

Systemdenken is een methode die wordt gebruikt om dynamische fenomenen te begrijpen. Een fenomeen is een verschijnsel dat wordt waargenomen. Dynamisch betekent veranderen in de tijd. Systemdenken geeft een kader om veranderende fenomenen mee te beschrijven en te analyseren.

1. Wat is **fysieke structuur**? (Tabel 1, item 1.1)

Een systeem bestaat uit een aantal, meestal tastbare, elementen die onderling verbonden zijn en gezamenlijk het systeem voorstellen. Denk aan de onderdelen die samen een auto vormen, de plant- en dierpopulaties in een regenwoud, of de organen die horen bij een bepaalde lichaamsfunctie. Er zijn ook elementen die geen onderdeel van het systeem zijn. Zulke elementen horen bij de omgeving. De omgeving kan een systeem wel beïnvloeden, maar de interne werking van het systeem is onafhankelijk van de omgeving.

2. Wat is **gedrag**?

De werking van een systeem wordt geobserveerd aan de hand van fenomenen: verschijnselen die veranderen in de tijd. Denk aan een auto die warm wordt, een populatie die toeneemt in omvang, of een orgaan dat teveel hormonen produceert. De werking van een systeem ligt ten grondslag aan die verschijnselen. Bijvoorbeeld, de auto lekt koelvloeistof waardoor..., de natuurlijke vijand is besmet met een dodelijk virus waardoor..., en de bloedvatvernauwing belemmert de bloedcirculatie waardoor... De werking verklaart het systeemgedrag. Hierbij is oorzaak-gevolg analyse belangrijk.

3. Wat is een **Grootheid**? (Tabel 1, item 1.2)

Grootheden zijn de eigenschappen van de elementen in een systeem. Met grootheden wordt het gedrag beschreven. Bijvoorbeeld, de temperatuur (van een automotor), het aantal (individueen in een populatie), of de hoeveelheid (hormonen in bloed). Een element kan meerdere grootheden hebben.

4. Wat is **Waardenbereik**? (Tabel 1, item 1.2)

Het waardenbereik definieert de waarden die een grootheid kan aannemen. Bijvoorbeeld, x °C voor temperatuur, waarbij $x \in R$. Anders gezegd, de temperatuur wordt aangegeven in Celsius en alle getallen uit de verzameling R worden gebruikt. Echter, voor het begrijpen en verklaren van systeemgedrag zijn vaak kwalitatieve waarden nodig. Daarbij wordt uitgegaan van een (zo klein mogelijke) verzameling discrete¹ waarden. Neem bijvoorbeeld een geïntegreerd verwarmings- en verkoelingssysteem in een woonhuis. Hoe blijft de kamertemperatuur (T_{KAMER}) op het gewenste niveau? Het volstaat om 3 waarden voor temperatuur te kiezen: de norm zoals aangegeven door de thermostaat (een puntwaarde: P_{NORM}), alle waarden onder die norm (een interval: I_{LAAG}), en alle waarden boven die norm (een interval: I_{HOOG}). De waardenbereik wordt dan $\{I_{\text{LAAG}}, P_{\text{NORM}}, I_{\text{HOOG}}\}$ (let op: puntwaarden en intervalwaarden wisselen elkaar af).

De systeemwerking kan nu beschreven worden²:

¹ Een beperkt aantal waarden. Tegenover *continue* waarbij er oneindig veel waarden zijn.

² $T_{\text{KAMER}}=I_{\text{LAAG}}$ is hetzelfde als $T_{\text{KAMER}}<P_{\text{NORM}}$ en $T_{\text{KAMER}}=I_{\text{HOOG}}$ hetzelfde als $T_{\text{KAMER}}>P_{\text{NORM}}$.

- als $T_{\text{KAMER}} = I_{\text{LAAG}}$, dan verwarmt het systeem de woning,
- als $T_{\text{KAMER}} = P_{\text{NORM}}$, dan is het systeem inactief, en
- als $T_{\text{KAMER}} = I_{\text{HOOG}}$, dan koelt het systeem de woning.

Merk op dat de eenheid voor temperatuur minder belangrijk is geworden. Celsius en Fahrenheit zijn niet relevant om te begrijpen hoe het systeem werkt.

5. Wat is **Huidige waarde** en **Verandering** (afgeleide)? (Tabel 1, item 1.2)

De waarde die een grootheid op een bepaald moment heeft, noemen we de huidige waarde van die grootheid. Bijvoorbeeld, de kamertemperatuur is op een bepaald moment gelijk aan de norm ($T_{\text{KAMER}} = P_{\text{NORM}}$) en op een ander moment lager dan die norm ($T_{\text{KAMER}} = I_{\text{LAAG}}$).

