

KORTSLUITSTROMING BIJ DOORBORINGEN

▶▶ KIWK 2022-28



Kennisimpuls
WATERKWALITEIT

▶▶ KIWK IN HET KORT

Dit rapport is geschreven in het kader van het project **Vergrijzing van grondwater door menselijke invloeden met nadruk op langetermijneffecten** van de Kennisimpuls Waterkwaliteit.

In de Kennisimpuls werken Rijk, provincies, waterschappen, drinkwaterbedrijven en kennisinstituten aan meer inzicht in de kwaliteit van het grond- en oppervlaktewater en de factoren die deze kwaliteit beïnvloeden. Daarmee kunnen waterbeheerders en andere partijen de juiste maatregelen nemen om de waterkwaliteit te verbeteren en de biodiversiteit te vergroten.

In het programma brengen partijen bestaande en nieuwe kennis bijeen, en maken ze deze kennis (beter) toepasbaar voor de praktijk. Hiermee verstevigen ze de basis onder het waterkwaliteitsbeleid. Het programma is gestart in 2018 en duurt vier jaar. Het wordt gefinancierd door het ministerie van Infrastructuur en Waterstaat, STOWA, waterschappen, provincies en drinkwaterbedrijven.

Kennisimpuls Waterkwaliteit.

Beter weten wat er speelt en wat er kan.

▶▶ COLOFON

Opdrachtgever	Kennisimpuls waterkwaliteit (KIWK)
Auteurs	Mariëlle van Vliet (TNO Geologische Dienst Nederland), Sebastian Huizer (Arcadis), Annemieke Marsman (Deltares), Martin van der Schans (KWR) en Willem Jan Zaadnoordijk (TNO Geologische Dienst Nederland)
Kwaliteitsborger	Cjestmir de Boer (TNO)
Contact	Mariëlle van Vliet Marielle.vanvliet@tno.nl +31 6 27312874

Gebruikerscommissie Kennisimpuls waterkwaliteit Vergrijzing van grondwater door menselijke invloeden met nadruk op langetermijneffecten

Almer Bolman	Waterschap Vallei en Veluwe
Birgitta Putters	WML
Suzanne van den Bos	Provincie Gelderland
Dennis Kos	Hoogheemraadschap Hollands Noorderkwartier
Eric Castenmiller	Provincie Limburg
Fransisco Leus	ILT
Janco van Gelderen	Provincie Utrecht
Juliaan Prast	Min I&W
Marian van Asten	Provincie Utrecht
Mark van Lokven	Waterschap de Dommel
Martin de Jonge	Vitens
Matthijs ten Harkel	Provincie Noord-Brabant
Ron Nap	Rijkswaterstaat
Sandra Verheijden	Brabant Water

Vormgeving Shapeshifter.nl | Utrecht

STOWA-rapportnummer 2022-28
ISBN 978.90.5773.982.8

Copyright De informatie uit dit rapport mag worden overgenomen, mits met bronvermelding. De in het rapport ontwikkelde, dan wel verzamelde kennis is kosteloos verkrijgbaar.

Disclaimer Deze uitgave is met de grootst mogelijke zorg samengesteld. Niettemin aanvaarden de auteur(s) en de uitgever geen enkele aansprakelijkheid voor mogelijke onjuistheden of eventuele gevolgen door toepassing van de inhoud van dit rapport.

▶▶ VOORWOORD

Het Kennisimpuls Waterkwaliteit-project 'Vergrijzing van grondwater door menselijke invloeden met nadruk op langetermijneffecten' richt zich op de kwaliteit van grondwater op de lange termijn. Een van de bedreigingen voor een duurzaam gebruik van het grondwater is de aanwezigheid van veel verschillende antropogene stoffen. Hoewel veel van deze stoffen net onder de norm blijven vormen ze toch een bedreiging voor toekomstig gebruik. Echt schoon grondwater wordt steeds schaarser.

De nadelige effecten van menselijk ingrepen werken niet 1-op-1 door op de kwaliteit van het (diepere) grondwater; er zijn drie barrières die ervoor zorgen dat deze effecten worden vertraagd en verminderd.

- 1 Geohydrologische bescherming bestaat uit slecht doorlatende lagen die stoffen tegenhouden.
- 2 Bodembioologische bescherming wordt geboden door organismen in de bodem die stoffen afbreken.
- 3 Geochemische bescherming bestaat uit de aanwezigheid van o.a. mineralen in de ondergrond die stoffen vastleggen of afbreken.

Voorliggend rapport gaat over de geohydrologische barrière. In dit rapport zijn landsdekkende kaarten gemaakt die op regionale schaal aangeven waar veel kortsluitstroming kan optreden als bij het doorboren van beschermende kleilagen het boorgat niet goed wordt afgedicht. Hierbij is gewerkt met een 'best guess' scenario, waarbij het boorgat onbedoeld instort en daardoor wordt aangevuld met ondiep bodemmateriaal voordat het is aangevuld met afdichtklei of grout. Daarnaast is nog een extreem ongunstig scenario doorgerekend, waarbij het boorgat instort met grind of deels open blijft staan (holtes).

De kaarten kunnen bijvoorbeeld gebruikt worden in het beschermingsbeleid, of om te bepalen waar ontwikkeling van bodemenergie wenselijk is.

Ook voor de bodembioologische barrière en geochemische barrière zijn beschermingskaarten gemaakt. Deze worden in aparte rapportages toegelicht.

Eric Castenmiller (Provincie Limburg)

Voorzitter gebruikerscommissie 'Vergrijzing van grondwater door menselijke invloeden met nadruk op langetermijneffecten'

▶▶ INHOUD

	Kennisimpuls Waterkwaliteit in het kort	2
	Voorwoord	4
1	INLEIDING	6
2	METHODE	7
2.1	Actuele, potentiële en totale beschermkaart	7
2.2	Berekeningswijze potentiële lekkage flux (“totale beschermkaart”)	7
3	LANDELIJKE KAARTEN ‘KORTSLUITSTROMING BIJ DOORBORINGEN’	10
3.1	Actuele beschermkaart (stijghoogteverschillen)	10
3.2	Potentiële beschermkaart (weerstand van scheidende lagen)	10
3.3	Totale beschermkaart	11
4	DISCUSSIE TOEPASBAARHEID KAARTEN EN AANBEVELINGEN VOOR GEBRUIK	13
4.1	Mogelijkheden en beperkingen van de kaarten	13
4.2	Ervaring casus Woerden	13
4.3	Flux versus reistijd	14
5	AANBEVELINGEN VOOR NADER ONDERZOEK	15
6	REFERENTIES	16
BIJLAGE A	Basiskaarten en afgeleide kaarten NHI	17
BIJLAGE B	Stijghoogteverschillen	23
BIJLAGE C	Weerstand van scheidende lagen (C-waarden)	24
BIJLAGE D	Lekkage flux	25

▶▶ 1 INLEIDING

ACHTERGROND

Door antropogene activiteiten wordt ons schone, traag stromende grondwater tot steeds grotere diepten verontreinigd met veel verschillende stoffen. Deze ‘vergrijzing’ is een urgent probleem, bijvoorbeeld met het oog op de drinkwatervoorziening. Om het grondwater hier beter tegen te beschermen is meer aandacht en kennis nodig voor de factor ‘tijd’ bij het grondwaterbeheer. Het KIWK project “Vergrijzing van grondwater door menselijke invloeden met nadruk op langetermijneffecten”, richt zich daarom op de langetermijneffecten van menselijke ingrepen op de grondwaterkwaliteit.

