers. Zij onderzochten het effect van een temperatuurstijging *én* een stijging van het CO₂-gehalte in de lucht op de levensduur van specifieke betonconstructies. Hun resultaten wijken iets af van de waarden berekend met de hier gebruikte formules, maar de trend is dezelfde. Dat is ook niet verwonderlijk. De basis voor deze berekeningen zijn formules uit de reactiekinetiek. Deze formules zijn reeds duizenden malen van toepassing gebleken voor het beschrijven van temperatureffecten op de snelheid van chemisch-fysische processen. De hier berekende afname van de levensduur van de infrastructuur als gevolg van opwarming van de aarde is dan ook niet het resultaat van doemdenken, maar van het toepassen van basisprincipes uit de reactiekinetiek!

Er moet op worden gewezen dat Fig. 15 het effect weergeeft van de gemiddelde temperatuurstijging op aarde op de levensduur van de *globale* infrastructuur. Het is zeer wel mogelijk dat het effect *lokaal* anders uitpakt. Zo zal een gemiddelde temperatuurstijging op aarde tot gevolg hebben dat zones met veel vorst-dooiwisselingen naar het noorden en het zuiden opschuiven. Dit betekent dat er gebieden zullen zijn waar schade door vorst-dooiwisselingen zal afnemen en de levensduur van kunstwerken zal toenemen in plaats van afnemen. Daar staat tegenover dat er ook gebieden zullen zijn waar schade door vorst-dooiwisselingen juist zal toenemen. Wij zien hier het belang van het beschouwen van verschijnselen op verschillende schaalni-

veaus. Op verschillende schaalniveaus kan de respons op één-en-dezelfde oorzaak, i.c. een temperatuurstijging, *tegengestelde* tendensen vertonen!

Effect van temperatuurstijging op vervangingskosten van de infrastructuur

Als de temperatuur stijgt, zo hebben we gezien, zal de levensduur van de infrastructuur afnemen. Verkorten van de levensduur zal leiden tot verhoging van de jaarlijkse vervangingskosten. In Fig. 16 zijn de extra vervangingskosten uitgezet tegen de gemiddelde temperatuurstijging. Uitgangspunten voor de berekening van de extra vervangingskosten zijn de waarde van de mondiale infrastructuur van US\$ 160 biljoen, een referentielevensduur van 50 jaar en een activeringsenergie van 35 kJ/mol. Een toename van de gemiddelde temperatuur van 2,5°C resulteert in een toename van de vervangingskosten van US\$ 430 miljard per jaar. Bij het extreme scenario, met een temperatuurstijging van 6,5°C, bedraagt deze toename US\$ 1220 miljard per jaar. Ter vergelijking: in de periode 2010-2015 bedroeg de schade door natuurrampen als gevolg van klimaatverandering tussen de US\$ 100 en US\$ 300 miljard per jaar³³. De geprognosticeerde extra vervangingskosten van de infrastructuur als gevolg van een temperatuurstijging van 2,5°C zijn dus aanzienlijk hoger dan de schade door klimaatgerelateerde natuurrampen!

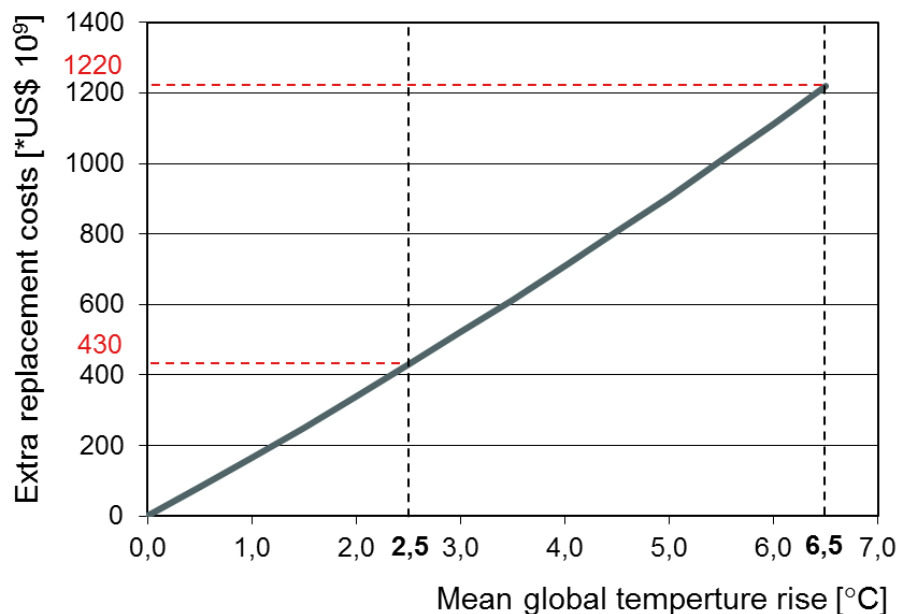


Fig. 16 Toename jaarlijkse vervangingskosten van de mondiale infrastructuur als functie van de gemiddelde temperatuurstijging op aarde.

³³ W.J.J Botzen (2017) Economie van klimaatverandering en natuurrampen. Oratie VU, 28p.

Tabel 2 Extra vervangingskosten als percentage van het GDP**¹⁾ per inwoner in rijke en arme landen.

		Extra replacement costs/cap. for IPCC climate scenarios	
		Temperature rise (expected)	Temperature rise (pessimistic)
		2.5 °C	6.5 °C
		Costs: 56 US\$/cap/yr	Costs: 158 US\$/cap/yr
Category	GDP/cap/yr	Percentage of GDP/cap/yr	
Rich countries*)	114,000	0.05%	0.14%
	54,000	0.10%	0.29%
Poor countries*)	544	10.1%	29.0%
	303	18.5%	52.2%

*) 10 rich and 10 poor countries, according to World Bank (2018)

**) GPD: Gross Domestic Product

Bij een wereldbevolking van 7,7 miljard mensen en een verwachte temperatuurstijging van 2,5°C komen de extra vervangingskosten per inwoner neer op een bedrag van 56 US\$ per jaar. In de tien rijkste landen komt dit overeen met 0,05% tot 0,10% van het GDP per inwoner (Tabel 2). Voor inwoners van de tien armste landen is dit 10,1% tot 18,5% van het GDP per inwoner. Als wij deze getallen zien, dan is het zonder meer duidelijk dat de gevolgen van klimaatverandering voor de levensduur van de infrastructuur niet gedragen kunnen worden door inwoners van de arme landen. Het zijn vooral de rijke landen die voor deze extra vervangingskosten de portemonnee zullen moeten trekken.

Besparen op infrastructuur in Nederland - Het nieuwe aardgas

Besparingen door verlengen van de levensduur van de infrastructuur

Zojuist hebben wij gezien dat opwarming van de aarde onvermijdelijk leidt tot verkorten van de levensduur van de infrastructuur en stijging van de vervangingskosten. Nu is dit wel een realistische, maar ook wat sombere manier om naar de werkelijkheid te kijken. Wij kunnen ook andersom redeneren. Wij stellen ons dan de vraag wat er te *besparen* valt op vervangingskosten als wij er in zouden slagen om de levensduur van de infrastructuur te *verlengen*. Ter illustratie van deze benadering richten wij ons nu op de Nederlandse situatie.

Eerder zagen wij dat de fysieke infrastructuur ongeveer 50% uitmaakt van het nationale kapitaal van een land. Voor Nederland gaat die vuistregel ook heel aardig op. Tabel 3 toont voor verschillende infrastructuurcomponenten welk deel zij uitmaken van het nationale kapitaal. De getallen in de tabel hebben betrekking op de situatie in

Tabel 3 Waarde infrastructuur in Nederland³⁴

Fixed capital goods	Value [× € 1.000.000.000]	Percentage of national wealth [%]
Infrastructure	312	8
Houses	975	25
Industrial building	382	10
Permanent capital goods	156	4
Total	1825	47

2009. Volgens het CBS bedroeg het nationale kapitaal toen € 3800 miljard³⁵. De waarde van de infrastructuur was € 1825 miljard³⁶. Dat is 47% van het nationale kapitaal. Stel nu dat de referentielevensduur van onze infrastructuur gemiddeld 50 jaar is, en dat wij die zouden kunnen verlengen met 10% of 20% tot respectievelijk 55 of 60 jaar. Fig. 17 laat zien hoe bij verlenging van de levensduur de jaarlijkse vervangingskosten dalen. Verlenging van de levensduur van 50 naar 55 of 60 jaar levert elk jaar een besparing op van € 3,3, respectievelijk € 6,1 miljard. Een bedrag van € 3,3 miljard per jaar komt qua orde van grootte overeen met de aardgasbaten in de negentiger jaren³⁷. De Nederlandse infrastructuur zou dan ook beschouwd kunnen worden als een enorme gasbel die ons miljarden kan opleveren als wij er zorgvuldiger mee omgaan!

