

# Kalibratie IBRAHYM & AZURE+UGM

Koen van der Hauw (Sweco)

Wouter Swierstra (RHDHV)

Jurriaan Cok (WL)

Tristan Bergsma (RWS)

NHI-dag 18 januari 2024

# Inhoud

- **Kalibratie proces**

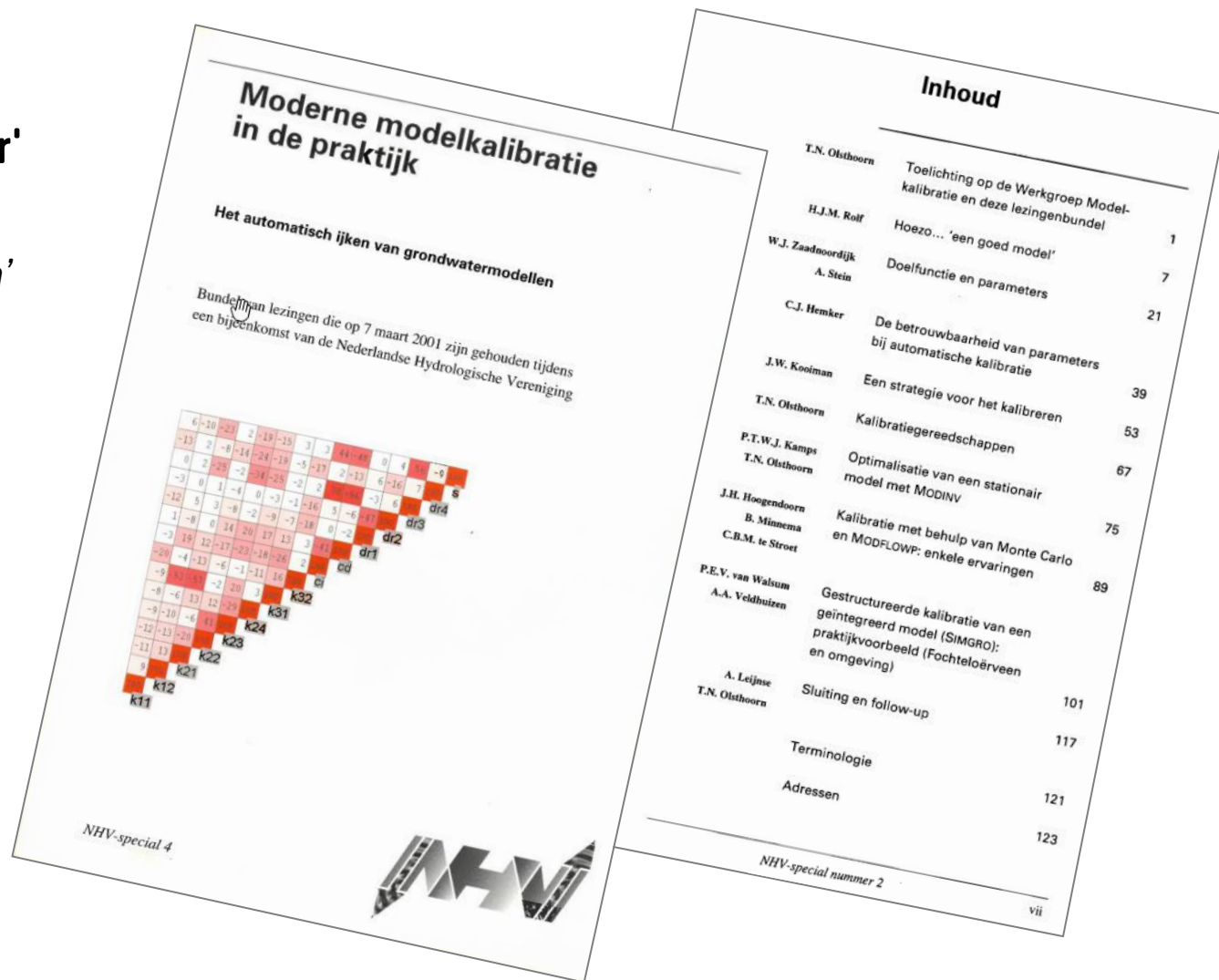


‘Trial and error’

‘gissen en missen’

- Systeemanalyse
- Kalibratiestrategie
- Modelbeschrijving
- Kalibratieperiode
- Kalibratieset
- Residu analyse
- Systematische afwijkingen
- Gevoeligheidsanalyse
- Automatische kalibratie
- Toetsing plausibiliteit
- Postprocessing
- Kalibratieresultaten

- **Conclusies en aanbevelingen**



- [Modelkalibratie – Het automatisch ijken van grondwatermodellen](#) (NHV-special nr. 2, 1996)
- [Moderne modelkalibratie in de praktijk](#) (NHV-special nr. 4, 2001)

# Kalibratiestrategie

## Kalibratieplan is belangrijk om

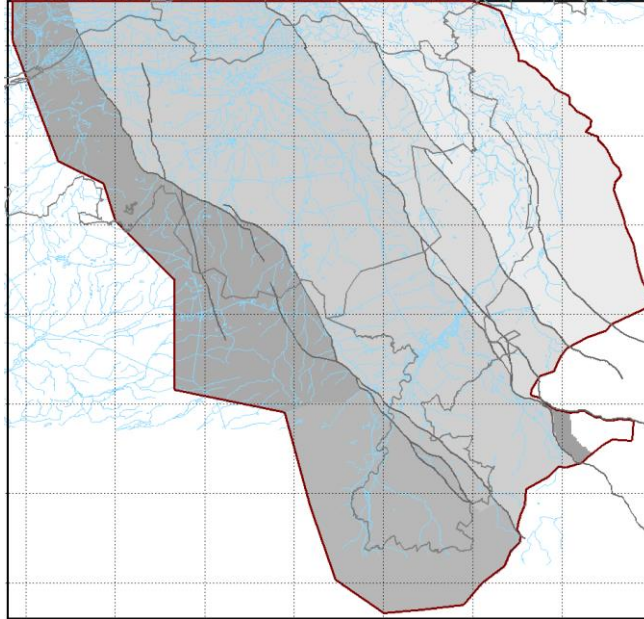
- Doel vast te leggen
- Vooraf na te denken over aanpak
- Vooraf na te denken over haalbare resultaten
- Vooraf na te denken over middelen

- Doel
- Doelfunctie
- Kalibratieset / gewichten
- Uitgangsmodel
- Modelresolutie
- Kalibratieperiode
- Kalibratiezones of pilot points
- Kalibratieparameters/-groepen
- Kalibratieparameters en -factoren
- Plausibele bandbreedten
- Gevoeligheidsanalyse
- Modelbetrouwbaarheid
- Restfouten-analyse en systematische fouten
- Kalibratiefasen
- Tijdsafhankelijke kalibratie
- iPEST / iPESTP
- Validatie (o.a. afvoer)
- ...

# Modelbeschrijving

## IBRAHYM kenmerken

- Modelbouw via SIF-workflow
- 26 modellagen (50 MF6-lagen)
- 7 zones o.b.v. hoofdbreuken
- Heuvelland
- Kalksteen in Zuid-Limburg
- Breuken
- Invloed Roerdalslenk
- Duitsland en België



Modelgebied IBRAHYM v3 en zonerings o.b.v. hoofdbreuken

## Modelconcepten

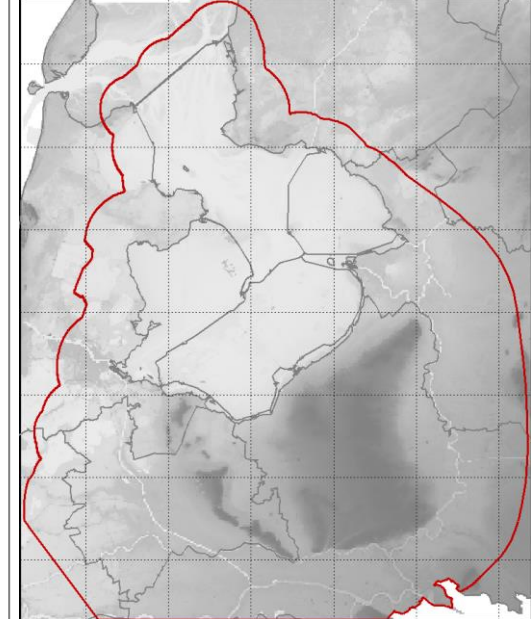
- MODFLOW 6
- iMOD v5.6.1 en MetaSWAP
- UNCONFINED rekenen
- Dikke onverzadigde zones
- 3D-breuken
- Kalksteen

## Benodigde resources

- Stationair (200 x 200)  
**10min – 4 uur**
- Tijdsafhankelijk 2006-2017 (30-daagse tijdstappen)  
**+/- 5 dagen +/- 150 Gb**

## AZURE+UGM kenmerken

- Modelbouw via SIF-workflow
- 33 modellagen (56 MF6-lagen)
- 1 zone
- Veluwe, Heuvelrug
  - Dikke onverzadigde zone
  - Anisotropie
- Kleischeuren in Flevoland
- IJsselmeer



Modelgebied AZURE+UGM v2 en maaiveldgradiënt

## Modelconcepten

- MODFLOW 6
- iMOD v5.6.1 en MetaSWAP
- UNCONFINED rekenen
- Dikke onverzadigde zones
- ANI-package en XT3D

## Benodigde resources

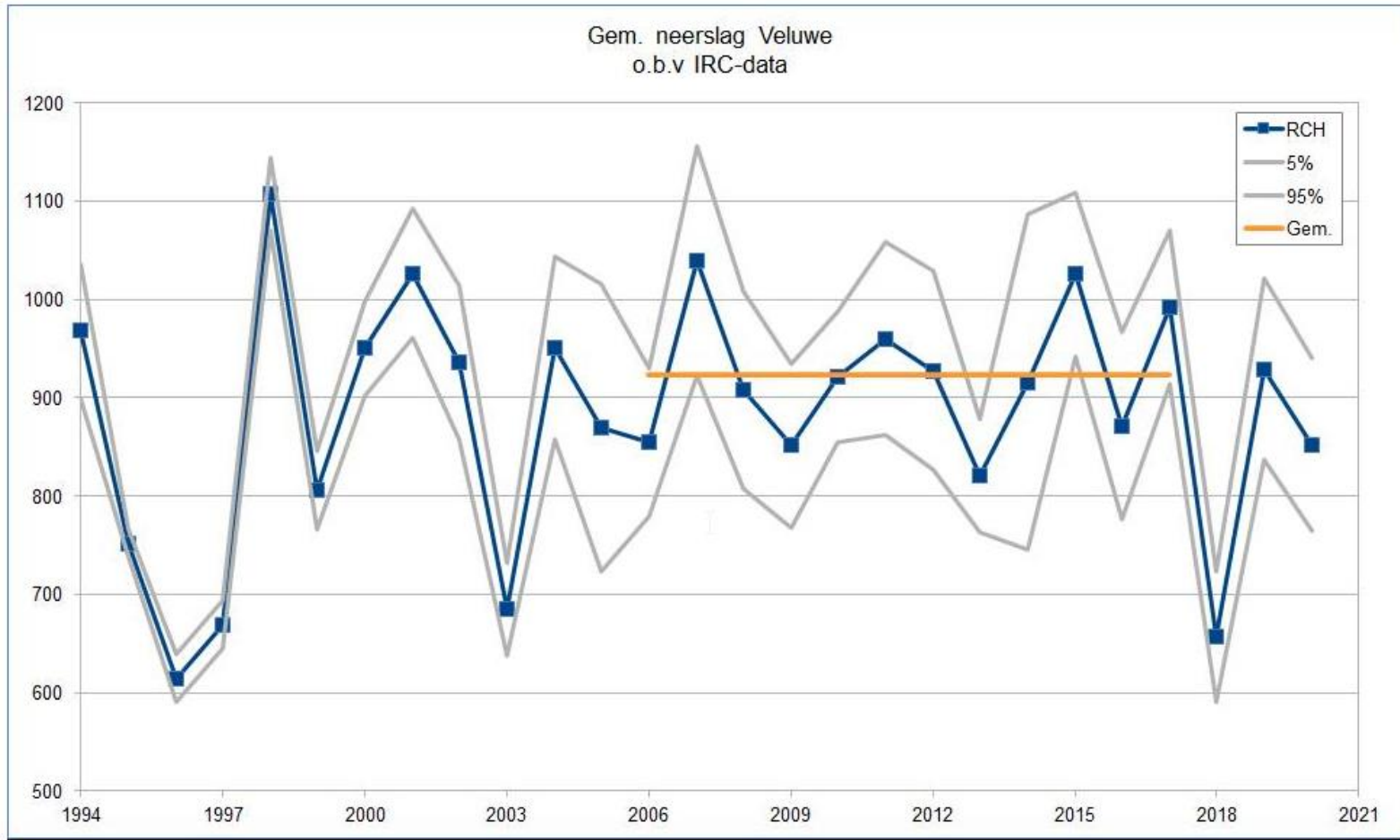
- Stationair model (200x200) na veel analyse: **1-4 uur**
- Tijdsafhankelijk 2006-2017 (30-daagse tijdstappen) +/- **17 dagen**

⇒ **Optimalisatie rekestijd!**

# Kalibratieperiode

## Stationaire kalibratieperiode 2006-2017 voor zowel IBRAHYM als AZURE+UGM

- 2006-2017 ligt dicht bij langjarig gemiddelde
- Bevat geen/weinig extreme jaren



5

Verdeling (NHI radar)neerslag over kalibratieperiode binnen, gemiddeld over en spreiding binnen de Veluwe

# Kalibratieset - combineren reeksen

## IBRAHYM3: Samenvoegen meetreeksen peilbuisfilters in volgende prioriteit

- Prov. Limburg, WML, WL, Brabant, DINOloket, LHM, Duitsland, België

Match tussen twee filters met verschil in ID, XY  
blauw: filter 1; groen: overlap; oranje: filter 2

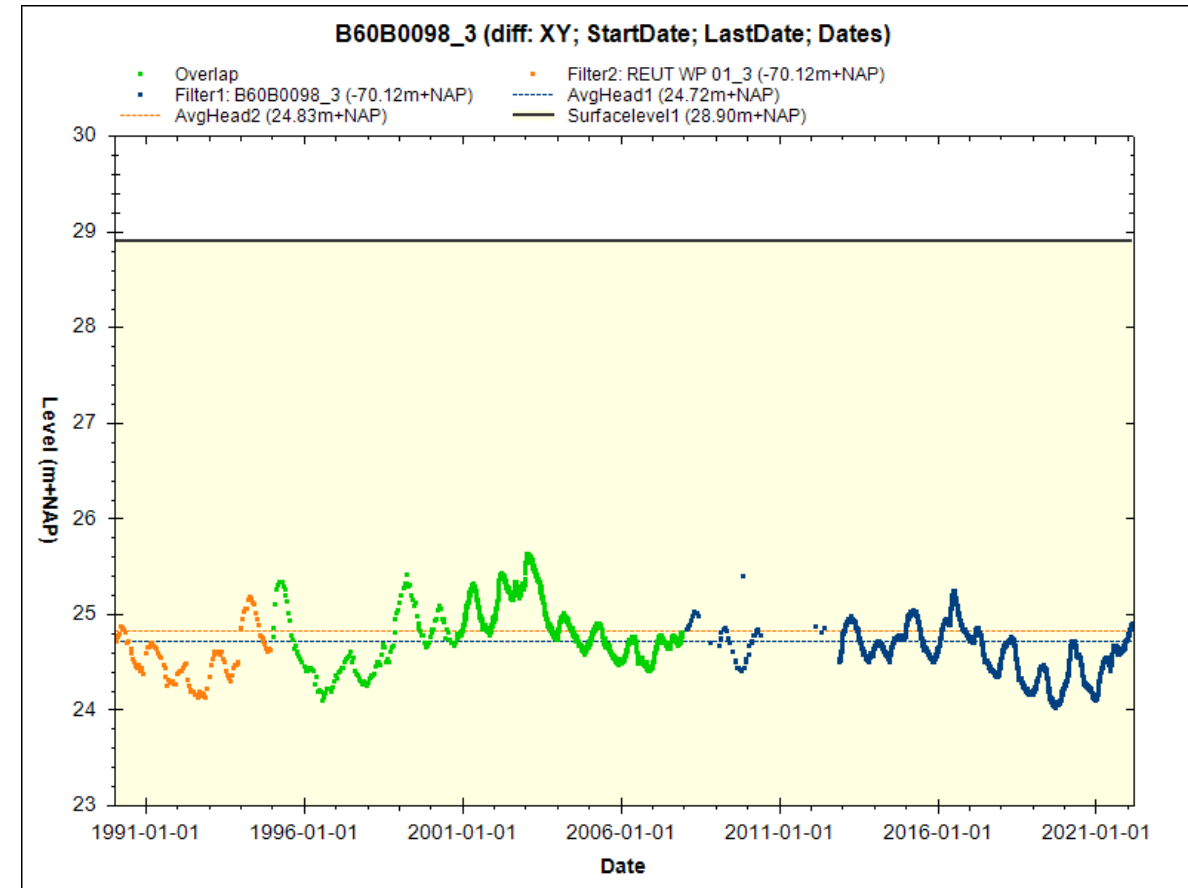
### • Samenvoegen lastig door verschillen in

- ID
- XY-coördinaten
- Filterstelling

### • Samenvoegen is belangrijk voor

- Voorkomen dubbele filters
- Voorkomen te korte reeksen
- Inconsistenties opsporen

⇒ Automatisch matchen en mergen met IPFanalysis-tool  
match op 1) ID; 2) filterstelling + afstand

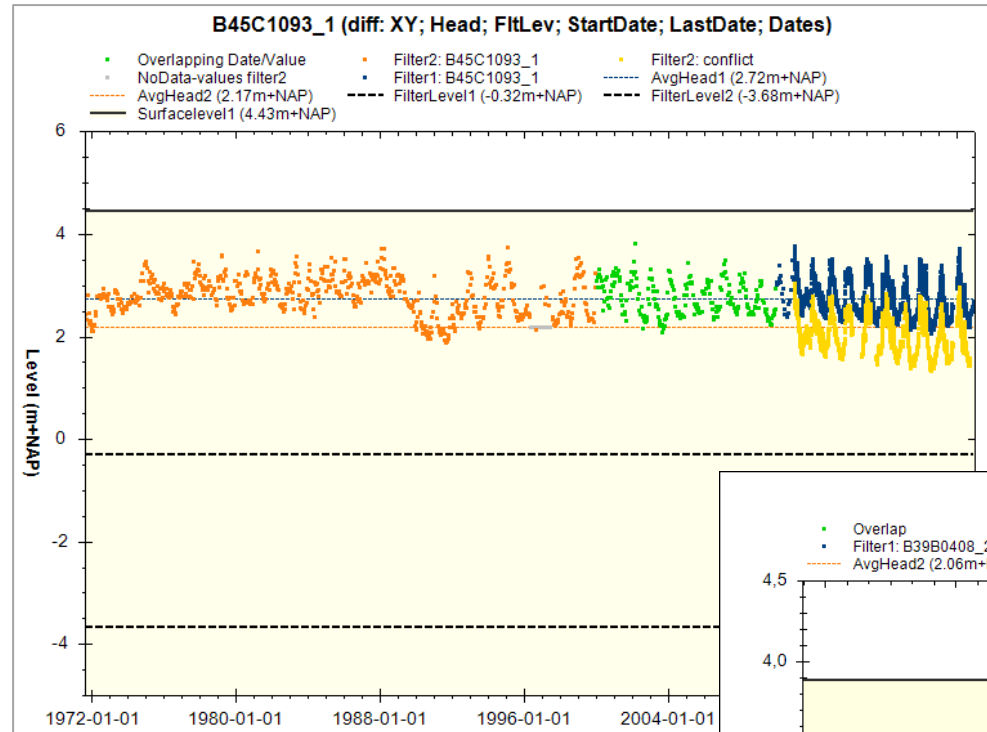


| ID1      | ID2            | DiffComment                          | Distance | FltLev  | FltLev2 | AvgH1  | AvgH2  | DiffH | FirstDate1 | LastDate1  | Dates1 | UniqueDates1 | FirstDate2   | LastDate2  | Dates2 | UniqueDates2 |
|----------|----------------|--------------------------------------|----------|---------|---------|--------|--------|-------|------------|------------|--------|--------------|--------------|------------|--------|--------------|
| B60B0098 | 3 REUT WP 01_3 | Diff: XY; StartDate; LastDate; Dates | 11,402   | -70,120 | -70,120 | 24,717 | 24,829 | 0,112 | 13-01-1995 | 09-03-2022 | 6149   |              | 0 15-01-1990 | 18-12-2007 | 2848   | 114          |