De nadelige effecten van menselijk ingrepen op de grondwaterkwaliteit werken niet 1-op-1 door; er zijn drie barrières die ervoor zorgen dat deze effecten worden vertraagd en verminderd:

1. Geohydrologische bescherming bestaat bijvoorbeeld uit slecht doorlatende lagen. Daardoor wordt de verspreiding van stoffen tegen gegaan (vooral verticaal). Door fysieke ingrepen in de bodem staat deze barrière onder druk.
2. Bodembioïologische bescherming wordt geboden door organismen in de onverzadigde bodem en bouwvoor die stoffen afbreken. Daardoor verdwijnen schadelijke stoffen. Deze barrière staat onder druk door stoffen die in en op de bodem worden gebracht zoals nitraat, bestrijdingsmiddelen en hulpstoffen zoals EDTA daarin, geneesmiddelen, etc.
3. Geochemische bescherming bestaat door de aanwezigheid van reactieve mineralen en sedimentair organisch materiaal (SOM) in de ondergrond. Hierdoor kunnen verontreinigingen gebonden en (bio)chemisch afgebroken worden, maar de mate waarin wordt zowel bepaald door de aanwezige hoeveelheid als de reactiviteit van de mineralen en SOM.

GEOHYDROLOGISCHE BESCHERMING

Afgelopen decennia zijn in Nederland vele boringen uitgevoerd voor het plaatsen van putten (voor drinkwater, beregening, industriewatervoorziening, warmte- en koudeopslag, geothermie, olie- en gas), het plaatsen van waarnemingsbuisen (voor het monitoren van grondwaterstanden en -kwaliteit) en verkenningsboringen om de ondergrond te karakteriseren. Het aantal doorboringen zal komende decennia naar verwachting sterk toenemen voor aanleg van bijvoorbeeld open en gesloten bodemenergiesystemen (OBES en GBES) en infiltratiesystemen. Dit om te voldoen aan de ambities van de energietransitie en gevolgen van klimaatverandering het hoofd te bieden.

Doorboringen van kleilagen kunnen leiden tot kortsluitstromingen tussen watervoerende pakketten, als het boorgat rond de buis die in het gat wordt geïnstalleerd niet goed afgedicht wordt ter hoogte van de kleilaag of als de buis (na het buiten gebruik stellen) niet meer intact is. Daardoor kunnen verontreinigingen zich veel sneller verspreiden tussen watervoerende pakketten en is er een risico dat de grondwaterkwaliteit in de diepere watervoerende pakketten versneld vergrijsst. Ook kan menging optreden van water met verschillende oorspronkelijk kwaliteit: zoals bijvoorbeeld de verzilting van zoete grondwatervoorraden. Grondwatervoorraden kunnen daardoor minder goed bruikbaar worden voor de productie van drinkwater, industriewater, beregening en andere functies. Stakeholders zoals nationale en regionale overheden, initiatiefnemers van bijvoorbeeld kunstmatige infiltratiesystemen en bodemenergiesystemen (BES) en geothermiesystemen en waterbedrijven hebben behoefte aan inzicht in welke gebieden doorboringen van scheidende lagen tot een verhoudingsgewijs groot risico kunnen vormen voor de grondwaterkwaliteit en bescherming van zoetwatervoorraden. Daarmee kunnen ze hun grondwaterbescherming en planvorming voor ondergrondse energiesystemen afstemmen op de geologische potenties en kwetsbaarheden van een gebied. Landelijke kaarten met risico’s kunnen een hulpmiddel zijn om een eerste indruk te krijgen van het risico van doorboringen. Eerdere kaarten op dit vlak beslaan slechts een deel van Nederland (NOGEPA, 2016) of zijn gebaseerd op intussen verouderde gegevens zoals het grondwatermodel NHI2.0 (Huijser, 2017).

In dit werkpakket zijn landsdekkende kaarten gemaakt die op regionale schaal in beeld brengen waar (in potentie) verhoudingsgewijs veel kortsluitstroming kan optreden bij het doorboren van beschermende kleilagen. Hierbij is gewerkt met een ‘best guess’ scenario (waarbij het boorgat onbedoeld instort en daardoor wordt aangevuld met ondiep bodemmateriaal voordat het is aangevuld met afdichtklei of grout). Daarnaast is nog een extreem ongunstig scenario doorgerekend waarbij het boorgat instort met grind of deels open blijft staan (holtes). De aanleiding lag hierbij op doorboringen bij gesloten bodemenergiesystemen, maar de resultaten zijn ook bruikbaar voor andere type boringen en putten.

►► 2 METHODE

2.1 ACTUELE, POTENTIËLE EN TOTALE BESCHERMKAART

Voor dit onderzoek zijn verschillende kaarten gemaakt om risico's bij perforeren van kleilagen inzichtelijk te maken:

- Actuele beschermkaart - gekoppeld aan de grootte van de drijvende kracht voor stroming (stijghoogteverschillen) door de perforatie;
- Potentiële beschermkaart - gekoppeld aan de afname van de weerstand door een perforatie;
- Totale beschermkaart waarin stijghoogteverschillen en de afname van de weerstand door een perforatie gecombineerd zijn.

Deze kaarten zijn voor heel Nederland gemaakt.

De “actuele beschermkaart” brengt de stijghoogteverschillen over de verschillende regionale scheidende lagen in Nederland in beeld. Dus het verschil in stijghoogte tussen het watervoerende pakket boven en onder de beschouwde scheidende laag. Indien een bovenliggend watervoerend pakket ontbreekt, dan wordt het verschil tussen freatische grondwaterstand en de stijghoogte in het onderliggende watervoerende pakket bepaald. Het idee achter deze kaart, is dat een groter stijghoogteverschil tot een groter lekdebiet leidt, bij gelijke permeabiliteit en dimensies van het niet goed afgedichte boorgat.