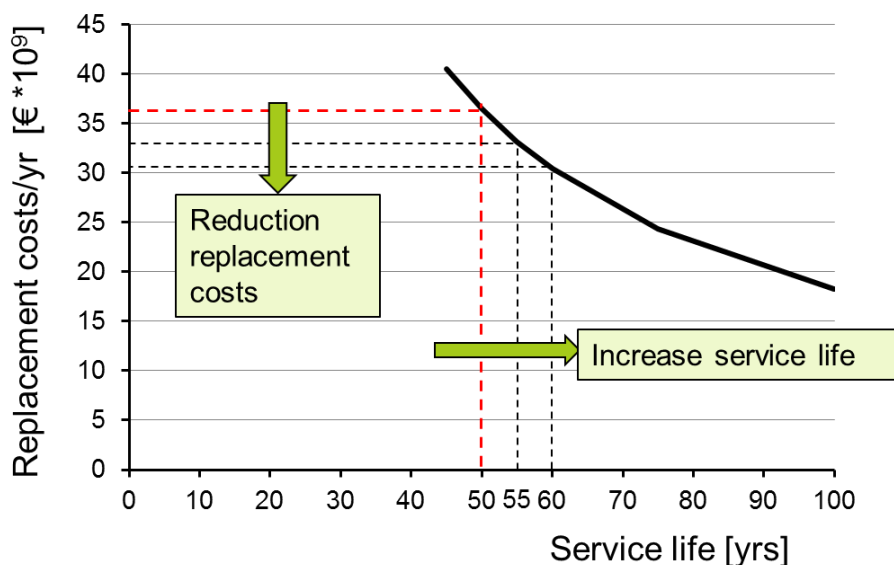


Fig. 17 Vervangingskosten van de infrastructuur in Nederland als functie van de levensduur.

³⁴ De Haan, M. et al. (2009) Het nationaal vermogen van Nederland. In De Nederlandse economie 2009, pp. 129-140.

³⁵ Bron: CBS, 2009

³⁶ NB: Voor 2015 noemt het CBS een waarde voor de infrastructuur van € 2001 miljard.

³⁷ Aardgasbaten in de 90-er jaren: € 2 - € 4 miljard per jaar. Bron: <https://nl.wikipedia.org/wiki/-Aardgasbaten>

Nu is het beslist niet eenvoudig om de gemiddelde levensduur van de infrastructuur met, zeg maar, 10% te verlengen. De miljarden die hier bespaard kunnen worden zijn echt niet te plukken als laaghangend fruit. Ook het Nederlandse aardsgas kwam niet zomaar de grond uit. Daarvoor moest eerst stevig worden geïnvesteerd. Geheel analoog zal ook voor het realiseren van besparingen op vervangingskosten eerst flink geïnvesteerd moeten worden. Een investering van 20% tot 30% van de beoogde besparing lijkt reëel³⁸. Voor een besparing van € 3,3 miljard per jaar komt dit neer op een investering van € 0,7 tot € 1,0 miljard per jaar. Dat is op zich een groot bedrag. Maar dit bedrag moet wel worden beoordeeld tegen de achtergrond van de waarde van de infrastructuur én van de bedragen die omgaan in de bouw. De waarde van de Nederlandse infrastructuur noemden wij reeds in het voorgaande. Een aantal kentallen voor de bouwsector volgt hieronder.

Kentallen voor de bouwsector

De omzet van Nederlandse bouwbedrijven bedraagt, orde van grootte, € 60 miljard per jaar³⁹. Die omzet wordt gerealiseerd met ca. 300.000 werknemers⁴⁰. Voor de komende jaren is een tekort aan arbeidskrachten voorzien van 30.000 werknemers. Dat is 10% van het beschikbare potentieel. Bijna 20% van de werknemers komt uit het buitenland⁴¹. Faalkosten in de bouw bedragen € 3 tot € 6 miljard per jaar⁴². Dat is 5% tot 10% van de omzet in de bouw. Het aantal bedrijven dat actief is in de bouwsector bedraagt 169.000⁴⁰.

Laten wij nu eens naar deze kentallen kijken tegen de achtergrond van de wens om te besparen op vervangingskosten door het verlengen van de levensduur van de infrastructuur met 10%. Wij merken dan een paar dingen op.

- Het verlengen van de levensduur van de infrastructuur met 10% zal niet alleen leiden tot een afname van de vervangingskosten, maar ook tot een afname van het aantal werknemers dat nodig is om de vervanging te realiseren. Een deel van het voorziene tekort aan werknemers kan hiermee worden opgevangen.
- Naast het verlengen van de levensduur is ook het terugdringen van de faalkosten een mogelijkheid om besparingen te realiseren. Faalkosten hebben vaak een niet-technische oorzaak. Te denken valt aan gebrekkige communicatie, onvoldoende toezicht tijdens de bouw en niet-adequate uitvoering. De toename van het aantal

³⁸ K. van Breugel (2016) Societal burdens and engineering challenges of ageing infrastructure. Proc. SCESCM 2016, Bali, 12 p.

³⁹ Jaren lang ca. € 60 miljard. 2018: € 70 miljard. Bron: <https://www.bouwendnederland.nl/service/feiten-en-cijfers>

⁴⁰ Bouw Fact sheet Arbeidsmarkt. <https://www.cdho.nl/assets/uploads/2018/02/UWV-Factsheet-Bouw-april-017.pdf>

⁴¹ C. Molijn (2019) Een op de vijf werknemers in de bouw komt uit buitenland. NRC, 11.6.2019.

⁴² P. van Heel e.a. (2019) Faalkosten in de bouw lopen jaarlijks op tot miljarden euro's. <https://insights.abnamro.nl/2019/04/faalkosten-in-de-bouw-lopen-jaarlijks-op-tot-miljarden-euros/>

werknemers dat de Nederlandse taal niet beheerst vergroot het communicatieprobleem en de kans op falen. De factor 'mens' speelt hierbij een sleutelrol.

- Bij het realiseren van bouwprojecten is vaak een groot aantal bedrijven betrokken. De bouw onderscheidt zich in dit opzicht nadrukkelijk van andere bedrijfstakken. De omzet in de chemische industrie⁴³ is qua orde van grootte vergelijkbaar met die in de bouw: € 50 miljard in de chemie t.o.v. € 60 miljard in de bouw. Maar in de chemiesector wordt de omzet gerealiseerd door 400 bedrijven⁴⁰ t.o.v. 169.000 bedrijven in de bouw. De betrokkenheid van veel bedrijven bij het realiseren van bouwprojecten impliceert veel 'interfaces', en een grote druk op communicatie en projectmanagement. Per saldo trekt dit een flinke wissel op de kwaliteit, en daarmee ook op de levensduur van de infrastructuur.

Regie gevraagd

Dit korte overzicht laat zien dat bij het zoeken naar mogelijkheden om de levensduur van de infrastructuur te verlengen en besparingen te realiseren naar zowel *technische* als *niet-technische* aspecten van het bouwproces moet worden gekeken. Dit vraagt om een *discipline-overstijgende regie* van het bouwproces. Dadelijk zullen we ingaan op de vraag hoe in de behoefte aan een discipline-overstijgende regie kan worden voorzien. Eerst kijken we nog naar twee meer techniek en technologie-georiënteerde opties om de levensduur van de infrastructuur te verlengen en de milieu-impact van de bouw terug te dringen. Deze opties zijn het toepassen van zelfherstellend beton en circulariteit. Het thema regie komt daarna uitvoerig aan de orde.

Opties voor levensduurverlenging en beperking van milieu-impact

Zelfherstellend beton

Met het verstrijken van de tijd kunnen materialen gaan scheuren, verbrossen of degraderen als gevolg van materiaal-inherente verouderingsprocessen. Wat zou het mooi zijn als een materiaal bij de eerste signalen van degradatie *zichzelf* zou herstellen. Dat zou de levensduur van constructies ten goede komen en de impact van de bouw op het milieu verminderen.