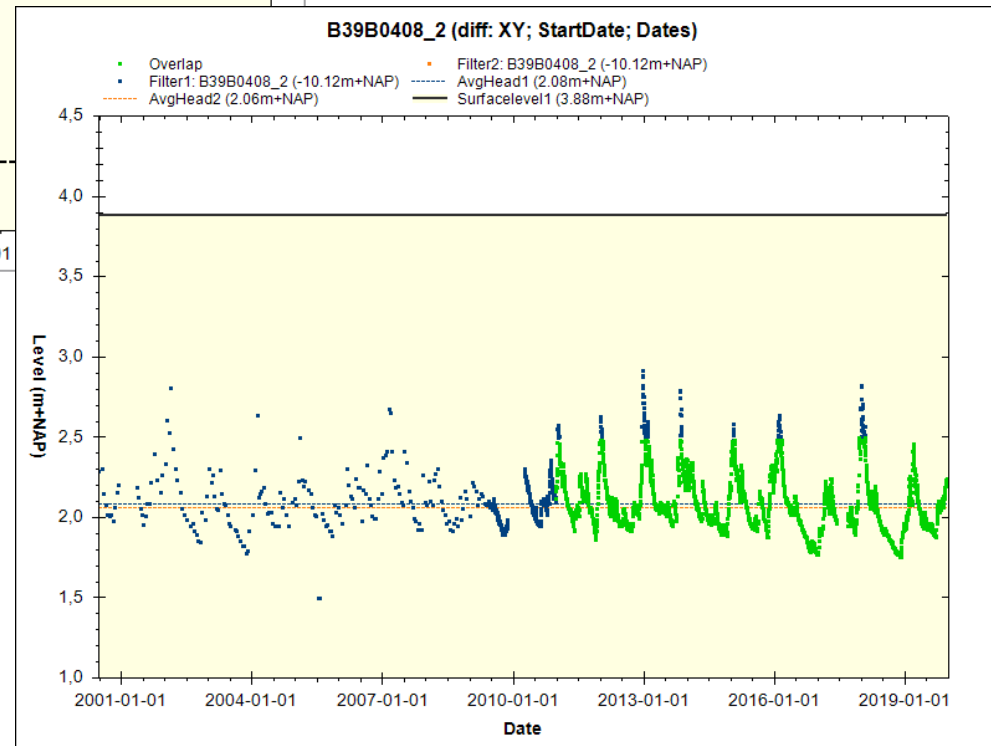
# Kalibratieset - combineren reeksen

## Diverse inconsistenties

- Zelfde ID, maar verschil in filterstelling
- Afwijking XY > 100m
- Inconsistente metingen
- Gat (onterecht) opgevuld
- Afgetopte reeksen



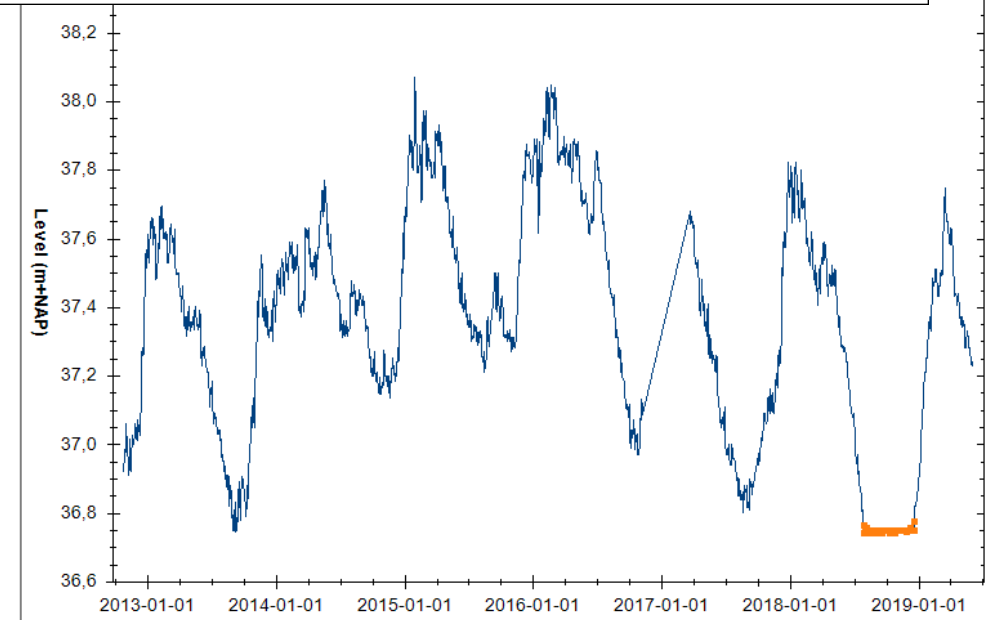
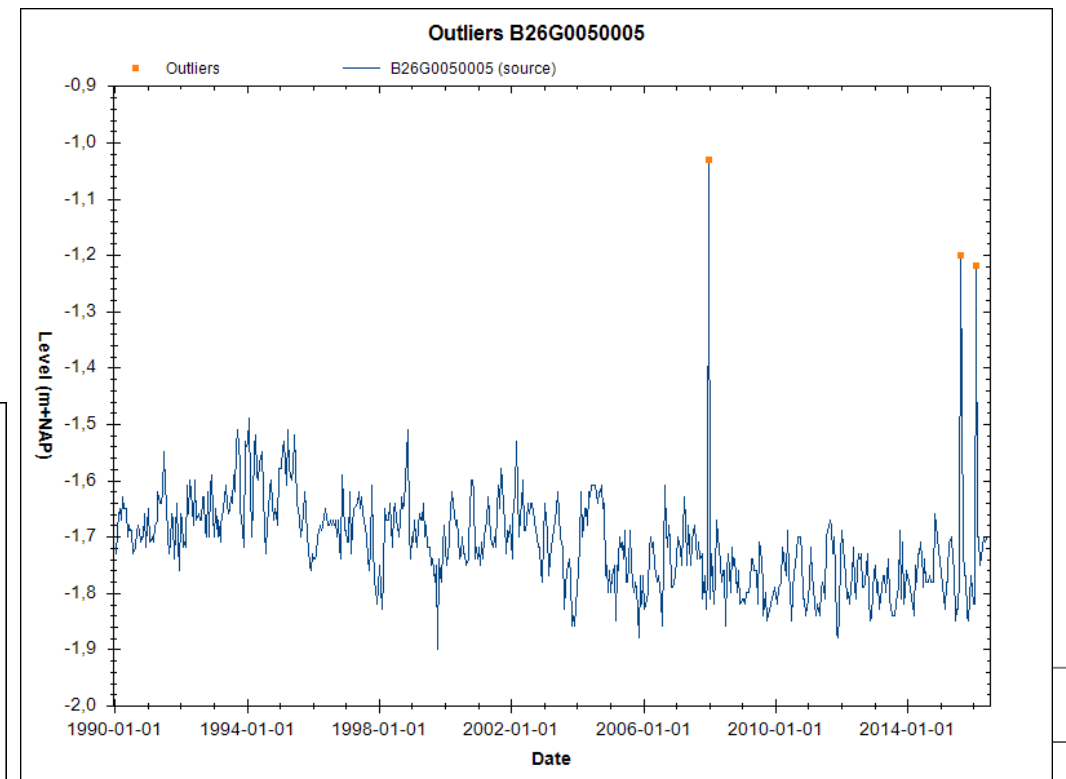
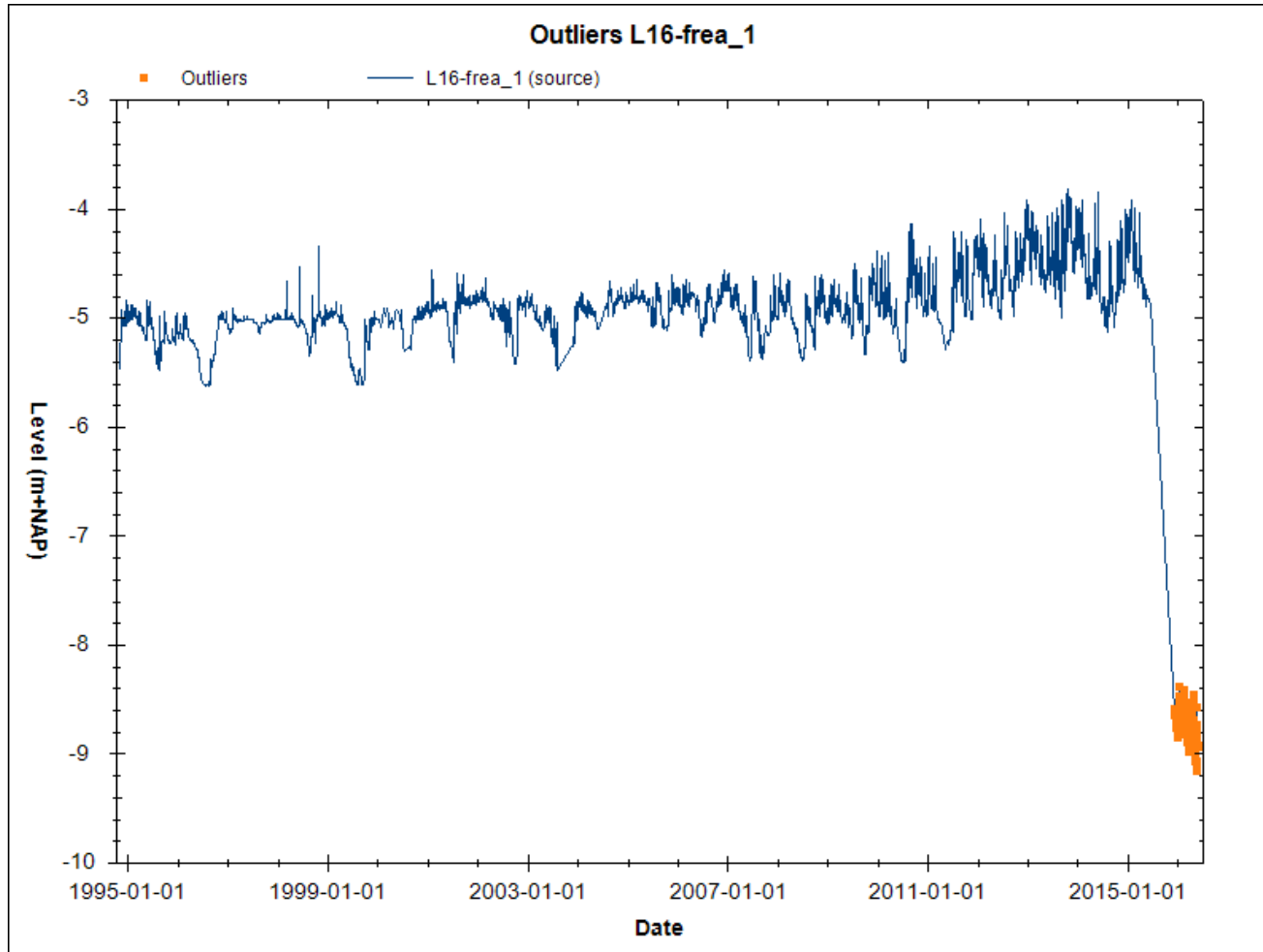
Voorbeeld samengevoegde filters  
blauw: filter 1; groen: overlap;  
oranje: filter 2; geel: conflict



# Kalibratieset - controles

## Controle op issues

- Grote aantallen filters
- ⇒ Automatisch op outliers/flatliners met IPFTSvalidate-tool





# Kalibratieset - gewichten clusters

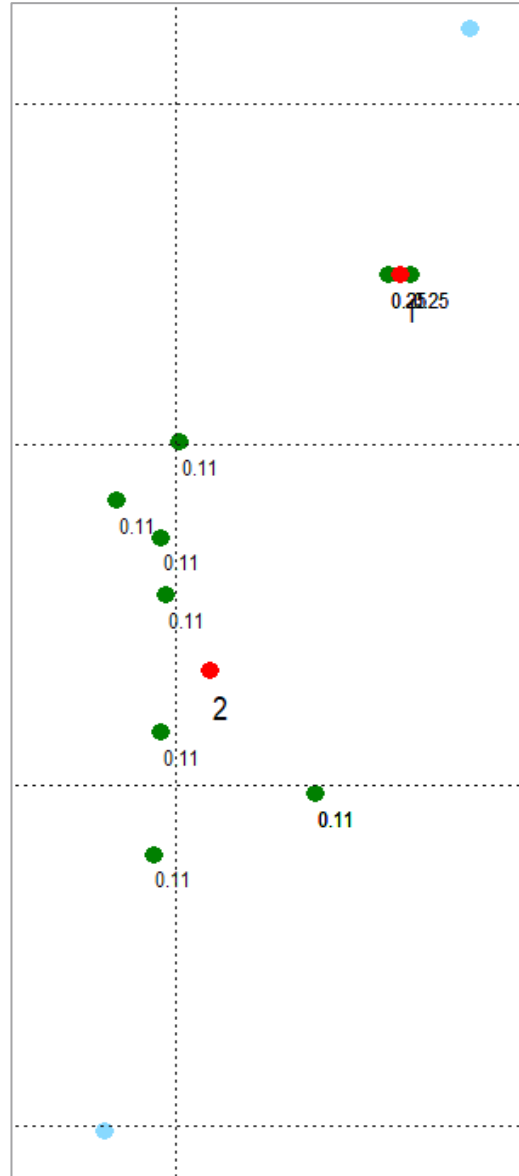
## Definitie cluster

- Maximale afstand tot centroïde: 250m
- Filters in zelfde aquifer (weerstand > 100d)
- Filters in dezelfde zone

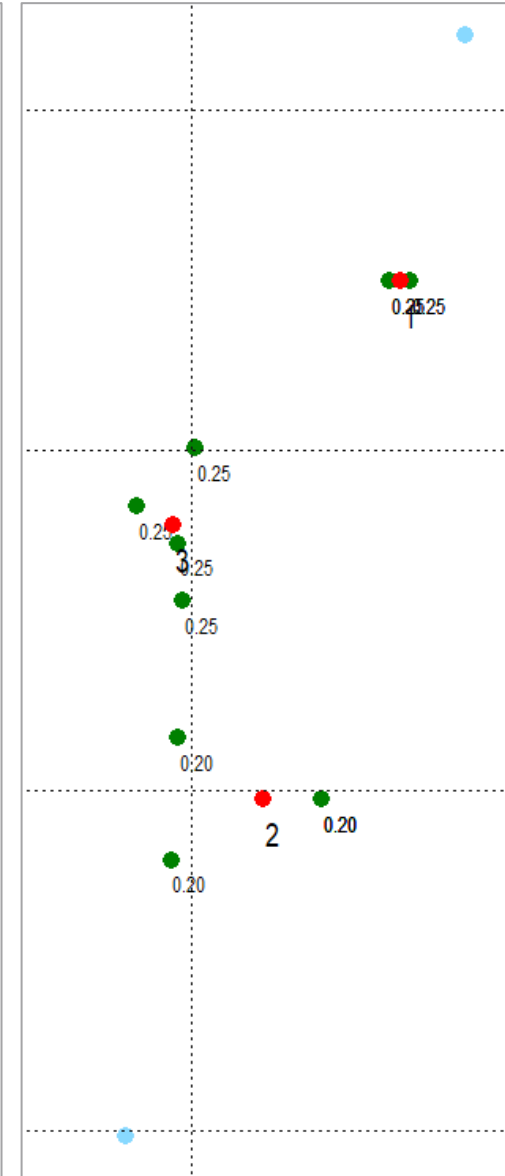
## Gewichten voor clusters

- Gewicht gedeeld door aantal clusterpunten

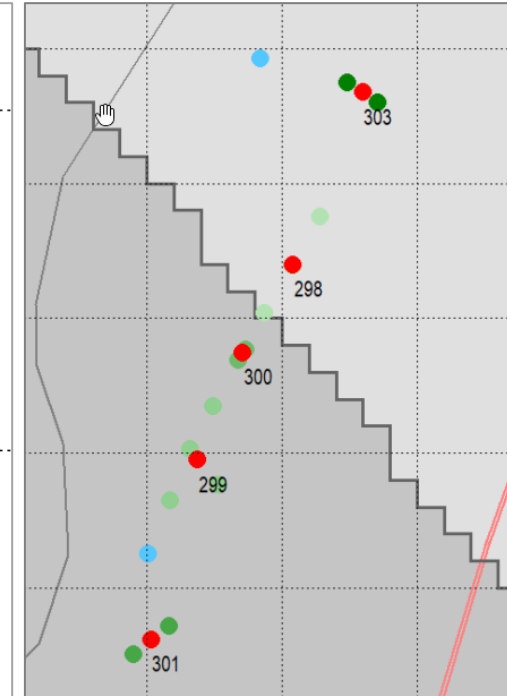
⇒ Automatische bepaling met IPFanalysis-tool



Maximale onderlinge afstand: 250m



Maximale afstand tot centroïde: 250m



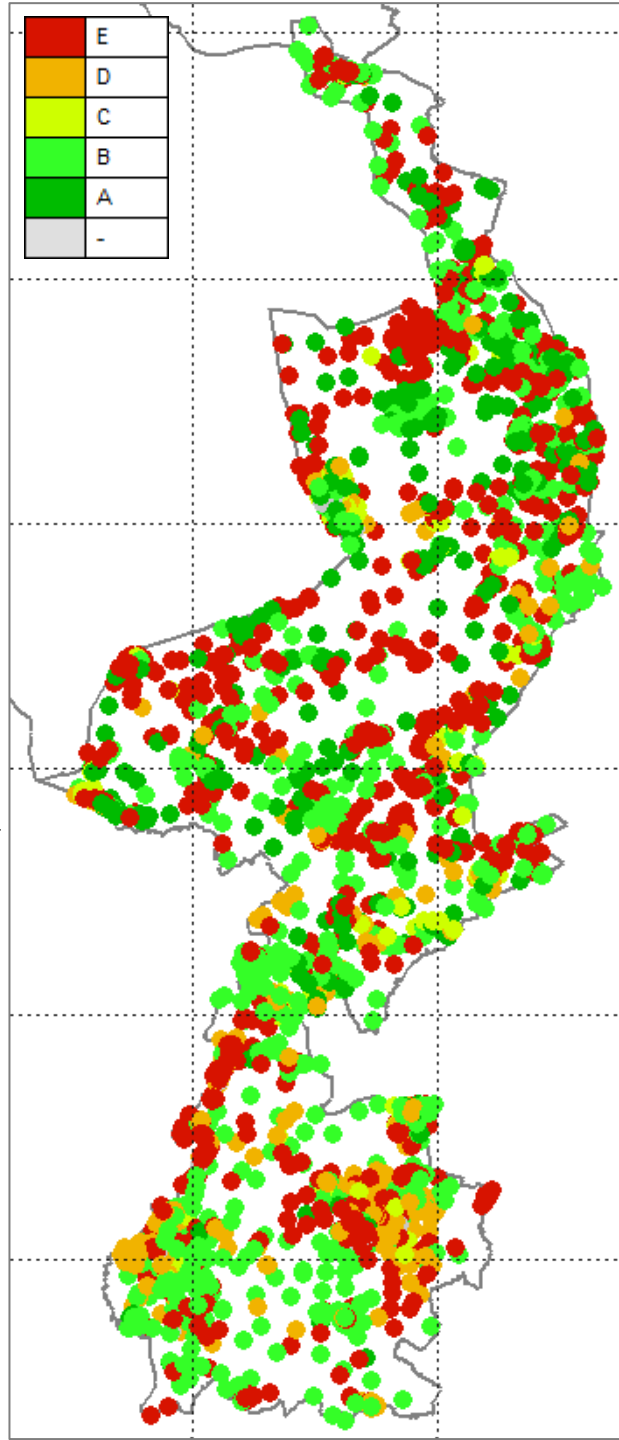
Verschillende clusters door zones

### Cluster max. afstand

Wanneer de maximale afstand tot nabijgelegen filters wordt gehanteerd (i.p.v. tot de centroïde), kunnen ongewenste clusters met lange ketens resulteren...