Daarnaast is een tweede “potentiële beschermkaart” gemaakt die de weerstand (c-waarde) van de scheidende lagen in beeld brengt. Het idee achter deze kaart is dat er bij een grotere weerstand, meer beschermende werking “verloren” kan gaan.

Tot slot is een derde kaart gemaakt, de “totale beschermkaart”. Hiervoor is berekend hoeveel water (volumestroom) er bij de huidige stijghoogteverdeling door een niet goed afgesloten boorgat kan stromen. De berekeningswijze van de potentiële lekkage flux wordt in de volgende paragraaf toegelicht.

Bij het maken van de kaarten is uitgegaan van een boring voor een GBES systeem met een straal van het boorgat van 7.2 cm (Bonte *et al.*, 2015). De resultaten zijn echter ook representatief voor boringen met een grotere diameter, met dien verstande dat de potentiële lekkageflux dan navenant groter is.

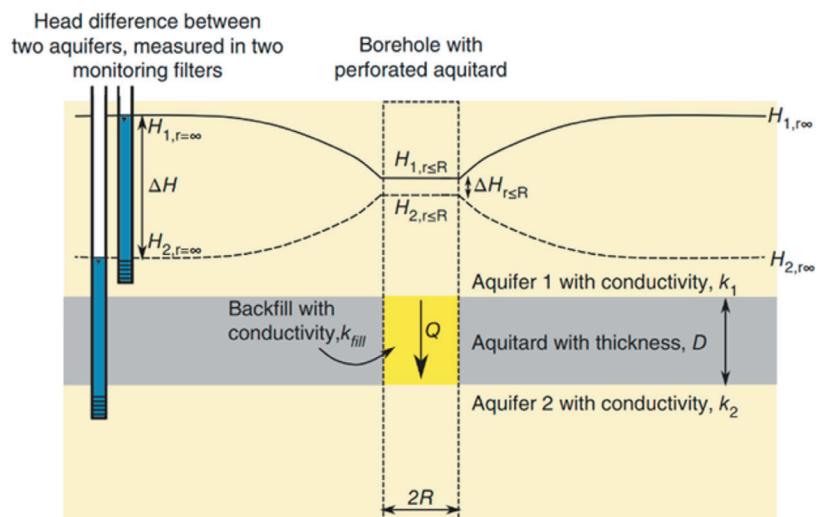
2.2 BEREKENINGSWIJZE POTENTIËLE LEKKAGE FLUX (“TOTALE BESCHERMKAART”)

Figuur 2.1 geeft het conceptuele model weer van de potentiële lekkage flux Q door een slecht doorlatende laag bij een onvolledige kleiafdichting.

FIGUUR 2.1

Conceptueel model van lekkage (Q) door een slecht doorlatende laag (grijs) bij een onvolledige kleiafdichting (donkergeel).

Bron: Bonte *et al.*, 2015.



De potentiële lekkage flux is berekend met een analytische formule voor de stationaire lekkage flux door een doorboorde slecht doorlatende laag (Vergelijking 2.1, Bonte *et al.*, 2015):

$$Q = \frac{R\Delta H}{\frac{D}{k_{fill}\pi R} + \frac{1}{4}\left(\frac{1}{k_1} + \frac{1}{k_2}\right)}$$

Vergelijking 2.1

Bij de bovenstaande vergelijking geldt:

- Q = Stationaire lekkage flux [m /d] door een doorboorde slecht doorlatende laag;
- R = Straal [m] van de doorboring. (0.072 m, zie [paragraaf 2.1](#))(Bonte *et al.*, 2015);
- ΔH = Stijghoogteverschil [m] over de slecht doorlatende laag; i.e. het verschil in stijghoogte tussen het watervoerende pakket boven (n) en onder (n+1) de slecht doorlatende laag;
- D = Dikte van de slecht doorlatende laag [m];
- k_{fill} = Doorlatendheid van de opvulling van het boorgat [m/d];
- k_n = Doorlatendheid watervoerend pakket boven (n=1) of onder (n=2) kleilaag [m/d].

De doorlatendheid van de opvulling van het boorgat (k_{fill}) kan sterk variëren bij een niet goed afgedicht boorgat, daardoor is het lastig om een realistische waarde hiervoor in te schatten (Hartog en Cirkel, 2017). Dit komt doordat een slechte afdichting kan ontstaan door verschillende faalmechanismen en er weinig praktijkgegevens beschikbaar zijn. Uit De Graaf *et al.* (2021) blijkt dat de afdichting niet altijd volgens de normen (BRL) wordt uitgevoerd. Daarnaast geldt voor de deklaag dat doorborende werkzaamheden zoals de aanleg van drainage en spuitboringen tot 10 m voor bronbemaling, buiten protocol BRL 2101 kunnen worden uitgevoerd. Samengevat kan een slechte afdichting ontstaan door één van de volgende oorzaken (faalmechanismen):

Oorzaken tijdens aanleg

- Invallen van klei in het boorgat: e.g. klei uit de boorgatwand valt in het onderliggende watervoerend pakket
- Invallen van zand/grind in het boorgat: e.g. zand/grind van bovenliggende lagen komt terecht in de slecht doorlatende laag
- Holtevorming door de inzet van een (te sterk) verdund bentoniet mengsel (indien het boorgat wordt opgevuld met een bentoniet mengsel)
- De beoordelingsrichting BRL 2021 schrijft voor dat de permeabiliteit van de klei-afdichting maximaal 10⁻⁹ m/s (0.0000864 m/dag) mag zijn. Kleilagen kunnen een permeabiliteit hebben die meerdere ordes van grootte lager is. Zelfs een goed afgedicht boorgat heeft dan een hogere permeabiliteit dan de doorboorde kleilaag.

Oorzaken na aanleg

Ook bij boorgaten die correct zijn afgedicht, kan sprake zijn van een verhoging van de permeabiliteit t.o.v. de oorspronkelijke slecht doorlatende laag:

- Indien het boorgat wordt opgevuld met cement, toename permeabiliteit van het cement door scheurvorming, als gevolg van een krimp van de kleiafdichtingen of door ouderdom
- Daarnaast wordt door de Boer *et al.* (2021) gewezen op het risico dat kleilagen rondom het boorgat dispergeren en meer permeabel worden door de toepassing van cementgebaseerd groutmengsel met een hoge pH
- Afdichtende werking van zwelkleikorrels kan sterk afnemen als een olieachtige zaklaag doorboord wordt. De olie vult de poriën op waardoor de kleikorrels niet kunnen opzwellen.

