

Modulair bouwen voor de energie- infrastructuur

Een samenhangende aanpak voor modulariteit, hergebruik en
variabiliteit met Systems Engineering en Product Line Engineering

TNO-2026-17446 – 22 September 2026

Modulair bouwen voor de energie-infrastructuur

Een samenhangende aanpak voor modulariteit,
hergebruik en variabiliteit met Systems Engineering en
Product Line Engineering

Auteurs:

Teun Hendriks
Jacques Verriet
Klaas Wijbrans
Jelena Marincic
Rob Ekkel

Rubricering rapport:

TNO Publiek
TNO Publiek

Aantal pagina's:

136 (excl. voor- en achterblad)

Projectnaam:

FuESSE25



Alle rechten voorbehouden

Niets uit deze uitgave mag worden verveelvoudigd en/of openbaar gemaakt door middel van druk, fotokopie, microfilm of op welke andere wijze dan ook zonder voorafgaande schriftelijke toestemming van TNO.

Disclaimer

Bij de totstandkoming van dit document is Microsoft 365 Copilot ingezet ter ondersteuning van het schrijf- en redactieproces. De auteurs hebben alle resultaten van Copilot zorgvuldig beoordeeld en gevalideerd om de juistheid, volledigheid en consistentie van de inhoud te waarborgen. De verantwoordelijkheid voor de inhoud van dit document berust volledig bij de auteurs.

Acknowledgement

Het onderzoek is uitgevoerd als onderdeel van het FuESSE25-project, onder verantwoordelijkheid van TNO in samenwerking met Alliander, Enexis, Stedin en TenneT. FuESSE25 is mede mogelijk gemaakt met financiering uit de PPS-Innovatieregeling (PPS-I) voor publiek private samenwerkingen van Holland High Tech | TKI HSTM.

TNO spreekt haar waardering uit voor de essentiële bijdragen van het kernteam van de netbeheerders en TNO aan dit rapport. De volgende personen hebben vanuit dit kernteam actief meegewerkt aan de totstandkoming van het rapport:

- Alliander: Simon Rasing, Joris Gallé,
- Enexis: Marcel Willems, Luuk van Weert,
- Stedin: Jeffrey van der Vegt, Jacob Reitsema, Josie Schönhoff, Joost van Gemeren,
- TenneT: Esmée Bertens, Kees de Korte, Rembrandt Koops,
- TNO: Teun Hendriks, Jacques Verriet, Jelena Marincic, Klaas Wijbrans, Rob Ekkel.

Daarnaast is TNO erkentelijk voor de waardevolle bijdragen van andere betrokkenen vanuit de netbeheerders.

Managementsamenvatting

De Nederlandse energiesector staat voor een opgave zonder precedent. Netbeheerders moeten de komende tien jaar meer energie-infrastructuur realiseren dan in de decennia daarvoor, terwijl netcongestie, arbeidsmarktkrapte en capaciteitsbeperkingen in de uitvoeringsketen toenemen. De vraag is niet langer of de sector de netuitbreiding moet versnellen, maar hoe die versnelling kan worden gerealiseerd.

Het FuESSE25-project is een gezamenlijke studie van Alliander, Enexis, Stedin, TenneT en TNO naar de rol van **Modulair Bouwen, Systems Engineering (SE) en Product Line Engineering (PLE)** bij het versnellen van de uitbreiding van de energie-infrastructuur. De studie richt zich op de vraag hoe standaardisatie, hergebruik en modulariteit kunnen bijdragen aan hogere productiviteit, kortere doorlooptijden, betere bouwkwiteit en effectiever gebruik van schaarse uitvoeringscapaciteit.

De centrale les van FuESSE25 is dat doelmatige opschaling van de energie-infrastructuur niet primair wordt bereikt door nieuwe technische oplossingen, maar door het versterken van het organisatievermogen om standaardisatie, hergebruik en modulariteit op schaal te organiseren. Waar standaardisatie onnodige variatie reduceert, maakt modulariteit gecontroleerde variatie mogelijk. Voor modulair bouwen liggen de grootste uitdagingen daarom niet in de techniek, maar in governance, samenwerking, besluitvorming en het vermogen om kennis, ontwerpen en oplossingen over projecten en organisaties herbruikbaar en voorspelbaar te organiseren. Modulair bouwen is daarmee een strategisch organisatievraagstuk gericht op het opschaalbaar voortbrengen van energie-infrastructuur.

Deze centrale les vertaalt zich in vijf bestuurlijke vragen die bepalend zijn voor het vermogen van netbeheerders en de uitvoeringsketen om verder op te schalen, zie onderstaande tabel.

Tabel 1: Opgaven en bestuurlijke uitdagingen.

Opgave	Inzicht	Bestuurlijke vraag
Meer werk dan capaciteit	Toenemend bouwvolume vraagt om industriële werken	Hoe verhogen we productiviteit en bouwvolume zonder evenredige groei van capaciteit?
Onvoldoende voorspelbaarheid in de keten	Opdrachtnemers kunnen alleen opschalen bij stabiele werkstromen en besluitvorming	Hoe maken we vraag, capaciteit en besluitvorming beter voorspelbaar over de gehele keten?
Groeiende kosten van onderhoud voor standaarden	Het doel: voorspelbare en schaalbare realisatie, niet uniforme oplossingen	Hoe vergroten we hergebruik kosten-effectief met behoud van de juiste flexibiliteit?
Schaarse expertise	Veel kennis en keuzes blijven project- of regiogebonden	Welke kennis organiseren we in één keer voor de hele organisatie?
Toenemende uitbesteding	Werk kan worden uitbesteed, systeemeigenaarschap niet volledig	Welke regie houden we zelf en welke verantwoordelijkheid leggen we in de keten?

Deze uitdagingen maken duidelijk dat verdere opschaling niet alleen vraagt om technische standaardisatie, maar vooral om gezamenlijke sturing op productlijnen, samenwerking, kennis en uitvoeringscapaciteit ten behoeve van een voorspelbare en schaalbare realisatie.

Op basis van deze bevindingen formuleert FuESSE25 vier aanbevelingen voor governance, organisatievermogen, ketensamenwerking en sectorbrede sturing:

1. **Ontwikkel een expliciete governance- en sturingsstrategie voor modulariteit, productlijnen en variabiliteitsbeheer.** Benader modulair bouwen als strategische keuze voor de manier waarop het elektriciteitsnet wordt ontworpen, gerealiseerd en beheerd.
2. **Richt organisatievermogen voor modulariteit en productlijnen expliciet in.** Beleg eigenaarschap van productlijnen, standaarden en variatiebeheer, en investeer in architectuurbeheer, competenties en hergebruik van kennis.
3. **Versterk harmonisatie en samenwerking met de keten.** Ontwikkel langdurige samenwerkingsrelaties en harmoniseer standaarden, interfaces en werkwijzen om voorspelbaarheid en opschaling in de keten te vergroten.
4. **Organiseer sectorbrede sturing op samenhang en prioritering.** Bundel initiatieven rond modulariteit, SE en ketensamenwerking tot een samenhangend veranderprogramma.

Maak samenwerking het uitgangspunt voor opschaling. Organiseer modulariteit, standaardisatie en hergebruik gezamenlijk, en wijk alleen af waar dit aantoonbare meerwaarde oplevert. Alleen zo kan de sector de benodigde productiviteitsprong en schaalvergroting realiseren in de ontwikkeling, realisatie en instandhouding van de energie-infrastructuur. Zonder versnelling groeit de maatschappelijke schade en vertraagt de energietransitie.

Inhoudsopgave

Managementsamenvatting	3
Afkortingen	8
1 Inleiding	10
1.2 Systems Engineering als organisatievermogen	11
1.3 Opzet van dit rapport	14
2 Het FuESSE25-project	15
2.1 Hoofduitdagingen netbeheerders	16
2.2 FuESSE25: aanpak van de studie	17
2.3 Onderzoeksvraag en projectuitvoering	17
3 Modulair bouwen en Product Line Engineering	19
3.1 Product Line Engineering als kader voor modulair bouwen	19
3.2 Toepassing van het PLE-kader op de netbeheerders	20
3.2.1 Alle netbeheerders zijn verder met standaardisatie dan met modulariteit	21
3.2.2 Verschillen in volwassenheid van Product Line Engineering	21
3.2.3 Systems Engineering: van eisenmanagement naar organisatievermogen	22
3.2.4 Referentiearchitecturen bevinden zich in verschillende ontwikkelingsfasen	22
3.2.5 Grote verschillen in governance	24
3.3 Conclusies en aanbevelingen	24
4 Testen en teststrategie	26
4.1 Conceptueel kader voor IVVQ	26
4.1.1 Testen	27
4.2 IVVQ bij netbeheerders	28
4.2.1 Alliander	28
4.2.2 Enexis	30
4.2.3 Stedin	33
4.2.4 TenneT	34
4.2.5 Vergelijking	36
4.3 Conclusies en aanbevelingen	38
5 Samenwerking in de keten	40
5.1 Conceptueel kader voor samenwerking in de keten	40
5.1.1 Van projectuitvoering naar gezamenlijke ontwikkeling van modulaire oplossingen	41
5.1.2 Sleutelfactoren voor succesvolle samenwerking	42
5.1.3 Samenwerking is meer dan een contractuele afspraak	43
5.2 Netbeheerderdilemma's bij verdere ketenintegratie	44
5.3 De grootste uitdagingen zijn niet technisch maar organisatorisch	45
5.4 Vijf bottlenecks voor verdere opschaling van modulair bouwen	47
5.4.1 Stabieler en consistent proces vóór ontwerp & bouw	48
5.4.2 Versterk standaardisatie en modulair bouwen verder	49
5.4.3 Ketenintegratie versterken: vaste teams, gezamenlijke planning, pragmatische SE	50
5.4.4 Digitale werkwijzen en informatie-uitwisseling harmoniseren	50
5.4.5 Planning en capaciteit beter voorspelbaar maken	51
5.5 Conclusies en aanbevelingen	53
6 Doelmatige eisen / eisensets	55

6.1	Conceptueel kader voor doelmatige eisen en eisenets	55
6.1.1	Doelmatigheid als balans tussen waarde, risico en kosten	56
6.1.2	Twee dimensies van doelmatigheid van eisen	57
6.1.3	Doelmatige Systems Engineering	57
6.1.4	Doelmatige Product Line Engineering en modulaair bouwen	58
6.1.5	Doelmatige uitbesteding	58
6.2	Doelmatigheid bij netbeheerders	59
6.2.1	Doelmatigheid als balans tussen waarde, risico en kosten	60
6.2.2	Doelmatigheid van individuele eisen en van de totale eisenet	60
6.2.3	Doelmatige Systems Engineering: van eisenbeheer naar ontwerp- en besluitvormingskader	62
6.2.4	Doelmatige Product Line Engineering en modulaair bouwen	62
6.2.5	Doelmatige uitbesteding en rolverdeling in de keten	64
6.3	Conclusies en aanbevelingen	65
7	Integraal sturen op doelmatige modulariteit	67
7.1	Conceptueel kader governance en sturing	67
7.1.1	Drielaags governance- en sturingsperspectief	68
7.1.2	Richtinggevende principes als schakel tussen strategie en uitvoering	69
7.2	Veel initiatieven, beperkte samenhang	70
7.3	Governance als randvoorwaarde voor schaalbare modulariteit	71
7.4	Conclusies en aanbevelingen	73
8	De FuESSE Modulaire Bouwstrategie	75
8.1	Conceptueel kader voor een modulaire bouwstrategie	76
8.1.1	Systems Engineering als organisatievermogen	76
8.1.2	BAPO als ontwikkelkader voor Modulaair Bouwen	79
8.1.3	Modulaair bouwen als veranderopgave	80
8.2	Status modulaair bouwen vs. bouwstrategie	81
8.3	Transitiedilemma's bij de opschaling van modulaair bouwen	81
8.3.1	Vijf dilemma's bij de opschaling van modulaair bouwen	82
8.3.2	Naar een samenhangende bouwstrategie	84
8.4	Uitwerking van de FuESSE Modulaire Bouwstrategie	84
8.4.1	Vier-fasen Bouwstrategie Roadmap	85
8.4.2	Drielaags Governance- en Sturingsroadmap	86
8.4.3	Faseovergangen als sturings- en beslismomenten	87
8.5	Conclusies en aanbevelingen	88
9	Conclusies en aanbevelingen	90
9.1	Observaties	90
9.2	Conclusies	91
9.3	Aanbevelingen	92
9.4	Call to Action	93
10	Referenties	94
	Bijlage A	98
	Overzicht van initiatieven voor modulaair bouwen	98
A.1	Initiatieven	100
A.2	Organisaties	105
	Bijlage B	110
	Conceptueel kader voor Product Line Engineering	110
B.1	Factoren voor een PLE-strategie	110
B.2	Standaardisatie en modulariteit	111

B.3	PLE-strategieën.....	112
B.4	Referentiearchitectuur, platformen en organisatorische context	114
B.5	Systems Engineering en de systeemlevenscyclus.....	115
B.6	De rol van de systeemarchitect	116
Bijlage C		118
PLE-kader toegepast op de netbeheerders		118
C.1	Alliander	118
C.1.1	Factoren voor een PLE-strategie	118
C.1.2	Standaardisatie en modulariteit	119
C.1.3	PLE-strategieën.....	119
C.1.4	Referentiearchitectuur, platformen en organisatorische context	119
C.1.5	Systems Engineering en de systeemlevenscyclus.....	120
C.1.6	De rol van de systeemarchitect	120
C.2	Enexis	120
C.2.1	Factoren voor een PLE-strategie.....	121
C.2.2	Standaardisatie en modulariteit	121
C.2.3	PLE-strategieën.....	122
C.2.4	Referentiearchitectuur, platformen en organisatorische context	122
C.2.5	Systems Engineering en de systeemlevenscyclus.....	123
C.2.6	De rol van de systeemarchitect	123
C.3	Stedin	124
C.3.1	Factoren voor een PLE-strategie.....	124
C.3.2	Standaardisatie en modulariteit	124
C.3.3	PLE-strategieën.....	125
C.3.4	Referentiearchitectuur, platformen en organisatorische context	125
C.3.5	Systems Engineering en de systeemlevenscyclus.....	126
C.3.6	De rol van de systeemarchitect	126
C.4	TenneT	126
C.4.1	Factoren voor een PLE-strategie.....	127
C.4.2	Standaardisatie en modulariteit	127
C.4.3	PLE-strategieën.....	128
C.4.4	Referentiearchitectuur, platformen en organisatorische context	128
C.4.5	Systems Engineering en de systeemlevenscyclus.....	129
C.4.6	De rol van de systeemarchitect	129
Bijlage D		131
Verdieping van de FuESSE modulaire bouwstrategie		131
D.1	Doel van deze bijlage	131
D.2	Verdieping Vier-fasen Bouwstrategie Roadmap	131
D.3	Typische resultaten per fase.....	132
D.4	Faseovergangen en besluitmomenten.....	133
D.5	De rol van de uitvoeringsketen	134
D.6	Relatie tussen de transitiedilemma's en de bouwstrategie.....	135
D.7	Samenvatting	136

Afkorting

Afkorting	Omschrijving
ACM	Autoriteit Consument & Markt
AM/ASM	Asset Management
BAPO	Business, Architecture, Process, Organisation
BEI	Bedrijfsvoering van Elektrische Installaties
BO	Basisontwerp
BRP	Bay Replacement Program (programma binnen TenneT)
BVG	Beproeving Voor Oplevering
DO	Detailontwerp
DSO	Distribution System Operator (Regionale Netbeheerder)
FAT	Fabrieksacceptatietest
FIT	Fabrieksintegratietest
FMECA	Failure Mode, Effects and Criticality Analysis
FTE	Fulltime Equivalent
FuESSE	Future Energy System Systems Engineering
GBT	Gebruikerstest
GFN	Grid Field Netherlands (afdeling binnen TenneT)
HS	Hoogspanning
IBN	Inbedrijfname
IBS	Installatie Buiten Spanning
II3050	Integrale Infrastructuurverkenning 2030-2050
IT	Information Technology
IVVQ	Integration, Verification, Validation and Qualification
LAN	Landelijk Actieprogramma Netcongestie
LON	Large Projects Onshore Netherlands (afdeling binnen TenneT)
LPN	Large Projects Netherlands (afdeling binnen TenneT)
MBSE	Model-Based Systems Engineering
MS	Middenspanning
MSI	Middenspanningsinstallatie
N&U	Netuitbreiding en Uitbesteding
NEC	New Engineering Contract
OG	Opdrachtgever
OIV	Operationeel Installatieverantwoordelijke
ON	Opdrachtnemer
OT	Operational Technology
PAT	Productacceptatietest
PIT	Productintegratietest
PLE	Product Line Engineering
RNB	Regionale Netbeheerder
RVO	Rijksdienst voor Ondernemend Nederland
SA	Stationsautomatisering

Afkorting	Omschrijving
SAT	Site-acceptatietest
SE	Systems Engineering
SIT	Site-integratietest
SOV	Standaard Ontwerp Velden (programma binnen TenneT)
SSI	Separaat Secundaire Installatie
TSO	Transmission System Operator (Landelijke Netbeheerder)
TU	Technische Uitwerking (Enexis)
UAV	Uniforme Administratieve Voorwaarden
UAV-GC	Uniforme Administratieve Voorwaarden voor Geïntegreerde Contractvormen
UO	Uitvoeringsontwerp
VO	Voorontwerp
V&V	Verificatie & Validatie

1 Inleiding

“Netcongestie wordt een steeds groter knelpunt voor zowel de Nederlandse economie als de energietransitie. Door netcongestie kunnen bedrijven zich minder vaak in Nederland vestigen, hun activiteiten uitbreiden, elektrificeren of duurzame elektriciteit terugleveren. Dit veroorzaakt maatschappelijke schade.”

Ecorys, De netto maatschappelijke kostprijs van netcongestie (2025) [1]

De uitbreiding van de energie-infrastructuur behoort tot de meest urgente maatschappelijke opgaven van Nederland. Op grote delen van het elektriciteitsnet is de beschikbare transportcapaciteit inmiddels volledig benut; in de provincie Utrecht moet de netbeheerder zelfs gasgeneratoren inzetten om de betrouwbaarheid van het net tijdens piekbelasting te waarborgen [2]. Netcongestie remt economische groei, vertraagt woningbouw en belemmert de verdere verduurzaming van Nederland. Onderzoek van Ecorys, uitgevoerd in opdracht van RVO en het Ministerie van Klimaat en Groene Groei, laat zien dat iedere niet-geleverde MWh elektriciteit als gevolg van netcongestie netto gemiddeld circa **€ 2.500 maatschappelijke schade** veroorzaakt [1] [3].

De maatschappelijke betekenis van versnelling is aanzienlijk. Ecorys laat zien dat een hoger realisatietempo van de geplande netuitbreidingen van TenneT kan leiden tot een substantiële vermindering van de maatschappelijke kosten van transportschaarste. Afhankelijk van het gekozen investeringspad vertegenwoordigt deze versnelling een maatschappelijke waarde van miljarden euro's per jaar. Daarmee wordt de snelheid waarmee energie-infrastructuur wordt gerealiseerd een belangrijke maatschappelijke en economische factor

De urgentie van deze opgave blijkt ook uit de omvang van de huidige congestieproblematiek. De wachtrij is tussen 2024 en eind 2025 gegroeid van 5.116 MW [4] naar 9.131 MW [5]. De ieder jaar toenemende omvang laat zien dat de benodigde uitbreidingen van het elektriciteitsnet sneller groeien dan de capaciteit van de sector om deze te ontwerpen, realiseren en in bedrijf te nemen. Zelfs na het opschonen van de wachtrij door het nieuwe prioriteringskader bedraagt de landelijke wachtrij voor afname- en teruglevercapaciteit medio juli 2026 nog steeds **7 GW** [6] op een landelijke piekvraag van 18 GW. Afhankelijk van het daadwerkelijke gebruik van deze capaciteit vertegenwoordigt deze wachtrij een potentiële maatschappelijke impact in de ordegrootte van **tientallen Miljarden Euro's per jaar**.

Nederland heeft daarom een radicale uitbreiding van de energie-infrastructuur nodig. De Integrale Infrastructuurverkenning 2030-2050 (II3050) [7] laat zien dat voor een klimaatneutraal energiesysteem omvangrijke investeringen nodig zijn in elektriciteits-, gas-, warmte- en waterstofinfrastructuur. Voor het elektriciteitsnet alleen al wordt een uitbreiding voorzien van 100-200% in koppelstations en tienduizenden kilometers extra midden- en laagspanningsverbindingen. Daarnaast groeit de behoefte aan flexibiliteit, opslag en systeemintegratie. De II3050 maakt daarmee duidelijk dat de energietransitie niet alleen vraagt om meer infrastructuur, maar ook om een structureel hoger tempo van ontwerpen, bouwen en in bedrijf nemen. De snelheid van realisatie is maatschappelijk relevant. Een hoger tempo van netuitbreidingen leidt tot een substantiële afname van de maatschappelijke kosten van transportschaarste. De maatschappelijke waarde van versnelling loopt op tot miljarden euro's per jaar; Ecorys becijfert deze alleen al voor TenneT in ordegrootte van **8 tot 30 Miljard Euro per jaar** [8].

Het Landelijk Actieprogramma Netcongestie (LAN) [9] erkent deze uitdaging en richt zich daarom op drie complementaire sporen: sneller bouwen, sterker sturen en het vergroten van flexibele capaciteit. De rode draad achter deze drie sporen is dat de opgave niet langer uitsluitend kan worden opgelost door meer infrastructuur te bouwen. Ook samenwerking, standaardisatie, flexibilisering en een effectievere inrichting van processen en besluitvorming zijn noodzakelijk om de beschikbare uitvoeringscapaciteit maximaal te benutten. Dit vraagt om een meer industriële benadering van ontwikkelen, bouwen en beheren, waarin hergebruik, modulariteit en schaalbaarheid centraal staan.

1.1 De energietransitie als uitvoerings- en organisatieopgave

De energietransitie ontwikkelt zich daarmee steeds nadrukkelijker van een energievraagstuk naar een uitvoeringsvraagstuk. De uitdaging is daarbij tweeledig. Enerzijds moet de sector tussen 2025 en 2035 aanzienlijk meer infrastructuur realiseren. Anderzijds neemt de complexiteit van het energiesysteem verder toe door decentralisatie, flexibilisering, digitalisering en de groeiende onderlinge afhankelijkheden tussen systemen. De sector staat daarmee voor de opgave om én sneller te bouwen én meer complexiteit te beheersen.

Tegelijkertijd laten praktijkvoorbeelden zien dat substantiële versnelling mogelijk is [10]. In verschillende gevallen blijken doorlooptijden met tientallen procenten te kunnen worden verkort door standaardisatie, modulaire oplossingen, vroegtijdige samenwerking en een betere inrichting van processen en besluitvorming in de keten. De grootste belemmeringen blijken daarbij niet primair technisch van aard, maar organisatorisch. Deze observatie sluit aan bij recent onderzoek van Flyvbjerg naar *zogenaamde modular natives* [11]. Zijn analyse laat zien dat modulaire oplossingen niet alleen meer schaalbaar zijn, maar ook voorspelbaarder en minder risicovol. Door standaardisatie, hergebruik en herhaling ontstaan leereffecten die leiden tot hogere productiviteit, lagere kosten en snellere opschaling.

Tegen deze achtergrond ontwikkelt modulair bouwen zich van een technische ontwerpkeuze tot een strategisch instrument voor het vergroten van de uitvoeringscapaciteit van de sector. De centrale vraag is daarmee niet langer óf de energie-infrastructuur sneller moet worden gerealiseerd, maar hoe de sector haar manier van ontwerpen, bouwen en samenwerken zodanig kan organiseren dat deze opschaling daadwerkelijk haalbaar wordt.

De schaal van deze opgave vraagt niet primair om nieuwe technische oplossingen, maar ook om een andere manier van organiseren. Het vermogen om strategie, architectuur, standaardisatie, engineering, uitvoering en ketensamenwerking met elkaar te verbinden wordt daarmee steeds belangrijker. In sectoren zoals aerospace, automotive en hightech wordt deze integrerende rol al decennialang ingevuld door Systems Engineering. De vraag die centraal staat in dit rapport is hoe dergelijke organisatievermogens kunnen bijdragen aan een snellere, voorspelbaardere en beter schaalbare realisatie van de energie-infrastructuur.

1.2 Systems Engineering als organisatievermogen

Systems Engineering (SE) is een interdisciplinaire benadering voor het ontwerpen, realiseren, gebruiken en beheren van complexe systemen gedurende hun volledige levenscyclus [12]. Kenmerkend voor Systems Engineering zijn de systeembenadering, de integrale

afweging van belangen van stakeholders en het expliciet beheren van samenhang tussen technische, organisatorische en operationele aspecten van een systeem.

De energietransitie vergroot de behoefte aan een dergelijke systeembenadering. Netbeheerders moeten niet alleen complexe energie-infrastructuur ontwerpen en realiseren, maar dit ook doen in een omgeving met toenemende maatschappelijke verwachtingen, veranderende regelgeving, schaarste aan personeel en materialen, en een ongekende opschalingsopgave. Hierdoor verschuift de uitdaging van het realiseren van individuele projecten naar het beheersen van complete systemen, herbruikbare oplossingen en uitvoeringsketens.

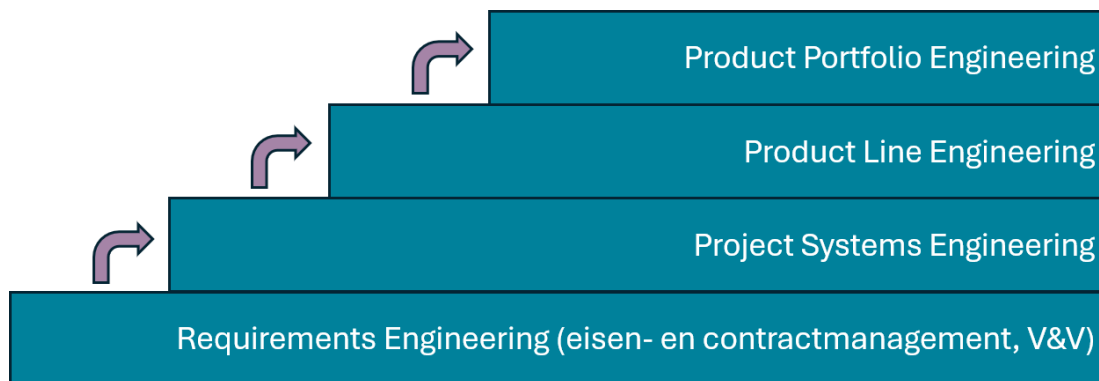
In de Nederlandse energiesector wordt Systems Engineering (SE) vaak geassocieerd met een methodiek voor eisenmanagement, contractmanagement en verificatie & validatie (V&V). Deze focus is historisch verklaarbaar: netbeheerders besteedden engineering en realisatie traditioneel grotendeels uit aan marktpartijen en richtten zich vooral op het specificeren, contracteren en accepteren van projecten. Deze activiteiten vormen een belangrijk onderdeel van Systems Engineering, maar bestrijken slechts een deel van het vakgebied. De complexiteit en omvang van de energietransitie vragen om Systems Engineering als organisatievermogen: een 'capability' welke samenhang creëert tussen strategie, architectuur, engineering, projecten en uitvoering. Daarmee richt Systems Engineering zich niet alleen op het ontwikkelen van systemen, maar ook op het ontwikkelen van het vermogen van organisaties om deze systemen doelmatig voort te brengen, te beheren en continu te verbeteren.

Bijvoorbeeld, binnen een organisatie als TNO wordt Systems Engineering als volgt gedefinieerd [13] :

"Systems engineering is the interdisciplinary field of engineering and engineering management that concentrates on how to design and manage effective systems over their full life cycles."

Deze definitie benadrukt twee complementaire aspecten. Enerzijds is Systems Engineering een **engineering discipline** die zich richt op het ontwerpen van effectieve systemen. Anderzijds is het een vorm van **regie** over de **engineering** die zorgt voor beheersing, samenhang en besluitvorming gedurende de gehele levenscyclus van die systemen [12] [14].

Deze twee aspecten zijn te vergelijken met een orkest. De **componist** bepaalt de structuur van het muziekstuk, de samenhang tussen de verschillende instrumenten en de bedoeling van het geheel. In Systems Engineering komt dit overeen met systems architecting [15]: het definiëren van functies, gedrag, raakvlakken, systeemstructuren en ontwerpprincipes die ervoor zorgen dat alle onderdelen gezamenlijk het gewenste resultaat en kwaliteit realiseren. De **dirigent** zorgt vervolgens dat alle musici in samenhang functioneren en het stuk daadwerkelijk uitvoeren zoals bedoeld. Hoewel de compositie gelijk blijft, is iedere uitvoering net iets anders, net als bij engineeringprojecten die vanuit dezelfde architectuur worden gerealiseerd. Deze rol weerspiegelt de leiderschapskant van Systems Engineering: het aansturen en organiseren van ontwikkeling, integratie, verificatie, besluitvorming en afstemming tussen disciplines, projecten en organisaties.



Figuur 1.1: Vier niveaus van Systems Engineering als capability, i.e. als organisatievermogen.

Een belangrijk inzicht vanuit aerospace, automotive, defensie, en ook de hightechindustrie is dat de impact van Systems Engineering toeneemt naarmate deze op een hoger organisatie-niveau wordt toegepast [16]. Figuur 1.1 onderscheidt daarom vier niveaus van Systems Engineering organisatievermogen:

1. **Requirements Engineering:** het doelmatig vastleggen, beheren en verifiëren van eisen (hoofdstuk 6), inclusief contractmanagement en efficiënte V&V (hoofdstuk 4);
2. **Project Systems Engineering:** het integraal sturen van projecten en technische besluitvorming gedurende de projectlevenscyclus inclusief toeleveringsketen (hoofdstuk 5);
3. **Product Line Engineering (PLE):** het ontwikkelen en beheren van modulaire productfamilies en herbruikbare bouwblokken (hoofdstuk 3);
4. **Product Portfolio Engineering:** het sturen van een samenhangende portfolio van producten, assets en ontwikkelinitiatieven vanuit een organisatie- of sectorbreed perspectief. Portfoliomanagement op basis van referentiearchitecturen is hierbij essentieel (hoofdstuk 7).

In veel infrastructurele organisaties ligt de nadruk momenteel nog op de eerste twee niveaus. In sectoren met een hoge mate van industrialisatie, zoals aerospace, automotive, defensie en hightech, heeft Systems Engineering zich echter ontwikkeld tot een strategisch organisatievermogen dat ook productlijnen, architecturen en productportfolio's omvat. Rollen als Chief Engineer, System Architect, Business Line Architect, en Chief Technical Officer vervullen daar een sturende rol in de ontwikkeling van complete productfamilies.

Ook bij netbeheerders is deze ontwikkeling inmiddels zichtbaar. Waar voorheen met name project-specifieke oplossingen werden uitbesteed, is de aandacht nu verschoven naar gestandaardiseerde ontwerpen, modulaire bouwblokken en door de opdrachtgever gespecificeerde goederen die over meerdere projecten worden hergebruikt. Product Line Engineering is daarbij een toepassing van Systems Engineering op families van systemen. Het vormt het primaire mechanisme voor het organiseren van standaardisatie, modulariteit, hergebruik en beheersing van variabiliteit over projecten, productlijnen en levenscyclusfasen heen. Daarmee groeit, naast de traditionele focus op projecten, het belang van productlijn- en portfolio-sturing.

Systems Engineering raakt daarmee niet alleen aan technische engineering, maar ook aan project- en portfoliomanagement, contractmanagement, omgevingsmanagement en de aansturing van de gehele keten. Juist deze combinatie van **systeemarchitectuur** en **integrale regie** is essentieel voor de verdere opschaling van modulair bouwen en de versnelling van de energietransitie.

De vraag hoe deze principes kunnen bijdragen aan de noodzakelijke opschaling van de energie-infrastructuur staat centraal in het FuESSE25-project, dat in dit rapport wordt beschreven.

1.3 Opzet van dit rapport

Het doel van dit rapport is om de bevindingen, inzichten en aanbevelingen van het FuESSE25-project vast te leggen en te vertalen naar een handelingsperspectief voor de verdere opschaling van de Nederlandse energie-infrastructuur.

Het FuESSE25-project is een gezamenlijk initiatief van Alliander, Enexis, Stedin, TenneT en TNO, gericht op de vraag hoe modulaair bouwen, Systems Engineering en Product Line Engineering kunnen bijdragen aan een snellere, voorspelbaardere en beter schaalbare realisatie van energie-infrastructuur. Waar eerdere discussies zich vaak richtten op technische oplossingen, laat deze studie zien dat de grootste uitdagingen voor verdere opschaling niet primair technisch van aard zijn, maar samenhangen met standaardisatie, hergebruik, samenwerking, governance en organisatieontwikkeling. Het rapport biedt daarom niet alleen een analyse van de huidige situatie, maar ook een gezamenlijk kader voor de verdere ontwikkeling van modulaair bouwen binnen de Nederlandse energiesector. De hoofdstukken behandelen verschillende aspecten van Systems Engineering als organisatievermogen, variërend van projectgebonden engineeringpraktijken tot Product Line Engineering, governance en portfolio-aansturing.

Dit rapport is als volgt opgebouwd:

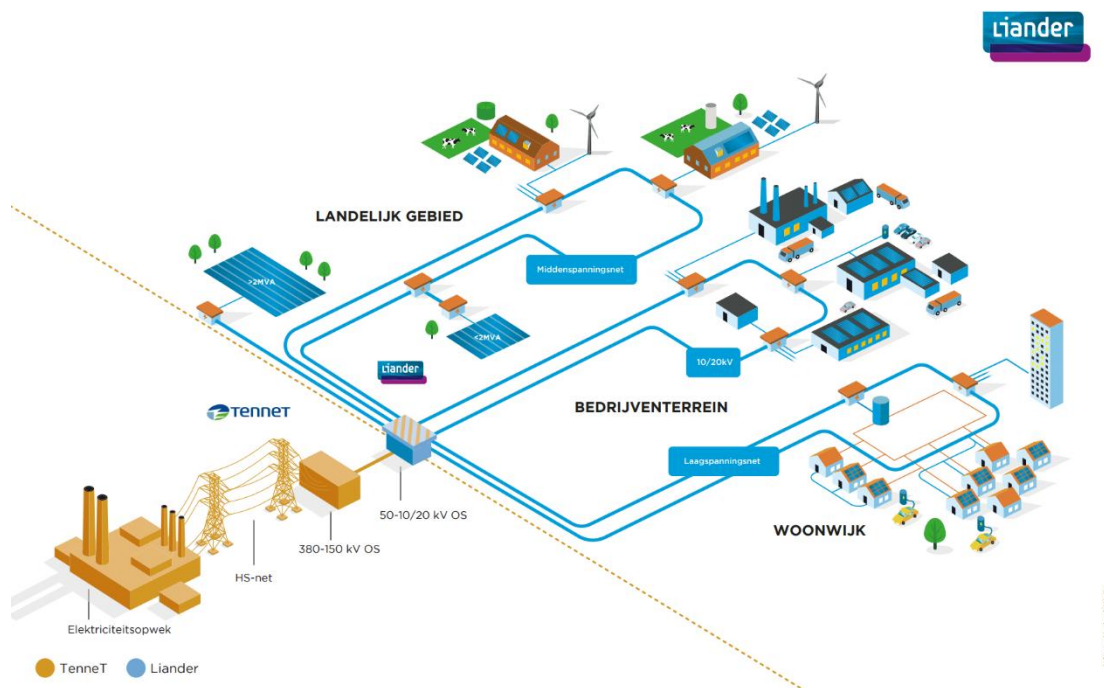
- **Hoofdstuk 1** beschrijft de maatschappelijke urgentie van de energietransitie, de uitbreidingsopgave van de energie-infrastructuur en de rol van Systems Engineering als organisatievermogen voor het realiseren van opschaling.
- **Hoofdstuk 2** introduceert het FuESSE25-project, de uitdagingen van de netbeheerders bij het uitbreiden van de energie-infrastructuur en de gehanteerde aanpak en onderzoeksthema's in het project.
- **Hoofdstuk 3** beschrijft de principes van Modulaair Bouwen en Product Line Engineering en analyseert hoe modulariteit kan bijdragen aan hogere productiviteit, voorspelbaarheid en schaalbaarheid van de energie-infrastructuur.
- **Hoofdstuk 4** onderzoekt de rol van testen, integratie, verificatie en validatie en kwalificatie binnen een modulaire bouwstrategie en beschrijft hoe hergebruik van kennis, ontwerpen en verificatie-informatie kan bijdragen aan verdere versnelling.
- **Hoofdstuk 5** analyseert de invloed van samenwerking binnen de keten en bespreekt hoe netbeheerders, opdrachtnemers en leveranciers gezamenlijk kunnen bijdragen aan een efficiëntere en beter beheersbare uitvoeringsketen.
- **Hoofdstuk 6** behandelt doelmatige eisen en eisenets, en beschouwt hoe expliciete afwegingen tussen waarde, risico, kosten, verificatielast en hergebruik kunnen bijdragen aan lagere complexiteit en betere schaalbaarheid van energie-infrastructuurprojecten.
- **Hoofdstuk 7** behandelt governance, besluitvorming en organisatie-inrichting en beschrijft de organisatorische randvoorwaarden voor succesvolle toepassing van modulaair bouwen op grotere schaal.
- **Hoofdstuk 8** verbindt de bevindingen uit de voorgaande hoofdstukken en bespreekt de belangrijkste transitiedilemma's die samenhangen met modulariteit, samenwerking, doelmatigheid en governance.
- **Hoofdstuk 9** presenteert de belangrijkste observaties, conclusies en aanbevelingen van het onderzoek en formuleert een call-to-action voor verdere opschaling van de Nederlandse energie-infrastructuur.

2 Het FuESSE25-project

Het FuESSE-project (Future Energy System Systems Engineering) is een gezamenlijk initiatief van vier grote Nederlandse elektriciteitsnetbeheerders en TNO om de bijdrage van Systems Engineering aan de versnelling van de energietransitie te onderzoeken en te versterken. Het eerdere FuESSE-project [17] richtte zich op de vraag hoe Systems Engineering kan bijdragen aan een hogere productiviteit bij de bouw van energie-infrastructuur, in het bijzonder door modulair bouwen, standaardisatie, digitalisatie en verbeterde samenwerking in de keten. De studie bracht gedeelde uitdagingen, succesvolle werkwijzen en concrete verbeterpunten in kaart voor de Nederlandse netbeheerders.

FuESSE25 bouwt voort op deze inzichten. Waar het eerdere FuESSE-project vooral gericht was op het identificeren van kansen en het delen van best practices, richt FuESSE25 zich op de vraag hoe deze inzichten op grotere schaal kunnen worden toegepast. Centraal staan daarbij modulair bouwen, Product Line Engineering, ketensamenwerking tussen netbeheerders en opdrachtnemers, en verdere harmonisatie van werkwijzen over organisatiegrenzen heen. Het doel is om te komen tot een gezamenlijke visie en roadmap voor een productiever, beter schaalbaar en meer geïntegreerd bouwproces dat bijdraagt aan de versnellingsopgave van de energietransitie.

Net als in het eerdere FuESSE-project worden de activiteiten uitgevoerd in nauwe samenwerking tussen netbeheerders, TNO en kennispartners. Daarbij wordt voortgebouwd op de relaties met onder andere de INCOSE SIG Energietransitie, Netbeheer Nederland en relevante initiatieven binnen de Topsector Energie.



Figuur 2.1: Energienetwerk (bron: Liander).

De hoofduitdagingen van de netbeheerders worden toegelicht in paragraaf 2.1, en daarna wordt de FuESSE25-studie beschreven in paragraaf 2.2. Vanuit één hoofduitdaging, het tekort aan personeel, zijn bij aanvang van het project de meest relevante thema's en problematiek geïdentificeerd. Paragraaf 2.3 introduceert de onderzoeksvraag en workshops en verdiepingssessies waarin deze thematiek is besproken.

2.1 Hoofduitdagingen netbeheerders

De energietransitie vereist een grootschalige uitbreiding van de energie-infrastructuur in de komende tien jaar. Om de Nederlandse samenleving te verduurzamen moet het elektriciteitsnet naar verwachting een factor vijf verzwaaard worden. In de komende tien jaar moeten daarvoor honderden onder- en middenspanningsstations worden bijgebouwd; daarnaast moeten op grote schaal nieuwe kabelverbindingen worden aangelegd en tienduizenden laagspanningsstations worden bijgeplaatst. Een voorbeeld van deze stations in het energienetwerk is weergegeven in Figuur 2.1.

In het eerdere FuESSE-project [17] zijn drie dominante uitdagingen voor netbeheerders geïdentificeerd: het verkrijgen van geschikte gronden, het doorlopen van omgevingsprocedures en het tekort aan gekwalificeerd personeel. Deze uitdagingen zijn nog steeds onverminderd actueel. Daarnaast is in recente publicaties van de Autoriteit Consument & Markt (ACM) een vierde uitdaging nadrukkelijker naar voren gekomen [18]: het betaalbaar houden van de energietransitie en de bijbehorende stijgende kosten voor netgebruikers.

Voor de netbeheerders zijn de belangrijkste uitdagingen hierbij als volgt:

1. Het verkrijgen van de geschikte gronden voor de energie-infrastructuur.

Het vinden en verkrijgen van geschikte gronden voor de uitbreiding van energie-infrastructuur is een grote uitdaging. Nederland is een dichtbevolkt land met beperkte ruimte. Er zijn veel concurrerende belangen voor het gebruik van beschikbare grond. Netbeheerders moeten onderhandelen met grondeigenaren, gemeenten en andere belanghebbenden om de benodigde locaties te verkrijgen. Dit proces kan tijdrovend en complex zijn, ook omdat de infrastructuur vaak door verschillende eigendommen en beschermde gebieden moet lopen.

2. Het verkrijgen van de benodigde toestemming in te doorlopen omgevingsprocedures.

Het verkrijgen van de benodigde vergunningen en toestemmingen voor de aanleg van energie-infrastructuur is een ander groot obstakel. De omgevingsprocedures in Nederland zijn streng en kunnen lang duren, met uitgebreide inspraakrondes en milieueffectrapportages. Dit kan leiden tot vertragingen in de uitvoering van projecten. Netbeheerders moeten nauw samenwerken met overheden en andere stakeholders om de procedures zo soepel mogelijk te laten verlopen en om te voldoen aan alle wettelijke vereisten. Desalniettemin zijn doorlooptijden van omgevingsprocedures nog steeds erg lang, zeker bij bezwaren van omwonenden.

3. Een tekort aan gekwalificeerd personeel om de grootschalige toename van onderhanden werk uit te kunnen voeren.

De energietransitie vereist een enorme uitbreiding en aanpassing van de energie-infrastructuur, wat leidt tot een grote vraag naar gekwalificeerd personeel. Er is echter een tekort aan technici, ingenieurs en andere vakmensen die nodig zijn om deze projecten uit te voeren. Dit tekort wordt verergerd door de vergrijzing van het huidige personeelsbestand en de concurrentie met andere sectoren. Netbeheerders moeten investeren in opleiding en werving om voldoende personeel aan te trekken en te behouden om de groeiende werklast aan te kunnen. Voor netbeheerders wordt geschat dat zij tot 2029 een tekort van 28.000 mensen zullen

hebben [19]. Om de benodigde vraag aan extra personeel te dempen wordt ook gezocht naar manieren om de effectiviteit van het personeel te vergroten.

4. Betaalbaarheid van de energietransitie en stijgende kosten voor netgebruikers.

De noodzakelijke uitbreiding van de energie-infrastructuur leidt tot sterk stijgende investeringen en daarmee hogere nettatarieven. Netbeheerders staan voor de uitdaging om het elektriciteitsnet tijdig uit te breiden, terwijl de kosten voor huishoudens en bedrijven beheersbaar blijven. Dit vraagt om doelmatige investeringen, hogere productiviteit en transparantie over de keuzes die worden gemaakt. De ACM heeft daarom betaalbaarheid en kostenefficiëntie expliciet als aandachtspunt in haar toezicht [18] benoemd.

Naast deze hoofduitdagingen zijn er nog een aantal andere uitdagingen vermeldenswaard:

5. De verkrijgbaarheid van kritische materialen en componenten zoals vermogens-transformatoren.

De Nederlandse netbeheerders zijn daarbij relatief kleine partijen voor de leveranciers van de vermogenstransformatoren.

6. De benodigde organisatie-omvorming tot slagvaardige, innovatieve organisaties.

De netbeheerders zullen zichzelf moeten omvormen van traditionele, “verkokerde” organisaties gericht op zekerheid van energielevering, tot slagvaardige, innovatieve organisaties gericht op versnelling van de energietransitie.

2.2 FuESSE25: aanpak van de studie

De bevindingen in dit rapport zijn tot stand gekomen in een gezamenlijke studie van Alliander, Enexis, Stedin, TenneT en TNO. Waar het eerdere FuESSE-project zich richtte op het identificeren van kansen voor Systems Engineering bij de versnelling van de energietransitie, staat in FuESSE25 de verdere opschaling van modulair bouwen en de daarvoor benodigde samenwerking in de keten centraal.

De studie is uitgevoerd door middel van workshops, interviews en verdiepingssessies. In de workshops zijn ervaringen uitgewisseld tussen de deelnemende netbeheerders en zijn gezamenlijke uitdagingen, best practices en verbeterkansen geïdentificeerd. Daarnaast zijn interviews gehouden met zowel netbeheerders als opdrachtnemers om inzicht te krijgen in de organisatorische, technische en samenwerkingsvraagstukken die verdere opschaling van modulair bouwen beïnvloeden.

Gedurende het project zijn conceptresultaten besproken met de deelnemende organisaties en getoetst binnen relevante kennisnetwerken, waaronder de INCOSE NL SIG Energietransitie. De combinatie van workshops, interviews en verdiepingssessies heeft geleid tot een gezamenlijk beeld van de belangrijkste kansen, knelpunten en vervolgstappen voor het verder industrialiseren van de bouw van energie-infrastructuur.

2.3 Onderzoeksvraag en projectuitvoering

Het FuESSE25-project bouwt voort op het eerdere FuESSE-project [17] en richt zich op de vraag hoe de Nederlandse netbeheerders de opschaling van de energie-infrastructuur kunnen versnellen door middel van modulair bouwen. Daarbij staat de ontwikkeling van een gezamenlijke visie op Systems Engineering centraal, evenals de verdere samenwerking en harmonisatie tussen netbeheerders en ketenpartners. Doel is om de realisatie van energie-infrastructuur sneller, efficiënter en beter schaalbaar te maken.

De **centrale onderzoeksvraag** luidt:

- Hoe kan een gezamenlijke visie op Systems Engineering voor modulair bouwen, ondersteund door verdere samenwerking en harmonisatie tussen netbeheerders en ketenpartners, bijdragen aan een snellere en schaalbare uitbreiding van de energie-infrastructuur?

Om deze vraag te beantwoorden is onderzocht hoe samenwerking tussen netbeheerders, afstemming met de opdrachtnemers en leveranciersketens, en verdere harmonisatie van werkwijzen, oplossingen en processen kunnen bijdragen aan een effectievere toepassing van modulair bouwen. Daarbij is specifiek gekeken naar **de rol van Systems Engineering en Product Line Engineering**, de mogelijkheden voor standaardisatie en hergebruik, de balans tussen innovatie en standaardisatie en de belangrijkste knelpunten in het engineeringproces.

Het project is uitgevoerd in de vorm van gezamenlijke analyses, workshops en verdiepingssessies met vertegenwoordigers van netbeheerders en interviews met ketenpartners. Tijdens deze sessies zijn zowel gemeenschappelijke uitdagingen als mogelijke verbetermaatregelen geïdentificeerd en uitgewerkt. De analyse richtte zich op vijf samenhangende thema's:

- **Testen en teststrategie:** Analyse van hoe testen en verificatie kunnen worden gestandaardiseerd en hergebruikt binnen een modulaire aanpak, zodat doorlooptijden afnemen en wijzigingen minder impact hebben op ontwerp-, realisatie- en ingebruiknameprocessen.
- **Samenwerken in de keten:** Analyse van de randvoorwaarden voor effectieve samenwerking tussen netbeheerders, aannemers en leveranciers, gericht op harmonisatie, kennisdeling, opschaling en een efficiëntere inrichting van de keten.
- **Doelmatige eisen / eisensets:** Analyse van vereenvoudiging, harmonisatie en beheersing van eisen en eisensets, inclusief de beoordeling of individuele eisen noodzakelijk, proportioneel en niet zwaarder zijn dan normen, regelgeving of het beoogde gebruik vereisen.
- **Sturing en governance:** Analyse van de bestuurlijke en organisatorische inrichting die nodig is om de ontwikkeling, invoering en verdere opschaling van modulair bouwen sectorbreed te sturen, prioriteren en borgen
- **Een modulaire bouwstrategie:** Analyse van de principes, ontwikkelrichting en implementatie van modulair bouwen als middel om standaardisatie, hergebruik en gecontroleerde variabiliteit te realiseren en daarmee de opschaling van de energie-infrastructuur te versnellen.

De resultaten van deze analyses zijn in de volgende hoofdstukken uitgewerkt. Op basis hiervan zijn conclusies, aanbevelingen en een strategie met twee complementaire roadmaps opgesteld voor de verdere ontwikkeling en invoering van modulair bouwen binnen de Nederlandse energie-infrastructuur.

3 Modulair bouwen en Product Line Engineering

“De situatie op het stroomnet is fundamenteel veranderd ... Dit geeft aanleiding om ook de bestaande procedures, uitgangspunten en werkwijzen fundamenteel tegen het licht te houden.”

Sophie Hermans (minister van Klimaat en Groene Groei) [20]

Modulair bouwen is niet primair een technisch vraagstuk, maar een organisatiebrede veranderingopgave. Om de energie-infrastructuur uitvoerbaar, voorspelbaar en schaalbaar uit te breiden, moeten gemeenschappelijkheid en variatie over projecten, programma's en levenscyclusfasen heen expliciet worden beheerst. Product Line Engineering (PLE) biedt hiervoor een kader dat standaardisatie, modulariteit, architectuur, Systems Engineering, governance en organisatieontwikkeling verbindt.

In dit hoofdstuk wordt deze samenhang geduid met het BAPO-perspectief: Business, Architecture, Process en Organisation [21]. Business bepaalt welke waarde modulair bouwen moet leveren; Architecture vertaalt dit naar productlijnen, referentiearchitecturen, interfaces en variatiepunten; Process borgt herhaalbare werkwijzen voor engineering, configuratie, verificatie en levenscyclusmanagement; Organisation legt eigenaarschap, governance, competenties en besluitvorming vast. BAPO maakt daarmee zichtbaar dat modulair bouwen alleen schaalbaar wordt wanneer technische keuzes, processen en organisatie-inrichting in samenhang worden ontwikkeld.

De Nederlandse netbeheerders hebben belangrijke stappen gezet in modulariteit, standaardisatie en industrialisatie. De gekozen oplossingen verschillen, maar de belangrijkste verschillen liggen in de afstemming tussen businessdoelen, architectuurkeuzes, processen en organisatie-inrichting. Het BAPO-perspectief helpt om deze verschillen systematisch te vergelijken [22].

Dit hoofdstuk beschrijft eerst het conceptuele Product Line Engineering-kader dat in dit rapport wordt gebruikt (paragraaf 3.1). Vervolgens wordt dit kader toegepast op de huidige praktijk van de Nederlandse netbeheerders (paragraaf 3.2), waarbij de analyse wordt gelezen langs de BAPO-dimensies. Op basis daarvan worden conclusies en aanbevelingen geformuleerd voor de verdere ontwikkeling van modulair bouwen als middel om de energietransitie te versnellen (paragraaf 3.3). Deze conclusies vormen de inhoudelijke basis voor de vervolghoofdstukken over testen en validatie, ketensamenwerking, doelmatige eisen, governance en de FuESSE Modulaire Bouwstrategie.

3.1 Product Line Engineering als kader voor modulair bouwen

Deze paragraaf geeft een beknopt overzicht van het Product Line Engineering (PLE)-kader dat in dit rapport wordt gebruikt om de verschillende benaderingen van modulair bouwen te analyseren. PLE wordt daarbij gelezen als samenhang tussen businessdoelen,

architectuurkeuzes, herhaalbare processen en organisatorische sturing. Het volledige conceptuele kader is opgenomen in Bijlage B; deze paragraaf beperkt zich tot de belangrijkste begrippen die nodig zijn om de observaties en vergelijkingen in dit hoofdstuk te begrijpen.

PLE kan worden gezien als de toepassing van Systems Engineering op een familie van verwante systemen. Het doel is om gemeenschappelijkheid en variatie expliciet te organiseren, zodat oplossingen vanuit een gedeelde architectuur kunnen worden samengesteld, geconfigureerd en doorontwikkeld. Naarmate productlijnen volwassen worden, verschuift engineering van projectspecifiek ontwerpen naar herhaalbare configuratie van eerder ontwikkelde bouwstenen [23] [24]. Daardoor ontstaan meer productiviteit, voorspelbaarheid en hergebruik over projecten en programma's heen. Een nadere toelichting is opgenomen in Bijlage B.1.

Binnen PLE spelen standaardisatie en modulariteit een complementaire rol. Standaardisatie legt vast wat gemeenschappelijk is; modulariteit bepaalt waar variatie en toekomstige wijzigingen beheersbaar blijven. Samen vormen zij de basis voor herhaalbare oplossingen die schaalvoordelen combineren met flexibiliteit in toepassing, onderhoud en doorontwikkeling. Zie Bijlage B.2 voor verdere uitwerking.

PLE kan op verschillende manieren worden ingevuld, bijvoorbeeld met componentenbibliotheken, configuratieraamwerken of platformgebaseerde benaderingen. Deze strategieën vormen geen volwassenheidsladder, maar verschillende keuzes in investering, flexibiliteit, beheersbaarheid en schaalbaarheid. Welke benadering passend is, hangt af van de opgave én van de organisatorische capaciteit om standaarden, variatie en wijziging te beheren. Een nadere beschrijving is opgenomen in Bijlage B.3.

Naarmate standaardisatie en hergebruik toenemen, groeit het belang van referentie-architecturen. Een referentiearchitectuur beschrijft wat gemeenschappelijk is, waar variatie is toegestaan en welke architectuurprincipes en interfaces worden toegepast. Daarmee vormt zij de schakel tussen businessdoelen, standaarden, productlijnen, processen en concrete projecten. Zie Bijlage B.4.

Systems Engineering vormt het verbindende kader binnen dit geheel. Het verbindt behoeften, eisen, architectuur, verificatie en levenscycluskeuzes, terwijl PLE deze samenhang uitbreidt naar meerdere systemen, projecten en programma's. De systeemarchitect bewaakt daarbij de samenhang en balans tussen businessdoelen, architectuur, processen, standaarden, interfaces en variatiepunten over de hele levenscyclus [15]. Zie Bijlagen B.5 en B.6 voor verdere uitwerking.

De analyse van de netbeheerders gebruikt deze elementen als referentiekader. Daarbij staat niet de vraag centraal welke organisatie het meest volwassen is, maar welke keuzes zijn gemaakt ten aanzien van businessdoelen, architectuur, processen, variatiebeheer en governance, en in hoeverre deze keuzes bijdragen aan een uitvoerbare, voorspelbare en schaalbare bouwopgave.