De zoektocht naar zelfherstellende materialen is een vorm van schatgraven. Het is zoeken naar materialen die waarschijnlijk nooit hebben bestaan, en misschien ook nooit zullen bestaan, maar waarvan de zoektocht ernaar ons wellicht toch een *smart material* kan opleveren dat dicht in de buurt daarvan komt. Nu kan beton in zekere

⁴³ Chemische industrie –7-9-2019 https://nl.wikipedia.org/wiki/Chemische_industrie

zin al een *smart material* worden genoemd⁴⁴. Immers, wij zagen reeds eerder dat beton van nature al een zeker zelfherstellend vermogen heeft. Als water via een scheur niet-gehydrateerd cement weet te bereiken, dan kan dat cement alsnog gaan reageren en kan de scheur zichzelf herstellen (Fig. 9g). Wij zagen echter ook dat om verschillende redenen het zelfherstellend vermogen van moderne betonmengsels onder druk staat. Dat laatste is de afgelopen jaren aanleiding geweest om intensief onderzoek te doen naar mogelijkheden om het zelfherstellend vermogen van beton significant te verbeteren. Aansprekend en veelbelovend is in dit verband het onderzoek van Jonkers c.s.⁴⁵ naar zelfherstellend 'biobeton'. Jonkers voegde aan het beton speciaal geselecteerde bacteriën toe die het vermogen hebben om scheuren te dichten. Fig. 18 laat het resultaat zien van waterdoorlatendheidsproeven met gescheurd traditioneel beton en biobeton. Scheuren in proefstukken waaraan bacteriën waren toegevoegd bleken na enkele dagen volledig dicht te zijn. Dit in tegenstelling tot scheuren in proefstukken waaraan *geen* bacteriën waren toegevoegd. Goede resultaten in verschillende proefprojecten hebben laten zien dat zelfherstel van biobeton niet alleen in het laboratorium werkt maar ook daarbuiten, en zo een bijdrage kan leveren aan het verlengen van de levensduur van de infrastructuur.

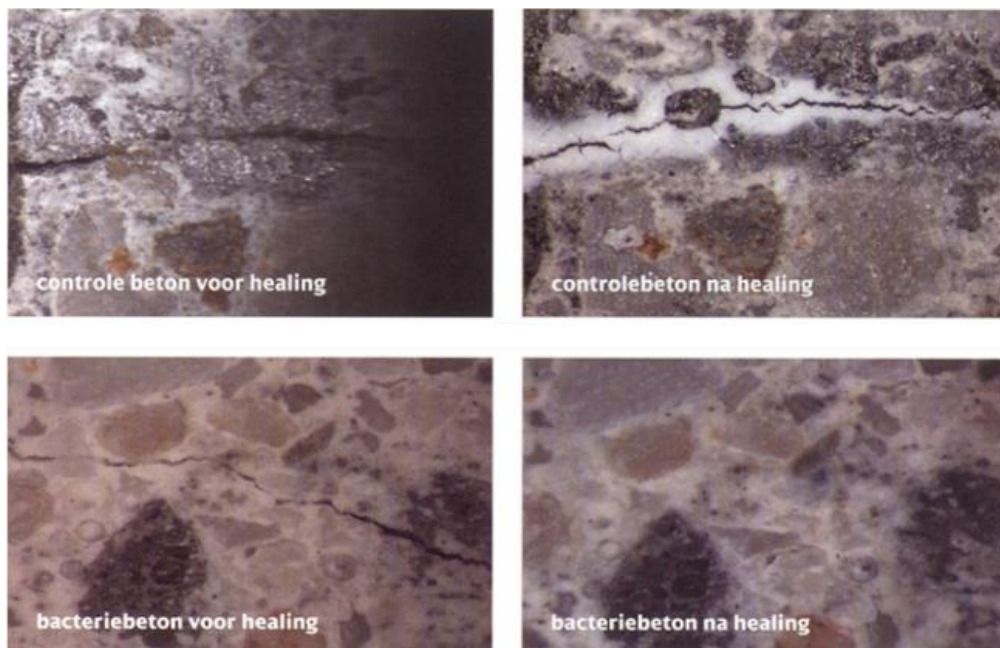


Fig. 18 Zelfherstellend 'biobeton'. Boven het referentiebeton zonder bacteriën en onder beton met bacteriën. Links proefstukken aan het begin van een waterdoorlatendheidsproef en rechts na de proef. De opname rechtsonder toont volledig herstel van de scheur⁴⁵.

⁴⁴ K. van Breugel (2018) Smart materials for social infrastructure: Past, Present and Future. Int. Workshop on Structural Life Management for Eco-Power Structures. Deajeon, Korea. 12 p.

⁴⁵ H.M. Jonkers, A. Thijssen, G. Muyzer, O. Copuroglu, E. Schlangen (2010) Application of bacteria as self-healing agent for the development of sustainable concrete. Ecological Engineering 36(2). pp 230-235.

Circulariteit

Een heel andere route om de milieudruk van bouwactiviteiten terug te dringen is die van het circulair bouwen. Bij professor Ch.F. Hendriks, voormalig hoofd van de sectie Materiaalkunde, was het thema circulariteit al nadrukkelijk in beeld. Zijn boek 'De Bouwcyclus' uit 2000 getuigt daarvan⁴⁶. Vanaf 2006 heeft de sectie Materials & Environment de materialencyclus omarmd en als uitgangspunt genomen voor het inrichten van haar onderwijs en onderzoek⁴⁷. Inmiddels heeft het denken in circulariteit een grote vlucht genomen.

Hoe circulariteit in de bouw werkt wordt geïllustreerd met het schema van Fig. 19. In dit schema onderscheiden wij twee concepten. Het eerste concept is weergegeven met de buitenste cirkel van de figuur. Deze cirkel heeft betrekking op de materialencyclus in de traditionele bouw. Er zijn grondstoffen en energie nodig om bouwmaterialen te vervaardigen. Deze materialen worden vervolgens gebruikt voor het realise-

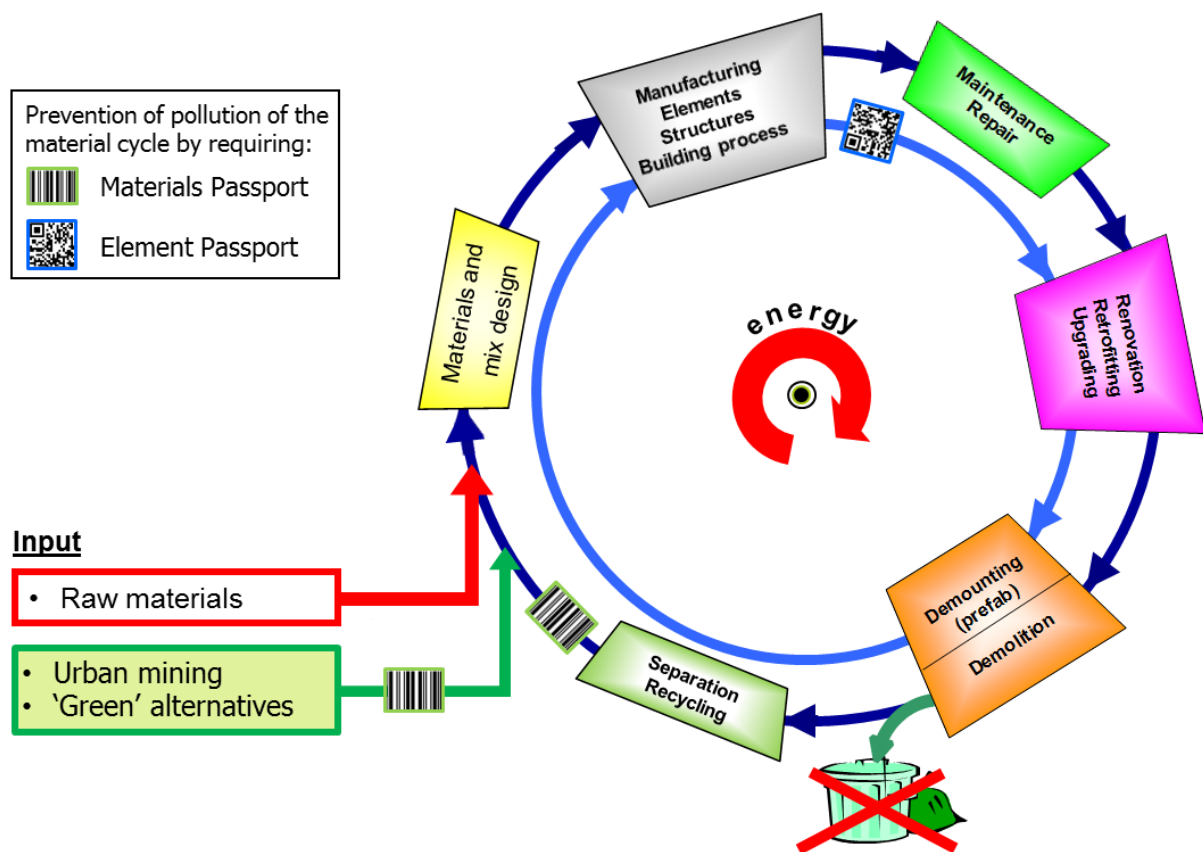


Fig. 19 De bouw- en materialen cyclus t.b.v. circulair bouwen^{21,48}.

