International Symposium **PRIOCHEM XXII**

organized by National Institute of R&D for Chemistry and Petrochemistry

ICECHIM Bucharest, ROMANIA

Round Table

Technology Readiness Levels (TRLs): Are They Enough to Guide Innovation to Successful Implementation?

Moderator:
Dr. Nicolae Varachiu - ICECHIM

20 October 2026 Bucharest, Romania

Five Round Tables on Innovation, satellite events of International Symposions PRIOCHEM – Priorities in Chemistry

- ***Make innovation happen:*** support tools / methodologies to pave the way toward Technology Readiness Level TRL 7-8-9 (**2022**)
- ***Innovation Way:*** *from wishful thinking to real-life applications* (**2023**)
- ***Innovation:*** *Mystery or a Systematic Approach?* (**2024**)
- ***Research and Innovation*** *– Societal Impact* (**2025**)
- ***TRLs:*** Are They Enough to Guide ***Innovation*** to ***Successful Implementation***? (**2026**)

Innovation “way”

the first occurrence of an idea for a **new product** or **process**

the first attempt to **carry it out into practice**

Creativity



new ideas: **invention**

"bringing ideas to life“: **innovation**

Innovation is typically understood as the **successful introduction** of something **new** *and* **useful,** ***i.e. it has effect in economy and society***

Innovation

Technology Transfer



R&D Lab

Inventions
potential innovative

Movement of knowledge and discovery (that fulfill the **three criteria*** of TECHNOLOGY) **to …**



Company



Introduce something new and useful that has effect in ….



Society (market, citizens)

*

1. systematic
2. in a certain place
3. directed for achieving a useful purpose

TRL: DE LA CERCETARE LA INOVARE

De ce ne interesează concret?

- **Finanțarea proiectelor:** numeroase apeluri europene și naționale solicită precizarea nivelurilor TRL, de unde pornim, unde ne propunem sa ajungem!
- **Evaluarea rezultatelor:** cum încadrăm corect maturitatea tehnologiilor și a soluțiilor dezvoltate?
- **Transferul de tehnologie si inovarea:** cum demonstrăm progresul de la rezultatele cercetării la aplicațiile concrete?
- **Evitarea ambiguităților:** cum aplicăm TRL coerent, fără interpretări mecanice sau nejustificate?

TRL Scale & Levels In EU Projects



9 Actual System Proven in Operational Environment

8 System Complete and Qualified

7 System Prototype Demonstration in Operational Environment

6 Technology Demonstrated in Relevant Environment

5 Technology Validated in Relevant Environment

4 Technology Validated in Lab

3 Experimental Proof of Concept

2 Technology Concept Formulated

1 Basic Principles Observed

TRL: Principiu fundamental

“TRL nu măsoară calitatea științifică, noutatea sau succesul comercial; este un cadru de evaluare a maturității **unei tehnologii** definite**, într-un** context definit**.”**
(nasa.gov : about Technology Readiness Levels)

Nivelul TRL se atribuie unui rezultat tehnologic definit și raportat la o aplicație concretă, nu unei tehnologii în mod abstract. *Formularea recomandată este:*
Rezultatul tehnologic X,
destinat aplicației Y,
a atins nivelul TRL Z
în condițiile de utilizare/mediul de testare W

Nu se recomandă formularea necontextualizată: „Tehnologia X este TRL Z.”

Această abordare este necesară deoarece nivelul de maturitate poate diferi pentru aceeași tehnologie în funcție de aplicația, configurația și mediul pentru care este evaluată.

Criterii operaționale recomnadate* pentru nivelurile TRL

TRL 1 – Principii fundamentale observate

Există rezultate științifice sau observații experimentale care identifică principii, fenomene sau relații ce pot constitui baza unei tehnologii viitoare.

Dovezi recomandate:

- ✓ rezultate științifice;
- ✓ publicații;
- ✓ modele teoretice;
- ✓ observații experimentale;
- ✓ rezultate de cercetare fundamentală.

Nu este necesar: un prototip sau o aplicație demonstrată

TRL 2 – Concept tehnologic formulat

Principiile identificate au fost transpuse într-un concept tehnologic asociat unei aplicații.

Trebuie să existe o descriere suficient de clară a:

- ✓ problemei/aplicației;
- ✓ principiului tehnologic propus;
- ✓ funcției urmărite;
- ✓ parametrilor principali;
- ✓ ipotezelor de dezvoltare.

Dovezi: concept tehnologic, scheme, modele, simulări, specificații preliminare.

*extrase din recomandări NASA, call-uri ale Comisiei Europeane și bune practici de cercetare-dezvoltare noi tehnologii

Criterii operaționale recomnadate* pentru nivelurile TRL

TRL 3 – Proof of Concept experimental

S-a demonstrat experimental că principiul sau conceptul poate realiza funcția esențială urmărită.

Criteriu-cheie:

Nu este suficient ca soluția să fie plauzibilă teoretic; funcția critică trebuie demonstrată experimental.

Dovezi:

- ✓ experimente;
- ✓ rezultate măsurate;
- ✓ modele validate experimental;
- ✓ probe de laborator;
- ✓ rezultate reproductibile.

TRL 4 – Tehnologie validată în laborator

Componentele sau subsistemele relevante sunt integrate într-o configurație suficient de reprezentativă și tehnologia este validată în condiții de laborator.

Criteriu-cheie:

Funcția tehnologică este demonstrată într-un sistem integrat, dar mediul de testare este încă unul de laborator.

Dovezi:

- ✓ prototip/pre-prototip;
- ✓ scheme și configurații;
- ✓ rezultate experimentale;
- ✓ caracteristici de performanță;
- ✓ comparație cu cerințele stabilite.

*extrase din recomandări NASA, call-uri ale Comisiei Europeane și bune practici de cercetare-dezvoltare de noi tehnologii

Criterii operaționale recomandate* pentru TRL <u>Zona critică: TRL 5–7</u>

TRL 5 – Tehnologie validată în mediu relevant

Tehnologia este testată într-un mediu care reproduce caracteristicile esențiale și relevante pentru aplicația avută în vedere.

În evaluarea TRL 5 trebuie precizate explicit:

- ✓ aplicația avută în vedere;
- ✓ caracteristicile mediului real care pot influența performanța;
- ✓ care dintre aceste caracteristici au fost reproduse;
- ✓ criteriile de performanță;
- ✓ rezultatele obținute.

Exemplu:

Pentru o tehnologie de tratare a apei, nu este suficientă testarea cu apă sintetică dacă performanța tehnologiei depinde de compoziția reală a apei. Mediul relevant trebuie să reproducă, în măsura relevantă pentru tehnologie, caracteristicile apei reale.

<u>Dovada minimă recomandată:</u>

raport experimental care demonstrează performanța tehnologiei în condiții relevante și explică de ce mediul ales este relevant pentru aplicația finală.

*extrase din recomandări NASA, call-uri ale Comisiei Europeane și bune practici de cercetare-dezvoltare noi tehnologii

Criterii operaționale recomandate* pentru TRL **Zona critică: TRL 5–7**

TRL 6 – Tehnologie demonstrată în mediu relevant

Un prototip sau o configurație reprezentativă a soluției tehnologice este demonstrată în mediul relevant.

Diferența față de TRL 5 nu trebuie redusă la „mai multe teste”.

Criteriul principal este:

TRL 5 demonstrează validitatea tehnologiei; TRL 6 demonstrează funcționarea soluției tehnologice reprezentative.

În consecință, la TRL 6 trebuie analizate, după caz:

- ✓ integrarea componentelor;
- ✓ funcționarea sistemului;
- ✓ interacțiunea dintre subsisteme;
- ✓ performanța în regim relevant;
- ✓ stabilitatea funcționării;
- ✓ reproductibilitatea rezultatelor;
- ✓ limitările identificate.

*extrase din recomandări NASA, call-uri ale Comisiei Europeane și bune practici de cercetare-dezvoltare noi tehnologii

Criterii operaționale recomandate* pentru TRL <u>Zona critică: TRL 5–7</u>

TRL 7 – Prototip demonstrat în mediu operațional

Prototipul sistemului este demonstrat în mediul operațional în care este prevăzută utilizarea soluției.
Acesta este un prag major.

<u>Pentru TRL 7 trebuie să existe, de regulă:</u>

prototip complet sau suficient de complet;

- ✓ instalație/sistem real sau reprezentativ la scară relevantă;
- ✓ condiții operaționale reale;
- ✓ funcționare documentată;
- ✓ criterii de acceptare stabilite anterior;
- ✓ rezultate măsurate.

În cazul unei tehnologii destinate unui beneficiar industrial, demonstrarea la beneficiarul real constituie, în principiu, o dovadă mult mai puternică decât demonstrarea într-o instalație experimentală proprie.

<u>Important:</u>

Un test în aer liber nu este automat TRL 7.
Un test la scară mare nu este automat TRL 7.
Un pilot industrial nu este automat TRL 7.

Ceea ce contează este dacă mediul și modul de funcționare sunt efectiv operaționale pentru aplicația definitivă.

*extrase din recomandări NASA, call-uri ale Comisiei Europeane și bune practici de cercetare-dezvoltare noi tehnologii

Criterii operaționale recomandate* pentru nivelurile TRL

TRL 8 – Sistem complet și calificat

Soluția tehnologică este completă și calificată pentru utilizarea prevăzută.

Evaluarea trebuie să ia în considerare, după caz:

- ✓ performanța;
- ✓ fiabilitatea;
- ✓ durabilitatea;
- ✓ siguranța;
- ✓ compatibilitatea;
- ✓ reproductibilitatea;
- ✓ mentenabilitatea;
- ✓ cerințele de calitate;
- ✓ cerințele legislative;
- ✓ standardele aplicabile;
- ✓ cerințele utilizatorului;
- ✓ documentația tehnică;
- ✓ condițiile de operare.

Prin urmare:

TRL 8 nu se consideră atins doar pentru că un prototip funcționează cu succes.

Trebuie demonstrat că soluția este complet definită și calificată pentru utilizarea prevăzută.