3.2 Toepassing van het PLE-kader op de netbeheerders

De analyse in Bijlage C laat zien dat alle netbeheerders werken aan standaardisatie, modulariteit en hergebruik, maar dat deze begrippen in de praktijk verschillend worden

ingevuld. De grootste verschillen zitten niet alleen in de technische oplossingen, maar vooral in de samenhang tussen businessdoelen, architectuurkeuzes, processen en organisatorische sturing. In deze paragraaf wordt het PLE-kader daarom gelezen langs de BAPO-dimensies: welke waarde modulair bouwen moet leveren, hoe dit architecturaal wordt vertaald naar productlijnen en variatiebeheer, hoe processen herhaalbaar worden ingericht en hoe eigenaarschap en governance zijn georganiseerd.

3.2.1 Alle netbeheerders zijn verder met standaardisatie dan met modulariteit

Een eerste observatie is dat standaardisatie inmiddels gemeengoed is geworden. Alle netbeheerders werken met standaardcomponenten, standaardontwerpen, typicals, standaardeisen, raamcontracten of andere herbruikbare oplossingen. Daarmee is de discussie grotendeels verschoven van de vraag óf standaardisatie nodig is naar de vraag hoe deze standaarden beheerd, toegepast en verder ontwikkeld moeten worden.

Expliciet denken over modulariteit komt minder vaak voor. Hoewel begrippen als modules, bouwblokken en modulaire stations veelvuldig worden gebruikt, ligt de nadruk in de praktijk vaak nog op het standaardiseren van ontwerpen en componenten. Het expliciet beheren van variatiepunten, interfaces, configuratieregels en productlijnen — zoals beschreven in Bijlage B — is in veel gevallen nog in ontwikkeling. Hierdoor bevinden de meeste netbeheerders zich verder op het gebied van standaardisatie dan op het gebied van PLE. Vanuit BAPO (Business, Architectuur, Proces, Organisatie) gezien is standaardisatie daarmee vooral een noodzakelijke architectuur- en procesbasis; PLE ontstaat pas wanneer deze basis wordt verbonden met expliciete businesskeuzes, variatiebeheer en organisatorisch eigenaarschap.

3.2.2 Verschillen in volwassenheid van Product Line Engineering

Alliander heeft de meest expliciete productlijnbenadering ontwikkeld. Modulair bouwen is hier uitgegroeid tot een organisatiebrede werkwijze met standaardstations, een 150%-model (een configuratiemodel dat alle toegestane varianten binnen de productlijn omvat; zie bijlage B.3), centrale bouwstenen, vaste processen en expliciet beheer van standaarden. Variatie wordt zoveel mogelijk binnen het platform georganiseerd en afwijkingen worden actief beheerst.

Enexis heeft een sterk gestandaardiseerde aanpak ontwikkeld rond typicals, modulaire bouwblokken en een repeteerbare bouwstroom. De nadruk ligt daarbij op configure-to-order (het samenstellen van projectspecifieke oplossingen uit vooraf gedefinieerde bouwstenen en configuratieregels, vergelijkbaar met de configuratieraamwerk-aanpak in bijlage B.3) vanuit standaardbouwstenen. De productlijn is minder expliciet gemodelleerd dan bij Alliander, maar is in de praktijk sterk verankerd in de werkwijze en uitvoering.

Stedin bevindt zich in een transitiefase. De organisatie beschikt over standaarden, kennis-teams en een sterke basis voor eisenbeheer, maar werkt nog aan de verdere ontwikkeling van modulariteit, systeemarchitectuur en productlijnsturing. Veel standaardisatie vindt nog plaats op installatie- en componentniveau.

TenneT heeft binnen verschillende programma's standaardoplossingen ontwikkeld, waaronder het Bay Replacement Program (BRP) (vervanging bestaande 150kV-velden), standaardvelden en offshore gridconnecties. Deze initiatieven zijn grotendeels onafhankelijk van elkaar ontstaan vanuit specifieke uitvoeringsopgaven. Daardoor is er geen

samenhangende PLE-benadering waarin variatiebeheer, architectuur, configuraties en levenscyclusontwikkeling over de verschillende productlijnen heen worden bestuurd. De belangrijkste uitdaging voor TenneT ligt daardoor niet zozeer in het ontwikkelen van nieuwe modulaire oplossingen, maar in het verbinden van bestaande initiatieven binnen een gezamenlijk productlijn- en architectuurkader binnen de nieuwe structuur na de reorganisatie. De complexiteit bij TenneT is hoger door het bestaan van meerdere kandidaatproductlijnen.

Samenvattend bevinden Alliander en Enexis zich dicht bij een expliciete PLE-benadering dan Stedin en TenneT. Het verschil zit echter niet alleen in de mate van technische standaardisatie, maar vooral in de mate waarin businessdoelen, architectuurkeuzes, processen en organisatorische sturing elkaar versterken. Bij de meer volwassen benaderingen verschuift engineering van het ontwikkelen van unieke projectoplossingen naar het configureren van eerder ontwikkelde en gevalideerde bouwstenen. Daarmee verplaatst kennisontwikkeling zich van individuele projecten naar productlijnen, standaarden en architecturen, waardoor schaarse expertise doelmatiger kan worden ingezet en hergebruik verder toeneemt.

3.2.3 Systems Engineering: van eisenmanagement naar organisatievermogen

Een tweede belangrijk verschil betreft de wijze waarop Systems Engineering (SE) wordt toegepast.

Bij TenneT en Stedin ligt de nadruk momenteel sterk op eisenbeheer, traceerbaarheid, verificatie en validatie. SE wordt daar vooral zichtbaar via eisenstructuren, Relatics-omgevingen, verificatieprocessen en projectbeheersing. Deze aanpak biedt aantoonbaarheid en controle, maar leidt ook tot grote hoeveelheden eisen, uitgebreide verificatieactiviteiten en een sterke projectoriëntatie. Tegelijkertijd zijn er al modulaire bouwblokken, standaarden en herbruikbare oplossingen aanwezig. De kans ligt erin om deze explicieter te verbinden met systeemarchitectuur, variatiebeheer, configuratieregels en levenscycluskeuzes, zodat SE niet alleen projecten beheerst, maar ook bijdraagt aan schaalbare modulariteit over projecten heen.

Bij Alliander en Enexis is SE minder prominent zichtbaar als aparte discipline of methodiek. In plaats daarvan zijn veel systeemkeuzes al verwerkt in standaardontwerpen, bouwstenen, configuraties, testaanpakken en uitvoeringsprocessen. Hierdoor verschuift een deel van de engineeringinspanning van projecten naar standaarden.

De analyse suggereert dat de volgende ontwikkelstap voor de sector ligt in het toepassen van SE als organisatievermogen. Dat betekent dat SE niet alleen wordt gebruikt voor eisenbeheer en verificatie, maar ook om businessdoelen, architectuurkeuzes, herhaalbare processen, levenscyclusmanagement, governance en productlijnontwikkeling met elkaar te verbinden.

3.2.4 Referentiearchitecturen bevinden zich in verschillende ontwikkelingsfasen

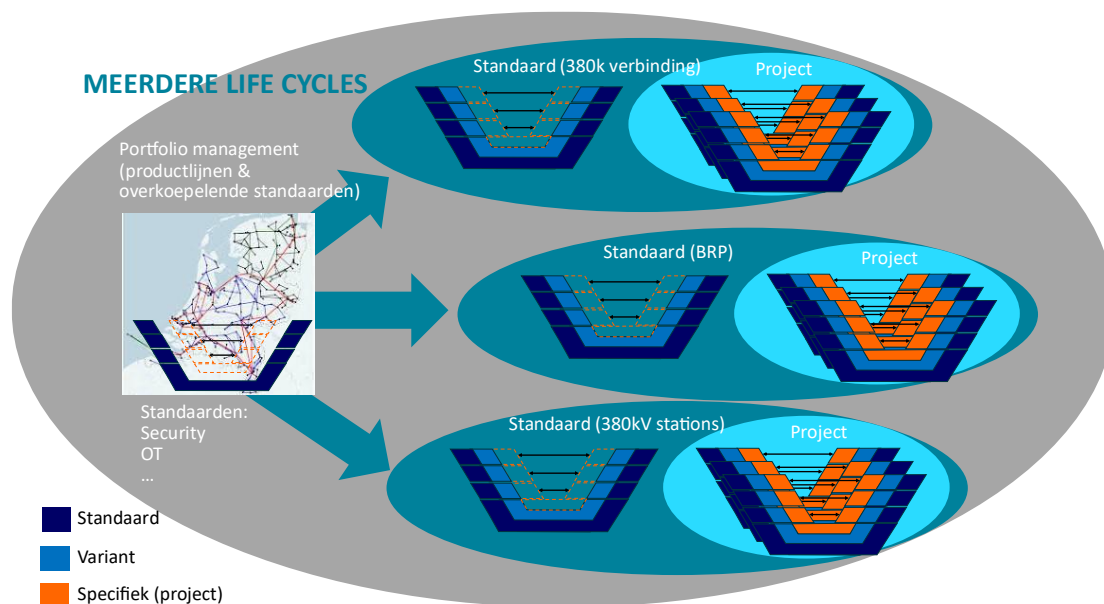
De analyse laat tevens grote verschillen zien in het gebruik van referentiearchitecturen. Referentiearchitecturen op organisatieniveau over productlijnen heen zijn buiten IT niet gezien, alleen op productlijnniveau.

Bij Alliander is feitelijk sprake van een impliciete referentiearchitectuur, zichtbaar in het 150%-model, de standaardstations en de centrale sturing op bouwstenen en variatie. De architectuur vormt hier de basis voor standaardisatie en verdere ontwikkeling van de productlijn.

Binnen Enexis is modulaair bouwen het meest expliciet uitgewerkt binnen de afdeling HS/MS stations, waar deze HS/MS-stations volgens een eigen modulaire bouwstandaard worden gerealiseerd. In het distributiedomein is eveneens sprake van vergaande standaardisatie en hergebruik, maar de productlijnontwikkeling ligt daar grotendeels bij leveranciers. Enexis past deze marktgedreven productfamilies en platformen toe binnen de eigen netcontext. Daarmee verschilt de referentiearchitectuur per domein: intern gestuurd bij de afdeling HS/MS stations, en sterker leveranciersgedreven binnen distributie.

Bij Stedin wordt systeemarchitectuur momenteel verder ontwikkeld als verbindend mechanisme tussen standaarden, projecten, eisen en verificatie.

Bij TenneT is de behoefte aan een expliciete referentiearchitectuur duidelijk aanwezig. Hoewel veel standaarden beschikbaar zijn, ontbreekt nog een overkoepelend architectuurkader waarin standaarden, productlijnen, variatiebeheer en levenscycluskeuzes samenkomen. Bovendien heeft TenneT een omgeving waarin duidelijk ruimte is voor meerdere productlijnen naast elkaar onder regie van gemeenschappelijke standaarden en mogelijk gemeenschappelijke platformen voor aspecten als OT. Een voorbeeld van een dergelijk referentiearchitectuurlandschap is te zien in Figuur 3.1, waarbij dit ook is gerelateerd aan het systems engineering V-model.



Figuur 3.1: 3-speed innovatiemodel: Referentiearchitectuur stuurt gemeenschappelijke standaarden en productlijnen. Binnen elk wordt SE toegepast, voor standaarden, de productlijn en individuele stations.

De verschillen laten zien dat de aandacht verschuift van individuele standaarden naar de vraag hoe standaarden, productlijnen en variatie samenhangend worden georganiseerd. Vanuit BAPO-perspectief vormt de referentiearchitectuur daarbij het scharnierpunt: zij vertaalt businessdoelen naar productlijnen, interfaces en variatiepunten, en geeft richting aan processen, verificatie, levenscyclusmanagement en governance.

3.2.5 Grote verschillen in governance

De grootste verschillen tussen de netbeheerders blijken uiteindelijk zichtbaar in governance.

- Alliander heeft de meest ver ontwikkelde governance rond modulair bouwen. Eigenaarschap van standaarden, wijzigingsbeheer, besluitvorming en toepassing van standaarden zijn expliciet georganiseerd.
- Ook Enexis beschikt over duidelijke organisatorische verankering via de afdeling HS/MS stations, standaardisatieprocessen en beheer van typicals.
- Bij Stedin wordt deze governance momenteel opgebouwd via veranderprogramma's, standaardisatieteams en explicieter eigenaarschap van standaarden en modulaire bouwconcepten.
- Bij TenneT wordt het belang van governance breed erkend, maar zijn eigenaarschap, standaardbeheer, productportfoliobeheer en architectuurverantwoordelijkheden nog relatief verspreid over programma's en organisatieonderdelen.

Vanuit BAPO-perspectief is governance de organisatiedimensie die bepaalt of standaardisatie en modulariteit daadwerkelijk schaalbaar worden. De organisaties die het verst zijn met modulair bouwen onderscheiden zich niet primair door andere technische oplossingen, maar door expliciet eigenaarschap, besluitvorming en wijzigingsbeheer voor standaarden, interfaces, variatiepunten en productlijnen.

3.3 Conclusies en aanbevelingen

De analyse van de netbeheerders laat zien dat de sector de introductiefase van standaardisatie voorbij is. Vrijwel alle netbeheerders beschikken inmiddels over standaarden, typische ontwerpen, bouwstenen en andere vormen van hergebruik. De volgende ontwikkelstap ligt daarom in het expliciet beheersen van variabiliteit en veranderbaarheid. Vanuit BAPO-perspectief betekent dit dat businessdoelen — zoals versnelling, doelmatigheid, beschikbaarheid en levenscyclusflexibiliteit — expliciet moeten worden vertaald naar architectuurkeuzes rond productlijnen, interfaces, variatiepunten en modulaire bouwstenen. Modulariteit is daarmee niet alleen een middel om sneller en voorspelbaarder te bouwen, maar vooral een mechanisme om toekomstige wijzigingen, vervanging, obsolescence, cybersecuritymaatregelen en uitbreidingen beheersbaar te houden over de volledige levenscyclus.

Tegelijkertijd laat de analyse zien dat de meeste netbeheerders verder zijn met standaardisatie dan met expliciete Product Line Engineering. De sector bevindt zich in een overgang van projectmatig hergebruik naar productlijn georiënteerd werken, waarin families van oplossingen centraal staan. De grootste verschillen tussen netbeheerders worden daarbij niet veroorzaakt door technische keuzes op zichzelf, maar door de mate waarin architectuur, processen en organisatie-inrichting elkaar versterken. De organisaties die het verst zijn met modulair bouwen onderscheiden zich vooral door expliciet eigenaarschap van productlijnen, een sterkere architectuurfunctie, duidelijke besluitvorming over variatie en het verplaatsen van kennis, verificatie en configuratieregels van projecten naar productlijnen. Dit bevestigt dat modulair bouwen een BAPO-opgave is: businesswaarde, architectuur, processen en organisatie moeten samen worden ontwikkeld.

Aanbevelingen

1. Benader modulariteit expliciet als een strategie voor levenscycluswaarde en aanpasbaarheid.

Ontwerp systemen zodanig dat toekomstige wijzigingen, technologische ontwikkelingen, cybersecuritymaatregelen, regelgeving en obsolescence beheersbaar kunnen worden doorgevoerd zonder grootschalige herontwerpen.

Dit vergroot de wendbaarheid van de infrastructuur, verlaagt de kosten van toekomstige wijzigingen en ondersteunt een efficiënter gebruik van investeringen en schaarse expertise over de gehele levenscyclus.

2. Ontwikkel Product Line Engineering als architectuur- en organisatiekader.

Verleg de aandacht van individuele standaarden naar productlijnen, variatiebeheer, configuraties en levenscyclusontwikkeling over meerdere projecten en generaties van systemen.

Dit vergroot hergebruik en standaardisatie, verkort ontwikkel- en realisatietijden en maakt opschaling mogelijk zonder een evenredige groei van capaciteit en kosten.

3. Gebruik referentiearchitecturen als schakel tussen businessdoelen, productlijnen en processen.

Gebruik architecturen niet alleen voor technische sturing, maar ook voor het verbinden van productlijnen, ketenpartners, verificatiestrategieën, onderhoudsconcepten, assetmanagement en levenscyclusmanagement.

Dit verbetert de samenhang tussen strategie, ontwerp en uitvoering, vermindert afstemmingsverliezen en ondersteunt een efficiëntere samenwerking in de keten.

4. Ontwikkel Systems Engineering als integrerend organisatievermogen.

Verplaats waar mogelijk kennis, architectuurkeuzes, verificatiebewijs en configuratieregels van individuele projecten naar standaarden, architecturen en productlijnen.

Dit vermindert dubbel werk tussen projecten, verhoogt de kwaliteit en reproduceerbaarheid van oplossingen en maakt kennis structureel herbruikbaar binnen de organisatie.

5. Richt governance expliciet in rond productlijnen, variatiebeheer en levenscycluskeuzes.

Leg eigenaarschap, besluitvorming en wijzigingsbeheer vast voor standaarden, interfaces, variatiepunten en levenscyclusontwikkeling en zorg voor voldoende mandaat en capaciteit om productlijnen over projecten heen te ontwikkelen en beheren.

Dit versnelt besluitvorming, voorkomt ongecontroleerde variatie en borgt een consistente ontwikkeling van productlijnen over projecten en generaties heen.

6. Maak levenscyclus-doelmatigheid een expliciet businesscriterium.

Beoordeel modulaire oplossingen niet alleen op bouwsnelheid of investeringskosten, maar ook op onderhoudbaarheid, beschikbaarheid, vervangbaarheid, flexibiliteit, toekomstige aanpasbaarheid en maatschappelijke kosten over de gehele levensduur.

Dit leidt tot beter onderbouwde investeringsbeslissingen, lagere totale levenscycluskosten en een betere balans tussen snelheid, kwaliteit, flexibiliteit en maatschappelijke waarde.

De eerste drie aanbevelingen betreffen de introductie van “system architecting”, de wijze waarop de hightechindustrie tot succesvolle productlijnen met een life cycle van vele decennia is gekomen. Aanbeveling 4 volgt hieruit: systems engineering wordt van project naar organisatieniveau getild over projecten heen. Aanbeveling 5 en 6 zijn business georiënteerd en gebaseerd op ervaringen met zowel hightechindustrie als Shell.

4 Testen en teststrategie

“You should stop testing when you reasonably believe that the probability is low that the product still has important undiscovered problems.”

Uit les 185 van Kaner, Bach en Pettichord [25]

Verificatie en validatie zijn in het eerdere FuESSE-project [17] geïdentificeerd als bottlenecks bij het realiseren van hoog- en middenspanningsstations. Een schaalbare bouwopgave vraagt om een schaalbare aanpak voor IVVQ — Integratie, Verificatie, Validatie en Kwalificatie (Qualification in het Engels) — gebaseerd op standaardisatie, hergebruik van bewijs en risico-gestuurde kwaliteitsborging. Dit onderwerp is in FuESSE25 geadresseerd in een workshop waarin gezocht is naar manieren waarop IVVQ, en in het bijzonder testen, kan worden geoptimaliseerd. Verder zijn er interviews met alle netbeheerders georganiseerd om de uitdagingen in hun huidige test- en validatiewerk te identificeren en te vergelijken. De bevindingen van deze workshop en de interviews worden in dit hoofdstuk besproken en aanbevelingen om tot efficiëntere verificatie en validatie worden geformuleerd.

Dit hoofdstuk is als volgt georganiseerd. In paragraaf 4.1 wordt de relevantie van testen en validatie in de context van systeemontwikkeling uitgelegd en de uitdagingen van de Nederlandse netbeheerders met betrekking tot testen en validatie. Paragraaf 4.2 bespreekt eerst het test- en validatiewerk per individuele netbeheerder en eindigt met een vergelijking van de netbeheerders. Paragraaf 4.3 vat het hoofdstuk samen en geeft een overzicht van aanbevelingen wat betreft testen en validatie.

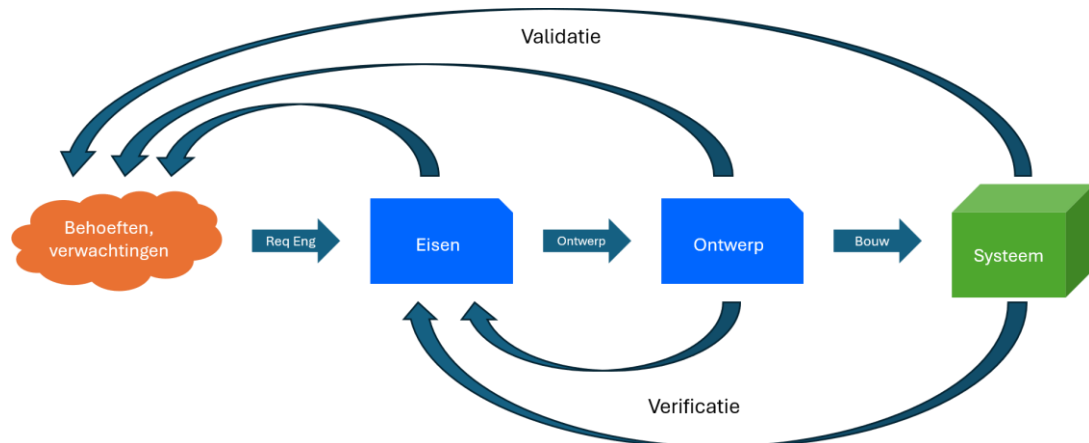
4.1 Conceptueel kader voor IVVQ

Testen en validatie in Systems Engineering valt onder het kader IVVQ. In Systems Engineering vormt IVVQ de kern van een gecontroleerde systeemrealisatie. **Integratie** draait om het samenbrengen van afzonderlijke onderdelen tot één werkend geheel, waarbij zowel de fysieke als functionele samenwerking van componenten wordt gewaarborgd. Daarna volgt **verificatie** (zie Figuur 4.1), waarin wordt gecontroleerd of het systeem voldoet aan de vooraf vastgestelde specificaties en eisen: werkt het zoals ontworpen? Vervolgens kijkt **validatie** (zie Figuur 4.1) naar de geschiktheid van het systeem in de echte gebruikscontext: voldoet het aan de behoefte van de gebruiker en ondersteunt het beoogde gebruik? Tot slot borgt **kwalificatie** dat het systeem aantoonbaar voldoet aan alle relevante normen, regelgeving en contractuele eisen — een formele bevestiging dat het systeem volgens de geldende standaarden mag worden ingezet.

Figuur 4.1 laat zien dat IVVQ zich niet alleen richt op het uiteindelijke systeem. IVVQ kan in eerdere fasen worden uitgevoerd door systeemeisen, -specificaties en -ontwerp te verifiëren en valideren. Deze vroege IVVQ kan IVVQ minder kritisch maken, omdat fouten eerder worden gedetecteerd en late IVVQ wordt verminderd.

Testen is geen afzonderlijke stap naast IVVQ, maar een methode die binnen integratie, verificatie, validatie en in sommige gevallen kwalificatie wordt toegepast om objectief bewijs te leveren. Integratietesten beantwoorden de vraag “functioneert het systeem als samenhangend

geheel?”, verificatietesten de vraag “voldoet het systeem aan de gestelde eisen?” en validatietesten “voldoet het systeem aan de behoeften van gebruikers en belanghebbenden?”



Figuur 4.1: Verificatie en validatie (aangepast van Ryan en Wheatcraft [26]).

4.1.1 Testen

Een effectief IVVQ-kader vormt de ruggengraat van gecontroleerde systeemontwikkeling en -realisatie. Elk van deze vier stappen draagt bij aan de zekerheid dat een systeem niet alleen technisch correct is ontworpen en gebouwd, maar ook functioneert zoals bedoeld, aansluit bij de gebruikersbehoefte en voldoet aan geldende normen en regelgeving. **Testen** speelt hierbij een centrale rol, omdat het in elke fase objectief bewijs levert: van vroegtijdig gebreken identificeren in het samenspel van modulaire componenten tijdens integratie, tot het aantonen van conformiteit met eisen in verificatie, het toetsen van geschiktheid in de praktijk tijdens validatie en het formeel onderbouwen van normconformiteit in kwalificatie.

Binnen het IVVQ-kader bestaan uiteenlopende testactiviteiten, elk met een eigen doel en dynamiek. In de vroege ontwikkelfasen ligt de nadruk op systeem- en productlijnontwikkeling, modulaire integratie en het borgen van kritische eigenschappen zoals betrouwbaarheid, veiligheid en prestatie. In project- en installatiecontext verschuift de focus naar productie- en bouwfasen, en naar de gestructureerde inzet van FITs, SITs, FATs en SATs om geïntegreerde functionaliteit en correcte uitvoering op locatie aan te tonen. Organisatorisch spelen vragen rond testgovernance, rolverdeling en kwalificatie van personeel en organisaties een belangrijke rol, zeker wanneer een aanzienlijk deel van de uitvoering door marktpartijen wordt gedaan. De effectiviteit van testen wordt verder mede bepaald door de beschikbaarheid van professionele testomgevingen, automatisering, volwassen eisen-traceerbaarheid en geïntegreerde testmanagementsystemen.

Omdat testen in complexe projecten snel arbeidsintensief en bureaucratisch kan worden, met grote administratieve lasten en veel dubbel werk, vraagt een slimmere en effectievere inzet van testen om gerichte principes en elementen:

- Een testmanagement- en ondersteuningssysteem voor systematische digitalisering van testplanning, protocollen, resultaten, opvolging en audit trails, zodat regressietesten, versiebeheer en kwaliteitsborging beter beheersbaar worden en afhankelijkheid van losse documenten afneemt, en end-to-end traceerbaarheid van eis tot test mogelijk is.

- Geautomatiseerde tests en testtools en ook virtuele en hybride testomgevingen, maken vervroegde integratie- en validatiemomenten mogelijk en verminderen tijdsbeslag op, en afhankelijkheid van, fysieke testlocaties.
- Risico-gestuurde test afdekking om testomvang en diepgang te richten op functies, interfaces en scenario's met de hoogste risico en foutgevoeligheid, zodat inspanning wordt afgestemd op technische en operationele risico's. Dit sluit aan bij een expliciete definitie van "voldoende kwaliteit", met vooraf vastgelegde acceptatiecriteria.
- Een programma-brede testaanpak, gebaseerd op mastertestplannen, met herbruikbare testworkflows en geharmoniseerde testniveaus zorgen voor voorspelbare kwaliteit, hergebruik van testbewijs met een consistente en efficiënte uitvoering over projecten en productlijnen.
- Een gedefinieerde IVVQ-governance tot slot versterkt de kwaliteit van besluitvorming en uitvoering, dankzij eenduidige rolverdeling met gekwalificeerd personeel. Uniforme acceptatiekaders, ook richting marktpartijen, en inclusief opleiding en kwalificatie-eisen, verbeteren voorspelbaarheid en testkwaliteit.

Door deze elementen te combineren en continu te verbeteren via analyse van testdata, kan de testaanpak minder belastend gemaakt worden, beter schaalbaar, steeds gericht op het leveren van aantoonbaar voldoende kwaliteit voor IVVQ-doeleinden.

4.2 IVVQ bij netbeheerders

Testwerk en validatie vormen volgens de Nederlandse netbeheerders een structurele bottleneck voor de realisatie en beheersing van OT- en energiesystemen. Deze situatie wordt veroorzaakt door een combinatie van organisatorische, technische en markt-gerelateerde uitdagingen:

- Schaarste aan testspecialisten en een hoge werklast, waardoor testactiviteiten vaak een kritische factor zijn in projectplanning en oplevering.
- Verschillende IVVQ-processen en werkwijzen tussen netbeheerders, wat kennisuitwisseling en samenwerking bemoeilijkt.
- Beperkte standaardisatie van testmethoden, testartefacten en testomgevingen, waardoor resultaten lastig overdraagbaar en herbruikbaar zijn.
- Organisatorische, operationele en cybersecurity-gerelateerde beperkingen rondom OT-testen, waardoor testen in representatieve omgevingen complex, kostbaar en risicovol is.
- Beperkte mogelijkheden om test- en validatiewerkzaamheden uit te besteden aan de markt, onder meer door de benodigde domeinkennis, veiligheidseisen en specifieke infrastructuur.

Als gevolg hiervan hebben IVVQ-activiteiten een lange doorlooptijd en vormen ze een bottleneck in de bouw van elektriciteitsstations.

In deze paragraaf vergelijken we het test- en validatiewerk van de Nederlandse netbeheerders. Input zijn de workshop met thema IVVQ en één-op-één interviews met de betrokken partijen.

4.2.1 Alliander

Alliander heeft een afdeling die verantwoordelijk is voor het ontwikkelen en beheren van standaardontwerpen voor hun elektriciteitsstations. Bij IVVQ wordt een onderscheid gemaakt tussen het testen van herbruikbare assets en van stationsconfiguraties in het veld. Componenten die bij een standaardontwerp horen worden in de fabriek getest, terwijl systeem-

specifieke onderdelen apart getest worden door specialisten. Een voorbeeld is het testen van de betonmortel; dit gebeurt voordat het op locatie gestort wordt.

Vanwege de standaardontwerpen heeft Alliander generieke testprotocollen/testplannen per discipline. Als er wordt afgeweken van de standaard, dan worden deze protocollen/plannen uitgebreid met specifieke tests voor de afwijkingen. Hierbij ligt de nadruk op het primaire proces: de functionaliteit van alle velden wordt volledig getest. Andere onderdelen worden “risico-gebaseerd” getest op basis van de ervaring van de specialisten. Deze tests zijn vaak inspecties.

Alle documentatie, inclusief de testdocumenten, van een project wordt opgeslagen in een (weinig gestructureerd) digitaal projectdossier in SharePoint. Externe opdrachtnemers hebben geen toegang tot het projectdossier; zij leveren de documenten aan de opdrachtgever, welke de documenten aan het dossier toevoegt. Er wordt gewerkt aan traceerbaarheid van documenten en formalisering van ontwerpen middels eisen door gebruik te maken van Relatics.¹

De verantwoordelijkheid voor de correcte werking van een station ligt bij Qirion, een onderdeel van Alliander. Zij zijn ook verantwoordelijk voor de IVVQ. Er worden weinig externe partijen ingeschakeld bij de stationsbouw, waardoor er weinig controlestappen zijn in het ontwikkelproces. Wel worden geleverde goederen aan de hand van eisen getest en vindt er een controle plaats bij overdracht van de bouwkundig aannemer naar Alliander. Een operationeel installatieverantwoordelijke (OIV) doet acceptatietests aan het eind van een project met de nadruk op het primaire systeem. Verder laat de OIV steekproefsgewijs tests uitvoeren.

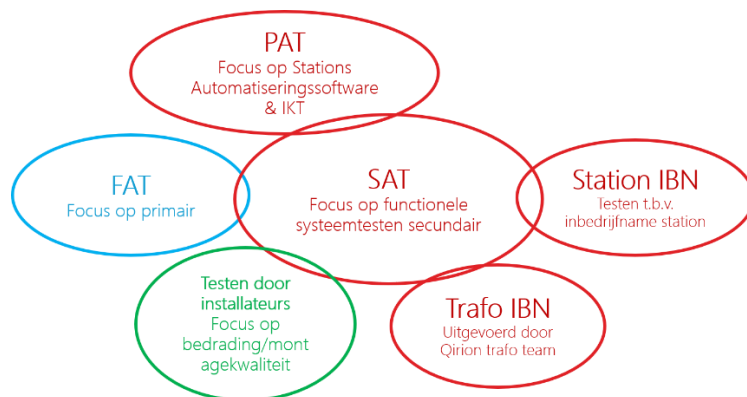
In de workshop presenteerde Qirion hun aanpak voor OT-testen in HS/MS-stations. Zij beschreven de testorganisatie als uitgevoerd door regionale OT-teams, bestaande uit OT-specialisten, voorbereidend OT-engineers en OT-technici/testers. Een landelijk OT-team, bestaande uit PAT/SAT-testcoördinatoren en ontwikkelaars, zorgt voor centraal georganiseerde testprocessturing en kwaliteitsmonitoring.

Stationsconfiguraties worden momenteel per regio ontwikkeld en getest, wat leidt tot dubbel werk, mede als gevolg van historische fusies en verschillende legacy-werkwijzen. De benoemde doelstellingen zijn aantoonbaar in control zijn over de OT-testkwaliteit en het verbeteren en optimaliseren van testactiviteiten.

Figuur 4.2 beschrijft de verschillende fasen van het OT-testproces: FAT, SAT, installatietesten, PAT, trafo- en station-IBN. Er ligt nadruk op PAT als validatie van de end-to-end stationsautomatiseringsketen, ondersteund door OT-testlaboratoria. Teststuring, bevindingenbeheer en overdracht worden centraal ondersteund via Tricentis qTest.² Er is een wens om de PAT-fase volledig te automatiseren.

¹ <https://www.relatics.com/>

² <https://www.tricentis.com/products/unified-test-management-qtest>



Figuur 4.2: Testproces van Qirion-OT voor HS/MS-stations (bron: Qirion).

Ten aanzien van verbeterpunten en trends merkt Alliander op dat het oplossen van testbevindingen in het veld een onevenredig groot deel van de tijd vergt. Fouten die pas op locatie aan het licht komen, leiden vaak tot extra diagnosewerk, herstelacties, hertesten en vertragingen in de uitvoering. Zo bepleitten zij expliciet het uit het kritieke projectpad halen van testen door deze meer “naar binnen” te brengen. Daarnaast benadrukten zij de samenwerking met industriepartners zoals Omicron³ en Wago.⁴

Qirion stelde dat testen meer kan worden geïntegreerd in het ontwerp van het secundaire systeem via digitale ontsluiting, software-defined concepten en IEC 61850-procesbussen, maar waarschuwde voor hogere cyberrisico's, grotere beheercomplexiteit en netwerkkosten, en benadrukte dat leereffecten en standaardisatie op installatieniveau de grootste efficiëntiewinst opleveren.

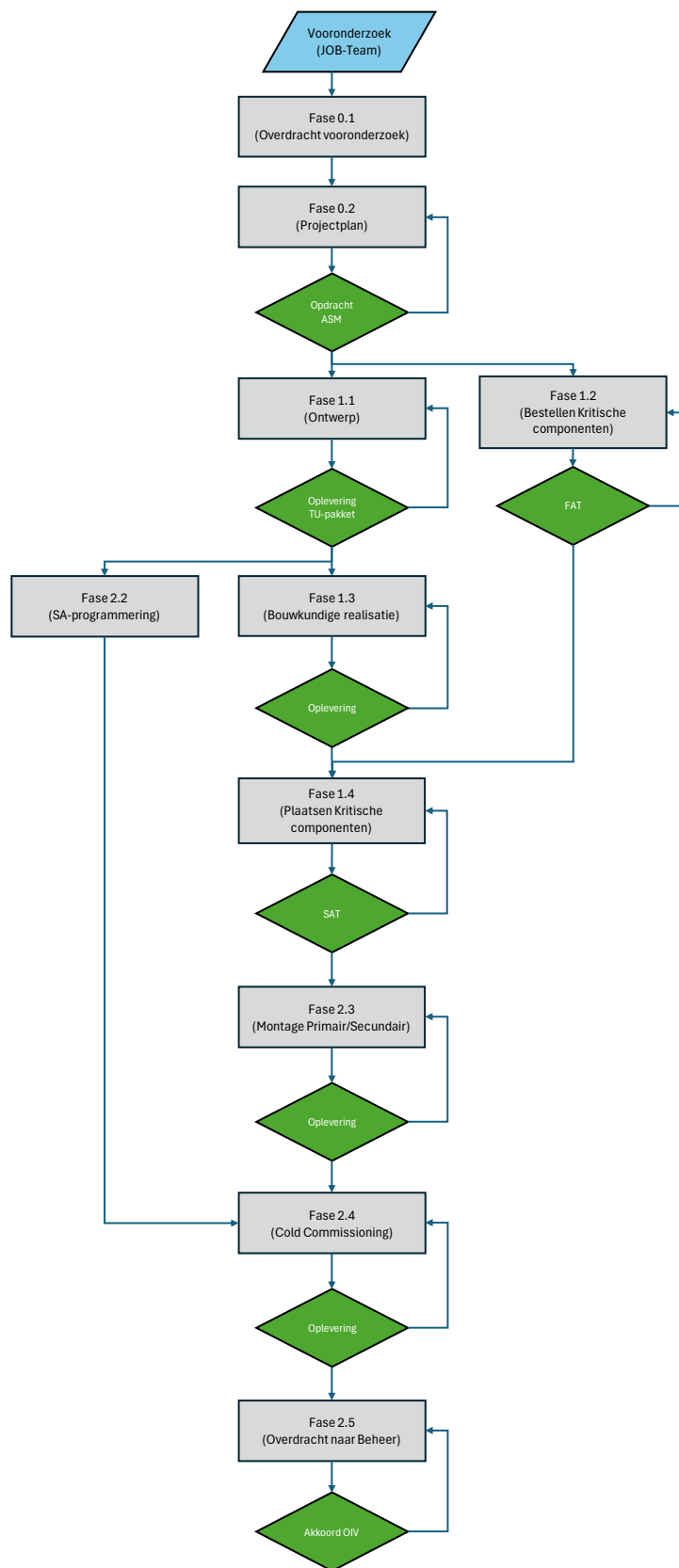
Daarnaast stelde Qirion de vraag of volledige functionele verificatie bij inbedrijfname altijd noodzakelijk is, of dat een levenscyclusgerichte, risico-gebaseerde benadering passender is, rekening houdend met testinspanning en uitvalrisico. Zij merkten op dat uitbesteden de uitvoeringslast kan verlagen, maar leidt tot meer senior toezicht en steeds sterker wordt beperkt door strengere beveiligingseisen.

4.2.2 Enexis

De Enexis-afdeling HS/MS-stations realiseert deze HS/MS-stations volgens de Enexis Modulaire Bouw (MB)-standaard. De realisatie kent een ontwikkelproces (zie Figuur 4.3) waarbij veel verantwoordelijkheid ligt bij (vaste) externe opdrachtnemers [17]. Elk van ontwikkelfasen kent een beperkte set van documenten (met een vaste opzet) die in die fase moeten worden opgeleverd. Elke ontwikkelfase eindigt met een test en/of overdrachtsstap waar mogelijke restpunten voor de voorgaande stap worden geïdentificeerd.

³ <https://www.omicronenergy.com/>

⁴ <https://www.wago.com/>



Figuur 4.3: Enexis ontwikkelproces (bron: Enexis)

De afdeling HS/MS-stations maakt daarbij gebruik van de vaste typicals voor alle primaire, secundaire en bouwkundige onderdelen. Het MB-station bestaat uit twee typen, gescheiden, gebouwdelen: een gebouw voor de middenspanningsinstallatie (MSI) en één voor de Separaat Secundaire Installatie (SSI). In de ontwikkelfase van typicals worden ontwerpkeuzes onderbouwd, en risico's vroegtijdig geadresseerd, met methoden zoals FMECA.

Er zijn IVVQ-stappen gedurende het gehele ontwerp- en realisatieproces. Enexis levert een station aan een OIV. Deze OIV reviewt het stations- en bouwplaatsontwerp voor de aanvang van de bouw.

De cold commissioningfase betreft echter de grootste IVVQ-effort. Deze fase kent een duidelijk afgebakende fasering en wordt uitgevoerd terwijl het station nog spanningsloos is. Hierdoor zijn BEI-procedures⁵ niet van toepassing en ontstaat ruimte voor een strak en herhaalbaar testproces. De totale doorlooptijd voor een station met twee transformatoren en één MS-blok bedraagt ongeveer zes weken, waarbij Enexis en aannemers nauw op elkaar aansluiten. De belangrijkste verificaties binnen het testproces richten zich op de systeemmatrix, waarin vergrendelingen, beveiligingsketens en alle conditionele logica zijn opgenomen. Daarnaast worden alle IO-lijsten, overzicht van alle in- en uitgangen, systematisch gecontroleerd, zodat vastgesteld kan worden dat de volledige signaaluitwisseling – zowel met primaire apparatuur als met centrale besturings- en automatiseringssystemen – correct en volledig functioneert.

De fasering bestaat uit:

- **Week 1 – Secundaire installatie onder spanning brengen (Aannemer)**
In deze fase wordt het station secundair onder spanning gezet, zodat alle componenten benaderbaar zijn en geschikt om te testen.
- **Week 2-3 – Inbedrijfstelling met testinstellingen (Enexis)**
Enexis verzorgt de configuratie voor het volledige SA-systeem, echter het beveiligingsrelais wordt geladen met testinstellingen omdat dan de definitieve instellingen vaak nog niet bekend zijn.
- **Week 4-5 – Testfase onder testinstellingen (Aannemer)**
De aannemer voert twee weken lang gestructureerde testen uit op basis van vooraf overeengekomen testprotocollen. Deze protocollen door aannemer opgesteld, en uitgevoerd met doorgaans met drie FTEs gedurende deze periode.
- **Week 6 – Cold commissioning (Aannemer)**
Aannemer doorloopt alle resterende verificaties, inclusief controle van vergrendelingen, beveiligingsketens en definitieve goedkeuring van alle IO-paden.

Voorafgaande aan deze testen, is al een intensieve verificatie gedaan met de afdeling netautomation, met gebruik van software om netten virtueel te testen. Deze verificatie is de afgelopen jaren aanzienlijk versneld. Waar in het verleden ongeveer twee weken nodig waren om alle datapunten, signaalketens en interfaceberichten te valideren, duurt deze stap tegenwoordig nog slechts twee dagen. De versnelling komt voort uit het op centrale locatie samenwerken van de testcoördinator en een netautomation-engineer. Gezamenlijk lopen zij de volledige datapuntenlijst door met behulp van Omicron StationScout.⁶ Hierdoor is de overdracht naar de aannemer kwalitatief hoog, met minder problemen tijdens testen.

Ten opzichte van de vroegere praktijk is de verkorting van de doorlooptijd significant voor het OT-testen van HS/MS stations. Waar OT-tests in bestaande stations soms zes maanden tot

⁵ <https://www.beviag.nl/>

⁶ <https://www.omicronenergy.com/en/products/stationscout/>

een jaar duurden, mede doordat stations tijdens de testperiode normaliter onder spanning stonden en OIV'ers dagelijks uitschakel- en inschakelacties moesten uitvoeren, is de nieuwe aanpak veel korter en voorspelbaarder.

Voor kritische componenten worden er SATs uitgevoerd bij levering. Dit betreft de secundaire kasten, de transformatoren en de MSIs. Deze SATs worden uitgevoerd door de leveranciers van de componenten, waarna ze worden gekoppeld aan het primaire/secundaire systeem. Alle andere componenten, bijv. scheiders, IO-interfaces en beveiligingsrelais, worden onder verantwoordelijkheid van de aannemer getest. Hierbij legt Enexis vast wat getest moet worden middels testcriteria en de aannemer bepaalt hoe de component getest wordt. Een bouwleider van Enexis controleert de werkzaamheden van de aannemer op basis van ervaring.

De OT-keten binnen Enexis is georganiseerd met nadruk op controle, herhaalbaarheid en scheiding van verantwoordelijkheden. De OT-kasten worden volledig afgemonteerd op locatie aangeleverd. Het installeren van software, logica en configuraties blijft nadrukkelijk in handen van Enexis, dat deze activiteiten beschouwt als een kerncompetentie en daarom niet uitbesteedt.

Aspecten die structureel en formeel getest worden zijn de bekisting en de eerste betonstorting. Een bouwkundig ontwerp wordt gemaakt door de bouwkundig aannemer en gereviseerd door Enexis. Aarding wordt getest voordat de bouwput weer wordt opgevuld en de aarddraden worden afgedekt.

De stations worden gebouwd aan de hand van een standaardontwerp op basis van typicals, i.e. standaardcomponenten. Dit reduceert de benodigde IVVQ-inspanning. Afwijkingen van de standaard worden door de opdrachtnemers gemeld aan Enexis. Omdat er gebruik wordt gemaakt van typicals, zijn eisen niet formeel vastgelegd. IVVQ vindt plaats op basis van het standaardontwerp en er wordt met vaste teams van aannemers die op elkaar zijn ingespeeld.

4.2.3 Stedin

Alliander en Enexis kunnen hun volwassen standaarden hun IVVQ-inspanning te beperken. Dit geldt niet voor Stedin, wat nog in de beginfase staat wat betreft standaardisatie. Elk project heeft een grote set eisen die afgevinkt moet worden. Stedin is ver wat betreft van traceerbaarheid van eisen. In Relatics,¹ hebben ze een hiërarchie van werkpakketten gedefinieerd die overeenkomt met de fasen in het stationsontwikkelproces. Elk werkpakket kent een verzameling eisen. Om een werkpakket af te ronden moeten alle eisen van het werkpakket en de onderliggende werkpakketten worden afgevinkt. De Relatics-omgeving is ook toegankelijk voor de opdrachtnemers van Stedin. Dit afvinken betreft o.a. het toevoegen van documentatie (door de opdrachtnemer) dat aan een eis voldaan is en goedkeuring door de leadengineer.

De testcoördinator bepaalt, samen met de commissioning engineer, wat er getest moet worden, wanneer getest moet worden en de betrokkenheid van Stedin. De commissioning engineer is betrokken bij de tests die worden uitgevoerd door de opdrachtnemer.

FATs en SATs van directieleveringen (d.w.z. materialen en goederen die door de opdrachtgever ter beschikking worden gesteld aan opdrachtnemers) worden in aanwezigheid van de commissioning engineer uitgevoerd. Bij een FAT toont de leverancier aan dat onderdelen voldoen aan specificaties en geldende normen. Na afloop worden restpunten vastgelegd en worden afspraken gemaakt hoe en wanneer aan te pakken. Bij een SAT moet een leverancier aantonen dat ook alle restpunten van de FAT zijn opgelost. Voor standaard-

componenten kan een FAT steekproefsgewijs worden gedaan en een SAT gedeeltelijk off-site.

Na de SAT wordt een component bedraad door de opdrachtnemer en worden tests uitgevoerd door de tester (software) en de inbedrijfsteller (hardware). De commissioning-engineer voert steekproefsgewijs controles uit bij deze stappen. Na succesvolle afronding worden Installatie Buiten Spanning (IBS) en Beproeving Voor Oplevering (BVG) protocollen ingevuld, waarna de OIV de gebruikerstest doet in aanwezigheid van de commissioning engineer.

De OT-software ondergaat hetzelfde IVVQ-proces als componenten van derden. Net automation wordt gebruikt om OT-tests uit te voeren. De SA-software wordt (grotendeels) off-site in een testrek getest door een testengineer. Daarna volgt een off-site FAT waarbij een commissioning engineer aanwezig is. Doel is de modules te controleren voordat deze ingebouwd. In de commissioningsfase wordt de software in combinatie met de hardware getest. Een volledige integratiecontrole wordt on-site gedaan door een tester en een inbedrijfsteller.

Het totaal aantal eisen (in Relatics) is (nog) erg groot. Een groot project kent honderden eisen. Stedin denkt het aantal eisen te kunnen reduceren door een standaard te ontwikkelen en een onderscheid te maken tussen eisen aan de standaard en van afwijkingen van de standaard. Ook is een reductie mogelijk door een onderscheid te maken tussen eisen en werkinstructies. Beide staan in Relatics, maar werkinstructies hoeven niet gevalideerd te worden.

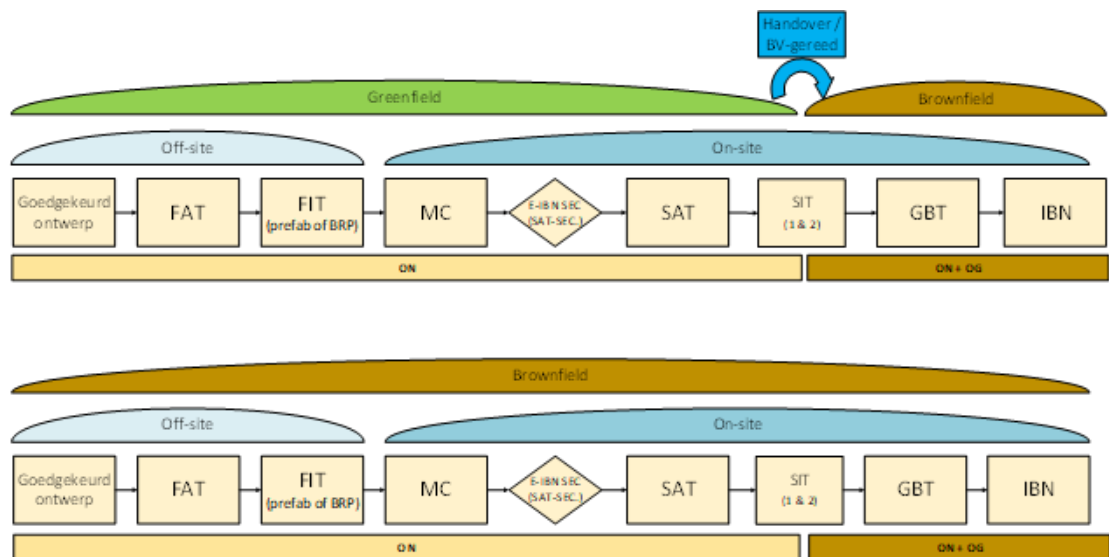
Stedin is erg risicomijdend waardoor onderdelen uitgebreid getest worden, soms zelfs meerdere keren. Het is dat duidelijk dat uitputtend testen niet houdbaar is en dat een aanpak nodig is waarbij op basis van weloverwogen keuzes de testinspanning wordt gericht op die plekken waar deze de meeste waarde toevoegt. Naast een reductie van het aantal eisen ziet Stedin daarom ook mogelijkheden om de IVVQ-inspanning te verlagen door de uitgebreidheid van de tests aan te passen aan hun waarde. Fouten met beperkt risico, i.e. de combinatie van kans van optreden en impact van optreden, hoeven minder uitgebreid getest te worden dan risicovolle fouten.

4.2.4 TenneT

TenneT lijkt qua mate en manier van standaardisatie en traceerbaarheid van eisen op Stedin. Een standaardontwerp groeit incrementeel door het te kopiëren van één project naar het volgende en verbeteringen toe te passen. Deze standaard kent een groot aantal eisen: er zijn duizenden eisen, maar niet alle eisen zijn even belangrijk.

TenneT kent een testproces (zie Figuur 4.4) waarbij de verantwoordelijkheid voornamelijk ligt bij de opdrachtnemer (ON).⁷ Opdrachtgever (OG) TenneT is (mede) verantwoordelijk voor de Site-integratietest (SIT), de gebruikerstest (GBT) en de inbedrijfname (IBN).

⁷ Er wordt een onderscheid gemaakt tussen greenfield- en brownfieldprojecten, maar dit onderscheid heeft geen invloed op de verantwoordelijkheid van IVVQ-activiteiten.



Figuur 4.4: TenneT-testproces (bron: TenneT)

TenneT's huidige test- en validatieactiviteiten zijn sterk afhankelijk van project-specifieke testplannen en het oordeel van een kleine groep zeer ervaren commissioning engineers en testcoördinatoren. Deze schaarse expertise schaalt niet mee met de programmagrootte, terwijl de diversiteit in stationsontwerpen — met name in het 110/150 kV-domein — hergebruik beperkt en leidt tot een hoge en variabele testinspanning.

In de voorbereiding op de workshop gaf TenneT aan dat het testregime bovendien sterk is ingericht op component niveau SAT-/SIT-testen, voorgeschreven vanuit interne kwaliteitsprocessen. Deze aanpak leidt bij grote en integrale projecten tot veel herhaling, hoge administratieve lasten en het risico dat testen een afvinkactiviteit wordt in plaats van een doelmatige kwaliteitsborging.

Een belangrijk knelpunt is het gebrek aan hergebruik van testbewijs. Testen die eerder zijn uitgevoerd, bijvoorbeeld in de fabriek of op softwareniveau, worden later vaak opnieuw gedaan, ook wanneer er geen inhoudelijke wijziging is. Dit geldt met name voor software, terwijl deze zich juist leent voor vroege en eenmalige verificatie. Door het ontbreken van expliciete standaardisatie, testautomatisering en gesloten testmanagementsystemen blijft vertrouwen in eerder testwerk beperkt.

Eisen worden gespecificeerd in Relatics⁷ en deze moeten worden afgevinkt middels IVVQ-documenten die in Meridian⁸ worden opgeslagen. Per veld moeten 20 SAT-/SIT-documenten worden ingevuld. Aangezien een typisch HS-station 21 velden heeft, moeten er honderden soortgelijke documenten worden ingevuld. Hierbij worden regelmatig kopieerfouten gemaakt, waardoor het systeem correct gerealiseerd is, maar de documentatie incorrect.

Er zijn ideeën om het aantal eisen te reduceren door de FAT van typicals af te schaffen. Ook risico-gebaseerd testen is een mogelijkheid om de IVVQ-inspanning te verlagen. AI-tooling wordt gebruikt om redundante en conflicterende eisen te identificeren. Ook is het bevriezen van de software na de FAT een mogelijkheid om de IVVQ-inspanning te verlagen: nu moet de software opnieuw getest worden. Nu worden tests herhaald, omdat er mogelijk wijzigingen zijn doorgevoerd en men de eerste testresultaten niet vertrouwd.

⁸ <https://www.acruent.com/products/meridian>

Het testproces door TenneT verschilt per project. Er is veel diversiteit, (nog) beperkte standaardisatie en geen uniforme kwaliteitsborging: testplannen worden gedefinieerd per project. Het proces verschilt ook per testcoördinator. Sommige testcoördinatoren lezen alle testdocumentatie volledig, terwijl andere hun aandacht richten op de door de opdrachtnemer gerapporteerde afwijkingen.

Het testen van de stationssoftware gebeurt zowel off-site als on-site. In het Bay Replacement Program (BRP) wordt tooling van Omicron³ gebruikt, o.a. StationScout.⁶ Binnen dit programma wordt ook het automatisch testen van besturingen ontwikkeld. Het compleet functioneel testen van besturingskasten bevindt zich in de pilot-fase. Voor deze pilot heeft TenneT door Strukton⁹ een PLC-achtige IO-box laten ontwikkelen om te kunnen werken met hogere voedingsspanningen. In de pilot wordt momenteel de testsoftware ontwikkeld door TenneT zelf.

In de workshop van 13 januari presenteerde TenneT hun visie op testen. Deze is gebaseerd op standaardisatie van componenten (modulair bouwen zoals in BRP) en van de bijbehorende tests (modulair testen). Dit moet de werklust van de ervaren commissioning engineers reduceren. Ook wordt in de visie ingezet op automatisering van systeemontwikkeling (“configure-to-order”) en testautomatisering.

4.2.5 Vergelijking

Op basis van workshop 2 en de één-op-één interviews met de netbeheerders hebben de twee vergelijkingstabellen samengesteld. De eerste tabel, Tabel 4.1, vergelijkt de IVVQ van standaarden voor HS/MS-stations door de netbeheerders en de tweede tabel, Tabel 4.2, de IVVQ van de project-specifieke configuraties van dergelijke stations. Hierbij moet in acht worden genomen dat de standaarden van Alliander en Enexis heel volwassen zijn en dat de standaarden van Stedin en TenneT nog (grotendeels) in ontwikkeling zijn. Om deze reden zijn de laatste twee kolommen in Tabel 4.1 leeggelaten.

Tabel 4.1: Vergelijking van netbeheerders wat betreft IVVQ van standaarden voor HS/MS-stations.

	Alliander	Enexis	Stedin	TenneT
Wie voert IVVQ-activiteiten uit?	Alliander	Enexis		
Welke vormen van verificatie worden gebruikt?	Reviews	Reviews		
Wat is de onderliggende specificatie voor IVVQ?	Nu: Domeinkennis Toekomst: Eisen	Domeinkennis		
Hoe uitgebreid is de IVVQ?	Volledig/uitgebreid	Volledig/uitgebreid		

⁹ <https://strukton.nl/>

Tabel 4.2: Vergelijking van netbeheerders wat betreft IVVQ van specifieke HS/MS-stationsconfiguraties.