⁴⁶ Ch.F. Hendriks (2000) De Bouwcyclus. Aeneas Technical Publications, 233 p.

⁴⁷ Bij deze strategische keuze paste ook de aansluiting in 2006 van de groep Resource Engineering van prof. Peter Rem, afkomstig van de toenmalige faculteit Mijnbouwkunde. Na herstructurering van de afdeling in 2018 is deze aansluiting weer beëindigd.

ren van bouwelementen en complete bouwwerken. Daarna volgt de gebruiksfase. In die fase vindt onderhoud aan constructies plaats en worden reparaties uitgevoerd, mogelijk gevolgd door upgrading en retrofitting. Op een zeker moment zal het in gebruik houden van een constructie zoveel geld en energie gaan kosten dat besloten wordt tot sloop. Al het bij sloop vrijkomende materiaal wordt vervolgens gerecycled en hergebruikt. Dat maakt de cirkel rond.

De binnenste cirkel van Fig. 19 representeert de prefabbouw. Geprefabriceerde bouwelementen worden onder streng geconditioneerde omstandigheden in de fabriek vervaardigd en zijn van hoge kwaliteit. Bij einde levensduur van een bouwwerk kunnen de geprefabriceerde bouwelementen na demonteren opnieuw worden gebruikt voor het realiseren van nieuwe bouwwerken.

Van dit circulaire concept wordt veel verwacht. De druk op schaarse grondstoffenvoorraden neemt af en bouw-gerelateerde CO₂-uitstoot wordt gereduceerd. Dat is winst. Maar deze winst ligt niet zomaar voor het oprapen. Zonder volledig te zijn volgt hier een aantal aandachtspunten die bij het uitwerken van een circulair concept om de nodige reflectie vragen⁴⁸.

- Een volledig circulair concept gaat uit van de beschikbaarheid van *donorgebouwen*, die een voldoende hoeveelheid geschikt materiaal kunnen leveren om de gewenste nieuwbouw te realiseren. Het is echter vrijwel ondenkbaar dat één enkel donorgebouw kan voorzien in de materiaalbehoefte van een vergelijkbaar nieuw gebouw. Er is *regionaal beleid* nodig voor het inrichten van een *databank*, waarin alle gebouwen in een regio die voor recycling in aanmerking komen worden geregistreerd, inclusief gegevens over materiaalhoeveelheden, aard en kwaliteit van de materialen, ouderdom, reparatiedossiers, etc. (zgn. ‘urban mining’).
- Het opnemen van verschillende materialen in de materialencyclus vereist een zorgvuldige registratie van de karakteristieken van deze materialen. Alternatieve materialen, toegepast om traditionele ingrediënten van betonmengsels te vervangen, vaak met als doel om beton te vergroenen, moeten worden getoetst op hun effect op het korte- en langeduurgedrag van beton. Eventueel negatieve effecten op het langeduurgedrag zullen zich per definitie pas na jaren manifesteren. Schadelijke ‘vervuiling’ van de materialenketen kan zo jarenlang onopgemerkt blijven. Om dat laatste te voorkomen is het van belang om materialen te blijven volgen op hun weg door de bouwcyclus. Een elektronisch materialen- en/of elementenpaspoort (Fig. 19) biedt de mogelijkheid om materiaalstromen te monito-

⁴⁸ K. van Breugel K. (2017) Circularity: A new avenue for mitigating the footprint of ageing infrastructure? The 9th International Symposium on Cement and Concrete (ISCC 2017), Wuhan. 12 p.

ren en/of gescheiden te houden. Een materialenpaspoort is te zien als een logisch vervolg op het in de negentiger jaren door Rostam⁴⁹ bepleite ‘birth certificate’ voor betonconstructies.

- Circulariteit in de bouw veronderstelt de aanwezigheid en beschikbaarheid van bouwwerken die voor recycling in aanmerking komen. Eerder is er op gewezen dat in de komende jaren, wereldwijd gezien, de helft van de bouwopgave in het teken staat van groei. Waar bouwen in het teken staat van groei kan circulair bouwen nauwelijks een optie zijn, eenvoudigweg omdat er onvoldoende bouwwerken aanwezig zijn die als donorgebouw kunnen dienen^{48,50}. In gebieden waar vanwege de afwezigheid van donorgebouwen het zogenoemde *urban mining* nog niet aan de orde is, zal voor nieuwbouw nog steeds een beroep moeten worden gedaan op nieuwe grondstoffenvoorraden. In dat geval zal voor het beperken van bouw-gerelateerde CO₂-uitstoot en het reduceren van de milieu-impact vooral gekeken moeten worden naar het toepassen van nieuwe (slimme) materialen, slim materiaalgebruik en verlengen van de levensduur van bouwwerken.

Reeds bij een oppervlakkige beoordeling van deze aandachtspunten dringt zich ook hier de behoefte op aan regie! Regie is nodig voor het optuigen van een databank met donorgebouwen en voor het registreren en monitoren van respectievelijk materialen en materiaalstromen. Alle reden dus om nu terug te keren naar de eerder gesignaleerde behoefte aan regie in de bouw.

Serious gaming voor interdisciplinaire regie in de bouw

De eerdere bespreking van de mogelijkheden om de levensduur van de infrastructuur te verlengen en te besparen op vervangingskosten eindigde met de vraag naar *discipline-overstijgende regie* van het bouwproces (blz. 29). Een instrument dat deze interdisciplinaire regie zou kunnen faciliteren en ondersteunen is *serious gaming*. Een serious game biedt een platform waar bruggen kunnen worden geslagen tussen verschillende disciplines, communicatie wordt geoptimaliseerd, de balans tussen verschillende duurzaamheidsparameters zichtbaar kan worden gemaakt en waarop vervolgens ook kan worden ingegrepen. Het speelveld van een serious game is schematisch weergegeven in Fig. 20. Een serious game kan ook de host zijn voor geavanceerde simulatiemodellen. Zo kunnen binnen een serious game de eerder besproken verhardingsbeheerssystemen actief zijn voor het optimaliseren van het onderdeel ‘uitvoering’. Onderzoek naar het gebruik van simulatiemodellen in de maakindustrie heeft uitgewezen dat bedrijven die ter ondersteuning van hun productieproces simu-

⁴⁹ S. Rostam (2005) Service life design of concrete structures – A challenge to designers as well as to owners. Asian Journal of Civil Engineering (Building and Housing) Vol. 6, No. 5, pp. 423-445.

⁵⁰ K. van Breugel (2018) Modelling in the service of sustainable construction. RILEM Pro. 126 Proc. of the Workshop on Concrete Modelling and Materials Behaviour. Ed. Guang Ye, pp. 3-14.