# Kalibratieset IBRAHYM v3

Kwaliteitsklassen  
Kalibratieset IBR3



## Peilbuisfilters

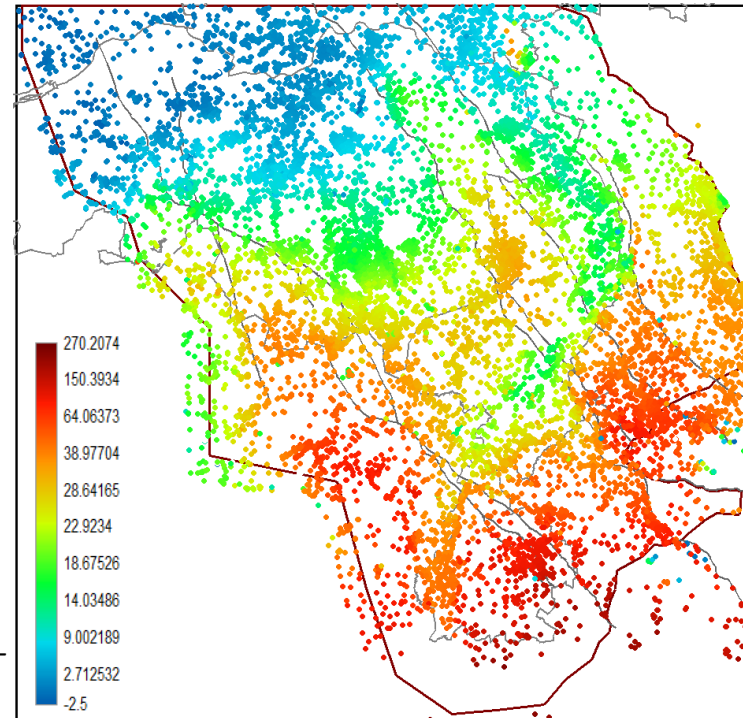
- Combinatie van diverse bronnen
- gewichten o.b.v. kwaliteit (lengte, tijdreeksanalyse, etc.) en clusters

## Kalibratieset

- 2444 stijghoogten binnen Limburg
- 836 diepe stijghoogten in Roerdalslenk in Nederland

## Validatieset

- 17387 stijghoogten buiten Limburg of korte reeks in Limburg
- Afvoeren
- Berekening
- Isohypsen Duitsland
- Breukflux



Peilbuisfilters kalibratie-  
en validatieset IBR3

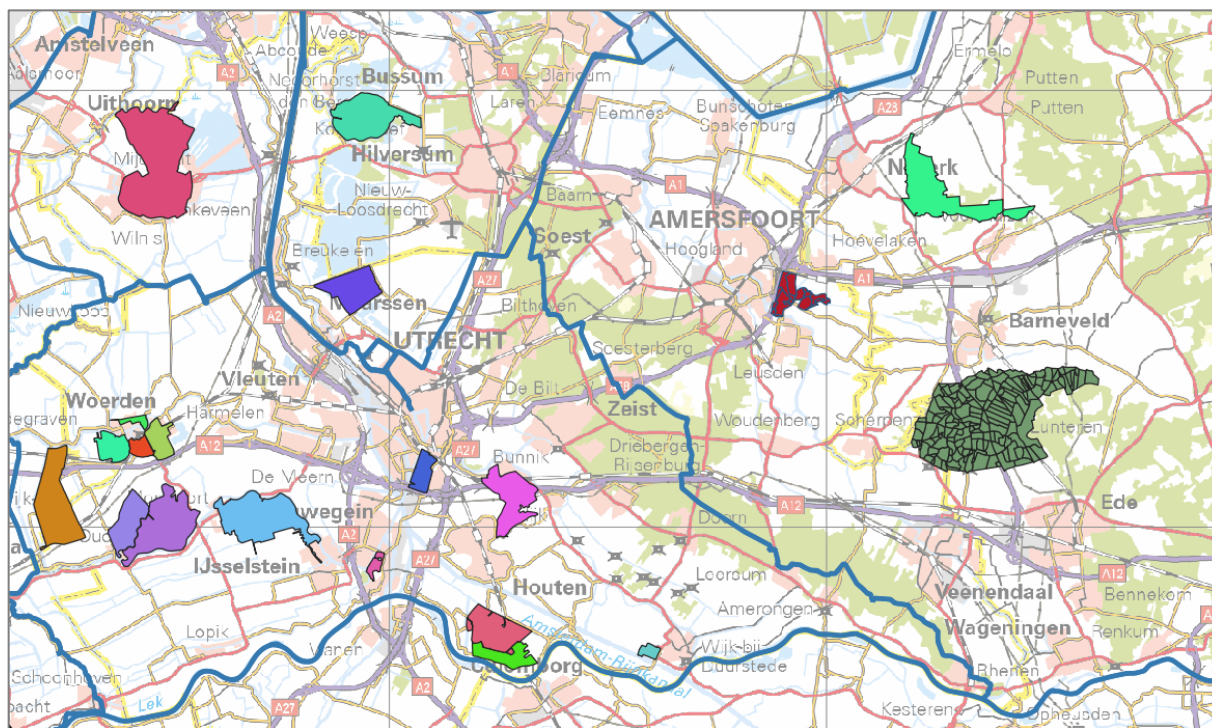
| Kwaliteitsklasse |      | Criteria     |           | Toepassing voor kalibratie-/validatieset |         |                          |
|------------------|------|--------------|-----------|--|---------|--------------------------|
| Nr               | Code | TRA-model ok | GxG-jaren | Stationair                               | Gewicht | Tijdsafhankelijk         |
| 1                | A    | ja           | ≥ 8       | Kalibratieset: GxG meetreeks             | 1,00    | Kalibratieset: meetreeks |
| 2                | B    | nee          | ≥ 8       | Kalibratieset: GxG meetreeks             | 0,75    | Kalibratieset: meetreeks |
| 3                | C    | ja           | ≥ 3       | Kalibratieset: GxG simulatie             | 0,50    | Kalibratieset: meetreeks |
| 4                | D    | nee          | ≥ 3       | Kalibratieset: Gem. meetreeks            | 0,25    | Kalibratieset: meetreeks |
| 5                | E    | nee          | ≥ 0       | Validatieset: Gem. meetreeks             | 0,00    | Kalibratieset: meetreeks |

Gewichtsbepaling IBR3

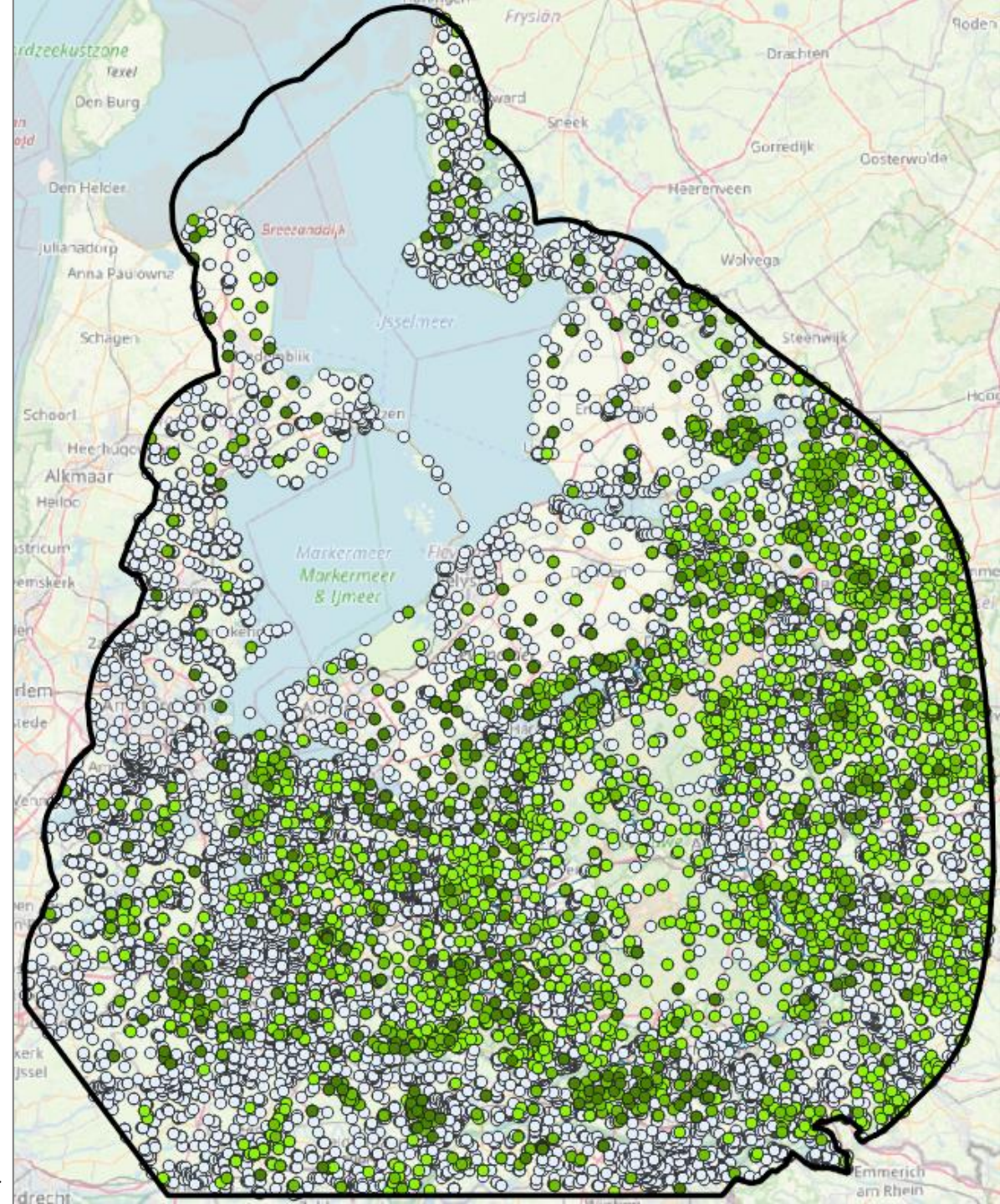
# Kalibratieset AZURE+UGM v2

## Peilbuisfilters

- Combinatie van diverse bronnen: LHM, TAUW Veluwe, Vitens, RWS
  - Er bleken echter m.n. te weinig filters in Flevoland
- ⇒ Alsnog opname van DINOloket-filters



11 Gebieden met afvoermetingen



Peilbuizen LHM (groen) en DINOloket

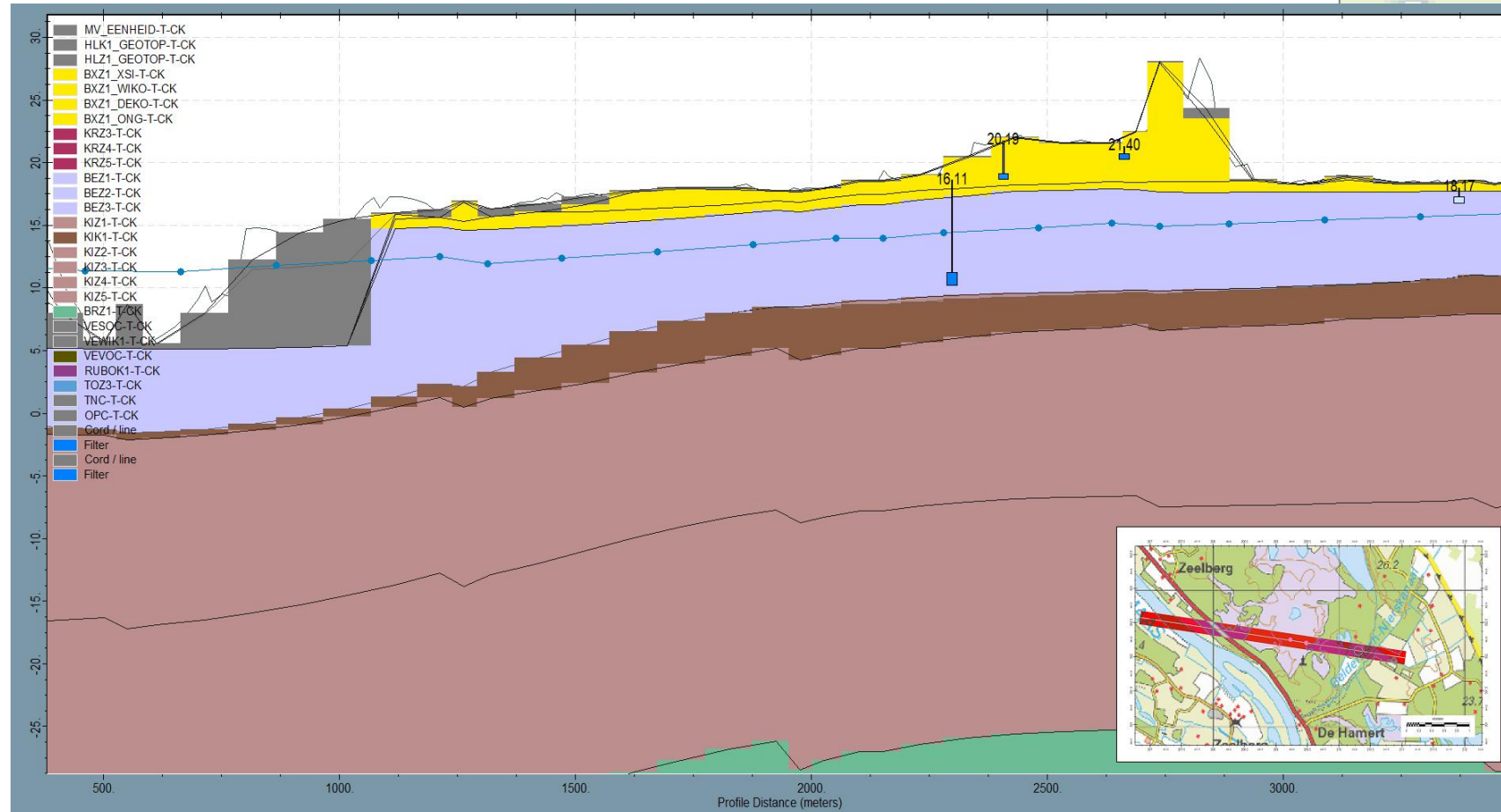
# Analyse extreme residuen

## Doelfunctie

- SSE: Sum of Squared Errors (som van **gekwadrateerde** afwijkingen (residuen))
- **Extreme residuen beïnvloeden daarmee sterk de uitkomst**  
Oorzaak bijvoorbeeld: meetfouten, schijngrondwaterspiegel, schematisatiefout



Voorbeelden schijngrondwaterspiegels



- Filters in schijngrondwaterspiegels:**
- Meting in L1 of L2
  - > 2m te droog berekend
  - Afwijkend t.o.v. omliggende residuen
  - In veengebied of nat natuurgebied

Dwarsprofiel west-oost door een tweetal peilbuisfilters met schijngrondwaterspiegels

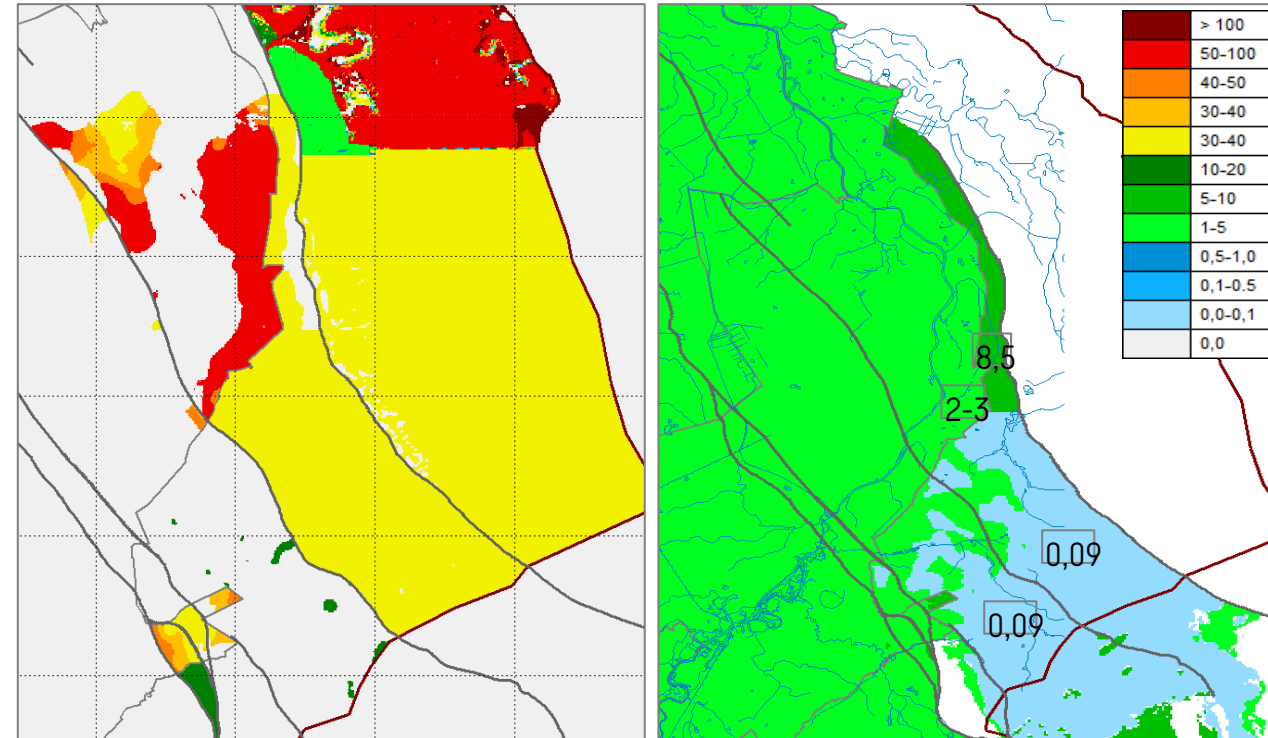
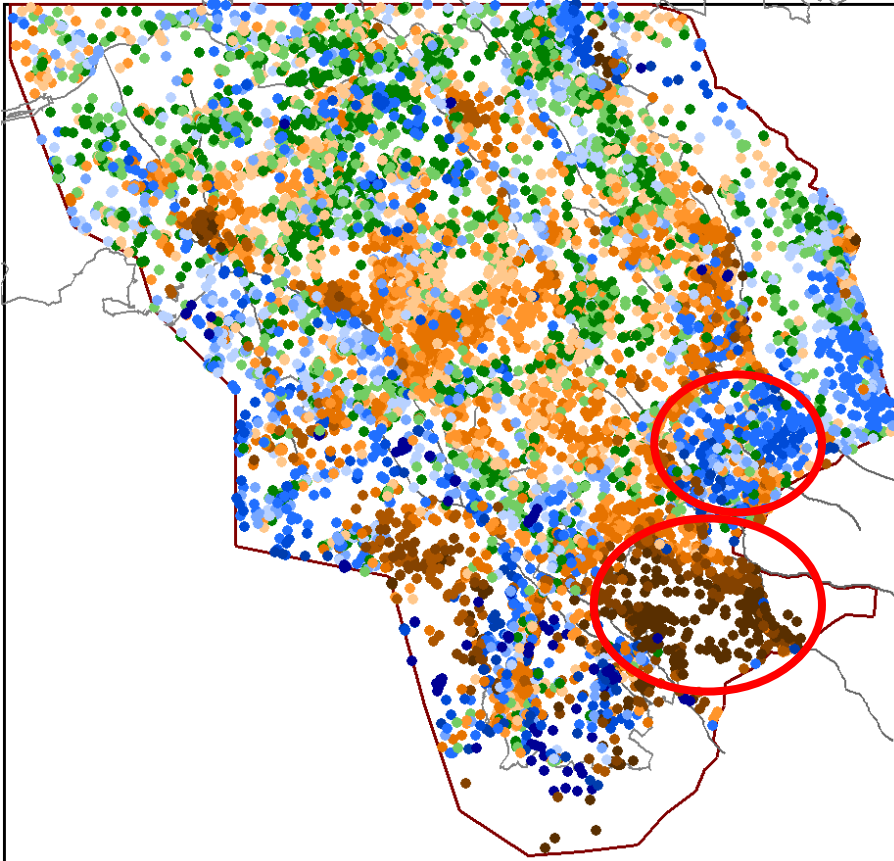
# Analyse systematische afwijkingen - IBRAHYM

## Doel na kalibratie

- gemiddelde afwijking 0
- alleen toevallige fouten (willekeurige afwijkingen)
- Beperkte gemiddelde absolute fout

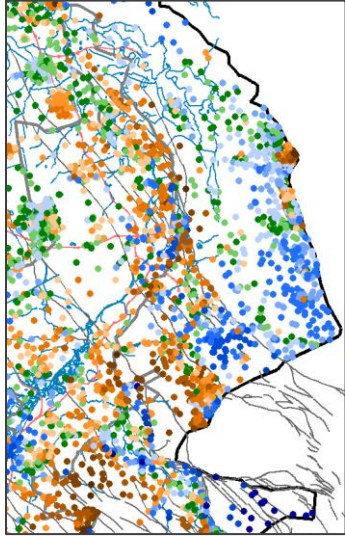
⇒ **Belangrijk om vooraf aan kalibratie grote clusters met systematische afwijkingen te voorkomen!**

Via kalibratie kan dit meestal niet worden opgelost.