	Alliander	Enexis	Stedin	TenneT
Wie voert IVVQ-activiteiten uit?	Alliander, Bouwkundig aannemer, Leveranciers van bedrijfsleveringen	Opdrachtnemers, Enexis, Leveranciers van bedrijfsleveringen	Hoofdpdracht-nemer, Stedin	Opdrachtnemer, TenneT
Welke vormen van verificatie worden gebruikt?	Inspecties, Tests on-site	Inspecties, Tests on-site	Inspecties, Tests on-site	Inspecties, Tests on-site
Wat is de onderliggende specificatie voor IVVQ?	Standaard-specificatie en eisen van afwijkingen	Standaard-specificatie	Eisen	Eisen
Hoe uitgebreid is de IVVQ?	Risico-gebaseerd	Risico-gebaseerd	Volledig/uitgebreid	Afhankelijk van testengineer
Wat is het aantal specificaties/eisen?	Onbekend	Enkele	Honderden	Duizenden
Wat zijn de drukste fasen wat betreft IVVQ?	Commissioning (SAT)	Commissioning	Inbedrijfname	FAT, SAT, SIT

In paragrafen 4.2.1, 4.2.2, 4.2.3 en 4.2.4 hebben we de IVVQ-activiteiten van Alliander, Enexis, Stedin en TenneT beschreven. Deze paragrafen laten zien dat er veel overeenkomsten zijn wat betreft de technieken en tools die gebruikt worden voor IVVQ. Ook wat betreft de projectdossiers zijn er vele overeenkomsten. Daarom hebben we deze aspecten niet opgenomen in de tabellen.

De vergelijking in Tabel 4.1 en Tabel 4.2 laat een duidelijk verschil zien wat betreft IVVQ tussen Alliander en Enexis aan de ene kant en Stedin en TenneT aan de andere kant. Door het gebruik van standaarden door Alliander en Stedin kunnen zijn hun IVVQ-inspanning beperken door wat zij “risico-gebaseerd testen” noemen. Deze risico-gebaseerde aanpak legt de nadruk bij de IVVQ-activiteiten op de kritieke componenten en de afwijkingen van de standaard. Een dergelijke aanpak reduceert de IVVQ-inspanning. Dit is mogelijk omdat de standaard geverifieerd en gevalideerd is in eerdere projecten. Figuur 4.1 ondersteunt deze observatie: het laat zien dat IVVQ in verschillende fasen gebeurt op basis van verschillende ontwerpartefacten. Het gebruik van gevalideerde standaard-eisen en een gevalideerd standaardontwerp verlegt de IVVQ-inspanning grotendeels buiten het project, omdat deze standaardartefacten eerder geverifieerd en gevalideerd zijn.

Een tweede duidelijk verschil is ook tussen Enexis en Alliander aan de ene kant en Stedin en TenneT aan de andere kant. Enexis heeft gekozen voor een informele, pragmatische aanpak van stationsontwikkeling door gebruik te maken van specificaties en niet van eisen. Alliander beperkt het aantal eisen in projecten door deze te beperken tot afwijkingen van de standaard. Eisen zijn een natuurlijke bron om testresultaten aan te koppelen. De IVVQ-inspanning in projecten van Alliander, Stedin en TenneT is bedoeld om eisen op gestructureerde wijze “af te vinken”. Dit geeft een natuurlijke traceerbaarheid tussen eisen en de uiteindelijke realisatie. De grote uitdaging ligt in het grote aantal eisen in projecten van i.h.b. Stedin en TenneT: er moeten honderden of zelf duizenden eisen worden afgevinkt, een zeer bewerkelijk en foutgevoelig proces, zelfs met ondersteuning van tooling zoals Relatics.¹ Daarmee is de keuze van Enexis en Alliander een pragmatische. De traceerbaarheid van hun IVVQ-activiteiten

loopt via de (nog) informele standaarden. Bij Alliander wordt deze geformaliseerd middels eisen; Enexis is niet bezig zijn standaarden te formaliseren middels eisen.

Samenvattend kunnen we concluderen dat het gebruik van een standaard de IVVQ-inspanning op twee manieren verkleint. Enerzijds is een standaard een handvat om risico-gebaseerde IVVQ te doen: d.w.z. de inspanning richt zich op kritieke componenten en afwijkingen van de standaard. Anderzijds biedt een standaard de mogelijkheid het aantal eisen drastisch te verlagen, omdat de eisen van de standaard niet meegenomen hoeven te worden in het project als deze de standaard toepast.

4.3 Conclusies en aanbevelingen

In dit hoofdstuk hebben we gekeken naar de IVVQ-activiteiten van de Nederlandse netbeheerders. Dit is één van de bottlenecks in de realisatie van HS/MS-elektriciteitsstations. Een vergelijking van de IVVQ van de verschillende netbeheerders toont dat er veel overeenkomst is wat betreft gebruik van IVVQ-methoden en -tools. Het grote verschil zit in het gebruik van een standaardstationsontwerp. Met een, in de praktijk geverifieerd en gevalideerd, standaardontwerp, kan de IVVQ-inspanning gereduceerd worden tot afwijkingen van de standaard en de controle dat de standaard correct is gerealiseerd.

Verder versnelt een risico-gebaseerde aanpak door alleen de meest risicovolle componenten te verifiëren en valideren. Deze aanpak wordt door alle netbeheerders toegepast, maar op een ad hoc manier. Individuele engineers bepalen op basis van hun ervaring welke tests uitgevoerd moeten worden. Hier is mogelijk ruimte voor verbetering. Risico-gebaseerd testen (Engels: Risk-based testing) [27] [28] is een de facto standaard in de systeemontwikkeling, omdat ook daar geen tijd is voor een volledige systeemverificatie en -validatie. Een belangrijk verschil met de praktijk bij de netbeheerders is de integrale aanpak die risico-gebaseerd testen voorschrijft. Risico's moeten niet eenmalig worden bepaald door één individu, maar moeten gedurende het gehele realisatieproces (en daarna) worden bijgehouden op basis van kennis vanuit de gehele organisatie. Zo'n meer gestructureerde aanpak zou kunnen leiden tot een verkorting van het realisatieproces omdat alle risico's worden beschouwd.

Aanbevelingen

1. Ontwikkel een sectorbreed IVVQ-raamwerk.

De interviews laten zien dat de netbeheerders grotendeels dezelfde testmethoden gebruiken, maar verschillende processen, terminologie, rollen en documentatie hanteren. Dit beperkt kennisuitwisseling, uitwisselbaarheid van personeel en samenwerking met marktpartijen. Een aanbeveling betreft de gezamenlijke ontwikkeling van een sectorbreed IVVQ-raamwerk zo mogelijk onder regie van Netbeheer Nederland, inclusief:

- uniforme definities van FAT, SAT, SIT, PAT, commissioning en validatie;
- uniforme rollen en verantwoordelijkheden;
- generieke testniveaus;
- minimumeisen voor testdocumentatie;
- uniforme acceptatiecriteria.

Dit vergroot de overdraagbaarheid van kennis en capaciteit tussen organisaties, versterkt de samenwerking met marktpartijen en ondersteunt de gezamenlijke ontwikkeling van tooling, opleidingen en testfaciliteiten.

2. Verplaats IVVQ-activiteiten van projecten naar standaarden.

Alliander en Enexis behalen een belangrijk deel van hun efficiëntie doordat standaardontwerpen al gevalideerd zijn en projecten vooral afwijkingen testen. Stedin en TenneT testen nog

vaker op projectniveau. Een aanbeveling, i.h.b. voor Stedin en TenneT, is de introductie van een expliciete productlijn- of standaardisatieaanpak waarbij standaardstations en standaardbouwstenen éénmalig uitgebreid worden gevalideerd. Vervolgens wordt in projecten alleen nog getest:

- wat afwijkt van de standaard;
- wat een hoog risico heeft;
- wat door integratie nieuw gedrag vertoont.

Dit reduceert de benodigde IVVQ-inspanning per project, verkort doorlooptijden en maakt schaarse engineerings- en testcapaciteit beschikbaar voor nieuwe projecten.

3. Maak risico-gebaseerd testen expliciet en reproduceerbaar.

Alle netbeheerders passen in de praktijk al een vorm van risico-gebaseerd testen toe, maar de selectie van tests is vaak afhankelijk van individuele ervaren engineers. Een derde aanbeveling betreft de gezamenlijke ontwikkeling van een risicomethodiek gebaseerd op: (1) risico = kans × impact, (2) veiligheidsimpact, (3) leveringszekerheid, (4) OT-security en (5) herstelbaarheid. Gebruik deze methodiek systematisch in ontwerp, verificatieplanning, SAT/SIT-planning en acceptatiebesluiten.

Dit levert een reproduceerbare en aantoonbaar verdedigbare teststrategie op, vermindert de afhankelijkheid van individuele expertise en verhoogt de effectiviteit van beschikbare testcapaciteit.

4. Maak OT-testen eerder mogelijk via digitale testomgevingen.

Verschillende netbeheerders noemen testlabs, Omicron StationScout,⁶ softwaretesten tegen simulaties, virtuele omgevingen om hun OT-software te verifiëren en valideren. Aanbeveling is een gezamenlijke investering in OT-labs, digitale tweelingen (Engels: digital twins), simulatieomgevingen en hardware-in-the-loop (HIL) testfaciliteiten. Het doel van een dergelijke investering is het opsporen van integratie- en validatieproblemen opsporen vóór de installatie op locatie.

Hierdoor worden integratieproblemen eerder ontdekt, neemt het aantal SAT/SIT-herhalingen af en worden doorlooptijd, inzet van schaarse specialisten en uitvoeringskosten verlaagd.

5 Samenwerking in de keten

"Contracten geven structuur aan de samenwerking; vertrouwen bepaalt wat partijen samen kunnen bereiken."

— geparafraseerd naar Blomqvist [29] en Smolders [30]

De uitbreiding van de Nederlandse energie-infrastructuur overstijgt de capaciteit van individuele organisaties. Geen enkele netbeheerder, aannemer, ingenieursorganisatie of leverancier kan de benodigde opschaling zelfstandig realiseren. Versnelling vraagt daarom niet alleen om duidelijke contractuele afspraken, maar ook om langdurige samenwerkingsrelaties. Juist bij modulair bouwen wordt zichtbaar dat contracten de samenwerking kunnen organiseren, maar dat ketenprestaties uiteindelijk worden bepaald door het vermogen van partijen om gezamenlijk te leren, verbeteren en innoveren.

Deze verschuiving verandert niet alleen de technische werkwijze, maar ook de aard van de samenwerking. De uitdaging is niet langer uitsluitend het efficiënt realiseren van afzonderlijke projecten, maar het ontwikkelen van een modulaire bouwproductielijn, waarin een continue stroom van projecten voorspelbaar, herhaalbaar en schaalbaar kan worden gerealiseerd. Dat vraagt om een balans tussen duidelijke contractuele afspraken enerzijds en vertrouwen, wederzijds begrip en gezamenlijke langetermijnontwikkeling anderzijds. Naarmate standaardisatie en modulariteit verder worden doorgevoerd, neemt het belang toe van stabiele samenwerkingsrelaties waarin partijen gezamenlijk verantwoordelijkheid nemen voor het functioneren en de continue verbetering van de gehele keten.

Samenwerking in de keten wordt daarmee een strategische randvoorwaarde voor modulair bouwen. De centrale vraag is niet alleen hoe werkzaamheden worden uitbesteed, maar vooral hoe netbeheerders en ketenpartners gezamenlijk kunnen komen tot een stabiele productielijn, gedeelde standaarden, voorspelbare vraag en een gezamenlijke verbetercyclus.

Dit hoofdstuk onderzoekt de rol van samenwerking bij de verdere ontwikkeling en opschaling van modulair bouwen. Paragraaf 5.1 introduceert een conceptueel kader voor samenwerking in de keten. Vervolgens worden in paragrafen 5.2 en 5.3 de inzichten uit workshops en gesprekken met netbeheerders besproken. Paragraaf 5.4 analyseert de resultaten van gesprekken met opdrachtnemers, met aandacht voor standaardisatie, ketenintegratie, informatie-uitwisseling, voorspelbaarheid en capaciteit. Het hoofdstuk sluit af met conclusies en aanbevelingen voor het versterken van samenwerking als randvoorwaarde voor verdere standaardisatie, modulariteit en opschaling van de energie-infrastructuur.

5.1 Conceptueel kader voor samenwerking in de keten

Structurele samenwerking in de keten is een belangrijke randvoorwaarde voor succesvolle opschaling van modulair bouwen. Voor de realisatie van energie-infrastructuur werken netbeheerders samen met ingenieursbureaus, aannemers, leveranciers, installateurs en verdere ketenpartners. Naarmate meer oplossingen, standaarden en bouwstenen worden hergebruikt, neemt de noodzaak toe om ontwerpkeuzes, interfaces, eisen en werkwijzen gezamenlijk te ontwikkelen en te beheren. Hierdoor wordt effectieve samenwerking een steeds

belangrijkere succesfactor voor standaardisatie, hergebruik en verdere opschaling. Het vermogen om de groeiende realisatieopgave tijdig, veilig en doelmatig uit te voeren wordt daarvoor in toenemende mate bepaald door de kwaliteit van de samenwerking binnen de keten.

Deze samenwerking staat onder druk door onder meer verschillen in eisen, werkwijzen en ontwerpkeuzes tussen netbeheerders, beperkte voorspelbaarheid van de vraagontwikkeling en een beperkte mogelijkheid om ervaringen uit projecten structureel te benutten. Tegelijkertijd werd door zowel netbeheerders als opdrachtnemers benadrukt dat verdere harmonisatie, meer continuïteit in opdrachten en vroegtijdige betrokkenheid van ketenpartners belangrijke voorwaarden zijn om kwaliteit, productiviteit en uitvoerbaarheid te verbeteren.

Een belangrijk kenmerk van modulaair bouwen is dat oplossingen, standaarden en interfaces niet eenmalig worden ontwikkeld, maar gedurende langere tijd worden toegepast en doorontwikkeld. Dit vraagt om samenwerking die verder gaat dan de realisatie van individuele projecten. Netbeheerders en ketenpartners hebben gezamenlijk belang bij het beheersbaar houden van variatie, het verbeteren van standaarden en het hergebruik van opgedane kennis en ervaringen.

5.1.1 Van projectuitvoering naar gezamenlijke ontwikkeling van modulaire oplossingen

Traditioneel zijn infrastructurele projecten georganiseerd rondom afzonderlijke opdrachten, aanbestedingen en contracten. In een modulaire bouwstrategie ontstaat echter een verschuiving naar herhaalbare oplossingen, standaardbouwstenen en productlijnen die over meerdere projecten worden toegepast. Hierdoor verandert ook de rol van ketenpartners. Leveranciers en aannemers worden niet langer uitsluitend gezien als uitvoerende partijen, maar als deelnemers aan de ontwikkeling, uitvoering en verdere verbetering van de productielijn.

Binnen veel netbeheerders zijn raamovereenkomsten en langdurige samenwerkingsrelaties met opdrachtnemers inmiddels de norm. De uitdaging ligt daardoor niet primair in het organiseren van samenwerking, maar in het effectiever benutten ervan. Modulaair bouwen vraagt om een werkwijze waarin oplossingen, standaarden en kennis niet projectmatig worden ontwikkeld, maar over projecten heen worden hergebruikt en continu verbeterd.

Deze ontwikkeling kan worden weergegeven als een verschuiving tussen niveaus van samenwerking, zie Tabel 5.1.

Tabel 5.1: Vier niveaus van samenwerking.

Niveau	Focus	Relatie
Uitvoering	Realisatie van projectscope	Opdrachtgever-opdrachtnemer
Optimalisatie	Betere projectuitvoering	Meedenken binnen projecten
Standaardisatie	Gezamenlijke ontwikkeling van standaarden en werkwijzen	Langdurige samenwerking
Ontwikkeling van modulaire oplossingen	Continue verbetering van configureerbare oplossingen, standaarden, interfaces en processen	Strategisch partnerschap

Deze vier niveaus van samenwerking zijn afgeleid uit inzichten uit Product Line Engineering [31] [32] en literatuur over interorganisationale samenwerking [33]. Zij beschrijven de ontwikkeling van projectgerichte realisatie naar gezamenlijke ontwikkeling en continue verbetering van herbruikbare oplossingen. De begrippen standaardisatie en modulariteit zijn conceptueel verschillend, en op verschillende niveaus in Tabel 5.1 geplaatst. Waar standaardisatie vaak wordt geassocieerd met het beperken van variatie, richt modulariteit zich op het creëren van herbruikbare bouwstenen die in verschillende configuraties kunnen worden toegepast. Daarbij vormen gestandaardiseerde interfaces een belangrijk mechanisme om hergebruik en gecontroleerde variabiliteit tegelijkertijd mogelijk te maken.

Voor netbeheerders betekent deze ontwikkeling ook een andere benadering van uitbesteding en samenwerking met marktpartijen. Waar opdrachtnemers traditioneel vooral werden ingezet voor de uitvoering van afzonderlijke projecten, vraagt een modulaire bouwstrategie om langduriger samenwerking gericht op de ontwikkeling, toepassing en verbetering van gestandaardiseerde oplossingen.

Daarbij is het van belang bewust te bepalen welke kennis, verantwoordelijkheden en besluitvorming binnen de netbeheerder worden georganiseerd en welke bij marktpartijen worden belegd. Het doel is daarbij niet maximale uitbesteding of maximale interne uitvoering, maar een samenhangende verdeling van rollen en competenties waarbij geen hiaten ontstaan in verantwoordelijkheden en onnodige overlap wordt voorkomen. Modulair bouwen vraagt daarom om een heldere verdeling van verantwoordelijkheden, waarbij de netbeheerder regie houdt op architectuur, standaarden, eisen en langetermijnontwikkeling, terwijl marktpartijen hun expertise inzetten voor ontwerputwerking, realisatie en continue verbetering. Hierdoor ontstaat een complementair samenwerkingsmodel waarin de kennis en competenties van alle partijen optimaal worden benut.

Deze verschuiving vergroot ook het belang van gezamenlijk leren. Ervaringen uit projecten moeten niet uitsluitend worden benut voor het betreffende project, maar juist worden ingezet om standaarden, werkwijzen en modulaire oplossingen over projecten heen continu te verbeteren. Dit vraagt om langdurige samenwerkingsstructuren waarin kennis, ervaring en verbeteringen behouden blijven en verder worden ontwikkeld. Continuïteit van teams, vroegtijdige betrokkenheid van ketenpartners en het hergebruik van opgedane kennis vergroten het collectieve leervermogen van de keten en vormen daarmee een belangrijke basis voor verdere standaardisatie, modulariteit en opschaling.

5.1.2 Sleutelfactoren voor succesvolle samenwerking

Succesvolle samenwerking ontstaat niet vanzelf. Zij wordt bepaald door een aantal onderliggende factoren die richting geven aan gedrag, besluitvorming en interactie tussen partijen. Onderzoek van Smolders [30], gebaseerd op ervaringen bij ProRail, en later verder ontwikkeld in de Cooperante-benadering [34] identificeert zes samenhangende sleutelfactoren voor succesvolle samenwerking (zie Tabel 5.2). Deze factoren vormen het fundament onder vertrouwen, voorspelbaarheid en gezamenlijk probleemoplossend vermogen.

De gesprekken met netbeheerders en opdrachtnemers bevestigen het belang van deze zes sleutelfactoren. Veel van de ervaren knelpunten, zoals wisselende uitgangspunten, beperkte voorspelbaarheid van de vraag, onvoldoende rolvastheid, verschillen in werkwijzen, gebrekkige informatie-uitwisseling en een te projectgebonden toepassing van Systems Engineering, zijn uiteindelijk terug te voeren op tekortkomingen in één of meerdere van deze factoren. Omgekeerd blijken deze factoren bepalend voor het opbouwen van vertrouwen, het benutten van

schaarse expertise en het gezamenlijk verbeteren van standaarden, werkwijzen en modulaire oplossingen.

Tabel 5.2: Sleutelfactoren voor succesvolle samenwerking [30].

Sleutelfactor	Korte omschrijving
Communicatie	Informatie wordt tijdig, transparant en wederkerig gedeeld. Open communicatie voorkomt misverstanden, maakt verwachtingen expliciet en ondersteunt gezamenlijk probleemoplossend vermogen.
Gedeeld doel	Partijen handelen vanuit een gezamenlijke opgave en gedeeld succes. Dit voorkomt sub-optimalisatie en stimuleert samenwerking over organisatiegrenzen heen.
Rentmeesterschap	Partijen gaan zorgvuldig om met tijd, capaciteit, budget, kwaliteit en risico's vanuit het belang van de totale opgave. Beslissingen zijn gericht op langetermijnwaarde in plaats van lokaal voordeel.
Normen en waarden	Een gedeelde basis van professionaliteit, integriteit, betrouwbaarheid, veiligheid en transparantie. Deze waarden zorgen voor voorspelbaar gedrag en vormen het fundament onder vertrouwen.
Professionele vaardigheden	Mensen beschikken over de kennis, competenties en vaardigheden om effectief samen te werken. Dit omvat technische expertise, communicatie, Systems Engineering, conflictbeheersing en verwachtingsmanagement.
Gelijkwaardigheid en wederkerigheid	Partijen behandelen elkaar als gelijkwaardige partners en nemen wederzijdse belangen serieus. Evenwicht in invloed, verantwoordelijkheden en risico's versterkt vertrouwen en samenwerking.

Daarnaast laten de gesprekken zien dat voorspelbaarheid een belangrijke randvoorwaarde vormt voor effectieve samenwerking. Voorspelbare werkstromen, stabiele uitgangspunten en tijdige besluitvorming maken het mogelijk om capaciteit op te bouwen, kennis vast te houden en gezamenlijk te investeren in standaardisatie, modulariteit en continue verbetering. Naarmate de sector meer afhankelijk wordt van schaarse competenties, langdurige samenwerkingsverbanden en herbruikbare oplossingen, worden deze sleutelfactoren steeds belangrijker. Zij vormen daarmee niet alleen de basis voor succesvolle samenwerking, maar ook voor de uitvoerbaarheid, schaalbaarheid en het collectieve leervermogen van de gehele keten.

5.1.3 Samenwerking is meer dan een contractuele afspraak

Contracten blijven noodzakelijk om verantwoordelijkheden, prestaties, risico's en besluitvorming expliciet vast te leggen. De ervaringen van zowel netbeheerders als opdrachtnemers laten echter zien dat verdere contractuele detaillering niet automatisch leidt tot betere samenwerking. Juist wanneer projecten worden gekenmerkt door onzekerheid, innovatie en continue verbetering ontstaat behoefte aan afstemming, vertrouwen en gezamenlijke probleemoplossing.

Contractvormen. Verschillende contractvormen bieden daarbij verschillende samenwerkingsprikkeles. Waar **UAV** [35] vooral is gericht op uitvoering van een grotendeels uitgewerkt ontwerp, verschuift **UAV-GC** [36] verantwoordelijkheden voor ontwerp en uitvoering gedeeltelijk naar de markt. Raamovereenkomsten en strategische partnerschappen creëren meer continuïteit en daarmee meer mogelijkheden voor gezamenlijke verbetering, kennisopbouw en standaardisatie. Ook internationale vormen zoals het **New Engineering Contract (NEC)**

[37] zijn expliciet ontworpen om samenwerking, transparantie en vroegtijdige risicobeheersing tussen opdrachtgever en opdrachtnemer te stimuleren.

De praktijk laat zien dat de contractvorm op zichzelf niet bepalend is voor succes. Belangrijker is in hoeverre contractuele afspraken ruimte bieden voor gezamenlijke verbetering, transparantie, kennisdeling en langetermijnsamenwerking. Contracten kunnen verantwoordelijkheden, bevoegdheden en risico's vastleggen, maar zij vervangen niet de factoren die effectieve samenwerking mogelijk maken. Onderzoek van Blomqvist et al. [29] laat zien dat duurzame samenwerking niet uitsluitend afhankelijk is van formele afspraken, maar van een evenwicht tussen contractering en onderling vertrouwen. Vanuit dit perspectief ondersteunen contracten de samenwerking, terwijl factoren als communicatie, gedeelde doelen, wederkerigheid en rentmeesterschap uiteindelijk bepalen hoe effectief partijen gezamenlijk kunnen presteren.

Risicomanagement en risicoverdeling. Een terugkerend spanningsveld binnen infrastructurele projecten betreft de verdeling van risico's. Het verleggen van risico's naar opdrachtnemers kan op korte termijn leiden tot schijnbare beheersbaarheid, maar resulteert vaak in hogere risicopremies, meer contractuele discussies, minder ruimte voor innovatie en een grotere kans op meerwerk. Binnen een modulaire bouwstrategie verschuift de aandacht daarom van risicoverschuiving naar gezamenlijke risicobeheersing. Naarmate ontwerpen, interfaces, standaarden en werkwijzen verder worden geharmoniseerd, neemt de onzekerheid af en kunnen risico's beter voorspelbaar, beheersbaar en evenwichtiger worden verdeeld over de keten. Dit sluit aan bij de eerder beschreven sleutelfactoren voor samenwerking: effectieve communicatie, gedeelde doelen, wederkerigheid en vertrouwen vormen niet alleen voorwaarden voor goede samenwerking, maar ook voor het gezamenlijk beheersen van risico's en onzekerheden binnen de keten.

5.2 Netbeheerderdilemma's bij verdere ketenintegratie

De gesprekken met netbeheerders laten zien dat verdere standaardisatie, hergebruik en opschaling van de energie-infrastructuur niet alleen vragen om technische veranderingen, maar ook om intensievere samenwerking met de keten. Naarmate oplossingen vaker worden hergebruikt, standaarden gezamenlijk worden ontwikkeld en marktpartijen langduriger betrokken zijn, neemt de onderlinge afhankelijkheid tussen netbeheerders en ketenpartners toe. Deze ontwikkeling brengt nieuwe vraagstukken met zich mee rond sturing, standaardisatie, kennisontwikkeling en rolverdeling. Hoewel deze dilemma's zich per organisatie anders manifesteren, vertonen zij duidelijke overeenkomsten en raken zij direct aan de manier waarop modulair bouwen in de praktijk vorm krijgt.

Een eerste dilemma betreft de balans tussen **sturing en samenwerking**. Netbeheerders dragen verantwoordelijkheid voor veiligheid, betrouwbaarheid, kwaliteit en investeringsbeslissingen. Daardoor bestaat een natuurlijke behoefte aan beheersing, duidelijke verantwoordelijkheden en transparante besluitvorming. Tegelijkertijd vraagt de verdere ontwikkeling van modulaire oplossingen om meer afstemming, kennisdeling en gezamenlijke probleemoplossing met ketenpartners.

Een tweede dilemma betreft de balans tussen **uniformiteit en diversiteit**. Standaardisatie en harmonisatie worden gezien als belangrijke hefboomen voor versnelling en hergebruik. Tegelijkertijd bestaan er verschillen in regionale omstandigheden, organisatiestructuren, werkwijzen en historische keuzes. Hierdoor ontstaat een voortdurende afweging tussen interne

optimalisatie en sectorbrede afstemming. Deze verschillen hebben niet alleen betrekking op technische standaarden, maar ook op de wijze waarop netbeheerders samenwerken met opdrachtnemers. Voor marktpartijen betekent dit dat vergelijkbare werkzaamheden regelmatig binnen verschillende processen, rollenmodellen en verwachtingen moeten worden uitgevoerd. Hierdoor ontstaat spanning tussen organisatie-specifieke werkwijzen en de wens tot verdere harmonisatie binnen de sector.

Een derde dilemma betreft de balans tussen **projectoptimalisatie en gezamenlijke ontwikkeling**. Binnen netbeheerders zijn raamovereenkomsten en langdurige samenwerkingsrelaties met marktpartijen inmiddels gemeengoed geworden. De uitdaging verschuift daarmee van het organiseren van samenwerking naar het vergroten van de effectiviteit ervan. Modulair bouwen vraagt niet alleen om langdurige relaties, maar ook om een werkwijze waarin oplossingen, standaarden, kennis en ervaringen structureel over projecten heen worden ontwikkeld, toegepast en verbeterd. Hierdoor verschuift de aandacht van samenwerking binnen afzonderlijke projecten naar gezamenlijke verbetering van werkwijzen, standaarden en herbruikbare oplossingen.

Een vierde dilemma betreft de balans tussen **eigen regie en externe expertise**. Naarmate standaardisatie en modulariteit toenemen, ontstaat behoefte aan een heldere verdeling van rollen, expertise en besluitvorming tussen netbeheerders en marktpartijen. Daarbij gaat het niet alleen om de uitvoering van werkzaamheden, maar ook om de ontwikkeling, toepassing en doorontwikkeling van oplossingen en werkwijzen.

Deze dilemma's maken duidelijk dat samenwerking niet uitsluitend een organisatorisch of contractueel vraagstuk is. Zij raken direct aan de manier waarop partijen gezamenlijk invulling geven aan standaardisatie, hergebruik, kennisontwikkeling en continue verbetering. In de volgende paragrafen worden deze vraagstukken verder uitgewerkt op basis van de gesprekken met opdrachtnemers en de gezamenlijke workshops.

5.3 De grootste uitdagingen zijn niet technisch maar organisatorisch

Om inzicht te krijgen in de samenwerking binnen de keten zijn gesprekken gevoerd met ingenieursbureaus, aannemers en systeemintegratoren die actief zijn voor meerdere netbeheerders. Hoewel de scope primair gericht was op HS/MS-stations, zijn waar relevant ook ervaringen vanuit LS-projecten meegenomen. De betrokken partijen werken vaak gelijktijdig voor verschillende netbeheerders en beschikken daardoor over een uniek vergelijkingsperspectief op verschillen en overeenkomsten binnen de sector.

Uit de gesprekken blijkt dat veel knelpunten niet primair technisch van aard zijn. Opdrachtnemers zien vooral verschillen in werkwijzen, besluitvorming, informatie-uitwisseling, rolopvattingen en de toepassing van Systems Engineering. Deze verschillen beperken het hergebruik van kennis, standaarden en ervaringen tussen projecten en organisaties en leiden tot extra afstemming, interpretatieverschillen en herstelwerk. Tegelijkertijd benadrukken vrijwel alle partijen dat verdere harmonisatie en standaardisatie belangrijke kansen bieden om kwaliteit, productiviteit en voorspelbaarheid te vergroten.

Vertrouwen als basis voor effectieve samenwerking. Het onderwerp vertrouwen kwam in vrijwel alle gesprekken terug als een belangrijke succesfactor. Opdrachtnemers geven aan dat vertrouwen niet zozeer ontstaat door contractuele afspraken, maar vooral door voorspelbaarheid in samenwerking, continuïteit van teams en transparantie in besluitvorming. Vaste

contactpersonen, stabiele projectteams en een consistent werkproces maken het mogelijk om kennis op te bouwen en sneller gezamenlijk besluiten te nemen. Omgekeerd leiden frequente wisselingen van projectleiders, lead engineers of besluitvormers regelmatig tot verlies van context, herinterpretatie van afspraken en vertragingen.

Daarnaast wordt vroegtijdige betrokkenheid van opdrachtnemers gezien als een belangrijke versterker van vertrouwen. Marktpartijen geven aan dat maakbaarheid, uitvoerbaarheid en risico's effectiever kunnen worden besproken wanneer zij al in vroege projectfasen betrokken worden. Hierdoor ontstaat meer ruimte voor gezamenlijke probleemoplossing en worden knelpunten eerder zichtbaar.

Communicatie en informatie-uitwisseling. Communicatie wordt door opdrachtnemers gezien als één van de belangrijkste voorwaarden voor succesvolle samenwerking. Vooral korte lijnen, duidelijke aanspreekpunten en een voorspelbaar overlegritme worden als positief ervaren. Deze elementen dragen niet alleen bij aan een efficiënter proces, maar versterken ook het onderlinge vertrouwen tussen partijen.

Tegelijkertijd worden verschillende belemmeringen genoemd. Informatie-uitwisseling verloopt in vroege projectfasen nog regelmatig via losse documenten, e-mails en project-specifieke werkwijzen. Ook verschillen communicatieritmes, projectsystemen en besluitvormingsprocessen tussen organisaties en regio's. Hierdoor ontstaat onduidelijkheid over de status van informatie, verantwoordelijkheden en besluiten. Opdrachtnemers benadrukken daarom het belang van een gezamenlijke informatiebasis, duidelijke communicatiestructuren en meer uniforme werkwijzen voor informatie-uitwisseling. Deze behoefte sluit aan bij de bevindingen uit het IXCESS-project [38] rondom harmonisatie van digitale samenwerking en informatie-uitwisseling.

Professionele vaardigheden en samenwerking. Naast technische expertise blijken professionele samenwerkingsvaardigheden een belangrijke succesfactor. Opdrachtnemers waarderen de aanwezige technische kennis binnen de sector, maar signaleren tegelijkertijd verschillen in Systems Engineering competenties, werkwijzen en besluitvorming tussen organisaties en teams. Daardoor zijn projectresultaten soms sterk afhankelijk van individuele personen of lokale werkwijzen.

Met name vaardigheden rondom afstemming, verwachtingsmanagement, interfacebeheer en gezamenlijke besluitvorming worden genoemd als cruciaal voor succesvolle samenwerking. Opdrachtnemers geven aan dat Systems Engineering soms te veel wordt ervaren als een document- en reviewproces, terwijl de grootste meerwaarde juist ligt in het expliciteren van keuzes, beheersen van interfaces en ondersteunen van gezamenlijke besluitvorming. Zij benadrukken het belang van een consistente en proportionele toepassing van Systems Engineering: voldoende structuur om samenwerking en besluitvorming te ondersteunen, zonder te vervallen in onnodige bureaucratie. Volgens de geïnterviewden ontstaat de meeste waarde wanneer technische expertise wordt gecombineerd met het vermogen om effectief samen te werken over disciplines en organisatiegrenzen heen.

Tabel 5.3 vat samen welke factoren ketenbreed goed functioneren, welke knelpunten worden ervaren en welke verbeteringen door de geïnterviewde partijen als noodzakelijk worden gezien. De tabel laat zien dat de grootste uitdagingen niet liggen in het ontbreken van samenwerkingsrelaties, maar in de effectiviteit waarmee bestaande samenwerkingsvormen functioneren. Langdurige relaties, raamovereenkomsten en vaste teams zijn bij veel netbeheerders inmiddels gemeengoed geworden. De aandacht verschuift daardoor naar de kwaliteit van de samenwerking binnen deze structuren.

Tabel 5.3: Synthese van bevindingen uit interviews met opdrachtnemers per sleutelfactor.

Sleutelfactor	Wat werkt goed? (ketenbreed)	Wat belemmert? (ketenbreed)	Wat is nodig? (ketenbreed)
1. Communicatie	Korte lijnen; Vaste aanspreekpunten; Ritmische afstemming	Ad-hoc communicatie; Late inrichting project informatiesystemen; Document-gedreven reviews	Vast communicatie-ritme; één kanaal; Modelgebaseerd samenwerken
2. Gedeeld doel	Gezamenlijke focus op veiligheid, maakbaarheid, planning	Interne NB-prioriteiten, eilandvorming, late wijzigingen	Eén gedeeld BO/VO-startpunt; Gezamenlijke prioritering & risicoanalyse
3. Rentmeesterschap	Repeteerbare bouwstenen verlagen kosten en verhogen kwaliteit	Piek-dip-piek uitvragen; Veel rework door instabiel BO, VO	Portfolio-uitvraag; Stabiele BO/VO-kwaliteit; Gedeeld risico-management
4. Normen & waarden	Openheid, professionaliteit, integriteit, veiligheid	Onvoorspelbaarheid (late info, PL-wissels); Focus op compliance i.p.v. probleemoplossing	Transparantie over onzekerheden; Fouten bespreekbaar maken
5. Professionele vaardigheden	Sterke techniekteams; Gebruik BIM/EPLAN/... versnellen	Verschil in SE-kennis; Onduidelijke besluitvorming; Nieuwe NB-teams	Pragmatische SE; Gedeelde werkrituelen; Vaardigheden in overleg & conflict
6. Gelijkwaardigheid & wederkerigheid	Bouwteam-achtige samenwerking; Heldere rolafbakening	Top-down interpretatie; Geen ruimte voor alternatieven; Veel rolwisselingen	Vroege co-ontwikkeling; Expliciete rolverdeling; Wederkerige afspraken

Over alle gesprekken heen blijken drie factoren steeds terug te komen: vertrouwen, communicatie en professionele vaardigheden. Deze factoren beïnvloeden elkaar sterk. Transparante communicatie versterkt vertrouwen, vertrouwen vergroot de ruimte voor gezamenlijke probleemoplossing en professionele vaardigheden bepalen in belangrijke mate hoe effectief partijen omgaan met onzekerheden, wijzigingen en verschillen in belangen. Daarmee vormen zij een belangrijke basis voor verdere standaardisatie, hergebruik en opschaling van modulair bouwen binnen de energie-infrastructuur.

5.4 Vijf bottlenecks voor verdere opschaling van modulair bouwen

Uit de gesprekken met opdrachtnemers blijkt dat de grootste verbeterkansen niet zozeer liggen in afzonderlijke technische oplossingen, maar in het verder versterken van voorspelbaarheid, standaardisatie, samenwerking en informatie-uitwisseling. De bevindingen in deze paragraaf zijn gebaseerd op acht interviews met opdrachtnemers en zijn geanalyseerd en geclusterd rond terugkerende thema's die door meerdere partijen zijn genoemd.

Hoewel ervaringen en werkwijzen tussen netbeheerders aanzienlijk verschillen, kwamen in de gesprekken duidelijke patronen naar voren. Deze patronen hebben betrekking op de manier waarop projecten worden voorbereid, gestandaardiseerd en uitgevoerd, en beïnvloeden

gezamenlijk de mogelijkheden om modulair bouwen verder op te schalen. De beschreven aandachtspunten moeten daarom worden gezien als veelvoorkomende observaties en verbeterkansen vanuit het perspectief van opdrachtnemers, waarbij de mate waarin deze al zijn ingevuld per netbeheerder kan verschillen.

De vijf bottlenecks worden in deze paragraaf stapsgewijs uitgewerkt. Voor de eerste vier bottlenecks wordt steeds ingegaan op het belang van het onderwerp voor modulair bouwen, de belangrijkste observaties uit de gesprekken, de implicaties voor verdere standaardisatie en opschaling, en voorbeelden van best practices uit de sector. De vijfde bottleneck, rondom planning, capaciteit en voorspelbaarheid, heeft een meer overkoepelend karakter en brengt verschillende eerder beschreven thema's samen vanuit het perspectief van uitvoerbaarheid en opschaalbaarheid van de keten.

5.4.1 Stabieler en consistent proces vóór ontwerp & bouw

Waarom is dit belangrijk?

Opdrachtnemers geven aan dat veel vertragingen, herstelwerkzaamheden en inefficiënties hun oorsprong vinden in de fasen voorafgaand aan detailengineering en uitvoering. Onduidelijke uitgangspunten, wijzigingen in eisen, onvolledige informatie en late besluitvorming leiden regelmatig tot herontwerp en verstoringen later in het proces.

Observaties:

- Uitgangspunten, scope en randvoorwaarden zijn bij aanvang van projecten niet altijd voldoende stabiel.
- Verschillen tussen netbeheerders in de kwaliteit en invulling van BO- en VO-fasen maken het voor marktpartijen lastig om uniforme werkwijzen en processen toe te passen.
- De kwaliteit en volledigheid van BO- en VO-uitwerkingen varieert van project tot project, waarbij problemen verschuiven naar latere fasen.
- Vergunningen, gronduitgifte en externe afhankelijkheden leiden regelmatig tot late wijzigingen in ontwerp en planning.
- Projectsystemen, documentstructuren en samenwerkingsomgevingen worden vaak pas ingericht nadat het project al is gestart.
- Besluitvorming over wijzigingen of afwijkingen kent niet altijd een voorspelbaar proces of doorlooptijd.
- Rollen, verantwoordelijkheden en verwachtingen zijn in vroege projectfasen niet altijd expliciet vastgelegd.

Wat betekent dit voor modulair bouwen?

Modulair bouwen vraagt om stabiele uitgangspunten, repeteerbare processen en tijdige besluitvorming. Wanneer fundamentele keuzes tijdens het project blijven veranderen, neemt de hoeveelheid projectspecifieke engineering toe en worden de voordelen van standaardisatie en hergebruik beperkt.

Best practices in de sector:

- Rolling forecasts van twee jaar of langer, gekoppeld aan raamovereenkomsten.
- Langetermijnportfolio's van 10-15 jaar voor capaciteitsplanning.
- Minimaliseren van projectspecifieke afwijkingen op standaarden en eisen sets.

- Vooraf vastgelegde rolverdelingen via bijvoorbeeld RASCI-tabellen¹⁰ en standaard procesafspraken.
- Gezamenlijke validatie van uitgangspunten in BO- en VO-fasen.

5.4.2 Versterk standaardisatie en modulair bouwen verder

Waarom is dit belangrijk?

Vrijwel alle geïnterviewde partijen zien verdere standaardisatie als één van de belangrijkste hefbomen voor productiviteitsverbetering. Repeteerbaarheid verlaagt engineeringinspanning, verkleint foutkansen en vergroot de voorspelbaarheid van uitvoering.

Observaties:

- Er bestaan nog aanzienlijke verschillen tussen regio's, projecten en organisaties in ontwerpen, componentkeuzes en werkwijzen.
- Ook bij vergelijkbare stations moet daardoor regelmatig opnieuw worden geëngineerd.
- Variatie ontstaat niet alleen door technische verschillen, maar ook door interpretatieverschillen van standaarden.
- Niet alleen componenten, maar ook interfaces tussen producten, disciplines, organisaties en informatiesystemen kunnen worden gestandaardiseerd.
- Variatie ontstaat vaak ook doordat bestaande standaarden verschillend worden geïnterpreteerd of toegepast.
- Standaarden worden niet altijd consequent toegepast of beheerd.
- Parallele versies van typicals, bibliotheken en standaarden leiden tot extra afstemming en uitzonderingen.
- Verschillende afdelingen optimaliseren soms vanuit verschillende doelstellingen, waardoor afwijkingen op standaarden ontstaan.

Wat betekent dit voor modulair bouwen?

Modulariteit wordt niet alleen bepaald door het bestaan van standaarden, maar vooral door de consistente toepassing ervan. Variatie door interpretatie kan dezelfde negatieve impact hebben als variatie in het ontwerp zelf. Zonder bestuurlijk mandaat, capaciteit en onderhoud verliest standaardisatie geleidelijk haar effectiviteit. Begrippen als standaardisatie, modulariteit, configuratie en variabiliteit niet altijd eenduidig worden gebruikt. Een gedeeld begrippenkader kan helpen om discussies over modulariteit, standaardisatie en hergebruik te verduidelijken. Daarbij werd benadrukt dat standaardisatie niet alleen betrekking heeft op componenten, maar ook op interfaces, processen en informatie-uitwisseling. Hierdoor kan ruimte ontstaan voor gecontroleerde variabiliteit binnen een gestandaardiseerd geheel.

Best practices in de sector:

- Een beperkte set standaard bouwstenen met gecontroleerde variabiliteit.
- Vaste releasecycli voor standaarden, bibliotheken en typicals.
- Standaardisatieteams met expliciet mandaat en capaciteit.
- KPIs gericht op hergebruik, standaardisatie en afwijkingsbeheer.
- Structurele betrokkenheid van opdrachtnemers bij de ontwikkeling van standaarden.

¹⁰ <https://www.rascimethode.nl/nl/rasci>

5.4.3 Ketenintegratie versterken: vaste teams, gezamenlijke planning, pragmatische SE

Waarom is dit belangrijk?

Volgens de geïnterviewde opdrachtnemers wordt de kwaliteit van de samenwerking tussen netbeheerders en marktpartijen een steeds belangrijkere succesfactor naarmate standaardisatie en hergebruik toenemen.

Observaties:

- Kennis en context gaan regelmatig verloren bij overgangen tussen BO/VO, DO en UO.
- Projecten worden vaak verdeeld over verschillende contracten, teams of organisaties, waardoor overdrachten noodzakelijk blijven.
- Opdrachtnemers worden formeel vroeg betrokken, maar in de praktijk vaak pas later actief betrokken bij ontwerpkeuzes.
- Wisselingen van projectleiders, lead engineers en andere sleutelrollen verstoren continuïteit en vertrouwen.
- Systemen, processen en teams sluiten niet altijd aan op de projectovergangen.
- Systems Engineering wordt verschillend geïnterpreteerd en toegepast, variërend van sterk procesmatig tot zeer pragmatisch.
- Verschillen tussen netbeheerders in rollen, verantwoordelijkheden en besluitvormingsprocessen bemoeilijken het hergebruik van ervaringen tussen projecten.
- Opdrachtnemers moeten regelmatig schakelen tussen verschillende vormen van samenwerking, ook wanneer de technische werkzaamheden vergelijkbaar zijn.

Wat betekent dit voor modulair bouwen?

Modulair bouwen profiteert van continuïteit, herhaling en kennisopbouw. Iedere overdracht, teamwisseling of herinterpretatie verkleint de repeteerbaarheid van het proces en vermindert het leereffect tussen projecten.

Best practices in de sector:

- Vaste samenwerking tussen dezelfde partners binnen geografische gebieden.
- Regionale kernteams die meerdere projecten achter elkaar uitvoeren.
- Vroege betrokkenheid van aannemers bij maakbaarheid en uitvoerbaarheid.
- Expliciete afspraken over rollen, verantwoordelijkheden en besluitvorming.
- Een pragmatische toepassing van Systems Engineering die samenwerking ondersteunt in plaats van belast.

5.4.4 Digitale werkwijzen en informatie-uitwisseling harmoniseren

Waarom is dit belangrijk?

Samenwerking tussen organisaties wordt in toenemende mate ondersteund door digitale systemen, modellen en data-uitwisseling. Geïnterviewde opdrachtnemers geven aan dat verschillen in digitale werkwijzen stelselmatig leiden tot extra afstemming, lagere productiviteit en langere doorlooptijden.

Observaties:

- Opdrachtnemers werken met uiteenlopende systemen, tools en informatieomgevingen.
- Naamgeving, metadata, documentstructuren en modelopbouw verschillen vaak per regio of project.
- Het vereiste detailniveau van modellen, tekeningen en opleverdossiers is niet overal eenduidig.
- Informatie-uitwisseling verloopt nog regelmatig via documenten in plaats van modellen.
- Brownfield-projecten zijn bijzonder gevoelig voor inconsistenties in data en revisiebeheer.
- Door verschillen in tools en werkwijzen ontstaan extra conversies, controles en herstelwerkzaamheden.
- Verschillen in informatie-uitwisseling tussen netbeheerders leiden tot extra project-specifieke afspraken en maken het moeilijker om digitale hulpmiddelen, standaarden en automatisering ketenbreed toe te passen.

Wat betekent dit voor modulair bouwen?

Repeteerbaarheid vereist niet alleen fysieke standaardisatie, maar ook consistente digitale representaties van producten, eisen, interfaces en projectinformatie. Digitale versnippering vermindert de voordelen van standaardisatie en verhoogt de kans op fouten en interpretatieverschillen. Harmonisatie van informatie-uitwisseling kan worden gezien als een vorm van standaardisatie van interfaces tussen organisaties. Hierdoor ontstaat een betere basis om kennis, modellen en oplossingen tussen projecten en partijen te hergebruiken.

Best practices in de sector:

- Uniforme documentstructuren en overdrachtsmomenten.
- Eenduidige afspraken over deliverables en detailniveau.
- Modelgebaseerde samenwerking in plaats van documentgebaseerde overdracht.
- Gestandaardiseerde naamgeving en metadata.
- Eén gedeelde informatieomgeving voor projectinformatie en besluitvorming.

5.4.5 Planning en capaciteit beter voorspelbaar maken

Een terugkerend thema in vrijwel alle gesprekken met opdrachtnemers is de behoefte aan meer voorspelbaarheid in planning, capaciteit en werkstromen. Waar de voorgaande paragrafen zich richtten op samenwerking, standaardisatie en informatie-uitwisseling, richt dit thema zich op de mate waarin de keten in staat is om werkzaamheden gelijkmatig, voorspelbaar en efficiënt te organiseren.

Opdrachtnemers geven aan dat de huidige realisatieopgave niet langer wordt beperkt door de beschikbaarheid van opdrachten, maar steeds vaker door de beschikbaarheid van gekwalificeerde mensen en specialistische kennis. Dit vraagt om een stabiele en voorspelbare werkstroom, zodat marktpartijen kunnen investeren in capaciteit, opleiding, digitalisering en verdere professionalisering. Tegelijkertijd zorgen wisselende prioriteiten, onduidelijke uitgangspunten, late wijzigingen en schommelingen in de projectportefeuille regelmatig voor verstoringen in de planning.

De analyse laat zien dat voorspelbaarheid niet door één maatregel wordt bepaald, maar ontstaat uit een combinatie van stabiele projectvoorbereiding, consistente besluitvorming, tijdige informatievoorziening, continuïteit van teams en een meer portfolio-georiënteerde benadering

van capaciteitsplanning. Tabel 5.4 vat de belangrijkste behoeften en onderliggende argumenten samen die door opdrachtnemers zijn genoemd.

Tabel 5.4: Behoeften rondom planning, capaciteit en voorspelbaarheid uit interviews met opdrachtnemers.

Onderwerp	Behoefte	Rationalisatie	Opdrachtnemer citaten
1. Vroege & stabiele plannings-informatie	Duidelijke, volledige en stabiele BO-, VO-uitgangspunten vóór start ontwerp	Onzekerheid in BO, VO leidt tot rework, plannings-turbulentie en foutkans.	<i>Uitgangspunten wijzigen laat... vertraging; Input komt te laat. Duizenden eisen doorzoeken.</i>
2. Voorspelbare doorlooptijden	Realistische faseringen (BO, VO / DO/UO) inclusief doorlooptijd	Teams kunnen geen capaciteit plannen bij wisselend ritme.	<i>BO, VO-kwaliteit inconsistent. Besluitvorming duurt lang.</i>
3. Portfolio-gebaseerde capaciteitsplanning	Overzicht werkstroom op kwartaal/jaarbasis	Markt kan alleen stabiele teams bouwen bij voorspelbaar werkaanbod.	<i>We moeten steeds opnieuw opstarten door wisselende prioriteiten. Repeteerbare opdrachten nodig.</i>
4. Stabiele NB projectteams	Minder wisselingen van projectleiders en engineers	Wisselingen veroorzaken re-interpretatie en vertraging.	<i>Veel wisselingen in Lead Engineer ... lastig; Nieuwe mensen steeds inwerken.</i>
5. Vroege betrokkenheid aannemers in BO, VO op uitvoering	Samen BO, VO-validatie & maakbaarheid toetsen	Maakbaarheid en uitvoeringscomplexiteit worden nu vaak pas in DO zichtbaar → planning stort in.	<i>Aannemers willen eerder meedenken.</i>
6. Snelle besluitvorming	Kortere beslislijnen en vaste Go/No-Go's	Besluiten over afwijkingen, wijzigingen, vergunningen of technische keuzes nemen vaak te lang → blockers voor planning & inzet.	<i>Soms moeten we wachten tot iemand tijd heeft om iets te beoordelen. (NB) Interne afstemming duurt te lang.</i>
7. Gelijkmatische projectuitvraag	Ritmische portfolio-uitvraag	Pieken en dalen forceren inefficiënte opschaling	<i>Meerdere projecten tegelijk → capaciteit lastig. Er zit veel variatie in de projecten die tegelijk lopen.</i>

Best practices in de sector:

- Generieke eisenets waarbij projecten alleen projectspecifieke aanvullingen toevoegen en waarbij gedurende een project één versie als uitgangspunt wordt gehanteerd.
- Vaste releasecycli voor standaarden en werkwijzen via coördinatiegroepen en standaardisatie-overleggen.
- Raamovereenkomsten gecombineerd met rolling forecasts en afspraken over compensatie bij grote afwijkingen in het werkpakket.
- Toewijzing van projecten op basis van capaciteit, geografische clustering en langdurige samenwerking met vaste partners.
- Vroegtijdige betrokkenheid van engineeringpartijen bij vergunningen, maakbaarheid en ontwerpkeuzes.
- Expliciete afspraken over rollen, verantwoordelijkheden, besluitvorming en verwachtingen tussen opdrachtgever en opdrachtnemer.
- Periodiek portfolio-overleg met marktpartijen en meerjarige projectprognoses die inzicht geven in de verwachte werkstroom.

De opbrengst van de gesprekken laat zien dat planning en capaciteit niet los kunnen worden gezien van de andere samenwerkingsthema's die in dit hoofdstuk zijn besproken. Veel van

de genoemde capaciteitsproblemen blijken uiteindelijk voort te komen uit onzekerheid, variatie en verstoringen eerder in het proces. Onstabiele uitgangspunten, late wijzigingen, onduidelijke besluitvorming of wisselingen in teams hebben direct invloed op de voorspelbaarheid van de uitvoering.

Opvallend is dat de behoefte van opdrachtnemers verder gaat dan alleen een grotere hoeveelheid werk. Minstens zo belangrijk is de voorspelbaarheid van dat werk. Marktpartijen geven aan dat stabiele werkstromen, repeteerbare opdrachten en meerjarige portfolio-informatie essentieel zijn om specialistische kennis op te bouwen, mensen op te leiden en investeringen in standaardisatie en digitalisering rendabel te maken. Dit wordt door de netbeheerders erkend en deze proberen hierop te sturen.

Daarnaast laten de gesprekken zien dat veel succesvolle praktijken al binnen de sector aanwezig zijn. Voorbeelden zoals rolling forecasts, geografische clustering, vaste projectteams, langdurige raamovereenkomsten en periodieke afstemming met marktpartijen tonen aan dat verbeteringen mogelijk zijn zonder fundamenteel andere contractvormen of organisatiestructuren. De grootste uitdaging ligt vooral in het consistent toepassen en verder harmoniseren van dergelijke werkwijzen.

Hiermee vormt voorspelbaarheid een verbindend thema tussen de eerdere observaties rondom samenwerking, standaardisatie, ketenintegratie en informatie-uitwisseling. Naarmate uitgangspunten stabiel worden, standaarden consequenter worden toegepast en samenwerking meer continuïteit krijgt, ontstaat ook een betere basis voor efficiënte capaciteitsplanning en verdere opschaling van de realisatie van energie-infrastructuur.

5.5 Conclusies en aanbevelingen

Samenwerking in de keten bepaalt in toenemende mate in welke mate modulair bouwen kan bijdragen aan de benodigde opschaling van de energie-infrastructuur. Hoewel raamovereenkomsten en langdurige samenwerkingsrelaties inmiddels breed zijn ingevoerd, zijn veel processen bij netbeheerders nog sterk project- en aanbestedingsgericht georganiseerd.

Hierdoor worden kennis, ervaringen en verbeteringen onvoldoende tussen projecten, netbeheerders en marktpartijen hergebruikt. Tegelijkertijd wordt de sector geconfronteerd met een groeiend tekort aan gekwalificeerd personeel en schaarse specialistische kennis, waardoor de onderlinge afhankelijkheid tussen netbeheerders en marktpartijen verder toeneemt.

Deze situatie weerspiegelt fundamentele afwegingen waarmee netbeheerders worden geconfronteerd: tussen projectspecifieke optimalisatie en standaardisatie, tussen autonomie en ketenintegratie, en tussen korte-termijnresultaten en gezamenlijke langetermijnontwikkeling. Verdere opschaling van modulair bouwen wordt niet primair beperkt door technische vraagstukken, maar door het vermogen van de sector om deze afwegingen gezamenlijk te organiseren.