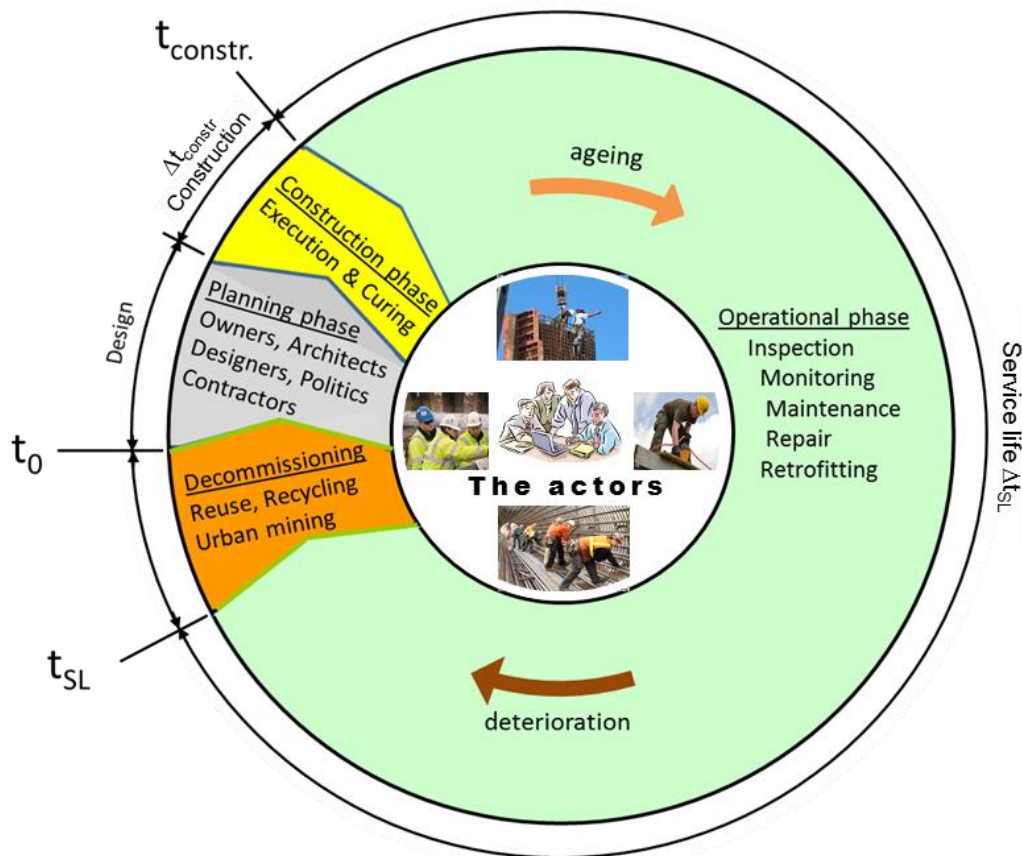


Fig. 20 Serious game als platform voor (interdisciplinaire) regie binnen een (circulair) bouwproces.

latiemodellen actief toepassen significant beter presteren dan bedrijven die dat niet doen⁵¹. Dit illustreert niet alleen het nut van simulatiemodellen in de maakindustrie, maar daagt ook uit tot het ontwikkelen van een serious game voor bouw waarin het hele ontwerp- en bouwproces integraal wordt gesimuleerd.

Voor een complexe en gefragmenteerde sector als de bouw liggen hier enorme uitdagingen en kansen. Een belangrijke vraag is wel wie het voortouw zal nemen bij het ontwikkelen van een serious game voor de bouw. Ook hier is behoefte aan regie! Nu de vraag naar regie hier opnieuw zo nadrukkelijk naar voren komt, zullen wij bij dit thema uitvoeriger stil moeten staan. Ik wil dat doen door de vraag naar regie bij het ontwikkelen van een serious game voor de bouw te verbreden naar regie bij ontwikkelingen in wetenschap en techniek in het algemeen. In het kader van deze rede moet dit wel uiterst beknopt. De focus zal daarom gericht blijven op de bouw. Voor wat volgt grijp ik terug naar het begin van deze rede, en wel de uiteenzetting over de werkwijze die bij het bedrijven van wetenschap en techniek wordt gehanteerd.

⁵¹ M. Boucher (2010) Cost saving strategies for engineering: Using simulation to make better decisions. Aberdeen Group. 24 p.

Zonder regie vaart niemand wel

Als regie ontbreekt

Grote successen in wetenschap en techniek zijn vaak te danken aan vergaande specialisatie. Modellen spelen daarbij een sleutelrol. Via modellen worden nieuw verworven inzichten en kennis toegepast voor het verwezenlijken van wensen en dromen van mensen. Zeker in geïndustrialiseerde landen hebben deze wensen en dromen het stadium van ‘providing shelter for people’ al lang achter zich gelaten. Het gaat nu om consumptie en groei. Zolang de consumptie toeneemt en de economie groeit staan alle seinen op groen. Maar als deze groei wordt beoordeeld in het licht van de houdbaarheid van de aarde, dan staan de seinen op rood. Wetenschap en techniek hebben ons in staat gesteld om in een ongeëvenaard tempo het jaarlijkse rantsoen aan grondstoffen en energie te verorberen*. In 2019 viel Earth Overshoot Day⁵² op 29 juli. Op die dag had de wereldbevolking haar rantsoen voor 2019 opgebruikt en was voor de rest van het jaar de koektrommel leeg. Schematisch is dat weergegeven in Fig. 21.

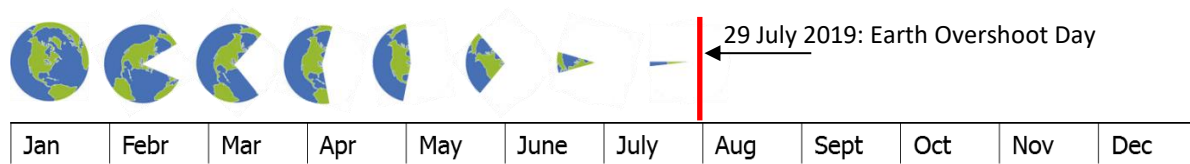


Fig. 21 Schematische weergave van het tempo waarin in 2019 het jaarlijks rantsoen aan grondstoffen is verbruikt. Op 29 juli 2019 was het rantsoen voor dat jaar volledig opgebruikt.

Wie na eind juli 2019 nog iets consumeerde of uit te delen had kon dat alleen maar doen als hij eerder dat jaar zijn aandeel van de koek had vergroot ten koste van anderen, *of* wanneer hij een voorschot had genomen op het aandeel dat hem in het komende jaar ter beschikking zou komen. Het eerste is een vorm van onrecht, en het tweede is strijdig met het duurzaamheidsprincipe zoals dat is verwoord in het Brundtland rapport⁵³ dat aan het huidige duurzaamheidsdenken ten grondslag ligt. In feite zien wij al jaren dat het niet lukt om consumptie en groei in balans te brengen met de mogelijkheden die de aarde - bij de huidige stand van wetenschap en techniek – ons biedt. Dit wijst ook op onbalans tussen technische mogelijkheden en onze ambities

⁵² L. Mead (2019) 2019 Earth Overshoot Day Reaches Earliest Date Ever. SDG Knowledge Hub. <https://sdg.iisd.org/news/2019-earth-overshoot-day-reaches-earliest-date-ever/>

⁵³ Brundtland commission (1987) ‘Our Common Future’, Report World Commission on Environment and development. Oxford University Press.

*) Indicatief voor de toename in ge-/verbruik van grondstoffen en energie is ook de groeicurve in Fig. 4