De permeabiliteit (k-waarde) van het boorgat kan sterk verschillen, afhankelijk van welk faalmechanisme optreedt. Bij het invallen van klei (1^e faalmechanisme) zal de permeabiliteit van het boorgat naar verwachting laag zijn (<< 1 m/d) aangezien de permeabiliteit van klei laag is. Bij het invallen van zand en/ of grind uit bovenliggende lagen (2^e faalmechanisme) is de permeabiliteit afhankelijk van het bovenliggende watervoerende pakket. In de meest ongunstige situatie kan grind invallen met een permeabiliteit tot wel 1000 m/d. Watervoerende pakketten in Nederland hebben over het algemeen een

lagere horizontale permeabiliteit van orde grootte 10 tot 100 m/d. De verticale permeabiliteit is vaak lager, waardoor de permeabiliteit van een ingestort boorgat ook lager kan uitvallen; zeker wanneer er ook nog menging optreedt met klei. Scheuren en holtevorming (3^e en 4^e faalmechanisme) kunnen in theorie tot een zeer hoge permeabiliteit leiden. Er is weinig bekend over de permeabiliteit bij scheurvorming in de praktijk. Dit hangt ook af van in hoeverre de scheuren doorlopen over het gehele dieptetraject van de doorboorde scheidende laag en derhalve de twee watervoerende pakketten met elkaar verbinden. Ook is niet duidelijk of de scheuren na verloop van tijd weer kunnen afdichten door bijvoorbeeld inspoeling van deeltjes. Door de Boer et al (2021) is de permeabiliteit na het oplossen van kleilagen (6^e faalmechanisme) gesimuleerd met een waarde van 10^{-5} m/s.

Kortom, er is veel onzekerheid omtrent de mogelijke permeabiliteit van een (foutief) afgedicht boorgat. Om een beeld te geven van de mogelijke variatie is de potentiële lekkage flux bij een slechte afdichting bepaald bij een doorlatendheid (k_{fil}) van 1 m/d, en een extreem hoge doorlatendheid van 1000 m/d die het effect geeft van de situatie waarin het boorgat volledig is gevuld met grind. Een k_{fil} van 1 m/d geeft de situatie weer van het bovengenoemde faalmechanisme 'invallen van klei in het boorgat'. Met een k_{fil} van 1000 m/d wordt het extreme faalmechanisme 'invallen van grind in het boorgat' gesimuleerd. Ter vergelijking de BRL 2021 schrijft voor dat de permeabiliteit van de klei-afdichting maximaal 10⁻⁹ m/s ofwel 0.0000864 m/dag mag zijn.

Gebruikte geo-informatie

De berekeningen zijn uitgevoerd op basis van informatie uit het Landelijk Hydrologische Model (LHM), dat onderdeel is van het Nationaal Hydrologisch Instrumentarium (NHI). LHM-versie 4.1 is gebruikt als uitgangspunt voor de berekening van de potentiële lekkage flux. Het LHM4.1 heeft acht watervoerende pakketten (WVP) en zeven slecht doorlatende lagen (SDL) en een gridgrootte 250 meter bij 250 meter. Op de website van Nederlands Hydrologisch Instrumentarium ([NHI](#)) wordt op korte termijn een rapportage opgenomen met een overzicht van welke REGIS II v2.2 formaties zijn opgenomen in de verschillende modellagen van LHM4.1.

De dikte van de slecht doorlatende lagen (D) is overgenomen uit het LHM4.1. Het stijghoogteverschil (ΔH) en de doorlatendheden van de watervoerend pakketten (k_n) zijn als volgt bepaald:

- De lekkage flux is berekend op basis van de gemiddelde stijghoogte in de periode 2011 t/m 2018.
- De doorlatendheid van de watervoerende pakketten (k_n) is berekend door de transmissiviteit van de watervoerende pakketten te delen door de dikte van de watervoerende pakketten (doorlatendheid is niet beschikbaar in het LHM).

In bijlage A zijn de gebruikte basis- en afgeleide kaarten van het Landelijk Hydrologische Model (LHM4.1) opgenomen:

- A.1: Top van de watervoerende pakketten (WVP1 t/m WVP8) in meter ten opzichte van NAP;
- A.2: Basis van de watervoerende pakketten (WVP1 t/m WVP8) in meter ten opzichte van NAP;
- A.3: Doorlatendheid in meter per dag (m/dag) voor de acht watervoerende lagen (WVP1 t/m WVP8);
- A.4: Dikte van de slecht doorlatende lagen (SDL 1 t/m SDL7) in meters;
- A.5: Transmissiviteit van de watervoerende pakketten (WVP1 t/m WVP8) in m²/dag;
- A.6: Gemiddelde stijghoogte over de periode 2011-2018 van de watervoerende pakketten (WVP1 t/m WVP8) in m t.o.v. NAP.

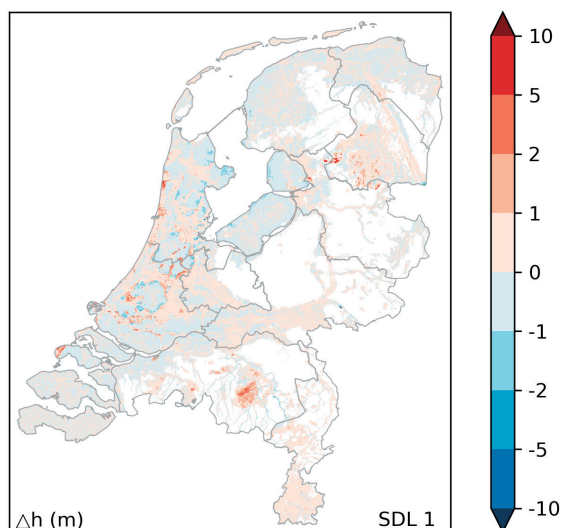
▶▶ 3 LANDELIJKE KAARTEN ‘KORTSLUITSTROMING BIJ DOORBORINGEN

3.1 ACTUELE BESCHERMKAART (STIJGHOOGTEVERSCHILLEN)

De actuele risico's zijn gekoppeld aan stijghoogteverschillen over scheidende lagen. In [Bijlage B](#) zijn kaarten opgenomen met per slecht doorlatende laag het verschil in stijghoogte tussen het watervoerende pakket erboven en er direct onder. Deze kaarten geven het actuele beeld van de drijvende kracht voor mogelijke kortsluitstroming per slecht doorlatende laag weer. [Figuur 3.1](#) geeft de kaart voor verschil in stijghoogte tussen het watervoerende pakket boven (WVP1) en onder (WVP2) de eerste slecht doorlatende laag (SDL1). In de gebieden waar WVP1 ontbreekt, maar wel stijghoogteverschillen over SDL1 worden berekend, wordt gebruik gemaakt van freatische grondwaterstanden. SDL1 is in West-Nederland de Holocene deklaag. Meer informatie over de koppeling tussen REGIS formaties en LHM modellagen komt binnenkort op de website van NHI beschikbaar.