De literatuur, interviews en analyses in dit hoofdstuk wijzen in dezelfde richting. De literatuur beschrijft samenwerking, harmonisatie en kennisdeling als belangrijke voorwaarden voor schaalbaarheid, terwijl de interviews laten zien dat juist hier in de praktijk nog belangrijke verbeterkansen liggen. De aanbevelingen bouwen voort op deze gezamenlijke inzichten. Alleen door kennis, ervaring en capaciteit sneller te delen kunnen standaarden, werkwijzen en modulaire oplossingen sneller worden verbeterd, gevalideerd en opgeschaald. In de woorden van Joost van Gemeren [39]: *“De toekomst van het energiesysteem wordt niet gebouwd door één organisatie, maar door een sector die leert samenwerken als één systeem.”*

Aanbevelingen

1. Breng meer discipline, samenhang én afstemming in de keten.

Versterk de samenwerking tussen engineering, assetmanagement, contractmanagement, inkoop, realisatie en onderhoud. Richt processen, rollen, besluitvorming en verantwoordelijkheden strakker in.

Verschillen in werkwijzen, verantwoordelijkheden en besluitvorming leiden tot vertragingen, herstelwerk en lokale optimalisaties. Meer samenhang vergroot de projectkwaliteit, betrouwbaarheid en voorspelbaarheid van de uitvoering.

2. Versnel harmonisatie van oplossingen, werkwijzen en informatie-uitwisseling.

Ontwikkel standaarden, interfaces en modulaire oplossingen gezamenlijk en harmoniseer tegelijkertijd processen, werkwijzen en informatie-uitwisseling tussen netbeheerders en marktpartijen. Beperk onnodige variatie tussen projecten, regio's en organisaties en richt verbeteringen op herbruikbare en opschaalbare oplossingen die over projecten heen waarde leveren.

Verschillen in oplossingen, processen en informatie-uitwisseling leiden tot extra engineering, meer afstemming en hogere faalkosten. Meer harmonisatie verhoogt productiviteit, verkort doorlooptijden en verbetert kwaliteit en voorspelbaarheid.

3. Versterk ketenintegratie, voorspelbaarheid en strategische samenwerking.

Benut raamovereenkomsten nadrukkelijker voor vaste teams, vroegtijdige betrokkenheid, gezamenlijke ontwikkeling en continue verbetering. Vergroot daarnaast de voorspelbaarheid van vraagontwikkeling, portfolio's, werkstromen en besluitvorming. Verschuif de focus van projectuitvoering naar langdurige samenwerking en gezamenlijke capaciteitsopbouw.

Hoewel langdurige samenwerkingsrelaties inmiddels breed aanwezig zijn, blijft de samenwerking vaak projectgericht. Meer ketenintegratie, voorspelbaarheid en strategische samenwerking vergroten het hergebruik van kennis, versterken onderling vertrouwen en maken effectiever gebruik van schaarse expertise mogelijk.

4. Versterk sectorbrede samenwerking tussen netbeheerders en marktpartijen.

Werk gezamenlijk aan standaardisatie, modulariteit, Systems Engineering, informatie-uitwisseling en competentieontwikkeling. Bundel schaarse kennis, expertise en capaciteit en organiseer snellere leer- en verbetercycli.

Veel vergelijkbare vraagstukken worden nog parallel worden opgelost, terwijl personeel en specialistische kennis schaars zijn. Door kennis, expertise en verbeteringen gezamenlijk te ontwikkelen, kan de sector sneller leren, verbeteren en opschalen.

6 Doelmatige eisen / eisensets

“Waarde = Functie / Kosten (van middelen)”

geparafraseerd Value Engineering principe van Lawrence D. Miles [40]

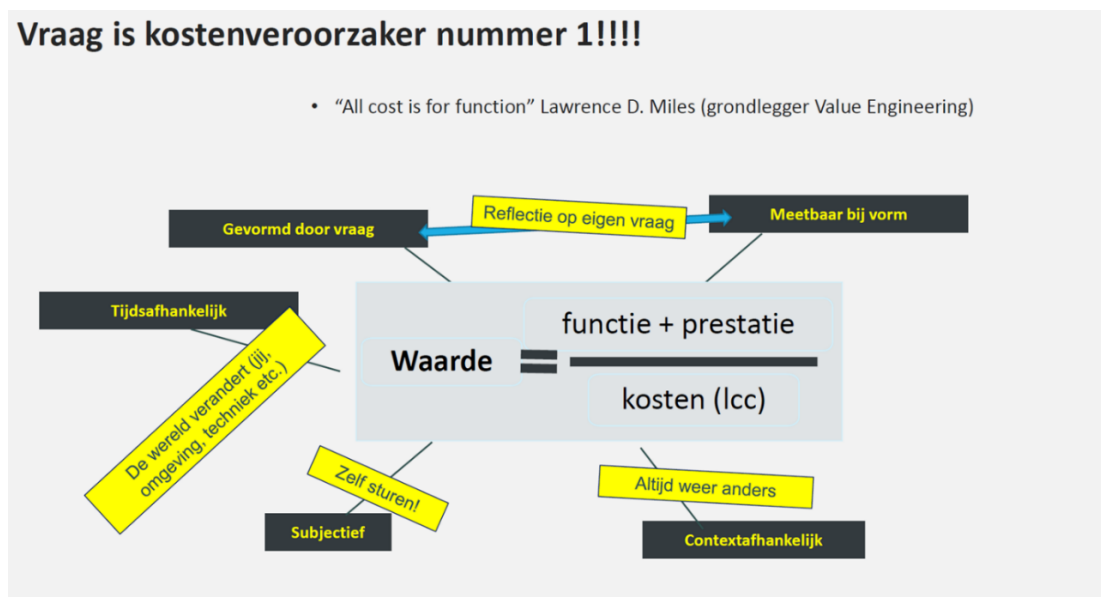
Doelmatige eisen zijn een belangrijke hefboom om de uitvoeringsopgave van de netbeheerders beheersbaar te maken. Eisen, specificaties en verificatieverplichtingen bepalen hoeveel engineering, toetsing, documentatie, afstemming en discussie in projecten ontstaat. Daarmee beïnvloeden zij direct de inzet van schaarse expertise, de voorspelbaarheid van doorlooptijden en de betaalbaarheid van de energietransitie. Een van de thema sessies van FuESSE25 stond daarom in het teken van doelmatige eisen en eisensets: hoe specificeren netbeheerders wat echt nodig is, zonder onnodige bureaucratie, verificatielast of ketencomplexiteit te veroorzaken? Daarbij is gekeken naar het proces waarmee eisen en specificaties worden samengesteld voor Basisontwerp, Voorontwerp, Detailontwerp en Uitvoeringsontwerp, én naar de inhoudelijke impact van eisen op kosten, doorlooptijd, risico's, ontwerp vrijheid en uitvoerbaarheid.

Het uitgangspunt was “precies genoeg” specificeren: eisen, specificaties en verificatieverplichtingen moeten aantoonbaar waarde toevoegen en op het juiste niveau worden vastgelegd. Doelmatige eisen gaan daarmee verder dan de kwaliteit van afzonderlijke eisen. Zij bepalen ook hoe eisen worden gebruikt binnen Systems Engineering, hoe ontwerpkeuzes en verificatiebewijs worden belegd in standaarden en productlijnen, en tot welke diepgang informatie in de keten moet worden beschreven, uitbesteed en geverifieerd.

Dit hoofdstuk werkt dit uit in drie stappen. Paragraaf 6.1 introduceert het conceptuele kader voor doelmatige eisen en eisensets. Paragraaf 6.2 toetst dit kader aan de praktijk van de netbeheerders. Paragraaf 6.3 vat de conclusies samen en formuleert aanbevelingen. De governance-inrichting die hiervoor nodig is, wordt verder uitgewerkt in hoofdstuk 7; dit hoofdstuk beperkt zich tot de gevolgen voor eisen, specificaties en verificatie.

6.1 Conceptueel kader voor doelmatige eisen en eisensets

Doelmatige eisen en eisensets zijn eisen en specificaties die precies genoeg zijn: zij realiseren de benodigde functionaliteit, prestaties, veiligheid en levenscycluswaarde, terwijl onnodige complexiteit, verificatielast, variabiliteit en kosten worden vermeden. Doelmatigheid gaat daarmee niet alleen over de inhoud van afzonderlijke eisen, maar ook over de omvang, structuur en toepassing van de totale eisen set en de wijze waarop deze binnen projecten, over projecten heen en in de keten wordt gebruikt. Eisen moeten alleen vragen wat waarde heeft en niet overvragen [41] [42].



Figuur 6.1: Value Engineering (bron [43]).

De discussies binnen FuESSE25 laten zien dat netbeheerders steeds vaker worden geconfronteerd met een spanningsveld tussen enerzijds beheersing van risico's en kwaliteit, en anderzijds de noodzaak tot versnelling, schaalbaarheid, standaardisatie en doelmatigheid. Naarmate modulair bouwen, standaardisatie en Product Line Engineering verder worden toegepast, verschuift de aandacht van het opstellen van steeds uitgebreidere projectspecifieke eisen sets naar het expliciet beheren van welke eisen daadwerkelijk waarde toevoegen en op welk niveau deze het beste kunnen worden vastgelegd.

6.1.1 Doelmatigheid als balans tussen waarde, risico en kosten

Het begrip doelmatigheid wordt in dit rapport niet geïnterpreteerd als kostenminimalisatie. Een oplossing is pas doelmatig wanneer de gerealiseerde waarde in verhouding staat tot de inspanning, kosten, risico's en doorlooptijd die nodig zijn om deze waarde te realiseren [44] [45]. Deze gedachte sluit aan bij Value Engineering, Lean Systems Engineering en de internationale literatuur over Requirements Engineering. Daarin wordt benadrukt dat eisen niet uitsluitend moeten worden beoordeeld op technische juistheid, maar ook op hun bijdrage aan het realiseren van behoeften, capaciteiten, prestaties en levenscyclusdoelen. Een eis is daarmee niet automatisch waardevol omdat deze technisch wenselijk is; de eis moet aantoonbaar bijdragen aan een gewenste functie, risicoreductie, betrouwbaarheid, veiligheid, onderhoudbaarheid of andere expliciete organisatiedoelstellingen [46] [47].

Vanuit dit perspectief ontstaat doelmatigheid door expliciete afwegingen tussen:

- gewenste functionaliteit en prestaties;
- veiligheid, betrouwbaarheid en beschikbaarheid;
- risico's en onzekerheden;
- investerings- en levenscycluskosten;
- uitvoerbaarheid en doorlooptijd;
- standaardisatie en flexibiliteit.

Hierdoor verschuift de discussie van de vraag "Is deze eis technisch correct?" naar de vraag "Levert deze eis voldoende waarde op ten opzichte van de kosten en complexiteit die zij veroorzaakt?"

6.1.2 Twee dimensies van doelmatigheid van eisen

De analyse van de literatuur en de discussies binnen FuESSE25 laten zien dat doelmatigheid vanuit twee complementaire dimensies moet worden beschouwd.

Doelmatigheid van individuele eisen

De eerste dimensie richt zich op de inhoud van afzonderlijke eisen. Hier staat de vraag centraal of een eis daadwerkelijk noodzakelijk is om een behoefte, risico, prestatie- of kwaliteitsdoel te realiseren. De INCOSE Guide to Writing Requirements [47] en ISO/IEC/IEEE 29148 [41] benadrukken dat eisen noodzakelijk, ondubbelzinnig, verifieerbaar en consistent moeten zijn. Eisen die geen aantoonbare bijdrage leveren aan systeemdoelen of die impliciet ontwerpkeuzes voorschrijven zonder duidelijke rechtvaardiging, verminderen de doelmatigheid van een systeemontwikkelingstraject.

Een doelmatige eis:

- ondersteunt een expliciete behoefte of capability;
- draagt aantoonbaar bij aan waardecreatie of risicobeheersing;
- is verifieerbaar;
- beperkt ontwerp vrijheid niet onnodig;
- voorkomt toekomstige levenscyclusproblemen.

Doelmatigheid van de eisenset als geheel

De tweede dimensie richt zich op de omvang en inrichting van de totale specificatie. Veel kosten, vertragingen en verificatie-inspanningen ontstaan niet door individuele eisen, maar door de optelsom van honderden of duizenden eisen, standaarden, verificaties en documentatieverplichtingen. Vanuit Requirements Engineering wordt dit beschouwd als een vorm van organisatorische complexiteit die alleen gerechtvaardigd is wanneer zij aantoonbaar waarde toevoegt [44].

Een doelmatige eisenset:

- bevat geen overbodige of redundante eisen;
- maakt maximaal gebruik van bestaande normen en standaarden;
- voorkomt projectspecifieke herhaling;
- ondersteunt standaardisatie en hergebruik;
- houdt verificatie- en documentatielast proportioneel;
- blijft beheersbaar gedurende de volledige levenscyclus.

6.1.3 Doelmatige Systems Engineering

Systems Engineering biedt het kader om doelmatigheidsafwegingen expliciet en navolgbaar te maken, maar moet daarbij breder worden opgevat dan eisenbeheer. In het ontwerpproces worden behoeften en eisen gebruikt als *design input*: zij beschrijven welke functies, prestaties, randvoorwaarden, risico's en levenscyclusdoelen moeten worden gerealiseerd. Het ontwerp en de bijbehorende specificaties vormen vervolgens de *design output*: zij beschrijven hoe het systeem wordt opgebouwd en welke gekozen oplossing moet worden gerealiseerd. Dit onderscheid is essentieel, omdat verificatie verschillend wordt ingericht afhankelijk van het niveau waarop wordt uitbesteed. ISO/IEC/IEEE 29148 [41] en de INCOSE Needs and Requirements Manual [42] benadrukken dat eisen alleen moeten worden vastgelegd

wanneer zij nodig zijn voor besluitvorming, contractering, ontwerpsturing of verificatie; niet iedere behoefte, ontwerpkeuze of werkwijze hoeft dus als eis te worden geformuleerd.

Wanneer een netbeheerder een opdrachtnemer vraagt om zelf een ontwerp te maken, zijn eisen nodig om de ontwerpvrijheid te begrenzen en later te kunnen verifiëren of het ontwerp aan de beoogde functies, prestaties en randvoorwaarden voldoet. Wanneer de netbeheerder daarentegen een station laat realiseren op basis van een al gespecificeerd en vastgesteld ontwerp, is het niet doelmatig om dezelfde onderliggende eisen opnieuw als projectspecifieke eisenset uit te besteden. In dat geval ligt de nadruk op configuratiecontrole en verificatie van conformiteit: is het station gebouwd zoals ontworpen en gespecificeerd? De verificatie richt zich dan primair op het aantonen dat de gerealiseerde oplossing overeenkomt met het ontwerp, inclusief relevante afwijkingen, interfaces en acceptatiecriteria.

Voor doelmatige eisen en eisensets is daarom een scherp onderscheid nodig tussen *eisen* en *ontwerp/specificaties*. Eisen beschrijven wat het systeem moet bereiken of waaraan het moet voldoen; ontwerp en specificaties beschrijven de gekozen oplossing. Wanneer deze categorieën door elkaar lopen, groeit de eisenset onnodig, neemt de verificatielast toe en wordt uitbesteding minder helder. Doelmatige eisen vragen daarom niet alleen om goede requirements engineering, maar ook om expliciete ontwerp-governance, architectuursturing, contracteringskeuzes en levenscyclusdenken.

6.1.4 Doelmatige Product Line Engineering en modulair bouwen

Voortbouwend op het PLE-kader uit hoofdstuk 3 richt deze paragraaf zich specifiek op de implicaties voor eisen, specificaties en verificatiebewijs. Doelmatige PLE betekent dat generieke eisen, ontwerpkeuzes, configuratieregels en bewijs niet telkens opnieuw in projecten worden behandeld, maar op productlijn-, standaard- of architectuurniveau worden beheerd.

Wanneer op productlijnniveau is aangetoond dat een standaardontwerp, bouwsteen of configuratieregel voldoet aan de relevante eisen, normen en architectuurprincipes, hoeft die conformiteit niet per individueel project opnieuw te worden bewezen. Projectverificatie richt zich dan primair op de vraag of de gerealiseerde oplossing correct is geconfigureerd en gebouwd volgens de vastgestelde productlijnspecificatie, inclusief interfaces, afwijkingen, locatiegebonden randvoorwaarden en projectspecifieke risico's.

Vanuit dit perspectief verschuift doelmatigheid van projectspecifiek specificeren en afvinken naar productlijnconformiteit: generieke eisen en verificatiebewijs worden éénmalig ontwikkeld, gevalideerd en beheerd; projecten tonen vooral correcte toepassing en beheerste afwijking aan. Daardoor neemt de projectspecifieke eisen-, verificatie- en documentatielast af en kan schaarse expertise worden ingezet waar zij de meeste waarde toevoegt: bij productlijn-ontwikkeling, afwijkingsbeheer, risicovolle interfaces en levenscyclusverbetering.

6.1.5 Doelmatige uitbesteding

Hoofdstuk 5 behandelt de samenwerkingsvormen en randvoorwaarden in de keten; deze paragraaf richt zich op de vraag hoe de gekozen rolverdeling moet doorwerken in eisen, specificaties, werkinstructies, acceptatiecriteria en verificatieverplichtingen. Doelmatige uitbesteding begint daarom niet bij de contractvorm, maar bij de vraag welke ontwerpvrijheid de markt krijgt en welk bewijs nodig is om conformiteit aan te tonen [12] [42].

Wanneer een netbeheerder vooral uitvoering van een vastgesteld standaardontwerp vraagt, moeten opdrachtnemers niet opnieuw de volledige onderliggende eisenset bewijzen. Dan volstaat verificatie op correcte toepassing van de specificatie, interfaces, afwijkingen en acceptatiecriteria. Wanneer de markt juist ontwerp vrijheid krijgt, zijn scherpere systeemeisen, duidelijke interfaces, expliciete randvoorwaarden en volwassen kwaliteitsborging nodig. In beide gevallen moet worden voorkomen dat eisen, specificaties en werkinstructies tegelijk als verifieerbare projecteisen worden behandeld; dat veroorzaakt dubbeling, onduidelijkheid en extra contract- en verificatielast.

De make-or-buy-afweging bepaalt daarmee vooral de specificatiestrategie. Wat de netbeheerder zelf wil beheersen — zoals systeemdoelen, netarchitectuur, veiligheidsfilosofie, kritieke interfaces, cybersecurity, levenscyclusbeleid en acceptatiecriteria — moet expliciet en verifieerbaar worden vastgelegd. Waar marktpartijen ruimte krijgen — zoals ontwerpuitwerking, maakbaarheid, industrialisatie, productontwikkeling, prefab-oplossingen of uitvoeringsoptimalisatie — moeten eisen juist voldoende functioneel blijven om marktkennis te benutten. Het doel is niet maximale uitbesteding of maximale interne beheersing, maar een specificatie- en verificatiestructuur die past bij de gekozen rolverdeling.

Per domein verschilt deze balans. Bij gebouwen kan de markt vaak meer ontwerp- en industrialisatiekennis leveren, waardoor de netbeheerder zich kan beperken tot functionele eisen, interfaces, veiligheid, onderhoudbaarheid en levenscyclus-eisen. Bij primaire installaties ligt een hybride model voor de hand, met regie op netfunctionaliteit, prestaties, veiligheid en interfaces, en marktbijdrage aan componentontwikkeling en detaillering. Bij secundaire systemen, OT, communicatie en IT blijft regie op functies, architectuur, interoperabiliteit, cybersecurity en beheerbaarheid cruciaal, terwijl technologieplatformen en implementaties vaak door gespecialiseerde marktpartijen worden geleverd.

6.2 Doelmatigheid bij netbeheerders

Doelmatigheid betekent beter gebruik van schaarse middelen. De toetsing aan het conceptuele kader van paragraaf 6.1 laat zien dat doelmatigheid bij de netbeheerders niet één enkel eisenvraagstuk is, maar een samenhang tussen waarde afweging, specificatiestructuur, Systems Engineering, Product Line Engineering en uitbesteding. De thema sessie richtte zich op de vraag wat “precies genoeg” is: niet te veel en niet te weinig specificeren, geen onnodige bureaucratie veroorzaken, en eisen, specificaties, verificatieverplichtingen en contractartefacten richten op aantoonbare waarde. De sessie keek zowel naar het proces waarmee netbeheerders eisensets en specificaties samenstellen voor Basisontwerp, Voorontwerp, Detailontwerp en Uitvoeringsontwerp, als naar de inhoudelijke impact van eisen op kosten, doorlooptijd, risico's en marktuitlevering.

De belangrijkste observatie is dat de vraag zelf vaak de grootste kostenveroorzaker is. Eisen, specificaties, standaarden, verificatieverplichtingen en contractartefacten bepalen niet alleen wat gebouwd wordt, maar ook hoeveel ontwerp vrijheid, verificatielast, documentatie, discussie en aansprakelijkheid in projecten ontstaat. Doelmatigheid vraagt daarom niet om simpelweg minder eisen, maar om expliciete besluitvorming over welke eisen, ontwerpkeuzes, verificaties en werkinstructies op welk niveau thuishoren: productlijn, standaard, programma, project of opdrachtnemer.

Enexis was helaas verhinderd in de thema sessie. De beoordeling van Enexis in deze paragraaf is daarom gebaseerd op eerdere FuESSE25-input, interviews en documentatie over de modulaire bouwstandaard, typicals, het proces bij de Enexis afdeling HS/MS stations, uitbesteding en cold commissioning.

6.2.1 Doelmatigheid als balans tussen waarde, risico en kosten

Bij Alliander wordt doelmatigheid vooral zichtbaar in waarde-risico-kosten-afwegingen rond eisen en ontwerpkeuzes met grote impact. Engineers toetsen bij Programma's van Eisen en componentspecificaties of eisen niet verder gaan dan wat gangbaar is in de markt en sector en sluiten daarbij veelal aan bij internationale normen. Daarnaast zijn templates met een financiële paragraaf, reviews door kernteam en multidisciplinair team en betrokkenheid van inkoop ingericht als kwaliteitsmechanismen. Ook het Modulair Bouwen-bevindingsproces functioneert als terugkoppeling om ondoelmatige eisen uit projecten zichtbaar te maken. De beoordeling blijft echter overwegend kwalitatief en ervaringsgedreven; een uniform afwegingskader voor functie, risico, kosten, doorlooptijd, levenscycluswaarde en marktimpact ontbreekt nog.

Bij Stedin ligt de nadruk op het reduceren van complexiteit door standaardisatie, scope-afbakening en programmatische inrichting van eisen, ontwerp en verificatie. De doelmatigheidsvraag verschuift daarmee van afzonderlijke kostendrijvers naar voorspelbare, herhaalbare en minder projectspecifieke realisatie. Stedin ziet dat uitputtend specificeren en testen niet houdbaar is en zoekt naar waarde- en risicogestuurde verificatie. De W-model-achtige productlijnbenadering (zie Figuur 6.3) past hierbij: systeem- en bouwstenen worden vooraf gevalideerd, waarna projecten vooral configuraties, afwijkingen en interfaces verifiëren.

Bij TenneT wordt doelmatigheid vooral bepaald door de omvang, dynamiek en toepassing van bestaande eisen, standaarden en projectdocumentatie. De generieke eisenbibliotheek is bedoeld om per project te worden gefilterd en gecontextualiseerd naar scope, systeemgrenzen en projectdoelen, maar wordt in de praktijk vaak te rechtstreeks als projecteisenset toegepast. Daardoor ontstaat veel review-, verificatie- en documentatielast, terwijl niet altijd expliciet is welke eisen de meeste waarde leveren ten opzichte van kosten, doorlooptijd en risico. Voor TenneT ligt de verbeterkans daarom in scherpere business- en systeemdoelen, een expliciet concept of operations, een top-down architectuurkader en een eisenbibliotheek die per project alleen de relevante eisen, verificaties en documentatieverplichtingen meegeeft.

Bij Enexis is doelmatigheid vooral georganiseerd via een sterk gestandaardiseerde modulaire bouwstandaard, typicals, vaste bouwstromen en een herhaalbaar proces. De waarde afweging zit minder in beoordeling van individuele eisen en meer in industrialisatie van ontwerp en realisatie. De standaardoplossing beperkt projectspecifieke ontwerpkeuzes en reduceert eisen en verificatie in projecten; tegelijk verschuift de doelmatigheidsvraag naar beheer van typicals, standaardontwerpen, leverancierskennis en levenscycluskwaliteit van de productlijn.

6.2.2 Doelmatigheid van individuele eisen en van de totale eisenset

De praktijk bevestigt het onderscheid uit paragraaf 6.1.2 tussen doelmatigheid van individuele eisen en doelmatigheid van de totale eisenset.

Bij Alliander is doelmatigheid van individuele eisen relatief zichtbaar, maar de analyse laat vooral zien dat kosten en vertraging vaak ontstaan door terugkerende patronen in de totale specificatie. Kostendrijvers liggen onder meer in kabeldieptes, civiele randvoorwaarden, grondverbetering en herstelmaatregelen, vergunningstechnische keuzes, aanvullende eisen

boven normniveau en afwijkingen van standaarden. De inzet van AI-gebaseerde analyse (zie Figuur 6.2) kan helpen om zulke patronen, redundantie en kostendrijvers zichtbaar te maken, maar vraagt vervolgens nog steeds om inhoudelijke besluitvorming over functie, risico en levenscycluswaarde.

Kostenanalyse van PvE met AI

Analyse uitkomsten



Meest terugkerende patronen • Verplicht specialistisch materiaal • Geotechnische beperkingen en maatregelen • Sleufoze technieken • Verificatie- en documentatieverplichtingen • Leveranciersspecifieke eisen zonder vaste waarde	Grootste invloed op lifecycle kosten • gedoogconstructie • veenvervangings • droge eindsluitingen • bereikbaarheid tracé • geen moffen in kabelkelder
Verificatie- en integratiekosten • normconformiteit • bodemonderzoek NEN 5725 • overleg netbeheerders + S2004 • thermische beoordeling 57002 bij warmteleidingkruising • boorplan + extern adviesbureau • tracélength-beoordeling bij transformatorverbinding	Mogelijk overgespecificeerde eisen • veenvervangings volledig aanvulblok • kortsluitkrachtheis op 'maximale doorgaande kortsluitstroom • isolatieklasse crossbonding gelijkwaardig 50kV-buitenmantel • historisch bodemonderzoek altijd verplicht

Figuur 6.2: Alliander AI-gebaseerde kostenanalyse (bron: Alliander).

Bij Stedin is vooral de omvang en structuur van de totale eisenset een centraal vraagstuk. De Relatics-omgeving bevat veel eisen en documentatieverplichtingen per werkpakket, waarbij opdrachtnemers bewijs moeten toevoegen en lead engineers goedkeuring moeten geven. Dat biedt traceerbaarheid, maar leidt ook tot hoge verificatielast. Stedin herkent dat eisen, werkinstructies en ontwerpkeuzes nog niet altijd scherp worden onderscheiden. De belangrijkste doelmatigheidsstap is daarom het scheiden van wat als systeemeis moet worden vastgelegd, wat onderdeel is van een standaard of ontwerp, en wat als werkinstructie of uitvoeringsafspraken moet worden behandeld. Werkinstructies hoeven niet dezelfde verificatielast te dragen als eisen.

Bij TenneT is de doelmatigheid van de totale eisenset het meest urgente vraagstuk. Er zijn duizenden eisen en omvangrijke standaardsensets, terwijl niet alle eisen even belangrijk zijn. De huidige werkwijze kan ertoe leiden dat eisen, testplannen en IVVQ-documenten vooral worden afgevinkt, terwijl de inhoudelijke waarde van de eis of verificatie niet altijd expliciet wordt beoordeeld. Per veld moeten veel SAT- en SIT-documenten worden ingevuld, waardoor honderden vergelijkbare documenten ontstaan en kopieerfouten kunnen optreden. AI-tooling om redundante of conflicterende eisen te identificeren is daarom waardevol, maar onvoldoende zolang niet ook wordt bepaald welke eisen op productlijn-, standaard-, programma- of projectniveau thuishoren.

Bij Enexis lijkt de projectspecifieke eisenset relatief beperkt doordat de standaardoplossing en typicals leidend zijn. In plaats van uitgebreide projectspecifieke eisensets wordt gewerkt vanuit gestandaardiseerde ontwerpen, vaste bouwblokken en vaste rollen in het proces. Ook bij uitbesteding wordt het aantal eisen zo klein mogelijk gehouden; Enexis legt vooral vast wat getest moet worden, terwijl de opdrachtnemer bepaalt hoe wordt getest. Dit verlaagt de projectspecifieke specificatie- en verificatielast. De keerzijde is dat de doelmatigheid van onderliggende ontwerpkeuzes en testcriteria vooral op het niveau van de standaard, typicals en leveranciersketen moet worden geborgd.

6.2.3 Doelmatige Systems Engineering: van eisenbeheer naar ontwerp- en besluitvormingskader

Paragraaf 6.1.3 maakt onderscheid tussen eisen als design input, ontwerp en specificaties als design output, en werkinstructies als uitvoeringsgerichte afspraken. De praktijk laat zien dat dit onderscheid bij netbeheerders nog niet overal scherp wordt gemaakt. Systems Engineering moet daarom niet alleen worden opgevat als eisenbeheer of traceerbaarheid, maar als kader om functies, eisen, ontwerpkeuzes, verificatie, risico's, kosten en levenscyclusbesluiten expliciet met elkaar te verbinden.

Bij Alliander zijn veel systeemkeuzes al verwerkt in standaardontwerpen, component-specificaties en modulaire bouwconcepten. Daardoor hoeven projecten niet steeds opnieuw alle onderliggende eisen te expliciteren, mits duidelijk is welke onderdelen standaard zijn, welke afwijkingen zijn toegestaan en hoe conformiteit met het ontwerp wordt vastgesteld. De huidige werkwijze steunt nog sterk op domeinkennis, ervaring en interne reviews. Systems Engineering kan hier helpen om impliciete ontwerpkeuzes, value-afwegingen, risico's en verificatiebewijs explicieter en herbruikbaar te maken.

Bij Stedin is Systems Engineering nadrukkelijk zichtbaar via eisenstructuren, Relatics,¹ verificatie en traceerbaarheid. De uitdaging is dat SE niet beperkt blijft tot het achteraf aantonen van conformiteit met eisen, maar ook wordt gebruikt als verbindend kader tussen eisen, ontwerp, verificatie en besluitvorming. De gewenste richting is dat SE sterker wordt gebruikt om eisen, ontwerpkeuzes, verificatie en besluitvorming te verbinden, zodat projecten van tevoren expliciet aantonen dat zij binnen de gekozen standaard- of configuratielogica blijven.

Bij TenneT is SE sterk verbonden met eisenbeheer, compliance en projectbeheersing. De volgende stap is het versterken van SE als top-down ontwerp- en besluitvormingskader. Zonder expliciete systeemdoelen, concept of operations, referentiearchitectuur en levenscycluskeuzes blijven eisen en standaarden vooral object- en componentgericht. Dat maakt het moeilijk om ontwerpvrijheid, verificatielast en uitbestedingsruimte doelmatig te begrenzen. TenneT heeft daarom vooral behoefte aan een expliciete ordening van eisen, objecten, standaarden, productlijnen, configuraties en verificatiebewijs vanuit een architectuurperspectief.

Bij Enexis is SE minder zichtbaar als formele methode, maar veel SE-keuzes zijn impliciet verwerkt in de modulaire bouwstandaard, typicals, vaste processtappen en cold commissioning. De opdrachtnemer hoeft niet telkens een nieuwe eisenset te interpreteren, maar werkt binnen een bekende configuratie- en uitvoeringslogica. De cold commissioning-aanpak laat zien dat ontwerp, configuratie, testcriteria en overdracht strak kunnen worden georganiseerd rond een gestandaardiseerde stationsoplossing. Voor verdere opschaling is het wel belangrijk dat de relatie tussen functies, ontwerpkeuzes, configuratieregels, testcriteria en acceptatiecriteria explicieter wordt vastgelegd.

6.2.4 Doelmatige Product Line Engineering en modulair bouwen

De toetsing aan paragraaf 6.1.4 laat vooral zien in hoeverre ontwerpkeuzes, configuratieregels en verificatiebewijs al buiten individuele projecten worden beheerd. De verschillen tussen de netbeheerders zitten niet in de vraag of standaardisatie en hergebruik waardevol zijn, maar in de mate waarin productlijnconformiteit expliciet is georganiseerd en aantoonbaar wordt gemaakt.

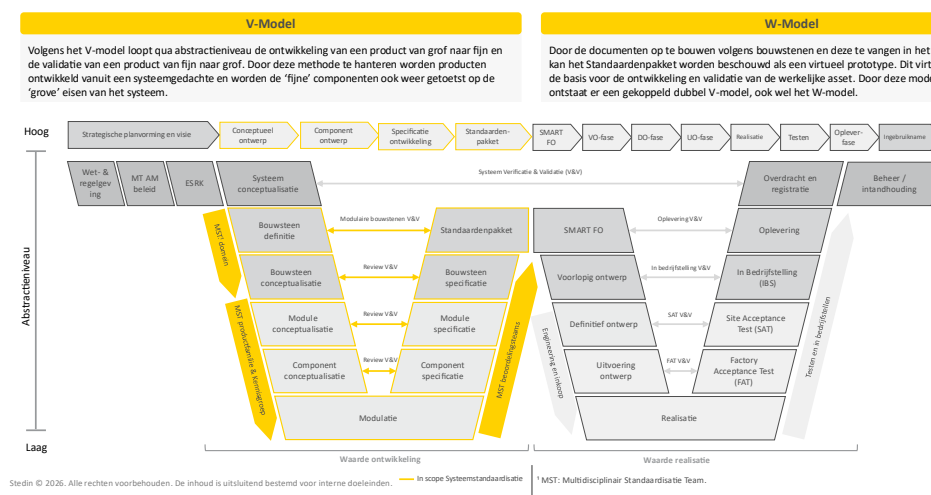
Bij Alliander is deze beweging duidelijk zichtbaar in standaardstations, modulaire bouwconcepten, bouwstenen en het streven om alleen afwijkingen projectspecifiek te beoordelen. De combinatie van standaardontwerpen, generieke testprotocollen en betrokkenheid van Qirion maakt het mogelijk om veel kennis en verificatie in de eigen keten te houden. De verbeterkansen zit vooral in het explicieter vastleggen van productlijnconformiteit en hergebruik van verificatiebewijs, zodat projecten minder afhankelijk blijven van impliciete domeinkennis of projectmatige interpretatie.

Bij Stedin is PLE vooral een transitieopgave. De organisatie werkt aan standaardisatie, systeemarchitectuur en vaste bouwstenen, maar veel verificatie is nog project- en werkpakketgericht georganiseerd. De W-model-benadering (zie Figuur 6.3) die in de sessie naar voren kwam, sluit goed aan op doelmatige PLE: standaarden en bouwstenen worden op productlijnniveau ontworpen en gevalideerd, waarna projecten zich richten op configuratiecontrole, afwijkingen en projectspecifieke interfaces. Daarmee kan Stedin de stap maken van traceerbaarheid per project naar hergebruik van bewijs over projecten heen.

Systems Engineering - Verificatie en Validatie volgens het W-model

STEDIN

Het model voor de ontwikkeling van beleid naar asset uitgezet in een W-model (gekoppeld dubbel V-model) over de keten(s) heen voor de technische beleidsroute waarin de totstandkoming van assets op basis van beleid staat weergegeven.



Figuur 6.3: Stedin W-modelaanpak (bron: Stedin).

Bij TenneT bestaan meerdere standaardisatie- en productlijnachtige initiatieven, zoals standaardvelden, het Bay Replacement Program en programmaspecifieke oplossingen. Deze initiatieven zijn echter nog onvoldoende verbonden in één samenhangend productlijn- en architectuurkader. Daardoor blijft verificatiebewijs vaak project- of programmaspecifiek en worden testen of documentatie soms herhaald omdat vertrouwen in eerder bewijs ontbreekt. Doelmatige PLE vraagt hier om expliciete productlijnen, configuratieregels, variatiepunten, referentiearchitecturen en beheer van verificatiebewijs, zodat projecten niet steeds opnieuw dezelfde conformiteit hoeven aan te tonen.

Bij Enexis is de productlijnlogica in de praktijk sterk aanwezig in typicals, standaardbouwblokken, het MB-station en vaste bouwstromen. Dit maakt configure-to-order mogelijk en beperkt projectspecifieke eisen. De cold commissioning-aanpak bouwt voort op deze standaardisatie: doordat het station spanningsloos en volgens vaste stappen wordt getest, ontstaat een herhaalbaar en voorspelbaar testproces. Enexis is daarmee relatief ver in het verplaatsen van ontwerp- en verificatielogica naar standaarden en productlijnen, met name binnen de afdeling

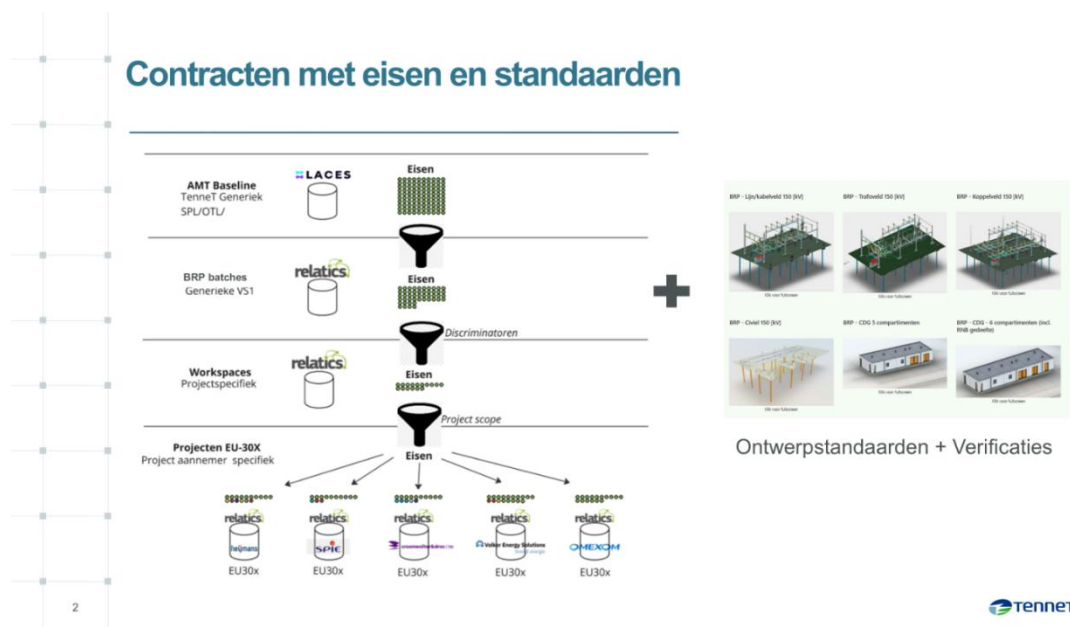
HS/MS stations. De belangrijkste aandachtspunten liggen in beheer van typicals, leveranciersafhankelijkheden, OT-configuraties, cybersecurity en overdracht aan de OIV.

6.2.5 Doelmatige uitbesteding en rolverdeling in de keten

Voortbouwend op de ketenanalyse uit hoofdstuk 5 kijkt deze paragraaf niet opnieuw naar samenwerkingsvormen, maar naar de specificatieconsequenties van de gekozen rolverdeling. De centrale vraag is: krijgen marktpartijen ontwerp-vrijheid, of realiseren zij vooral een voorgeschreven standaard? Het antwoord bepaalt of de opdracht vooral functionele systeemeisen, productspecificaties, werkinstructies, acceptatiecriteria of configuratiecontrole moet bevatten.

Bij Alliander ligt veel kennis en realisatiekracht in de eigen keten via Qirion en de modulaire bouworganisatie. Daardoor kan Alliander relatief veel ontwerp- en uitvoeringskeuzes intern standaardiseren, testen en beheersen. Bij externe uitbesteding moet vooral expliciet worden gemaakt waar marktpartijen ontwerp-vrijheid hebben en waar zij aantonen dat zij conform een voorgeschreven standaard of specificatie hebben gerealiseerd. De doelmatigheidsvraag is dus niet primair met wie wordt samengewerkt, maar welke informatie als eis, specificatie, afwijking, werkinstructie of acceptatiecriterium wordt meegegeven.

Bij Stedin is de specificatieconsequentie vooral zichtbaar in de Relatics-omgeving en werkpakketstructuur. Traceerbaarheid is goed mogelijk doordat opdrachtnemers bewijs leveren per werkpakket, maar de administratieve last neemt toe wanneer systeemeisen, ontwerpkeuzes, werkinstructies en documentatieverplichtingen dezelfde status krijgen. Doelmatigheid vraagt hier om een scherpere scheiding tussen wat als systeemeis moet worden geverifieerd, wat onderdeel is van een standaard- of productlijnspecificatie, wat als werkinstructie geldt en welke acceptatiecriteria werkelijk projectspecifiek zijn.



Figuur 6.4: Contracten met eisen en standaarden bij TenneT (bron: TenneT).

Bij TenneT ligt de verbeterkans in het explicieter koppelen van uitbestedingsscope aan eisen- en bewijsniveau. Wanneer omvangrijke generieke eisenbibliotheken rechtstreeks aan projecten worden toegewezen, ontstaat veel verificatie- en documentatielast. Wanneer

marktpartijen ontwerprijheid krijgen, moeten systeemeisen, interfaces, architectuurskaders en acceptatiecriteria scherp zijn. Wanneer zij vooral een voorgeschreven standaard realiseren, moeten projecten vooral configuratieconformiteit, afwijkingen en interfaces aantonen. Daarmee verschuift de vraag van “hoeveel eisen geven we mee?” naar “welke eisen en bewijsstukken horen bij deze uitbestedingsrol?”

Bij Enexis is de specificatieconsequentie van uitbesteding relatief helder zichtbaar in het Netuitbreiding en Uitbesteding (N&U) model van de afdeling HS/MS stations. Vaste opdrachtnemers realiseren stations binnen een gestandaardiseerde modulaire bouwopbouw, terwijl Enexis regie houdt op kritieke functies, configuraties, OT, acceptatiecriteria en overdracht aan de OIV. De opdrachtnemer krijgt ruimte in uitvoering en testen, maar binnen een sterk gestandaardiseerde productlijnlogica. Dit beperkt projectspecifieke eisen sets en maakt verificatie meer gericht op correcte toepassing van typicals, testcriteria, configuraties en overdracht.

6.3 Conclusies en aanbevelingen

Doelmatige eisen ontstaan niet door simpelweg minder te specificeren, maar door scherper te bepalen **welke informatie op welk niveau moet worden vastgelegd en bewezen**. De analyse langs waarde, eisen set, Systems Engineering, Product Line Engineering en uitbesteding laat hetzelfde patroon zien: veel projectlast ontstaat doordat eisen, ontwerpkeuzes, werkinstructies, verificatiebewijs en contractverantwoordelijkheden onnodig op projectniveau terechtkomen. De kern van doelmatigheid is daarom het organiseren van eisen, specificaties en verificatiebewijs op het niveau waar zij de meeste waarde toevoegen: project, standaard, productlijn, architectuur of opdrachtnemer.

Voor de netbeheerders betekent dit een verschuiving van projectspecifiek aantonen naar vooraf georganiseerde productlijnconformiteit. Alliander en Enexis laten zien dat standaardisatie, modulaire bouwstromen en vaste configuraties de projectmatige eisen- en verificatielast kunnen beperken. Stedin en TenneT laten zien welke transitie nodig is wanneer eisenbeheer, verificatie en projectbeheersing nog sterk projectgericht zijn ingericht. De belangrijkste ontwikkelrichting is dat productlijnen, standaarden en bouwstenen vooraf worden gevalideerd, zodat projecten zich vooral richten op configuratiecontrole, afwijkingen, interfaces en projectspecifieke risico's.

De governance-inrichting die nodig is om deze keuzes structureel te borgen, wordt verder uitgewerkt in hoofdstuk 7. Dit hoofdstuk beperkt zich tot de gevolgen voor eisen, specificaties, verificatie en uitbestedingsscope.

Aanbevelingen

1. Organiseer generieke eisen en verificatiebewijs op productlijnniveau.

Verplaats generieke eisen, standaardontwerpen, configuratieregels en verificatiebewijs zoveel mogelijk naar productlijn-, standaard- of architectuurniveau. Beperk projectverificatie tot configuratiecontrole, interfaces, afwijkingen en projectspecifieke risico's.

Dit vermindert projectspecifieke eisen-, verificatie- en documentatielast, voorkomt dubbel bewijs en maakt schaarse expertise effectiever inzetbaar voor productlijnontwikkeling, afwijkingenbeheer en risicovolle interfaces.

2. Maak doelmatigheidsafwegingen expliciet en scheid eisen, specificaties, werkinstructies en acceptatiecriteria.

Gebruik eisen voor wat het systeem moet bereiken, specificaties voor gekozen oplossingen, werkinstructies voor uitvoering en acceptatiecriteria voor aantoonbaarheid. Voorkom dat ontwerpkeuzes, werkinstructies of documentatieverplichtingen onbedoeld als verifieerbare projecteisen worden behandeld.

Dit voorkomt overvragen, vermindert dubbelingen, verlaagt de administratieve verificatielast en maakt beter navolgbaar waarom eisen of ontwerpkeuzes wel of niet worden opgenomen.

3. Laat de specificatie- en verificatiestrategie aansluiten op de gekozen uitbestedingsrol.

Bepaal per domein of marktpartijen vooral een voorgeschreven standaard realiseren of ontwerp vrijheid krijgen. Gebruik bij voorgeschreven standaarden vooral productspecificaties, configuratiecontrole, afwijkingsbeheer en acceptatiecriteria. Gebruik bij ontwerp vrijheid vooral functionele systeemeisen, duidelijke interfaces, randvoorwaarden en kwaliteitsborging.

Dit verlaagt contract- en verificatielast, maakt de rolverdeling tussen netbeheerder en markt explicieter en benut marktkennis gericht zonder regie op veiligheid, betrouwbaarheid, cyber security en levenscycluskwaliteit te verliezen.

4. Gebruik data en AI als hulpmiddel voor inhoudelijke besluitvorming.

Zet data- en AI-analyse in om redundante eisen, conflicten, afwijkingen, verificatielast en kostendrijvers zichtbaar te maken. Gebruik de uitkomsten niet als besluit, maar als input voor inhoudelijke afwegingen over waarde, risico, levenscyclusdoelen en uitvoerbaarheid.

Dit versnelt analysewerk, verbetert besluitkwaliteit en helpt experts zich te richten op de eisen en keuzes met de grootste impact.

7 Integraal sturen op doelmatige modulariteit

"De productiviteit moet omhoog... Dat doen we door te vereenvoudigen: we werken efficiënter, doelgerichter en meer gestandaardiseerd."

Meerjarenplan instandhouding Rijkswaterstaat-netwerken 2025-2030 [48]

De Nederlandse netbeheerders staan voor een vergelijkbare opgave als Rijkswaterstaat voor de weg- en waterinfrastructuur. Rijkswaterstaat zet daarbij in op **integraal sturen**: het in samenhang prioriteren, standaardiseren en programmeren van werkzaamheden om met schaarse capaciteit meer maatschappelijke waarde te realiseren. Voor de netbeheerders bestaat een vergelijkbare noodzaak. Om de energietransitie te realiseren moeten aanzienlijk meer projecten worden voorbereid, ontworpen en gerealiseerd, terwijl personeel, materialen en uitvoeringscapaciteit schaars blijven. Dit vraagt niet alleen om technologische innovatie, maar vooral om strategische sturing op modulariteit, standaardisatie en hergebruik om productiviteit, voorspelbaarheid en uitvoerbaarheid structureel te vergroten.

Modulair bouwen wordt daarbij gezien als een belangrijk instrument om deze opschalingsopgave beheersbaar te maken. Tegelijkertijd laten de ervaringen van netbeheerders zien dat modulariteit niet uitsluitend een technisch vraagstuk is. Standaarden, bouwblokken en productlijnen leveren pas structurele voordelen op wanneer ook keuzes over prioriteiten, investeringen, eigenaarschap, variatiebeheer en toepassing expliciet worden gestuurd. De uitdaging verschuift daarmee van het ontwikkelen van modulaire oplossingen naar het organiseren van de governance en sturing die nodig zijn om deze oplossingen op grote schaal toe te passen.

Vanuit dit perspectief kan modulair bouwen worden beschouwd als een strategisch organisatievermogen: het vermogen om modulariteit, hergebruik en variabiliteit doelgericht te ontwikkelen, toe te passen en door te ontwikkelen over projecten, programma's en portfolio's heen. Governance vormt daarbij de verbindende schakel tussen strategische doelstellingen, standaardisatie en uitvoering, en is daarmee een randvoorwaarde voor doelmatige opschaling van de energie-infrastructuur.

Dit hoofdstuk werkt dit perspectief verder uit. Paragraaf 7.1 introduceert een conceptueel kader voor governance en sturing, gebaseerd op een drielaags perspectief van portfolio-, programma- en projectniveau, en introduceert richtinggevende principes als schakel tussen strategie en uitvoering. Paragraaf 7.2 geeft vervolgens een overzicht van lopende verbeterinitiatieven binnen de sector. Op basis daarvan analyseert paragraaf 7.3 de noodzaak van governance, prioritering en samenhang bij netbeheerders. Het hoofdstuk sluit af met conclusies en aanbevelingen voor de verdere strategische sturing van modulariteit ten behoeve van de opschaling van de energie-infrastructuur.

7.1 Conceptueel kader governance en sturing

De transitie naar doelmatig modulair bouwen vraagt naast technische standaarden, architecturen en herbruikbare oplossingen ook om samenhangende governance en sturing.

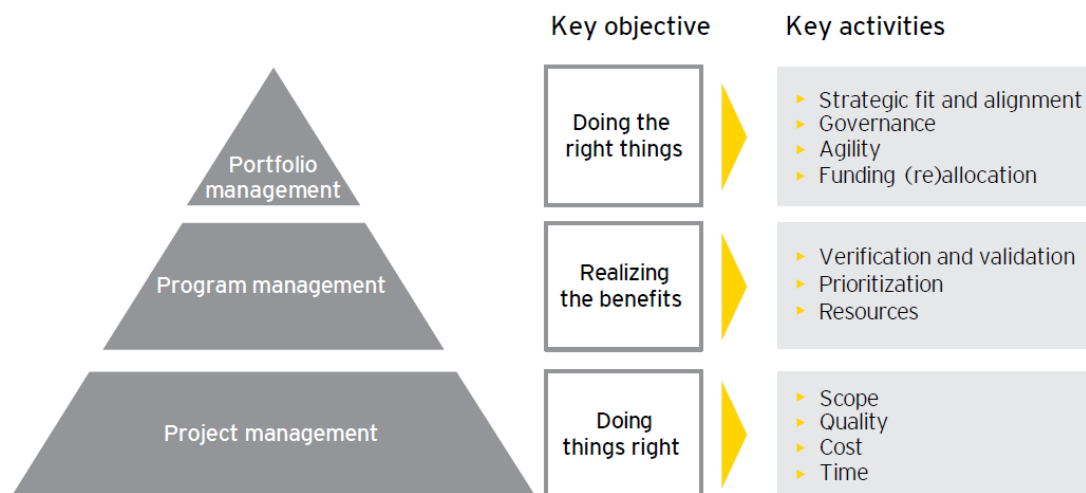
Naarmate modulariteit, hergebruik en variabiliteit een grotere rol gaan spelen in de ontwikkeling van HS- en MS-stations, nemen de afhankelijkheden tussen projecten, programma's en strategische initiatieven toe. Hierdoor ontstaat behoefte aan besluitvorming die architectuur, standaardisatie, investeringen en portfolio-ontwikkeling met elkaar verbindt.

7.1.1 Drielaags governance- en sturingsperspectief

Modulair bouwen is een organisatiebrede veranderopgave die zich afspeelt op meerdere bestuurlijke niveaus tegelijk. Projecten realiseren concrete assets, programma's zorgen voor samenhang tussen projecten en standaarden, en op portfolioniveau worden strategische keuzes gemaakt over investeringen, architectuurontwikkeling en capability-ontwikkeling.

De drie governance-niveaus vertonen ook een duidelijke relatie met de vier niveaus van Systems Engineering organisatievermogen uit paragraaf 1.2. Projectsturing sluit primair aan op *Requirements Engineering* en *Project Systems Engineering*, waar de nadruk ligt op het realiseren van individuele projecten binnen gestelde eisen en randvoorwaarden. Programmasturing sluit aan op *Product Line Engineering*, waarin hergebruik, standaardisatie en beheersing van variatie centraal staan. Portfoliosturing sluit aan op *Product Portfolio Engineering*, waarbij productlijnen, referentiearchitecturen, assets en ontwikkelinitiatieven in samenhang worden bestuurd vanuit een organisatie- of sectorbreed perspectief.

Effectieve opschaling vraagt om sturing die deze niveaus expliciet met elkaar verbindt.



Figuur 7.1: Drielaags governance- en sturingsperspectief (bron: [49]).

Deze driedeling sluit aan bij gangbare inzichten uit portfolio-, programma- en projectmanagement [50] [51] [52]. Portfoliosturing richt zich op het maken van de juiste strategische keuzes (*doing the right things*), programmasturing op het realiseren van samenhang en voordelen (*realizing the benefits*) en projectsturing op het effectief realiseren van resultaten (*doing things right*), zie Figuur 7.1. De drie niveaus zijn complementair en vragen om onderlinge afstemming (zie ook het rapport van het eerdere FuESSE-project [17], paragraaf 7.1).

Op **projectniveau** staan maakbaarheid en uitvoerbaarheid centraal. De focus ligt op het doelmatig realiseren van individuele projecten binnen de beschikbare capaciteit, middelen en uitvoeringscontext. Principes zoals uitvoerbaarheid, doelmatigheid en overdraagbaarheid geven hier richting aan de dagelijkse besluitvorming en uitvoering.

Op **programmaniveau** staan beheersbaarheid en voorspelbaarheid centraal. De focus ligt op het consistent realiseren van meerdere projecten als samenhangende bouwstroom, waarbij variatie beheerst wordt en herhaalbaarheid, eenduidigheid en voorspelbaarheid worden vergroot. Deze eigenschappen vormen de basis voor schaalvoordelen en een efficiënte samenwerking in de keten.

Op **portfolioniveau** staan opschaalbaarheid en lerend vermogen centraal. Het gaat hier om het maken van strategische keuzes over programma's, standaarden, productlijnen en investeringen, met als doel maximale waardecreatie, hergebruik en aanpassingsvermogen over projecten en programma's heen.

De waarde van dit perspectief ligt in de samenhang tussen de drie niveaus. Versnelling van de bouwopgave vraagt om een gebalanceerde ontwikkeling van project-, programma- en portfoliosturing. Modulair bouwen is daarmee niet alleen een technische of projectmatige opgave, maar ook een vraagstuk van samenhangende governance en sturing.

7.1.2 Richtinggevende principes als schakel tussen strategie en uitvoering

Het ontwikkelen van een modulaire bouwstrategie begint bij de strategische opgave van de netbeheerder. Deze opgave wordt gedreven door doelen zoals versnelling van netuitbreidingen, vergroting van de uitvoeringscapaciteit, verbetering van voorspelbaarheid en beheersing van kosten en risico's. In paragraaf 7.1.1 zijn daartoe drie complementaire sturingsperspectieven geïntroduceerd: maakbaarheid en uitvoerbaarheid op projectniveau, beheersbaarheid en voorspelbaarheid op programmaniveau, en opschaalbaarheid en lerend vermogen op portfolioniveau.