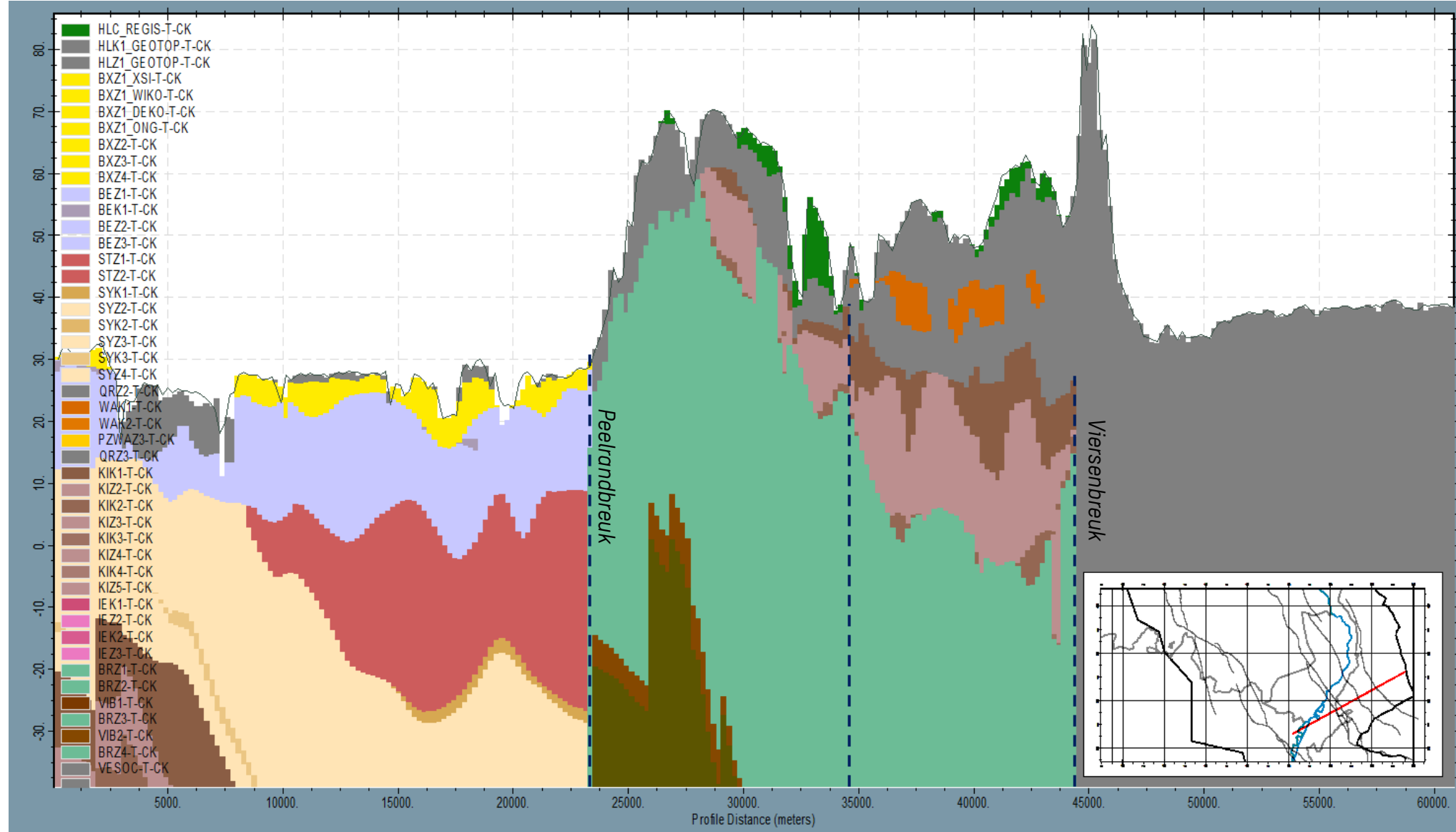
Systematische afwijkingen in kh-waarden geologisch model:  
PZWaz3 / QRz3 (links) en BRz1 (rechts)

# Analyse systematische afwijkingen - IBRAHYM

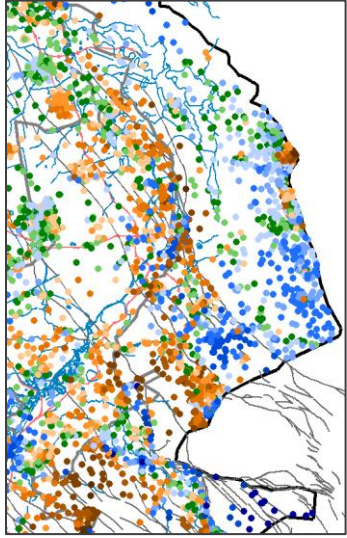


Linksboven:  
Modelresiduen (m):  
gemeten min  
berekende  
stijghoogten  
(HLC – Klz5)

Rechts:  
Dwarsprofiel ZW-NO  
REGIS+ lagen

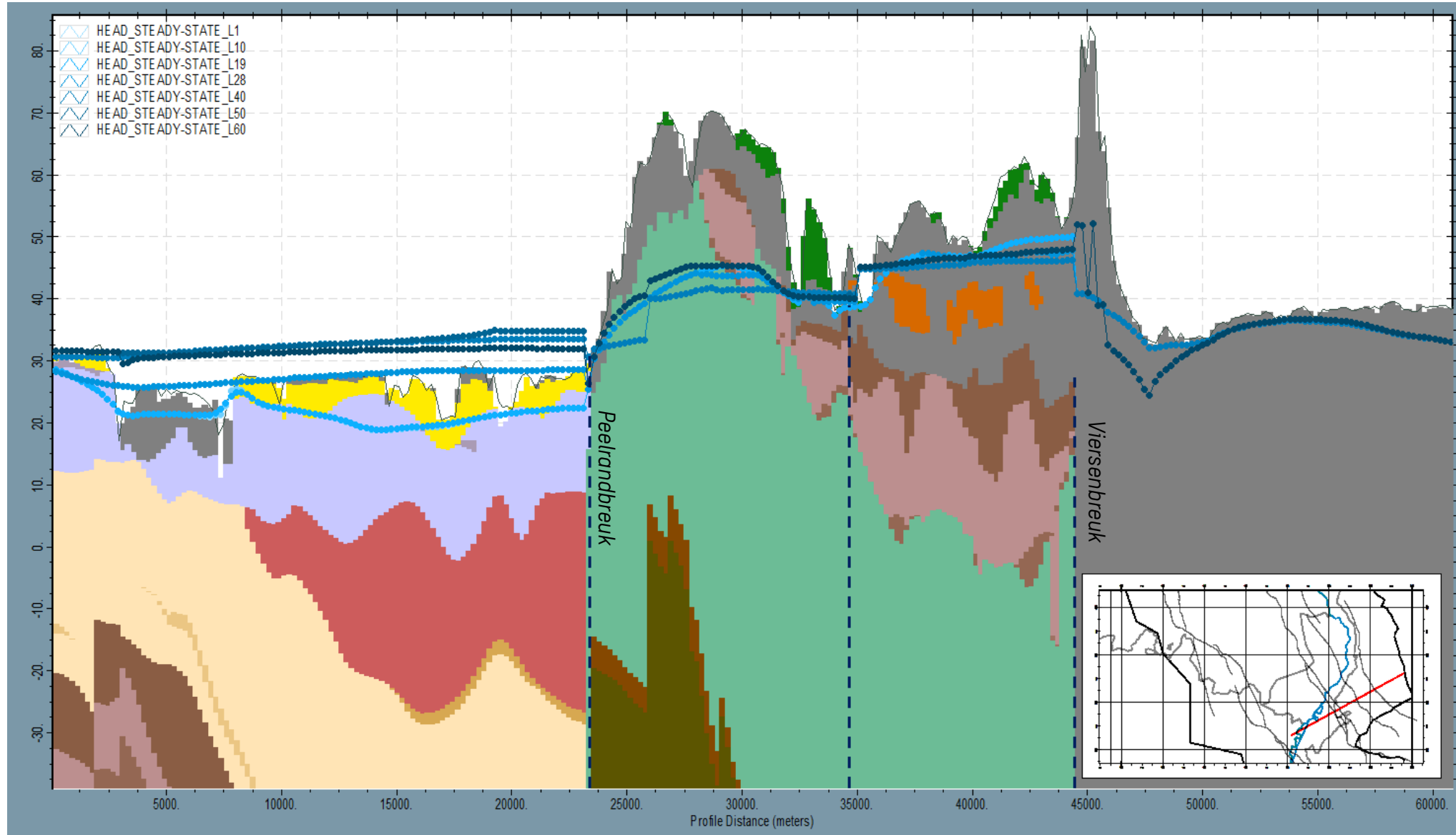


# Kalibratie – handmatige verbeteringen

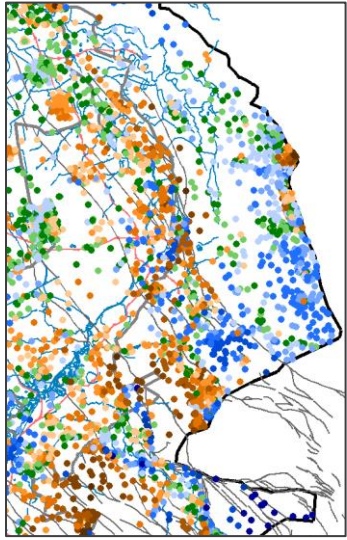


Linksboven:  
Modelresiduen (m):  
gemeten min  
berekende  
stijghoogten  
(HLC – Klz5)

Rechts:  
Dwarsprofiel ZW-NO  
REGIS+ lagen en  
stijghoogten L1 (l.bl.),  
L10, ..., L60 (d.blauw)

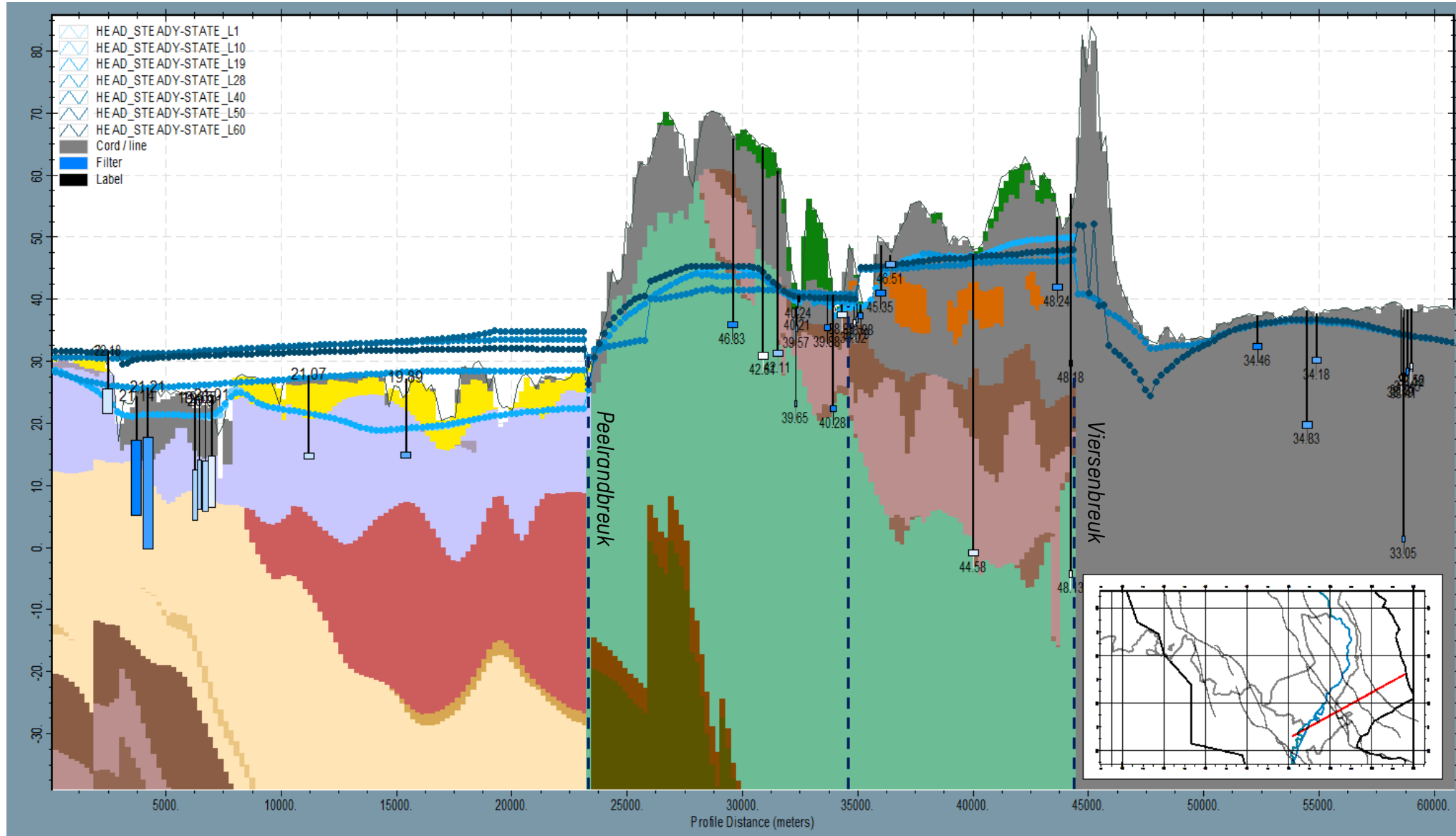


# Kalibratie – handmatige verbeteringen



Linksboven:  
Modelresiduen (m):  
gemeten min  
berekende  
stijghoogten  
(HLC – Klz5)

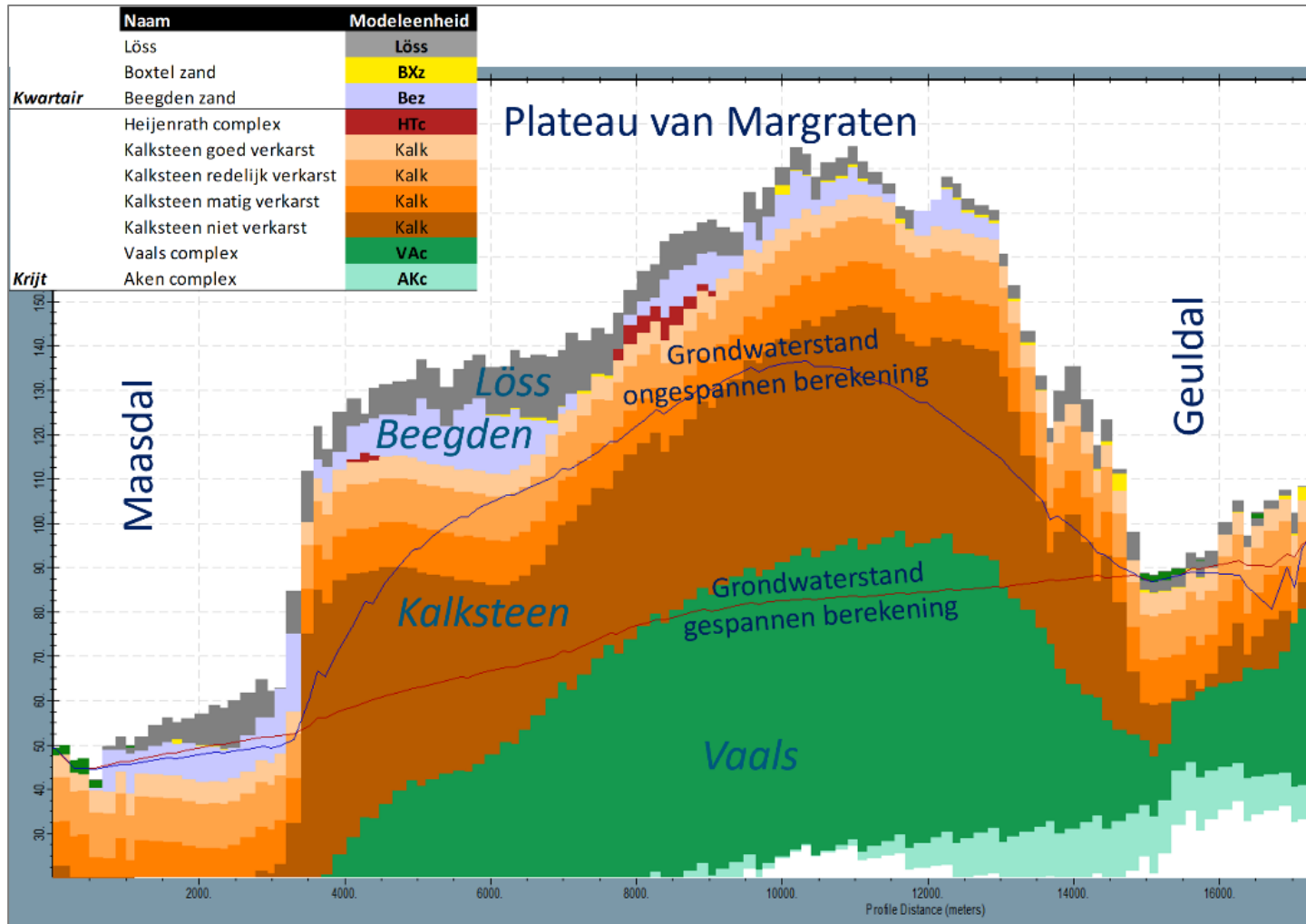
Rechts:  
Dwarsprofiel ZW-N0  
REGIS+ lagen en  
stijghoogten L1 (l.bl.),  
L10, ..., L60 (d.blauw)





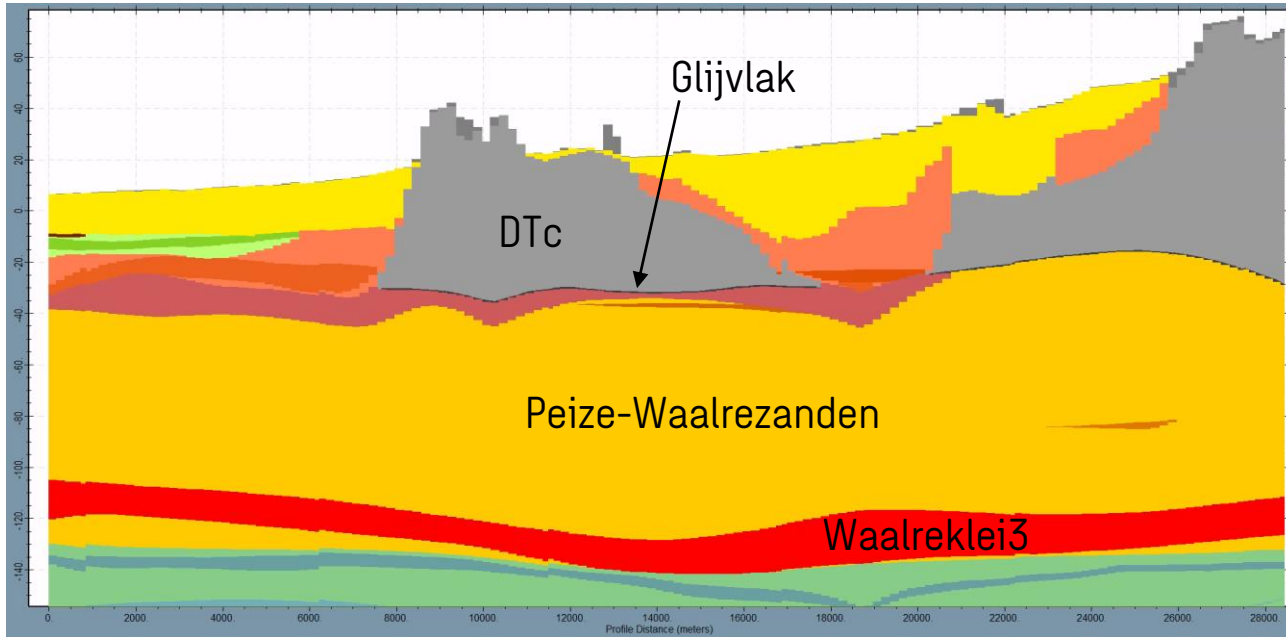
# Analyse systematische afwijkingen - IBRAHYM

- Confined versus (MF6) unconfined: grondwaterstand Plateau van Margraten is confined niet goed te berekenen
- Kalibratie o.b.v. confined model kan daardoor problemen geven



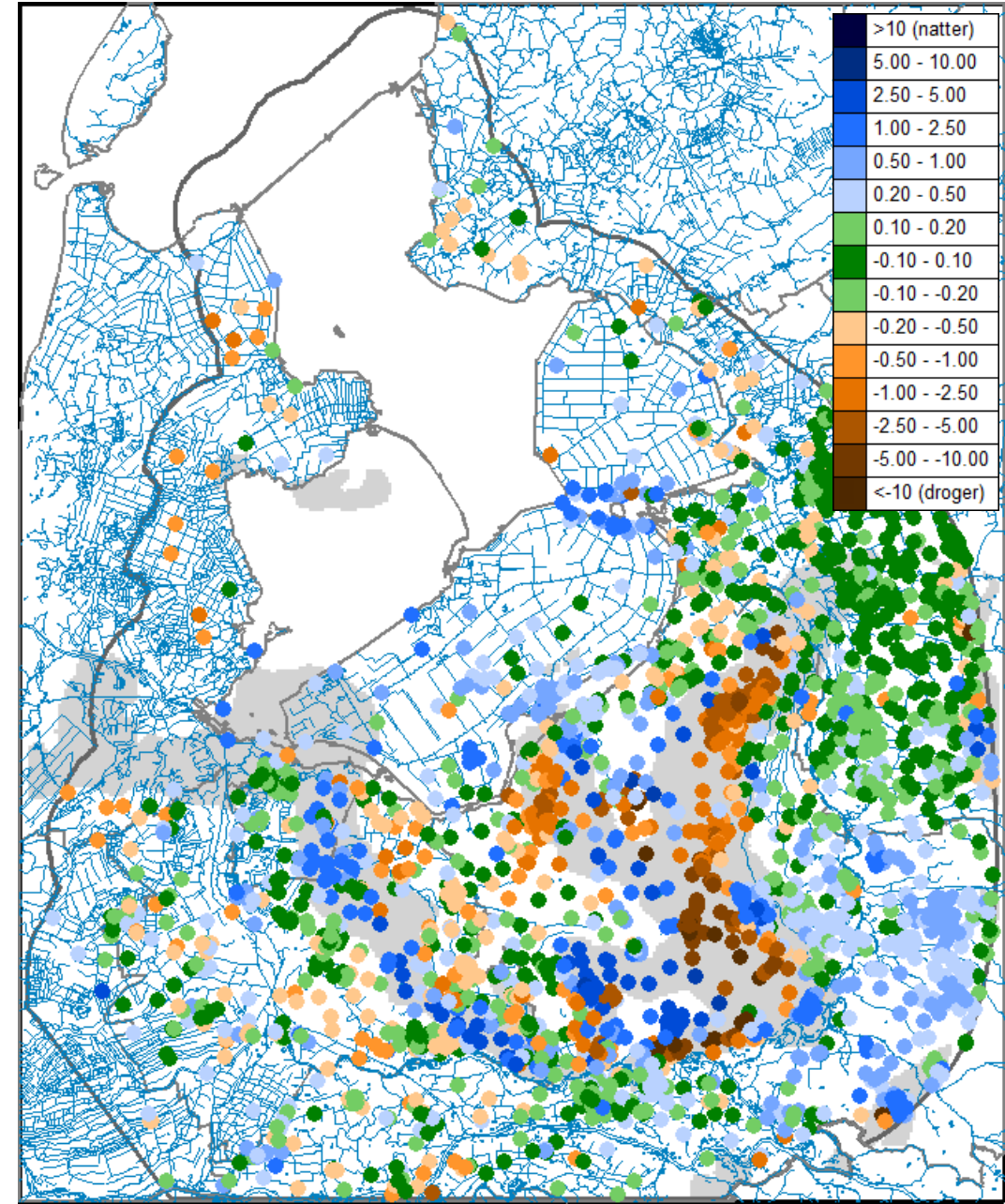
# Analyse systematische afwijkingen - AZURE+UGM