FIGUUR 3.1

Actuele beschermkaart (stijghoogteverschillen in meter) voor SDL1. Blauw is kwel, rood is infiltratie. Waar SDL1 ontbreekt is de kleur wit. De kaarten voor de overige SDL's zijn opgenomen in bijlage B.



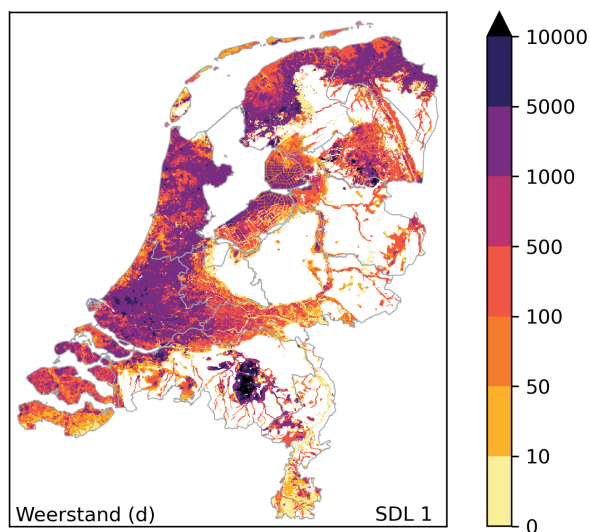
Het verschil in stijghoogte over de eerste slecht doorlatende laag (SDL1) ligt over het algemeen tussen -1 en +1 m. Eén van de uitzonderingen is een hoger (positief) stijghoogteverschil in de Slenk nabij Eindhoven (corresponderend met infiltratie). Over SDL2 zijn de verschillen hoger dan 2 m nabij de Brabantse Wal, Zundert en Baarle-Nassau. Over SDL3 zijn de stijghoogteverschillen groter dan 2 m in de provincie Noord-Brabant en de Veluwe en kleiner dan -2 meter op de grens van de Provincies Gelderland-Overijssel. Over SDL4 zijn minder stijghoogteverschillen zichtbaar, maar vergelijkbaar met SDL1 en 2, op lokale verschillen na. Opvallend op deze kaart zijn de grote verschillen in het noorden van Zuid-Limburg (>10 m). Daarnaast zijn er grote negatieve stijghoogteverschillen (<-5 m) in het gebied tussen Nijkerk en de Flevopolder. Over SDL5 zijn stijghoogteverschillen groter dan 2 m op Zuid-Beveland, Veluwe, De Peel en in Zuid-Limburg. Op Zuid-Beveland zijn deze verschillen mogelijk artefacten van verschillen in dichtheid van het grondwater die niet in het model verwerkt zijn. In het midden van Limburg en Noord-Brabant komen grotere negatieve stijghoogteverschillen (<-2 m) voor. De stijghoogteverschillen over SDL6 zijn het grootst in midden Limburg, waar wederom verschillen kleiner dan -2 m voorkomen. SDL7 toont hetzelfde beeld, waarbij het grootste verschil ten opzichte van SDL6 optreedt in Zuid-Beveland. Daar zijn relatief grote stijghoogteverschillen zichtbaar.

3.2 POTENTIËLE BESCHERMKAART (WEERSTAND VAN SCHEIDENDE LAGEN)

De “potentiële beschermkaart” brengt de weerstand (c-waarde) van de scheidende lagen in beeld. Bij een grotere weerstand kan door doorboren meer beschermende werking “verloren” gaan. Een voorbeeld van de potentiële beschermkaart voor SDL1 is gegeven in [Figuur 3.2](#). De kaarten voor alle SDL's zijn opgenomen in [bijlage C](#).

FIGUUR 3.2

Potentiële beschermkaart (c-waarden in dagen) voor SDL1. De kaarten voor de overige SDL's zijn opgenomen in bijlage C.

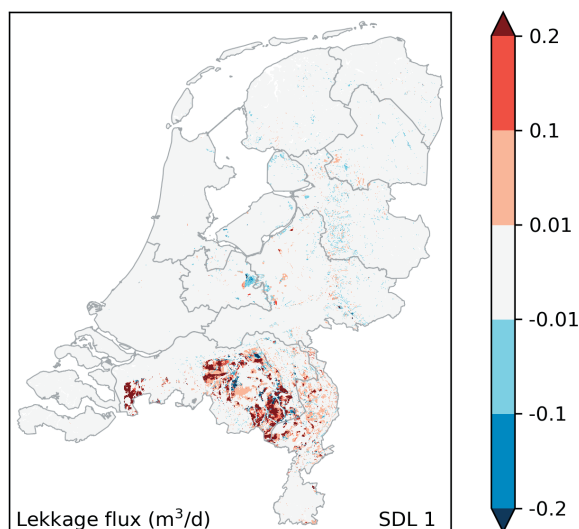


3.3 TOTALE BESCHERMKAART

In bijlage D.1 is landsdekkend weergegeven wat het potentiële lekdebiet is per gridcel van 250 m bij 250 m bij een boorgat dat is opgevuld met materiaal met een k-waarde van 1 m/d. De kaart geeft dus een indruk van het lekdebiet per boorgat. Een positieve lekkage flux staat voor een flux van het bovenliggende watervoerende pakket naar het onderliggende watervoerende pakket (zie ook Figuur 2.1). Een voorbeeld van het potentiële lekkage flux over SDL1 is gegeven in Figuur 3.3.

FIGUUR 3.3

Totale beschermkaart voor SDL1, met het potentiële lekdebiet per gridcel van 250 m bij 250 m over SDL1 bij een boorgat dat is opgevuld met materiaal met een k-waarde van 1 m/d. De kaarten voor de overige SDL's zijn opgenomen in bijlage D.1.