Om deze perspectieven te vertalen naar concrete keuzes in ontwerp, processen en besluitvorming zijn richtinggevende principes nodig. Deze principes beschrijven welke eigenschappen oplossingen, processen en besluitvorming moeten hebben om de strategische doelstellingen te ondersteunen. Tabel 7.1 geeft een overzicht van deze principes voor project-, programma- en portfolioniveau.

Tabel 7.1: Richtinggevende principes voor sturing op project-, programma-, en portfolioniveau

Laag	Principe	Uitleg
Project Maakbaar & uitvoerbaar	Uitvoerbaarheid	Het proces en de oplossing zijn praktisch realiseerbaar.
	Doelmatigheid	Precies genoeg: niet te veel, niet te weinig; gericht op waarde.
	Overdraagbaarheid	Keuzes en informatie kunnen zonder betekenis- of kwaliteitsverlies worden overgedragen aan een volgende partij in de keten.
Programma Beheersbaar & voorspelbaar	Repeteerbaarheid	Het proces werkt elke keer hetzelfde.
	Eenduidigheid	Iedereen gebruikt dezelfde taal en interpretatie.
	Voorspelbaarheid	Geen verrassingen in tijd, scope en kwaliteit.
Portfolio Opschaalbaar & lerend	Herbruikbaarheid	Oplossingen, bouwblokken en gegevens kunnen opnieuw worden toegepast.
	Beslisvastheid	Keuzes blijven begrijpelijk, uitlegbaar en overdraagbaar in de tijd.
	Aanpasbaarheid	Strategie, standaarden en oplossingen kunnen gecontroleerd aangepast worden wanneer omstandigheden veranderen.

De principes in Tabel 7.1 vertalen strategische doelstellingen naar gewenste eigenschappen van oplossingen, processen en besluitvorming. Daarmee vormen zij het verbindende kader tussen strategische doelen, governance en uitvoering.

De principes ondersteunen de vertaling van strategische doelstellingen naar concrete keuzes in ontwerp, standaardisatie, processen en besluitvorming. Governance en sturing bewaken daarbij de samenhang tussen portfolio-, programma- en projectniveau, zodat strategische doelstellingen doorwerken in de uitvoering en ervaringen uit projecten kunnen worden teruggekoppeld naar beleid, standaarden en besluitvorming.

Samen vormen deze principes een referentiekader voor de analyse van governance- en sturingsvraagstukken in de volgende paragrafen. Zij maken zichtbaar welke eigenschappen nodig zijn om niet alleen individuele projecten succesvol uit te voeren, maar ook om programma's beheersbaar en de gehele realisatieopgave schaalbaar te maken.

7.2 Veel initiatieven, beperkte samenhang

In het project is een inventarisatie uitgevoerd van lopende verbeterinitiatieven binnen de Nederlandse netbeheerders. Deze inventarisatie laat zien dat de sector zich midden in een omvangrijke transitie bevindt, waarin wordt gewerkt aan modulariteit, standaardisatie, Systems Engineering, digitalisering, ketensamenwerking en procesverbetering. Tabel 7.2 geeft een overzicht van de geïnterviewde initiatieven; deze worden meer in detail besproken in Bijlage A. In totaal zijn er 62 initiatieven geïnterviewd waar een groot aantal organisaties aan deelneemt.

Tabel 7.2: Aantal initiatieven per organisatie top-5.

Naam	Beschrijving	#initiatieven
Stedin	Regionale netbeheerder	21
Alliander	Regionale netbeheerder	16
Enexis	Regionale netbeheerder	16
TenneT	Transport System Operator	14
Netbeheer Nederland	Vereniging van elektriciteits- en gasnetbeheerders in Nederland, waaronder Alliander, Enexis, Stedin en TenneT	8

De inventarisatie bevestigt dat de sector beschikt over een aanzienlijke hoeveelheid kennis, ervaring en verandervermogen. Tegelijkertijd blijkt dat veel initiatieven bijdragen aan vergelijkbare strategische doelstellingen, zoals hogere productiviteit, kortere doorlooptijden, betere ketensamenwerking, efficiënter gebruik van schaarse capaciteit en een hogere opschaalbaarheid van de bouwopgave. Hoewel de initiatieven vaak vanuit verschillende organisaties, programma's of verbeterdoelen worden aangestuurd, hebben zij in veel gevallen een sterke inhoudelijke samenhang.

De inventarisatie maakt zichtbaar dat succesvolle opschaling niet zozeer vraagt om meer initiatieven, maar om meer samenhang tussen bestaande inspanningen. Capaciteit, middelen en verandervermogen zijn beperkt, waardoor keuzes over investeringen, eigenaarschap, afhankelijkheden en prioriteiten steeds belangrijker worden. Dit vraagt om gezamenlijke prioritering, expliciete governance en afstemming tussen netbeheerders, zodat bestaande initiatieven bijdragen aan een samenhangende ontwikkeling van de organisatorische capabilities die nodig zijn voor een uitvoerbare, voorspelbare en opschaalbare energie-infrastructuur.

7.3 Governance als randvoorwaarde voor schaalbare modulariteit

De inventarisatie van verbeterinitiatieven laat zien dat de Nederlandse netbeheerders de afgelopen jaren belangrijke stappen hebben gezet op het gebied van modulariteit, standaardisatie, Systems Engineering, digitalisering en ketensamenwerking. Tegelijkertijd blijkt dat succesvolle opschaling steeds minder wordt bepaald door de beschikbaarheid van technische oplossingen en steeds meer door de wijze waarop besluitvorming, eigenaarschap, prioritering en samenwerking zijn georganiseerd. De analyse van de initiatieven en governance-discussies laat zien dat veel uitdagingen niet primair technisch van aard zijn, maar samenhangen met governance en sturing. Tabel 7.3 geeft hiervan een overzicht op basis van de presentaties en discussies van in FuESSE context.

Tabel 7.3: Overzicht governance- en sturingsaspecten voor invoering van modulair bouwen.

Thema	Wat kan misgaan (knelpunten)	Wat moet geadresseerd worden (randvoorwaarden)	Wat werkt al (succesfactoren)
Mandaat & slagkracht	• Programma's zonder mandaat → geen doorwerking • Strategische plannen blijven vrijblijvend • Vraag "gaan we het doen of niet?" blijft open	• Mandaat expliciet beleggen (portfolio/programma) • Besluitvorming afdwingbaar maken • "Modulair bouwen tenzij"-principe invoeren	• Sterk mandaat bij succesvolle cases (Alliander / Enexis N&U) • Onafhankelijk programma met dedicated resources
Programma-inrichting & governance	• "Strategisch programma" zonder uitvoeringskracht • Geen centrale sturing → versnippering • Initiatieven blijven lokaal	• Programma's met echte governance (budget + rol) • Centrale regie op standaardisatie en PLE	• Dedicated programma's met eigen organisatie en mandaat (Enexis N&U) • Centrale teams met mandaat en wijzigings-beheer over gebruik standaard in projecten (Alliander).
Rollen & eigenaarschap	• Onduidelijke rolverdeling AM / projecten / productmanagement • Standaarden volgen projecten i.p.v. andersom	• Eigenaarschap standaarden expliciet beleggen • Productmanagement in portfolio positioneren • Single Points of Contact (SPoC) (technisch + contractueel)	• Productmanagement-achtige rollen • Component management / centrale aanspreekpunten
Strategie → uitvoering	• Strategische doelstellingen niet concreet vertaald • Geen KPIs → discussie blijft abstract • Verschillende interpretaties van doelen	• KPIs per laag (snelheid, volume, levenscyclus) • Concrete vertaling naar projecten • Eenduidige definities	• Roadmaps en visies (bijv. TenneT target grid) • Concrete strategische drivers formuleren

Thema	Wat kan misgaan (knelpunten)	Wat moet geadresseerd worden (randvoorwaarden)	Wat werkt al (succesfactoren)
Cultuur & gedrag	- SE wordt doel op zich (tooling focus) - Afwachtende houding ("eerst plan") - Weerstand bij middenmanagement	- SE positioneren als middel voor besluitvorming - Cultuur van "doen & leren" stimuleren - Leiderschap zichtbaar maken	- Proactieve "change agents" - Kleine groepen die al resultaten laten zien
Naleving & standaardisatie	- Afwijkingen niet gecontroleerd - Standaarden niet toegepast - Projectoptimalisatie blijft dominant	- Handhaving in projecten (stage gates) - Afwijkingsproces + besluitvorming - KPI op adoptie	"Geen afwijking zonder reden" - Designates met toetsing - Registratie afwijkingen
Samenhang initiatieven	- Grote versnippering en overlap - Geen sectorbreed overzicht	- Clustering en prioritering van initiatieven - Sectorbrede governance (regie) - Koppeling aan roadmap	Kleine bilaterale samenwerkingen werken effectief
Sector samenwerking	- Veel overleg → weinig besluiten - Geen verplichtende governance - Kennisdeling zonder impact	- Mandaat op sectorniveau (bv. Netbeheer NL) - Besluitvormende structuren i.p.v. alleen overleg	- Bilaterale samenwerking levert sneller resultaat - Gebruik van vaste aannemers (Enexis N&U & Alliander)
KPIs & incentive structuur	- Verkeerde KPIs sturen tegen (bijv. korte termijn productie) - Optimalisatie per afdeling	- KPIs consistent maken over keten - Incentives op langetermijnwaarde	Monitoring adoptie en prestaties (beginnend aanwezig)
Personeel & competenties	- Onervaren personeel zonder opleiding - Gebrek aan systeendenken (SE-mindset)	- Opleidingsplan (SE + modulair bouwen) - Uniform begrip ontwikkelen	- Expertisegroepen / communities - Training en kennisdeling
Technisch beleid & standaarden	- Onduidelijk beleid - Inconsistente eisen en documentatie	- Eenduidig technisch beleid - Levenscyclus-denken integreren	- Bibliotheken met standaarden - Functioneel specificeren
Levenscyclus & CAPEX/OPEX balans	- Focus op kortetermijn-CAPEX - Onderhoud en levenscyclus niet meegenomen	- Integrale afweging levenscyclus (TCO) - Asset management meenemen in ontwerp	- Bewustwording groeit - Eerste integrale benaderingen
Externe context	- Overheden / vergunningen niet geïntegreerd - Externe eisen versnipperd	- Stakeholders (gemeenten, ACM, etc.) expliciet meenemen - Sectorbrede afstemming	Externe druk stimuleert samenwerking

Thema	Wat kan misgaan (knelpunten)	Wat moet geadresseerd worden (randvoorwaarden)	Wat werkt al (succesfactoren)
Verander management	- Middenmanagement blokkeert verandering - Geen doorvertaling van visie	- Management op alle niveaus meenemen - Belonen gewenst gedrag	C-level support aanwezig (maar inconsistent)

De observaties uit Tabel 7.3 laten zien dat veel organisaties zich in een overgangsfase bevinden. Enerzijds zijn er succesvolle voorbeelden van standaardisatie, modularisering en programmatische sturing, waarbij expliciet mandaat, centrale regie en structureel eigenaarschap aanwezig zijn. Anderzijds worden verbeterinitiatieven nog regelmatig lokaal of projectmatig aangestuurd, waardoor vergelijkbare vraagstukken parallel worden uitgewerkt en expertise, capaciteit en middelen versnipperd raken.

Een terugkerend patroon is dat strategische ambities niet altijd worden vertaald naar concrete prioriteiten, verantwoordelijkheden en besluitvormingscriteria. Doelen zoals versnelling, hogere productiviteit, betere voorspelbaarheid en efficiënter gebruik van schaarse capaciteit worden breed onderschreven, maar zijn nog niet altijd verankerd in KPIs, governance-structuren en besluitvorming. Hierdoor ontstaat het risico dat projecten worden geoptimaliseerd binnen hun eigen context, terwijl kansen voor organisatiebrede of sectorbrede schaalvoordelen onvoldoende worden benut.

Daarnaast laat de analyse zien dat veel governance-vraagstukken verschillende organisatie-niveaus raken. Strategische keuzes over investeringen, standaardisatie en productlijnontwikkeling vragen sturing op portfolioniveau, terwijl samenhang tussen initiatieven en programma's vooral op programmaniveau georganiseerd wordt. De toepassing van standaarden en het beheersen van afwijkingen vinden plaats op projectniveau. Effectieve opschaling vraagt daarom om consistente verbindingen tussen deze niveaus. Governance heeft daarbij niet alleen als doel besluitvorming en samenhang te ondersteunen, maar ook om voldoende stabiliteit en voorspelbaarheid te creëren voor organisaties in de gehele uitvoeringsketen.

7.4 Conclusies en aanbevelingen

De bevindingen uit hoofdstuk 5 laten zien dat verdere opschaling van modulaair bouwen in belangrijke mate wordt beperkt door organisatorische en ketengerelateerde vraagstukken rondom samenwerking, harmonisatie, kennisdeling en gezamenlijke capaciteitsontwikkeling. De analyse in dit hoofdstuk laat zien dat deze vraagstukken niet kunnen worden opgelost met afzonderlijke verbeterinitiatieven, maar vragen om expliciete sturing op samenhang, prioritering, eigenaarschap en besluitvorming.

Veel van de onderliggende vraagstukken zijn bovendien sectorbreed, waardoor gezamenlijke prioritering, afstemming en besluitvorming steeds belangrijker worden. Governance richt zich daarbij niet alleen op de aansturing van afzonderlijke initiatieven, maar vooral op het organiseren van samenhang tussen strategische doelen, programma's en projecten, zodat schaarse capaciteit doelgericht wordt ingezet en modulariteit kan uitgroeien tot een schaalbaar organisatievermogen.

De analyse laat ook zien dat effectieve sturing expliciet onderscheid vraagt tussen portfolio-, programma- en projectniveau. Strategische keuzes over investeringen, standaardisatie en capability-ontwikkeling vragen sturing op portfolioniveau, terwijl samenhang tussen initiatieven, productlijnen en verbeterprogramma's vooral op programmaniveau moet worden

georganiseerd. Op projectniveau staat de consistente toepassing van standaarden, werkwijzen en geleerde lessen centraal.

Aanbevelingen

1. Richt governance expliciet in over portfolio-, programma- en projectniveau.

Veranker verantwoordelijkheden, besluitvorming en eigenaarschap op de drie sturingslagen en zorg voor een consistente verbinding tussen strategie, programma's en uitvoering.

Dit draagt direct bij aan hogere productiviteit, kortere doorlooptijden en effectiever gebruik van schaarse capaciteit, doordat strategische keuzes beter doorwerken naar programma's en projecten.

2. Beleg eigenaarschap van standaarden en productlijnen expliciet.

Zorg voor duidelijke verantwoordelijkheden voor referentiearchitecturen, standaarden, interfaces, productlijnen en variatiebeheer, inclusief besluitvorming over afwijkingen en doorontwikkeling.

Dit verhoogt de herbruikbaarheid van oplossingen, vermindert onnodige variatie en draagt direct bij aan betere kwaliteit, kortere doorlooptijden en lagere ketenkosten.

3. Prioriteer en verbind bestaande verbeterinitiatieven.

Clusteren, prioriteren en verbinden van bestaande initiatieven is belangrijker dan het starten van nieuwe. Richt schaarse expertise en investeringen op verbeteringen die aantoonbaar bijdragen aan uitvoerbaarheid, voorspelbaarheid en opschaalbaarheid.

Dit voorkomt versnippering van middelen en vergroot de kans dat verbeterinitiatieven daadwerkelijk leiden tot meer volume, lagere kosten en hogere kwaliteit.

4. Versterk sectorbrede samenwerking en gezamenlijke besluitvorming.

Verschuif de nadruk van kennisuitwisseling naar gezamenlijke prioritering, standaardisatie en uitvoering op onderwerpen zoals Systems Engineering, productlijnontwikkeling, digitalisering en competentieontwikkeling.

Dit maakt het mogelijk om schaarse kennis, capaciteit en investeringen te bundelen, dubbel werk te voorkomen en sneller sectorbreed te leren en te verbeteren.

Effectieve governance vraagt niet alleen om passende structuren en besluitvorming, maar ook om de onderliggende organisatievermogens die nodig zijn om modulariteit op grote schaal toe te passen en continu te verbeteren, zie ook de aanbevelingen in hoofdstuk 3.

8 De FuESSE Modulaire Bouwstrategie

“Maatschappelijke waarde ontstaat wanneer organisaties hun middelen, processen en besluitvorming effectief richten op het realiseren van publieke opgaven”

Mark H. Moore, *Creating Public Value*, 1995 [53]

De analyse in hoofdstuk 7 laat zien dat de sector niet wordt beperkt door een gebrek aan initiatieven, maar door een gebrek aan samenhangende sturing daarop. Veel van de onderliggende vraagstukken zijn bovendien sectorbreed, waardoor gezamenlijke prioritering, afstemming en besluitvorming steeds belangrijker worden. De uitdaging voor netbeheerders ligt daarmee niet primair in het ontwikkelen van nieuwe technische oplossingen, maar in het vermogen om bestaande kennis, standaarden en werkwijzen doelgericht toe te passen, op te schalen en te borgen.

De FuESSE Modulaire Bouwstrategie biedt hiervoor een gezamenlijk ontwikkelkader. Het doel van deze strategie is netbeheerders te ondersteunen bij de invoering, opschaling en borging van modulaair bouwen van hoog- en middenspanningsstations. Daarbij staat het ontwikkelen van het organisatievermogen centraal om modulariteit, hergebruik en variabiliteit consistent toe te passen over projecten, programma's en portfolio's heen.

In deze strategie wordt Systems Engineering, met toepassing van Product Line Engineering, beschouwd als het centrale organisatievermogen voor doelmatige opschaling. Het maakt het mogelijk om strategische doelen, architectuur, processen, standaarden en uitvoering met elkaar te verbinden en daarmee consistent te sturen over de volledige levenscyclus van infrastructuursystemen. Governance, programmasturing, competentieontwikkeling en verandermanagement ondersteunen dit en zorgen voor de organisatorische borging ervan.

De strategie wordt uitgewerkt in twee complementaire roadmaps:

- De **Vier-fasen Bouwstrategie Roadmap**, die beschrijft welke ontwikkelingen nodig zijn vanuit de perspectieven Business, Architecture, Process en Organisation (BAPO).
- De **Drie-laags Governance- en Sturingsroadmap**, die beschrijft hoe eigenaarschap, besluitvorming en sturing worden ingericht op portfolio-, programma- en projectniveau.

Samen vormen deze roadmaps één geïntegreerd ontwikkelkader voor de professionalisering en opschaling van modulaair bouwen van HS/MS-stations. De Bouwstrategie Roadmap beschrijft wat ontwikkeld moet worden; de Governance- en Sturingsroadmap beschrijft hoe deze ontwikkeling wordt gestuurd, georganiseerd en geborgd. Gezamenlijk ondersteunen zij de ontwikkeling van het organisatievermogen dat nodig is voor duurzame opschaling van de energie-infrastructuur.

Dit hoofdstuk geeft een overzicht van de FuESSE Modulaire Bouwstrategie voor de opschaling van modulaair bouwen binnen de energie-infrastructuur (Bijlage D geeft een verdere verdieping). In dit hoofdstuk wordt eerst het conceptuele kader uitgewerkt, gebaseerd op Systems Engineering, Product Line Engineering en het BAPO-raamwerk als organisatievermogen voor modulariteit en variabiliteitsbeheer. Vervolgens wordt in paragraaf 8.2 ingegaan

op de verschillende ontwikkelfasen van netbeheerders en in paragraaf 8.3 op de transitiedilemma's die ontstaan bij de verschuiving van projectmatig werken naar een productlijn- en platformgerichte aanpak. Op basis hiervan worden in paragraaf 8.4 een vier-fasen Bouwstrategie Roadmap en een Drielaags Governance- en Sturingsroadmap uitgewerkt als samenhangend ontwikkel- en sturingskader. Het hoofdstuk sluit af met conclusies en aanbevelingen voor de verdere ontwikkeling van een schaalbaar productiesysteem voor de energie-infrastructuur.

8.1 Conceptueel kader voor een modulaire bouwstrategie

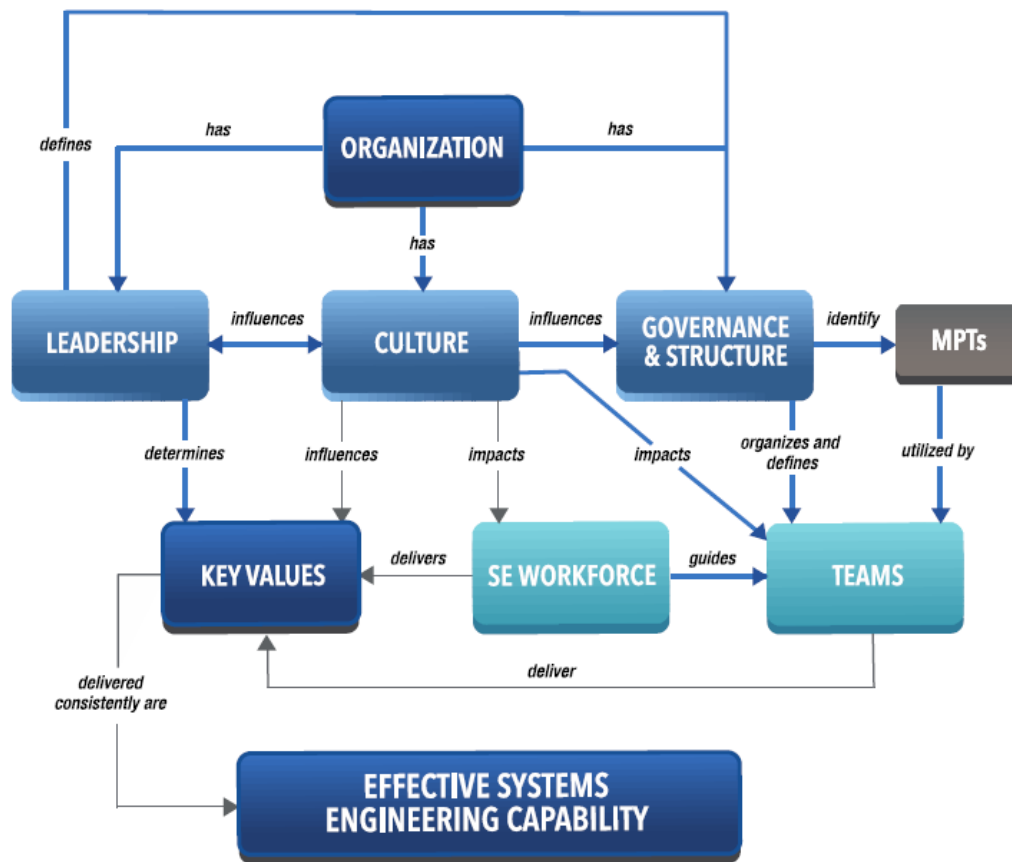
De opgave om de energie-infrastructuur versneld op te schalen vraagt meer dan technische verbeteringen of afzonderlijke standaardisatie-initiatieven. Netbeheerders beschikken al over veel kennis en ervaring met modulair bouwen, standaardisatie en hergebruik. De uitdaging ligt vooral in het organisatiebreed toepassen en verder ontwikkelen van deze kennis, zodat modulariteit, hergebruik en variabiliteit structureel bijdragen aan een hogere uitvoerbaarheid, voorspelbaarheid en opschaalbaarheid van de bouwopgave. De FuESSE Modulaire Bouwstrategie beschouwt deze opgave als een organisatorische transformatie, gericht op de ontwikkeling van het vermogen om modulair bouwen duurzaam toe te passen en te borgen.

8.1.1 Systems Engineering als organisatievermogen

Om modulariteit op schaal toe te passen moeten organisaties in staat zijn om keuzes over strategie, architectuur, uitvoering en beheer met elkaar te verbinden. Dit vraagt om het vermogen om afhankelijkheden zichtbaar te maken, variabiliteit te beheersen en consistente afwegingen te maken tussen prestaties, kosten, risico's, flexibiliteit en maatschappelijke waarde.

Binnen de FuESSE Modulaire Bouwstrategie wordt Systems Engineering daarom niet primair beschouwd als een projectmethodiek of verzameling technieken, maar als een organisatievermogen. Het stelt organisaties in staat samenhang te creëren tussen doelen, stakeholders, architecturen, processen, organisatie-inrichting en besluitvorming gedurende de volledige levenscyclus van infrastructuursystemen. Naarmate netbeheerders meer gebruikmaken van standaardontwerpen, productlijnen en modulaire bouwconcepten neemt de behoefte toe om keuzes rondom hergebruik, standaardisatie en variabiliteit consistent door te vertalen naar projecten, programma's en portfolio's.

De positionering van Systems Engineering als organisatievermogen wordt ondersteund door zowel internationaal onderzoek als ervaringen uit de hightechindustrie. De Helix-studie naar *Systems Engineering Effectiveness* [16] omvatte meer dan 650 professionals uit 31 organisaties in sectoren zoals aerospace, defensie, hightech, software en healthcare. De studie laat zien dat effectieve Systems Engineering niet primair wordt bepaald door processen, methoden of tooling, maar door de samenhang tussen leiderschap, governance, competenties, organisatie-inrichting en technische werkwijzen. Systems Engineering wordt daarbij beschouwd als een organisatiebrede capability die strategie, architectuur, besluitvorming, uitvoering en continu leren met elkaar verbindt.



Figuur 8.1: Effectiviteit van SE als 'capability', i.e. als organisatievermogen (figuur 13 in [16]).¹¹

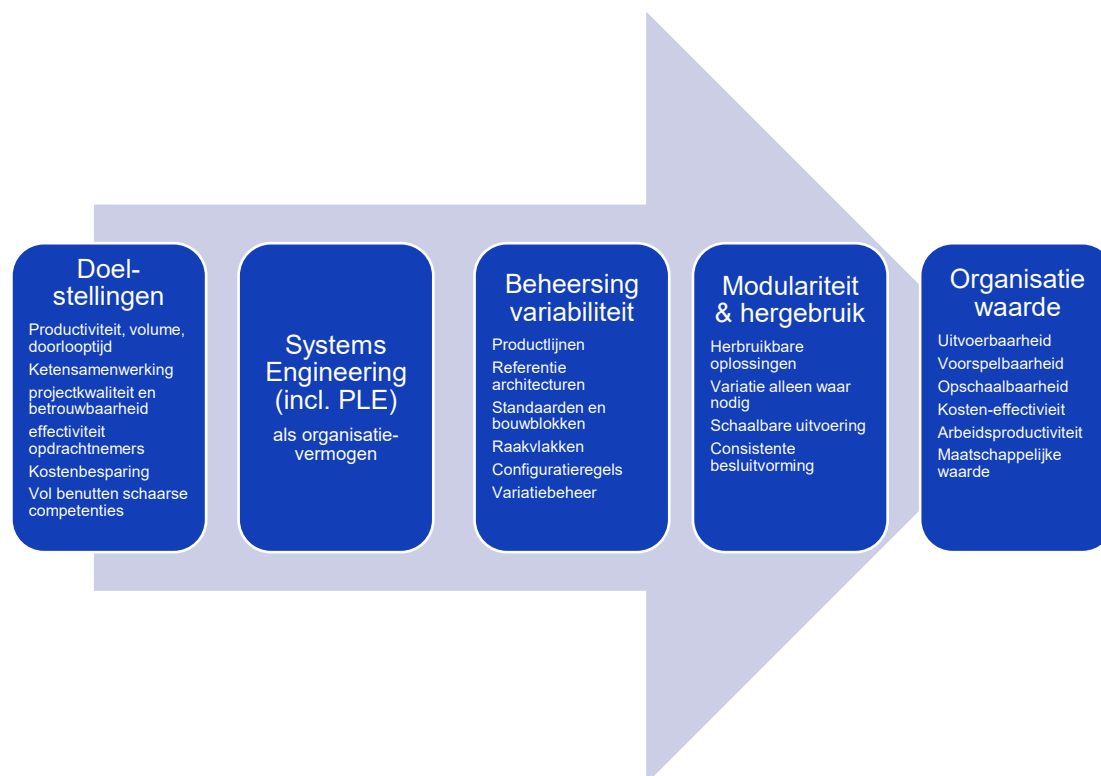
Figuur 8.1 illustreert dat de effectiviteit van Systems Engineering geen eigenschap is van afzonderlijke projecten of personen, maar van het vermogen van een organisatie om structureel samenhang te organiseren tussen strategie, governance, competenties, organisatie-inrichting en technische werkwijzen. De Helix-studie introduceert hiervoor het begrip *Systems Engineering Effectiveness*: niet de kwaliteit van afzonderlijke methoden, processen en tools staat centraal, maar het vermogen van een organisatie om gedurende de gehele levenscyclus consistent betere systeemkeuzes te maken.

Vergelijkbare inzichten komen naar voren uit ervaringen met Product Line Engineering (PLE), platformstrategieën en configure-to-order benaderingen in de hightechindustrie [22] [32], evenals uit de TNO-ESI's MBSE-studies [13] [54]. Deze ervaringen laten zien dat schaalvoordelen niet primair voortkomen uit modulaire producten of standaarden op zichzelf, maar uit het vermogen om architecturen, productlijnen, variabiliteit en besluitvorming organisatiebreed te beheren. De aandacht verschuift daarmee van individuele projecten naar het ontwikkelen van organisatorische capabilities voor architectuurbeheer, productlijnmanagement, configuratiebeheer en levenscyclus-governance.

Vanuit dit perspectief vormt Systems Engineering, met toepassing van Product Line Engineering, het centrale organisatievermogen voor doelmatig modulaair bouwen. Dit maakt het mogelijk om strategische doelstellingen, architecturen, standaarden, productlijnen en besluitvorming met elkaar te verbinden over de volledige levenscyclus van de energie-infrastructuur.

¹¹ MPT staat voor Methods, Processes, and Tools.

De achterliggende redeneerlijn is dat organisatiedoelstellingen, zoals hogere productiviteit, kortere doorlooptijden, betere ketensamenwerking, hogere kwaliteit en een effectievere benutting van schaarse competenties, niet rechtstreeks worden gerealiseerd door standaardisatie of modulariteit alleen. Deze voordelen ontstaan doordat organisaties in staat zijn variatie doelgericht te beheersen. Systems Engineering en de toepassing van Product Line Engineering bieden hiervoor de benodigde organisatorische vermogens, waaronder architectuurbeheer, productlijnmanagement, configuratiebeheer en levenscyclusgovernance. Figuur 8.2 toont deze redeneerlijn.



Figuur 8.2: Redeneerlijn van organisatiedoelstellingen naar organisatiewaarde via beheersing van variabiliteit.

Figuur 8.2 toont een binnen het project ontwikkelde synthese van inzichten uit Systems Engineering, Product Line Engineering en modulariteitsliteratuur. De figuur laat zien hoe Systems Engineering (met toepassing van Product Line Engineering) als organisatievermogen bijdraagt aan het realiseren van organisatiedoelstellingen via de beheersing van variabiliteit.

Systems Engineering, met toepassing van Product Line Engineering, ondersteunt het expliciet beheren van productlijnen, referentiearchitecturen, standaarden, interfaces, configuratieregels en variatie. Hierdoor wordt duidelijk welke onderdelen worden gestandaardiseerd, waar variatie wordt toegestaan en hoe deze variatie over projecten, programma's en portfolio's heen wordt beheerst. Gecontroleerde variabiliteit vormt daarmee de verbindende schakel tussen organisatiedoelstellingen en de schaalbare toepassing van modulariteit en hergebruik.

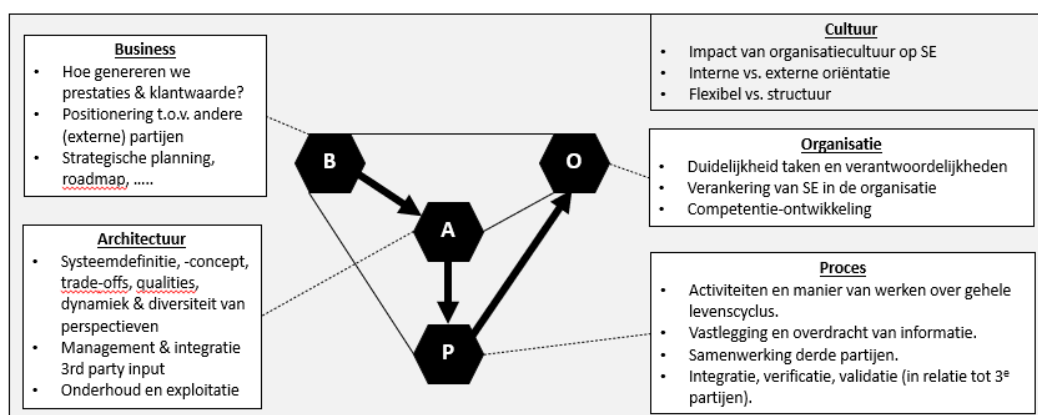
De beheersing van variabiliteit maakt het mogelijk om herbruikbare oplossingen toe te passen, variatie te beperken tot situaties waarin deze daadwerkelijk waarde toevoegt, schaalbare uitvoering te realiseren en besluitvorming te harmoniseren. Hierdoor ontstaat organisatiewaarde in de vorm van een grotere uitvoerbaarheid, betere voorspelbaarheid, hogere opschaalbaarheid, grotere kosteneffectiviteit, hogere arbeidsproductiviteit en meer maatschappelijke waarde.

De Nederlandse netbeheerders bevinden zich daarmee niet aan het begin van modulariteit, maar midden in een bredere organisatorische transitie. Modulaire stations, standaardontwerpen, bouwblokken en standaardisatieprogramma's zijn aanwezig. De volgende stap ligt daarom vooral in het versterken van het organisatievermogen om productlijnen, standaarden, architecturen en gecontroleerde variabiliteit samenhangend te besturen over projecten, programma's en portfolio's heen. Dit organisatievermogen wordt in de volgende paragraaf verder uitgewerkt via het BAPO-raamwerk.

8.1.2 BAPO als ontwikkelkader voor Modulair Bouwen

Het ontwikkelen van Systems Engineering als organisatievermogen vraagt aandacht voor meer dan techniek alleen. Daarom maakt de FuESSE Modulaire Bouwstrategie gebruik van het BAPO-raamwerk (Business, Architecture, Process en Organisation) als integraal ontwikkelkade (zie Figuur 8.3).

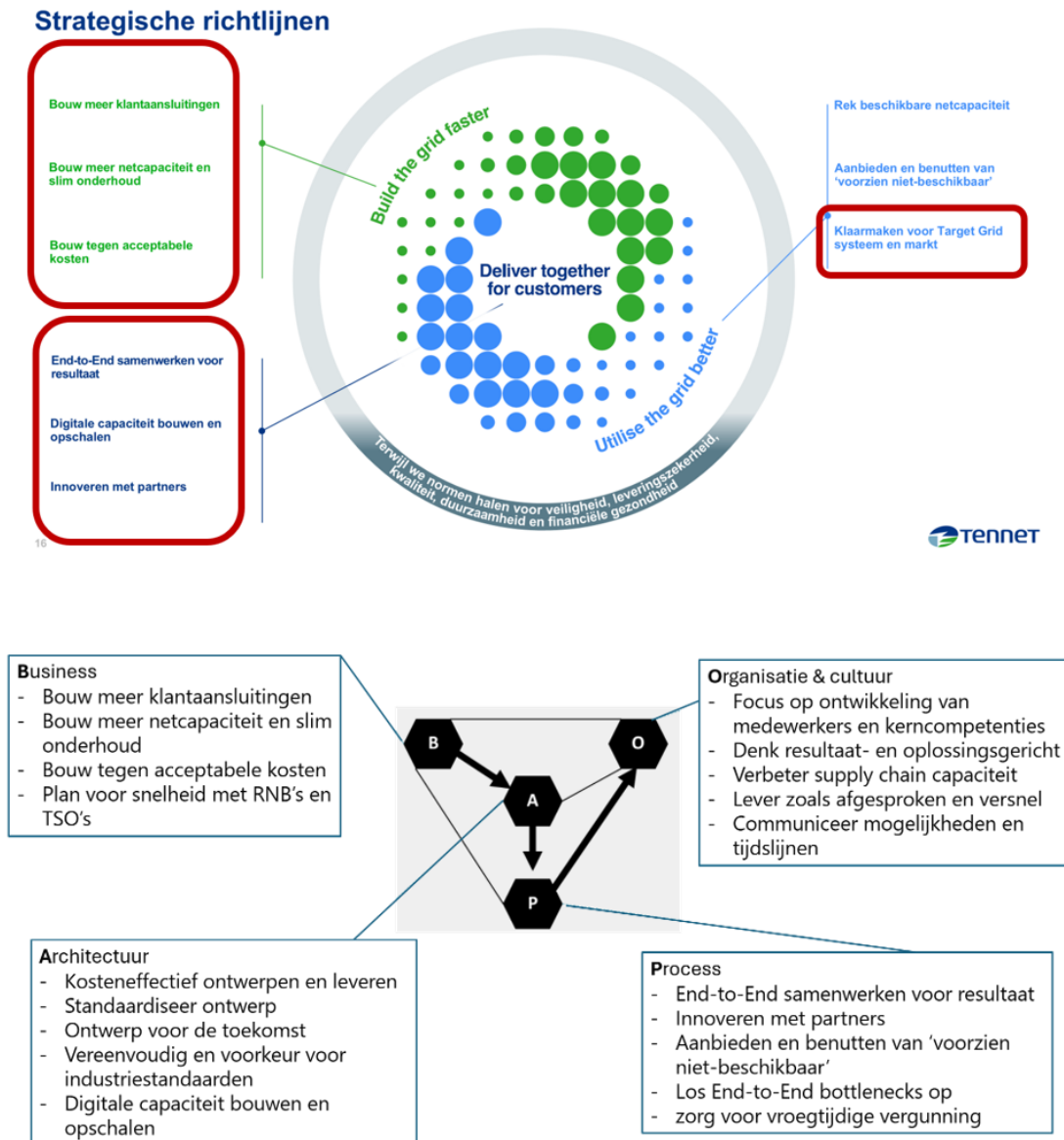
- **Business** richt zich op doelen, waardecreatie, prioriteiten en portfoliokeuzes.
- **Architecture** richt zich op productlijnen, platformen, referentiearchitecturen en de beheersing van variabiliteit.
- **Process** richt zich op herhaalbare werkwijzen, levenscyclusbeheer en voorspelbare realisatie.
- **Organisation** richt zich op governance, rollen, competenties, samenwerking en besluitvorming.



Figuur 8.3: Het BAPO-raamwerk [22] (Business, Architecture, Process en Organisation).

De vier dimensies vormen gezamenlijk de bouwstenen van het organisatievermogen voor modulair bouwen. Architecturen zonder governance leveren beperkte resultaten op, processen zonder eigenaarschap leiden tot versnippering, en standaarden zonder organisatorische borging worden onvoldoende toegepast. Juist de samenhang tussen de vier dimensies bepaalt of organisaties in staat zijn modulair bouwen op grote schaal toe te passen.

Deze noodzaak tot samenhang is ook zichtbaar in de strategieën van netbeheerders. De relevante elementen uit de TenneT-strategie (omkaderd in Figuur 8.4, zie meer detail in [55]) bestrijken alle vier de BAPO-dimensies en laten zien dat succesvolle opschaling vraagt om een geïntegreerde ontwikkeling van business, architectuur, processen en organisatie.



Figuur 8.4: TenneT-strategie (hoofdlijn boven) met betrekking tot bouwopgave afgebeeld op BAPO-dimensies (onder, inclusief meer detail elementen van de strategie) (bron: TenneT).

De Vier-fasen Bouwstrategie Roadmap operationaliseert dit kader en beschrijft hoe de verschillende BAPO-dimensies zich ontwikkelen van richting en analyse naar ontwerp, invoering, opschaling en continue verbetering. Daarmee vormt BAPO het inhoudelijke fundament van de FuESSE Modulaire Bouwstrategie.

8.1.3 Modulair bouwen als veranderopgave

De transitie naar doelmatig modulair bouwen kan worden beschouwd als een capability-transformatie: een geleidelijke ontwikkeling van organisatorische vermogens die organisaties in staat stelt modulariteit, hergebruik en variabiliteit steeds consistentier toe te passen. Dit vraagt niet alleen om technische ontwikkeling, maar ook om expliciete governance, eigenaarschap, competentieontwikkeling en verandermanagement.

Daarom wordt het BAPO-perspectief aangevuld met een governance- en sturingsperspectief. De Drie-laags Governance- en Sturingsroadmap beschrijft hoe besluitvorming, verantwoordingen en eigenaarschap worden georganiseerd op portfolio-, programma- en projectniveau. Hierdoor kunnen strategische keuzes doorwerken naar uitvoering, terwijl ervaringen uit projecten worden teruggekoppeld naar standaarden, productlijnen en beleid.

De FuESSE Modulaire Bouwstrategie is daarbij gebaseerd op de volgende zeven veranderkundige uitgangspunten:

1. Richting vóór standaardisatie.
2. Capabilities vóór oplossingen.
3. Iteratief leren en opschalen.
4. Balans tussen uniformiteit en flexibiliteit.
5. Verankeren in de organisatie.
6. Sturen op samenhang.
7. Continue ontwikkeling.

Samen vormen deze uitgangspunten het conceptuele fundament onder de twee roadmaps die in de volgende paragrafen worden uitgewerkt. Hoewel deze uitgangspunten breed worden onderschreven, vraagt de toepassing ervan in de praktijk om het maken van strategische keuzes. Netbeheerders moeten voortdurend afwegen hoeveel standaardisatie wenselijk is, welke variatie moet worden toegestaan, waar samenwerking meerwaarde oplevert en hoe investeringen in toekomstige opschaalbaarheid zich verhouden tot de druk van de huidige uitvoeringsopgave. Deze afwegingen komen in vrijwel alle organisaties terug en vormen de transitiedilemma's die in de volgende paragraaf worden besproken.

8.2 Status modulair bouwen vs. bouwstrategie

Modulair bouwen is binnen de Nederlandse energiesector geen nieuw concept meer. Hoofdstuk 3 laat zien dat alle betrokken netbeheerders de potentie van modulariteit, standaardisatie en Product Line Engineering erkennen, maar zich in verschillende fasen van ontwikkeling en opschaling bevinden. Verschillen in netstructuur, organisatie-inrichting, marktbenadering en bestaande werkwijzen leiden tot verschillende keuzes in de wijze waarop modulair bouwen wordt vormgegeven.

De analyse uit Hoofdstuk 3 laat ook zien dat de grootste verschillen tussen netbeheerders niet liggen in de toegepaste technologieën, maar in de wijze waarop modulariteit, standaardisatie, productlijnen en eigenaarschap organisatorisch zijn ingebed. Juist deze observatie vormt een belangrijke aanleiding voor de ontwikkeling van de FuESSE Modulaire Bouwstrategie.

Ondanks deze verschillen bestaat een gedeeld fundament. Binnen FuESSE is vastgesteld dat Systems Engineering en Product Line Engineering een gemeenschappelijk uitgangspunt bieden voor de verdere ontwikkeling van modulair bouwen. De concrete invulling kan verschillen, maar de onderliggende principes zijn breed herkenbaar. De FuESSE Modulaire Bouwstrategie biedt hiervoor een gezamenlijk referentiekader.

8.3 Transitiedilemma's bij de opschaling van modulair bouwen

De voorgaande hoofdstukken laten zien dat de verdere ontwikkeling van modulair bouwen niet wordt beperkt door het ontbreken van technische oplossingen, standaarden of

initiatieven. De Nederlandse netbeheerders beschikken inmiddels over een groeiend aantal standaardontwerpen, modulaire bouwconcepten, productlijnen en verbeterprogramma's. De uitdaging verschuift daardoor van het ontwikkelen van oplossingen naar het maken van keuzes over hoe deze oplossingen doelmatig kunnen worden toegepast, beheerd en opgeschaald.

Deze verschuiving brengt een aantal strategische dilemma's met zich mee. Deze dilemma's zijn zichtbaar in de discussies over Product Line Engineering (Hoofdstuk 3), verificatie en validatie (Hoofdstuk 4), ketensamenwerking (Hoofdstuk 5), doelmatige eisen (Hoofdstuk 6) en governance (Hoofdstuk 7). De dilemma's hebben geen universele oplossing, maar maken zichtbaar welke afwegingen netbeheerders moeten maken bij de transitie van projectmatig werken naar een productlijn- en platformgerichte aanpak.

8.3.1 Vijf dilemma's bij de opschaling van modulaair bouwen

De transitie naar modulaair bouwen is niet alleen een technische of methodische verandering, maar vooral een organisatorische en bestuurlijke veranderopgave. Naarmate netbeheerders de stap zetten van projecten naar productlijnen en van lokale optimalisatie naar schaalbare oplossingen, ontstaan nieuwe afwegingen rondom standaardisatie, samenwerking, governance en investeringen. Deze afwegingen komen in vrijwel alle organisaties terug, zij het in verschillende vormen. De onderstaande vijf transitiedilemma's vatten deze vraagstukken samen en vormen het vertrekpunt voor de verdere uitwerking van de FuESSE Modulaire Bouwstrategie.

1. Van projecten naar productlijnen

Netbeheerders zijn van oudsher georganiseerd rond projecten. Budgetten, verantwoordelijkheden en succescriteria zijn vaak gericht op het succesvol realiseren van individuele stations, verbindingen of uitbreidingsprojecten. Vanuit dit perspectief ligt de nadruk op het beperken van risico's, het beheersen van kosten en het opleveren van resultaten binnen de afgesproken projectkaders.

Modulaair bouwen introduceert echter een tweede perspectief. Productlijnen, standaarden, architecturen en herbruikbare bouwblokken worden niet ontwikkeld voor één project, maar voor een hele familie van projecten. Investerings in referentiearchitecturen, productlijnontwikkeling, configuratiebeheer en standaardisatie kunnen op korte termijn extra inspanning vragen, maar leveren op langere termijn schaalvoordelen op. Hierdoor ontstaat een spanning tussen het optimaliseren van individuele projecten en het ontwikkelen van oplossingen die de productiviteit van de gehele organisatie of zelfs van de sector vergroten.

2. Van standaardisatie naar beheersbare variatie

Hoofdstukken 3 en 6 laten zien dat standaardisatie een belangrijke bron van productiviteit, voorspelbaarheid en hergebruik vormt. Tegelijkertijd kent de energie-infrastructuur een grote diversiteit aan locaties, netconfiguraties, vergunningseisen, klantvragen en technische randvoorwaarden. Hierdoor is volledige standaardisatie niet realistisch en vaak ook niet wenselijk.

Het centrale vraagstuk verschuift daarom van standaardisatie naar het beheersen van variatie. Te veel vrijheid leidt tot een groeiend aantal oplossingen, interfaces en uitzonderingen, waardoor de voordelen van modulariteit verloren gaan. Te veel standaardisatie beperkt juist flexibiliteit en toekomstbestendigheid. De uitdaging ligt in het expliciet vastleggen welke onderdelen gemeenschappelijk zijn, waar variatie wordt toegestaan en hoe deze variatie

gedurende de levenscyclus wordt beheerd. Product Line Engineering biedt hiervoor een kader waarin gemeenschappelijkheid en variabiliteit niet als tegenpolen worden gezien, maar als complementaire ontwerpkeuzes.

3. Van autonomie naar harmonisatie

De analyse van de netbeheerders laat zien dat iedere organisatie een eigen geschiedenis, organisatiestructuur, technische infrastructuur en leverancierslandschap heeft. De verschillen zijn vaak logisch vanuit de specifieke context waarin netbeheerders opereren en hebben geleid tot uiteenlopende keuzes op het gebied van standaardisatie en modulair bouwen.

Tegelijkertijd worden veel van de onderliggende uitdagingen steeds meer gedeeld. Schaarste aan personeel, beperkte beschikbaarheid van componenten, stijgende kosten, verificatielasten en de noodzaak tot versnelling raken alle netbeheerders. Bovendien werken veel organisaties met vergelijkbare technologieën, leveranciers en bouwconcepten. Daardoor ontstaat een spanning tussen organisatorische autonomie en sectorbrede harmonisatie. De uitdaging is om samen te werken waar dit aantoonbare meerwaarde oplevert, terwijl ruimte blijft bestaan voor verschillen die noodzakelijk zijn vanwege specifieke omstandigheden of strategische keuzes.

4. Van leveren vandaag naar opschalen morgen

De maatschappelijke urgentie van de energietransitie creëert een sterke druk om op korte termijn resultaten te realiseren. Netbeheerders moeten vandaag stations bouwen, congestie verminderen en de uitvoeringscapaciteit vergroten. Deze druk stimuleert pragmatische oplossingen die snel toepasbaar zijn binnen bestaande organisaties en processen.

Tegelijkertijd vraagt duurzame opschaling om investeringen die pas op langere termijn rendement opleveren. Productlijnen, architecturen, governance, capability-ontwikkeling, ketenintegratie en kennisopbouw vergen tijd voordat zij zichtbaar bijdragen aan productiviteit en uitvoerbaarheid. Hierdoor ontstaat een klassiek transitiedilemma: organisaties moeten gelijktijdig voldoen aan de huidige uitvoeringsopgave én investeren in het productiesysteem dat toekomstige groei mogelijk maakt. Succesvolle opschaling vraagt daarom niet alleen om het realiseren van projecten, maar ook om het ontwikkelen van de organisatorische vermogens die toekomstige productiviteit mogelijk maken.

5. Van lokale keuzes naar gezamenlijke sturing

Naarmate modulariteit verder wordt toegepast, nemen ook de gevolgen van keuzes over standaarden, productlijnen, architecturen, interfaces en variatiebeheer toe. Dergelijke keuzes beïnvloeden niet alleen individuele projecten, maar hebben gevolgen voor programma's, portfolio's, ketenpartners en toekomstige generaties van infrastructuur.

Traditionele projectorganisaties zijn echter vaak ingericht op lokale besluitvorming dicht bij de uitvoering. Dit biedt flexibiliteit en eigenaarschap, maar maakt het tegelijkertijd moeilijk om organisatiebrede of sectorbrede keuzes consequent door te voeren. Het vraagstuk verschuift daardoor van techniek naar governance: welke keuzes worden lokaal gemaakt, welke centraal, en hoe worden belangen afgewogen over projecten, programma's en portfolio's heen? Het antwoord op deze vraag bepaalt in belangrijke mate of modulariteit, hergebruik en productlijnontwikkeling daadwerkelijk schaalvoordelen opleveren.

Deze vijf dilemma's maken zichtbaar dat verdere opschaling niet alleen vraagt om technische standaarden, modulaire bouwblokken of productlijnen. Juist wanneer standaardisatie, hergebruik en modulariteit op grotere schaal worden toegepast, ontstaan nieuwe afhankelijkheden

tussen projecten, organisaties en ketenpartners die besluitvorming, samenwerking en governance beïnvloeden.

Hoewel deze vijf dilemma's verschillende aspecten van de opschaling beschrijven, komen zij uiteindelijk samen in één centrale uitdaging: hoe kunnen netbeheerders tegelijkertijd voldoen aan de urgente maatschappelijke behoefte aan nieuwe infrastructuur én investeren in het productiesysteem dat verdere schaalvergroting mogelijk maakt?

8.3.2 Naar een samenhangende bouwstrategie

Gezamenlijk maken deze vijf dilemma's duidelijk dat de verdere ontwikkeling van modulair bouwen vooral een organisatiekundige en bestuurlijke opgave is. Het vraagstuk gaat niet uitsluitend over standaarden, bouwblokken of stations, maar over het ontwikkelen van een samenhangend productiesysteem waarin strategie, architectuur, processen, governance en ketensamenwerking elkaar versterken.

De dilemma's brengen daarbij de belangrijkste bevindingen uit de voorgaande hoofdstukken samen: verschillen in volwassenheid en productlijnontwikkeling (hoofdstuk 3), de verschuiving naar herbruikbare verificatie- en validatiebenaderingen (hoofdstuk 4), de toenemende afhankelijkheid van ketensamenwerking (hoofdstuk 5), de noodzaak van doelmatige eisen en beheersbare variabiliteit (hoofdstuk 6), en de behoefte aan expliciete governance en eigenaarschap (hoofdstuk 7).

De dilemma's laten bovendien zien dat afzonderlijke verbeterinitiatieven onvoldoende zijn. Standaardisatie zonder governance leidt tot versnippering. Productlijnen zonder duidelijke besluitvorming leiden tot uitzonderingen. Ketenafspraken zonder gezamenlijke richting blijven beperkt tot lokale optimalisaties. Juist de onderlinge afhankelijkheid van deze vraagstukken vraagt om een integrale benadering. De analyses uit hoofdstuk 5 laten zien dat veel voordelen van modulariteit pas ontstaan wanneer afspraken over standaarden, interfaces, informatie-uitwisseling en productlijnen gezamenlijk worden ontwikkeld en beheerd binnen de keten.

De FuESSE Modulaire Bouwstrategie adresseert deze uitdaging. De strategie richt zich niet primair op het ontwikkelen van nieuwe standaarden, maar op het versterken van het organisatievermogen om modulariteit, hergebruik en variabiliteit doelgericht toe te passen, te beheersen en op te schalen over de gehele levenscyclus en keten van de energie-infrastructuur.

8.4 Uitwerking van de FuESSE Modulaire Bouwstrategie

De FuESSE Modulaire Bouwstrategie adresseert de hiervoor beschreven transitiedilemma's via twee complementaire perspectieven:

- Een Vier-fasen Bouwstrategie Roadmap (BAPO-perspectief), en
- Een Drie-laags Governance- en Sturingsroadmap (Portfolio-Programma-Project perspectief).

Samen vormen deze perspectieven het kader om te komen tot een samenhangende, schaalbare en bestuurbare aanpak voor modulair bouwen van HS/MS-stations. Deze roadmaps beschrijven gezamenlijk de ontwikkeling van context en analyse naar ontwerp, implementatie en continue optimalisatie.

8.4.1 Vier-fasen Bouwstrategie Roadmap

De Vier-fasen Bouwstrategie Roadmap beschrijft de inhoudelijke ontwikkeling die nodig is om modulaair bouwen doelmatig op te schalen. De roadmap is uitgewerkt langs de vier BAPO-dimensies Business, Architecture, Process en Organisation en beschrijft de ontwikkeling van richting en analyse, via productlijnontwikkeling en invoering, naar structurele verankering en continue verbetering.

De Vier-fasen Bouwstrategie Roadmap kan worden gezien als een antwoord op de transitie-dilemma's uit de vorige paragraaf. Waar deze dilemma's zichtbaar maken welke strategische afwegingen gemaakt moeten worden, beschrijft de roadmap welke organisatorische ontwikkelingen nodig zijn om deze afwegingen beheersbaar te maken. De roadmap richt zich daarmee niet op het implementeren van één specifieke oplossing, maar op het ontwikkelen van het vermogen om productlijnen, architecturen, standaarden en variabiliteit doelgericht te sturen.

De vier fasen beschrijven niet alleen een technisch ontwerptraject, maar vooral een organisatiebrede transitie: van analyse naar ontwerp, van experiment naar schaal en van implementatie naar een structureel lerend systeem, zie Tabel 8.1.

Tabel 8.1: Overzicht Vier-fasen Bouwstrategie Roadmap (BAPO-perspectief).