Bij een dynamisch systeem veranderen de waarden van grootheden. Dit wordt weergegeven met de afgeleide middels drie kwalitatieve waarden: min (afname), \emptyset (stabiel), en plus (toename). Het waardenbereik voor de verandering is dan ook {min, \emptyset , plus}.

Waarde en verandering gaan samen. De kamertemperatuur kan bijvoorbeeld $\langle I_{\text{LAAG}}, \text{plus} \rangle$ zijn. Dat betekent dat de temperatuur de waarde I_{LAAG} heeft en toeneemt. Op een ander moment kan de kamertemperatuur $\langle P_{\text{NORM}}, 0 \rangle$ zijn. Dat betekent dat de temperatuur de waarde P_{NORM} heeft en stabiel is.

6. Wat is **Toestand**? (Tabel 1, item 1.6)

Toestand verwijst naar een periode in de tijd gedurende welke het systeem een bepaald gedrag vertoont. Toestand wordt weergegeven met een S (van state) en een getal. Bijvoorbeeld, in een toestand (S_1) is de kamertemperatuur $\langle I_{\text{LAAG}}, \text{plus} \rangle$ (temperatuur heeft waarde I_{LAAG} en neemt toe). Als de temperatuur blijft toenemen, komt het systeem in een nieuwe toestand (S_2), namelijk $\langle P_{\text{NORM}}, \text{plus} \rangle$ (temperatuur heeft waarde P_{NORM} en neemt toe), om vervolgens direct over te gaan naar weer een nieuwe toestand (S_3), namelijk $\langle I_{\text{HOOG}}, \text{plus} \rangle$ (temperatuur heeft waarde I_{HOOG} en neemt toe).

7. Wat is **Toestandsgraaf** en **Toestandsovergang**? (Tabel 1, item 1.6)

Een aantal opvolgende toestanden vormen een toestandsgraaf, in het voorbeeld $[S_1 \rightarrow S_2 \rightarrow S_3]$. Bij complexe systemen, met veel grootheden, kan de toestandsgraaf ook complex worden, met lange ketens en veel vertakkingen. Een keten kan ook terugkomen bij het beginpunt: een lus van gedragingen. Bijvoorbeeld, een massa hangend aan een veer die (zonder wrijving) eindeloos op en neer beweegt.

De reden waarom een toestand overgaat in een volgende toestand heet de toestandsovergang. Waarom gaat S_1 over in S_2 ($S_1 \rightarrow S_2$)? Omdat de temperatuur in interval I_{LAAG} zit en stijgt, is het onvermijdelijk dat de huidige waarde op een bepaald moment aan het einde van dat interval komt en overgaat naar de (hoger) aangrenzende waarde in het waardenbereik, in dit geval P_{NORM} . Samenvattend, $\langle I_{\text{LAAG}}, \text{plus} \rangle \rightarrow \langle P_{\text{NORM}}, \text{plus} \rangle$ is de toestandsovergang bij $S_1 \rightarrow S_2$.

8. Wat is **Invloed (I)** en **Proportionaliteit (P)**? (Tabel 1, item 1.3)

Een belangrijk aspect bij systeemdenken is het in kaart brengen van de oorzaak-gevolg verbanden (causaliteit) die de werking van een systeem verklaren.

Daarbij wordt een onderscheid gemaakt tussen de primaire oorzaak, de **invloed** (I+ en I-) en de doorgeven daarvan, de **proportionaliteit** (P+ en P-). Bijvoorbeeld, een badkuip en de vraag waarom het water steeds hoger komt te staan. Hier is de invloed: er stroomt water uit de kraan en daardoor neemt de hoeveelheid water in het bad toe. De proportionaliteit is: de hoeveelheid water in het bad neemt toe en daardoor neemt de waterhoogte toe. Dus:

$\text{Water}_{\text{STROOM}} \text{ I+ } \text{Water}_{\text{HOEVEELHEID}} \text{ \& } \text{Water}_{\text{HOEVEELHEID}} \text{ P+ } \text{Water}_{\text{HOOGTE}}$

Een invloed kan ook negatief zijn. Stel, het bad zit vol water, de kraan is dicht en iemand laat het bad leeglopen. In dat geval is sprake van een negatieve invloed:

$\text{Water}_{\text{UITSTROOM}} \text{ I- } \text{Water}_{\text{HOEVEELHEID}} \text{ \& } \text{Water}_{\text{HOEVEELHEID}} \text{ P+ } \text{Water}_{\text{HOOGTE}}$