*extrase din recomandări NASA, call-uri ale Comisiei Europeane și bune practici de cercetare-dezvoltare noi tehnologii

Criterii operaționale recomandate* pentru nivelurile TRL

TRL 9 – Sistem real demonstrat în mediul operațional

Soluția tehnologică este utilizată în condițiile reale pentru care a fost dezvoltată, iar performanța acesteia este demonstrată în exploatare.

Dovezi posibile:

- ✓ exploatare efectivă;
- ✓ date de funcționare;
- ✓ rezultate monitorizate;
- ✓ acceptarea de către utilizator;
- ✓ performanțe confirmate;
- ✓ rezultate economice/tehnice/funcționale, după caz.

În cazul produselor destinate pieței, atingerea TRL 9 presupune o formă efectivă de utilizare/aplicare, nu numai existența unui prototip calificat.

*extrase din recomandări NASA, call-uri ale Comisiei Europeane și bune practici de cercetare-dezvoltare noi tehnologii

Nivele TRL

Problema începe când încercăm să spunem ce înseamnă exact:

„relevant”,

„operațional”,

“validat”,

„demonstrat”,

„complet” și

„calificat”.

TRL: POSIBILE CONFUZII, AMBIGUITĂȚI

1. **Originea TRL** vs. **utilizarea actuală non-SPATIU**



-**scara TRL** a fost dezvoltată de **NASA** pentru sisteme spațiale, unde mediul operațional este foarte clar definit: spațiul, condiții extreme, misiuni precise, etc.

În schimb,

-în programele de cercetare-inovare ale Comisiei Europeane, „**mediul relevant**” sau „**operațional**” pot însemna lucruri foarte diferite:

-laborator industrial,
-pilot într-o fabrică,
-testare cu utilizatori reali
... etc.



TRL: POSIBILE CONFUZII, AMBIGUITĂȚI

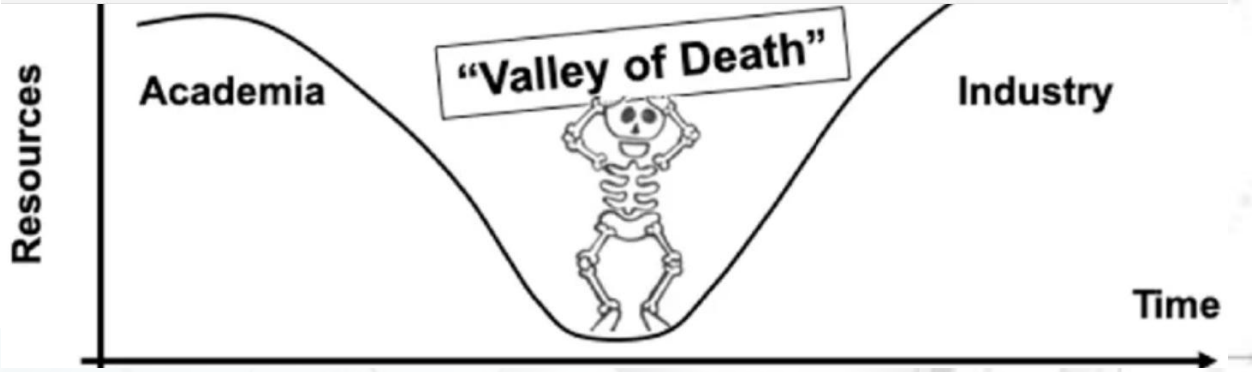
2. Zona critică: TRL 5–7 („valea morții”)

Aici apare cea mai mare ambiguitate:

TRL 5: validare în mediu relevant

TRL 6: demonstrare în mediu relevant

TRL 7: demonstrare în mediu operațional



Problema este că **diferența dintre**:

„**validare**” și „**demonstrare**”,

sau între

„**relevant**” și „**operațional**”,

nu este standardizată între domenii.

De exemplu, „**mediu relevant**”:

În electronică → un banc de test cu condiții simulate.

În energie → o instalație pilot reală.

În IT → un sandbox sau chiar un beta cu utilizatori.

Rezultatul: aceleași activități pot fi încadrate diferit de evaluatori diferiți

TRL: POSIBILE CONFUZII, AMBIGUITĂȚI

3. Lipsa dimensiunii de piață a TRL

TRL măsoară maturitatea tehnologică, **dar nu**:

- pregătirea pentru piață
- modelul de business
- acceptarea de către utilizatori



De exemplu, *două tehnologii la TRL 7* pot fi:

- una aproape comercializabilă
- alta complet neviabilă economic

Această lipsa creează o impresia de „neclaritate” în aplicare

TRL: POSIBILE CONFUZII, AMBIGUITĂȚI

4. Extinderea artificială a conceptului

În programele europene (FP7, Horizon 2020, Horizon Europe), TRL a fost folosit ca instrument de:

- planificare a finanțării
- evaluare a proiectelor
- comunicare între actori



Dar TRL nu a fost inițial conceput pentru toate aceste roluri simultan.
De aici suprasolicitarea lui conceptuală!

TRL: POSIBILE CONFUZII, AMBIGUITĂȚI

5. Interpretări „strategice” în proiecte

În practică, consorțiile tind să:



- „umfle” TRL-ul inițial pentru a părea mai mature
- sau să îl „coboare” pentru a justifica finanțarea pentru anumite programe de cercetare



Asta accentuează lipsa de consistență a utilizarii TRL

TRL: PROVOCARI, CAPCANE (1/2)

- **Confuzia dintre maturitatea tehnologică și maturitatea inovării**

O tehnologie poate fi validată experimental fără să existe încă un produs sau un proces viabil, un utilizator interesat ori o perspectivă realistă de implementare.

- **Ambiguitatea tranziției dintre nivelurile superioare TRL**

Trecerea de la demonstrarea tehnologiei la utilizarea ei în condiții reale nu este întotdeauna o simplă succesiune de trepte tehnice.

- **Transferabilitatea limitată a definițiilor**

O scală *dezvoltată inițial pentru tehnologii aerospațiale* trebuie interpretată cu atenție când este aplicată unor domenii civile foarte diferite, inclusiv chimiei și biotehnologiilor.

TRL: PROVOCARI, CAPCANE (2/2)

- **Riscul de a confunda progresul tehnic cu progresul către inovare**

TRL nu măsoară, în sine, acceptarea de către utilizatori, fezabilitatea economică, cerințele de reglementare, scalarea industrială sau capacitatea de integrare într-un sistem existent.

- **Nevoia unei evaluări complementare**

TRL trebuie pus în relație cu alte dimensiuni relevante pentru inovare, fără a pretinde că un singur indicator poate sintetiza toate acestea.

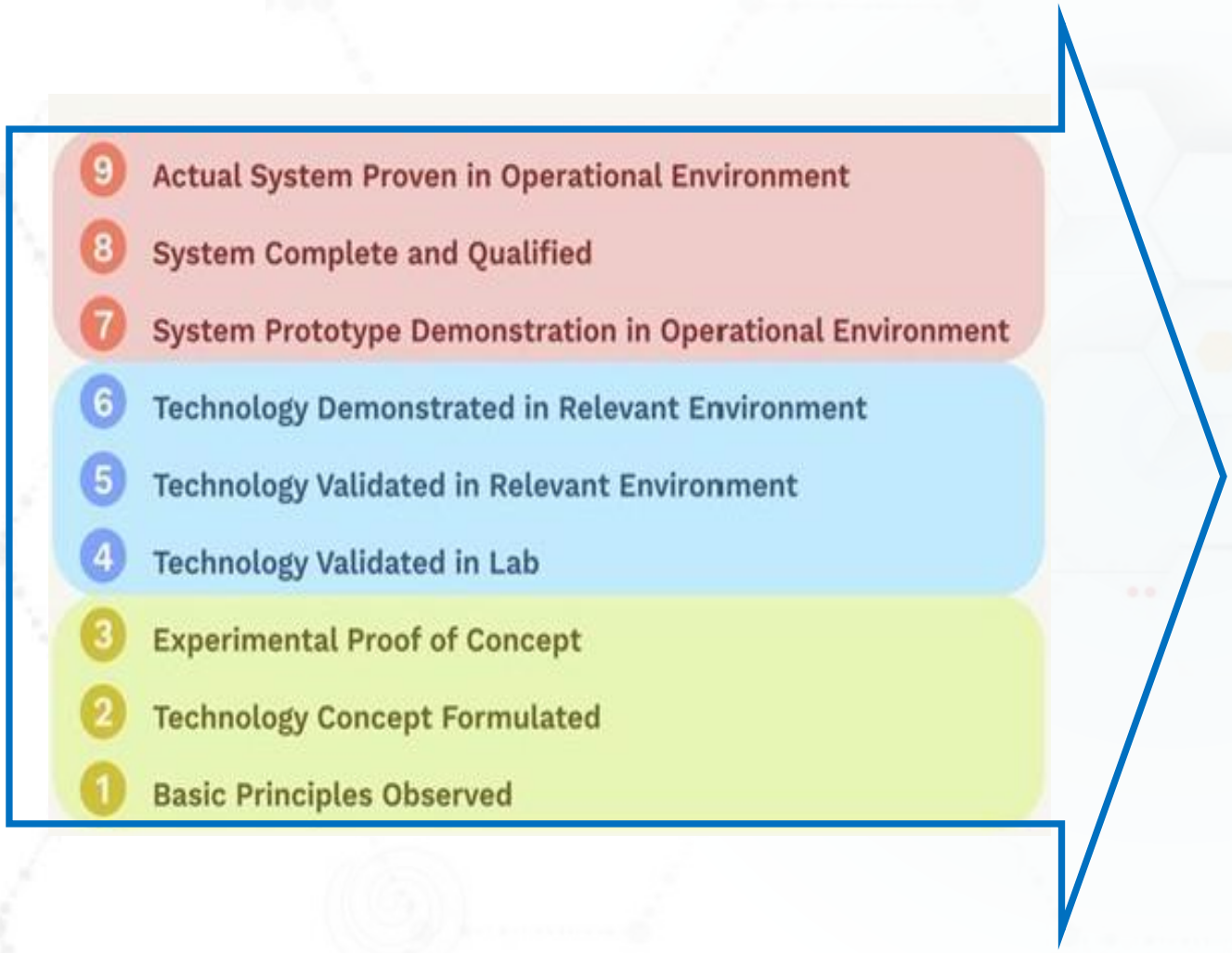
Definițiile TRL ale Comisiei Europene sunt utilizabile, dar:

- **sunt prea generale pentru a fi universal aplicabile, *și***
- **inevitabil devin interpretabile în funcție de domeniu**

TRL: Capcane care se repetă în toate domeniile

Capcană	Interpretare greșită	Bună practică
Confundarea prototipului cu produsul final	„Avem un prototip, deci suntem la TRL 7.”	Se verifică ce s-a demonstrat efectiv și în ce mediu.
Confundarea simulării cu demonstrația	„Modelul funcționează, deci tehnologia este validată.”	Se precizează ce a fost simulat și ce a fost testat fizic sau operațional.
Extrapolarea de la laborator la industrie	„Rezultatele sunt excelente la scară mică.”	Se documentează scalarea, fidelitatea și condițiile testării.
Generalizarea unui test reușit	„A funcționat o dată, deci este matură.”	Se verifică reproductibilitatea și robustețea, în limitele relevante.
Confundarea componentelor cu sistemul	„Toate componentele au TRL 8, deci și sistemul are TRL 8.”	Se evaluează integrarea și interacțiunile dintre componente.
Confundarea TRL cu succesul comercial	„TRL 9 înseamnă inovație reușită.”	Se analizează separat piața, economia, reglementarea și adoptarea.
Utilizarea unei definiții vagi a mediului relevant	„Am testat în condiții apropiate de realitate.”	Condițiile relevante sunt descrise și justificate explicit.

TRL: O INTERPRETARE MAI PRACTICĂ (MAI PUȚIN AMBIGUĂ):



- **TRL 1–4:** știință + prototip de laborator
- **TRL 5–6:** prototip funcțional în condiții apropiate de realitate
- **TRL 7:** prototip aproape final testat în condiții reale
- **TRL 8–9:** produs calificat, industrializat și utilizat efectiv

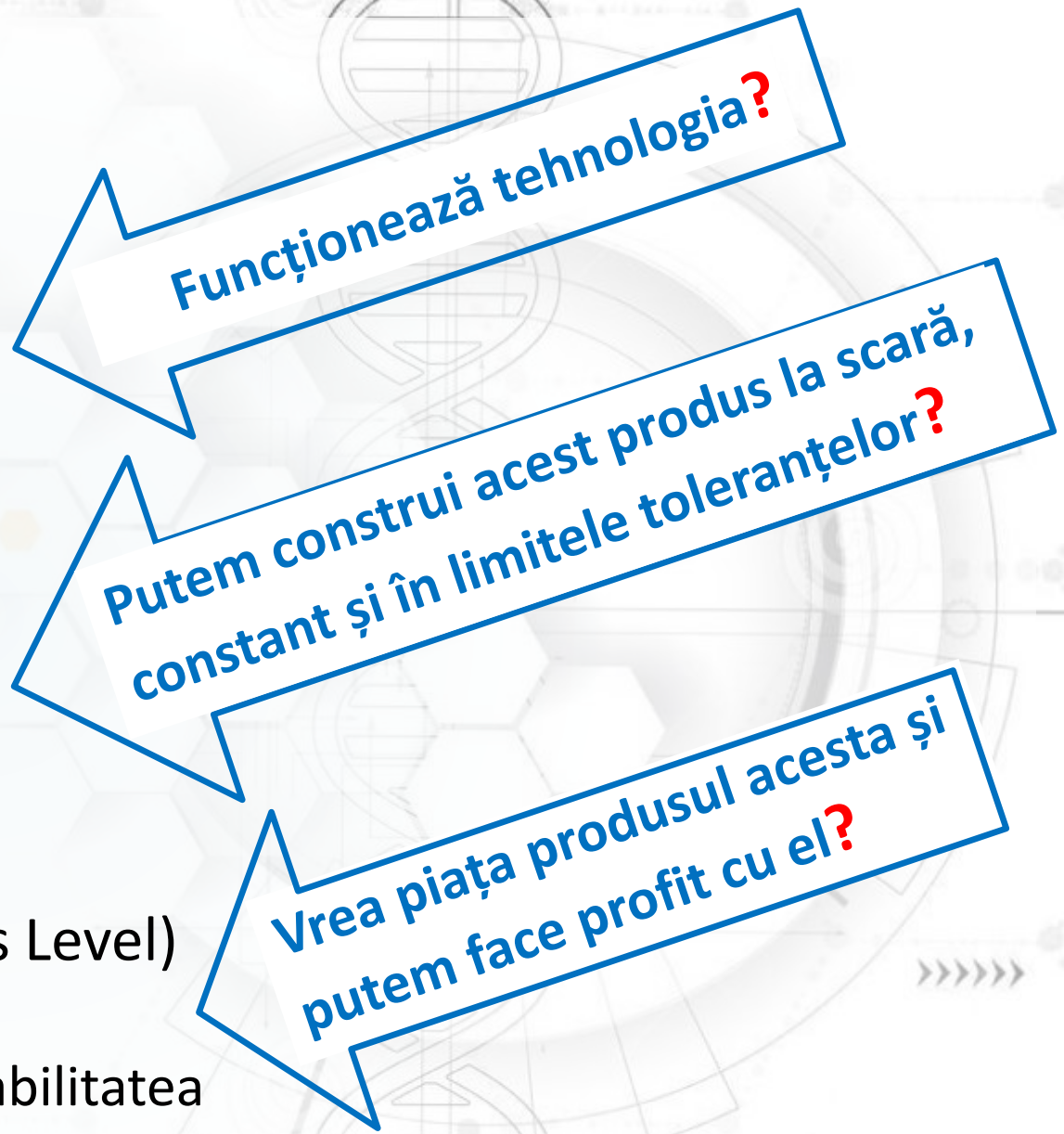
O regulă empirică utilă, pe care mulți practicieni o folosesc

TRL: COMBINAREA CU ALTE SCALE

TRL (Technology Readiness Level)
De la principiile de bază observate până la sistemul dovedit în mediu operațional

MRL (Manufacturing Readiness Level)
Capacitatea de producție, materiale, costuri, forță de muncă și controlul calității

CRL / BRL (Commercial / Business Readiness Level)
Viabilitatea economică, cererea pieței, modelul de afaceri, lanțul de distribuție și profitabilitatea



TRL: COMBINAREA CU ALTE SCALE

Etape de dezvoltare	TRL (Tehnologie)	MRL (Producție)	CRL (Comercial / Business)
Cercetare fundamentală / Concept	**TRL 1 – 3**	**MRL 1 – 2**	**CRL 1 – 2** (Identificare nevoie / piață potențială)
Prototip și Validare	**TRL 4 – 6**	**MRL 3 – 5** (Prototip industrial / linii pilot)	**CRL 3 – 5** (Validare Produs-Market Fit, discuții clienți)
Producție de serie și Piață	**TRL 7 – 9**	**MRL 6 – 10** (Producție de masă / optimizare&lean)	**CRL 6 – 9** (Lansare comercială, distribuție, scalare venituri)

NOTA **Nivelurile TRL-MRL-CRL nu sunt necesar sincronizate / corelate: o tehnoogie poate fi la TRL 7-8-9, dar doar la MRL 3 sau CRL 1-2**

TRL util ca limbaj comun, insuficient dacă este folosit singur

▪**TRL**: Bune practici generale*, valabile în toate domeniile

1. Definirea precisă a obiectului evaluării

Nu evaluăm generic „proiectul”, „produsul” sau „inovația”, ci o tehnologie, un subsistem ori o funcție tehnologică bine delimitată. Dacă proiectul are mai multe tehnologii, acestea trebuie evaluate separat.

2. Dovezi înaintea declarațiilor

Fiecare nivel atribuit trebuie susținut prin rezultate de testare, date experimentale, demonstrații. alte dovezi verificabile. Formulări ca „funcționează bine”, „este aproape gata” nu sunt criterii de evaluare.

3. Definirea mediului relevant înaintea testării

„Relevant” nu înseamnă același lucru în toate domeniile.

Trebuie precizate condițiile de operare, solicitările, materialele, utilizatorii, interfețele și variabilitatea *care caracterizează* ***aplicația vizată***.

4. Criterii explicite de trecere la nivelul următor

Criteriile se stabilesc înaintea evaluării, nu după obținerea rezultatelor. Ele trebuie să precizeze ce funcții trebuie demonstrate, în ce condiții și cu ce performanțe acceptabile.

*în concordanță cu recomandările NASA și cu practica de evaluare din cadrul Departamentului Energiei al SUA

NASA subliniază explicit necesitatea definirii termenilor, a criteriilor de evaluare, a condițiilor de testare și a unei echipe de evaluare competente.

TRL: Bune practici generale, valabile în toate domeniile

5. Separarea componentelor de sistemul integrat

O componentă poate fi matură, în timp ce integrarea ei cu celelalte componente rămâne insuficient demonstrată.

Maturitatea unei componente nu trebuie transferată automat întregului sistem.

6. Evaluare independentă și interdisciplinară

Echipa trebuie să includă competențe tehnice relevante și, după caz, specialiști în integrare, exploatare și utilizare.

Evaluatorul nu ar trebui să fie singurul care stabilește nivelul tehnologiei pe care a dezvoltat-o.

7. Trasabilitate și reevaluare

Se păstrează nivelul estimat, data evaluării, dovezile, ipotezele, limitele testelor și condițiile în care concluzia rămâne valabilă.

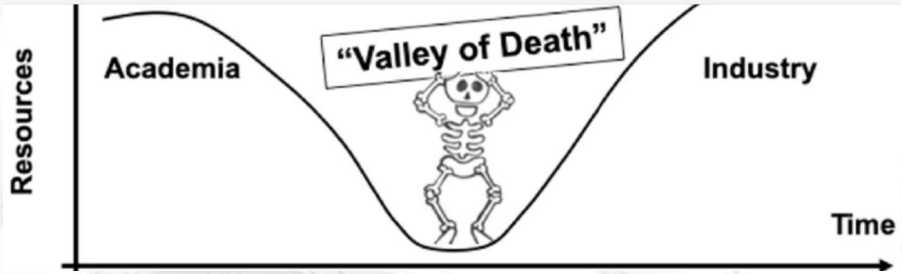
Modificarea tehnologiei sau a aplicației poate impune o nouă evaluare.