Dimensie	Fase 1 – Richting en focus	Fase 2 – Productlijn- ontwikkeling	Fase 3 – Invoering en ketenopschaling	Fase 4 – Verankering en optimalisatie
Business	Waarde & haalbaarheid	Productlijn- en ketenstrategie	Waarde realiseren	Waarde borgen & verhogen
Architecture	Richting bepalen	Platform & varianten	Toepassing	Beheren & doorontwikkelen
Process	Analyse werkwijzen	Productlijn en proces standaardisatie	Uitvoering & Ketenintegratie	Leren & verbeteren
Organisation	Governance starten	Rollen, eigenaarschap & samenwerking	Opschalen organisatie en keten	Verankeren & ontwikkelen

Hoewel de vier fasen opeenvolgend zijn weergegeven, vormen zij geen strikt lineair implementatiepad. In de praktijk zullen netbeheerders zich vaak gelijktijdig in meerdere fasen bevinden. Zo kunnen productlijnen worden doorontwikkeld terwijl bestaande oplossingen al worden opgeschaald en nieuwe governance-structuren worden ingevoerd. De fasen moeten daarom vooral worden gezien als ontwikkelperspectieven die richting geven aan besluitvorming, investeringen en veranderactiviteiten. Iedere fase adresseert bovendien één of meer van de transitiedilemma's uit de vorige paragraaf en draagt bij aan de ontwikkeling van het organisatievermogen dat nodig is voor duurzame opschaling van modulaair bouwen.

De vier fasen zijn de volgende:

Fase 1 – Richting en focus

In deze fase staat het creëren van gezamenlijk begrip centraal. Organisaties bepalen waar modulariteit waarde toevoegt, welke productlijnen relevant zijn en waar standaardisatie wenselijk is. Tegelijk worden eerste keuzes gemaakt over governance, scope, commonality en variability.

In deze fase staat vooral het dilemma tussen autonomie en harmonisatie centraal. Organisaties verkennen welke onderwerpen zich lenen voor standaardisatie en gezamenlijke ontwikkeling, en waar ruimte moet blijven voor lokale verschillen.

Fase 2 – Productlijnontwikkeling

De tweede fase richt zich op het ontwerpen van productlijnen, referentiearchitecturen, platformen, interfaces en configuratiestrategieën, alsmede het organiseren van herbruikbare verificatie- en validatieactiviteiten. Ook worden keuzes gemaakt over de inrichting van de toeleveranciersketen en de rol van opdrachtnemers binnen de productlijn.

Hier verschuift de aandacht naar het dilemma tussen standaardisatie en variabiliteit. Productlijnen maken expliciet welke elementen gemeenschappelijk zijn en waar gecontroleerde variatie wordt toegestaan.

Fase 3 – Invoering en ketenopschaling

De focus verschuift van ontwerp naar toepassing. Productlijnen worden uitgerold in projecten, standaarden worden toegepast in de keten en samenwerking met leveranciers en aannemers wordt ingericht. De nadruk ligt op industrialisatie, herhaalbaarheid en voorspelbare uitvoering.

In deze fase manifesteert zich vooral het dilemma tussen leveren vandaag en opschalen morgen. Organisaties moeten de lopende uitvoeringsopgave blijven realiseren terwijl nieuwe werkwijzen tegelijkertijd worden ingevoerd.

Fase 4 – Verankering en optimalisatie

In de laatste fase wordt modulaar bouwen verankerd als onderdeel van het reguliere operating model. Prestatiesturing, levenscyclusmanagement, continue verbetering en feedback vanuit projecten en beheerorganisaties zorgen voor verdere doorontwikkeling van productlijnen en standaarden. De nadruk verschuift naar het borgen van continue verbetering en het voorkomen van terugval naar projectspecifieke oplossingen.

Gezamenlijk beschrijven de vier fasen de ontwikkeling van modulaar bouwen van het nemen van initiatieven naar een bestuurbaar en schaalbaar productiesysteem. Daarbij verschuift de aandacht stapsgewijs van het bepalen van richting en strategische keuzes, via het ontwerpen van productlijnen en het organiseren van de keten, naar structurele toepassing, borging en continue verbetering. De roadmap maakt daarmee zichtbaar dat succesvolle opschaling niet het resultaat is van één technisch ontwerp of standaard, maar van de samenhangende ontwikkeling van business, architectuur, processen en organisatie. Om deze ontwikkeling daadwerkelijk te realiseren is echter niet alleen inhoudelijke richting nodig, maar ook passende besluitvorming, eigenaarschap en sturing. Daarom wordt de bouwstrategie in de volgende paragraaf aangevuld met de Drielaags Governance- en Sturingsroadmap.

8.4.2 Drielaags Governance- en Sturingsroadmap

De Vier-fasen Bouwstrategie Roadmap beschrijft wat ontwikkeld moet worden. De Drielaags Governance- en Sturingsroadmap beschrijft hoe deze ontwikkeling wordt bestuurd. De roadmap maakt onderscheid tussen portfolio-, programma- en projectniveau en expliciteert hoe besluitvorming, eigenaarschap en verantwoordelijkheid over deze niveaus worden verdeeld.

Naarmate modulariteit verder wordt opgeschaald, verschuiven steeds meer besluiten van projectniveau naar programma- en portfolioniveau. Keuzes over productlijnen, interfaces, standaarden, leveranciersstrategieën en variabiliteitsbeheer hebben invloed op grote aantallen toekomstige projecten en kunnen daarom niet uitsluitend lokaal worden genomen. De

Governance- en Sturingsroadmap maakt zichtbaar waar verschillende typen besluiten thuis horen en hoe consistentie wordt geborgd over de gehele levenscyclus.

De Governance- en Sturingsroadmap wordt ondersteund door de richtinggevendende principes uit paragraaf 7.1.2. Deze beschrijven welke eigenschappen een schaalbaar productiesysteem moet bezitten: uitvoerbaarheid, doelmatigheid en overdraagbaarheid op projectniveau; repeteerbaarheid, eenduidigheid en voorspelbaarheid op programmaniveau; en herbruikbaarheid, beslisvastheid en aanpasbaarheid op portfolioniveau. Samen vormen deze principes het inhoudelijke kompas voor governance, besluitvorming en de verdere ontwikkeling van modulair bouwen.

Het onderliggende uitgangspunt is dat succesvolle opschaling niet alleen afhankelijk is van inhoudelijke keuzes, maar ook van het vermogen om deze keuzes consistent door te vertalen naar programma's, projecten en de uitvoerende keten. Tabel 8.2 laat zien hoe deze verantwoordelijkheden over de drie bestuursniveaus worden verdeeld.

Tabel 8.2: Overzicht Drie-laags Governance- en Sturingsroadmap (Portfolio-Programma-Project perspectief).

Niveau	Fase 1 – Richting en focus	Fase 2 – Productlijn- ontwikkeling	Fase 3 – Invoering en ketenopscaling	Fase 4 – Verankering en optimalisatie
Portfolio	Wat doen we eerst/ niet? <i>Scope & prioritering</i>	Wat standaardiseren we? <i>Keuzes welke productlijn(en)</i>	Hoe gaan we opschalen? <i>Adoptie & beslissingen</i>	Levert het waarde? <i>KPIs & sturing</i>
Programma	Wat hoort bij elkaar? <i>Clustering & samenhang</i>	Hoe maken we het herhaalbaar? <i>Standaarden & aanpak</i>	Houden we ons eraan? <i>Change control & borging</i>	Hoe verbeteren we? <i>Harmonisatie & verbetering</i>
Project	Wat zijn de kaders? <i>Uitgangspunten & randvoorwaarden</i>	Hoe gaan we het toepassen? <i>Configure-to-order</i>	Werken we volgens standaard? <i>Templates & uitvoering</i>	Wat leren we? <i>Feedback & optimalisatie</i>

Het portfolioniveau bepaalt richting en prioriteiten, het programmaniveau ontwikkelt en beheert productlijnen en standaarden, en het projectniveau past deze toe in de praktijk. Samen vormen zij een gesloten leercyclus waarin strategie, ontwikkeling en uitvoering met elkaar verbonden blijven. Hierdoor kunnen keuzes over modulariteit, standaarden en productlijnen consistent worden doorvertaald naar projecten, terwijl ervaringen uit de uitvoering worden benut voor verdere verbetering.

Zowel de Vier-fasen Bouwstrategie Roadmap als de Drielaags Governance- en Sturingsroadmap ondersteunen besluitvorming tijdens de transitie naar modulair bouwen. De overgang tussen fasen vertegenwoordigt daarom niet alleen een ontwikkelstap, maar ook een expliciet beslismoment over scope, productlijnen, investeringen, eigenaarschap en opscaling. De volgende paragraaf werkt deze faseovergangen verder uit als sturings- en beslismomenten.

8.4.3 Faseovergangen als sturings- en beslismomenten

Een belangrijk kenmerk van de FuESSE Modulaire Bouwstrategie is dat de faseovergangen niet uitsluitend ontwikkelstappen vertegenwoordigen, maar ook expliciete besluitmomenten vormen. Op deze momenten moet niet alleen beoordeeld worden of een oplossing technisch

voldoende volwassen is, maar ook of de organisatie gereed is om de benodigde veranderingen in processen, rollen, governance en samenwerking door te voeren.

Organisaties kunnen hierbij verschillende transitiepaden kiezen. Sommige kiezen voor een bredere herinrichting van hun operating model, terwijl andere specifieke organisatieonderdelen inrichten voor productlijnontwikkeling, standaardisatie, ketensamenwerking of de regie op uitbestede activiteiten. Niet de gekozen organisatiestructuur staat daarbij centraal, maar het vermogen om productlijnen, standaarden, variabiliteit en ketensamenwerking duurzaam te verankeren.

De faseovergangen markeren daarom bestuurlijke beslismomenten over de verdere inrichting van het productiesysteem:

- **Fase 1 → Fase 2:** Welke productlijnen, standaarden en variatiepunten zijn kansrijk en waardevol om verder te ontwikkelen?
- **Fase 2 → Fase 3:** Welke oplossingen zijn voldoende volwassen om organisatiebreed en in de keten toe te passen?
- **Fase 3 → Fase 4:** Welke werkwijzen, productlijnen en governance-structuren worden structureel verankerd?

Naarmate organisaties verder opschalen verschuift de aandacht van het ontwikkelen van oplossingen naar het ontwikkelen van het vermogen om deze oplossingen duurzaam toe te passen, te beheren en door te ontwikkelen. De gewenste eindtoestand is daarom niet een verzameling standaarden of modulaire bouwblokken, maar een schaalbaar productiesysteem waarin productlijnen, processen, governance en ketenpartners gezamenlijk bijdragen aan een voorspelbare en doelmatige uitbreiding van de energie-infrastructuur.

8.5 Conclusies en aanbevelingen

De bevindingen uit hoofdstuk 5, 6 en 7 laten zien dat de grootste uitdagingen rondom modulaair bouwen niet afzonderlijk kunnen worden beschouwd. Samenwerkingsdilemma's in de keten, afwegingen rondom doelmatigheid van eisen en standaarden, en vraagstukken rondom governance en eigenaarschap zijn verschillende uitingen van dezelfde onderliggende transitie: de verschuiving van projectmatig werken naar een modulaire aanpak gebaseerd op standaarden, productlijnen en herbruikbare bouwblokken. Hierdoor ontstaan nieuwe afwegingen tussen flexibiliteit en standaardisatie, lokale optimalisatie en schaalvoordelen, en autonomie en harmonisatie.

De centrale stelling van de FuESSE Modulaire Bouwstrategie is dat doelmatige opschaling niet primair wordt bereikt door betere technische oplossingen, maar door het versterken van het organisatorische vermogen om modulariteit, hergebruik en variabiliteit doelgericht te sturen. Systems Engineering vormt daarbij de integrerende 'capability' die strategie, architectuur, processen, governance en uitvoering met elkaar verbindt. De combinatie van de Vierfasen Bouwstrategie Roadmap en de Drie-laags Governance- en Sturingsroadmap biedt hiervoor een samenhangend ontwikkel- en sturingskader, waarin de inhoudelijke ontwikkeling en organisatorische verankering expliciet met elkaar worden verbonden. Een verdere verdieping van de activiteiten, resultaten, besluitmomenten en ketenuitwerking per fase is opgenomen in Bijlage D.

Tegelijkertijd laat de studie zien dat er geen uniforme route naar modulaair bouwen bestaat. Netbeheerders verschillen in context, volwassenheid, organisatie-model en mate van standaardisatie, en bevinden zich daardoor in verschillende fasen van de bouwstrategie. De bouwstrategie moet daarom niet worden gezien als een voorschrijvende implementatie-

methode, maar als een gezamenlijk referentiekader dat organisaties helpt hun huidige positie te bepalen, transitiedilemma's bespreekbaar te maken en gerichte vervolgstappen te definiëren. Duurzame verbetering ontstaat daarbij alleen wanneer Business, Architectuur, Processen en Organisatie zich in samenhang ontwikkelen; modulair bouwen is daarmee uiteindelijk een organisatiebrede veranderopgave en niet uitsluitend een technische vernieuwing.

Aanbevelingen

1. Gebruik de FuESSE Modulaire Bouwstrategie als gemeenschappelijk ontwikkelkader.

Positioneer bestaande initiatieven rondom Systems Engineering, standaardisatie, productlijnontwikkeling, digitalisering en ketensamenwerking expliciet binnen de Vier-fasen Bouwstrategie Roadmap en de Drie-laags Governance- en Sturingsroadmap. Hierdoor wordt zichtbaar welke opgaven samenhangen, waar hiaten zitten en welke vervolgstappen prioriteit hebben. *Veel initiatieven worden vandaag nog afzonderlijk aangestuurd, waardoor samenhang en opschaling beperkt blijven. Een gezamenlijk ontwikkelkader vergroot de effectiviteit van investeringen en versterkt de samenhang tussen strategie, programma's en projecten.*

2. Ontwikkel Systems Engineering en Product Line Engineering als organisatievermogen.

Investeer niet alleen in standaarden, architecturen, processen en tooling, maar ook in competenties, governance, productlijnmanagement, verandermanagement en leiderschap. Positioneer Systems Engineering expliciet als de capability die strategie, architectuur, uitvoering en continue verbetering met elkaar verbindt.

Duurzame schaalvoordelen ontstaan niet door modulaire oplossingen alleen, maar door het vermogen om modulariteit, hergebruik en variabiliteit organisatiebreed te besturen en continu door te ontwikkelen.

3. Pas de bouwstrategie situationeel toe en vermijd een one-size-fits-all benadering.

Erken dat netbeheerders zich in verschillende ontwikkelfasen bevinden en verschillende uitgangsposities hebben. Gebruik de roadmap als referentiekader om de huidige positie te bepalen, transitiedilemma's zichtbaar te maken en organisatiespecifieke vervolgstappen te definiëren.

Dit voorkomt generieke implementatieprogramma's en maakt het mogelijk om investeringen, prioriteiten en verandertrajecten beter af te stemmen op de context van iedere netbeheerder.

4. Versterk de verbinding tussen netbeheerders, opdrachtnemers en de toeleveranciersketen.

Integreer ketenstrategie, ketensamenwerking en opdrachtnemers expliciet in de verdere uitwerking van productlijnen, standaarden en bouwblokken. Richt de transitie niet alleen op interne harmonisatie, maar op de gehele keten.

Veel voordelen van modulariteit ontstaan pas wanneer standaardisatie, informatie-uitwisseling en werkwijzen ook doorwerken naar leveranciers, engineeringpartijen en aannemers. Dit vergroot productiviteit, voorspelbaarheid en opschaalbaarheid over de gehele keten.

9 Conclusies en aanbevelingen

De Nederlandse energiesector staat voor een opgave zonder precedent. In de komende tien jaar moet meer energie-infrastructuur worden gerealiseerd dan in de decennia daarvoor, terwijl netcongestie, arbeidsmarktkrapte en capaciteitsbeperkingen in de uitvoeringsketen verder toenemen. De maatschappelijke kosten van vertraging lopen inmiddels op tot tientallen miljarden euro's per jaar. De vraag is daarom niet langer óf de sector moet versnellen, maar hoe deze versnelling structureel kan worden gerealiseerd.

Deze studie laat zien dat de grootste belemmeringen voor verdere opschaling niet primair technisch zijn. De uitdaging ligt steeds meer in het vermogen van organisaties en ketens om standaardisatie, hergebruik, modulariteit, samenwerking en besluitvorming op schaal te organiseren. De opgave verschuift daarmee van het optimaliseren van afzonderlijke projecten naar het ontwikkelen van het organisatorische vermogen om energie-infrastructuur voorspelbaar, herhaalbaar en schaalbaar voort te brengen.

In dit hoofdstuk worden de observaties uit deze studie gegeven in paragraaf 9.1. Daarna volgen conclusies in paragraaf 9.2, en aanbevelingen in paragraaf 9.3. Deze observaties, conclusies en aanbevelingen vormen een synthese van de conclusies en aanbevelingen uit de voorgaande hoofdstukken. Waar de eerdere hoofdstukken afzonderlijke perspectieven uitwerken, brengt dit hoofdstuk deze inzichten samen tot een overkoepelend beeld van de belangrijkste uitdagingen, conclusies en handelingsperspectieven voor de verdere opschaling van modulair bouwen.

9.1 Observaties

De onderstaande observaties beschrijven de belangrijkste ontwikkelingen die tijdens deze studie zichtbaar zijn geworden. Zij laten zien dat de sector zich geleidelijk ontwikkelt van projectgericht werken naar een meer gestandaardiseerde, modulaire en schaalbare manier van ontwikkelen en realiseren. Daarbij verschuift de aandacht steeds meer van technische oplossingen naar de organisatorische vermogens die nodig zijn om deze oplossingen op grote schaal toe te passen.

1. Modulair bouwen krijgt een steeds prominentere positie in de strategie van netbeheerders.

Waar standaardisatie, hergebruik en modulaire bouwblokken voorheen vooral werden ingezet om individuele projecten efficiënter uit te voeren, worden zij steeds vaker gezien als strategische instrumenten om uitvoerbaarheid, voorspelbaarheid en opschaalbaarheid te vergroten. De aandacht verschuift daarmee van projectoptimalisatie naar productlijnen, herbruikbare bouwblokken en een meer industriële manier van ontwikkelen en realiseren. Deze ontwikkeling is zichtbaar bij alle betrokken netbeheerders.¹²

¹² "Modulair Bouwen, tenzij" is al geruime tijd het credo bij Alliander. TenneT positioneert modulair bouwen expliciet als versnellingsstrategie voor de uitbreiding van het elektriciteitsnet [43]; bij Stedin is Modulair Bouwen nu een Raad van Bestuur thema.

2. Netbeheerders volgen verschillende ontwikkelpaden, maar zoeken steeds nadrukkelijker de samenwerking op.

De analyses laten zien dat organisaties verschillende keuzes maken in de toepassing van modulariteit, standaardisatie en Systems Engineering. Tegelijkertijd groeit de erkenning dat de huidige opgave vraagt om meer harmonisatie, hergebruik en samenwerking. Ruimte blijft bestaan voor organisatiespecifieke keuzes, terwijl tegelijkertijd wordt gewerkt aan een sterker gezamenlijk fundament voor de verdere ontwikkeling van modulair bouwen binnen de sector.

3. De verdere digitalisering van de energie-infrastructuur vergroot het belang van architectuur- en variabiliteitsbeheer.

Hoewel de huidige aandacht van netbeheerders vooral uitgaat naar het versnellen van de fysieke uitbreidings- en vervangingsopgave, wijzen ontwikkelingen rond flexibilisering, congestiemanagement en de integratie van decentrale energiebronnen erop dat het elektriciteitsnet in de toekomst steeds meer digitale functionaliteit zal bevatten. Hierdoor zal de complexiteit verschuiven van afzonderlijke fysieke assets naar geïntegreerde systemen waarin hardware, software, data en besturing nauw met elkaar samenhangen. Het belang van architectuurbeheer, Systems Engineering en Product Line Engineering zal daardoor verder toenemen, zowel voor de bouwopgave als voor de toekomstbestendigheid van de energie-infrastructuur.

9.2 Conclusies

De analyses in dit rapport laten een consistent beeld zien. De belangrijkste uitdagingen voor verdere opschaling van de energie-infrastructuur liggen steeds minder in de technische haalbaarheid van modulair bouwen en steeds meer in het realiseren van een voorspelbare en schaalbare realisatie middels het organiseren van hergebruik, standaardisatie, modulariteit, samenwerking en besluitvorming. De onderstaande conclusies vatten deze inzichten samen.

1. Modulair bouwen is primair een organisatorische transformatie, geen technische transformatie.

De studie laat zien dat de technische bouwstenen voor modulair bouwen in grote mate beschikbaar zijn. Vrijwel alle netbeheerders werken inmiddels met standaardontwerpen, modulaire bouwblokken en vormen van hergebruik. De grootste uitdagingen liggen daardoor niet langer in de technische haalbaarheid van modulair bouwen, maar in het vermogen om standaardisatie, hergebruik en modulariteit organisatiebreed te sturen en te borgen. Succesvolle opschaling vraagt daarom niet alleen om technische standaarden, maar vooral om passende governance, eigenaarschap, besluitvorming, samenwerking en competentieontwikkeling.

2. Doelmatige opschaling vraagt om sturen op producten en productlijnen in plaats van afzonderlijke projecten.

Veel werkwijzen, processen en besluitvormingsstructuren zijn historisch gericht op het optimaliseren van afzonderlijke projecten. De bouwopgave vraagt echter om een benadering waarin producten, productlijnen en architecturen over projecten heen worden ontwikkeld, beheerd en doorontwikkeld. Hierdoor verschuift de aandacht van projectoptimalisatie naar het systematisch ontwikkelen en beheren van herbruikbare en modulaire oplossingen.

3. Voorspelbare en schaalbare realisatie vraagt om hergebruik, harmonisatie en samenwerking.

De studie laat zien dat duurzame opschaling vooral ontstaat wanneer standaarden, modulaire bouwblokken, kennis en werkwijzen project- en organisatie-overstijgend worden ontwikkeld en hergebruikt. Verschillen in eisen, standaarden, processen en besluitvorming beperken deze schaalbaarheid en voorspelbaarheid nog vaak. Harmonisatie, standaardisatie, modulariteit en samenwerking vergroten de voorspelbaarheid van werkstromen en

besluitvorming, verlagen risico's en maken effectiever gebruik van schaarse uitvoeringscapaciteit.

4. De FuESSE Modulaire Bouwstrategie biedt een gezamenlijk ontwikkelkader voor verdere opschaling.

De voorgestelde strategie laat zien hoe modulariteit, standaardisatie, Systems Engineering, Product Line Engineering, governance en ketensamenwerking met elkaar kunnen worden verbonden. De studie bevestigt dat netbeheerders verschillende uitgangspunten en ontwikkelpaden kennen, maar tegelijkertijd een gemeenschappelijke richting herkennen waarin modulair bouwen wordt ingezet als middel voor een voorspelbare en schaalbare realisatie van de energie-infrastructuur.

De studie laat zien welke uitgangspunten inmiddels voldoende duidelijk zijn om vast te leggen, welke vraagstukken verdere uitwerking vragen en welke organisatorische randvoorwaarden moeten worden geborgd. Productlijnen vóór projecten, expliciet variatiebeheer en samenwerking als uitgangspunt vormen daarbij de kern voor voorspelbare en schaalbare realisatie. De aanbevelingen in de volgende paragraaf vertalen deze inzichten naar concrete handelingsperspectieven voor verdere opschaling.

9.3 Aanbevelingen

De analyses in dit rapport laten zien dat verdere opschaling van de energie-infrastructuur niet primair wordt beperkt door techniek, maar door de wijze waarop organisaties, ketens en de sector als geheel zijn ingericht. De onderstaande aanbevelingen richten zich daarom op de belangrijkste hefboomen voor productiviteit, samenwerking, kwaliteit en opschaalbaarheid. Samen vormen zij een handelingsperspectief voor netbeheerders om modulariteit verder te ontwikkelen van een verzameling initiatieven naar een structureel organisatie- en sectorvermogen dat bijdraagt aan hogere productiviteit, kortere doorlooptijden, betere samenwerking, hogere betrouwbaarheid, lagere kosten en een effectiever gebruik van schaarse expertise.

1. Ontwikkel een expliciete governance- en sturingsstrategie voor modulariteit, productlijnen en variabiliteitsbeheer.

Benader modulair bouwen niet als een verzameling standaarden of projecten, maar als een strategische keuze voor de inrichting van het toekomstige bouw- en ontwikkelsysteem. Vertaal organisatiedoelen expliciet naar keuzes rond productlijnen, standaardproducten, variatiebeheer en levenscyclusmanagement.

Dit vergroot de productiviteit en uitvoeringscapaciteit, verkort doorlooptijden en maakt een doelmatiger inzet van schaarse kennis, mensen en middelen mogelijk.

2. Richt organisatievermogen voor modulariteit en productlijnen expliciet in.

Investeer gericht in architectuurbeheer, productlijnontwikkeling, governance, competentieontwikkeling en verandermanagement. Verplaats kennis, ontwerpkeuzes, verificatiebewijzen, configuratieregels en geleerde lessen zoveel mogelijk van individuele projecten naar standaarden en productlijnen.

Dit vermindert dubbel werk, verhoogt kwaliteit en betrouwbaarheid, borgt kennis en maakt organisaties minder afhankelijk van individuele experts.

3. Versterk harmonisatie en samenwerking in de keten.

Ontwikkel langdurige samenwerkingsrelaties waarin netbeheerders, opdrachtnemers en leveranciers gezamenlijk werken aan standaardisatie, modulariteit, uitvoerbaarheid en continue verbetering. Vergroot daarnaast de voorspelbaarheid van vraagontwikkeling, portfolio's,

werkstromen en besluitvorming. Versnel daarnaast de harmonisatie van standaarden, interfaces, informatie-uitwisseling, IVVQ-aanpakken en architectuurprincipes tussen netbeheerders. *Dit vergroot hergebruik en voorspelbaarheid in de keten, waardoor opdrachtnemers effectiever kunnen opschalen en projecten sneller en met hogere kwaliteit kunnen worden gerealiseerd.*

4. Organiseer sectorbrede sturing op samenhang, prioritering en toekomstige ontwikkelingen.

Bundel bestaande initiatieven rond modulariteit, digitalisering, Systems Engineering en ketensamenwerking in een samenhangend ontwikkelprogramma. Richt aandacht op het verbinden, prioriteren en opschalen van bestaande activiteiten. Houd daarbij expliciet rekening met levenscycluswaarde, digitalisering en de toenemende verwevenheid van IT- en OT-systemen. *Dit voorkomt versnippering van middelen en expertise, vergroot de toekomstbestendigheid van de energie-infrastructuur en zorgt ervoor dat investeringen maximaal bijdragen aan de strategische doelstellingen van de sector.*

De maatschappelijke opgave vraagt niet om meer losse verbeterinitiatieven, maar om gerichte keuzes die leiden tot hogere productiviteit, kortere doorlooptijden en betere benutting van schaarse capaciteit. De vier aanbevelingen hierboven richten zich daarom op de belangrijkste hefboomen voor opschaling: productlijnvorming, organisatievermogen, ketensamenwerking en sectorbrede sturing. Gezamenlijk bieden zij een handelingsperspectief om modulair bouwen te ontwikkelen van een verzameling initiatieven naar een structureel vermogen om de energie-infrastructuur sneller, voorspelbaarder en op grotere schaal te realiseren.

9.4 Call to Action

De komende jaren bepalen of netbeheerders erin slagen de overgang te maken van projectmatig bouwen naar industriële schaalvergroting. De benodigde technologie is grotendeels beschikbaar en de richting wordt breed herkend. De uitdaging ligt nu in het opschalen van bewezen werkwijzen op organisatie- en sectorniveau. De oproep van deze studie aan netbeheerders is daarom helder: investeer niet primair in nieuwe oplossingen, maar in het vermogen om bestaande oplossingen sneller, consistent en op grotere schaal toe te passen.

Maak samenwerking het uitgangspunt voor opschaling. Organiseer modulariteit, standaardisatie en hergebruik gezamenlijk, en wijk alleen af waar dit aantoonbare meerwaarde oplevert.

Alleen zo kan de sector de benodigde productiviteitsprong en schaalvergroting realiseren in de ontwikkeling, realisatie en instandhouding van de energie-infrastructuur. Iedere verdere vertraging vergroot de maatschappelijke schade en vertraagt de economische ontwikkeling, woningbouw en energietransitie waarvoor deze infrastructuur juist bedoeld is.

10 Referenties

- [1] Ecorys (in opdracht van RVO), „De netto maatschappelijke kostprijs van netcongestie,” 21 Augustus 2025. [Online]. Available: <https://open.overheid.nl/documenten/cec87d92-5128-4aa4-9abc-06f6ff877dec/file>.
- [2] NOS Nieuws, „Gasgeneratoren moeten stroomnet Utrecht ook op piektijden betrouwbaar houden,” NOS, 21 Juli 2026. [Online]. Available: <https://nos.nl/artikel/2623826-gasgeneratoren-moeten-stroomnet-utrecht-ook-op-piektijden-betrouwbaar-houden>.
- [3] Ecorys (in opdracht van RVO), „Maatschappelijke kosten netcongestie,” 25 Juni 2024. [Online]. Available: <https://www.rijksoverheid.nl/site/binaries/site-content/collections/documents/2024/06/25/studie-maatschappelijke-kosten-netcongestie/Maatschappelijke+kostprijs+van+netcongestie+29+04+2024.pdf>.
- [4] Netbeheer Nederland, „Nieuwe netcapaciteitskaart, wachtrij-informatie en uitvoeringsdashboard: nu snel door met bouwen,” 6 Juni 2024. [Online]. Available: <https://www.netbeheernederland.nl/artikelen/persbericht/nieuwe-netcapaciteitskaart-wachtrij-informatie-en-uitvoeringsdashboard-nu>. [Geopend 17 Augustus 2026].
- [5] Netbeheer Nederland, „Stand van de Uitvoering 2025,” 2026.
- [6] Netbeheer Nederland, „Netcongestiekaartnederland.nl,” Netbeheer Nederland, [Online]. Available: <https://netcongestiekaartnederland.nl/>. [Geopend 16 Juli 2026].
- [7] Netbeheer Nederland, „Het energiesysteem van de toekomst: de II3050-scenario's - Integrale energiesysteemverkenning 2030-2050,” June 2023. [Online]. Available: <https://www.netbeheernederland.nl/publicatie/rapport-ii3050-scenarios>.
- [8] Ecorys (in opdracht van TenneT), „Maatschappelijke impact van tijdige netuitbreiding door TenneT,” 20 November 2024. [Online]. Available: <https://www.ecorys.com/nl/case-studies/social-impact-of-timely-investments-in-the-dutch-high-voltage-grid/>. [Geopend 21 Augustus 2026].
- [9] Netbeheer Nederland, „Landelijk Actieprogramma Netcongestie,” 2022. [Online]. Available: <https://open.overheid.nl/documenten/ronl-4a4a6f1bcb4f30278f4205aeb085c3208f62e8a6/pdf>.
- [10] Arcadis (in opdracht van Nederlandse Vereniging Duurzame Energie (NVDE)), „Vertrouwen in elkaar, sneller beslissen, anders omgaan met risico's,” 2 Maart 2026. [Online]. Available: <https://www.nvde.nl/arcadis-energietransitie-kan-tot-75-sneller-binnen-bestaande-regels/>.
- [11] B. Flyvbjerg, A. Budzier en M. Christodoulou, „Towards a Theory of Modular Natives: Explaining Superscaling, China's Greatest Innovation Yet,” SSRN, 16 May 2026. [Online]. Available: https://papers.ssrn.com/sol3/papers.cfm?abstract_id=6755340. [Geopend 20 Juli 2026].
- [12] INCOSE, INCOSE systems engineering handbook, John Wiley & Sons, 2023.
- [13] J. Wesselius, J. van den Aker, R. Doornbos, T. Hendriks, J. Marincic en W. Tabingh Suermondt, „TNO R2022 R11504 MBSE in the High-Tech Equipment Industry,” TNO-ESI, Eindhoven, The Netherlands, 2022.

- [14] NASA, NASA Systems Engineering Handbook, NASA Headquarters, Washington, D.C.: National Aeronautics and Space Administration, 2017.
- [15] M. Maier en E. Rechtin, The Art of Systems Architecting, vierde red., Boca Raton, FL: CRC Press, 2025.
- [16] N. Hutchison, „Helix - Organizational Systems Engineering Effectiveness,” Systems Engineering Research Center, Stevens Institute of Technology, 7 July 2020. [Online]. Available: <https://apps.dtic.mil/sti/pdfs/AD1104588.pdf>.
- [17] T. Hendriks, J. Marincic, J. Verriet en R. Ekkel, „TNO 2025 R10501 Systems Engineering voor de energie-infrastructuur,” TNO, Eindhoven, 2025.
- [18] ACM, „Focus op Energie 2026,” Autoriteit Consument & Markt, 13 Februari 2026. [Online]. Available: <https://www.acm.nl/nl/publicaties/focus-op-energie-2026>.
- [19] Netbeheer Nederland, „Feiten en cijfers,” [Online]. Available: <https://www.netbeheernederland.nl/feiten-en-cijfers>.
- [20] S. Hermans, „BRIEF VAN DE MINISTER VAN KLIMAAT EN GROENE GROEI,” Tweede Kamer, vergaderjaar 2025–2026, 29 023, nr. 597, Den Haag, 6 oktober 2025.
- [21] P. America, H. Obbink, R. van Ommering en F. van der Linden, „CoPAM: A Component-Oriented Platform Architecting Method Family for Product Family Engineering,” in *Software Product Lines: Experience and Research Directions*, P. Donohoe, Red., Boston, MA: Springer US, 2000, p. 167–180.
- [22] F. van der Linden, J. Bosch, E. Kamsties, K. Känsälä, L. Krzanik en H. Obbink, „Software Product Family Evaluation,” in *Software Product-Family Engineering*, 2004.
- [23] A. C. Ward en D. K. Sobek II, Lean product and process development, tweede red., Lean Enterprise Institute, 2014.
- [24] M. Kennedy, Product development for the lean enterprise, Oaklea Press, 2008.
- [25] C. Kaner, J. Bach en B. Pettichord, Lessons Learned in Software Testing, New York: Wiley, 2002.
- [26] M. J. Ryan en L. S. Wheatcraft, „On the Use of the Terms Verification and Validation,” in *27th Annual INCOSE International Symposium (IS 2017)*, Adelaide, 2017.
- [27] E. van Veenendaal, R. Black en D. Graham, Foundations of Software Testing, vijfde red., Cengage, 2024.
- [28] M. Felderer en R. Ramler, „Integrating risk-based testing in industrial processes,” *Software Quality Journal*, vol. 22, pp. 543-575, 2014.
- [29] K. Blomqvist, P. Hurmelinna en R. Seppänen, „Playing the collaboration game right: Balancing trust and contracting,” *Technovation*, vol. 25, nr. 5, pp. 497-504, 2005.
- [30] A. Smolders, Trust unravelled: In inter-organisational relationships in a regulated tender environment, Delft: Dissertation (TU Delft), Delft University of Technology, 2019.
- [31] J. Bosch, Design and use of software architectures: Adopting and evolving a product-line approach, Addison-Wesley, 2000.
- [32] F. van der Linden, K. Schmid en E. Rommes, Software Product Lines: The Best Industrial Practice in Product Line Engineering, Berlin Heidelberg New York: Springer Science & Business Media, 2007.
- [33] J. H. Dyer en H. Singh, „The Relational View: Cooperative Strategy and Sources of Interorganizational Competitive Advantage,” *Academy of management review*, vol. 23, nr. 4, pp. 660-679, 1998.
- [34] Cooperante, „Succesvol samenwerken - Vertrouwen: de basis voor betere prestaties,” Cooperante, [Online]. Available: <https://cooperante.nl/succesvol-samenwerken/>. [Geopend 16 Juli 2026].

- [35] CROW, *Uniforme Administratieve Voorwaarden voor de uitvoering van werken en van technische installatiewerken 2012 (UAV 2012)*, Ede: CROW, 2012.
- [36] CROW, *Uniforme Administratieve Voorwaarden voor Geïntegreerde Contractvormen 2025 (UAV-GC 2025)*, Ede: CROW, 2025.
- [37] NEC, *NEC4 Engineering and Construction Contract (ECC)*, London: Thomas Telford Ltd, 2017.
- [38] J. Lukkien, A. Mooij en R. Ekkel, „TNO 2026-17671 Digitale informatie-uitwisseling tussen netbeheerders en opdrachtnemers,” TNO, Eindhoven, 2026.
- [39] J. van Gemeren, „Van ontwerpen aan het net van vandaag naar testen voor het energiesysteem van morgen,” LinkedIn, 17 Juli 2026. [Online]. Available: https://www.linkedin.com/posts/joost-van-gemeren-87424a9_energietransitie-stedin-elaadnl-share-7483801426830368768-QDJp/.
- [40] L. D. Miles, *Techniques of Value Analysis and Engineering*, New York: McGraw-Hill, 1961.
- [41] ISO, *ISO/IEC/IEEE 29148:2018 Systems and software engineering - Requirements Engineering*, International Standards Organization, 2018.
- [42] L. S. Wheatcraft, M. J. Ryan en T. E. Katz, *INCOSE Needs and Requirements Manual: Needs, Requirements, Verification, Validation Across the Lifecycle*, John Wiley & Sons, 2024.
- [43] T. Hendriksen, „Sturen op Waarde (presentatie voor DACE Contactbijeenkomst),” 27 November 2025. [Online]. Available: <https://www.dace.nl/nl/library/download/urn:uuid:65d53091-7f77-4132-92a9-2de69f168443/sturen+op+waarde+dace+contactbijeenkomst+27+nov+25.pdf>.
- [44] E. Rebentisch, D. H. Rhodes en E. Murman, „Lean systems engineering: research initiatives in support of a new paradigm,” *Systems Engineering*, vol. 4, nr. 1, 2004.
- [45] B. Boehm en L. Huang, „Value-based software engineering: A case study,” *Computer*, vol. 36, nr. 3, pp. 33-41, 2003.
- [46] Nature, „Software Product Line Engineering and Variability Management,” Nature, [Online]. Available: <https://www.nature.com/nature-index/topics/l4/software-product-line-engineering-and-variability-management>. [Geopend 2026 July 20].
- [47] Requirements Working Group, „INCOSE Guide to Writing Requirements,” INCOSE, 2023.
- [48] Rijkswaterstaat, „Meerjarenplan instandhouding Rijkswaterstaat-netwerken 2025-2030,” 24 Juni 2025. [Online]. Available: <https://www.rijksoverheid.nl/documenten/2025/07/01/bijlage-2-meerjarenplan-instandhouding-rijkswaterstaat-netwerken-2025-2030>.
- [49] Ernst & Young, „Portfolio management transformation - How to effectively screen and align your program portfolio with with strategic objectives,” Ernst & Young, 2015.
- [50] H. A. Levine, *Project portfolio management: a practical guide to selecting projects, managing portfolios, and maximizing benefits*, John Wiley & Sons, 2005.
- [51] R. Müller, M. Martinsuo en T. Blomquist, „Project portfolio control and portfolio management performance in different contexts,” *Project management journal*, vol. 39, nr. 3, pp. 28-42, 2008.
- [52] PMI, *The standard for portfolio management*, Chicago: Project Management Institute, 2017.
- [53] M. Moore, *Creating Public Value: Strategic Management in Government*, Cambridge: Harvard University Press, 1995.

- [54] T. Hendriks, J. van den Aker, W. Tabingh Suermondt en B. Pronk, „TNO 2025 R11769 MBSE in the High-Tech Equipment Industry – MBSE-Study phase 2 of TNO-ESI and Partners: Key MBSE Topics and Approaches,” TNO-ESI, Eindhoven, The Netherlands, 2025.
- [55] TenneT TSO, „Onze strategie,” [Online]. Available: <https://www.tennet.eu/nl/over-tennet/organisatie-en-strategie/onze-strategie>. [Geopend 7 July 2026].
- [56] M. H. Meyer en A. P. Lehnerd, *The power of product platforms: Building value and cost leadership*, Free Press, 1997.
- [57] ISO, „ISO/IEC/IEEE 15288:2023: Systems and software engineering — System life cycle processes,” International Organization for Standardization, 2023.
- [58] K. Pohl, G. Böckle en F. van der Linden, *Software Product Line Engineering: Foundations, Principles and Techniques*, Springer, 2005.
- [59] P. Clements en L. Northrop, *Software product lines: Practices and patterns*, Hoboken, NJ: Addison-Wesley, 2001.
- [60] C. Baldwin en K. Clark, *Design Rules: The Power of Modularity*, Cambridge, MA: MIT Press, 2000.
- [61] R. Sanchez en J. Mahoney, „Modularity, flexibility and knowledgemanagement in product and organization design.,” *Strategic Management Journal*, vol. 17, pp. 63-76, 1996.
- [62] K. Sinha, E. S. Suh en O. de Weck, „Correlating integrative complexity with system modularity,” in *Proceedings of the ASME 2017 International Design Engineering Technical Conferences and Computers and Information in Engineering Conference. Volume 2A: 43rd Design Automation Conference.*, Cleveland, Ohio, 2017.
- [63] J. Jiao, T. W. Simpson en Z. Siddique, „Product family design and platform-based product development: A state-of-the-art review,” *Journal of Intelligent Manufacturing*, vol. 18, nr. 1, pp. 5-29, 2007.
- [64] G. Muller en E. Hole, „Reference Architectures; Why, What and How,” *Systems Architecture Forum*, Hoboken NJ, 2007.
- [65] M. Jazayeri, A. Ran, F. Van Der Linden en P. Van Der Linden, *Software architecture for product families: principles and practice (Vol. 9)*, Reading: Addison-Wesley, 2000.
- [66] R. Doornbos, J. Marincic, A. Vasenev en J. Wesselius, „Reference Architecting : A methodology for distilling and documenting a reference architecture for complex high-tech systems,” TNO ESI, Eindhoven, 2020.
- [67] D. D. Walden, T. M. Shortall, G. J. Roedler, B. Delicado, O. Mornas, Y.-S. Yip en D. Endler, *INCOSE systems engineering handbook: A guide for system life cycle processes and activities*, John Wiley & Sons, 2023.
- [68] ISO, *ISO 55000:2024: Asset management — Vocabulary, overview and principles*, Geneva: International Organization for Standardization, 2024.
- [69] IEC, *IEC Standard for Obsolescence Management*, IEC Standard 62402, 2019.
- [70] ISO, *ISO/IEC/IEEE 42010:2022 — Systems and software engineering — Architecture description*, Geneva: International Organization for Standardization, 2022.

Bijlage A

Overzicht van initiatieven voor modulair bouwen

Binnen de Nederlandse energiesector lopen inmiddels vele initiatieven die direct of indirect bijdragen aan modulair bouwen, standaardisatie, Systems Engineering, digitalisering, ketensamenwerking en de versnelling van de realisatie van energie-infrastructuur. Deze initiatieven verschillen sterk in scope, volwassenheid, organisatorische inbedding en betrokken partijen. Tijdens het FuESSE project werd vastgesteld dat de sector niet wordt gekenmerkt door een gebrek aan initiatieven, maar juist door een groot aantal parallelle activiteiten die soms vergelijkbare doelen nastreven en slechts beperkt met elkaar verbonden zijn. Hierdoor ontstaat het risico op overlap, versnippering en suboptimalisatie, terwijl de grootste maatschappelijke meerwaarde juist ontstaat wanneer initiatieven elkaar versterken en bijdragen aan een gezamenlijke bouwstrategie. Dit overzicht heeft daarom niet als doel een complete inventarisatie van alle activiteiten te geven, maar vooral om inzicht te bieden in de breedte van het initiatieflandschap, mogelijke samenhang zichtbaar te maken en een basis te leggen voor verdere prioritering, clustering en governance van modulair bouwen binnen de energie-infrastructuur. **De grootste versnelling wordt waarschijnlijk niet gerealiseerd door nieuwe initiatieven te starten, maar door bestaande initiatieven expliciet te verbinden binnen één gezamenlijke bouwstrategie, governance-structuur en roadmap die gericht zijn op een schaalbaar en doelmatig productiesysteem voor de energie-infrastructuur.**

Werkwijze

De initiatieven in deze bijlage zijn in eerste instantie geïnventariseerd tijdens een thema sessie van het FuESSE25-project, waarin deelnemers gezamenlijk een overzicht hebben opgesteld van lopende initiatieven die bijdragen aan modulair bouwen, standaardisatie, Systems Engineering, digitalisering, ketensamenwerking en de versnelling van de energie-infrastructuur. Het resultaat hiervan is weergegeven in Tabel 10.1, waarin per initiatief de naam en de deelnemende organisaties zijn opgenomen. Vervolgens is deze inventarisatie gevalideerd en aangevuld met informatie uit publiek beschikbare bronnen. Op basis daarvan is Tabel 10.2 opgesteld met per initiatief een korte beschrijving, de betrokken organisaties en – waar beschikbaar – een verwijzing naar een publieke informatiebron. Om de samenhang tussen initiatieven beter zichtbaar te maken is daarnaast Tabel 10.3 opgesteld waarin de betrokken organisaties zijn samengebracht. Tijdens deze validatieslag is de eerste inventarisatie aangevuld met organisaties en initiatieven waar indirect naar werd verwezen. Het betreft daarbij met name overheidsorganisaties, sectorbrede samenwerkingsverbanden en Europese programma's die geen directe deelnemer zijn aan FuESSE, maar wel invloed hebben op de randvoorwaarden voor modulair bouwen en de verdere ontwikkeling van de energie-infrastructuur.

Tabel 10.1: Overzicht initiatieven, gesorteerd naar organisaties en samenwerkingsverbanden.

Overkoepelend (organisatie)	Overkoepelend (informeel)			Tennet	Allander	Stedin	Enexis
Nationaal Plan Energiesysteem Ministerie van Klimaat en Groene Groei, Ministerie van Economische Zaken	CE4E (Centre International des Grands Réseaux Électriques) Netbeheerders, industrie, kennisinstellingen, universiteiten	ICESS Allander, Enexis, Gasunie, Stedin, Tennet, TNO	LinkWinn Lander, Westland Infra	Kabel expertise Piet Soepboer	Harmonisatie Infocontainer Tennet	Modulair bouwen - bouwplaketten stations	Modulair bouwen - Enexis Enexis
Nationaal Programma Regionale Energie Strategie In de Regionale Energie Strategie werken 30 regio's onder andere aan het ontwikkelen van aansluitingen	Kennis standaardisatie initiatieven Netbeheer Nederland	LV-NEXT Allander, Enexis, Stedin	Bilateraal Stedin Enexis Stedin, Enexis	Trilateraal - Bouwkunde E430x partijen Tennet	Modulair bouwen Lander/Allander Standaardblokken	Systeemstandaardisatie Stedin	Samenwerking Enexis & Siemens Enexis
Achtjarige Digitalisering Energiesysteem Topsector Energie, Ministerie van Klimaat en Groene Groei, Netbeheerders	Modulair bouwen - NBNL Netbeheer Nederland	Stakkerbaai MGR (Middengangruimte) Netbeheer Nederland, Techniek Nederland, Bouwend Nederland	Topsteam Stedin, Allander	Trilateraal - Stedelijke Inpassing, IABR, TNO Stedin, Allander, Enexis	Modulair bouwen - Tennet Tennet	Modulair bouwen - Werkwijze Allander	Potentialmanagement op toegevoegde waarde voortbrengingsproces Stedin
Ruander Harmonisatie werkgroepen (12 werkgroepen) Digitaalvrijke stichting Kustdr	Mensen Maken de Transitie Techniek Nederland, Bouwend Nederland, Netbeheer Nederland, MBO Kennisalliance	Gezamenlijke aanbesteding componenten Stedin, Allander, Enexis	AAC Allander, Stedin	Software Defined Substation Stedin, Allander, Enexis	SE Programma Tennet	Modulair bouwen - Team & Cost center Allander	Weerbaarheid netwerk Stedin
Samenwerking naar Digital Twin technologie tegen netcongestie NWO, Tennet, Topsector Energie	Discipline werkgroepen (techniek) - primair, secundair, IECSURB Netbeheer Nederland	FuESSE Allander, Enexis, Stedin, Tennet, TNO	Trilateraal Stedin/Allander (Stedin) SE, standaardisatie, uitwisseling personeel, IABR Allander, Stedin	Distributiesystematiek Stedin, Allander	Targetgrid Tennet		
NILCS Stichting Miljoensluiting.nl	NILCS+ Miljoensluiting.nl	FuESSE werkgroepen testen, automation, strategy Allander, Enexis, Stedin	Topsteam Stedin, Allander	Vitale Infra Event - praktijk platform Movares, TNO	Modulair bouwen 380kV Tennet		
Critical Entities Resilience Directive Ministerie van Justitie en Veiligheid	DSP-18 Stichting Miljoensluiting.nl	ICESS Allander, Enexis, Gasunie, Stedin, Tennet, TNO	AAC Allander, Stedin	Venezias Tennet - Unifore Divisie - Afdeling P.P.S. - AIP - M&SE Tennet			
				Vernieuwd Tennet - Modulair Standaard & Systems Engineering Tennet			

Observaties uit het initiatievenlandschap

De inventarisatie laat zien dat de sector beschikt over een groot en divers landschap van initiatieven. De initiatieven bestrijken onder meer standaardisatie, modulariteit, digitalisering, Systems Engineering, netcongestie, ketensamenwerking, governance, onderwijs en kennisontwikkeling. De betrokken organisaties variëren van netbeheerders, kennisinstellingen en leveranciers tot brancheorganisaties, ministeries, uitvoeringsorganisaties en Europese samenwerkingsverbanden. De inventarisatie bevat ongeveer zestig unieke hoofdorganisaties, waarbij de feitelijke betrokkenheid via koepelorganisaties en samenwerkingsverbanden aanzienlijk groter is.

Tegelijkertijd laat het overzicht zien dat veel initiatieven inhoudelijk aan elkaar raken. Met name op het gebied van standaardisatie, digitalisering, Systems Engineering, ketensamenwerking en modulair bouwen bestaan verschillende initiatieven die vergelijkbare doelstellingen nastreven vanuit verschillende organisatorische contexten. Dit wijst niet noodzakelijk op ongewenste overlap, maar benadrukt wel de behoefte aan afstemming, kennisdeling en samenhang tussen programma's en organisaties.

De inventarisatie maakt daarmee duidelijk dat de uitdaging voor de sector waarschijnlijk niet wordt veroorzaakt door een gebrek aan initiatieven, maar door de complexiteit van het totale landschap. Initiatieven opereren tegelijkertijd op project-, programma-, organisatie-, sector-, nationaal en Europees niveau en kennen uiteenlopende doelstellingen, governance-structuren en deelnemers. De grootste opgave lijkt daarom niet het starten van nieuwe initiatieven, maar het expliciet verbinden, prioriteren en bestuurbaar maken van bestaande initiatieven zodat zij gezamenlijk bijdragen aan één samenhangend productiesysteem voor de ontwikkeling, realisatie, instandhouding en doorontwikkeling van de energie-infrastructuur.

Een interessante observatie is dat de verzamelde initiatieven vrijwel alle elementen bestrijken die elders in dit rapport worden geïdentificeerd als succesfactoren voor modulair bouwen: standaardisatie, Product Line Engineering, Systems Engineering, digitalisering, ketensamenwerking, governance, opleiding en veranderkunde. Het overzicht bevestigt daarmee dat de belangrijkste uitdaging niet meer ligt in het identificeren van verbetermaatregelen, maar in het realiseren van samenhang tussen al bestaande initiatieven. Vanuit dit perspectief kan de FuESSE Modulaire Bouwstrategie worden gezien als een poging om deze initiatieven, organisaties en verbeterlijnen te verbinden binnen één gemeenschappelijk richtinggevend kader.

A.1 Initiatieven

Tabel 10.2: Lopende initiatieven en hun deelnemers.