- Residuen uitgangsmodel
- Systematische afwijkingen o.a. Veluwe en Utrechtse Heuvelrug
- Onder beide stuwwallen zit glijvlak met weerstand 5000 d



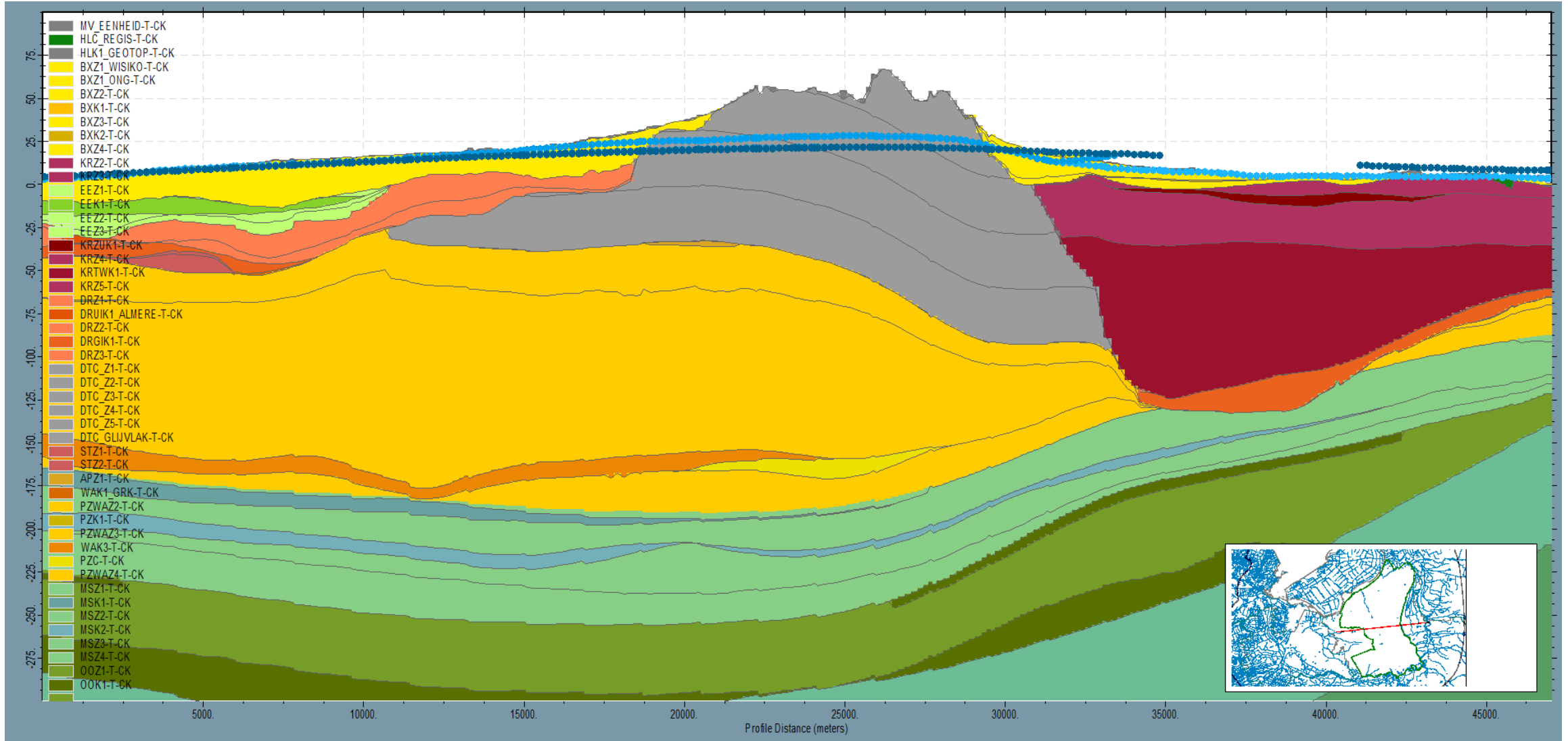
Weergave glijvlak

DTc (grijs) + residuen (m) MF6 L1-27 (Hlc - DTc/KRUIK/KRTWk)



# Analyse systematische afwijkingen - AZURE+UGM

- Veel te weinig opbolling op de Veluwe



Dwarsprofiel W-0 Veluwe: lichtblauwe lijn geeft freatische grondwaterstand, donkerblauw de stijghoogte

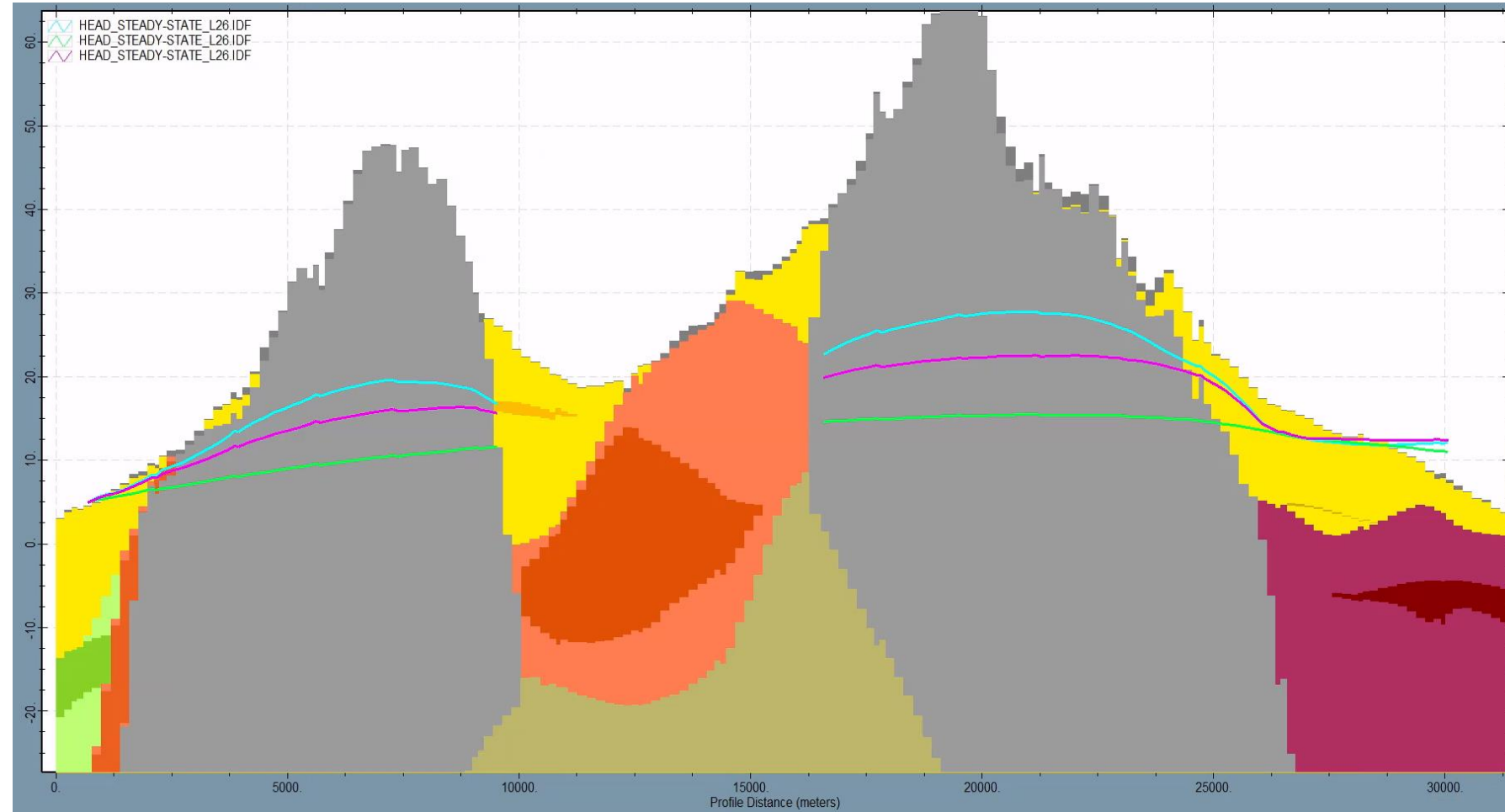
# Analyse systematische afwijkingen - AZURE+UGM

- **Gevoeligheidsanalyse glijvlak weerstand**

- Roze = Glijvlakweerstand 5000 d
- Groen = Glijvlakweerstand 10 d
- Blauw = Glijvlakweerstand x 2

- **Conclusie**

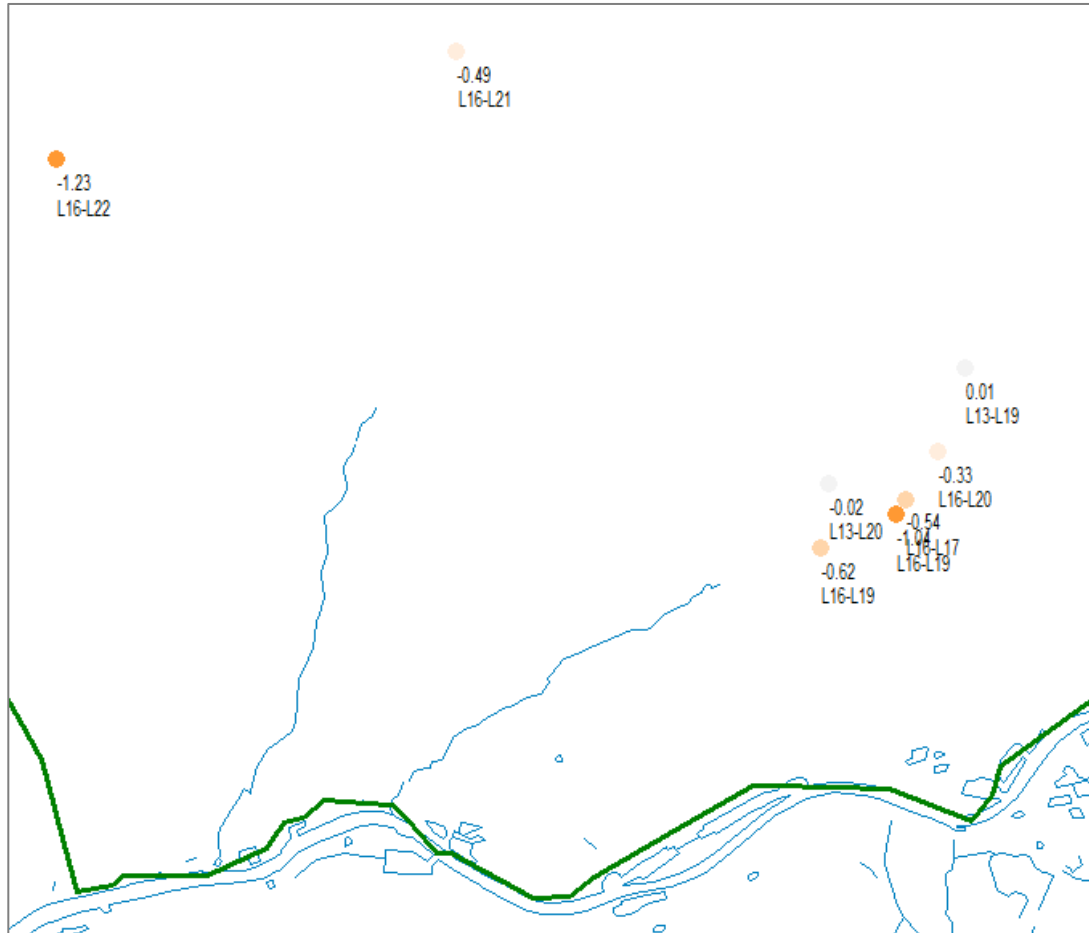
hogere opbolling door vergroten glijvlakweerstand



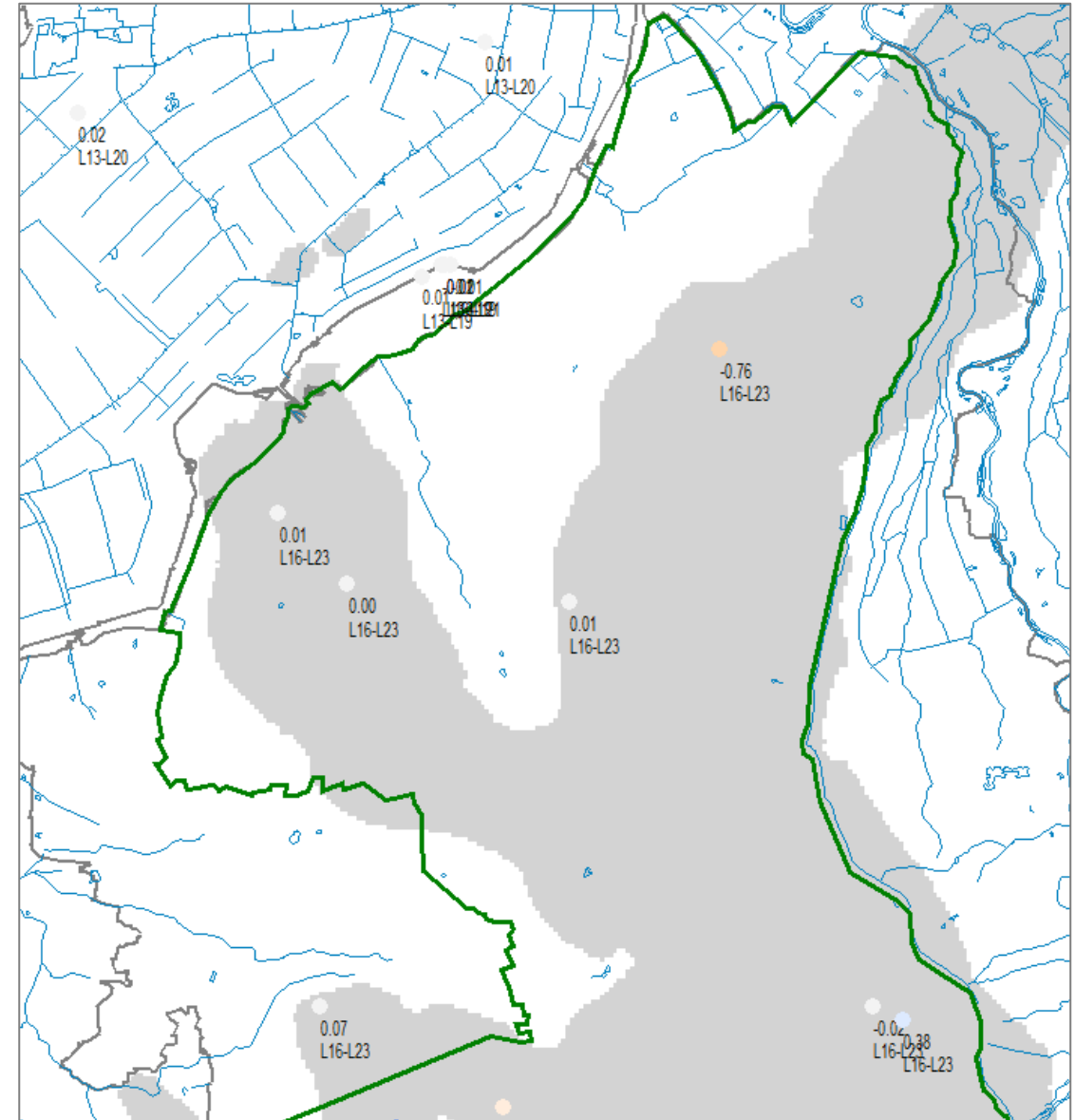
Dwarsprofiel W-0 Veluwe: berekende stijghoogte bij verschillende tests

# Analyse systematische afwijkingen - AZURE+UGM

- Analyse potentiaalverschillen over glijvlak
- Metingen geven te weinig verschil om opbolling te verklaren

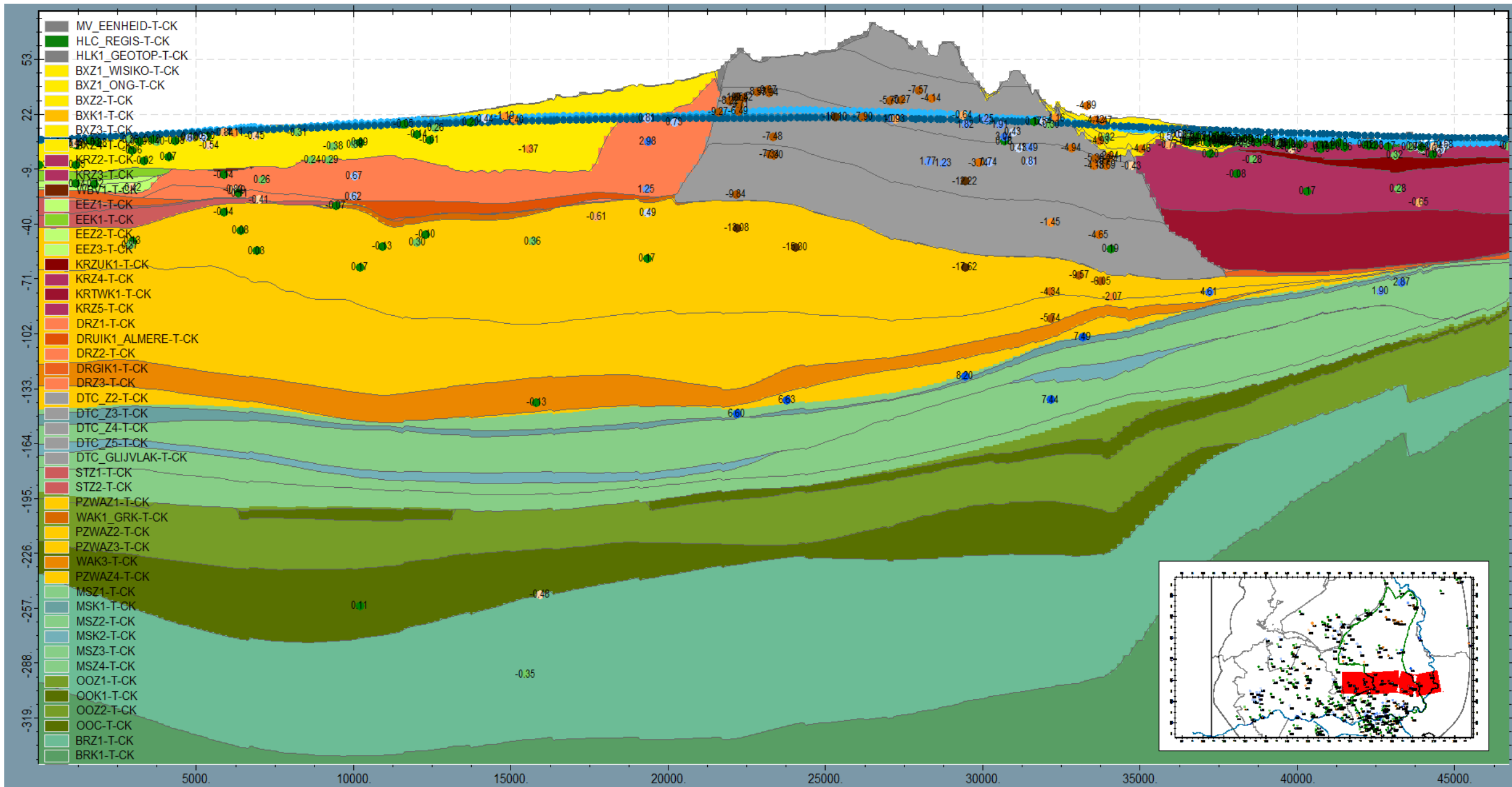


Potentiaalverschillen over glijvlak Zuid-west Veluwe



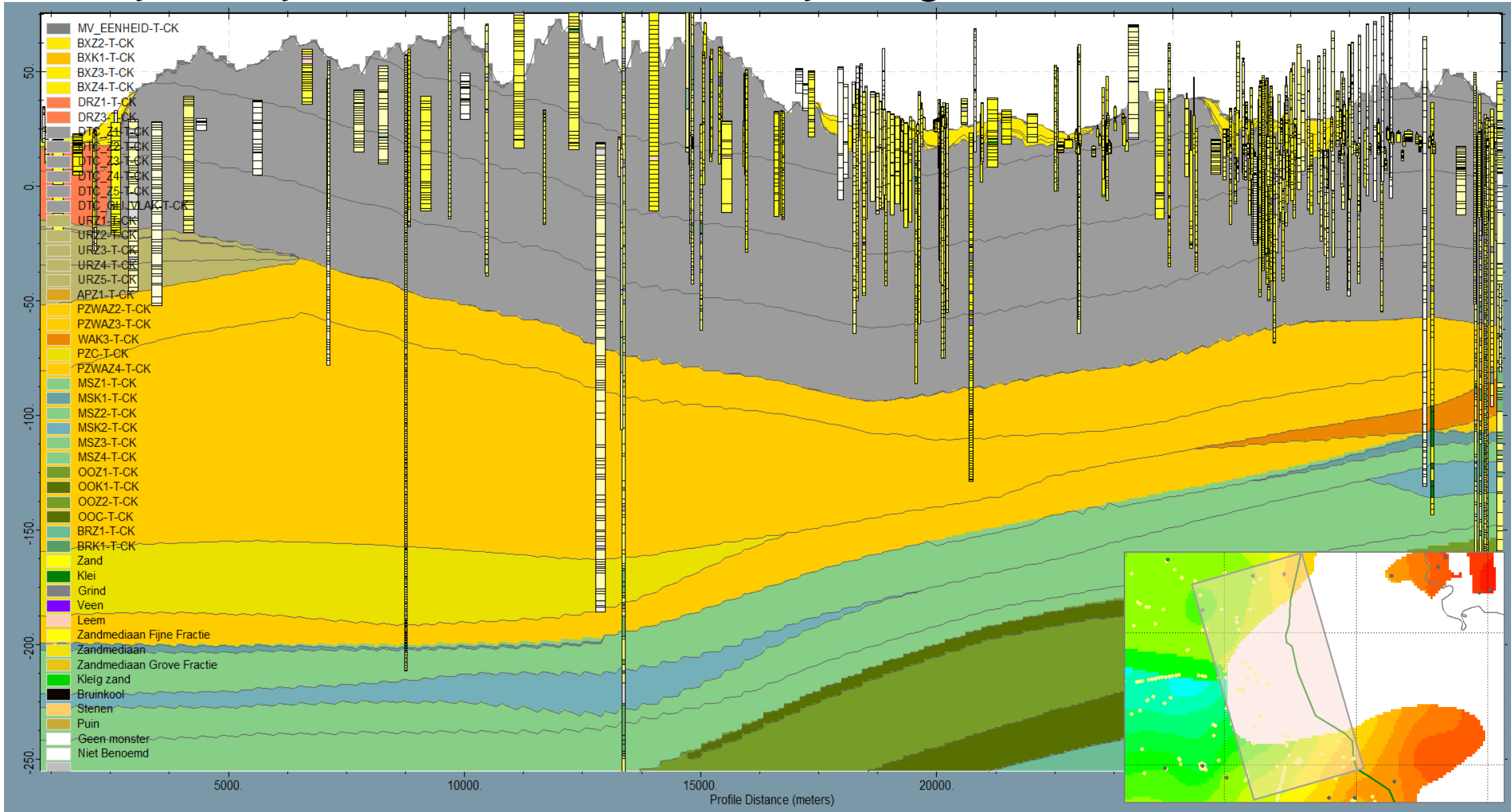
Filters en potentiaalverschillen boven en onder DTC glijvlak tot in PZWaz2, onder WAK1