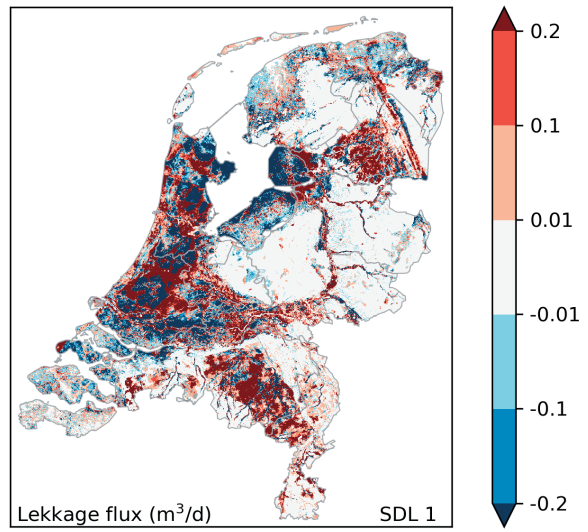


Bij deze kaarten (zie bijlage D.1) valt op dat met name in het oosten van Noord-Brabant een grote lekkage flux optreedt van WVP1 naar WVP2 en van WVP2 naar WVP3. Meer de diepte in valt vervolgens op dat met name in noordoost Nederland over SDL6 en SDL7 zowel een positieve als negatieve flux van 0.01-0.1 m³/dag ontstaat.

In bijlage D.2 is landsdekkend weergegeven wat het potentiële lekdebiet is bij een boorgat dat is opgevuld met materiaal met een k-waarde van 1000 m/d. Zoals verwacht kan worden, is de potentiële lekkage flux door het boorgat bij een k-waarde van 1000 m/d veel groter dan bij een k-waarde van 1 m/d. In Figuur 3.4 is een voorbeeld opgenomen van het potentiële lekdebiet over SDL1. Over iedere slecht-doorlatende laag (SDL1 t/m SDL7, zie bijlage D) is zowel een positieve als negatieve lekkage flux zichtbaar groter dan 0.2 m³/dag.

FIGUUR 3.4

Totale beschermkaart voor SDL1, met het potentiële lekdebiet per gridcel van 250 m bij 250 m over SDL1 bij een boorgat dat is opgevuld met materiaal met een extreem hoge k-waarde van 1000 m/d. De kaarten voor de overige SDL's zijn opgenomen in bijlage D.2.



►► 4 DISCUSSIE TOEPASBAARHEID KAARTEN EN AANBEVELINGEN VOOR GEBRUIK

4.1 MOGELIJKHEDEN EN BEPERKINGEN VAN DE KAARTEN

De kaarten geven een indicatie van de potentiële kortsluitstroming tussen de watervoerende pakketten bij doorboringen. Ze kunnen bijvoorbeeld gebruikt worden in het beschermingsbeleid, of juist om te bepalen waar ontwikkeling van bodemenergie wenselijk is.

- Eerste selectie van gebieden waar doorboringen minder wenselijk zijn, of waar extra aandacht aan zorgvuldige uitvoering gegeven moet worden en of toezicht en handhaving;
- Eerste selectie van maximale dieptes per gebied voor grotere aantallen doorboringen zoals voor gesloten bodemenergiesystemen.

Bij het gebruik moet rekening houden worden met de beperkingen:

- Gemaakt met grid 250 m bij 250 m voor een landelijke schaal en met als invoer LHM-model, welke ook onzekerheden kent (bijvoorbeeld schematisatie van SDL);
- De kaarten zijn gemaakt voor doorlatendheden van 1 en 1000 m/d. In werkelijkheid is het niet goed bekend, welke doorlatendheid kan worden verwacht in een slecht afgedicht boorgat;
- Gemiddelde stijghoogtes voor de periode 2011-2018 als drijvende kracht. Deze kunnen veranderen bijvoorbeeld door bijplaatsen van grondwateronttrekkingen.

4.2 ERVARING CASUS WOERDEN

De toepasbaarheid van de landelijke 'totale beschermkaart' is nagegaan voor een gebied rond Woerden (Van Vliet et al, 2022). De landelijke kaarten zijn gecombineerd met de locaties waar slecht doorlatende lagen zijn doorboord voor de aanleg van bodemenergiesystemen en grondwateronttrekkingen. Voor Woerden zijn de kaarten van de potentiële lekkage flux over SDL1 (deklaag), SDL2 (ST-k, Sterksel klei) en SDL3 (WAK1, Waalre klei 1) van belang. De slecht doorlatende laag van de Sterksel klei komt niet onder heel Woerden voor.

De huidige resolutie (250x250 m) van de landelijk kaart levert bij Woerden een nuttig eerste beeld op, waaruit blijkt dat het in Woerden belangrijk is dat er aandacht is voor het realiseren van goede afdichtingen.

Bij een slechte afdichting met een k -waarde van 1 m/dag zien we beperkte effect. Echter bij een extreem slechte afdichting met een k -waarde van 1000 m/d zijn forse lekkagefluxen mogelijk. Dit zien we bij alle slecht doorlatende lagen die in Woerden zijn doorboord: SDL1, SDL2 en SDL3.

De flux is voornamelijk van bovenliggende naar onderliggende watervoerende pakketten. Dit betekent dat onder het centrum van Woerden verspreiding van de aanwezige VOCL-verontreiniging naar diepere watervoerende pakketten sneller zou kunnen plaatsvinden.

De kaarten zijn gemaakt met een 250x250 m grid voor een landelijke schaal. Regionaal geven deze kaarten voldoende inzicht, waardoor ze indicatief zijn toe te passen op een lokale schaal als de gemeente Woerden. Voor detail analyse op lokale schaal zijn de kaarten niet geschikt. Verder is het van belang om bij toepassing goed te vermelden dat deze kaarten zijn gemaakt voor slechts twee situaties: een 'best guess' en 'worst case' (extreme hoge doorlatendheid) situatie. De praktijk zit hier ergens tussenin en zo moeten de resultaten dan ook geïnterpreteerd worden afhankelijk van de toepassing.

In de casus Woerden is met behulp van reactief transport modellering een aantal hypothetische worst case scenario's doorgerekend om inzicht te krijgen in de invloed van bodemenergiesystemen op de verspreiding van de aanwezige verontreinigingen. In deze scenario's is een lekkage langs de boorgatwand gesimuleerd.

Uit de hypothetische worst case scenario's blijkt dat de aanleg van bodemenergiesystemen tot in diepere watervoerende pakketten ter plaatse van de grondwaterverontreinigingspluim (worst case scenario voor wat betreft het doorboren van de scheidende laag en de slechte afdichting van de boringen) een aanzienlijke invloed kan hebben op de kwaliteit van het grondwater in de diepere watervoerende pakketten (Van Vliet et al, 2022). In Van Vliet et al (2022) zijn de bevindingen per hypothetisch scenario verder toegelicht. Uit deze modellering volgen geen nieuwe bevindingen voor de hier besproken landelijke kaart 'doorboringen'.

4.3 FLUX VERSUS REISTIJD

Het is belangrijk om te realiseren dat de kaarten inzicht geven in de netto toename van de wegzijging (of kwelflux). Echter, de waterkwaliteitsrisico's van watervoerende pakketten worden onder goed afdichtende kleilagen voor een belangrijk deel juist bepaald door de preferente stroming via de boorgaten (van der Schans, 2021).