Naam	Beschrijving	Deelnemer(s) / Opdrachtgevers	Weblink
AAC	Asset-Activity-Combination	Alliander, Stedin	
Aanbesteding	Gezamenlijke aanbesteding componenten	Stedin, Alliander, Enexis	
Actieagenda Digitalisering Energiesysteem	Deze actieagenda zet daarin een eerste stap en geeft richting aan de digitalisering van het energiesysteem. De agenda bevat acties die bestaande initiatieven versterken of versnellen, en nieuwe acties die nodig zijn om de doelen van het NPE te halen.	Topsector Energie, Ministerie van Klimaat en Groene Groei, Netbeheerders	Actieagenda Digitalisering Energiesysteem Rapport Rijksoverheid.nl
Bilateraal Stedin Enexis	Bilateraal overleg tussen Stedin en Enexis	Stedin, Enexis	
CIGRÉ (Conseil International des Grands Réseaux Électriques)	CIGRÉ is een wereldwijde, onafhankelijke kennisorganisatie gericht op elektriciteitsnetwerken (power systems), met name: - Hoogspanningsnetten (transmissie) - Integratie van hernieuwbare energie - Netbetrouwbaarheid en stabiliteit - Digitalisering en smart grids - Asset management van energie-infrastructuur	Netbeheerders, industrie, kennisinstellingen, universiteiten	CIGRE > Home
Congestiemaatregelen ACM	De Autoriteit Consument & Markt (ACM) heeft een overzicht gemaakt van alle maatregelen die door de ACM zijn of worden getroffen om de problematiek van netcongestie te verminderen. Netcongestie speelt zich vooral af op piekmomenten waarop er te veel vraag is naar elektriciteit of te veel aanbod is van duurzaam geproduceerde elektriciteit. De maatregelen bevatten onder meer diverse nieuwe mogelijkheden voor afnemers om (ook in tijden van schaarste) transportcapaciteit te verkrijgen, prikkels om de schaarse transportcapaciteit efficiënter te gebruiken en een aantal manieren om de netbeheerder (tegen vergoeding) te helpen congestie te voorkomen of op te lossen.	Autoriteit Consument en Markt	Overzicht en inzicht congestiemaatregelen ACM ACM
Critical Entities Resilience Directive Wet weerbaarheid kritieke entiteiten	Critical Entities Resilience Directive) is een wet die de fysieke weerbaarheid verhoogt van vitale organisaties binnen de EU, zoals energiebedrijven, transport en de gezondheidszorg. Het beschermt tegen sabotage, terrorisme en natuurrampen. In Nederland wordt dit geïmplementeerd via de Wet weerbaarheid kritieke entiteiten (Wwke)	Ministerie van Justitie en Veiligheid	Overheid.nl Consultatie Wet weerbaarheid kritieke entiteiten
Distributieautomatisering		Stedin, Alliander	
DSP-A	DSP Aansluiting is ingericht voor het verwerken van werkzaamheden aan (huis)aansluitingen, werkzaamheden met een korte doorlooptijd.	Stichting Mijnaansluiting.nl	DSP Aansluiting (DSP-A) - Mijn Aansluiting Wiki - Mijn Aansluiting

Naam	Beschrijving	Deelnemer(s) / Opdrachtgevers	Weblink
DSP-H	DSP Hoofdnet is gericht op werkzaamheden aan de ondergrondse infra, anders dan aan (huis)aansluitingen. Het is erop gericht om een brede variatie aan werkstromen te ondersteunen, zoals Wijkgerichte Aanpak, combi-projecten en Middenspanningsprojecten. Projecten met een doorlooptijd van een paar dagen tot meerdere maanden. Een project bestaat uit meerdere fasen, waarbij er voor elke fase een DSP-hoofdnetopdracht is.	Stichting Mijnaansluiting.nl	DSP Hoofdnet (DSP-H) - Mijn Aansluiting Wiki - Mijn Aansluiting
EU-30x	Reguliere samenwerkingsoverleggen met ingenieursbureaus en aannemers in het kader van de EU-30x raamcontracten. EU-30x staat voor Engineering (EU-300), Kabels (EU-301), Lijnen (EU-302), en Stations (EU-303).	TenneT	
Enexis-Liander verkenning	Bilaterale verkenning tussen Enexis en Alliander	Enexis, Liander	
FuESSE	Project met doel een integrale modulaire bouwstrategie te ontwikkelen, inclusief een visie, roadmap en een implementatie- en governance-stappenplan, gericht op concrete, korte termijn, verbeteringen en brede toepasbaarheid binnen de sector.	Alliander, Enexis, Stedin, TenneT, TNO	
FuESSE werkgroepen	Initiatieven tussen Alliander, Enexis en Stedin opgestart in het kader van het FuESSE25-project op het gebied van testen, automation, strategie	Alliander, Enexis, Stedin	
Gezamenlijk onderzoek roadmaps	De Onderzoeksmiddeel Flexibiliteit van Netbeheer Nederland brengt prioritaire onderzoeksvragen, lopende pilots en samenwerkingen in kaart om flexibiliteit beter in te zetten voor het verminderen van netcongestie, het balanceren van vraag en aanbod en het ondersteunen van de energietransitie.	Netbeheer Nederland	Onderzoeksmiddeel flexibiliteit Netbeheer Nederland
GOPACS	GOPACS is het platform waarmee netbeheerders flexibel vermogen kunnen inzetten om netcongestie te voorkomen. Dat gebeurt op twee manieren: door het afroepen van biedingen via Redispatch en door het activeren van contracten voor capaciteitsbeperking (CBC's).	Stedin, Liander, Enexis, Westland Infra, Enduris, Rendo, Coteq, TenneT	GOPACS - Platform voor congestiemanagement
Harmonisatie TenneT	Harmonisatie initiatief voor de Infocontainer	TenneT	
Herijking Stedin	Herijking strategie - modulair, standaard, prefab	Stedin	
IXCESS	Project om tot slimmere digitale samenwerking te komen tussen netbeheerders, binnen netbeheerders en tussen netbeheerders en opdrachtnemers.	Alliander, Enexis, Gasunie, Stedin, TenneT, TNO	
Kabelexpertise	Expert op het gebied van kabels die door netbeheerders wordt gebruikt.	Piet Soepboer	
Ksandr Harmonisatie werkgroepen (12 werkgroepen)	Ksandr is het Collectieve Brein voor de Nederlandse netbeheerders. Door het borgen, ontwikkelen en delen van kennis over de assets van hun netten, stelt Ksandr de netbeheerders in staat om op efficiënte wijze de kwaliteit van hun netten op minimaal het maatschappelijk gewenst niveau te houden.	Onafhankelijke stichting Ksandr	Ksandr. Het Collectieve brein van het Nederlandse Elektriciteitsnet

Naam	Beschrijving	Deelnemer(s) / Opdrachtgevers	Weblink
Landelijk Actieprogramma Netcongestie	Het Landelijk Actieprogramma Netcongestie (LAN) is een samenwerkingsprogramma van netbeheerders, overheden, Autoriteit Consument & Markt en marktpartijen. De partners werken aan het verminderen van netcongestie en de voorbereiding op het energiesysteem van de toekomst	ACM, Bouwend Nederland, Coteq, Energie-Nederland, EnergieSamen, Energy Storage NL, Enexis, Ministerie van Economische Zaken en Klimaat, FME, Holland Solar, Interprovinciaal Overleg, Liander, Ministerie van Binnenlandse Zaken en Koninkrijksrelaties, Ministerie van Infrastructuur en Waterstaat, MKB-Nederland, Netbeheer Nederland, Nederlandse Vereniging voor Duurzame Energie (NVDE), Nederlandse WindEnergie Associatie (NWEA), Rendo, Rijksdienst voor Ondernemend Nederland, Stedin, Taskforce Elektra, Techniek Nederland, VEMW, Vereniging van Nederlandse Gemeenten (VNG), VNO-NCW	Landelijk Actieprogramma Netcongestie
LinkWIN	Initiatief genoemd tijdens workshop 5 tussen Liander en Westland Infra.	Liander, Westland Infra	
LV-NExT	Mondiale innovatiechallenge om de verzwaring van het laagspanningsnet in woonwijken radicaal te versnellen.	Alliander, Enexis, Stedin	Netbeheerders starten wereldwijde challenge om stroomnetverzwaring in wijken te vertienvoudigen
Mensen Maken de Transitie	Nationaal Leer & Actieprogramma	Techniek Nederland, Bouwend Nederland, Netbeheer Nederland, MBO Raad, Vereniging Hogescholen, 4TU.Federatie, Ministerie van Volkshuisvesting en Ruimtelijke Ordening, Isolierend Nederland	Mensen Maken de Transitie Samen slim aanpakken
Modulair bouwen - Alliander	Modulair bouwen initiatief bij Alliander voor HS/MS stations op basis van standaard blokken/bouwpakketten (150% platform), werkwijze voor modulair bouwen met centraal eigen team en cost center	Alliander	
Modulair bouwen - Enexis	Modulair bouwen initiatief bij Enexis voor HS/MS stations, onder regie van EBS uitgevoerd door de afdeling HS/MS stations	Enexis	
Modulair bouwen - NBNL	Initiatie	Netbeheer Nederland	
Modulair bouwen - TenneT	Modulair bouwen initiatief binnen TenneT	TenneT	
Modulair bouwen 380kV	Modulair bouwen als toegepast bij de 380kV stations	TenneT	

Naam	Beschrijving	Deelnemer(s) / Opdrachtgevers	Weblink
Nationaal EMS Programma	In een vastlopend energiesysteem kunnen Energie Management Systemen (EMS) een sleutelrol spelen. Ze sturen energiegebruik, opwek en flexibiliteit aan en vormen daarmee de digitale interface tussen individueel gedrag en systeemdoelen. Het Nationaal EMS Programma faciliteert een strategisch publiek-privaat innovatie-ecosysteem dat bestaande initiatieven verbindt, collectieve randvoorwaarden organiseert, en EMS opschaaft van losse oplossing naar betrouwbare systeemfunctie en economisch groeipotentieel.	Topsector Energie, Connectr, The Green Village, Earth Valley, RVO	Nationaal EMS Programma
Nationaal Plan Energiesysteem	Het Nationaal plan energiesysteem beschrijft hoe Nederland een energiesysteem ontwikkelt dat past bij een klimaatneutrale samenleving. Dat betekent dat de manier waarop we energie opwekken, transporteren, opslaan en gebruiken geen negatief effect heeft op het klimaat.	Ministerie van Klimaat en Groene Groei, Ministerie van Economische Zaken	Nationaal plan energiesysteem (NPE) RVO.nl
Nationaal Programma Regionale Energie Strategie	In de Regionale Energiestrategie werken 30 regio's onder andere aan het opwekken van grootschalige duurzame energie op land en het zoeken naar duurzame warmtebronnen. Het Nationaal Programma ondersteunt de regio's bij het maken en uitvoeren van de RES.	Vereniging Nederlandse Gemeenten, Inter provinciaal Overleg, Unie van Waterschappen, Ministerie van Economische Zaken en Klimaat, Ministerie van Binnenlandse Zaken en Koninkrijksrelaties, netbeheerders	Nationaal Programma Regionale Energiestrategie Regionale Energiestrategie
Nationale Coalitie Duurzame Digitalisering	Pre-competitieve, functionele samenwerking, voortgekomen uit het LEAP-initiatief (LEAP versnelt de energietransitie en digitale transitie) van de Amsterdam Economic Board voor duurzame digitalisering, i.e., digitalisering die bijdraagt aan het inperken van haar eigen energiegebruik, milieu-impact én aan verduurzamingsopgaven in andere sectoren.	Deelnemers uit overheid, academia en industrie.	Over NCDD – Nationale Coalitie Duurzame Digitalisering
Nbility	NBility is een gezamenlijk initiatief van de Nederlandse netbeheerders dat zich richt op gemeenschappelijke business- en informatiearchitectuur voor het energiedomein.	Liander / Alliander, Enexis, Stedin, TenneT	Introductie-presentatie-Nbility-2.3.pptx
NBNL - Techniek	Werkgroepen binnen Netbeheer Nederland voor de technische disciplines als - primair, secundair, IEC 61850.	Netbeheer Nederland	https://www.netbeheernederland.nl/onze-themas
NBNL – Datastandaardisatie-initiatieven	Werkt samen met netbeheerders en ketenpartners aan uniforme begrippen, gegevensmodellen en richtlijnen, zodat data zoals assetinformatie, netmodellen en congestiegegevens eenduidig, betrouwbaar en efficiënt kunnen worden uitgewisseld. Dit vormt een belangrijke basis voor interoperabiliteit, digitalisering en de verdere energietransitie.	Netbeheer Nederland	Datastandaardisatie en uniformiteit Netbeheer Nederland
Nederlands Energie Domein Referentie Architectuur		Topsector Energie, RVO	Actieagenda Digitalisering Energiesysteem

Naam	Beschrijving	Deelnemer(s) / Opdrachtgevers	Weblink
Nederlandse Overheids Referentie Architectuur (NORA)	NORA is de Nederlandse Overheid Referentie Architectuur. Alle overheidsorganisaties kunnen de NORA gebruiken bij het vorm geven en inrichten van hun dienstverlening. De kern bestaat uit de Verbindende Architectuurafspraken en een uitwerking van het Vijflaagsmodel. Daarnaast delen we sets met relevante architectuurinformatie zoals Begrippen, Standaarden en Bouwstenen.	Stichting ICTU, Rijksoverheid, Unie van Waterschappen, Vereniging van Nederlandse Gemeenten, Interprovinciaal Overleg	NORA Online
NLCS	Open standaard voor 2D ontwerptekeningen met metadata voor grond-, weg- en waterbouw.	Stichting Mijnaansluiting.nl	NLCS Forum Standaardisatie
NLCS++	Uitbreiding van NLCS voor objecttypen, gestructureerde attributen en statussen aan de geografische objecten.	Mijnaansluiting.nl	
Opschalingsplan 2030	Het Opschalingsplan 2030 is een initiatief van netbeheerders, aannemers en de overheid om de capaciteit van het Nederlandse elektriciteitsnet versneld uit te breiden. Het belangrijkste doel is het werven en opleiden van 5.000 extra technici om de groeiende netcongestie aan te pakken.	Overheden, Bouwend Nederland, Techniek Nederland, WENB, Netbeheer Nederland, Ministerie van Sociale Zaken en Werkgelegenheid	Netbeheerders en aannemers zetten samen in op 5.000 extra technici voor uitbreiden elektriciteitsnet Netbeheer Nederland
Overleg Topteam	Mogelijke introductie Topteam	Stedin, Alliander	
Portfoliomanagement - Stedin	Portfoliomanagement op toegevoegde waarde voortbrengingsproces	Stedin	
Samenwerking Enexis & Siemens	Gestandaardiseerde aanpak verdeelstations. Standaard skids geplaatst in prefab verdeelstations.	Enexis	Solar & Storage Magazine - Gestandaardiseerde aanpak verdeelstations versnelt uitbreiding elektriciteitsnet Enexis
Samenwerking IT-architecten - SOK team	Samenwerking tussen de IT-architecten van netbeheerders met rapportage naar CIOs	Alliander, Enexis, Stedin, TenneT	
SE Programma	Programma voor introductie en ondersteuning van Systems Engineering binnen TenneT	TenneT	
Software Defined Substation	Initiatief van Alliander waarbij fysieke IEDs worden vervangen door softwarematige implementaties via virtuele IEDs (vIEDs).	Stedin, Alliander, Enexis	Engineering the Future: Alliander's Journey Toward Software-Defined Substations - LF Energy
SOK Digitalisering en ICT	In 2024, the grid operators Alliander, Enexis, Stedin and TenneT signed a cooperation agreement (SOK) to accelerate ICT and digitalisation initiatives. This enables the joint development and maintenance of innovative digital solutions. Examples of current SOK initiatives are a joint station registration system and a smart meter headend for reading and maintaining the new generation of smart meters.	Alliander, Stedin, Enexis, TenneT, Gasunie	Alliander-Co-creation-Position-Paper-UK.pdf Gasunie - Vandaag markeren we een belangrijke mijlpaal in... Facebook
Stekkerbaar MSR (Middenspanningsruimte)	Het 'stekkerbaar MSR' (Middenspanningsruimte) initiatief in de Nederlandse energiesector is een innovatieve standaardisatiemethode van netbeheerders en installateurs om elektriciteitshuisjes sneller te kunnen bouwen en aansluiten. Het wordt ook wel 'MS-stekkerbaar' genoemd.	Netbeheer Nederland, Techniek Nederland, Bouwend Nederland	Klik, klaar, stroom: versnellen met MS-stekkerbaar Netbeheer Nederland

Naam	Beschrijving	Deelnemer(s) / Opdrachtgevers	Weblink
Subsidie onderzoek naar Digital Twin-technologie tegen netcongestie	Het doel is om binnen het toegekende onderzoeksproject tot een werkbaar prototype te komen van een Digital Twin voor netbeheerders. Door het realtime monitoringvermogen van deze technologie kan het een belangrijke rol spelen in het vinden van oplossingen voor de uitdagingen waar het Nederlandse energienetwerk voor staat.	NWO, TenneT, Topsector Energie	https://www.nwo.nl/onderzoeksprogrammas/kennis-en-innovatieconvenant-kic/kic-2024-2027/vraag-2024-2027/ontgrendel-de-kracht-van-de-digital-twin-voor-netbeheerders
Systeemstandaardisatie	Standaardisatie-initiatief binnen Stedin	Stedin	
Target Grid	Het TenneT Target Grid is de toekomstvisie van netbeheerder TenneT op het klimaatneutrale elektriciteitsnet van 2045. Het is een blauwdruk om grootschalige, duurzame energie (vooral wind op zee) efficiënt over land en zee te transporteren naar miljoenen huishoudens en de industrie.	TenneT	Target Grid (NL) TenneT
Trilateraal Alliander, Enexis, Stedin	Trilateraal overleg tussen netbeheerders over bouwkunde aspecten, stedelijke inpassing, IABR en MSR	Stedin, Alliander, Enexis	
Uitvoeringsakkoord voor versnelling in verzwaring lokale netten	Akkoord tussen Netbeheer Nederland, Bouwend Nederland en Techniek Nederland. Het akkoord richt zich op de grootschalige en broodnodige uitbreiding van laag- en middenspanningsnetten om de energietransitie en netcongestie aan te pakken	Taskforce Elektra	Uitvoeringsakkoord voor versnelling in verzwaring lokale netten
Vernieuwd TenneT	Als onderdeel van de reorganisatie Vernieuwd TenneT zijn alle standaardisatie activiteiten binnen de divisie Onshore geconsolideerd in één afdeling. Onderdeel hiervan is Modulaire Standaard & Systems Engineering	TenneT	
Vitale Infra Event - praktijk platform	Event bij Movares waar o.a. TenneT en IXCESS presenteren.	Movares, TNO	Vitale Infra Event: Modulair bouwen en datagedreven werken aan de energietransitie - Movares Smart Urban Engineering
Weerbaarheid netwerk	Initiatief binnen Stedin naar aanleiding van de Wet weerbaarheid kritieke entiteiten (Wwke)	Stedin	

A.2 Organisaties

Tabel 10.3: Organisaties betrokken bij initiatieven uit Tabel 10.2.

Naam	Beschrijving	Deelnemers/Partners	Weblink
ACER	The European Union Agency for the Cooperation of Energy Regulators (ACER) was established in March 2011 (Third Energy Package legislation) to foster cooperation among the EU's energy National Regulatory Authorities (NRAs) and help ensure that a single European market for electricity, and similarly natural gas, functions well.		Home www.acer.europa.eu
Alliander	Regionale netbeheerder		Alliander - Ontwikkelt en beheert energienetten

Naam	Beschrijving	Deelnemers/Partners	Weblink
Autoriteit Consument en Markt (ACM)	De Autoriteit Consument & Markt (ACM) is een onafhankelijke toezichthouder. We maken ons sterk voor goed werkende markten voor mensen en bedrijven. De ACM houdt o.a. toezicht op de energiemarkt.		Energie ACM
Bouwend Nederland	Bouwend Nederland is de vereniging van bouw- en infrabedrijven. Hierin werken ruim 4.600 leden samen binnen regio's en afdelingen, vakgroepen en contactgroepen.	± 4.600 leden uit de bouw- en infrabedrijven	Home Bouwend Nederland
Clusterregie Noord-Nederland	Regionaal samenwerkings- en overheidsprogramma dat gericht is op het versnellen van de verduurzaming van de zware industrie in de regio Noord-Nederland (lopend van de Eemshaven tot Emmen)	~200 bedrijven uit de regio Noord-Nederland	Cluster Noord-Nederland Nationaal Programma Verduurzaming Industrie
digiGO	digiGO is hét netwerk- en innovatieplatform voor digitalisering in de Nederlandse bouw-, ontwerp- en technieksector. Het doel is om de hele keten slimmer, sneller en efficiënter te laten samenwerken door middel van uniforme digitale standaarden.	Vertegenwoordigers van de rijksoverheid, grote opdrachtgevers (zoals woningcorporaties en het Rijksvastgoedbedrijf), bouwers, installatietechnici, toeleveranciers en kennisinstellingen	Home - digiGO
DSO Entity	Organisation providing expertise on electricity distribution grids, which are the final, low-voltage part of the electricity grid, distributing electricity to homes, industry, and other end-users. Entity was formally established in June 2021.	800+ DSO members	DSO Entity – Pillar of Europe's Energy Transition
E.DSO	E.DSO is the key interface between Europe's Distribution System Operators (DSOs) and the European institutions. E.DSO gathers 37 leading electricity DSOs, including 2 national associations, cooperating to ensure the reliability of Europe's electricity supply for consumers and enabling their active participation in our energy system.	37 European DSOs including two national organizations	E.DSO
Energie Data Services Nederland (ESDN)	Samenwerkingsplatform en centrale uitvoeringsinstantie en IT-netwerkorganisatie van de gezamenlijke Nederlandse netbeheerders (zoals TenneT, GTS en regionale netbeheerders)	Westland Infra, Coteq Stedin, Rendo, Liander, Enexis, TenneT, Gasunie Transport Services, Het Normo, GOPACS	Over ons - EDSN.nl
Energie Nederland	Branchevereniging van bijna 90% van de markt voor producenten, leveranciers en handelaren van elektriciteit, gas en warmte.	± 80+ bedrijven uit de energiesector	Energie-Nederland Branchevereniging voor energiebedrijven
Energie Samen	Energie Samen = de landelijke koepel en belangenorganisatie van energiecoöperaties en lokale energie-initiatieven in Nederland	± 350 directe leden, 700 initiatieven.	
Energy Innovation NL / Topsector Energie	Operationeel innovatieplatform en netwerkorganisatie voortgekomen uit Topsector Energie (April 2026).	Stichting TKI-Energie	Topsector Energie, de drijvende kracht achter innovatie.
Enexis	Regionale netbeheerder		Energie bij u thuis Enexis Netbeheer
ENTSO-E	ENTSO-E, the European Network of Transmission System Operators for Electricity, brings together 40 member TSOs from 36 countries to ensure the secure and coordinated operation of Europe's electricity system – one of the world's largest interconnected grids. Created with a legal mandate under EU law, ENTSO-E delivers technical coordination and strategic contributions to support Europe's energy and climate objectives.	40 TSOs uit 36 landen	Home

Naam	Beschrijving	Deelnemers/Partners	Weblink
Gasunie	Transport System Operator		
Het Normo (voorheen Beheerder Afspraken Stelsel)	Aangewezen gegevensuitwisselingsentiteit (GUE) binnen de Energiewet. Als neutrale en onpartijdige autoriteit zorgen wij voor duidelijke en betrouwbare afspraken over het veilig en transparant delen van energiedata – en maken we samenwerking en toegang tot data mogelijk via één centrale entiteit.	Partijen in de energiesector	Home Het Normo
Interprovinciaal Overleg (IPO)	Vereniging van, voor en door de provincies. De provincies zijn de leden van de vereniging en zijn vertegenwoordigd in het Bestuur en de Algemene Vergadering. Bevat onder andere kennis community Netcongestie voor provincies.	Provincies	Interprovinciaal Overleg - Interprovinciaal Overleg
Ksandr	Onafhankelijke stichting Ksandr is het Collectieve Brein voor de Nederlandse netbeheerders. Door het borgen, ontwikkelen en delen van kennis over de assets van hun netten, stelt Ksandr de netbeheerders in staat om op efficiënte wijze de kwaliteit van hun netten op minimaal het maatschappelijk gewenst niveau te houden.		Ksandr. Het Collectieve brein van het Nederlandse Elektriciteitsnet
Minister van Klimaat en Groene Groei / Directoraat Klimaat en Energie	Minister en directoraat verantwoordelijk voor klimaat, energietransitie etc. binnen het Ministerie van Economische Zaken en Klimaat	Nu onderdeel van Ministerie van Economische Zaken en Klimaat	Directoraat-generaal Klimaat en Energie Ministerie van Economische Zaken en Klimaat Rijksoverheid.nl
Ministerie van Binnenlandse Zaken en Koninkrijksrelaties	Verantwoordelijk voor het versterken van de democratische rechtsstaat en het openbaar bestuur, het bewaken van grondrechten, het organiseren van verkiezingen, het bevorderen van een betrouwbare en slagvaardige overheid, het onderhouden van de relaties binnen het Koninkrijk der Nederlanden, en het realiseren van voldoende betaalbare woningen en een evenwichtige ruimtelijke inrichting van Nederland.		Ministerie van Binnenlandse Zaken en Koninkrijksrelaties Rijksoverheid.nl
Ministerie van Economische Zaken	Verantwoordelijk voor het versterken van de Nederlandse economie en het ondernemingsklimaat. Het Ministerie van Economische Zaken ontwikkelde beleid voor ondernemerschap, innovatie, industrie, digitalisering, mededinging, buitenlandse handel en telecom, met als doel duurzame economische groei, concurrentiekracht en werkgelegenheid te bevorderen.	Nu onderdeel van Ministerie van Economische Zaken en Klimaat	
Ministerie van Economische Zaken en Klimaat	Verantwoordelijk voor het versterken van de Nederlandse economie én het realiseren van de energietransitie. Het Ministerie van Economische Zaken en Klimaat (EZK) ontwikkelt beleid voor ondernemerschap, innovatie, industrie, digitalisering, energievoorziening en klimaat, met als doel een concurrerende, duurzame en toekomstbestendige economie te bevorderen en de klimaatdoelstellingen van Nederland te realiseren.		Ministerie van Economische Zaken en Klimaat Rijksoverheid.nl
Ministerie van Infrastructuur en Waterstaat	Verantwoordelijk voor mobiliteit, infrastructuur, waterbeheer en transport. Het Ministerie van Infrastructuur en Waterstaat werkt aan een veilig, bereikbaar en duurzaam Nederland door het beheer en de ontwikkeling van wegen, spoorwegen, vaarwegen, luchtvaart en watersystemen.		Ministerie van Infrastructuur en Waterstaat Rijksoverheid.nl
Ministerie van Justitie en Veiligheid	Ministerie verantwoordelijk voor recht en veiligheid. In deze rol ook verantwoordelijk voor de implementatie van het EU Critical Entities Resilience directive in Nederlandse wetgeving en de Cyberbeveiligingswet.		Ministerie van Justitie en Veiligheid Rijksoverheid.nl

Naam	Beschrijving	Deelnemers/Partners	Weblink
Ministerie van Sociale Zaken en Werkgelegenheid	Verantwoordelijk voor het arbeidsmarktbeleid, inclusief migratie en vrij verkeer van werknemers, uitkeringen en re-integratie, inkomensbeleid, het combineren van arbeid en zorg, arbeidsomstandighedenbeleid en inspectie daarop.		Ministerie van Sociale Zaken en Werkgelegenheid Rijksoverheid.nl
Ministerie van Volkshuisvesting en Ruimtelijke Ordening	Verantwoordelijk voor ruimtelijke opgaven op het gebied van wonen, industrie, energie, infrastructuur, recreatie, landbouw en natuur.	Nu onderdeel van het Ministerie van Binnenlandse Zaken en Koninkrijksrelaties	Ministerie van Binnenlandse Zaken en Koninkrijksrelaties Rijksoverheid.nl
MKB Nederland	De grootste belangenorganisatie voor het midden- en kleinbedrijf in Nederland en vertegenwoordigt de belangen van mkb-ondernemers richting politiek, overheid en andere maatschappelijke partijen, met als doel een sterk en concurrerend ondernemingsklimaat te bevorderen.		Home - MKB-Nederland
Nederlandse Organisatie voor Wetenschappelijk Onderzoek (NWO)	Financier van wetenschappelijk onderzoek. NWO is een zelfstandig bestuursorgaan met wettelijk vastgelegde taken. De organisatie valt onder de verantwoordelijkheid van het ministerie van Onderwijs, Cultuur en Wetenschap.		Homepagina NWO
Netbeheer Nederland	Vereniging van elektriciteits- en gasnetbeheerders in Nederland.	TenneT, Gasunie Transport Services, Liander, Enexis, Stedin, Rendo, Coteq, Westland Infra	Samen aan de slag met het energiesysteem Netbeheer Nederland
Next Generation Infrastructures (NGInfra)	Next Generation Infrastructures (NGInfra) is het kennisplatform van beheerders van zes kritieke infrastructures in Nederland. Samen met kennisinstellingen onderzoeken we invraagstukken alsof we één beheerder zijn. Onze wetenschappelijke kennis en netwerksamenwerking heeft impact op het lange termijnbeleid en werkwijzen van infabeheerders.	Alliander, Port of Rotterdam, ProRail, Rijkswaterstaat, Schiphol, Vitens	Next Generation Infrastructures (NGInfra)
NLdigital	Branchevereniging van de digitale sector in Nederland.	±600 IT-bedrijven	Wie we zijn NLdigital
Rathenau Instituut	The Rathenau Institute is an independent knowledge institute. We contribute to socially responsible science, technology, and innovation. Part of KNAW.		Science, technology and innovation in society Rathenau Instituut
Rendo	Distribution System Operator in een aantal gebieden in Drenthe en Overijssel.		Over N.V. RENDO - N.V. RENDO is netbeheerder in Drenthe en Overijssel
Rijksdienst voor Ondernemend Nederland (RVO)	De Rijksdienst voor Ondernemend Nederland ondersteunt ondernemers en organisaties die verduurzamen, innoveren of internationaliseren. Zo maken we (subsidie)regelingen en voeren ze uit, dragen bij aan kennisnetwerken en informeren over wetten en regels.	Agentschap onder het Ministerie van Economische Zaken	Rijksdienst voor Ondernemend Nederland RVO.nl
Stedin	Regionale netbeheerder		Thuis en kleinzakelijk Stedin
Stichting Mijnaansluiting.nl	Mijn Aansluiting is een initiatief van samenwerking van netbeheerders in Nederland. De netbeheerders werken samen in Stichting Mijn Aansluiting en richten zich op het verbeteren van de samenwerking en het optimaliseren van het proces voor aanleg en vervanging van ondergrondse netwerken voor elektriciteit, gas, warmte, water, riool en media & communicatie.	Netbeheerders voor elektriciteit en gas, water, warmte, riool en media & communicatie	Mijnaansluiting.nl - Nuts aansluitingen aanvragen
Taskforce Elektra	De Taskforce Elektra initieert, organiseert en faciliteert activiteiten voor het uitvoeren van de afspraken uit het Uitvoeringsakkoord van 11 juni 2024. Het Uitvoeringsakkoord is	Netbeheerder Nederland, Bouwend Nederland, Techniek Nederland	Taskforce Elektra Samen bouwen aan de toekomst

Naam	Beschrijving	Deelnemers/Partners	Weblink
	ondertekend door Netbeheer Nederland, Bouwend Nederland en Techniek Nederland. In de uitvoering kan versnelling worden gerealiseerd door van elkaar te leren.		
Techniek Nederland			
TenneT	Transport System Operator		TenneT Holding Lighting the way ahead together
TNO	Onafhankelijke not-for-profit onderzoeksorganisatie die is samengesteld uit units, raden en een services-organisatie.	N/A	Innovation for life TNO
Vereniging Nederlandse Gemeenten (VNG)	Belangenorganisatie en het kennisplatform voor alle Nederlandse gemeenten. Het doel van de VNG is om de krachten van gemeenten te bundelen en gezamenlijk op te treden in het belang van de lokale overheid en haar inwoners.	Nederlandse gemeenten	VNG Vereniging van Nederlandse Gemeenten
VNO-NCW	VNO-NCW is een vereniging die de belangen van kleine, middelgrote en grote ondernemingen verspreid over alle sectoren behartigt.		Over ons - VNO-NCW
Werkgeversvereniging Energie en Nuts Bedrijven	De WENB is de werkgeversvereniging voor bedrijven in energie, telecom, recycling en milieu.	±75 directe leden	Homepage van de werkgeversvereniging WENB
Westland Infra	Regionale netbeheerder		Thuis & Kleinzakelijk :: Westland Infra

Bijlage B

Conceptueel kader voor Product Line Engineering

Deze bijlage werkt het conceptuele kader voor Product Line Engineering (PLE) uit dat in hoofdstuk 3 wordt gebruikt om modulaair bouwen bij de Nederlandse netbeheerders te analyseren. Waar hoofdstuk 3 de hoofdboodschap en toepassing op de netbeheerders beschrijft, richt deze bijlage zich op de onderliggende begrippen, principes en ontwerpkeuzes. PLE wordt daarbij gezien als het systematisch organiseren van gemeenschappelijkheid en variatie binnen een familie van verwante systemen, zodat oplossingen vanuit een gedeelde architectuur kunnen worden samengesteld, geconfigureerd, geverifieerd en doorontwikkeld. Het BAPO-perspectief — Business, Architecture, Process en Organisation — fungeert daarbij als verbindend ordeningskader: PLE-keuzes worden steeds beoordeeld op hun bijdrage aan businesswaarde, architecturale samenhang, herhaalbare processen en organisatorische borging.

Binnen dit kader vullen standaardisatie en modulariteit elkaar aan. Standaardisatie legt vast wat gemeenschappelijk is en herhaald kan worden toegepast; modulariteit bepaalt waar variatie, wijziging en vervanging beheersbaar blijven. Productlijnengineering vraagt daarom niet alleen om herbruikbare componenten of standaardontwerpen, maar ook om expliciete keuzes over architectuur, interfaces, variatiepunten, configuratieregels, verificatie, levenscyclusbeheer en governance.

Het BAPO-perspectief wordt in deze bijlage gebruikt als ordeningskader. Dit maakt zichtbaar dat PLE geen puur technisch standaardisatievraagstuk is, maar een samenhangende ontwikkelopgave waarin businessdoelen, architectuurkeuzes, processen en organisatorische sturing op elkaar moeten aansluiten. Bijlage C bevat de praktijkobservaties per netbeheerder; deze bijlage beperkt zich tot het conceptuele kader.

Paragraaf B.1 introduceert PLE als benadering voor families van systemen. Paragraaf B.2 bespreekt standaardisatie, modulariteit en variabiliteit. Paragraaf B.3 beschrijft verschillende PLE-strategieën. Paragraaf B.4 gaat in op referentiearchitecturen als verbindend mechanisme tussen productlijn, projecten en levenscyclusontwikkeling. Paragrafen B.5 en B.6 positioneren Systems Engineering, systeemarchitectuur en governance als randvoorwaarden om PLE schaalbaar toe te passen.

B.1 Factoren voor een PLE-strategie

Een productlijn is daarom niet alleen een verzameling herbruikbare oplossingen, maar een expliciete keuze om businessdoelen — zoals schaalbaarheid, voorspelbaarheid, doelmatigheid en levenscyclusflexibiliteit — structureel te vertalen naar architectuur, processen en organisatie-inrichting. De keuze voor een PLE-strategie wordt bepaald door een combinatie van businessdrivers, contextuele beperkingen en organisatorische randvoorwaarden. Voor energie-infrastructuur is daarbij het levenscyclusperspectief essentieel: de bouwopgave moet

niet alleen versneld worden gerealiseerd, maar ook leiden tot assets die decennialang betrouwbaar, veilig en doelmatig in operatie blijven. De belangrijkste factoren zijn:

- **Schaal, volume en tempo**
Het aantal systemen en de snelheid waarmee deze moeten worden gerealiseerd.
- **Personeel en productiviteit**
Behoeft om engineering- en uitvoeringscapaciteit effectiever in te zetten.
- **Variatie en onzekerheid**
Mate waarin verschillen tussen systemen en veranderende contexten beheersbaar moeten worden gemaakt, zowel vooraf als toekomstige variatie.
- **Levenscyclus, operatie en instandhouding**
Operatie, onderhoudbaarheid, vervangbaarheid en leveringszekerheid over de gehele levensduur.
- **Toeleveringsketen en beschikbaarheid**
Beperkingen en kansen rond leveranciers, levertijden, componentbeschikbaarheid en ketencapaciteit.
- **Organisatie en governance**
Inrichting van eigenaarschap, mandaat, besluitvorming en feedbackloops rond productlijnkeuzes.

Deze factoren bepalen gezamenlijk de economische en organisatorische haalbaarheid van een PLE-strategie. Hoe zwaar elke factor weegt, hangt af van het type systeem, het verwachte volume, de mate van variatie, de levensduur en de organisatorische context.

De businesscase voor PLE is complex omdat kosten en baten vaak op verschillende niveaus, momenten en budgetten liggen. Investerings in productlijnarchitectuur, platformen, configuratieregels, verificatiebewijzen en governance worden meestal vooraf op productlijn- of programmaniveau gedaan, terwijl baten pas later ontstaan in projecten, inkoop, testen, operatie, onderhoud en vervanging. Een PLE-businesscase moet daarom niet alleen projectkosten vergelijken, maar ook levenscycluswaarde, risicoreductie, capaciteitswinst, schaalbaarheid, interne complexiteitskosten en hergebruik over meerdere projecten meenemen. Vanuit productplatformdenken worden investeringen bewust gedaan op productlijnniveau om waarde te creëren over een familie van systemen en meerdere generaties van producten [56] [57].

Deze factoren moeten in samenhang worden beoordeeld: een PLE-strategie is pas doelmatig wanneer de beoogde businesswaarde, architectuurkeuzes, benodigde processen en organisatorische governance elkaar ondersteunen [58] [59] [21].

B.2 Standaardisatie en modulariteit

Vanuit BAPO gezien vormt standaardisatie vooral de architectuur- en procesbasis voor herhaalbaarheid: zij legt vast wat gemeenschappelijk is en hoe dit consistent wordt toegepast. Modulariteit verbindt deze basis met businesswaarde en veranderbaarheid: interfaces en variatiepunten bepalen waar toekomstige wijzigingen, configuraties, uitbreidingen, vervanging en obsolescence beheersbaar blijven. Standaardisatie zonder expliciet variatiebeheer leidt vooral tot uniformering; modulariteit binnen PLE maakt gecontroleerde variatie en levenscyclusflexibiliteit mogelijk [60] [61] [58].

Standaardisatie legt herbruikbare afspraken, eisen, architecturen, ontwerpen, specificaties, werkwijzen of artefacten vast om herhaling, voorspelbaarheid, uitwisselbaarheid en kwaliteitsborging mogelijk te maken. Standaardisatie kan worden beschreven naar schaal, reikwijdte en toepassingsdomein. In dit rapport wordt “standaard” breed gebruikt; een “norm” is een formeel vastgestelde standaard van een erkende normalisatieorganisatie, zoals ISO,

IEC, CEN, CENELEC, ETSI of NEN. Het Engelse begrip “standard” is breder dan het Nederlandse “norm” en omvat ook industrie-, sector- en bedrijfsstandaarden.

Modularisatie is het ontwerpproces waarbij een systeem wordt gestructureerd in samenhangende bouwstenen met duidelijke verantwoordelijkheden, grenzen en interfaces. Modulariteit is de resulterende eigenschap dat onderdelen relatief onafhankelijk kunnen worden gecombineerd, vervangen, getest, ontwikkeld of aangepast. Modularisatie gaat daarmee over het ontwerpen van de structuur; modulariteit over de mate waarin die structuur flexibiliteit, hergebruik en evolueerbaarheid ondersteunt.

Modulariteit heeft niet alleen betrekking op producten en systemen, maar ook op organisaties en waardeketens. Modulariteit maakt het mogelijk om verantwoordelijkheden, besluitvorming, leveranciersrelaties en levenscyclusactiviteiten langs architectuurgrenzen te organiseren. Hierdoor ontstaat flexibiliteit in zowel technische als organisatorische systemen. Modulariteit wordt daarmee niet alleen een architectuureigenschap, maar ook een organisatorische capability die flexibiliteit ondersteunt in besluitvorming, leveranciersrelaties en levenscyclusmanagement [61].

Modulariteit elimineert complexiteit niet automatisch. Een deel van de complexiteit verschuift naar interfaces, ontwerpregels, configuratieregels en integratie. Naarmate modulariteit toeneemt worden architectuurdiscipline, referentiearchitecturen en governance daarom belangrijker [60] [62].

In een Product Line Engineering-context krijgt standaardisatie een productlijnfunctie. Standaarden leggen de gemeenschappelijke elementen van een productlijn vast, zoals functies, interfaces, modules, configuratieregels, processen en verificatiebewijzen. Daarmee beperken zij ongewenste variatie en maken zij hergebruik, kwaliteitsborging en voorspelbare toepassing over meerdere systemen, projecten en levenscyclusfasen mogelijk.

Modularisatie bepaalt vervolgens waar gewenste variatie in de productlijn mag optreden en hoe deze beheersbaar blijft. Modules, interfaces en configuratieregels maken het mogelijk om project- of context-specifieke oplossingen af te leiden zonder de samenhang van de productlijn te verliezen. De kracht van PLE ontstaat dus uit de combinatie: standaardisatie zorgt voor herhaalbaarheid en beheersing, terwijl modulariteit flexibiliteit en evolueerbaarheid mogelijk maakt.

B.3 PLE-strategieën

In dit rapport worden vier archetypische PLE-strategieën onderscheiden. Deze strategieën verschillen in de mate van hergebruik, standaardisatie, initiële investering, flexibiliteit en robuustheid voor variatie. Zij vormen geen volwassenheidsladder: de passende strategie hangt af van volume, voorspelbaarheid van variatie, levenscycluscontext, keteninrichting en governancecapaciteit [63] [58].

Tabel 10.4: PLE-strategieën.

Engelse term	Nederlandse benaming	Definitie
Clone & Own	Klonen en aanpassen	Hergebruik ontstaat door bestaande systemen te kopiëren en per project aan te passen; variatie blijft impliciet en elk product wordt feitelijk opnieuw ontworpen.

Engelse term	Nederlandse benaming	Definitie
Component Library	Componentenbibliotheek	Producten worden samengesteld uit herbruikbare, gestandaardiseerde componenten; integratie en variatie worden per project ingevuld.
Framework Library	Configuratieraamwerk	Producten worden samengesteld uit gestructureerde bouwstenen, interfaces en variatiepunten; hergebruik en variatiebeheer zijn expliciet georganiseerd.
Superset Platform (150%)	Supersetplatform / 150%-platform	Producten worden gekozen uit één integraal model waarin alle vooraf bekende varianten zijn vastgelegd, met hoge variëteit en massaproductie-efficiëntie.

Elk van deze modellen heeft zijn eigen afweging tussen flexibiliteit, efficiëntie, investering en beheersbaarheid. Het spectrum is daarmee een palet voor PLE-strategiekeuzes, geen rangorde van goed naar beter. Een componentenbibliotheek of configuratieraamwerk kan in een context met lage volumes, onverwachte variatie of sterke locatieafhankelijkheid doelmatiger zijn dan een supersetplatform. Tabel 10.5 toont de eigenschappen en trade-offs van elk van deze PLE-modellen.

Tabel 10.5 Eigenschappen en trade-offs van PLE-modellen.

Aspect	Klonen en aanpassen	Componentenbibliotheek	Configuratieraamwerk	Supersetplatform / 150%-platform
Kernidee	Kopiëren en aanpassen	Hergebruik van componenten	Structuur + variatiepunten	Compleet productlijnmodel
Typisch gebruik	Lage aantallen, veel maatwerk	Herhaling met variatie	Productfamilies	Massamaatwerk
Hergebruik	Laag	beperkt	hoog	zeer hoog
Variatiebeheer	impliciet	beperkt	expliciet	volledig expliciet
Configuratie	handmatig	deels impliciet	Regelgestuurd via architectuur	Voorgedefinieerde opties
Initiële investering	zeer laag	laag	middel–hoog	zeer hoog
Doorlooptijd (eerste product)	snelst	snel	trager	traagst
Doorlooptijd (herhaling)	traagst	traag	snel	snelst
Opschaalbaarheid	Laag	beperkt	hoog	zeer hoog
Complexiteit zit in	project	integratie	architectuur + regels	model + randvoorwaarden
Onderhoud / evolutie	moeilijk	matig	goed beheersbaar	complex; minder robuust voor onverwachte toekomstige variatie
Organisatorische impact	Laag	beperkt	significant	zeer groot
Geschikt bij	unieke projecten, lage herhaling	gedeeltelijke standaardisatie	gebalanceerde variatie + herhaling	stabiele, goed voorspelbare en hoog herhaalde varianten

Aspect	Klonen en aanpassen	Componentenbibliotheek	Configuratieraamwerk	Supersetplatform / 150%-platform
Architectuur	impliciet en project-specifiek	Componenten gestandaardiseerd	Expliciet vastgelegd met interfaces en variatiepunten	Volledige architectuur en variabiliteit van tevoren vastgelegd
Engineering	Projectniveau	Ontwerp en integratie van standaardcomponenten tot product op projectniveau	Grotendeels productlijn, meer configureren dan ontwerpen in project	Volledig op productlijnniveau.
IVVQ	Herhalend, weinig herbruikbaar	Herbruikbaar op componentniveau	Systematisch herbruikbaar over productlijn	Vooraf geborgd

De optimale strategie wordt bepaald door de balans tussen gewenste externe variatie en de interne complexiteit die een organisatie kan beheersen.

De keuze voor een PLE-strategie is geen puur technische keuze en vormt ook geen eenvoudige volwassenheidsladder. Een componentenbibliotheek vraagt andere investeringen, processen en governance dan een configuratieraamwerk of platformbenadering. Vanuit BAPO-perspectief moet elke strategie worden beoordeeld op de businesswaarde die zij ondersteunt, de architectuurkeuzes die zij mogelijk maakt, de processen die nodig zijn voor configuratie en wijzigingsbeheer, en de organisatorische capaciteit om de gekozen productlijn over meerdere projecten en levenscyclusfasen te beheren [59] [32] [31] [63].

B.4 Referentiearchitectuur, platformen en organisatorische context

Binnen PLE vormt de referentiearchitectuur het scharnierpunt tussen de BAPO-dimensies. Zij vertaalt businessdoelen naar architectuurprincipes, productlijnen, interfaces en variatiepunten, en geeft richting aan processen voor configuratie, verificatie, wijzigingsbeheer en levenscyclusontwikkeling. Tegelijkertijd maakt zij zichtbaar welke organisatorische afspraken nodig zijn over eigenaarschap, besluitvorming en governance van standaarden, interfaces en productlijnen [22] [64] [31].

Een referentiearchitectuur is de herbruikbare architectuurbasis voor een familie van systemen. Zij legt vast welke architectuurprincipes, structuren, interfaces, kwaliteitseigenschappen en ontwerpkeuzes gemeenschappelijk zijn, en waar gecontroleerde variatie is toegestaan. Een platform implementeert vervolgens het gemeenschappelijke deel van de productlijn: de herbruikbare functies, modules, interfaces, configuratieregels en verificatiebewijzen waarop specifieke varianten worden gebaseerd. Daarmee maakt de referentiearchitectuur expliciet welke delen van een productlijn stabiel blijven en welke delen per toepassing kunnen worden geconfigureerd. Referentiearchitecturen leggen daarbij niet alleen architectuurstructuren vast, maar ook ontwerpregels, architectuurbeslissingen, variatiepunten en de rationale achter gemaakte keuzes [65] [66].

Binnen PLE ondersteunt een referentiearchitectuur zowel het ontwikkelen en beheren van de productlijn als geheel (*domain engineering*) als het toepassen daarvan in concrete projecten (*application engineering*). Op productlijnniveau beschrijft zij de gemeenschappelijke architectuur, variatiepunten, interfaces, configuratieregels en herbruikbare verificatiebewijzen. Op

projectniveau wordt hieruit een specifieke systeemarchitectuur afgeleid door varianten te selecteren en modules te configureren.

Vanuit Design Rules Theory wordt de snelheid waarmee productlijnen kunnen evolueren sterk bepaald door de kwaliteit van interfaces, standaarden, architectuurprincipes en configuratieregels. Deze ontwerpregels vormen de stabiele kern waarbinnen variatie en innovatie mogelijk zijn. De kwaliteit van deze ontwerpregels bepaalt in belangrijke mate hoe onafhankelijk modules kunnen evolueren en hoe efficiënt nieuwe varianten kunnen worden ontwikkeld [60].

De context van een productlijn wordt bepaald door de positie ervan binnen de organisatie. Een productlijn staat niet op zichzelf, maar bevindt zich tussen portfolio, programma's, projecten, assetmanagement, inkoop, operatie, onderhoud en de toeleveringsketen. Die context bepaalt welke variatie waardevol is, welke delen gemeenschappelijk moeten worden beheerd, welke platformen nodig zijn en wie mandaat heeft over standaarden, afwijkingen en releases. Een referentiearchitectuur moet daarom niet alleen de technische structuur van de productlijn beschrijven, maar ook haar organisatorische inbedding: voor welke doelen de productlijn wordt ontwikkeld, welke organisatieonderdelen haar gebruiken, wie eigenaar is van gemeenschappelijke assets en hoe feedback uit projecten en operatie terugvloeit naar de productlijn [32] [66].

Referentiearchitecturen kunnen op meerdere niveaus bestaan. Overkoepelende referentiearchitecturen worden meestal op portfolio- of organisatieniveau ontwikkeld en gebruikt om samenhang te sturen tussen domeinen, productlijnen en platformen. Horizontale referentiearchitecturen beschrijven gedeelde voorzieningen en platformen, zoals OT/IT, cybersecurity, datamodellen of testinfrastructuur; zij worden vooral gebruikt door meerdere productlijnen en programma's. Verticale referentiearchitecturen beschrijven een specifieke productlijn of systeemfamilie en worden vooral gebruikt in projecten om concrete systeemarchitecturen af te leiden. Platformen volgen dezelfde gelaagdheid: een productlijnplatform implementeert het gemeenschappelijke deel van één productlijn, terwijl horizontale platformen gedeelde voorzieningen over meerdere productlijnen heen implementeren.

Naarmate een organisatie verschuift van losse componentenbibliotheken naar configuratieraamwerken of 150%-platformen, wordt een expliciete set van referentiearchitecturen en platformen belangrijker. Er kan bijvoorbeeld een productlijnplatform zijn dat het gemeenschappelijke deel van één productlijn implementeert, naast horizontale platformen voor gedeelde voorzieningen zoals datamodellen, testinfrastructuur of OT/IT. Elke referentiearchitectuur biedt daarbij de gemeenschappelijke taal, architectuurbaseline en interfaceafspraken voor het bijbehorende platform. Projecten configureren vervolgens binnen de relevante platformen, terwijl leerervaringen uit projecten terugvloeien naar de betreffende productlijn, referentiearchitectuur en platformen.

B.5 Systems Engineering en de systeemlevenscyclus

Binnen Product Line Engineering verschuift Systems Engineering van een projectgerichte discipline naar een productlijnbrede levenscyclusfunctie. Behoeften, eisen, architectuurkeuzes, configuratieregels en verificatiebewijs worden niet alleen per project beheerd, maar zoveel mogelijk op het niveau van standaarden, referentiearchitecturen en productlijnen. Daarmee ondersteunt SE niet alleen aantoonbaarheid, maar ook hergebruik, doelmatigheid,

wijzigingsbeheer en consistente kwaliteit over meerdere projecten en generaties van systemen heen [67] [57].

Product Line Engineering bouwt hierop voort door SE toe te passen op een familie van verwante systemen. Waar SE in een project de samenhang borgt tussen probleem, oplossing en bewijsvoering, organiseert PLE deze samenhang op productlijnniveau. Gemeenschappelijke eisen, modules, interfaces, ontwerpkeuzes, configuratieregels en verificatiebewijzen worden daarbij ontwikkeld, beheerd en toegepast over meerdere projecten heen. De inrichting daarvan hangt af van verwachte volumes, gewenste variatie, levenscyclusbehoeften en de kenmerken van toeleveringsketen, fabricage, installatie en inbedrijfstelling.

Voor langlevende fysieke infrastructuur is dit levenscyclusperspectief essentieel. Keuzes die vroeg in de architectuur worden gemaakt, werken door in productie, toeleveringsketen, installatie, operatie, onderhoud, modernisering, vervanging en uitfasering. Variatie ontstaat daarbij niet alleen uit projectspecifieke context, maar ook uit assetmanagement, obsolescence, cybersecurity, veranderende regelgeving en toekomstige beheer- en vervangingsopgaven. Standaardisatie en modulariteit leveren daarom niet alleen waarde tijdens engineering en bouw, maar ook later: expliciete interfaces ondersteunen uitwisselbaarheid, herbruikbare verificatiebewijzen verminderen testlast en modulaire architecturen maken vervanging en modernisering beter beheersbaar [68] [69].

De relatie tussen SE en PLE speelt daarmee op drie niveaus. Op projectniveau helpt SE om een specifieke oplossing doelmatig te definiëren, realiseren en verifiëren. Op productlijnniveau helpt PLE om gemeenschappelijkheid, variatie en bewijsvoering systematisch te beheeren. Op portfolio- en organisatieniveau helpt SE om businessdoelen, levenscycluswaarde, governance, toeleveringsketen en operationele consequenties in samenhang te sturen.

Governance borgt dat deze productlijnbrede keuzes niet vrijblijvend zijn. Zij bepaalt eigenaarschap, mandaat, variatiebeheer, configuratieregels, wijzigingsbeheer en feedbackloops, zodat standaarden, modules, platformen en verificatiebewijzen consequent worden beheerd, toegepast en verbeterd over projecten en levenscyclusfasen heen. Deze governancefunctie wordt verder uitgewerkt in bijlage B.6.

B.6 De rol van de systeemarchitect

De systeemarchitect brengt productlijnbrede consequenties van ontwerpkeuzes in beeld en adviseert over de balans tussen standaardisatie, variatie, levenscycluswaarde en projectbelangen. In de geest van Maier en Rechtin [15] gaat het daarbij vooral om het expliciet maken van richtinggevendende systeemkeuzes op het moment dat informatie nog onvolledig is, maar de gevolgen voor de verdere levenscyclus groot zijn. De architect is verantwoordelijk voor de kwaliteit van de analyse en de architecturaanbeveling, maar niet voor het eenzijdig beslechten van conflicterende belangen. Besluiten over deze afwegingen horen thuis in een governance-orgaan met mandaat over projecten, productlijnen, assetmanagement, inkoop en operatie heen. Deze interpretatie sluit aan bij de rol van systems architecting als het balanceren van tegenstrijdige belangen en constraints in complexe systemen, zoals ook beschreven in de NASA Systems Engineering Handbook [14].

De systeemarchitect werkt op meerdere niveaus. Op productlijnniveau ontwikkelt en onderhoudt de architect de architectuurvisie, modulariteit en configureerbare variatie. Op het niveau van referentiearchitecturen en platformen worden gemeenschappelijke structuren, interfaces en variatiepunten vastgelegd. Op projectniveau helpt de architect concrete oplossingen af te leiden uit de productlijn, door varianten te selecteren en projectspecifieke keuzes

te onderbouwen zonder de samenhang van de productlijn te ondermijnen. Naarmate productlijnen volwassen worden, verschuift de rol van de architect van het ontwerpen van individuele systemen naar het beheren van architectuurregels, variatiepunten en productlijnontwikkeling als geheel. Daarmee bepaalt de architect niet alleen hoe systemen vandaag worden samengesteld, maar ook welke toekomstige veranderingen eenvoudig, kostbaar of juist onmogelijk worden [58] [32].

Een kernverantwoordelijkheid van de systeemarchitect is het expliciet maken van ontwerpkeuzes en afwegingen. Architectuur gaat daarbij vooraf aan gedetailleerd ontwerp: eerst moet helder zijn welk probleem wordt opgelost, voor wie, onder welke randvoorwaarden en met welke waarde over de levenscyclus. Voorbeelden zijn de balans tussen standaardisatie en lokale projectbehoeften, tussen modulariteit en prestatie-optimalisatie, tussen korte-termijn projectdoelen en langetermijn platformwaarde, en tussen initiële investering en levenscycluskosten. De architect identificeert stakeholderbelangen, analyseert alternatieven, maakt consequenties zichtbaar en adviseert over een gebalanceerde keuze voor de productlijn als geheel.

Governance vormt binnen BAPO de organisatiedimensie die bepaalt of productlijnen, standaarden en variatiebeheer daadwerkelijk schaalbaar worden toegepast. Zonder expliciet eigenaarschap, mandaat, wijzigingsbeheer en besluitvorming blijven standaarden kwetsbaar voor projectmatige afwijkingen en lokale optimalisatie. PLE vraagt daarom niet alleen om architectuurprincipes en configuratieregels, maar ook om een organisatie-inrichting die productlijnen over projecten en levenscyclusfasen heen kan ontwikkelen, beheren en aanpassen. Juist omdat architectuurbesluiten vaak vroeg, onder onzekerheid en met grote langetermijngevolgen worden genomen, moet governance borgen dat deze besluiten transparant, herleidbaar en productlijnbreed worden afgewogen.

Voor langlevende fysieke infrastructuur is deze rol extra belangrijk. Architectuurkeuzes werken door in ontwerp, bouw, productie, toeleveringsketen, operatie, onderhoud, modernisering, vervanging en uitfasering. Een volwassen PLE-aanpak vraagt daarom om sterke architectuurleiding én expliciete governance: de architect maakt de productlijnbrede consequenties zichtbaar, vooral voor toekomstige veranderbaarheid en levenscycluswaarde, terwijl governance bepaalt welke afweging maatschappelijk, bedrijfsmatig en levenscyclusbreed wordt geaccepteerd [66] [70].

Bijlage C

PLE-kader toegepast op de netbeheerders

Bijlage C past het conceptuele kader voor Product Line Engineering uit Bijlage B toe op de huidige aanpak van modulaair bouwen en standaardisatie bij de afzonderlijke netbeheerders. Per netbeheerder wordt beschreven welke strategische PLE-factoren dominant zijn, hoe de aanpak zich verhoudt tot standaardisatie, modulariteit, PLE-strategieën, referentiearchitectuur, Systems Engineering, levenscyclusdenken en de architectuurfunctie, en welke vervolgstappen passen bij de specifieke context van de netbeheerder.

C.1 Alliander

Alliander heeft een sterk platformgerichte Product Line Engineering-aanpak gekozen, passend bij hoge herhaling, vooraf bekende variatie en centrale productlijndiscipline. Modulaair bouwen is standaardwerkwijze, met modulaire stations op basis van een 150%-model ondersteund door standaardbouwstenen, raamcontracten, protocollen, KPIs, en kernteams met mandaat. Dit sluit sterk aan op Bijlage B, waarin PLE wordt beschreven als het expliciet beheren van gemeenschappelijkheid, variatie, configuratie, verificatiebewijzen en governance over meerdere projecten.

De resterende opgave ligt vooral in verdere operationalisering: value-case, doelmatige eisen, portfolio-sturing, afwijkingsbeheer, levenscyclus-feedback, harmonisatie tussen regio's en explicietere architectuurgovernance. Daarbij is relevant dat de rol van systeemarchitect zoals beschreven in Bijlage B bij netbeheerders meestal niet als afzonderlijke formele functie bestaat; architectuurbesluiten zijn vaak verdeeld over lead engineers, specialisten, standaardisatiegroepen, assetmanagement en programma-/projectsturing.