O precizare importantă: acestea sunt principii de bună practică sintetizate din ghiduri și din raționamentul inginerească, NU afirmații că există o singură metodologie universală pentru toate domeniile

Exemple TRL in domeniul CHIMIC (1/3)

NIVEL TEHNOLOGIC	Exemplu	Activitate de dezvoltare
TRL 1: Principii de bază observate Principiile de bază sunt observate și raportate; cunoștințele științifice stau la baza unei potențiale aplicații.	Descoperirea faptului că un material metal–organic adsorbe selectiv CO2	Izoterme de adsorbție publicate, mecanism spectroscopic, date inițiale de selectivitate
TRL 2: Concept tehnologic formulat O aplicație practică este formulată, dar rămâne speculativă și nu are încă dovadă experimentală de concept.	Concept pentru un strat anticoroziv autocicatrizant, bazat pe inhibitori microîncapsulați	Concept de formulare, performanță țintă, mecanism propus de eliberare
TRL 3: Dovadă experimentală de concept Studiile analitice și experimentale validează funcția sau caracteristica critică.	O nouă cale enzimatică produce molecula țintă la scară de miligrame, cu selectivitate acceptabilă	Sinteză la scară mică, confirmare analitică, validare inițială a modelului de reacție
TRL 4: Validare în laborator Tehnologia este validată în condiții de laborator; componentele sunt integrate și testate împreună.	Catod, electrolit, separator și colector de curent asamblați într-o celulă pouch de laborator	Ciclare, capacitate la diferite regimuri, impedanță, screening de siguranță în condiții controlate

Exemple TRL in domeniul CHIMIC (2/3)



NIVEL TEHNOLOGIC	Exemplu	Activitate de dezvoltare
TRL 5: Validare într-un mediu relevant Tehnologia este validată într-un mediu relevant; pentru tehnologiile-cheie activatoare, acesta este adesea un mediu relevant industrial.	Un proces de hidrogenare în flux continuu demonstrat într-un reactor pilot, folosind materie primă reală cu impurități	Funcționare de mai multe zile, dezactivarea catalizatorului, bilanț de masă, control al calității
TRL 6: Demonstrare într-un mediu relevant Tehnologia este demonstrată într-un mediu relevant; NASA descrie TRL 6 ca implicând un prototip complet funcțional sau un model reprezentativ.	Un proces pilot cu membrană produce produsul la puritatea țintă, într-o campanie extinsă	Modul prototip, alimentare reală, control automat, evaluarea reproductibilității și a economiei procesului
TRL 7: Prototip într-un mediu operațional Un prototip de sistem este demonstrat într-un mediu operațional. AVERTISMENT:: Pentru chimie, „mediu operațional" poate însemna instalația industrială reală, nu doar un pilot mai mare.	Un proces catalitic de producție demonstrat în linia tehnologică intenționată, cu variabilitatea alimentării și eșantionare conform reglementărilor	Campanie cap-coadă, validarea siguranței procesului, proceduri pentru operatori, testarea calității

Exemple TRL in domeniul CHIMIC (3/3)

TRL 8: Sistem complet și calificat Sistemul final este completat și calificat prin teste și analize pentru mediul operațional și platforma intenționate.	Un proces calificat pentru intermediar farmaceutic, un strat industrial sau o chimie de baterie certificată, gata de implementare	Înghețarea designului, metode analitice validate, validarea procesului, documentație de reglementare, calificarea lanțului de aprovizionare
TRL 9: Demonstrat în operațiuni reale Sistemul real este demonstrat prin operațiuni de misiune reușite; în formularea UE/Horizon, TRL 9 poate însemna, de asemenea, producție competitivă pentru tehnologiile-cheie sau operare în spațiu.	Un catalizator comercial utilizat în mod curent într-o instalație industrială sau o chimie de diagnostic medical implementată în condiții aprobate	Producție susținută, performanță în teren, conformitate de calitate și reglementare

Exemple TRL in domeniul SPATIAL (1/4)

NIVEL TEHNOLOGIC	Exemplu	Activitate de dezvoltare
TRL 1: Principii de bază observate Principiile de bază sunt observate și raportate; cunoștințele științifice stau la baza unei potențiale aplicații. AVERTISMENT: O publicație, singură, nu transformă o tehnologie într-un produs matur; ea stabilește baza științifică, dar aplicația propusă poate rămâne încă speculativă.	Observarea că un polimer își modifică densitatea optică sub expunere simulată la oxigen atomic	Studiu fundamental al radiației și materialelor, care identifică un principiu potențial pentru straturi de protecție
TRL 2: Concept tehnologic formulat O aplicație practică este formulată, dar rămâne speculativă și nu are încă dovadă experimentală de concept. AVERTISMENT: Nu confundați o idee de aplicație atractivă cu fezabilitatea demonstrată. La TRL 2, poate exista puțină sau deloc dovadă experimentală.	Concept pentru un propulsor electrospray cu lichide ionice, folosind un propulsant nou	Model conceptual de performanță, proprietăți preliminare țintă ale propulsantului

Exemple TRL in domeniul SPATIAL (2/4)

NIVEL TEHNOLOGIC	Exemplu	Activitate de dezvoltare
TRL 3: Dovadă experimentală de concept Studiile analitice și experimentale validează funcția sau caracteristica critică. AVERTISMENT: Un experiment reușit pe un singur lot de material sau într-o singură condiție de reacție nu reprezintă validarea sistemului. Demonstrează o funcție critică, nu manufacturabilitatea, durata de viață sau integrarea.	Un strat candidat rezistent la oxigen atomic supraviețuiește expunerii reprezentative într-o instalație terestră	Expunere la nivel de eșantion, pierdere de masă, testare optică și mecanică
TRL 4: Validare în laborator Tehnologia este validată în condiții de laborator; componentele sunt integrate și testate împreună. AVERTISMENT: „Validat în laborator” poate ascunde efectele de scară: evacuarea căldurii, acumularea impurităților, amestecarea, uniformitatea electrozilor și degradarea pe termen lung se pot comporta foarte diferit la scară pilot sau de zbor.	Propulsant, material de căptușeală a rezervorului, supape și componentă de aprindere testate ca breadboard integrat de laborator	Teste de compatibilitate, etanșeitate, ciclare termică și funcționalitate

Exemple TRL in domeniul SPATIAL (3/4)

NIVEL TEHNOLOGIC	Exemplu	Activitate de dezvoltare
TRL 5: Validare într-un mediu relevant Tehnologia este validată într-un mediu relevant; pentru tehnologiile-cheie activatoare, acesta este adesea un mediu relevant industrial. AVERTISMENT: „Relevant” este cel mai frecvent cuvânt abuzat în evaluările TRL. O cameră de vid termic este relevantă pentru multe componente spațiale, dar poate să nu reproducă oxigenul atomic, impactul micrometeoroidelor, sarcinile combinate sau efectele pe durata misiunii.	Un proces de hidrogenare în flux continuu demonstrat într-un reactor pilot, folosind materie primă reală cu impurități	Funcționare de mai multe zile, dezactivarea catalizatorului, bilanț de masă, control al calității
TRL 6: Demonstrare într-un mediu relevant Tehnologia este demonstrată într-un mediu relevant; NASA descrie TRL 6 ca implicând un prototip complet funcțional sau un model reprezentativ. AVERTISMENT: Un prototip poate fi funcțional, dar nereprezentativ ca materiale, interfețe, software de control sau rută de producție. TRL 6 nu înseamnă „aproape TRL 9”; integrarea și calificarea operațională rămân înainte	Un subsistem complet de propulsie funcționează într-o instalație de vid, folosind propulsantul și profilul de operare prevăzute	Cartografierea performanței, demonstrarea ciclului de lucru, capacitatea de repornire, evaluarea contaminării

Exemple TRL in domeniul SPATIAL (4/4)

NIVEL TEHNOLOGIC	Exemplu	Activitate de dezvoltare
TRL 7: Prototip într-un mediu operațional		
Un prototip de sistem este demonstrat într-un mediu operațional. În domeniul spațial, poate implica o unitate inginerească de înaltă fidelitate, operată în mediul real al platformei — terestru, aerian sau spațial. AVERTISMENT:: Pentru spațial, o cameră de vid de laborator nu este, de regulă, echivalentă cu mediul operațional orbital.	Un senzor nou de urmărire stelară sau o unitate de propulsie zburată ca sarcină utilă găzduită ori demonstrată pe o platformă relevantă, cum ar fi o rachetă sondă	Testarea interfețelor operaționale, autonomie, gestionarea defecțiunilor, date reprezentative pentru misiune
TRL 8: Sistem complet și calificat		
Sistemul final este completat și calificat prin teste și analize pentru mediul operațional și platforma intenționate. AVERTISMENT: Calificarea este dependentă de context. O chimie de baterie calificată pentru vehicule electrice terestre nu este automat calificată pentru vibrații de lansare, vid, ciclare termică, radiații sau cerințele de siguranță ale vehiculelor spațiale cu echipaj.	Echipament de zbor calificat pentru un anumit vehicul de lansare și clasă de misiune	Calificare prin analize și teste, testare de acceptanță, standarde de execuție, control al configurației
TRL 9: Demonstrat în operațiuni reale		
Sistemul real este demonstrat prin operațiuni de misiune reușite; AVERTISMENT: TRL 9 pentru o misiune nu se transferă automat la alta. O componentă demonstrată pe orbita terestră joasă poate să nu fie TRL 9 pentru suprafața lunară, spațiul profund, misiuni cu echipaj sau misiuni cu constrângeri de protecție planetară.	Un sistem de propulsie, strat de protecție, senzor sau chimie de susținere a vieții, funcționând cu succes în timpul unei misiuni	Date de zbor, rezultate operaționale, istoric de anomalii, inginerie de susținere

Let's proceed



Dr. Nicolae Varachiu – ICECHIM nicolae.varachiu@icechim.ro

Nivelurile de pregătire tehnologică (TRL) în aplicații spațiale

De la “insight” la sisteme demonstrate în zbor:
beneficii, rezerve și riscuri de interpretare

Florin-Adrian Popescu – **INSTITUTUL DE ȘTIINTE SPAȚIALE**, filiala INFLPR
www.spacescience.ro fapopescu@spacescience.