# Residuen Veluwe



Dwarsprofiel W-0 met residuen (m) ter plaatse van peilbuisfilters

# Analyse systematische afwijkingen - AZURE+UGM



Dwarsprofiel met boringen DINOLOket ter plaatse van gat PZc

# Automatische kalibratie

## Handmatige kalibratie

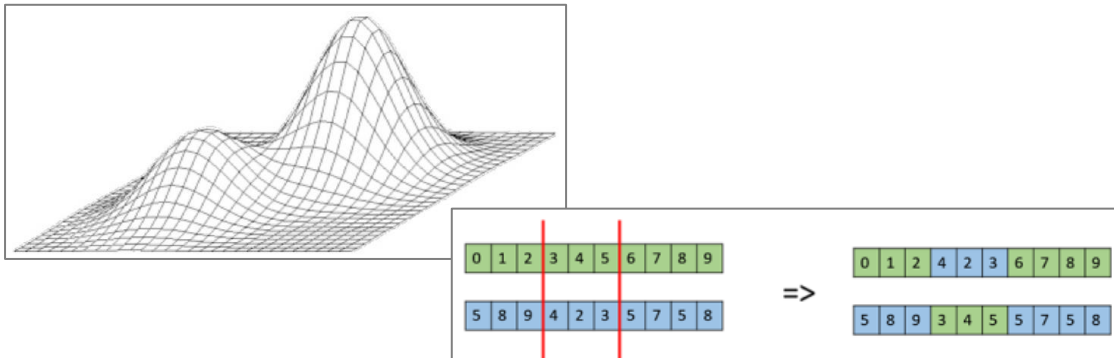
- Meer mogelijkheden voor analyse
- Kalibratie o.b.v. inzicht
- Gevoeligheidsanalyses per parameter ...

## Gevoeligheidsanalyse

- Handmatig voor inzicht in ruimtelijke invloed van parameters
- iPEST en iPEST Analyzer in iMOD
- Kan met IPESTP (bij voldoende CPU's) ook tijdens kalibratie

## AI en kalibratie

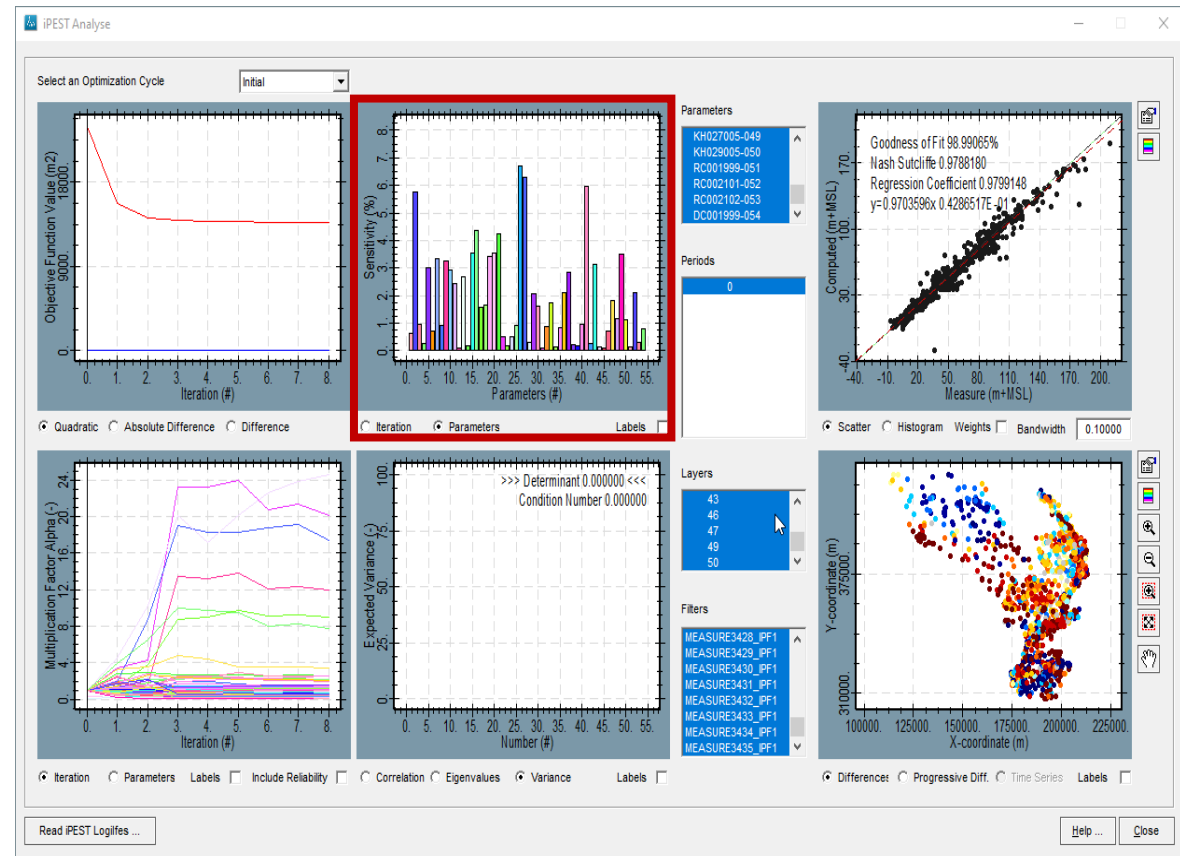
- Pilot met **Genetisch Algoritme** i.v.m. lokale optima



Voorbeeld: Kruisen van genen met kalibratiefactoren

## Automatische kalibratie

- Integrale optimalisatie van meerdere parameters tegelijk
- Beoordeling gekalibreerde parameters o.b.v. objectieve criteria
- Reproduceerbaar
- Levert informatie m.b.t. gevoeligheid en onzekerheden





# Automatische kalibratie met IPEST - invoer

- Aanmaken PST-block in PRJ-file met instellingen, kalibratieset, parameters, zones, etc.
- Via teksteditor, direct in PRJ-file (zie H10 in iMOD-manual)

**IPESTP voor MODFLOW 6**

- Parallel
- Bepaalt automatisch modellagen voor peilbuizen

Kalibratieset  
Instellingen  
Parameters

```

78,(PST),1, Parameter Estimation,[PST]
-2
"X:\...\PeilbuisDataIBR30-KalSet.IPF",1,1,2,0,10,-21,0,6,7
"X:\...\PeilbuisDataIBR30-ValSet_zone3.IPF",1,1,2,0,10,-21,0,6,7
50,0.0,0.1,0,0,1.0,0.0,3,0.0,0.0,1,0.0,0
1,KH,7,1,1.000,1.01,1,10,10,1,1,KH007001-001,1,10
1,KH,15,1,1.000,1.01,0.1,10,10,2,1,KH015001-002,1,10
1,KH,18,1,1.000,1.01,0.1,10,10,3,1,KH018001-003,1,10
1,KH,21,1,1.000,1.01,0.1,10,10,4,1,KH021001-004,1,10
...
1,KH,29,5,1.000,1.01,0.1,10,10,51,1,KH029005-051,1,10
1,RC,1,999,1.000,1.01,0.4,2,10,52,1,RC001999-052,1,10
1,RC,2,101,1.000,1.01,0.5,5,10,53,1,RC002101-053,1,10
1,RC,2,102,1.000,1.01,1,5,10,54,1,RC002102-054,1,10
1,DC,1,999,1.000,1.01,0.1,1,10,55,1,DC001999-055,1,10
3
X:\...\REGISzones_ibound.IDF
X:\...\PST\Maas_PST-zones.IDF
999
    
```

Zones

**Data Set 14: Parameter Estimation – Main settings**

|             |   |
|-------------|---|
| Data Set 14 | PE_MXITER,PE_STOP,PE_SENS,PE_NPERIOD,PE_NBATCH,<br>PE_TARGET_H,PE_TARGET_D,PE_SCALING,PE_PADJ,PE_DRES,<br>PE_KTYPE,PE_KRANGE,<br>PE_REGULARISATION,PE_REGFACTOR |
|-------------|---|

| PE_MXITER | PE_STOP | PE_SENS | PE_NPERIOD | PE_NBATCH | PE_TRGTH | PE_TRGTD | PE_SCALING | PE_PADJ | PE_DRES | PE_KTYPE | PE_KRANGE | PE_REG | PE_REGF |
|-----------|---------|---------|------------|-----------|----------|----------|------------|---------|---------|----------|-----------|--------|---------|
| 50        | 0       | 0,1     | 0          | 0         | 1        | 0        | 3          | 0       | 0       | 1        | 0         | 0      | 0       |

| PARCODE    | PACT | PPARAM | PILS | PIZONE | PINI | PDELTA | PMIN | PMAX | PINCREASE | PIGROUP | PLOG |
|------------|------|--------|------|--------|------|--------|------|------|-----------|---------|------|
| KH001001-1 | 1    | KH     | 1    | 1      | 1,00 | 1,1    | 0,1  | 10   | 10        | 1       |      |

# Automatische kalibratie met IPESTP - invoer

- Aanmaken PST-block in PRJ-file via Project Manager in iMOD

The screenshot displays the iMOD Project Manager interface on the left and the Parameter Estimation Settings dialog box on the right. The Project Manager shows a tree view with 'PST Parameter Estimation' selected. The Parameter Estimation Settings dialog box is open to the 'Parameters' tab, showing a table of parameters to be estimated.

| Act.                                | Parame... | Layer/S... | Zone | Group | Initial | Minimal | Maximal | StepSize | Increase | Transf.                             | Acronym | P.Estimate |
|-------------------------------------|-----------|------------|------|-------|---------|---------|---------|----------|----------|-------------------------------------|---------|------------|
| <input checked="" type="checkbox"/> | KH        | 1          | 1    | 1     | 1.00    | 0.01    | 100.00  | 1.10     | 2.00     | <input checked="" type="checkbox"/> |         | 1.0000     |
| <input checked="" type="checkbox"/> | KH        | 1          | 2    | 2     | 1.00    | 0.01    | 100.00  | 1.10     | 2.00     | <input checked="" type="checkbox"/> |         | 1.0000     |
| <input checked="" type="checkbox"/> | KH        | 2          | 1    | 3     | 1.00    | 0.01    | 100.00  | 1.10     | 2.00     | <input checked="" type="checkbox"/> |         | 1.0000     |
| <input checked="" type="checkbox"/> | KH        | 2          | 2    | 4     | 1.00    | 0.01    | 100.00  | 1.10     | 2.00     | <input checked="" type="checkbox"/> |         | 1.0000     |

The Parameter Estimation Settings dialog box includes the following options:

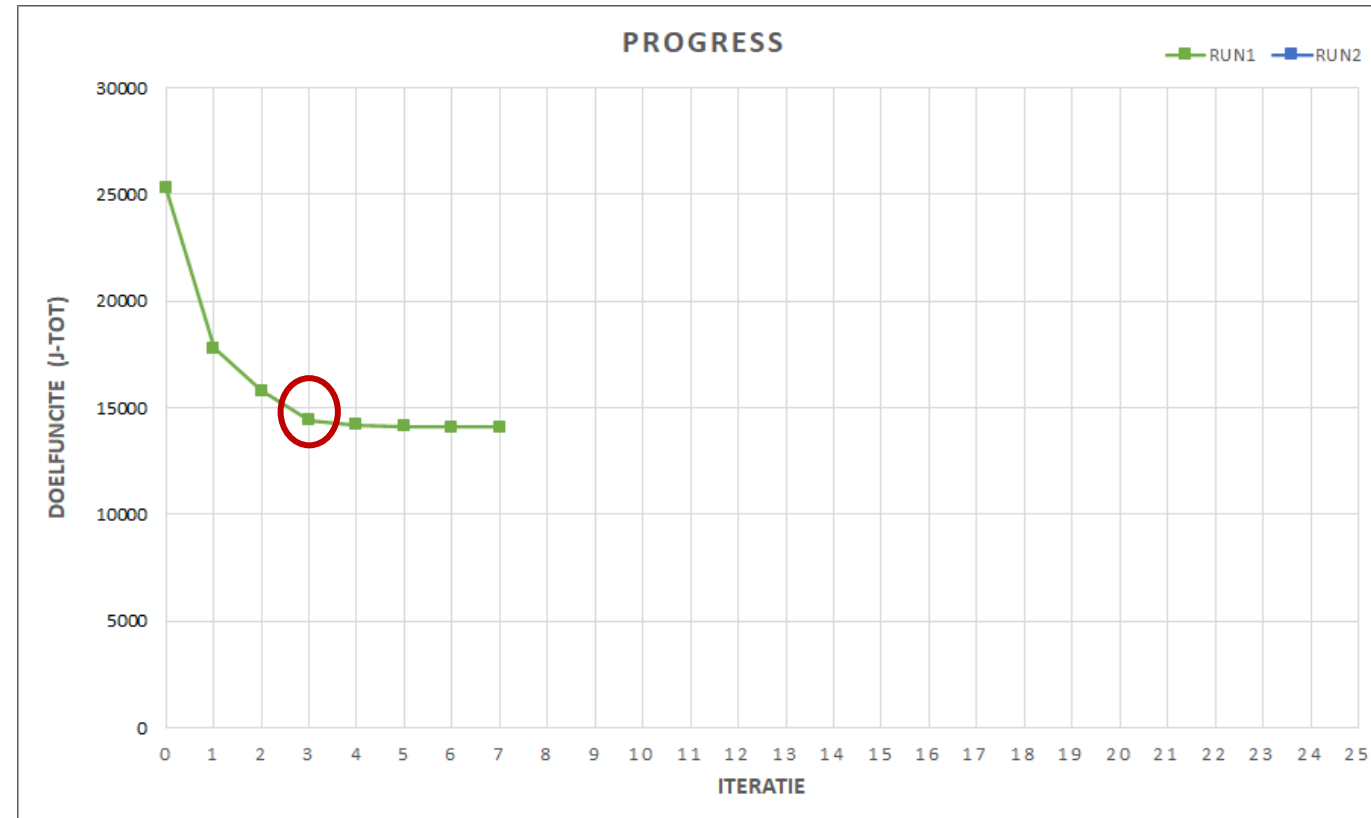
- Define General Characteristics
  - Apply Parallel iPEST:
  - Hide Command Windows:
  - Number of Processors: 5
  - Number of Line Searches: 3
  - Maximum Number of Sequences: 10
  - Stop Criterion Reduction of Objective Function (%): 0.100
  - Stop Criterion Parameter Adjustment (0-1): 0.010
  - Ignore Parameter with maximal Sensitivity (%): 0.000
  - Minimal Acceptable Residual (m): 0.000
  - Enter a Fraction for each Target (0-1): 1.000, 0.000
  - Specify Scaling / SVD: Scaling
  - Tikhonov Regularisation:
  - Variable Weighting: 1.00
  - Kriging Type: Simple Kriging
  - Number of Periods: 0
  - Number of Batchfiles: 0
  - Number of Parameters: 0
  - Number of Zones: 0
  - Number of Measurements: 0

# Keuze iteratie van kalibratierun

- Meerdere iteraties tijdens kalibratie waarin factoren worden aangepast
- Kies laatste iteratie die nog noemenswaardige verbetering geeft

| KALRUN             | 1         |              |
|--------------------|-----------|--------------|
| ITSEL              | 3         |              |
| TOT_J              | 14401,682 |              |
| $\Delta$ TOT_J (%) | 8,86%     |              |
| IT                 | TOT_J     | Progress (%) |
| 0                  | 25313,551 |              |
| 1                  | 17794,047 | 29,71%       |
| 2                  | 15802,422 | 11,19%       |
| 3                  | 14401,682 | 8,86%        |
| 4                  | 14212,051 | 1,32%        |
| 5                  | 14128,103 | 0,59%        |
| 6                  | 14107,457 | 0,15%        |
| 7                  | 14097,443 | 0,07%        |

⇒ KAL1: Iteratie 3 gebruikt



Verbetering doelfunctie

# Keuze kalibratiefactoren

- Kies gevoelige en betrouwbare kalibratiefactoren

| Vergelijking kalibratiefactoren |              |                      |                      |                      |                       | Vergelijking betrouwbaarheid |          |                      |              |       |                      |              |
|---------------------------------|--------------|----------------------|----------------------|----------------------|-----------------------|------------------------------|----------|----------------------|--------------|-------|----------------------|--------------|
| dF <sub>min</sub>               |              | Model                | <a href="#">RUNA</a> | <a href="#">RUNB</a> | Verschil<br>RUNA/RUNB | Model                        |          | <a href="#">RUNA</a> |              |       | <a href="#">RUNB</a> |              |
| fC <sub>max</sub>               |              | Modelrun             | RUN1                 | RUN2                 |                       | Modelrun                     |          | RUN1                 |              |       | RUN2                 |              |
| Importeer Parameters            |              | Iteratie             | 2                    | 3                    |                       | Iteratie                     |          | 2                    |              |       | 3                    |              |
| Nr                              | Parameter    | ZONE-detail          | Factor               | Factor               |                       | Parameter                    | Lower    | Upper                | Significant? | Lower | Upper                | Significant? |
| 1                               | KH007001-001 | krz3 - qrz1          | 1                    | 1,000                | #####                 | KH007001-001                 | 0,572    | 1,747                | nee          | 0,575 | 1,740                | nee          |
| 2                               | KH014001-002 | DTc_glijvlak - stk1  | 0,69785              | 0,617                | 1,27                  | KH014001-002                 | 0,065    | 7,515                | nee          | 0,060 | 6,360                | nee          |
| 3                               | KH015001-003 | urz1 - qrz2          | 0,45916              | 0,485                | 0,95                  | KH015001-003                 | 0,111    | 1,906                | nee          | 0,149 | 1,583                | nee          |
| 4                               | KH018001-004 | wak1                 | 1,30794              | 1,463                | 1,51                  | KH018001-004                 | 0,627    | 2,726                | nee          | 0,697 | 3,073                | nee          |
| 5                               | KH021001-005 | pzwaz3 - qrz3        | 0,49556              | 0,196                | 1,59                  | KH021001-005                 | 0,209    | 1,174                | nee          | 0,073 | 0,525                | ja           |
| 6                               | KH024001-006 | kik1                 | 1,2132               | 1,480                | 2,25                  | KH024001-006                 | 0,591    | 2,489                | nee          | 0,738 | 2,971                | nee          |
| 7                               | KH025001-007 | kiz2                 | 0,67187              | 0,604                | 1,21                  | KH025001-007                 | 0,449    | 1,006                | nee          | 0,362 | 1,007                | nee          |
| 8                               | KH031001-008 | brz1                 | 0,47878              | 1,980                | -1,88                 | KH031001-008                 | 0,103    | 2,215                | nee          | 0,444 | 8,821                | nee          |
| 9                               | KH003002-009 | bxz2 - BXz1_ong      | 1,58725              | 13,466               | 21,23                 | KH003002-009                 | 0,010    | 243,317              | nee          | 0,636 | 284,919              | nee          |
| 10                              | KH005002-010 | krz3 - bez1          | 0,72913              | 0,589                | 1,52                  | KH005002-010                 | 0,252    | 2,107                | nee          | 0,150 | 2,315                | nee          |
| 11                              | KH029002-011 | iez3 - brz1          | 0,82255              | 0,335                | 3,75                  | KH029002-011                 | 0,368    | 1,837                | nee          | 0,139 | 0,806                | ja           |
| 12                              | KH003003-012 | bxz2 - BXz1_ong      | 0,56778              | 0,936                | 0,15                  | KH003003-012                 | 0,015    | 21,170               | nee          | 0,016 | 54,234               | nee          |
| 13                              | KH009003-013 | krz3 - bez1          | 0,31535              | 0,250                | 1,10                  | KH009003-013                 | 0,193    | 0,516                | ja           | 0,152 | 0,410                | ja           |
| 14                              | KH014003-014 | syk1                 | 1,79597              | 2,376                | 1,73                  | KH014003-014                 | 8,06E-04 | 4,00E+03             | nee          | 0,001 | 5014,843             | nee          |
| 15                              | KH015003-015 | syz2                 | 0,20429              | 0,203                | 1,00                  | KH015003-015                 | 0,104    | 0,403                | ja           | 0,105 | 0,391                | ja           |
| 16                              | KH016003-016 | syk2                 | 2,19837              | 2,211                | 1,01                  | KH016003-016                 | 1,502    | 3,217                | ja           | 1,525 | 3,206                | ja           |
| 17                              | KH018003-017 | syk3                 | 3,82327              | 8,788                | 2,76                  | KH018003-017                 | 0,006    | 2,45E+03             | nee          | 0,000 | 193574,800           | nee          |
| 18                              | KH021003-018 | pzwaz2 - QRz3_Rslenk | 0,42654              | 0,522                | 0,83                  | KH021003-018                 | 0,316    | 0,575                | ja           | 0,385 | 0,707                | ja           |
| 19                              | KH022003-019 | wak2                 | 1,2165               | 1,065                | 0,30                  | KH022003-019                 | 0,908    | 1,629                | nee          | 0,812 | 1,396                | nee          |