Oftewel: (invloed, I-) er stroomt water via de afvoer weg en daardoor neemt de hoeveelheid water in het bad af, en (proportionaliteit, P+) de hoeveelheid water in het bad neemt af en daardoor neemt de waterhoogte af. Merk op dat het verband tussen hoeveelheid en hoogte positief blijft. Bij een P+ verband volgt de beïnvloede grootheid namelijk de verandering van de beïnvloedende grootheid. Anders gezegd, als de oorzaak afneemt, neemt het gevolg af, en als de oorzaak toeneemt, neemt het gevolg toe. Bij een negatief proportioneel verband (P-) wordt de verandering gespiegeld: als de oorzaak afneemt, neemt het gevolg toe, en als de oorzaak toeneemt, neemt het gevolg af.

Merk op dat, in tegenstelling tot bij een proportionaliteit (P), de *verandering* van de grootheid die de *invloed* (I) uitoefent geen rol speelt. Immers, als het water uit de kraan stroomt, neemt de hoeveelheid water toe. Het gaat dus om de omvang van de stroom, en niet om diens verandering.

9. Wat is **Terugkoppeling**?

Een keten van proportionaliteitsverbanden (P), volgend op een invloed (I), kan deze invloed zelf weer beïnvloeden. Er is dan sprake van terugkoppeling (ook wel feedback genoemd). Een positieve terugkoppeling versterkt de oorspronkelijke invloed en een negatieve terugkoppeling verzwakt deze. De stortbak van een WC is een voorbeeld van een systeem met een negatieve terugkoppeling. De hoger wordende waterkolom sluit gaandeweg de watertoevoer af (via de vlotter).

10. Wat is **On/gelijkheid, Optelling en Aftrekking**? (Tabel 1, item 1.4)

Met relaties zoals gelijkheid (=), ongelijkheid (<, ≤, ≥, >), optelling (A+B=C) en aftrekking (A-B=C) kunnen uitspraken worden gedaan over de relatieve grootte van puntwaarden, grootheden onderling, en de huidige waarde van een grootheid. Bijvoorbeeld, $T_{\text{KAMER}} < P_{\text{NORM}}$ (kamertemperatuur is lager dan de norm).

Merk op dat een waardenbereik in feite ook een verzameling van dergelijke uitspraken is. Bijvoorbeeld, het waardenbereik $\{I_{\text{LAAG}}, P_{\text{NORM}}, I_{\text{HOOG}}\}$ betekent eigenlijk $I_{\text{LAAG}} > P_{\text{NORM}}, > I_{\text{HOOG}}$ (en dus ook: $I_{\text{LAAG}} < P_{\text{NORM}} < I_{\text{HOOG}}$).

11. Wat is **Correspondentie**? (Tabel 1, item 1.5)

Soms is bekend dat bepaalde waarden noodzakelijk samen voorkomen. Bijvoorbeeld, als er geen kracht wordt uitgeoefend op een veer dan heeft de veer de rustlengte. Correspondentie is niet hetzelfde als gelijk zijn. Waarden kunnen corresponderen, maar toch ongelijk zijn (of niet vergelijkbaar).

12. Wat is **Systeemselectie**?

Een systeem is veelal een selectie van een groter geheel. Een longarts, bijvoorbeeld, kijkt naar fenomenen en organen die iets met de longen te maken hebben. Een gebroken been of een oorontsteking horen daar over het algemeen niet bij. Wanneer een auto een APK-keuring ondergaat, test de monteur niet of de autoradio nog werkt, want dat valt niet onder die keuring. Systeemselectie is afhankelijk van de te beantwoorden vraag. Het is een keuze die steeds opnieuw moet worden gemaakt. Een systeem is goed gekozen als het zo klein mogelijk is, maar juist voldoende omvat om de vraag goed te kunnen beantwoorden.

13. Wat is **Perspectief** en **Aanname**?

Perspectief en aanname spelen een rol bij systeemselectie. Ze helpen de keuzes onderbouwd en inzichtelijk te maken. Perspectief is het gezichtspunt dat wordt ingenomen bij de selectie. Neem een radiator en de vraag of deze voldoende warmte genereert voor een bepaalde ruimte, tegenover de vraag hoe de lekkage kan worden verholpen. In het eerste geval is de radiator een warmtebron in een energiesysteem. In het tweede geval is de radiator onderdeel van een containersysteem, gevuld met water, dat lekt. De keuze voor een perspectief maakt dat bepaalde zaken wel of niet relevant zijn en brengt daarmee focus aan.