“TRL nu măsoară calitatea științifică, noutatea sau succesul comercial; este un cadru de evaluare a maturității unei tehnologii definite, într-un context definit.”

(nasa.gov : about Technology Readiness Levels)

De ce este util TRL?

Scala NASA merge de la TRL 1, „principii de bază observate și raportate”, până la TRL 9, „sistem real demonstrat în zbor prin operațiuni de misiune reușite”.

Un nivel ***TRL are sens*** doar atunci când sunt precizate trei elemente:

- ***Tehnologia*** *sau* ***produsul***

de exemplu: un catalizator, un strat de protecție, un electrolit, un propulsant, un material senzoric sau un proces de purificare.

- ***Limita sistemului*****:**

de exemplu: moleculă, formulare, componentă, subsistem sau sistem integrat.

- ***Mediul și criteriile de acceptare***
- de exemplu: laborator, instalație pilot, reactor industrial, mediu de lansare, orbită, suprafață planetară sau misiune operațională.

Exemple TRL in domeniul SPATIAL

NIVEL TEHNOLOGIC	Exemplu	Activitate de dezvoltare
TRL 1: Principii de bază observate		
Principiile de bază sunt observate și raportate; cunoștințele științifice stau la baza unei potențiale aplicații. AVERTISMENT: O publicație, singură, nu transformă o tehnologie într-un produs matur; ea stabilește baza științifică, dar aplicația propusă poate rămâne încă speculativă.	Observarea că un polimer își modifică densitatea optică sub expunere simulată la oxigen atomic	Studiu fundamental al radiației și materialelor, care identifică un principiu potențial pentru straturi de protecție
TRL 2: Concept tehnologic formulat		
O aplicație practică este formulată, dar rămâne speculativă și nu are încă dovadă experimentală de concept. AVERTISMENT: Nu confundați o idee de aplicație atractivă cu fezabilitatea demonstrată. La TRL 2, poate exista putină	Concept pentru un propulsor electrospray cu lichide ionice, folosind un propulsant nou	Model conceptual de performanță, proprietăți preliminare țintă ale propulsantului

Exemple TRL in domeniul SPATIAL

TRL 3: Dovadă experimentală de concept Studiile analitice și experimentale validează funcția sau caracteristica critică. AVERTISMENT: Un experiment reușit pe un singur lot de material sau într-o singură condiție de reacție nu reprezintă validarea sistemului. Demonstrează o funcție critică, nu manufacturabilitatea, durata de viață sau integrarea.	Un strat candidat rezistent la oxigen atomic supraviețuiește expunerii reprezentative într-o instalație terestră	Expunere la nivel de eșantion, pierdere de masă, testare optică și mecanică
TRL 4: Validare în laborator Tehnologia este validată în condiții de laborator; componentele sunt integrate și testate împreună. AVERTISMENT: „Validat în laborator” poate ascunde efectele de scară: evacuarea căldurii, acumularea impurităților, amestecarea, uniformitatea electrozilor și degradarea pe termen lung se pot comporta foarte diferit la scară pilot sau de zbor.	Propulsant, material de căptușeală a rezervorului, supape și componentă de aprindere testate ca breadboard integrat de laborator	Teste de compatibilitate, etanșeitate, ciclare termică și funcționalitate

Exemple TRL in domeniul SPATIAL

TRL 5: Validare într-un mediu relevant Tehnologia este validată într-un mediu relevant; pentru tehnologiile-cheie activatoare, acesta este adesea un mediu relevant industrial. AVERTISMENT: „Relevant” este cel mai frecvent cuvânt abuzat în evaluările TRL. O cameră de vid termic este relevantă pentru multe componente spațiale, dar poate să nu reproducă oxigenul atomic, impactul micrometeoroidelor, sarcinile combinate sau efectele pe durata misiunii.	Un proces de hidrogenare în flux continuu demonstrat într-un reactor pilot, folosind materie primă reală cu impurități	Funcționare de mai multe zile, dezactivarea catalizatorului, bilanț de masă, control al calității
TRL 6: Demonstrare într-un mediu relevant Tehnologia este demonstrată într-un mediu relevant; NASA descrie TRL 6 ca implicând un prototip complet funcțional sau un model reprezentativ. AVERTISMENT: Un prototip poate fi funcțional, dar nereprezentativ ca materiale, interfețe, software de control sau rută de producție. TRL 6 nu înseamnă „aproape TRL 9”; integrarea și calificarea operațională rămân înainte	Un subsistem complet de propulsie funcționează într-o instalație de vid, folosind propulsantul și profilul de operare prevăzute	Cartografierea performanței, demonstrarea ciclului de lucru, capacitatea de repornire, evaluarea contaminării

Exemple TRL in domeniul SPATIAL

TRL 7: Prototip într-un mediu operațional		
Un prototip de sistem este demonstrat într-un mediu operațional. În domeniul spațial, poate implica o unitate inginerească de înaltă fidelitate, operată în mediul real al platformei — terestru, aerian sau spațial. AVERTISMENT:: Pentru spațial, o cameră de vid de laborator nu este, de regulă, echivalentă cu mediul operațional orbital.	Un senzor nou de urmărire stelară sau o unitate de propulsie zburată ca sarcină utilă găzduită ori demonstrată pe o platformă relevantă, cum ar fi o rachetă sondă	Testarea interfețelor operaționale, autonomie, gestionarea defecțiunilor, date reprezentative pentru misiune
TRL 8: Sistem complet și calificat		
Sistemul final este completat și calificat prin teste și analize pentru mediul operațional și platforma intenționate. AVERTISMENT: Calificarea este dependentă de context. O chimie de baterie calificată pentru vehicule electrice terestre nu este automat calificată pentru vibrații de lansare, vid, ciclare termică, radiații sau cerințele de siguranță ale vehiculelor spațiale cu echipaj.	Echipament de zbor calificat pentru un anumit vehicul de lansare și clasă de misiune	Calificare prin analize și teste, testare de acceptanță, standarde de execuție, control al configurației
TRL 9: Demonstrat în operațiuni reale		
Sistemul real este demonstrat prin operațiuni de misiune reușite; AVERTISMENT: TRL 9 pentru o misiune nu se transferă automat la alta. O componentă demonstrată pe orbita terestră joasă poate să nu fie TRL 9 pentru suprafața lunară, spațiul profund, misiuni cu echipaj sau misiuni cu constrângeri de protecție planetară.	Un sistem de propulsie, strat de protecție, senzor sau chimie de susținere a vieții, funcționând cu succes în timpul unei misiuni	Date de zbor, rezultate operaționale, istoric de anomalii, inginerie de susținere

- **TRL nu este linear în practică.** Dezvoltarea chimică a combustibililor rachetei implică adesea cicluri: o modificare de formulare la TRL 5 poate invalida dovezi anterioare privind compatibilitatea, toxicitatea, îmbătrânirea sau scalarea.
- **Unitatea de evaluare contează.** Un catalizator, un reactor, un proces, un produs și o instalație integrată pot avea niveluri TRL diferite.
- **Reprezentativitatea mediului se bazează pe evaluare.** Mediile simulate pot omite efecte cuplate: radiații plus ciclare termică plus vid plus solicitări mecanice.

- **TRL nu spune aproape nimic despre economie.** Un proces TRL 9 poate eșua comercial din cauza costului materiei prime, duratei de viață a catalizatorului, tratării deșeurilor sau schimbării pieței.
- **TRL nu înlocuiește pregătirea reglementară.** Cerințele REACH, GMP farmaceutic, contactul cu alimentele, biocidele sau calificarea pentru zbor spațial pot impune porți separate.
- **Calitatea datelor contează.** O afirmație de TRL ridicat necesită condiții de test documentate, criterii de acceptare, verificare independentă și trasabilitate — nu doar un videoclip demonstrativ.

•Utilizare greșită frecventă a interpretării nivelelor tehnologice:

Utilizare greșită	De ce este greșită	Practică mai bună
„Materialul nostru este TRL 6”, fără a preciza aplicația	Același material poate fi TRL 3 pentru o utilizare și TRL 8 pentru alta	Precizați materialul, funcția, limita sistemului, mediul și criteriile de acceptare
Considerarea succesului de laborator ca validare într-un mediu relevant	Scala, impuritățile, îmbătrânirea și materiile prime reale pot invalida rezultatele	Definiți mediul relevant și demonstrați performanța pe o durată semnificativă
Presupunerea că TRL avansează monoton	Noi formulări sau cerințe de misiune pot provoca regres	Reevaluați după modificări de design, proces, furnizor sau cerințe
Egalarea TRL 9 cu calificare universală	Mediile și platformele de misiune diferă	Calificați și demonstrați pentru clasa specifică de misiune și domeniul de operare
Utilizarea TRL ca proxy pentru excelența științifică	TRL măsoară maturitatea, nu noutatea sau calitatea publicațiilor	Evaluați separat meritul științific și nivelul TRL
Revendicarea unui TRL ridicat doar pe baza modelării	Modelele susțin, dar nu înlocuiesc validarea experimentală	Asociați simulările cu dovezi experimentale la nivelul corespunzător

Pentru fiecare afirmație TRL, documentați:

1. **Descrierea tehnologiei:** chimie, formulare, dispozitiv sau proces.
2. **Aplicația intenționată:** produs, reacție, mediu și nevoie a utilizatorului.
3. **Limita sistemului:** ce este inclus și ce este exclus.
4. **TRL actual:** cu definiția exactă utilizată.
5. **Dovezile:** articole de test, scară, durată, mediu, rezultate și criterii de acceptare.
6. **Lacunele cunoscute:** moduri de defectare, riscuri de scalare, nevoi reglementare și plan de calificare.
7. **Următoarea "poartă" TRL:** demonstrația specifică necesară pentru a justifica avansarea.

Concluzii

TRL este cel mai util în dezvoltarea spațială atunci când este tratat ca un **protocol structurat de dovezi**, nu ca un simplu număr.