C.1.1 Factoren voor een PLE-strategie

Bij Alliander is de aanpak gericht op sneller bouwen, opschalen door standaardiseren en clusteren, slimmer gebruik van schaarse capaciteit, prefab en configure-to-order. Daarmee is de PLE-rationale sterk verbonden met de FuESSE25-doelen productiviteit, doorlooptijd, kwaliteit, ketensamenwerking en competentieschaarste.

De belangrijkste PLE-factoren voor Alliander zijn volume/tempo, inzet van schaarse engineers en technici, beheersing van variatie via het 150%-model, levenscyclus-borging via Qirion/IVVQ en ketenvoorspelbaarheid via raamcontracten. Verdere versterking zit in expliciete value-case-onderbouwing en portfolio-sturing: PLE-investeringen renderen immers niet alleen in projecten, maar ook in inkoop, testen, operatie, onderhoud en vervanging.

Tussenconclusie B.1: Alliander heeft een sterke strategische fit met PLE. De aanpak is vooral gedreven door volume, tempo, personeelsschaarste, variatiebeheersing en levenscycluskwaliteit; value-case en portfolio-afwegingen kunnen nog explicieter.

C.1.2 Standaardisatie en modulariteit

Bijlage B.2 onderscheidt standaardisatie als het vastleggen van herbruikbare afspraken, ontwerpen, processen en verificatiebewijzen, en modularisatie als het ontwerpen van bouwstenen met duidelijke grenzen en interfaces. Alliander past beide toe: standaardbouwstenen, modulaire stations, raamcontracten, protocollen en KPIs vormen samen een productlijnmechanisme, niet alleen een componentencatalogus.

Het 150%-model fungeert als superset van stations en maakt vooraf bekende variatie expliciet. Afwijkingen lijken vooral aan de “schil” van het station plaats te vinden, terwijl de kern zoveel mogelijk gestandaardiseerd blijft. Daarmee combineert Alliander herhaalbaarheid met gecontroleerde contextvariatie, precies de combinatie die Bijlage B als kern van PLE beschrijft.

Tussenconclusie B.2: Alliander scoort hoog op de combinatie van standaardisatie en modulariteit. De productlijnkern is sterk gestandaardiseerd, terwijl variatie gecontroleerd wordt toegestaan en vaker voorkomende variatie in de standaard wordt opgenomen.

C.1.3 PLE-strategieën

Bijlage B.3 onderscheidt vier PLE-strategieën: klonen en aanpassen, componentenbibliotheek, configuratieraamwerk en supersetplatform/150%-platform. Alliander bevindt zich duidelijk aan de rechterkant van dit spectrum. De combinatie van 150%-model, standaardstations, bouwstenen, protocollen, KPIs en mandaat past vooral bij een supersetplatformstrategie, aangevuld met een configuratieraamwerk voor locatie- en contextvariatie.

Alliander is daarmee duidelijk voorbij een componentenbibliotheekstrategie. Integratie, validatie, standaardbeheer en variatiebeheersing liggen niet alleen bij projecten, maar worden centraal en productlijnachtig georganiseerd. Omdat fysieke infrastructuur altijd locatie-, vergunning- en omgevingsvariatie kent, is de meest passende typering: **supersetplatform voor de productlijnkern, configuratieraamwerk voor contextspecifieke variatie**.

Tussenconclusie B.3: Alliander kiest voor een platformgerichte PLE-strategie: primair een 150%-platform voor de productlijnkern, aangevuld met configuratieregels voor contextvariatie. Deze strategie past bij hoge herhaling en voorspelbare variatie, maar vraagt blijvende discipline in modelbeheer, afwijkingsbeheer en levenscyclus-evolutie.

C.1.4 Referentiearchitectuur, platformen en organisatorische context

Bijlage B.4 beschrijft een referentiearchitectuur als herbruikbare architectuurbasis voor een familie van systemen. Alliander's 150%-model, standaardstations, bouwstenen, protocollen en raamcontracten kunnen worden gezien als een platformachtige basis waaruit projecten concrete configuraties afleiden. De aanpak is bovendien organisatorisch verankerd via kernteams, mandaat en topmanagementsponsoring.

De belangrijkste verdere ontwikkeling ligt in expliciete koppeling tussen productlijn, portfolio, project, assetmanagement, operatie, inkoop en keten. Specialistische resources en projecten moeten op portfolioniveau worden geprioriteerd en feedback uit projecten en externe partijen moet terugvloeien naar standaarden en releases. Dat past direct bij de PLE-logica van bijlage B.

Tussenconclusie B.3: Alliander heeft een sterke platformachtige basis en organisatorische verankering. Portfoliosturing, releasebeheer en structurele feedbackloops zijn de belangrijkste vervolgstappen.

C.1.5 Systems Engineering en de systeemlevenscyclus

Bijlage B.5 ziet SE als organisatiecompetentie om behoeften, eisen, architectuur, interfaces, verificatie en levenscycluskeuzes te verbinden. Alliander sluit hierbij aan doordat modulair bouwen niet alleen technische bouwstenen omvat, maar ook contracten, processen, IVVQ, Qirion, standaardontwerpen en testprotocollen. Daarmee krijgt PLE ook levenscyclus-inhoud. Bij IVVQ maakt Alliander onderscheid tussen herbruikbare assets en stationsconfiguraties. Standaardontwerpen voor opdrachtnemers worden ondersteund door generieke testprotocollen; afwijkingen krijgen aanvullende tests. Qirion borgt integratie en OT-testen, met regionale OT-teams, landelijke testprocessturing, qTest en ambitie voor PAT-automatisering. Dit past bij PLE doordat verificatiebewijs zoveel mogelijk productlijnbreed wordt opgebouwd.

Een aandachtspunt is dat stationsconfiguraties nog per regio worden ontwikkeld en getest, waardoor dubbel werk ontstaat. Verdere harmonisatie, hergebruik van testbewijs en expliciete risicogebaseerde teststrategieën zijn nodig om de levenscycluswaarde van PLE volledig te benutten.

Tussenconclusie B.5: Alliander heeft een sterke SE/PLE-basis over ontwerp, realisatie en IVVQ. Verdere winst zit in harmonisatie, traceerbaarheid, hergebruik van testbewijs en levenscyclus-feedback.

C.1.6 De rol van de systeemarchitect

Bijlage B.6 beschrijft de systeemarchitect als rol die productlijnbreed samenhang bewaakt tussen businessdoelen, functies, referentiearchitectuur, platformen, modules, interfaces, configuratieregels en verificatiebewijzen. Bij Alliander zijn veel van deze activiteiten herkenbaar in het 150%-model, kernteams, standaardbouwstenen en afwijkingsturing. Tegelijkertijd moet expliciet worden gemaakt dat de functie “systeemarchitect” bij netbeheerders op dit moment meestal niet als formele, afzonderlijke rol bestaat.

De architectuurfunctie is bij Alliander dus eerder verdeeld over kernteams, lead engineers, specialisten, standaardisatie-eigenaren, assetmanagement en programmasturing. Dit werkt zolang mandaat, analyse en governance expliciet zijn ingericht. Voor verdere PLE-volwassenheid is het belangrijk om deze architectuurfunctie explicieter te beleggen, ook als dit niet meteen een nieuwe functietitel vraagt.

De behoefte hieraan neemt toe door groei en kennisverdunding. Architectuurkeuzes, configuratieregels en afwijkingsprincipes moeten daarom niet alleen in experts zitten, maar expliciet worden vastgelegd in standaarden, tooling, opleiding, besluitvorming en governance.

Tussenconclusie B.6: Alliander vervult veel systeemarchitectuuractiviteiten, maar de architect als formele functie is niet expliciet ingericht. Voor schaalbare PLE is een herkenbare architectuurfunctie nodig, met duidelijk mandaat, besluitvorming en borging van productlijnkennis.

C.2 Enexis

Enexis heeft een volwassen, pragmatische modulaire bouwpraktijk voor HS/MS-stations via de Modulaire Bouw-standaard voor N&U van de afdeling HS/MS stations. De aanpak is sterk

gebaseerd op vaste typicals voor primaire, secundaire en bouwkundige onderdelen, standaardbouwstenen, vaste opdrachtnemers en een strak herhaalbaar realisatie- en commissie-ningsproces. In FuESSE wordt Enexis getypeerd als “Serieproductie & pragmatische modulariteit”: modulariteit via bouwblokken en herhaalbare projecten, met “geen volledig plat-form/superset vooraf”.

De sterke kant van Enexis is de uitvoerbaarheid: de standaard werkt in projecten, sluit aan op opdrachtnemers en reduceert IVVQ-inspanning door herhaling en vooraf gevalideerde typi-cals. De resterende opgave ligt vooral in landelijke consistentie, standaardbeheer, portfolio-inbedding, koppeling met Asset Management en explicietere architectuur- en governance-functie. Letterlijke quote uit Enexis-notities: “Enexis heeft nu een mooie standaard die werkt. Nog wel optimaliseren.”

C.2.1 Factoren voor een PLE-strategie

Bijlage B.1 noemt schaal, tempo, schaarse competenties, variatie, levenscyclus, keten en go-vernance als bepalende factoren. Bij Enexis zijn vooral volume/tempo, uitvoerbaarheid, op-drachtnemerseffectiviteit en schaarse capaciteit dominant. De MB-standaard ondersteunt repeteerbare projectuitvoering met vaste typicals, vaste opdrachtnemers en een strak cold-commissioningproces. Daarmee draagt Enexis direct bij aan productiviteit, doorlooptijdverkor-ting, projectkwaliteit en beter gebruik van schaarse Enexis-expertise.

De ketenfactor is bij Enexis bijzonder belangrijk, omdat veel verantwoordelijkheid in de reali-satie bij vaste externe opdrachtnemers ligt. Enexis bepaalt wat getest moet worden via test-criteria, terwijl de aannemer bepaalt hoe componenten getest worden. Dit ondersteunt opschaling, maar vraagt stabiele standaarden, duidelijke contractvormen en eenduidige werkwijze richting opdrachtnemers

De governancefactor is aanwezig, maar verdeeld over meerdere organisatieonderdelen. De standaard wordt gebruikt door de afdeling HS/MS stations, beheerd via een standaardisa-tie-werkgroep met eigenaarschap vanuit EBS. Dit past bij PLE, maar laat ook zien dat pro-ductlijnontwikkeling, standaardbeheer en projecttoepassing organisatorisch explicieter kunnen worden verbonden.

Tussenconclusie: Enexis onderscheidt zich door doelmatigheid vooral te organiseren via sterke ketenintegratie rond een gestandaardiseerde modulaire bouwstroom. Vaste typicals, duidelijke rolverdeling met opdrachtnemers en een herhaalbaar proces beperken projectspe-cifieke eisen en verificatielast. De belangrijkste ontwikkelstap ligt in het explicieter borgen van productlijn-kennis, configuratieregels, testcriteria en levenscycluskwaliteit binnen deze geïnte-greerde ketenaanpak.

C.2.2 Standaardisatie en modulariteit

Bijlage B.2 onderscheidt standaardisatie als het vastleggen van herbruikbare afspraken, ont-werpen, processen en verificatiebewijzen, en modularisatie als het structureren van sys-temen in bouwstenen met interfaces. Enexis past dit pragmatisch toe via functioneel beschreven bouwstenen voor bouwkunde, primaire, secundaire en tertiaire systemen, vaste typicals en twee bouwtypen: MSI en SSI.

De Enexis-aanpak heeft een sterke standaardisatiefunctie, met modulariteit door sterke typi-cals en bouwstenen; variatie is pragmatisch toegestaan op systeemniveau ondersteund door

de organisatorische inbedding en manier van werken. Daarmee ligt de kracht in de herhaalbare modulariteit en uitvoeringsdiscipline.

Een aandachtspunt is wijzigingsbeheer. In de Enexis-notities wordt expliciet genoemd dat “Wijzigingsbeheer/aanpassing van de standaard is nog veel werk”, met als voorbeeld het sneller kunnen introduceren van nieuwe transformatoren in de standaard. Dit raakt de PLE-kern: standaarden moeten stabiel genoeg zijn voor herhaling, maar flexibel genoeg voor levenscyclus-evolutie.

Tussenconclusie B.2 Enexis scoort hoog op pragmatische standaardisatie en modulariteit. De aanpak is sterk repeteerbaar, maar vraagt verdere versterking van expliciet variatiebeheer, releasebeheer en levenscyclus-aanpassing van standaarden.

C.2.3 PLE-strategieën

Enexis past vooral een configuratieraamwerk toe, ondersteund door een sterke typical- en componentenbibliotheek. De aanpak is meer dan losse componenten: typicals, bouwstenen, opdrachtnemersrollen, testcriteria en cold commissioning vormen samen een herhaalbaar systeem. Dat Enexis geen volledig supersetplatform vooraf hanteert, is strategische keuze voor lagere platforminvestering en meer flexibiliteit voor contextvariatie.

De beste typering is daarom: configuratieraamwerk met sterke component-/typical-bibliotheek, gericht op serieproductie en pragmatische modulariteit. Enexis maximaliseert flexibiliteit en uitvoerbaarheid.

Deze strategie past goed bij Enexis' context, waarin uitbesteding, vaste opdrachtnemers en repeteerbare bouwstromen belangrijk zijn. Tegelijk ontstaat bij verdere opschaling behoefte aan strakker configuratiebeheer, standaardreleases en duidelijke beslisregels voor variatie. Dit voorkomt dat configure-to-order ongemerkt terugvalt in lokaal maatwerk.

Tussenconclusie B.3: Enexis gebruikt een volwassen configuratieraamwerkstrategie, ondersteund door typicals en standaardbouwstenen. De keuze voor configure-to-order in plaats van een volledig 150%-platform past bij seriematige uitvoering, opdrachtnemersinzet en blijvende contextvariatie.

C.2.4 Referentiearchitectuur, platformen en organisatorische context

Bijlage B.4 stelt dat een referentiearchitectuur vastlegt wat gemeenschappelijk is en waar gecontroleerde variatie is toegestaan. Bij Enexis is deze architectuur deels impliciet aanwezig in de MB-standaard, typicals, gebouwtypen, testcriteria en proces. De standaardisatie-werkgroep geeft twee keer per jaar releases vrij, wat wijst op een vorm van productlijnbeheer.

De organisatorische context is echter verdeeld. De Enexis afdeling HS/MS stations gebruikt de standaard in N&U-projecten onder de regie van EBS. De distributie-infrastructuur valt onder Asset Management en maakt gebruik van meerdere vanuit de markt geleverde 150%-platformen waar geen engineering meer op plaats vindt. Deze distributie-infrastructuur heeft veel hogere volumes en met weinig variatie, waardoor een 150%-platform hier goed past.

De Enexis HS/MS-stations hebben sterke afhankelijkheden naar TenneT, gemeenten en opdrachtnemers. In de notities worden voorbeelden genoemd zoals stations die wachten op

aansluiting, aanpassing van stationsuiterlijk voor het verkrijgen van vergunningen en het delen van concepten met andere netbeheerders. Dit past bij Bijlage B: productlijnen staan tussen portfolio, projecten, assetmanagement, inkoop, operatie en keten.

Tussenconclusie B.4: Enexis heeft een sterke impliciete referentiearchitectuur via MB-standaard en typicals. De vervolgstap is explicietere organisatorische inbedding tussen de afdeling HS/MS stations, Asset Management, portfolio, opdrachtnemers en standaardreleases.

C.2.5 Systems Engineering en de systeemlevenscyclus

Bijlage B.5 ziet SE als organisatiecompetentie om eisen, architectuur, interfaces, verificatie en levenscycluskeuzes te verbinden. Bij Enexis is dit vooral zichtbaar in het N&U-proces, de MB-standaard, typicals, FMECAs, testcriteria, vaste documentensets en cold commissioning. De standaard reduceert project-IVVQ omdat veel ontwerpkeuzes en risico's al in de typical-ontwikkeling zijn geadresseerd.

De cold-commissioning aanpak is een sterk levenscyclus- en IVVQ-element. De grootste IVVQ-inspanning vindt plaats terwijl het station nog spanningsloos is, waardoor een strak, herhaalbaar testproces mogelijk is. De doorlooptijd voor een station met twee transformatoren en één MS-blok bedraagt ongeveer zes weken, met nauwe aansluiting tussen Enexis en aannemers.

Enexis kiest ook voor pragmatische specificaties in plaats van grote eisen sets. Enexis werkt op basis van standaardontwerpen en typicals in plaats van geformaliseerde eisen: van de opdrachtnemer wordt verwacht dat deze het ontwerp zoals door Enexis gespecificeerd uitvoert. Ook bij UAV-GC wordt het aantal eisen zo klein mogelijk gehouden. Dit reduceert bureaucratie, maar vraagt dat de standaard zelf voldoende expliciet, beheerd en gevalideerd blijft.

Tussenconclusie B.5: Enexis heeft een sterke pragmatische SE/PLE-basis via typicals, cold commissioning en risico-gebaseerde testkeuzes. Verdere verbetering zit in expliciete traceerbaarheid, levenscyclus-feedback en beheer van standaardvalidatie zonder onnodige eisenbureaucratie.

C.2.6 De rol van de systeemarchitect

Bijlage B.6 beschrijft de systeemarchitect als rol die productlijnbreed samenhang bewaakt tussen businessdoelen, functies, platformen, interfaces, configuratieregels en verificatiebewijzen. Bij Enexis worden veel van deze activiteiten uitgevoerd, maar niet noodzakelijk onder de formele functietitel systeemarchitect. Net als bij andere netbeheerders bestaat de architect als afzonderlijke formele functie meestal niet; de architectuurfunctie is verdeeld over standaardisatie, de afdeling HS/MS stations, Asset Management, specialisten, projectleiding en opdrachtnemers.

Bij Enexis is architectuurleiding vooral zichtbaar in de inrichting van typicals, bouwblokken, MSI/SSI-gebouwtypen, integrale vernieuwing van stationsautomatisering en keuzes rond standaard versus variatie. De workshopnotities benadrukken dat een multidisciplinair team nodig is met verschillende viewpoints, en ook onderhoudsaspecten moeten in de standaard worden meegenomen.

Voor verdere PLE-volwassenheid kan Enexis deze architectuurfunctie explicieter beleggen, zonder dat dit per se één nieuwe functietitel hoeft te zijn. Belangrijk is dat beslissingen over variatie, releases, levenscyclus-effecten, opdrachtnemersinput en Asset Management-

afwegingen productlijnbreed worden genomen met een goede afweging van de verschillende belangen. Dit voorkomt dat de standaard vooral een succesvolle projectpraktijk blijft, maar onvoldoende als productlijnasset wordt bestuurd over de levenscyclus.

C.3 Stedin

Stedin bevindt zich in een transitiefase richting een meer expliciete Product Line Engineering-aanpak. Een groot deel van de bouwprojecten betreft reconstructies, waardoor lokale variatie en aanpassing van bestaande locaties dominant zijn. Modulaire concepten worden vooral toegepast bij nieuwbouw. De huidige aanpak combineert projecthergebruik, component- en installatiestandaarden en eerste stappen richting een configuratieraamwerk.

Tegelijkertijd is duidelijk beweging zichtbaar. Stedin spreekt over “PLE opstarten”, een “change team” voor modulair bouwen en een “hybride model tussen Enexis en TenneT”. Ook wordt gewerkt aan meer mandaat en bestuurlijke verankering. Dit wijst op een verschuiving van losse standaarden en projectpraktijken naar productlijnachtige sturing.

C.3.1 Factoren voor een PLE-strategie

Bij Stedin zijn vooral variatie, reconstructiedominantie, schaarse competenties, ketensamenwerking en governance bepalend voor de PLE-strategie. Omdat veel projecten bestaande locaties aanpassen, is één breed toepasbaar standaardstationsontwerp minder vanzelfsprekend. Daarom ligt standaardisatie nu vooral op installatie- en componentniveau, met behoefte aan meer expliciet variatiebeheer.

De businessdruk is wel duidelijk. Stedin wil de bouwopgave versnellen door standaardisatie, betere ketensamenwerking, stabielere processen voor ontwerp en bouw, passende contract-inrichting en projecttreintjes. De formuleringen “Samen met keten”, “Stabiel proces voor ontwerp en bouw” en “Treintjes maken van projecten” vatten deze richting goed samen. Stedin heeft bovendien een sterke basis in eisenbeheer en traceerbaarheid via Relatics. Die basis geeft controle, maar leidt ook tot veel projecteisen en administratieve IVVQ-last. De strategische PLE-opgave is om eisen aan standaarden te scheiden van eisen aan projectspecifieke afwijkingen, zodat verificatie en validatie beter schaalbaar worden.

Tussenconclusie B.1: Stedin heeft een sterke PLE-rationale, maar de context is complex door reconstructies en lokale variatie. De belangrijkste stap is het expliciet verbinden van standaardisatie, portfolio, keten, eisenbeheer en governance.

C.3.2 Standaardisatie en modulariteit

Stedin past standaardisatie vooral toe op installatie- en componentniveau en gebruikt standaard modulaire stations bij nieuwbouw. Bij reconstructies blijft aanpassing aan lokale vereisten vaak nodig. Daardoor is de standaardisatiepraktijk aanwezig, maar nog minder productlijnbreed dan bij Alliander en Enexis.

De kennisteams vormen een belangrijk organisatorisch mechanisme voor kennisdeling en standaardisatie. Elke lead engineer neemt deel aan ten minste één kennisteam. Deze teams opereren vooral op installatie- of componentniveau en minder op module- of productlijnniveau. Dat ondersteunt vakinhoudelijke standaardisatie, maar beperkt nog de stap naar productlijnbreed variatiebeheer.

Stedin zoekt expliciet naar de juiste grens tussen standaard en flexibiliteit. Uitspraken als “Wel een stukje flexibiliteit behouden” en “tot hoever standaardiseren” laten zien dat het centrale PLE-vraagstuk nog in ontwikkeling is: ongewenste variatie beperken, maar gewenste variatie gecontroleerd toestaan.

Tussenconclusie B.2: Stedin heeft duidelijke standaardisatie op component- en installatieniveau, maar nog beperkte productlijnmodulariteit. De volgende stap is expliciet variatiebeheer op module- en stationsniveau.

C.3.3 PLE-strategieën

Stedin past momenteel het best bij een combinatie van clone-and-own, componentenbibliotheek en beginnend configuratieraamwerk. Ontwerpen van eerdere projecten worden hergebruikt in vervolgprojecten, terwijl centraal beheerde standaarden nog in ontwikkeling zijn. Dat is kenmerkend voor projectgedreven hergebruik.

Tegelijkertijd zijn er componentbibliotheek- en frameworkelementen. Stedin gebruikt standaarden op installatie- en componentniveau, standaard modulaire stations bij nieuwbouw, Relatics-werkpakketten, eisen sets en een uitgebreid test- en commissioningproces. De huidige positie is daarom niet puur clone-and-own, maar een hybride aanpak in transitie.

Een supersetplatform of 150%-model is op dit moment niet zichtbaar. De realistische ontwikkelrichting is eerst een configuratieraamwerk: standaarden, variatiepunten, configuratieregels, afwijkcingscriteria en herbruikbaar testbewijs expliciet maken.

Tussenconclusie B.3: Stedin heeft nog geen expliciet gekozen PLE-strategie. De huidige aanpak is hybride: projecthergebruik en componentstandaardisatie, met duidelijke beweging richting een configuratieraamwerk. Gezien de reconstructiedominantie en lokale variatie lijkt een flexibel configuratieraamwerk voor geselecteerde modules logischer dan een generieke ambitie richting een volledig 150%-platform.

C.3.4 Referentiearchitectuur, platformen en organisatorische context

Een expliciete referentiearchitectuur of productlijnplatform is bij Stedin nog niet duidelijk zichtbaar. Wel zijn er bouwstenen aanwezig: kennisteam s, Relatics-werkpakketten, standaardcomponenten, modulaire stations voor nieuwbouw en samenwerking met andere netbeheerders rond modulaire bouwstrategie en maturity ontwikkeling.

De organisatorische context is in beweging. Er worden keuzes voorbereid rond modulair bouwen, bestuurlijke steun groeit en eigenaarschap met mandaat wordt sterker belegd. Dat is belangrijk, omdat productlijnkeuzes anders blijven hangen in projecten, kennisteam s of losse verbeterinitiatieven.

Een belangrijk aandachtspunt is de koppeling tussen Asset Management, Zakelijk Complex, portfolio en keten. Stedin werkt aan een virtueel team waarin deze perspectieven samenkomen en kijkt naar sectorale samenwerking. Dit past bij de noodzaak om productlijnkeuzes niet alleen technisch, maar ook organisatorisch, contractueel en levenscyclusgericht te sturen.

Tussenconclusie B.4: Stedin heeft nog geen volledig expliciete referentiearchitectuur of productlijnplatform, maar de organisatorische basis wordt opgebouwd. De vervolgstap is expliciet eigenaarschap, standaardbeheer, portfolio-inbedding en interface met de keten.

C.3.5 Systems Engineering en de systeemlevenscyclus

Stedin is sterk in eisenbeheer en traceerbaarheid. Relatics wordt gebruikt om werkpakketten, eisen, documentatie en goedkeuringen te structureren. Dit geeft goede controle over projectrealisatie, maar leidt ook tot veel eisen, veel afvinkwerk en een hoge IVVQ-last.

Het test- en commissioningproces is uitgebreid ingericht. Testcoördinator en commissioning engineer bepalen wat en wanneer getest wordt. FAT en SAT worden bijgewoond, software wordt off-site in een testrek getest, en daarna volgen on-site integratiecontrole, IBS/BVG en de OIV-gebruikerstest. Dit levert kwaliteit en controle op, maar is arbeidsintensief.

Stedin onderkent dat uitputtend testen niet houdbaar is. De ontwikkelrichting is om de testinspanning meer te richten op waarde en risico. Voor PLE betekent dit dat eisen en verificatiebewijs zoveel mogelijk op standaard- of productlijnniveau moeten worden geborgd, terwijl projecttests zich richten op afwijkingen, integratie en risico's.

Tussenconclusie B.5: Stedin heeft een sterke SE-basis in eisen en traceerbaarheid, maar nog beperkte PLE-herbruikbaarheid van standaarden en testbewijs. De vervolgstap is eisen en IVVQ verschuiven van projectniveau naar standaard-/productlijnniveau.

C.3.6 De rol van de systeemarchitect

Bij Stedin is de systeemarchitectfunctie nog niet expliciet ingericht. Architectuuractiviteiten zijn verdeeld over lead engineers, kennisteam, Asset Management, Zakelijk Complex, OT, commissioning, SE-specialisten en programmasturing. Dat past bij het bredere beeld dat de architect als formele functie bij netbeheerders meestal nog niet expliciet bestaat.

Stedin is wel bezig deze architectuurfunctie explicieter te maken. De uitspraken “Nu bezig met systeemarchitectuur” en “iets subtieler in organisatie laten landen” laten zien dat men zoekt naar een passende manier om architectuurdenken organisatorisch te verankeren. Ook de beweging naar eigenaarschap en mandaat onder directieniveau ondersteunt deze ontwikkeling.

Voor Stedin is deze architectuurfunctie extra belangrijk omdat de organisatie een balans zoekt tussen standaardisatie en lokale flexibiliteit. De architectuurfunctie moet helpen bepalen welke variatie acceptabel is, welke eisen bij de standaard horen, welke afwijkingen projectspecifiek zijn, en hoe testbewijs kan worden hergebruikt. Dit hoeft niet direct één formele functietitel te zijn, maar vraagt wel herkenbaar mandaat en governance.

Tussenconclusie: Stedin heeft veel architectuuractiviteiten, maar nog geen expliciete systeemarchitectfunctie. Voor PLE-volwassenheid is een herkenbare architectuurfunctie nodig met mandaat over standaarden, variatie, eisen, interfaces, levenscyclus en testbewijs.

C.4 TenneT

TenneT bevindt zich, net als Stedin, in een transitiefase richting een explicietere productlijnachtige aanpak. Er zijn duidelijke standaardisatie-initiatieven, waaronder BRP, SOV, LPN, GFN en LON, en TenneT werkt met standardeisen die per project worden bevroren,

raamcontracten voor primaire en secundaire componenten en transformatoren, coördinatiegroepen per discipline en aparte aandacht voor configuratiemanagement van specificaties en standaarden. Tegelijkertijd zijn deze initiatieven nog onvoldoende geïntegreerd tot één samenhangende productlijn- of productportfolio-aanpak.

De kernobservatie is dat TenneT veel standaarden heeft, maar dat het rendement daarvan nog beperkt is. Letterlijke notities vatten dit scherp samen: “Er zijn standaarden, maar TenneT is er nog niet” en “We hebben nog standaarden, maar het rendement van het gebruik van deze standaarden is nog vrij laag.” Daarmee ligt de PLE-opgave vooral in samenhang, eigenaarschap, configuratiemanagement, productportfolio en systeemarchitectuur.

C.4.1 Factoren voor een PLE-strategie

Bij TenneT zijn schaalbaarheid, voorspelbaarheid, schaarse expertise, ketensturing en beheersing van eisen- en testlast de dominante factoren. Anders dan bij regionale netbeheerders gaat het minder om veel kleine stations en meer om complexe HS-stations, velden, masten, offshore-gridconnecties en grote programma's. Daardoor is de PLE-rationale vooral programmatisch: herhaalbaarheid over programma's, standaardisatie van veld- en stationsoplossingen, en het uit projecten trekken van systeemvraagstukken.

De businessdruk wordt versterkt door opdrachtnemersfeedback. Aannemers ervaren het SE- en eisenproces als omvangrijk, wisselend en administratief zwaar. Letterlijke quotes zijn: “SE moet geen last zijn/ballast, zou je moeten helpen”, “Bij TenneT loopt het proces wel, maar het is heel theoretisch georganiseerd” en “Besluitvorming duurt lang... er zijn veel lagen.” Voor PLE betekent dit dat standaardisatie niet alleen technisch moet zijn, maar ook de projectpraktijk, ketencommunicatie en besluitvorming moet vereenvoudigen.

Een specifieke PLE-factor bij TenneT is het reduceren van eisen- en IVVQ-last. TenneT werkt met grote eisenbibliotheken, project-specifieke filtering en veel verificatieactiviteiten. In workshop 4 wordt benoemd dat het kernprobleem niet efficiëntie op individueel projectniveau is, maar schaalbaarheid en herhaalbaarheid over programma's heen. Dit sluit direct aan op Bijlage B: PLE-investeringen moeten op productlijn- of programmaniveau renderen in projecten, testen, inkoop, operatie en onderhoud.

Tussenconclusie B.1: TenneT heeft een sterke PLE-rationale vanuit schaalbaarheid, programmaherhaling, schaarse expertise en reductie van eisen- en testlast. De belangrijkste stap is het verbinden van standaarden, eisen, portfolio, programma's en keten tot één bestuurbare productlijnbenadering.

C.4.2 Standaardisatie en modulariteit

TenneT past standaardisatie zichtbaar toe via standaardisen, ontwerpstandaarden, raamcontracten, standaardisatieprogramma's en configuratiemanagement van specificaties. In termen van Bijlage B is dit een stevige standaardisatiebasis. De modulariteit is vooral zichtbaar op het niveau van velden, primaire en secundaire componenten, transformatoren, masten en programma's zoals BRP, SOV en prefab-to-stock. Minder zichtbaar is een integraal modulair stationsplatform waarin interfaces, variatiepunten en configuratieregels expliciet als productlijn worden beheerd.

Een belangrijk aandachtspunt is dat standaarden nog onvoldoende samenhangend en herleidbaar zijn. In de TenneT-workshop wordt expliciet genoemd dat standaarden op Share-Point staan, dat er acht onderwerpen zijn maar “niet samenhangend”, en dat een standaard

wel wordt gebruikt, maar “niet herleidbaar en daarmee niet geïnstitutionaliseerd” is. Dit raakt de PLE-kern: standaarden moeten niet alleen bestaan, maar als samenhangende productlijnassets beheerd worden.

TenneT zoekt daarnaast naar een manier om standaarden praktischer toe te passen in projecten en richting opdrachtnemers. Letterlijke notities noemen als doel: “eisenpakket zo klein mogelijk en aan aannemers een standaardpakket geven met klein pakketje eisen” en “Standaard: doel is uitbesteding naar Opdrachtnemers eenduidig en repeteerbaar te maken en zo doende sneller te kunnen bouwen.” Dit past goed bij PLE, mits varianten, vrijheidsgraden en afwijkingen expliciet worden beheerd.

Tussenconclusie B.2: TenneT heeft veel standaarden en modulariteit op component-, veld- en programmaniveau, maar nog beperkte productlijnmodulariteit. Er wordt meer gedacht vanuit eisen dan vanuit productlijnen. De volgende stap is samenhangend configuratie- en variatiebeheer over standaarden, programma's en projecten heen om tot consistente productlijnen te komen.

C.4.3 PLE-strategieën

TenneT past momenteel een hybride strategie toe. Er zijn duidelijke elementen van clone-and-own, omdat standaardontwerpen incrementeel groeien door kopiëren van project naar project en verbeteren in volgende projecten. Tegelijkertijd zijn er componentbibliotheek- en configuratieraamwerkelementen via raamcontracten, standaardeisen, ontwerpstandaarden, BRP, SOV, prefab-to-stock en programma's voor standaardvelden en masten.

De beste typering is daarom: componenten-/standaardenbibliotheek met beginnende configuratieraamwerken per programma. BRP lijkt hierin het meest PLE-achtig, omdat daar standaardisatie, modulaire testen, configure-to-order en testautomatisering expliciet worden genoemd. Tegelijkertijd ontbreekt nog een overkoepelend productportfolio waarin BRP, SOV en modulaire bouwen als samenhangende productlijnen worden beheerd.

Een volledig supersetplatform of 150%-model is op dit moment niet zichtbaar en ligt ook niet vanzelfsprekend voor de hand. De complexiteit van TenneT-stations, de lagere aantallen, de grote projectspecifieke context en de verschillen tussen LPN, GFN en LON maken één integraal 150%-platform waarschijnlijk minder doelmatig. De passende ontwikkelrichting is eerst harmonisatie van standaardisatieprogramma's en een configuratieraamwerk met duidelijke varianten, vrijheidsgraden, interfaces en releasebeheer.

Tussenconclusie B.3: TenneT bevindt zich tussen componentenbibliotheek en configuratieraamwerk, met BRP als meest volwassen voorbeeld. De stap naar PLE ligt in het harmoniseren van programma's en het expliciet maken van productportfolio, variatiebeheer en standaardreleases.

C.4.4 Referentiearchitectuur, platformen en organisatorische context

Bijlage B stelt dat een referentiearchitectuur vastlegt wat gemeenschappelijk is, waar variatie is toegestaan en hoe productlijnassets organisatorisch worden ingebed. Bij TenneT is de behoefte hieraan expliciet benoemd. Letterlijke notitie: “Om standaarden te beheren en samen te brengen heb je een systeemarchitectuur nodig. Hierin staan keuzes over de standaarden.”

Tegelijkertijd is ook genoteerd dat een productportfolio nog ontbreekt en dat onduidelijk is waar dit precies belegd moet worden.

De organisatorische context is complex doordat TenneT meerdere executie-units en standaardisatieprogramma's kende. LPN, GFN en LON hebben elk eigen modulaire bouwprogramma's; daarnaast bestaan BRP, SOV en modulair bouwen als programma's die op verschillende niveaus opereren. Dit maakt een overkoepelende referentiearchitectuur en governance nodig om te voorkomen dat standaarden programma-eilandjes blijven.

Een belangrijk governanceknelpunt is dat configuratiemanagement en beheer van standaarden nog beperkt belegd zijn. Letterlijke notities: "Hier zit nog geen governance op. Het wordt erbij gedaan; Excel-lijstje bijhouden", "Mist naast sturing ook eigenaarschap" en "Er is geen verantwoordelijke hoog in de organisatie die standaardisatie overkoepelend organiseert." Dit is precies het punt waarop PLE verschilt van losse standaardisatie: productlijnassets vragen expliciet eigenaarschap, releasebeheer en besluitvorming.

Tussenconclusie B.4: TenneT heeft duidelijke bouwstenen voor referentiearchitectuur en platformvorming, maar nog geen samenhangend productportfolio of expliciet productlijnplatform. De prioriteit ligt bij systeemarchitectuur, eigenaarschap, configuratiemanagement en governance over programma's heen.

C.4.5 Systems Engineering en de systeemlevenscyclus

TenneT heeft een sterke basis met SE ondersteuning, eisenbeheer en traceerbaarheid, maar de praktijk is nog zwaar project- en documentgedreven. Eisen worden gespecificeerd in Relations en IVVQ-documenten worden opgeslagen in Meridian.⁸ Per veld moeten veel SAT-/SIT-documenten worden ingevuld; bij een typisch HS-station leidt dat tot honderden documenten. Hierdoor ontstaat een hoge administratieve last en risico op kopieerfouten, terwijl het systeem technisch correct kan zijn.

De test- en validatieaanpak is sterk afhankelijk van schaarse commissioning engineers en testcoördinatoren. In workshop 2 wordt gesteld dat testen bij TenneT geen efficiëntieprobleem is, maar een schaalprobleem: project-specifieke testplannen, weinig hergebruik van testbewijs, grote afhankelijkheid van experts en veel herhaling maken de aanpak onvolgende schaalbaar. Dit is een directe PLE-opgave: verificatiebewijs moet meer op standaard- of productlijn niveau worden opgebouwd.

TenneT ziet zelf oplossingsrichtingen in risico-gebaseerd testen, AI-tooling voor redundante en conflicterende eisen, het bevriezen van software na FAT, testautomatisering, StationScout en configure-to-order. In de TenneT-visie op testen wordt expliciet ingezet op standaardisatie van componenten, modulair testen en testautomatisering om de werklust van ervaren commissioning engineers te reduceren.

Tussenconclusie B.5: TenneT heeft sterke SE- en IVVQ-capaciteit, maar de huidige werkwijze is te project-specifiek en documentintensief. De PLE-stap is om eisen, teststrategie en verificatiebewijs naar standaard-/productlijn niveau te verschuiven, met risico-gebaseerde en geautomatiseerde ondersteuning.

C.4.6 De rol van de systeemarchitect

Bijlage B beschrijft de systeemarchitect als rol die productlijn breed samenhang bewaakt tussen businessdoelen, functies, referentiearchitectuur, platformen, modules, interfaces,

configuratieregels en verificatiebewijzen. Bij TenneT is deze behoefte expliciet en urgent. In de notities wordt gevraagd: “Wie is verantwoordelijk voor de systeemarchitectuur?” en in de TenneT-workshop is systeemarchitectuur juist benoemd als middel om standaarden, productportfolio en Asset Standards samenhangend te maken.

Net als bij andere netbeheerders bestaat de systeemarchitect als formele functie niet vanzelfsprekend of niet eenduidig. Bij TenneT zijn architectuuractiviteiten verdeeld over Asset Standards, Asset Management, engineering, programma's, lead engineers, technisch managers, SE-specialisten en opdrachtnemers. De vraag is daarom niet alleen of er een systeemarchitect moet zijn, maar hoe de architectuurfunctie herkenbaar, praktisch en met mandaat wordt ingericht.

De architectuurfunctie moet TenneT helpen om systeemvraagstukken uit projecten te halen, standaardisatieprogramma's te harmoniseren, configuraties en vrijheidsgraden expliciet te maken, standaarden beheersbaar te maken en levenscyclus-effecten mee te nemen. Letterlijke notities geven dit concreet weer: “Hoe ga je systeemvraagstukken weghalen uit het project?”, “Welke configuraties verwacht je”, “Welke vrijheid heeft ieder project” en “Hoe beheer wordt ingericht; wijzigingsbeheer, versiebeheer van standaard.”

Tussenconclusie B.6: TenneT heeft sterke behoefte aan een expliciete architectuurfunctie. Voor PLE-volwassenheid moet deze functie standaarden, productportfolio, configuratieregels, variatiebeheer, levenscyclus-afwegingen en governance over programma's heen verbinden.

Bijlage D

Verdieping van de FuESSE modulaire bouwstrategie

Deze bijlage biedt een verdere verdieping van de FuESSE Modulaire Bouwstrategie uit hoofdstuk 8. Waar hoofdstuk 8 het strategische kader beschrijft, werkt deze bijlage de twee roadmaps verder uit aan de hand van activiteiten, resultaten, besluitmomenten en de rol van de uitvoeringsketen.

Het doel van deze bijlage wordt eerst toegelicht (D.1). Na een verdieping van de Vier-fasen Bouwstrategie Roadmap (D.2) worden de typische resultaten per fase (D.3), de belangrijkste besluitmomenten (D.4), de rol van de uitvoeringsketen (D.5) en de relatie met de transitiedilemma's uit hoofdstuk 8 besproken (D.6). De bijlage wordt afgesloten met een korte samenvatting (D.7).

D.1 Doel van deze bijlage

Hoofdstuk 8 introduceert de FuESSE Modulaire Bouwstrategie als een integraal ontwikkelen en sturingskader voor de verdere opschaling van modulair bouwen binnen de energie-infrastructuur. De strategie is bewust op strategisch niveau beschreven en richt zich op de onderliggende principes, transitiedilemma's en de twee centrale roadmaps van de bouwstrategie.

Deze bijlage biedt een verdere verdieping van deze roadmaps. Het doel is niet om een uniforme implementatiemethode voor te schrijven, maar om organisaties te ondersteunen bij het vertalen van de bouwstrategie naar hun eigen context. De opgenomen tabellen beschrijven mogelijke activiteiten, resultaten en besluitmomenten per fase van de bouwstrategie. De uitwerking kan worden gebruikt als referentiekader voor beleid, programmaontwikkeling, portfolio-sturing en de verdere professionalisering van modulair bouwen.

De beschreven activiteiten zijn illustratief en niet uitputtend. Organisaties kunnen afhankelijk van hun context, volwassenheid en ambitie verschillende accenten leggen. De bijlage moet daarom worden gezien als een hulpmiddel voor analyse, dialoog en verdere concretisering van de bouwstrategie.

D.2 Verdieping Vier-fasen Bouwstrategie Roadmap

De Vier-fasen Bouwstrategie Roadmap beschrijft hoe modulair bouwen zich ontwikkelt van een verzameling initiatieven naar een samenhangende werkwijze die over de volledige levenscyclus kan worden toegepast. De roadmap moet niet worden gezien als een lineair implementatieplan. Organisaties kunnen zich in verschillende fasen bevinden voor verschillende dimensies. Zo kan een netbeheerder bijvoorbeeld al beschikken over een volwassen productlijnarchitectuur, terwijl governance, ketensamenwerking of lifecyclemanagement zich nog in een eerdere ontwikkelfase bevinden. De roadmap biedt daarom vooral een

referentiekader om ontwikkelingen te structureren, afhankelijkheden zichtbaar te maken en vervolgstappen te bepalen.

De Vier-fasen Bouwstrategie Roadmap beschrijft zowel de inhoudelijke ontwikkeling van productlijnen, standaarden en werkwijzen als de ontwikkeling van het organisatievermogen dat nodig is om deze duurzaam toe te passen, inclusief keuzes over productlijnen, leveranciersstrategieën en samenwerking in de uitvoeringsketen. De vier BAPO-dimensies vormen daarbij niet alleen een structuur voor inhoudelijke ontwikkeling, maar ook voor organisatieontwikkeling en verandervermogen.

Succesvolle opschaling vraagt niet alleen om technische oplossingen, maar ook om passende governance, competenties, ketensamenwerking en verandercapaciteit. De roadmap moet daarom worden gezien als zowel een ontwikkel- als veranderkader. Tabel 10.6 geeft een verdieping van de activiteiten en resultaten per fase.

Tabel 10.6: Verdieping Vier-fasen Bouwstrategie Roadmap.

Dimensie	Fase 1 – Context & richting	Fase 2 – Ontwerp & bouwstrategie	Fase 3 – Invoering & opschaling	Fase 4 – Consolidatie & optimalisatie
Business	Scopebepaling; waardeanalyse; business case, commonality- en variability-analyse	Productlijnstrategie; ketenstrategie; Waardepropositie; sourcing-keuzes	Adoptie, opschaling, realiseren van beoogde waarde	Prestatiesturing, KPIs, waarde-optimalisatie
Architecture	Domeinafbakening; oplossingsruimte bepalen; Initiële referentie-architectuur;	Referentie- en productlijn- architectuur; platformen, varianten	Toepassen van architecturen, standaarden en bouwblokken	Beheer en doorontwikkeling van productlijnen en architecturen
Process	Analyse huidige werkwijzen en verbeterpotentieel	Productlijn processen, configuratiestrategieën, standaardisatie	Afstemming van engineering, verificatie, inkoop, uitvoering en ketenpartners	Feedbackloops, procesoptimalisatie en continue verbetering
Organisation	Initiële governance, eigenaarschap, rollen en mandaat	Product-eigenaarschap, samenwerking, governance-inrichting en veranderaanpak	Opschalen van organisatie, competenties, verandercapaciteit en ketensamenwerking	Verankeren van governance, samenwerking, leren en continue ontwikkeling

D.3 Typische resultaten per fase

Elke fase van de bouwstrategie leidt tot andere resultaten en besluitproducten. Deze resultaten vormen geen verplichte deliverables, maar geven richting aan de ontwikkeling van modulaair bouwen en maken zichtbaar wanneer voldoende samenhang is ontstaan om een volgende fase betekenisvol te starten.

Belangrijk daarbij is dat resultaten uit eerdere fasen actief worden onderhouden gedurende latere fasen. Een business case, referentiearchitectuur of governance-model wordt gedurende de gehele levenscyclus verder ontwikkeld. De roadmap moet daarom worden gezien als een iteratief ontwikkelproces waarin leren, bijsturen en verbeteren expliciet onderdeel zijn van de aanpak.

De resultaten van de bouwstrategie zijn zowel inhoudelijk als organisatorisch van aard. Naast productlijnen, architecturen, standaarden en processen ontstaan in iedere fase ook nieuwe vormen van governance, eigenaarschap, competentieontwikkeling en samenwerking. Tabel 10.7 geeft een overzicht van de belangrijkste resultaten die organisaties in de verschillende fasen van de bouwstrategie kunnen realiseren.

Tabel 10.7: Typische resultaten per fase.

Fase	Inhoudelijke resultaten	Organisatorische resultaten
Fase 1 – Richting en focus	Scope en afbakening van de opgave; business case; commonality- en variability-analyse; architectuurprincipes	Initiële governance; eigenaarschap; gedeelde visie en veranderambitie
Fase 2 – Productlijn-ontwikkeling	Productlijnarchitectuur; referentiearchitectuur; platformstrategie; procesontwerp; ketenstrategie	Governance-inrichting; operating model ontwerp; producteigenaarschap; veranderaanpak
Fase 3 – Invoering en ketenopschaling	Productlijnprojecten; standaardenbibliotheek; templates; afgestemde engineering-, inkoop- en uitvoeringsprocessen; toepassing van bouwblokken en standaarden;	Operating model in gebruik; competentieontwikkeling; veranderorganisatie; ketensamenwerking
Fase 4 – Verankering en optimalisatie	Prestatiesturing; KPI-dashboard; verbeterportfolio; feedbackloops; doorontwikkeling van productlijnen	Structurele governance; kennisborging; continue professionalisering; lerende organisatie

De resultaten in Tabel 10.7 moeten niet worden gezien als vaste deliverables of formele fasecriteria, maar als indicaties van de ontwikkeling die organisaties doormaken tijdens de opschaling van modulaair bouwen. In elke fase ontwikkelen inhoudelijke resultaten, zoals productlijnen, architecturen en standaarden, zich in samenhang met organisatorische resultaten, zoals governance, eigenaarschap, competenties en samenwerking in de uitvoeringsketen. Organisaties zullen zich daarbij niet altijd gelijktijdig in dezelfde fase bevinden voor alle dimensies. De bouwstrategie biedt daarom geen voorschrijvende route, maar een referentiekader om de huidige situatie te analyseren, ontwikkelrichtingen te bepalen en gerichte verbeterstappen te identificeren.

D.4 Faseovergangen en besluitmomenten

Een terugkerend thema in hoofdstuk 7 is dat veel vraagstukken rondom modulaair bouwen uiteindelijk terug te voeren zijn op expliciete keuzes over prioriteiten, eigenaarschap, standaardisatie en investeringen. De grootste risico's ontstaan vaak niet door verkeerde technische keuzes, maar doordat dergelijke keuzes onduidelijk blijven of op verschillende niveaus onvoldoende op elkaar aansluiten.

De faseovergangen in de bouwstrategie markeren daarom niet alleen een inhoudelijke ontwikkeling, maar ook expliciete besluitmomenten. Op deze momenten wordt vastgesteld of voldaan is aan de voorwaarden om de volgende fase te starten en worden keuzes gemaakt die richting geven aan verdere ontwikkeling, opschaling en borging.

Tabel 10.8 geeft een overzicht van faseovergangen met besluitvragen in context van een veranderfocus.

Tabel 10.8: Faseovergangen en besluitvragen.

Overgang	Centrale besluitvraag	Veranderkundige focus
Fase 1 → Fase 2	Welke domeinen, productlijnen en variatiepunten worden verder ontwikkeld?	Creëren van gezamenlijke richting en commitment
Fase 2 → Fase 3	Welke oplossingen zijn voldoende volwassen om breed toe te passen en op te schalen?	Organiseren van adoptie en ketensamenwerking
Fase 3 → Fase 4	Welke werkwijzen, productlijnen en governance-structuren worden structureel veranderd?	Verankeren van gedrag, rollen en continue verbetering

Deze besluitmomenten vormen de natuurlijke koppeling tussen inhoudelijke ontwikkeling en governance. Zij maken expliciet wanneer keuzes moeten worden gemaakt over onder andere productlijnen, standaardisatie, investeringen, eigenaarschap en opschaling.

D.5 De rol van de uitvoeringsketen

Hoofdstuk 5 laat zien dat een belangrijk deel van de potentiële voordelen van modulaair bouwen pas ontstaat wanneer netbeheerders, opdrachtnemers en leveranciers hun werkwijzen beter op elkaar afstemmen. Veel huidige inefficiënties ontstaan doordat standaarden, eisen, ontwerpkeuzes en uitvoeringsprocessen nog onvoldoende over organisatiegrenzen heen worden geharmoniseerd.

De FuESSE Modulaire Bouwstrategie beschouwt de uitvoeringsketen daarom niet als een externe randvoorwaarde, maar als een integraal onderdeel van de bouwstrategie. Naarmate organisaties verder opschalen verschuift de aandacht van interne standaardisatie naar ketenbrede afstemming van productlijnen, interfaces, processen, capaciteit en besluitvorming. Juist in deze samenwerking ontstaan veel van de schaalvoordelen die nodig zijn om de productiviteitsopgave van de energietransitie te realiseren.

Tabel 10.9 geeft een overzicht van de mogelijke betrokkenheid van ketenpartners per fase.

Tabel 10.9: Betrokkenheid van ketenpartners per fase.

Fase	Netbeheerder	Opdrachtnemers	Leveranciers
Fase 1	Scope, visie en prioriteiten	Inbreng uitvoerbaarheid	Inbreng technologie en componentmogelijkheden
Fase 2	Productlijnontwikkeling en architectuur	Bouwconcepten en realisatie-aanpak	Platformen, interfaces en standaardcomponenten
Fase 3	Opschaling en implementatie	Realisatie en industrialisatie	Levering, productiecapaciteit en standaardisatie
Fase 4	Prestatiesturing en doorontwikkeling	Verbeterinitiatieven en lessons learned	Innovatie en doorontwikkeling van oplossingen

Naarmate organisaties verder opschalen verschuift de samenwerking van projectmatige afstemming naar structurele samenwerking rond productlijnen, standaarden en capaciteitsontwikkeling. Opdrachtnemers en leveranciers worden daarmee niet alleen uitvoerende partijen, maar ontwikkelen zich steeds meer tot partners in de ontwikkeling, toepassing en verdere verbetering van productlijnen, bouwconcepten en werkwijzen. De ontwikkeling van modulaair bouwen vraagt daardoor niet alleen om veranderingen binnen individuele organisaties, maar

ook om gezamenlijke ontwikkeling van competenties, processen en governance in de uitvoeringsketen.

D.6 Relatie tussen de transitiedilemma's en de bouwstrategie

De transitiedilemma's genoemd in paragraaf 8.3 zijn niet uitsluitend inhoudelijke vraagstukken. Zij maken zichtbaar welke organisatorische veranderingen nodig zijn om modulariteit, standaardisatie en hergebruik structureel toe te passen. Vraagstukken rondom samenwerking, governance, standaardisatie, variabiliteit en eigenaarschap blijken daarbij nauw met elkaar samen te hangen.

De FuESSE Modulaire Bouwstrategie is ontwikkeld als antwoord op deze dilemma's. De strategie is geen generiek stappenplan voor standaardisatie of productlijnontwikkeling, maar een kader dat technische ontwikkeling verbindt met governance, organisatieontwikkeling, samenwerking en capability-opbouw.

De vier fasen van de bouwstrategie en de bijbehorende governance-roadmap bieden geen uniforme oplossing voor deze dilemma's. Zij helpen organisaties om deze dilemma's expliciet te maken, afwegingen transparant te onderbouwen en keuzes consistent door te vertalen naar productlijnen, processen, organisatie-inrichting en ketensamenwerking. Tabel 10.10 illustreert hoe de verschillende elementen van de bouwstrategie bijdragen aan het adresseren van de belangrijkste transitiedilemma's.

Tabel 10.10: Relatie tussen transitiedilemma's en de bouwstrategie.

Transitiedilemma	Aanpak in de FuESSE Modulaire Bouwstrategie
Van projecten naar productlijnen	Productlijnontwikkeling, portfolio-sturing en lifecyclemanagement
Van standaardisatie naar beheersbare variatie	Product Line Engineering, platformen en variatiebeheer
Van autonomie naar harmonisatie	Gemeenschappelijke roadmaps, sectorafstemming en ketensamenwerking
Van leveren vandaag naar opschalen morgen	Gefaseerde invoering en capability-ontwikkeling
Van lokale keuzes naar gezamenlijke sturing	Portfolio-, programma- en projectgovernance

Gezamenlijk laten deze relaties zien dat de bouwstrategie niet gericht is op het maximaliseren van standaardisatie of het opleggen van één uniforme werkwijze. Het doel is om organisaties te ondersteunen bij het maken van samenhangende keuzes die passen bij hun eigen context, terwijl tegelijkertijd de voordelen van samenwerking, hergebruik en harmonisatie worden benut. De kracht van de bouwstrategie ligt daarmee niet in afzonderlijke instrumenten of activiteiten, maar in de samenhang tussen strategie, architectuur, processen, organisatie en de uitvoeringsketen.

Uiteindelijk is modulaair bouwen daarmee niet alleen een ontwerp- of standaardisatievraagstuk, maar een organisatiebrede veranderopgave. De FuESSE Modulaire Bouwstrategie biedt een kader om deze verandering stapsgewijs vorm te geven en tegelijkertijd de productiviteit, voorspelbaarheid en schaalbaarheid van de realisatieketen te vergroten.

D.7 Samenvatting

Deze bijlage laat zien dat de FuESSE Modulaire Bouwstrategie verder gaat dan een roadmap voor standaardisatie of productlijnontwikkeling. De strategie biedt een samenhangend kader voor de ontwikkeling van productlijnen, processen, governance, competenties en samenwerking in de uitvoeringsketen. De opgenomen uitwerkingen helpen organisaties om de bouwstrategie te vertalen naar hun eigen context en ondersteunen het maken van expliciete keuzes over opschaling, samenwerking en organisatorische ontwikkeling. Daarmee vormt de bijlage een praktische verdieping van hoofdstuk 8 en een referentiekader voor verdere toepassing van modulair bouwen binnen de energie-infrastructuur.

ICT, Strategy & Policy

High Tech Campus 25
5656 AE Eindhoven
www.tno.nl