Onderstaande Tabel 4.1 illustreert het effect van kortsluitstroming op zowel de totale flux in een woonwijk als de reistijd middels enkele indicatieve berekeningen:

- Variant 1 laat zien dat bij een boorgat dat conform BRL 2100 is afgedicht met een k-waarde van 10⁻⁹ m/s, de verblijftijd tussen WVP1 en WVP2 afneemt van circa 6000 jaar (2.314815 dagen) naar 600 jaar. Uiteraard is dit afhankelijk van de huidige permeabiliteit van de kleilaag. Indien deze groter is dan 10⁻⁹ m/s dan kan de reistijd ook toenemen.
- Bij variant 2 en 3 is de k-waarde van het boorgat een factor 10 hoger en de reistijd navenant lager (60 jaar).
- Bij variant 4 is de k-waarde van het boorgat gelijk aan het bovenliggende watervoerend pakket. De reistijd bedraagt dan slechts 2 dagen.

De gemiddelde of effectieve permeabiliteit van de woonwijk (K_{eff}) en het totale debiet zijn in al deze varianten min of meer gelijk aan de oorspronkelijke situatie. Variant 3 en 4 hebben eenzelfde lekdebet, maar de reistijd van variant 4 is veel korter. Afhankelijk van de toepassing is het nuttig om ook rekening te houden met reistijdverdeling en stofgedrag.

TABEL 4.1

Indicatieve berekeningen naar de invloed van de permeabiliteit van afdichtmateriaal op het lekdebet van boorgaten en de verblijftijd (van der Schans 2021). De geohydrologische invoerparameters zijn overgenomen uit de Boer et al (2021)

			woonwijk	Variant boorgat			
				1	2	3	4
				K _{bg} conform BRL	K _{bg} 10% lager t.o.v. 1 ^{ste} variant	100 extra boorgaten	K _{bg} gelijk aan K _{klei}
Invoerparameters							
aantal boorgaten	n	-	n.v.t.	1	1	100	1
permeabiliteit kleilaag/ boorgat	K _{klei} , K _{bg}	m/s	1.00E-10	1.00E-09	1.00E-08	1.00E-08	1.00E-04
stijghoogteverschil tussen wvp's	ΔH	m	5	5	5	5	5
dikte scheidende laag	D _{sdl}	m	10	10	10	10	10
diameter boorgat	∅	m		0.15	0.15	0.15	0.15
doorstroomde oppervlak (bodemplussen verwaarloosd)	A	m ²	67600	0.02	0.02	1.77	0.02
Resultaat berekening							
debet over kleilaag/ boorgat	Q	m ³ /d	2.92E-01	7.6E-07	7.6E-06	7.6E-02	7.6E-02
verblijftijd in kleilaag/ boorgat	Δt	d	2,314,815	231,481	23,148	23,148	2.31
effectieve permeabiliteit	K _{eff}	m/s		1.00E-10	1.00E-10	1.26E-10	1.26E-10

▶▶ 5 AANBEVELINGEN VOOR NADER ONDERZOEK

- Nagaan hoe (goed) deze kaart toepasbaar is op lokale schaal door het vergelijken van de uitkomsten met meer gedetailleerde studies;
- Combineren met data/kaarten met grondwaterkwaliteitsgegevens om in beeld te brengen waar de grote verschillen in grondwaterkwaliteit over slecht doorlatende lagen zich bevinden. De gevolgen voor de grondwaterkwaliteit zijn bijvoorbeeld groter bij verstoring van redox zones, zout upconing of doorboring van verontreinigingspluimen.