Vergelijking factoren en onzekerheden van verschillende iteraties

# Keuze kalibratiefactoren

- Kies plausible kalibratiefactoren binnen fysieke bandbreedtes
  - Beoordeel resulterende k-waarden op plausibiliteit voor betreffende geologische eenheid

| Zone IDF-file #1 |     | %DBASEPATH%\BASIS1\LinkTable\REGISzones_ibound.IDF |          |      |       |        |                   |                 |                      |                      |                          |                          |  |  |
|------------------|-----|--|----------|------|-------|--------|-------------------|-----------------|----------------------|----------------------|--------------------------|--------------------------|--|--|
| Zone IDF-file #2 |     | %DBASEPATH%\KAL2\PST\Maas_PST-zones.IDF            |          |      |       |        |                   |                 |                      |                      |                          |                          |  |  |
| PPARAM details   |     |  |          |      |       |        | LinkTable details |                 |                      |                      |                          |                          |  |  |
| PACRONYM         | PAR | LAY  | ZONEFILE | ZONE | GROUP | Factor | MF6 Package       | MF-2005 Package | Eenheid <sub>1</sub> | Eenheid <sub>n</sub> | k-org <sub>1</sub> (m/d) | k-org <sub>2</sub> (m/d) |  |  |
| KH007001-001     | KH  | 7  | 1        | 1    | 1     | 1      | KHV               | KHV             | krz3                 | qrz1                 | 58,2137                  | 27                       |  |  |
| KH015001-002     | KH  | 15   | 1        | 1    | 2     | 0,604  | KHV               | KHV             | urz1                 | qrz2                 | 55                       | 27                       |  |  |
| KH018001-003     | KH  | 18   | 1        | 1    | 3     | 1,218  | KHV               | KVV             | wak1                 |                      | 0,05292                  |                          |  |  |
| KH021001-004     | KH  | 21   | 1        | 1    | 4     | 0,435  | KHV               | KHV             | pzwaz3               | qrz3                 | 39,0435                  | 27                       |  |  |
| KH024001-005     | KH  | 24   | 1        | 1    | 5     | 1,225  | KHV               | KVV             | kik1                 |                      | 0,00084                  |                          |  |  |
| KH025001-006     | KH  | 25   | 1        | 1    | 6     | 0,499  | KHV               | KHV             | kiz2                 |                      | 24,7242                  |                          |  |  |
| KH025001-006     | KH  | 27   | 1        | 1    | 6     | 0,499  | KHV               | KHV             | kiz3                 |                      | 24,4927                  |                          |  |  |
| KH025001-006     | KH  | 29   | 1        | 1    | 6     | 0,499  | KHV               | KHV             | kiz4                 | ooc                  | 29,9409                  | 2,30195                  |  |  |
| KH031001-007     | KH  | 31   | 1        | 1    | 7     | 1,988  | KHV               | KHV             | brz1                 |                      | 3,26418                  |                          |  |  |
| KH031001-007     | KH  | 33   | 1        | 1    | 7     | 1,988  | KHV               | KHV             | brz2                 |                      | 0,09                     |                          |  |  |
| KH031001-007     | KH  | 35   | 1        | 1    | 7     | 1,988  | KHV               | KHV             | brz3                 |                      | 2,7                      |                          |  |  |
| KH003002-008     | KH  | 3  | 1        | 2    | 8     | 1,023  | KHV               | KHV             | bxz2                 | BXz1_ong             | 4,76289                  | 4,61643                  |  |  |
| KH005002-009     | KH  | 5  | 1        | 2    | 9     | 1      | KHV               | KHV             | krz3                 | bez1                 | 58,7428                  | 73,6937                  |  |  |
| KH005002-009     | KH  | 7  | 1        | 2    | 9     | 1      | KHV               | KHV             | bez2                 |                      | 77,7167                  |                          |  |  |
| KH005002-009     | KH  | 9  | 1        | 2    | 9     | 1      | KHV               | KHV             | bez3                 | qrz2                 | 79,5131                  | 27,0132                  |  |  |

Beoordeling factoren t.o.v. huidige k-waarden

# Analyse niet-plausibele kalibratiefactoren

## Niet-plausibele factoren geven aanwijzing voor fouten in schematisatie

- Fouten in metingen ?
- Filters aan verkeerde modellaag toegekend
- Ontbrekende scheidende lagen
- Noodzaak voor locale zonering
- ...

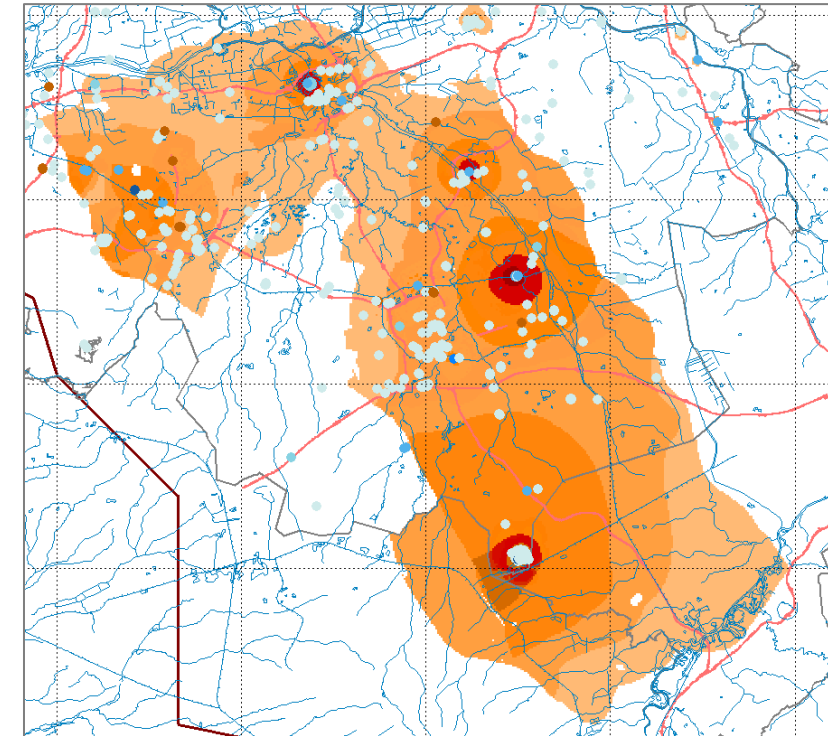
## Voorbeeld IBRAHYM3

- Kalibratiefactor 47,6 voor WAK1:  
⇒ onttrekkingen Brabant bleken in  $\text{m}^3/\text{mnd}$  ipv  $\text{m}^3/\text{d}$  opgeslagen

⇒ Geef parameters daarom initieel de ruimte ...

| Parameter    | ZONE-detail | Factor | Lower | Upper    |
|--------------|-------------|--------|-------|----------|
| KV020003-090 | wak1        | 47,558 | 0,052 | 4,31E+04 |

↓  
Onttrekkingen Brabant  $\text{m}^3/\text{mnd}$  ipv  $\text{m}^3/\text{d}$



Effect correctie winningen L1/L21/L31 (transparant)  
+ locatie winningen Prov. Brabant met gem. debiet

# Toepassing IPESTP-factoren

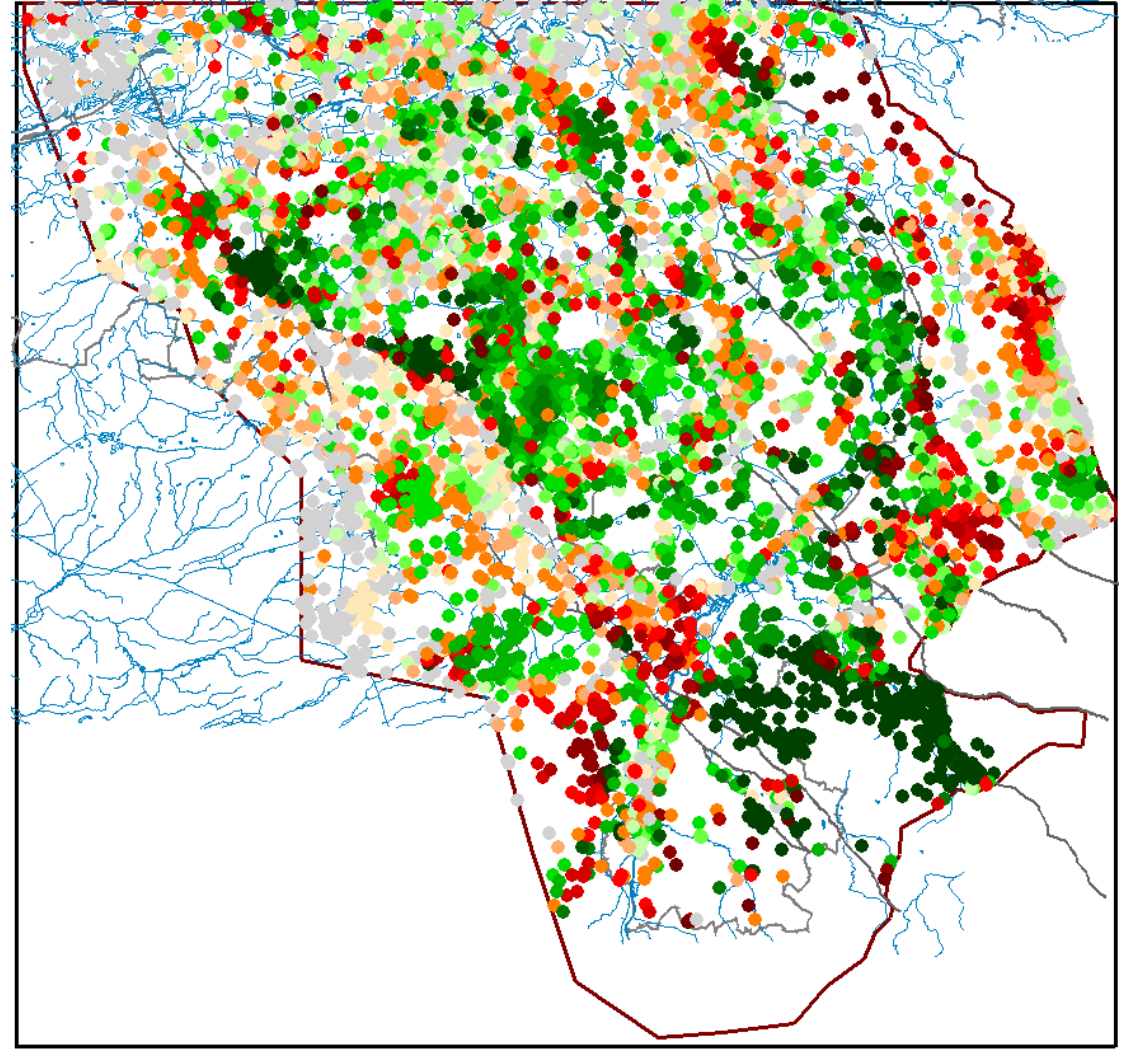
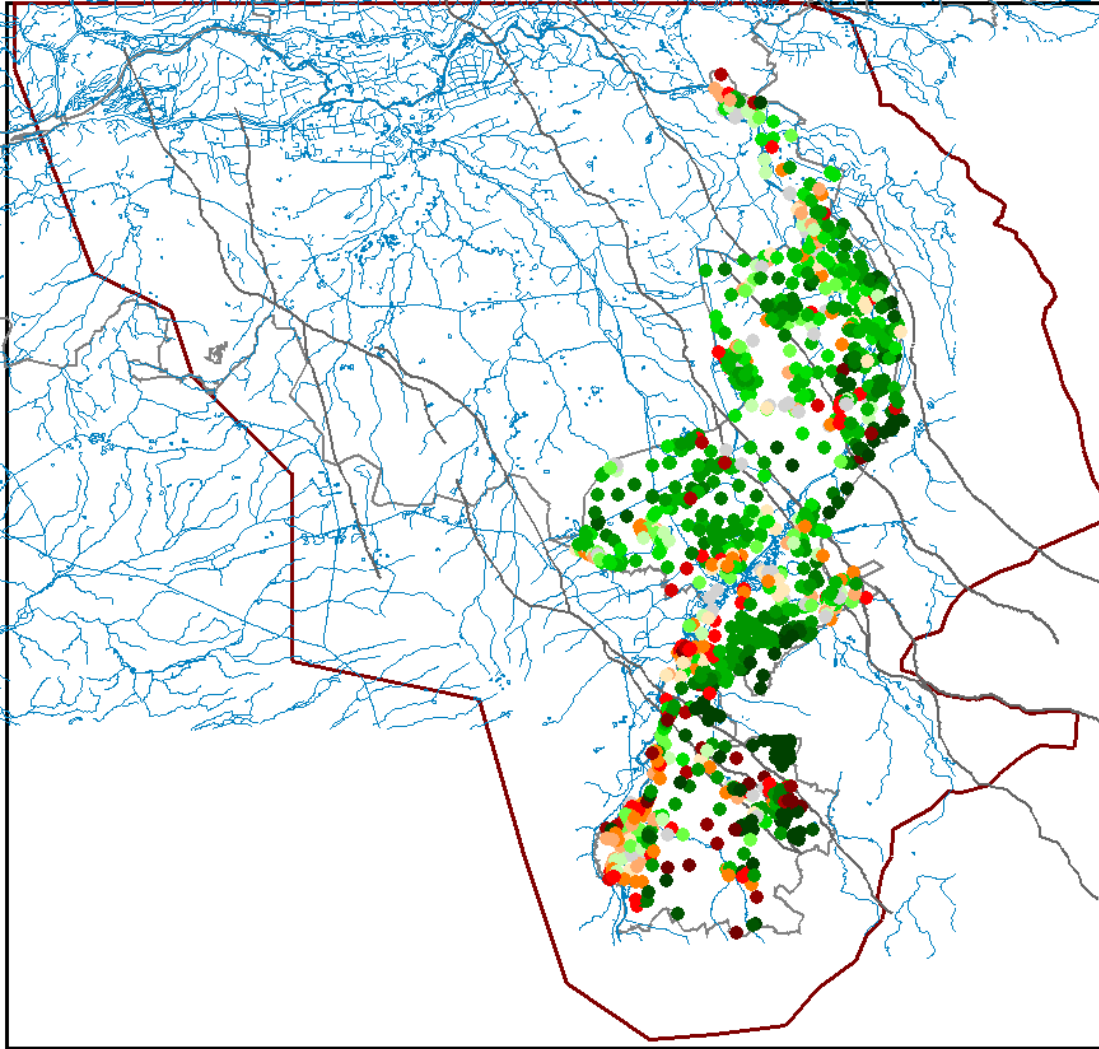
## Verwerking kalibratiefactoren bij modelbouw

- Kalibratiefactoren moeten later nog kunnen worden aangepast  
⇒ kalibratiefactoren apart opgeslagen bij model in Exceltabel
- Deelmodellen kunnen andere laagindeling hebben ...  
⇒ kalibratiefactoren *per geologische eenheid* en *per zone*
- Exceltabel is invoer voor subworkflow bij modelbouw

|    | A      | B           | C        | D          | E      | F    | G       | H        |
|----|--------|-------------|----------|------------|--------|------|---------|----------|
| 1  | Number | Name        | Type     | Percentage | Schema | Part | Kfactor | AverageK |
| 37 | 36     | syz1        | Aquifer  | 10,15      | 7      | 1    | 1       | 10,7604  |
| 38 | 37     | syk1        | Aquitard | 60,91      | -7     | 1    | 1       | 0,03706  |
| 39 | 38     | syz2        | Aquifer  | 74,52      | 8      | 1    | 0,3     | 12,9168  |
| 40 | 39     | syk2        | Aquitard | 27,25      | -8     | 1    | 1       | 0,03978  |
| 41 | 40     | syz3        | Aquifer  | 90,71      | 9      | 1    | 0,3     | 17,4047  |
| 42 | 41     | syk3        | Aquitard | 22,25      | -9     | 1    | 1       | 0,01917  |
| 43 | 42     | syz4        | Aquifer  | 57,3       | 10     | 1    | 0,3     | 16,86    |
| 44 | 43     | QRz2_Rslenk | Aquifer  | 4,27       | 10     | 1    | 0,3     | 46,9967  |
| 45 | 44     | pzwaz1      | Aquifer  | 6,39       | 10     | 1    | 1       | 15,9992  |
| 46 | 45     | wak1        | Aquitard | 61,47      | -10    | 1    | 2       | 0,01571  |
| 47 | 46     | pzwaz2      | Aquifer  | 62,59      | 11     | 1    | 0,5     | 18,3196  |
| 48 | 47     | QRz3_Rslenk | Aquifer  | 4,22       | 11     | 1    | 0,5     | 46,9857  |
| 49 | 48     | wak2        | Aquitard | 64,73      | -11    | 1    | 1       | 0,011    |
| 50 | 49     | pzwaz3      | Aquifer  | 66,95      | 12     | 1    | 0,5     | 23,2096  |
| 51 | 51     | wak3        | Aquitard | 39,26      | -12    | 1    | 1       | 0,02166  |
| 52 | 52     | pzwaz4      | Aquifer  | 62,65      | 13     | 1    | 0,5     | 25,2137  |
| 53 | 53     | msz1        | Aquifer  | 17,4       | 14     | 1    | 1       | 16,2513  |
| 54 | 54     | msk1        | Aquitard | 26,21      | 14     | 1    | 1       | 0,00393  |
| 55 | 55     | msz2        | Aquifer  | 33,89      | 14     | 1    | 1       | 16,3039  |
| 56 | 56     | msk2        | Aquitard | 24,53      | 14     | 1    | 1       | 0,00413  |
| 57 | 57     | msz3        | Aquifer  | 27,32      | 14     | 1    | 1       | 13,9111  |
| 58 | 58     | msc         | Complex  | 0,58       | 14     | 1    | 1       | 7,52105  |
| 59 | 59     | msz4        | Aquifer  | 17,06      | 14     | 1    | 1       | 12,685   |
| 60 | 60     | kik1a       | Aquitard | 2,77       | -14    | 1    | 1       | 0,00056  |
| 61 | 61     | kiz1        | Aquifer  | 5,31       | 15     | 1    | 1       | 47,5199  |
| 62 | 62     | kik1        | Aquitard | 63,96      | -15    | 1    | 0,5     | 0,00095  |
| 63 | 63     | kiz2        | Aquifer  | 61,65      | 16     | 1    | 0,7     | 24,9732  |
| 64 | 64     | kiz2a       | Aquifer  | 3,38       | 16     | 1    | 0,7     | 15       |
| 65 | 65     | kik2        | Aquitard | 45,15      | -16    | 1    | 1,4     | 0,00074  |
| 66 | 66     | kiz3        | Aquifer  | 68,47      | 17     | 1    | 0,7     | 25,8306  |
| 67 | 67     | kik3        | Aquitard | 43,56      | -17    | 1    | 1       | 0,00115  |
| 68 | 68     | kiz4        | Aquifer  | 67,55      | 18     | 1    | 0,7     | 36,6356  |
| 69 | 69     | kik4        | Aquitard | 8,89       | -18    | 1    | 1       | 0,00125  |
| 70 | 70     | kiz5        | Aquifer  | 39,64      | 19     | 1    | 0,7     | 41,4214  |
| 71 | 71     | ooz1        | Aquifer  | 2          | 20     | 1    | 0,8     | 12,4152  |

# Residuanalyse: residuverschil t.o.v. basismodel

- Residuuverschillen (tov uitgangsmoedel) door kalibratieronde 3



KAL3 resultaten (residuuverbetering) L1-23 KalSet. Rechts idem, maar dan voor KalSet + ValSet L1-23