Creează așteptări comune de la descoperirea moleculară până la operarea demonstrată în zbor, dar valoarea sa depinde de definirea precisă a tehnologiei, a limitei sistemului, a mediului relevant și a criteriilor de acceptare.

„O afirmație TRL credibilă răspunde nu doar la întrebarea

Cât de matură este?,

ci și la:

Matură pentru ce, demonstrată unde și conform căror criterii?”

(NASA)

DINCOLO DE TRL: MATURITATEA NANOTEHNOLOGIILOR ȘI PROVOCAREA IMPLEMENTĂRII INDUSTRIALE

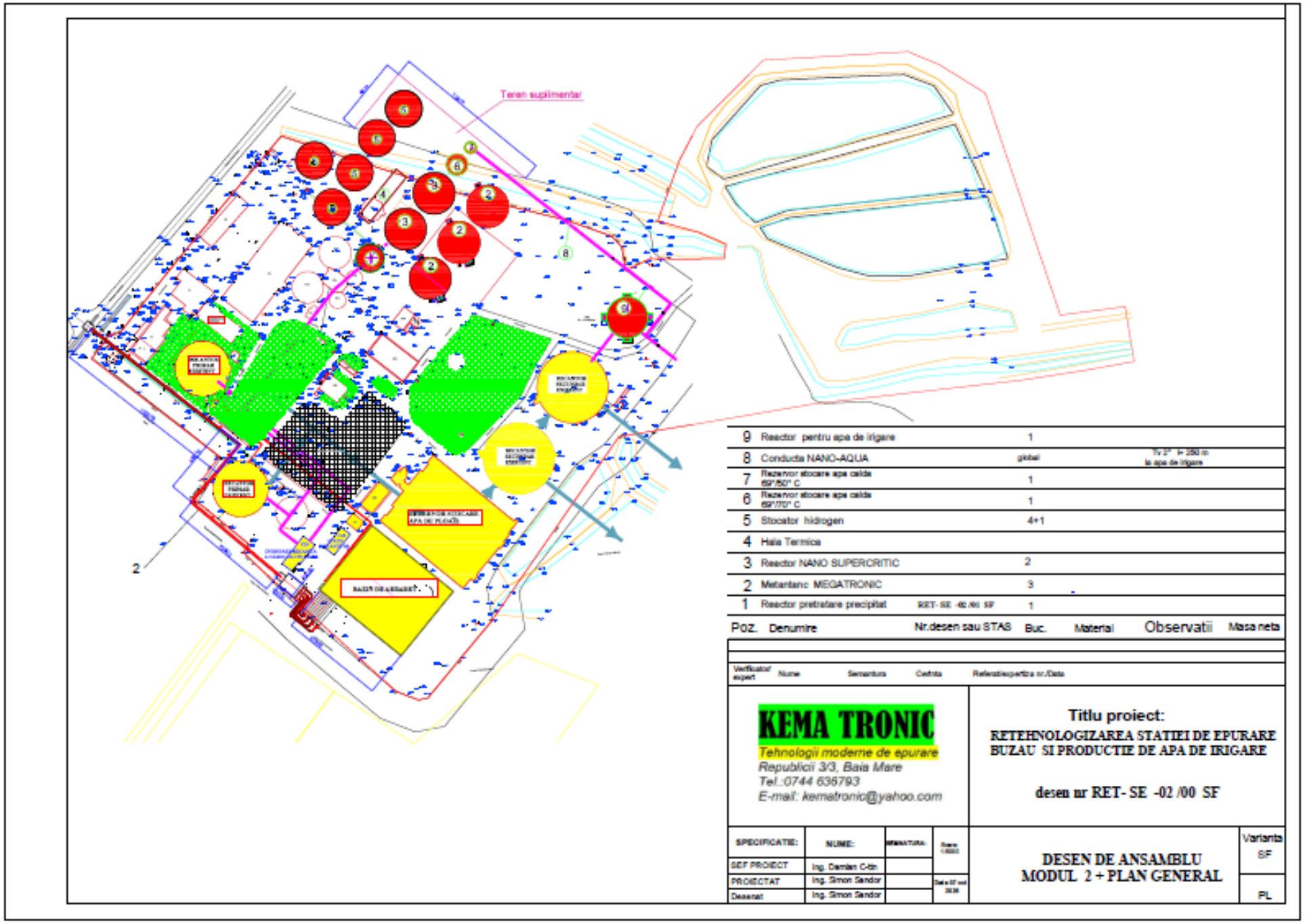
Cercetările KEMA TRONIC cu ECOIND
și aplicația integrată la Stația de Epurare Buzău

Ing. Constantin Damian, Dr. Ioana Bercu

PRIOCHEM 2026, Masa rotunda **TRL: DE LA CERCETARE LA INOVARE**
ICECHIM București | 20 octombrie 2026

1. De la demonstrarea tehnologică la implementarea industrială

- Demonstrarea funcționării unui principiu tehnologic nu echivalează cu pregătirea sa pentru exploatare industrială.
- Experiența KEMA TRONIC în cercetările anterioare de ultrasonare și gazificare a nămolurilor, realizate în colaborare cu ECOIND București, constituie baza pentru dezvoltarea unor aplicații integrate la Stația de Epurare Buzău.
- **Nivelul TRL 6 este reperul invocat pentru cercetările precedente**;
- **TRL 8** este obiectivul de calificare a ansamblului industrial, **nu un nivel deja atins prin elaborarea documentației de proiectare.**
- Cazul Buzău permite examinarea concretă a limitelor unei evaluări TRL unice:
  - Un generator ultrasonic, un dispozitiv Venturi, un fermentator sau o instalație de recuperare a căldurii pot avea grade diferite de maturitate.
  - Cuplarea lor într-un flux comun, cu recirculări de gaze, materiale și energie, introduce riscuri de interfață care nu sunt reflectate suficient de maturitatea fiecărei componente luate separat.


Teren suplimentar
9 Reactor pentru apa de irigare 1
8 Conducta NANO-AQUA global Tv 2" l= 250 m la apa de irigare
7 Rezervor stocare apa calda 60°/50° C 1
6 Rezervor stocare apa calda 60°/70° C 1
5 Stocator hidrogen 4+1
4 Hala Termica
3 Reactor NANO SUPERCRITIC 2
2 Metantanc MEGATRONIC 3
1 Reactor pretratare precipitat RET- SE -02 /01 SF 1
Poz. Denumire Nr.desen sau STAS Buc. Material Observatii Masa neta
Verificator/ expert Nume Semnatura Cerinta Referat/expertiza nr./Data
KEMA TRONIC
Tehnologii moderne de epurare
Republicii 3/3, Baia Mare
Tel.:0744 636793
E-mail: kematronic@yahoo.com
Titlu proiect:
RETEHNOLOGIZAREA STATIEI DE EPURARE BUZAU SI PRODUCTIE DE APA DE IRIGARE
desen nr RET- SE -02 /00 SF
SPECIFICATIE: NUME: SEMNATURA:
SEF PROIECT Ing. Damian C-tin
PROIECTAT Ing. Simon Sandor
Desenat Ing. Simon Sandor
DESEN DE ANSAMBLU MODUL 2 + PLAN GENERAL
Varianta SF
PL

2. Nucleul nanotehnologic: Venturi, ultrasunete și cavitație

- Platforma tehnologică utilizează introducerea gazelor în fluxuri lichide prin dispozitive Venturi, urmată de tratament ultrasonic, în configurații care includ aer, biogaz și hidrogen. Câmpul acustic induce oscilația și colapsul bulelor cavitaționale, cu apariția locală a unor gradienți mari de temperatură și presiune, forfecare, microjeturi și reacții sonochimice. **Aceste fenomene sunt relevante pentru dezagregarea flocoanelor, dezintegrarea structurilor celulare, solubilizarea parțială a materiei organice și intensificarea transferului gaz–lichid.**
- Trebuie diferențiate nanobulele dispersate, care pot avea o durată de viață relativ mare în lichid, de bulele cavitaționale care suferă implozie. Condițiile extreme estimate în microzonele de colaps nu reprezintă parametrii termodinamici medii ai reactorului și nu demonstrează, prin ele însele, disocierea completă a tuturor moleculelor. **Pentru transferul la scară industrială contează distribuția câmpului ultrasonic, frecvența nominală de circa 20 kHz, densitatea de putere, geometria traductoarelor, dimensiunea și fracția volumică a bulelor, timpul efectiv de contact și consumul specific de energie.**
- **Prin urmare, calificarea nu se poate baza exclusiv pe existența unui efect de cavitație observat în laborator: este necesară verificarea reproductibilității fenomenelor în condiții de debit, compoziție și încărcare variabile.**

3. Pretratarea nanotehnologică și fermentarea anaerobă intensificată

- În configurația propusă pentru Buzău, nămolul și precipitatul sunt supuse îngroșării, condiționării termice și pretratării cu Venturi și ultrasunete înaintea digestiei anaerobe. Sunt prevăzute recirculări de biogaz și hidrogen, precum și introducerea nanocarbonului, nitrocarbonului și a unor nanoparticule metalice în fluxul de pretratare. **Scopul tehnologic este creșterea accesibilității substratului organic și intensificarea etapelor biologice ulterioare.**
- Fermentatoarele din conceptul MEGATRONIC sunt integrate cu pretratarea ultrasonică și cu transferul de gaze. Metanogeneza hidrogenotrofică poate fi exprimată prin reacția globală

$$CO_2 + 4H_2 \rightarrow CH_4 + 2H_2O.$$

- Performanța depinde însă de presiunea parțială a hidrogenului, transferul interfacial, compoziția consorțiului microbian, stabilitatea procesului și bilanțul energetic. Eventuala reducere a CO_2 din biogaz trebuie cuantificată prin bilanț de carbon, nu doar prin procente volumice.
- **Demonstrarea industrială presupune monitorizarea solidelor volatile distruse, producției specifice de biogaz, concentrației de metan, acizilor grași volatili, alcalinității și consumului energetic al pretratării. Pentru nanoparticulele de Ni și Cr sunt necesare evaluări distincte privind specia chimică, doza, toxicitatea, acumularea în reziduuri și compatibilitatea cu utilizările finale.**

4. NANOSUPERCRITIC: conversia fluxurilor carbonice și producerea hidrogenului

- Modulul NANOSUPERCRITIC este conceput pentru conversia suplimentară a fluxurilor organice și gazoase, cu producerea și recircularea hidrogenului.
- Conceptul tehnologic corelează cavitația, reacțiile radicalice locale, transformările carbonului, separarea H_2 și utilizarea sa în pretratare și cogenerare.
- Denumirea tehnologiei nu trebuie interpretată ca dovadă că întregul reactor funcționează la condițiile termodinamice ale apei supercritice, peste aproximativ 374 °C și 22,1 MPa; documentația descrie microcondiții tranzitorii asociate colapsului cavitațional.
- **La scara instalației**, întrebările determinante nu sunt numai dacă apare hidrogen, ci ce cantitate netă se produce, la ce puritate, cu ce consum specific de energie și cu ce stabilitate la variația compoziției alimentării.
- Separarea, stocarea, siguranța la explozie și funcționarea motoarelor de cogenerare fac parte din aceeași demonstrație. Recircularea H_2 trebuie evaluată prin bilanț molar și energetic, astfel încât să nu fie confundat debitul recirculat cu producția netă.
- **Aceasta este una dintre limitele TRL ca indicator singular: un reactor calificat nu califică automat și lanțul de producere, purificare, stocare și valorificare energetică a hidrogenului**.