Aannames worden gebruikt om een probleem te vereenvoudigen. Voorbeelden zijn: beschouw het katrollensysteem zonder wrijving, neem aan dat het een ideaal gas betreft, ga ervan uit dat de warmtebron geen energie verliest aan de omgeving, etc. Bij aannames wordt een in principe relevant aspect van het systeem buiten beschouwing gelaten en daardoor het probleem versimpeld. Dit kan afbreuk doen aan de oplossing. Bij aannames kan het zijn dat in werkelijkheid het systeem toch ander gedrag heeft en de versimpeling niet straffeloos was. Perspectief doet in principe geen afbreuk aan de oplossing.

14. Wat is **Modelbouw** en **Simulatie** (met computers)?





















Modelbouw met computertalen is het maken van een logische beschrijving van de werking van een systeem. Simulatie is het doorrekenen van deze beschrijving met de computer. Bij een goed model komt de simulatie nauwgezet overeen met hoe het systeem zich in werkelijkheid gedraagt. De fenomenen zoals afgebeeld in het model, en zoals deze veranderen tijdens het doorrekenen, komen zoveel mogelijk overeen met de dynamische fenomenen van het echte systeem.

Bij een kwalitatief³ model is het de bedoeling om een model te maken van *hoe wij denken* dat een systeem functioneert. Een goede oorzaak-gevolg analyse is daarbij belangrijk.






Modelbouw plaatst systeemdenken in een formeel kader en verkleint daarmee de kans op fouten en onvolledigheden. Het faciliteert en verbetert in principe ook de communicatie en discussie over systemen.

³ Kwalitatief in de zin van conceptueel (i.p.v. numeriek) en zoals met de ingrediënten uit Tabel 1 kan worden gemaakt.

Tabel 1. – DynaLearn model- en simulatie-ingrediënten

Naam	Icoon	Beschrijving
1.1 Structuur		
Entiteit		Objecten waaruit een systeem is opgebouwd.
Configuratie		Structureel verband tussen entiteiten.
1.2 Grootheden		
Grootheid		Veranderbare eigenschappen van entiteiten.
Interval		Een waardenbereik bestaat uit een geordende serie van afwisselend punten en intervallen. Het definieert de mogelijke waarden van een grootheid.
Punt		
Actieve waarde		Geeft de huidige waarde van een grootheid aan. Ook te gebruiken voor het aangeven van de afgeleide.
Afgeleide	δ	De afgeleide geeft de verandering van een grootheid aan. De verandering kan zijn: afnemen, stabiel blijven, of toenemen.
Toename		
Stabiel	\emptyset	
Afname		
1.3 Causale verbanden		
Invloed (positief)		<i>Omvang</i> van de beïnvloedende grootheid (oorzaak) bepaalt de <i>verandering</i> van de beïnvloede grootheid (gevolg).
Invloed (negatief)		
Proportionaliteit (positief)		<i>Verandering</i> van de beïnvloedende grootheid (oorzaak) propageert naar de <i>verandering</i> van de beïnvloede grootheid (gevolg).
Proportionaliteit (negatief)		
1.4 On/gelijkheden, optelling en aftrekking		
Kleiner of gelijk		On/gelijkheden zijn relaties die iets zeggen over de relatieve grootte van de verbonden ingrediënten.
Kleiner		
Gelijk		
Groter		
Groter of gelijk		
Optelling		$A+B=C$
Aftrekking		$A-B=C$
1.5 Correspondenties		
Correspondentie (alle waarden)		Correspondentie geeft aan dat bepaalde waarden (uit verschillende waardenbereik) tegelijk voorkomen.
Correspondentie (twee waarden)		

1.6 Toestanden en overgangen

Open (a)		<p>Elke toestand verwijst naar een mogelijk gedrag van het systeem. Het geeft daarvan een beschrijving.</p> <p>Toestanden zijn onderling verbonden in een toestandsgraaf (toestanden en overgangen). Een graaf laat alle mogelijke gedragingen van een systeem zien. Tijdens simulatie worden toestanden uitgerekend middels een aantal stappen: Open (beschrijving genereerd) (a), vervolgens worden mogelijke veranderingen gezocht (b), waarna deze worden geordend (c), en tenslotte daadwerkelijk uitgeprobeerd. Als een verandering plaatsvindt, gaat de bijbehorende toestand (beschrijving) over in de opvolgende toestand. Als alle veranderingen bepaald zijn, wordt de toestand afgesloten (d).</p>
Mogelijke veranderingen bekend (b)		
Mogelijke veranderingen geordend (c)		
Afgesloten (alle veranderingen zijn bepaald) (d)		
Verandering		Mogelijke en echte veranderingen van een toestand.