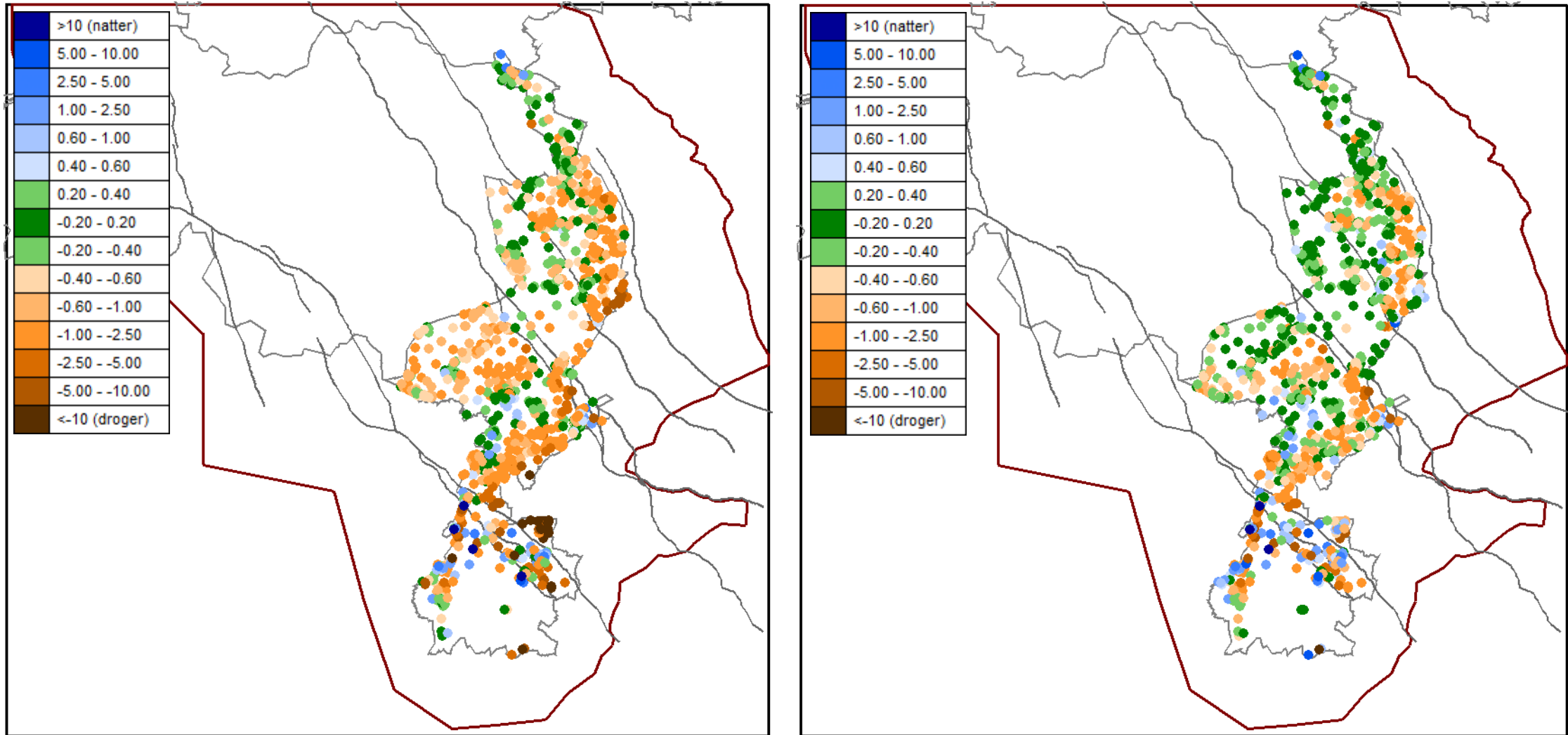
# Residuanalyse: residuverschil t.o.v. basismodel

| Set                      | Layer | N           | ME           |              | MAE         |             | SD(E)       |             | RMSE        |             | SSE             |                 |
|--------------------------|-------|-------------|--------------|--------------|-------------|-------------|-------------|-------------|-------------|-------------|-----------------|-----------------|
|                          |       |             | BASIS1       | KAL3         | BASIS1      | KAL3        | BASIS1      | KAL3        | BASIS1      | KAL3        | BASIS1          | KAL3            |
| PeilbuisData1BR30-KalSet | 1     | 92          | -1,79        | -0,90        | 1,91        | 1,12        | 3,38        | 2,16        | 3,80        | 2,32        | 1331,45         | 496,73          |
|                          | 3     | 467         | -0,75        | -0,43        | 0,82        | 0,53        | 0,92        | 0,79        | 1,19        | 0,90        | 658,30          | 378,47          |
|                          | 5     | 94          | -1,10        | -0,43        | 1,23        | 0,92        | 1,37        | 1,59        | 1,75        | 1,64        | 288,71          | 252,45          |
|                          | 7     | 349         | -1,53        | -0,70        | 1,62        | 0,84        | 2,62        | 1,10        | 3,03        | 1,30        | 3201,83         | 589,20          |
|                          | 9     | 77          | -0,95        | -0,38        | 1,29        | 0,81        | 1,45        | 1,36        | 1,73        | 1,40        | 229,18          | 151,35          |
|                          | 11    | 309         | -0,93        | -0,61        | 1,06        | 0,78        | 1,07        | 0,97        | 1,41        | 1,14        | 617,23          | 403,79          |
|                          | 13    | 41          | -0,39        | 0,09         | 1,04        | 0,70        | 1,45        | 1,29        | 1,49        | 1,28        | 90,56           | 66,94           |
|                          | 15    | 104         | -2,67        | -0,72        | 3,21        | 1,63        | 3,84        | 2,55        | 4,67        | 2,63        | 2263,44         | 720,76          |
|                          | 17    | 58          | -1,10        | 0,82         | 3,85        | 2,08        | 8,55        | 3,42        | 8,55        | 3,49        | 4237,60         | 706,19          |
|                          | 19    | 85          | -2,14        | -1,06        | 2,90        | 2,48        | 5,06        | 4,40        | 5,47        | 4,50        | 2542,34         | 1720,77         |
|                          | 21    | 76          | -2,05        | -1,63        | 2,58        | 2,04        | 3,79        | 3,40        | 4,29        | 3,75        | 1396,06         | 1068,68         |
|                          | 23    | 51          | -0,96        | -0,95        | 3,46        | 3,20        | 4,91        | 4,53        | 4,96        | 4,59        | 1254,08         | 1074,03         |
|                          | 25    | 125         | 1,07         | 0,65         | 3,01        | 2,93        | 5,10        | 4,90        | 5,19        | 4,93        | 3372,31         | 3034,57         |
|                          | 27    | 41          | -1,58        | -0,35        | 5,82        | 4,17        | 9,48        | 7,21        | 9,49        | 7,13        | 3694,67         | 2087,06         |
|                          | 29    | 84          | -0,55        | -0,32        | 1,99        | 1,91        | 3,63        | 3,53        | 3,65        | 3,53        | 1121,95         | 1045,00         |
|                          | 31    | 71          | -2,16        | -0,24        | 3,61        | 2,42        | 5,30        | 3,18        | 5,69        | 3,16        | 2296,82         | 710,06          |
|                          | 33    | 52          | -4,51        | -2,51        | 5,66        | 3,42        | 11,76       | 7,11        | 12,49       | 7,48        | 8108,47         | 2906,54         |
|                          | 35    | 42          | -5,31        | -2,86        | 5,56        | 3,11        | 7,60        | 4,41        | 9,20        | 5,21        | 3552,50         | 1141,89         |
|                          | 37    | 23          | -0,62        | -0,48        | 1,07        | 0,96        | 2,93        | 1,57        | 2,93        | 1,60        | 197,84          | 59,16           |
|                          | 40    | 6           | -1,47        | -0,02        | 1,88        | 0,94        | 1,73        | 1,12        | 2,16        | 1,02        | 28,07           | 6,22            |
| 42                       | 13    | -2,89       | -1,29        | 3,08         | 1,57        | 4,31        | 2,76        | 5,05        | 2,95        | 331,98      | 112,75          |                 |
| 43                       | 22    | -2,38       | -0,11        | 2,86         | 2,12        | 5,00        | 3,79        | 5,43        | 3,71        | 649,17      | 302,62          |                 |
| 47                       | 2     | -11,32      | 1,91         | 12,33        | 6,67        | 17,44       | 9,43        | 16,74       | 6,94        | 560,34      | 96,27           |                 |
| 49                       | 3     | 1,31        | 10,76        | 3,06         | 10,76       | 4,71        | 1,95        | 4,06        | 10,88       | 49,54       | 355,16          |                 |
| <b>Total</b>             |       | <b>2287</b> | <b>-1,30</b> | <b>-0,56</b> | <b>2,02</b> | <b>1,40</b> | <b>3,93</b> | <b>2,76</b> | <b>4,29</b> | <b>2,92</b> | <b>42074,42</b> | <b>19486,66</b> |

Residustatistiek per modellaag voor uitgangsmodel (linker kolom) en gekalibreerd model (rechter kolom) (gemaakt met ResidualAnalysis-tool)

# Residuen ondiep

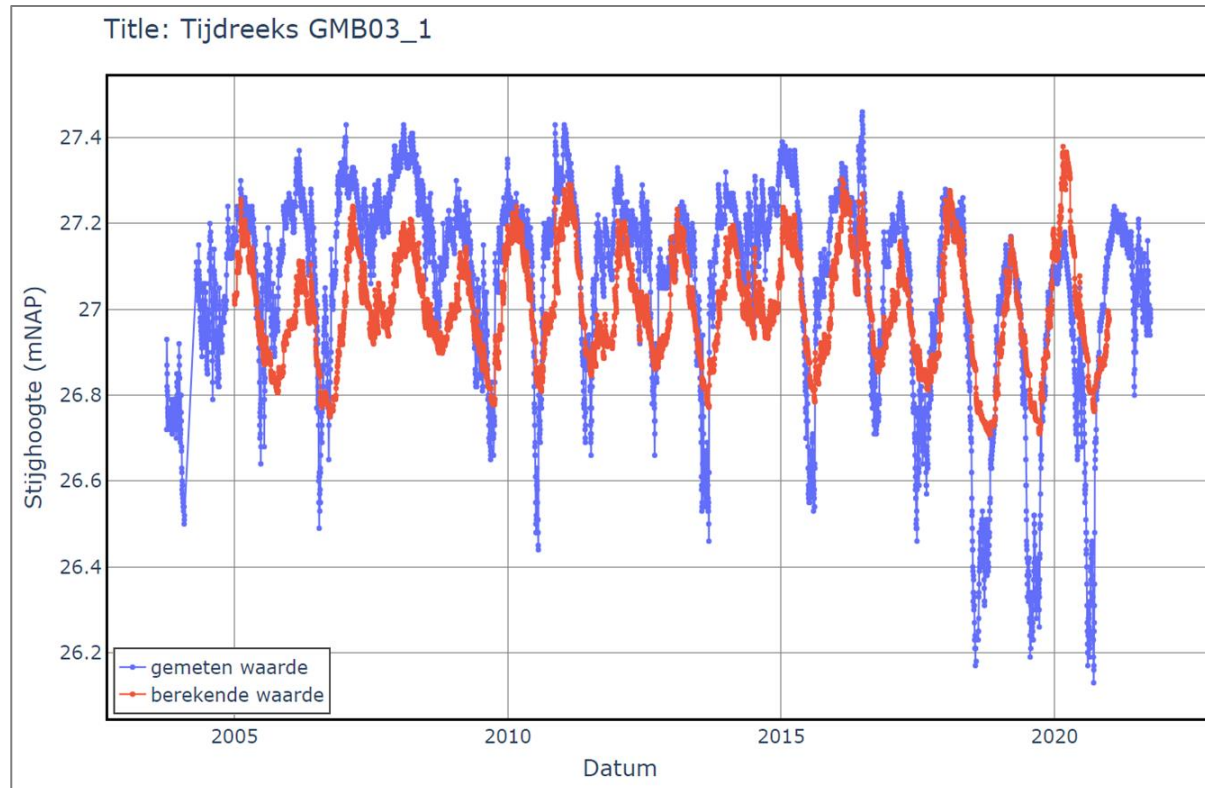
- Residuen ondiep (boven WAK1; L1-17) uitgangsmoedel (links) en gekalibreerd moedel (rechts)



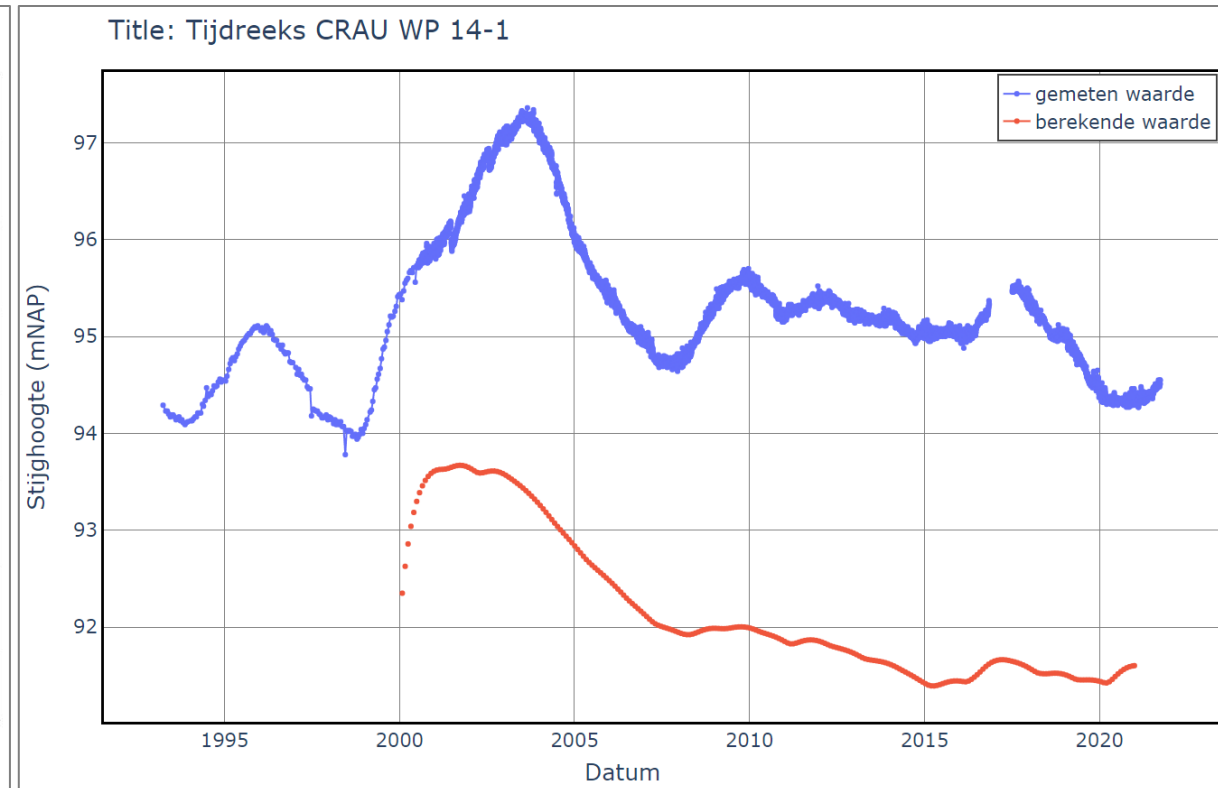
Residuen (m) Kalibratieset ondiep L1-17 (boven WAK1) voor uitgangsmoedel (links) en gekalibreerd moedel (rechts)

# Validatie gekalibreerd model

- Noord-Limburg met een kleiner modelgebied 50x50 confined op dagbasis  
Dit zijn snel reagerende systemen met 's zomers lage grondwaterstanden en 's winters hoge grondwaterstanden.
- Zuid-Limburg met een model 200x200 unconfined met 30 daagse tijdstappen  
Dit zijn traag reagerende systemen.



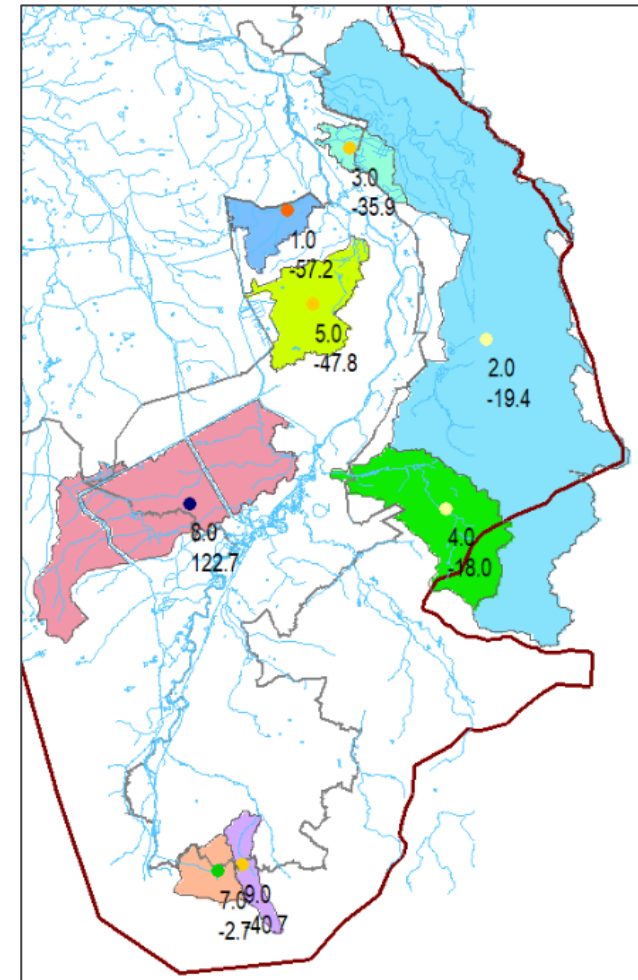
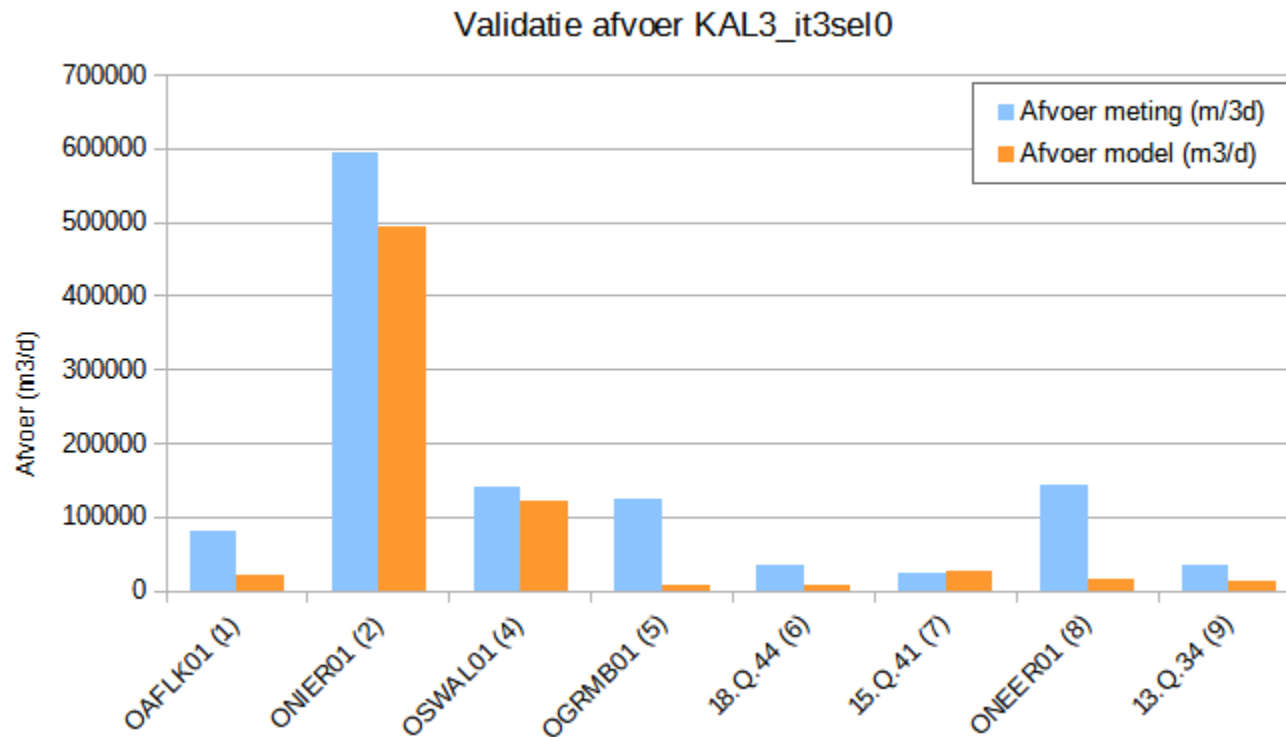
Voorbeeld gemeten en berekende tijdstijgtereeks Noord-Limburg



Voorbeeld gemeten en berekende tijdstijgtereeks Zuid-Limburg

# Validatie gekalibreerd model

- Stijghoogtemetingen: korte reeksen / buiten Limburg
- Afvoer
- Beregening
- Isohypsens Duitsland
- Breukflux



Stroomgebieden (nummer) met afwijking (%) in berekende minus gemeten afvoer.

# Conclusies en aanbevelingen

## Conclusies

- Maak kalibratieplan
- Controleer kalibratieset
- Analyseer extreme residuen
- Analyseer systematische fouten
- IPESTP krachtig
- Handmatige analyse ook belangrijk
- Controleer plausibiliteit factoren
- Controleer op systematische fouten
- Valideer op afvoeren
  
- Kalibratie is complex en tijdrovend

## Valkuilen

- Gebrek aan systeeminzicht
- Foute metingen / uitbijters
- Niet representatieve kalibratieperiode
- Systematische fouten in schematisatie
- Teveel parameters: overparameterisatie
- Gecorreleerde parameters / metingen
- Aan verkeerde knoppen gedraaid
  
- ⇒ 'Goed kalibratieresultaat', maar fout model.
- ⇒ Wellicht model met kleine residuen, maar foute, berekende effecten

# Vragen?