5. Nanocarbon, nitrocarbon și recuperarea carbonului

- O direcție distinctă este recuperarea carbonului sub formă de materiale carbonice fine și structuri carbonice funcționalizate cu azot, denumite în documentația tehnologică nanocarbon și nitrocarbon. Aceste fluxuri sunt prevăzute pentru recirculare în pretratare, pentru procese de separare și pentru aplicații agricole.
- **Originalitatea propunerii rezidă în integrarea conversiei carbonului cu tratamentul nămolului, digestia anaerobă și reutilizarea apei.**
- Identificarea produselor impune metode analitice adecvate: distribuție dimensională, morfologie, compoziție elementală, natura legăturilor și grupărilor azotate, stabilitatea dispersiei și cuantificarea randamentului de recuperare. Existența unor reacții radicalice locale nu este, singură, probă a formării selective a unui material determinat.
- **Avantajul față de epurarea biologică convențională trebuie demonstrat prin bilanțuri comparative exprimate în kg C/zi: carbon în influent, CO_2 eliminat prin aerare, carbon în nămol, biogaz, efluent și produse recuperate. Captarea CO_2, conversia sa chimică și stocarea carbonului în produs sunt operații distincte, cu randamente și verificări proprii.**

6. NANOAQUA și integrarea resurselor de apă

- Linia NANOAQUA urmărește tratarea avansată a apei epurate pentru reutilizare, prin cavitație acustică, nanobule de O_2 și N_2 și integrarea controlată a nutrienților recuperați. Documentația tehnică indică ținte de aproximativ 10 mg/L CCO-Cr și 5 mg/L materii în suspensie, care trebuie tratate ca parametri proiectați, nu ca performanțe deja certificate la Buzău.
- Pentru utilizarea agricolă sunt necesare verificări independente ale calității microbiologice, micropoluanților, reziduurilor farmaceutice, pesticidelor, PFAS și microplasticelor, în raport cu cerințele de reglementare aplicabile.
- Un sistem poate atinge o țintă de reducere a CCO fără a demonstra eliminarea fiecărei clase de contaminanți. **Această diferență ilustrează de ce pregătirea pentru piață și autorizare nu poate fi dedusă direct din TRL.**

6. NANOAQUA și integrarea resurselor de apă

- Linia NANOAQUA urmărește tratarea avansată a apei epurate pentru reutilizare, prin cavitație acustică, nanobule de O_2 și N_2 și integrarea controlată a nutrienților recuperați. Documentația tehnică indică ținte de aproximativ 10 mg/L CCO-Cr și 5 mg/L materii în suspensie, care trebuie tratate ca parametri proiectați, nu ca performanțe deja certificate la Buzău.
- Pentru utilizarea agricolă sunt necesare verificări independente ale calității microbiologice, micropoluanților, reziduurilor farmaceutice, pesticidelor, PFAS și microplasticelor, în raport cu cerințele de reglementare aplicabile.
- Un sistem poate atinge o țintă de reducere a CCO fără a demonstra eliminarea fiecărei clase de contaminanți. **Această diferență ilustrează de ce pregătirea pentru piață și autorizare nu poate fi dedusă direct din TRL.**

7. Ce trebuie evaluat dincolo de TRL?

- Într-o instalație de epurare reală, validarea industrială a nanotehnologiilor trebuie să acopere simultan cinci dimensiuni:
  - Prima este maturitatea tehnică: repetabilitate, disponibilitate, mentenanță și comportament la încărcări variabile.
  - A doua este integrarea de proces: bilanțuri de masă, carbon, azot, apă și energie, inclusiv toate recirculările.
  - A treia este siguranța: hidrogen, ultrasunete de putere, nanoparticule, emisii și produse secundare.
  - A patra este conformarea: autorizarea instalației, a efluentului și a produselor recuperate.
  - A cincea este fezabilitatea economică: investiție, cost operațional, consum energetic net, valoarea energiei și posibilitatea comercializării produselor.
- O cale riguroasă de la TRL 6 la TRL 8 ar trebui să includă protocoale de încercare, criterii de acceptanță pentru fiecare modul, probe de funcționare integrată și o perioadă demonstrativă suficientă pentru variațiile sezoniere ale influentului.
- Nivelul de maturitate al sistemului complet trebuie justificat prin dovezi ale funcționării sale, nu prin însumarea nivelurilor atribuite subsistemelor.

8. Concluzie pentru masa rotundă

- Cavitația acustică, nanobulele, pretratarea nămolului, fermentarea intensificată, NANOSUPERCRITIC, nanocarbonul, nitrocarbonul și NANOAQUA nu trebuie evaluate numai ca tehnologii individuale, ci ca elemente ale unei instalații interdependente.
- TRL rămâne util pentru a ordona etapele de dezvoltare, dar nu este suficient pentru a garanta implementarea reușită.
- În cazul nanotehnologiilor aplicate epurării, progresul real înseamnă trecerea de la efecte fizico-chimice observate la performanțe cuantificate, bilanțuri închise, exploatare sigură, autorizare și viabilitate economică.
- Obiectivul Buzău este tocmai demonstrarea acestei treceri la scară industrială.
- *Notă: TRL 6 este reperul declarat pentru cercetările anterioare, iar TRL 8 este obiectivul de calificare industrială. Performanțele propuse necesită verificare prin încercări și bilanțuri.*

BEYOND TRL: NANOTECHNOLOGY MATURITY AND THE CHALLENGE OF INDUSTRIAL IMPLEMENTATION

KEMA TRONIC Research with ECOIND and Its Integrated Application at the Buzău Wastewater Treatment Plant

Authors: MSc Eng. Constantin Damian and Dr. Eng. Ioana Bercu

PRIOCHEM 2026, ICECHIM Bucharest | 20 October 2026

1. From Technology Demonstration to Industrial Implementation

The theme of the PRIOCHEM 2026 roundtable, “Technology Readiness Levels (TRLs): Are They Enough to Guide Innovation to Successful Implementation?”, raises a fundamental distinction: demonstrating that a technological principle works is not the same as being ready for industrial operation. KEMA TRONIC's experience in previous research on ultrasonic treatment and sludge gasification, conducted in collaboration with ECOIND Bucharest, provides the basis for developing integrated applications at the Buzău Wastewater Treatment Plant. TRL 6 is the reference level cited for the earlier research; TRL 8 is the qualification target for the industrial system as a whole, not a level already achieved through the preparation of design documentation.

The Buzău case provides a concrete opportunity to examine the limitations of assigning a single TRL. An ultrasonic generator, a Venturi device, a digester, or a heat recovery system may each have a different maturity level. Combining them into a common process, with recirculation of gases, materials, and energy, introduces interface risks that are not adequately reflected by the maturity of each component considered separately.

2. The Nanotechnology Core: Venturi, Ultrasound, and Cavitation

The technology platform introduces gases into liquid streams through Venturi devices, followed by ultrasonic treatment, in configurations involving air, biogas, and hydrogen. The acoustic field induces the oscillation and collapse of cavitation bubbles, producing localised high temperature and pressure gradients, shear forces, microjets, and sonochemical reactions. These phenomena are relevant to floc disruption, disintegration of cellular structures, partial solubilisation of organic matter, and enhanced gas–liquid mass transfer.

A distinction must be made between dispersed nanobubbles, which may persist in a liquid for relatively long periods, and cavitation bubbles, which undergo implosion. The extreme conditions estimated within microscopic collapse zones do not represent the reactor's average thermodynamic parameters and do not, in themselves, demonstrate the complete dissociation of all molecules. For industrial scale-up, the relevant factors include the distribution of the ultrasonic field, the nominal frequency of approximately 20 kHz, power density, transducer geometry, bubble size and volume fraction, effective contact time, and specific energy consumption.

Qualification therefore cannot rely solely on observing a cavitation effect in the laboratory: the reproducibility of these phenomena must be verified under varying flow rates, compositions, and loadings.

3. Nanotechnology-Based Pretreatment and Enhanced Anaerobic Digestion

In the configuration proposed for Buzău, sludge and precipitate undergo thickening, thermal conditioning, and pretreatment using Venturi devices and ultrasound before anaerobic digestion. Biogas and hydrogen recirculation is envisaged, along with the introduction of nanocarbon, nitrocarbon, and certain metal nanoparticles into the pretreatment stream. The technological objective is to increase the accessibility of the organic substrate and intensify the subsequent biological stages.

The digesters in the MEGATRONIC concept are integrated with ultrasonic pretreatment and gas transfer. Hydrogenotrophic methanogenesis can be expressed by the overall reaction $CO_2 + 4H_2 \rightarrow CH_4 + 2H_2O$. However, performance depends on the partial pressure of hydrogen, interfacial transfer, the composition of the microbial consortium, process stability, and the energy balance. Any reduction in CO_2 in the biogas must be quantified using a carbon balance, not merely volumetric percentages.