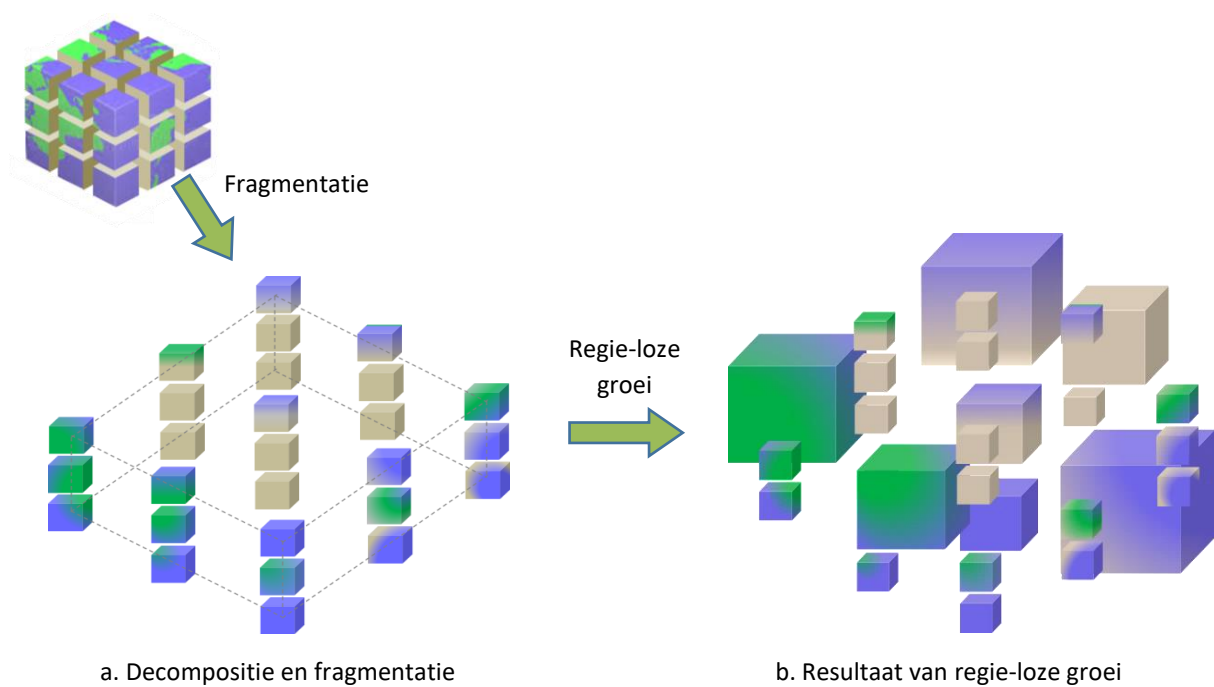


Fig. 22 Schematische weergave van groei van individuele sectoren zonder inachtneming van onderlinge samenhang en harmonie.

enerzijds, en verantwoord beheer van de aarde anderzijds. Fig. 22 illustreert deze onbalans. In Fig. 22a is de tot een kubus gereduceerde werkelijkheid onderverdeeld in zevenentwintig sectoren, alle van gelijk gewicht. Wanneer met name sectoren die ons veel welvaart en genoegens in het vooruitzicht stellen de kans wordt geboden te groeien, dan ontstaat een beeld als weergegeven in Fig. 22b. Enkele sectoren zijn enorm gegroeid, terwijl andere gelijk zijn gebleven. Op geen enkele wijze is van deze zevenentwintig kubussen nu nog iets te maken dat de contouren heeft van de oorspronkelijke kubus. De werkelijkheid is geweld aangedaan. Disproportionele groei levert een gedrocht op! Daarmee is niet gezegd dat groei altijd vermeden moet worden. Maar groei van individuele sectoren moet proportioneel zijn, en gericht op harmonie en volwassenheid. Als na het bereiken van het stadium van volwassenheid groei niet stopt, dan ontstaat een medisch gezien ongewenste situatie, oftewel een ziekte! Om van een dergelijke ziekte te genezen is niet alleen een chirurgische ingreep nodig, maar ook en vooral een verandering van gedrag. Zonder gedragsverandering zal een harde ingreep al snel zijn effect verliezen. De natuur leert ons dat.

Naar duurzame groei

Als het doel van bouwen het voorzien van 'shelter for people' is, en als iedereen van shelter is voorzien, dan zal aan verdere groei de vraag vooraf moeten gaan wat het doel daarvan is. Techniek en technologie zullen het antwoord op deze vraag niet geven. De wetenschap evenmin. Om met Einstein te spreken, wetenschap en techniek

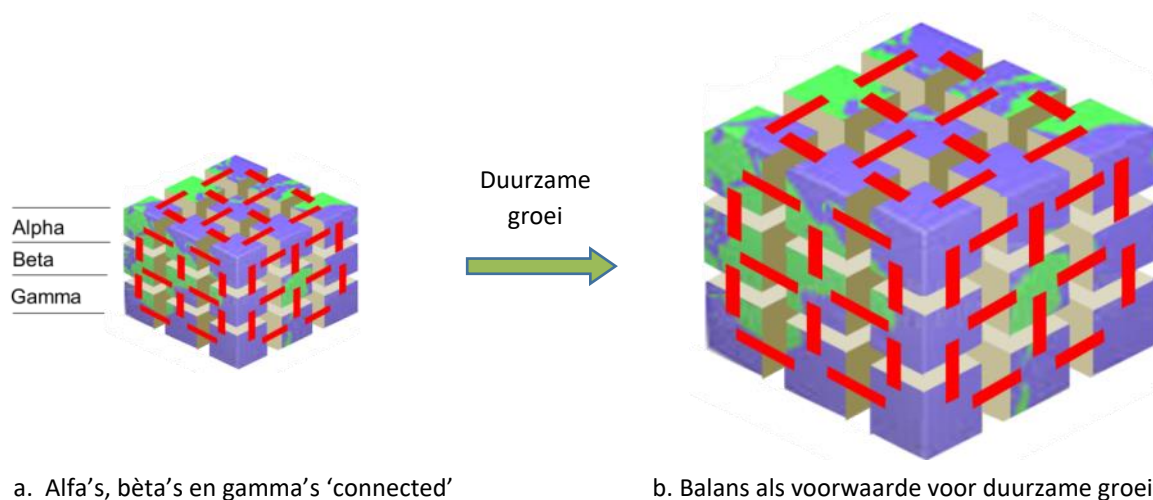


Fig. 23 Duurzame groei: Balans tussen alfa-, bèta- en gamma-aspecten.

houden zich bezig met hoe de dingen zijn, niet hoe ze behoren te zijn. De vraag hoe dingen behoren te zijn valt buiten het kader van deze rede. Hier beperk ik mij tot de opmerking dat duurzame groei vraagt om balans in groei van *alle* sectoren die samen de werkelijkheid representeren. De drie P's die in het duurzaamheidsdenken centraal staan, People–Planet–Profit, veronderstellen onderlinge interactie, afstemming en harmonie. Harmonieuze groei veronderstelt dat de groei van een sector gepaard gaat met een corresponderende groei van andere sectoren, *en* van ons vermogen om te overzien wat op korte en lange termijn de gevolgen zijn van het implementeren van nieuwe technieken en technologieën om deze groei te realiseren. Schematisch is dit weergegeven in Fig. 23. De samengestelde kubus in Fig. 23a is nu onderverdeeld in alfa-, bèta- en gammasectoren. Horizontale en verticale verbindingen tussen individuele sectoren moeten voorkomen dat ongebreidelde groei van een enkele sector de balans binnen de samengestelde kubus zal verstoren. Toegespitst op de bouw gaat het om de vraag hoe alfa's, bèta's en gamma's binnen het bouwproces tot hun recht kunnen komen, en samen kunnen waarborgen dat groei van de infrastructuur op een verantwoorde en duurzame wijze kan plaatsvinden. Zeker is dat dit niet vanzelf gaat. Ook hier dient zich de noodzaak aan van regie, en de behoefte aan een instantie die deze regie doeltreffend en met gezag kan voeren.

De overheid als regisseur

De aanleiding om uitvoerig stil te staan bij het thema 'regie' was de vraag wie het voortouw zou moeten nemen bij het ontwikkelen van een serious game voor de bouw (blz. 34). Het is niet realistisch om te veronderstellen dat één individuele partij in de bouw een serious game voor de *hele* sector gaat ontwikkelen. Als duurzame ontwikkeling het primaire doel van het gebruik van een serious game is, dan zal de

regie voor het ontwikkelen van een serious game ook moeten liggen bij de instantie die voor dit primaire doel verantwoordelijk is. De Nederlandse grondwet wijst ons hier de weg. Artikel 21 van de grondwet zegt dit als volgt:

“De zorg van de overheid is gericht op de bewoonbaarheid van het land en de bescherming en verbetering van het leefmilieu.”

Als het om de aarde gaat, en om zorg voor de aarde, dan is de overheid aan zet. Nu moet onmiddellijk worden gezegd dat met name de Nederlandse overheid heel veel doet om ons land bewoonbaar te maken en te houden. Garanderen dat in een delta-gebied zeventien miljoen mensen veilig kunnen wonen en werken is een grote uitdaging en vergt een enorme inspanning van de overheid. In lijn met de grondwet zou het garanderen van de bewoonbaarheid van het land echter ook gepaard moeten gaan met *bescherming* en *verbetering* van het leefmilieu. Wij zien dat het op dit punt steeds meer gaat knellen, ook in de bouw. Illustratief zijn in dit verband de eerder aangehaalde quotes - hoe eenzijdig ook(!) - van Watts¹⁹ en Vidal²⁰, maar ook de discussies over fijnstof, stikstof, pfas, etc.. Wij lopen hier op tegen de gevolgen van uit balans geraakte groei.