Industrial demonstration requires monitoring volatile solids destruction, specific biogas production, methane concentration, volatile fatty acids, alkalinity, and pretreatment energy consumption. For Ni and Cr nanoparticles, separate assessments are required regarding chemical species, dosage, toxicity, accumulation in residues, and compatibility with end uses.

4. NANOSUPERCRITIC: Conversion of Carbon-Containing Streams and Hydrogen Production

The NANOSUPERCRITIC module is designed for further conversion of organic and gaseous streams, with hydrogen production and recirculation. The technology concept combines cavitation, local radical reactions, carbon transformations, H_2 separation, and its use in pretreatment and cogeneration. The technology's name should not be taken as evidence that the entire reactor operates under the thermodynamic conditions of supercritical water, above approximately 374 °C and 22.1 MPa; the documentation describes transient microconditions associated with cavitation collapse.

At plant scale, the decisive questions are not simply whether hydrogen is produced, but how much is produced on a net basis, at what purity, with what specific energy consumption, and with what stability as the feed composition varies. Separation, storage, explosion safety, and the operation of cogeneration engines are all part of the same demonstration. H_2 recirculation must be evaluated through molar and energy balances so that the recirculated flow is not confused with net production.

This is one of the limitations of TRL as a stand-alone indicator: qualifying a reactor does not automatically qualify the entire chain of hydrogen production, purification, storage, and energy recovery.

5. Nanocarbon, Nitrocarbon, and Carbon Recovery

A separate area of development is carbon recovery in the form of fine carbonaceous materials and nitrogen-functionalised carbon structures, referred to in the technology documentation as nanocarbon and nitrocarbon. These streams are intended for recirculation in pretreatment, for separation processes, and for agricultural applications. The originality of the proposal lies in integrating carbon conversion with sludge treatment, anaerobic digestion, and water reuse.

Product identification requires appropriate analytical methods: particle size distribution, morphology, elemental composition, the nature of nitrogen-containing bonds and functional groups, dispersion stability, and quantification of recovery yield. The occurrence of local radical reactions is not, by itself, evidence of the selective formation of a particular material.

The advantage over conventional biological wastewater treatment must be demonstrated through comparative balances expressed in kg C/day: carbon in the influent, CO_2 released through aeration, carbon in sludge, biogas, effluent, and recovered products. CO_2 capture, its chemical conversion, and carbon storage in a product are distinct operations, each with its own efficiency and verification requirements.

6. NANOAQUA and the Integration of Water Resources

The NANOAQUA treatment line aims to provide advanced treatment of wastewater effluent for reuse through acoustic cavitation, O_2 and N_2 nanobubbles, and the controlled integration of recovered nutrients. The technical documentation sets targets of approximately 10 mg/L COD-Cr and 5 mg/L suspended solids, which should be regarded as design targets, not as performance levels already certified at Buzău.

For agricultural use, independent verification is required of microbiological quality, micropollutants, pharmaceutical residues, pesticides, PFAS, and microplastics against applicable regulatory requirements. A system may meet a COD reduction target without demonstrating the removal of every class of contaminant. This distinction illustrates why market and regulatory readiness cannot be inferred directly from TRL.

7. What Should Be Assessed Beyond TRL?

At an actual wastewater treatment plant, industrial validation of nanotechnologies must simultaneously cover five dimensions. The first is technical maturity: repeatability, availability, maintenance, and performance under variable loading. The second is process integration: mass, carbon, nitrogen, water, and energy balances, including all recirculation streams. The third is safety: hydrogen, high-power ultrasound, nanoparticles, emissions, and by-products. The fourth is regulatory compliance: authorisation of the plant, the effluent, and the recovered products. The fifth is economic feasibility: capital investment, operating costs, net energy consumption, energy value, and the marketability of products.

A rigorous path from TRL 6 to TRL 8 should include test protocols, acceptance criteria for each module, integrated operation trials, and a demonstration period long enough to capture seasonal variations in the influent. The maturity level of the complete system must be supported by evidence of its operation, rather than by adding together the levels assigned to its subsystems.

8. Conclusion for the Roundtable

KEMA TRONIC's research experience with ECOIND, together with the integration of the proposed technologies at Buzău, provides a relevant case study for the PRIOCHEM 2026 theme. Acoustic cavitation, nanobubbles, sludge pretreatment, enhanced digestion, NANOSUPERCRITIC, nanocarbon, nitrocarbon, and NANOAQUA should be assessed not only as individual technologies but as elements of an interdependent plant.

TRL remains useful for structuring development stages, but is not sufficient to guarantee successful implementation. For nanotechnologies applied to wastewater treatment, real progress means moving from observed physicochemical effects to quantified performance, closed mass and energy balances, safe operation, regulatory authorisation, and economic viability. The objective at Buzău is precisely to demonstrate this transition at industrial scale.

Note: TRL 6 is the declared reference level for the previous research, while TRL 8 is the target for industrial qualification. The proposed performance levels require verification through testing and balances.

R A P O R T privind desfășurarea mesei rotunde:
Technology ReadinessLevels (TRLs):Are They Enough to Guide Innovation to Successful Implementation?

Eveniment satelit al simpozionului internațional **PRIOCHEM XXII Ed.,** 2026

20 oct. 2026, orele 13:00-15:00, la sediul ICECHIM, etaj 1, sala 2.
Moderator: Dr. Nicolae Varachiu, specialist inovare ICECHIM

Scopul și conținutul propus participanților:

TRL (Technology Readiness Levels) nu reprezintă doar o scară de evaluare a maturității tehnologice, ci și un instrument practic pentru cercetarea aplicativă și inovare. Scopul mesei rotunde a fost unul practic: folosire TRL mai corect, mai coerent și mai eficient, atât în proiectele pe care le pregătim, cât și în valorificarea rezultatelor cercetărilor.

Un motiv suplimentar, foarte concret: numeroase apeluri de proiecte cu finanțare europeană sau națională solicită precizarea nivelurilor TRL vizate la începutul și/sau la finalul proiectului. Înțelegerea corectă a acestor niveluri poate face diferența între o încadrare justificată și una ambiguă sau greu de susținut.

Daca la utilizarea inițială a TRL pentru misiunile spațiale lucrurile sunt mai clare, condițiile fiind practic standardizate, in aplicațiile „civile" ale TRL lucrurile nu mai stau așa, condițiile de aplicare depinzând de domeniile concrete. Ne-am propus să prezentam situații concrete ale încadrărilor in nivele TRL, dificultăți, ambiguități si să împărtășim cele mai bune practici, lecțiile învățate și chiar să dezbatem ce a mers bine si de ce si ce a nu a mers la fel de bine in acest proces.

Participanții au fost încurajați să furnizeze și un suport cu diapozitive (slide-uri) pentru a-și susține exemplele și opiniile.

Participarea efectivă, desfășurarea mesei rotunde:

Au fost în total **13 de participanți**, de la 5 entități, firme si mediu academic: ROADIX GROUP, firma multinațională India, China, România; Institutul de Științe Spațiale - parte a INFRPL, România; Kema Tronic S.R.L. Baia Mare, România; UNST Politehnica București, Romania; INCDCP-ICECHIM București, Romania. Lista nominala a participanților, cu acordul CDPR, afilierea, titlu st, semnătura, in Anexa.

Moderatorul a prezentat un „starter", au urmat doua prezentări (KemaTronic si Institutul de Științe Spațiale), in continuare având loc discuții foarte interesante, in care cercetătorii si firmele au împărtășit din experiența lor in aplicarea TRL, uneori dificilă, confuză a acestei scări.

Câteva concluzii importante, apreciate ca utile:

Definițiile TRL ale Comisiei Europene sunt utilizabile, dar:

- sunt prea generale pentru a fi universal aplicabile, *și*
- inevitabil devin interpretabile în funcție de domeniu

Un principiu de baza in aplicarea TRL: "TRL nu măsoară calitatea științifică, noutatea sau succesul comercial; este un cadru de evaluare a maturității unei tehnologii definite, într-un context definit." (nasa.gov : about Technology Readiness Levels)

Formularea recomandată este: Rezultatul tehnologic X, destinat aplicației Y, a atins nivelul TRL Z în condițiile de utilizare/mediul de testare W:

Nu se recomandă formularea ne contextualizată: „Tehnologia X este TRL Z."
S-au discutat posibile confuzii, ambiguități, criterii operaționale recomandate pentru TRL (extrase din recomandări NASA, call-uri ale Comisiei Europene și bune practici de cercetare-dezvoltare noi tehnologii), provocări, capcane, exemple capcane care se repeta in toate domeniile, combinarea necesara a TRL cu alte scale: MRL (Manufacturing Readiness Level) si BRL (Business / Commercial Readiness Level), bune practici generale*, valabile in toate domeniile (*în concordanță cu recomandările NASA și cu practica de evaluare din cadrul Departamentului Energiei al SUA); exemple de aplicare TRL in CHIMIE si SPATIU.
Materialele prezentate sunt încărcate pe site-ul PRIOCHEM al ICECHIM.

Round table: **Technology Readiness Levels (TRLs): Are They Enough to Guide Innovation to Successful Implementation? (**moderator: Dr. Nicolae Varachiu - ICECHIM)

-Abstract-

Keywords: Technology Readiness Levels; technological maturity; innovation management; technology transfer; industrial implementation; readiness assessment.

TRLs are widely used to assess technological maturity and support decision-making throughout research, development, and innovation processes. Originally developed for aerospace applications, the nine-level TRL scale has been adopted across numerous fields, including industrial research, energy, information technology, agriculture, and chemistry. However, its broader application raises important questions regarding the interpretation, consistency, and practical relevance of individual readiness levels, particularly when moving from experimental validation to industrial implementation and from one domain / field to another.

This roundtable aims to critically examine the capabilities and limitations of TRLs as instruments for guiding innovation towards successful implementation. Attention will be given to the potential ambiguities arising when aerospace-oriented definitions are transferred to civilian and industrial contexts, where technological performance represents only one of several conditions for success, to explore good practices for applying TRLs across different technological domains, identifying common interpretation pitfalls and opportunities for integrating TRL assessment with complementary approaches.