In 1987 verscheen het boekje ‘Kunnen wij de aarde beheren’ van de Nederlandse econoom en Nobelprijswinnaar Jan Tinbergen⁵⁴. De titel van zijn boekje is al veelzeggend. Tinbergen spreekt niet over *beheersen*, maar *beheren*. Hij is scherp als hij zegt dat gulzigheid van onze generatie gebrek kan betekenen voor komende generaties. Hij vervolgt met te zeggen dat creativiteit en soberheid tezamen ons levensdevies zullen moeten worden. Ten behoeve van verantwoord beheer van de aarde bepleitte Tinbergen strakke regie op breed, internationaal niveau. Beheer van de aarde vereist om groot te denken, om vervolgens lokaal, i.c. nationaal, te handelen. De bouw heeft de potentie om een substantiële bijdrage te leveren aan verantwoord beheer van de aarde. Maar zonder regie blijft het verzilveren van deze potentie een illusie. De overheid moet hier haar opwachting maken. Een geavanceerde, multidisciplinaire serious game kan een instrument zijn waar zowel de hele bouwsector als de Nederlandse samenleving en het milieu wel bij zullen varen.

Voor het ontwikkelen van een serious game voor de bouw is regie cruciaal. Niet alleen vanwege de complexiteit van de bouw, maar ook met het oog op het rekruteren van deskundigen uit alle betrokken disciplines om een serious game vorm te geven. Regie is ook onmisbaar bij het genereren en beheren van de middelen die voor het ontwikkelen *én* implementeren van een serious game voor de bouw nodig zijn. Eer-

⁵⁴ J. Tinbergen (1987) Kunnen wij de aarde beheren? Uitg. Kok/Agora. 172 p.

der is aangegeven dat voor het realiseren van een besparing op de infrastructuur van ca. € 3,3 miljard per jaar een investering moet staan van ca. € 1 miljard per jaar. Een substantieel deel van dit bedrag zou besteed moeten worden aan het ontwikkelen van een serious game voor de bouw. In het kader van deze rede is verdere uitsplitsing en toekenning van dit bedrag niet aan de orde. Belangrijk is wel dat het bedrag wordt verdeeld onder *alle* disciplines – alfa, bèta, gamma -, die bij het initiëren, realiseren en beheren van de infrastructuur zijn betrokken.

Het model: Vehikel voor glorie en schade

Het moment is aangebroken om de vraag te stellen of al het voorgaande ons nu ook zicht heeft gegeven op het thema van deze rede: ‘Het model: vehikel voor glorie en schade’. Om deze vraag te kunnen beantwoorden vatten wij het voorgaande eerst nog eens kort samen. Wij hebben gezien dat het bedrijven van wetenschap een activiteit is die zich kenmerkt door voortdurende *reductie* van de werkelijkheid. De *drijfveer* achter dit proces van reductie is het willen begrijpen van de werkelijkheid, met als ultiem doel deze werkelijkheid te kunnen beheersen. De route van reductie is gekozen, omdat de werkelijkheid te complex is om alle facetten ervan in hun onderlinge samenhang te doorgronden en in één alomvattend model te vangen. Gaandeweg het proces van reductie hebben zich individuele vakdisciplines ontwikkeld, die zich richten op deelgebieden van de werkelijkheid. Van op deelgebieden verworven kennis is vervolgens gebruik gemaakt bij het ontwikkelen van modellen voor het beschrijven van verschijnselen *binnen*, en interacties *tussen* deelgebieden. Via modellen wordt verworven kennis vervolgens operationeel gemaakt binnen de maakindustrie.

Kijken wij nu naar de producten die de maakindustrie heeft voortgebracht, dan zien wij dat er ontzettend veel is bereikt. Er is veel gebeurd, gebouwd en genoten. Ook zien wij dat wetenschap en techniek, en ook modellen, zijn en worden ingezet voor het realiseren van groei. Economische groei en groei in welvaart. Om deze groei mogelijk te maken is een betrouwbare infrastructuur essentieel. Inmiddels is deze infrastructuur goed voor ongeveer 50% van het mondiaal geaggregeerde nationale kapitaal. Om dit alles te duiden met de term glorie misstaat niet. Maar voor deze glorie en groei wordt wel een hoge prijs betaald. Groei die doorgaat, ook nadat het stadium van volwassenheid is bereikt, is schadelijke groei. De schade kan heel lokaal zijn, maar kan zich ook manifesteren als mondiale milieuschade en klimaatverandering. Ook de infrastructuur heeft daar last van. Zo zien wij dat wetenschap en techniek, en ook modellen die bij het beoefenen van wetenschap en techniek worden ontwikkeld en toegepast, vehikels zijn die zowel tot glorie als schade kunnen voeren. Echter, het

zijn en blijven *vehikels*! De *bestuurder* bepaalt waar het vehikel hem brengt! Noch de wetenschap, noch de techniek, noch enig model zullen de samenleving een stap voorwaarts of zijwaarts brengen als er niet een bestuurder is die de koers bepaalt en het gaspedaal bedient. Niet wetenschap en techniek drukken hun stempel op de samenleving, maar het zijn *mensen* die het stempel van wetenschap en techniek op de samenleving drukken. Wetenschap en techniek hebben geen vaste woon- of verblijfplaats, en kunnen ook niet gedagvaard worden als het aankomt op de vraag wie verantwoordelijkheid draagt voor de impact van het handelen van de mens op zijn medemens en het milieu. Het zijn altijd *mensen* die keuzes maken en de koers bepalen. Mensen kunnen er voor kiezen om wetenschap en techniek in te zetten voor groei. Maar ze kunnen ook kiezen voor *duurzame* groei. Duurzame groei is groei die gericht is op het ontwikkelen en in stand houden van een volwassen economie. Voor de bouw betekent dit het ontwikkelen en realiseren van constructieve concepten voor 'human shelter and use', i.c. een infrastructuur die noodzakelijk is om een samenleving veilig en in harmonie met haar leefomgeving te laten functioneren. Voor nu en in de nabije toekomst zal het definiëren van wat *echt* noodzakelijk is – wat echt onze 'needs' zijn - topprioriteit moeten hebben. Nieuwe producten of diensten die vandaag ter beschikking komen, mogelijk ten koste van anderen of van de aarde, zouden niet onmiddellijk toegevoegd moeten worden aan de lijst van 'needs', laat staan dat aan de toegang tot die producten of diensten reeds morgen de status van (mensen)recht toegekend zou moeten worden. Ook hier geldt dat noch de wetenschap, noch de techniek, noch wetenschappelijke modellen een antwoord zullen geven op de vraag wat werkelijk onze 'needs' zijn en wat daarbovenuit gaat. Het zijn mensen die hier keuzes maken. Bij het maken van die keuzes kunnen modellen ons wel helpen om te beoordelen of onze keuzes zullen leiden tot glorie of schade.

Onderwijs

Kort wil ik nog ingaan op een enkel aspect van het universitaire onderwijs. In de periode 2005-2009 was ik opleidingsdirecteur van de faculteit Civiele Techniek & Geowetenschappen. In die hoedanigheid maakte ik de verandercultuur in het onderwijs van dichtbij mee. De invoering van de BaMa-structuur was net achter de rug, maar het verandervirus was nog steeds actief. De reden om veranderingen door te voeren was dat - naar mijn idee te vaak – stilstand werd beschouwd als achteruitgang. Wiskundig uitgedrukt: $0 = -1$. Een eigenaardige vergelijking, die je onwillekeurig doet denken aan tekeningen van Escher waarbij water omhoog stroomt in plaats van naar beneden. Op het eerste gezicht lijkt alles te kloppen, maar als je goed kijkt deugt er niets van. Niettemin is Escher er wereldberoemd mee geworden. Zo trekken veranderaars ook

vrijwel altijd aan het langste eind. Als een voorgestelde verandering goed uitpakt, dan krijgt de functionaris die de verandering had voorgesteld al snel de opdracht om een volgende verandering voor te bereiden. Pakt de verandering verkeerd uit, dan krijgt een andere functionaris de opdracht om de mislukte verandering te herstellen. Zo blijft het verandervirus ongebreideld voortwoekeren.

Ik zie het onderwijs liever als een boom. Voor een boom geldt: stilstand = groei! Zo nu en dan moet er dood hout worden weggekap. Maar bij het zien van dood hout moet niet meteen de hele boom uit de grond worden getrokken om te zien of de wortels nog wel gezond zijn. Dan gaat de boom dood! Als er dood hout is, dan kappen waar dat nodig is. Bemoedig waar mogelijk, corrigeer waar nodig en voer een slechtnieuwsgesprek indien onvermijdelijk, maar val niet iedereen lastig met generieke maatregelen die handen vol geld kosten, veel frustratie opleveren, maar waarbij hoogstwaarschijnlijk het dode hout ongemoeid blijft zitten.

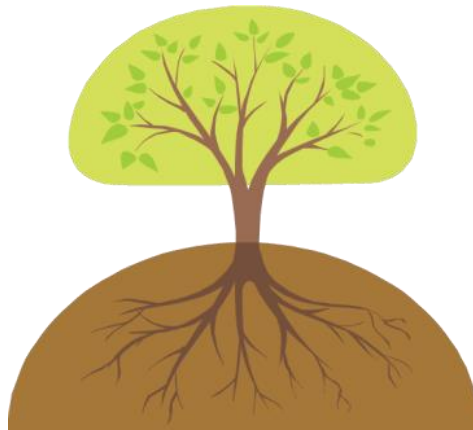


Fig. 25 De boom als metafoor voor ontwikkeling van het onderwijs: Stilstand = Groei!

Dankwoord

Het was meer voorrecht dan verdienste dat ik mijn hele actieve loopbaan aan de TU Delft heb mogen doorbrengen. Ik heb genoten van de vrijheid die je in deze instelling hebt als wetenschapper, docent en leidinggevende. Ik ben deze universiteit dan ook veel dank verschuldigd. Dank voor de prettige contacten met collega's van de sectie, afdeling, faculteit en universiteit. In het bijzonder noem ik de samenwerking met de dienst Onderwijs & Onderzoek in de periode 2005-2009, waarin ik opleidingsdirecteur van de faculteit mocht zijn. Aan de contacten met collega's uit andere afdelingen en faculteiten bewaar ik de beste herinneringen. Bijzondere dank gaat ook uit naar collega's met wie ik, onder de deskundige leiding van prof. Sybrand van der Zwaag, bij mocht dragen aan de totstandkoming en uitvoering van het IOP-programma 'Zelfher-

stellende materialen'. Dank ook aan de collega's met wie een eerste aanzet is gegeven voor de vorming van een Expert Centre op het gebied van veroudering van materialen en constructies. De contacten met het bedrijfsleven, de Betonvereniging, de CUR, CROW, NEN, KIVI-Bouw, Rijkswaterstaat, het College van Deskundigen Betonreparatie, STW, M2i en de studieverenigingen Stufib en Stutech heb ik als bijzonder waardevol ervaren. Veel dank daarvoor.

Tijdens het internationale afscheidssymposium in Delft in 2018 was ik reeds in de gelegenheid om stil te staan bij de waarde van internationale contacten⁵⁵. Contacten met collega's van buitenlandse universiteiten, onderzoekinstellingen en internationale organisaties als fib, IABSE, IALCCE en RILEM zijn zuurstof voor een wetenschapper. Je kunt niet zonder. Dank daarvoor.

Aan het einde van mijn intreerede⁵⁶ in 2000 had ik ruimschoots de gelegenheid om collega's van de sectie Betonconstructies te bedanken voor hun collegialiteit en samenwerking, niet in de laatste plaats vanuit de gedachte en intentie om die samenwerking vruchtbaar te kunnen voortzetten. Van mijn hoogleraarschap bracht ik uiteindelijk alleen de beginperiode bij die sectie door. Ook al was het veel korter dan gepland, veel dank voor de samenwerking in die periode en voor de voortzetting van die samenwerking binnen colleges en de gezamenlijk verzorgde postdoctorale cursussen over temperatuur- en krimpeffecten in betonconstructies.

Veel heb ik te danken aan collega's met wie ik het genoeg heb gehad om vanaf 2003 te werken aan de voortzetting en verdere vormgeving van het Microlab en de sectie Materials & Environment. Ik kon daarbij rekenen op de kritische, maar welwillende steun van de decaan, prof. Louis de Quelerij, en de afdelingsvoorzitter, prof. Frans Bijlaard. Hun steun was onmisbaar. Dank daarvoor! Het was een uitdaging om samen met de wetenschappelijke staf van de sectie, de technici, secretaresses, studenten, studentassistenten en onderzoekers de sectie te positioneren. Zonder hun inzet zou het onmogelijk zijn geweest om daar te komen waar wij nu staan. Veel dank daarvoor.

Met veel voldoening kijk ik terug op de internationale congressen, workshops en cursussen, waarvoor de afgelopen jaren het initiatief is genomen en die wij als sectie mochten organiseren. Dank aan Iris Batterham voor haar inzet en creativiteit bij het vormgeven en organiseren van deze evenementen. Zonder haar inzet zou er niet veel van terecht gekomen zijn.

⁵⁵ G. Ye (Ed.) (2018) RILEM Workshop on Concrete Modelling and Materials Behaviour. RILEM PRO 126. Delft.

⁵⁶ K. van Breugel (2000) Van Vitruvius tot Virtueel Lab. Intreerede TU Delft. 50 p.

De groei van de sectie en het organiseren van evenementen vroegen veel secretariële ondersteuning. Een beroep op Iris Batterham, Marijke van der Veen, Claudia Baltussen, Melanie Holtzapfel, Ingrid van Wingerden, Nynke Verhulst, Claire de Bruin en Jacqueline van Unen-Bergenhengouwen was nooit tevergeefs. Dank voor jullie inzet en de prettige manier waarop jullie je werk verrichtten.

Bijzondere vermelding verdient het optreden van Nynke Verhulst rondom mijn onverwachte verblijf in het ziekenhuis van Daejeon in Korea in oktober 2015. Jij verzorgde de communicatie tussen mij en het thuisfront, onderhield de contacten met de verzekering, regelde de repatriëring en fungeerde als non-medical escort op de terugreis. Jouw zorg en toewijding vergeet ik nooit. Dankjewel!

Tijdens mijn ongeplande verblijf in Korea in 2015, en in de maanden daarna, hebben collega's van de sectie laten zien dat zonder mij het werk gewoon doorgang kon vinden. Ik heb daar ook geen moment zorgen over gehad. Erik Schlangen, Ye Guang, Ton van Beek en René Braam, dank voor de extra inspanningen die jullie toen hebben geleverd om lopende colleges over te nemen. Onbedoeld hebben jullie toen laten zien dat ik zonder zorgen over het voortbestaan van de sectie kon toewerken naar mijn afscheid van de universiteit.

Een uittreerede is hét moment om stil te staan bij alles wat ik in de afgelopen vier decennia heb mogen doen, bij de gezondheid die ik daarvoor kreeg, en bij de mensen met wie ik meer of minder intensief heb samengewerkt. Niets van alles wat geweest is was vanzelfsprekend. U vraagt het mij niet, althans niet vandaag, maar voor mijzelf is dit ook het moment om rekenschap af te leggen. Rekenschap van gepubliceerde artikelen en boeken, van colleges en commissiewerk, van congressen en cursussen, van functionerings- en beoordelingsgesprekken, van beleidsbeslissingen en managementstijl, kortom, van alles wat ik heb gedaan. Alles bij elkaar is het toch wel heel wat. Nee, niet alles was perfect, maar het stelt toch wel wat voor. Ik wacht mij ervoor om te beweren dat ik leven kan maken, en zelfs niet dat ik alles van beton weet. Maar ik zou toch wel willen weten of het, grosso modo, aan de maat was. Ik actualiseer mijn CV en leg het alles voor aan God. Hij neemt het ter hand. Hij kijkt. Hij bla-dert. Hij weegt. Ik wacht af. Misschien zegt Hij dan wel: "Mooi. Ja, zo is het mooi geweest". Dan schuift Hij mijn CV terzijde en vervolgt: "Je CV had je wel thuis mogen laten. Die kende Ik al. Maar Ik heb iets mooiers, iets beters voor je. En het beste komt nog!" Ik zou Laplace willen bijvallen als hij zegt dat hij God als hypothese niet nodig heeft. Inderdaad, niet als hypothese, maar als Vader.

Ik heb gezegd.