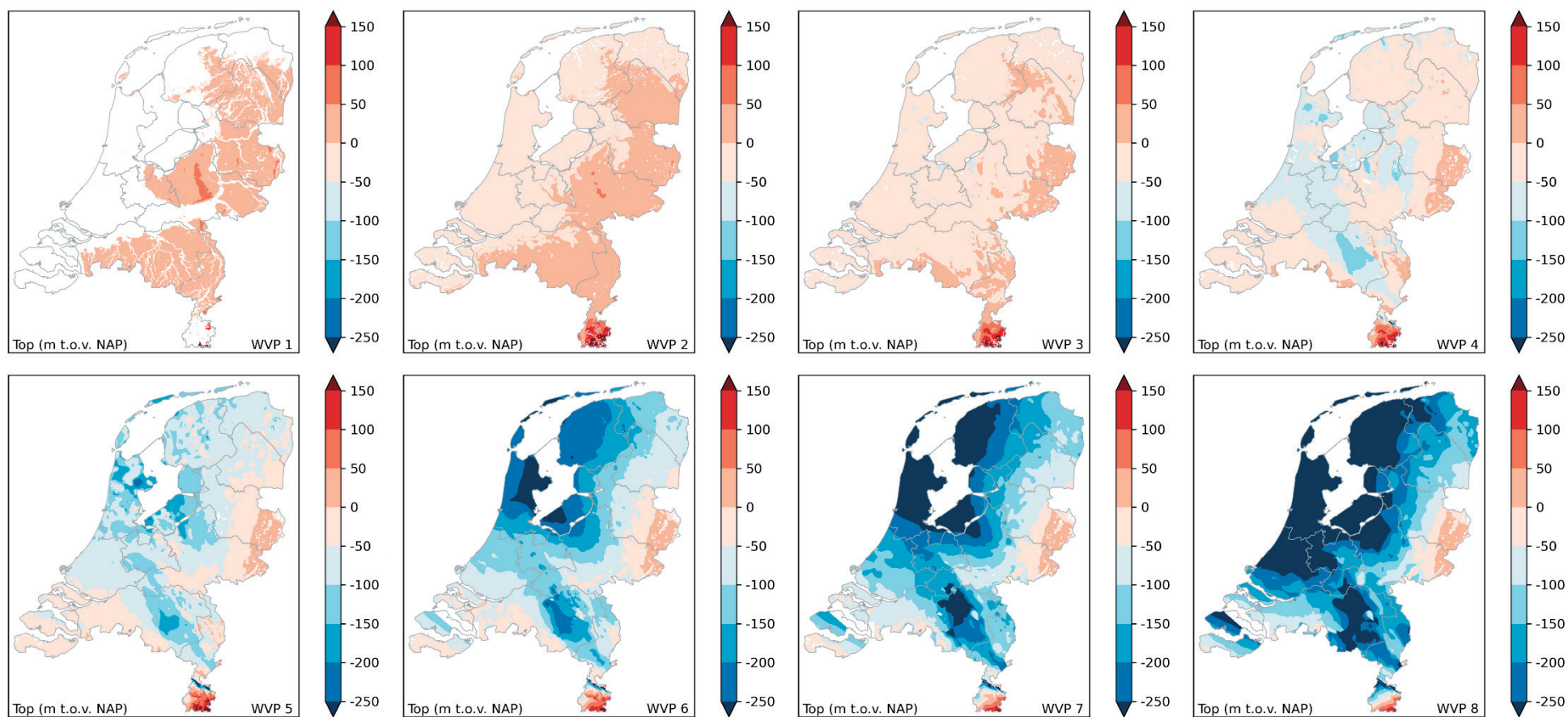
▶▶ 6 REFERENTIES

- De Boer, C.V., Griffioen, J., Menkovic, A., van Vliet, M.E., Zaadnoordijk, W.J. (2021). Grondwaterkwaliteitsrisico's van bodemenergiesystemen door doorboren van kleilagen in de Brabantse situatie, TNO-rapport TNO 2021 R11454, TNO Geologische Dienst Nederland, Utrecht.
- Bonte M., Zaadnoordijk W.J., Maas K. (2015) A simple analytical formula for the leakage flux through a perforated aquitard. Groundwater 53:638-644. <https://doi.org/10.1111/gwat.12239>.
- De Graaf A., Bloemendal M., van der Schans M.L. (2021). Aanvullen van boorgaten voor gesloten bodemenergiesystemen: Verkenning van en voorstellen tot verbetering van de kwaliteitsboring. BTO-rapport 2021.004. Nieuwegein: KWR. <https://library.kwrwater.nl/publication/61812832>
- Hartog, N., Cirkel, D.G. (2017). Grondwatermonitoring bij Geothermieputten. BTO-rapport 2017.075. Nieuwegein: KWR. <https://library.kwrwater.nl/publication/55459247/>
- Huijser, F. (2017). Risk of leakage flux in the Netherlands caused by the installation of borehole thermal energy storage systems. Bachelor thesis, Utrecht University, The Netherlands.
- Nederlands Hydrologisch Instrumentarium (NHI), <https://www.nhi.nu/nl/>
- NOGEPa (2016). Industry standard No 41. Well Engineering and Construction
- Van der Schans, M.L. (2021). Reflectie op de conceptrapportage "grondwaterkwaliteitsrisico's van bodemenergiesystemen door het doorboren van kleilagen in de Brabantse situatie", Nieuwegein, KWR 2021.076
- Van Vliet, Mariëlle, Frank Swartjes, Annemieke Marsman, Peter Rood (2022). Onderzoek naar de invloed van de aanleg van bodemenergiesystemen op vergrijzing van grondwater - Case study Woerden, KIWK-rapport.

►► BIJLAGE A BASISKAARTEN EN AFGELEIDE KAARTEN NHI

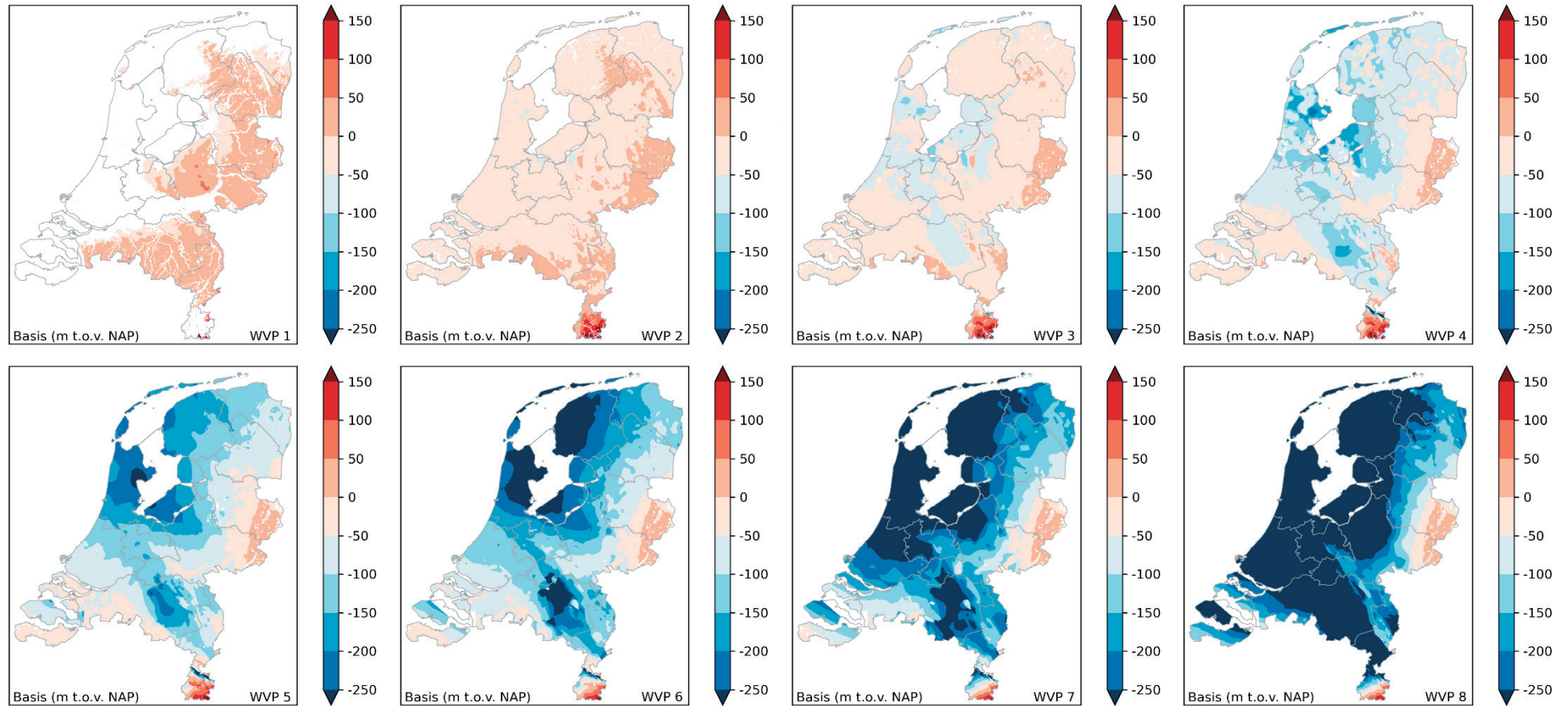
A.1 TOP WATERVOEREND PAKKET (WVP)

Onderstaande kaarten tonen de diepteligging van de top (ofwel bovenkant) van de watervoerende pakketten (WVP 1 t/m WVP8) in meter ten opzichte van NAP. Als WVP niet voorkomt is de kleur wit.



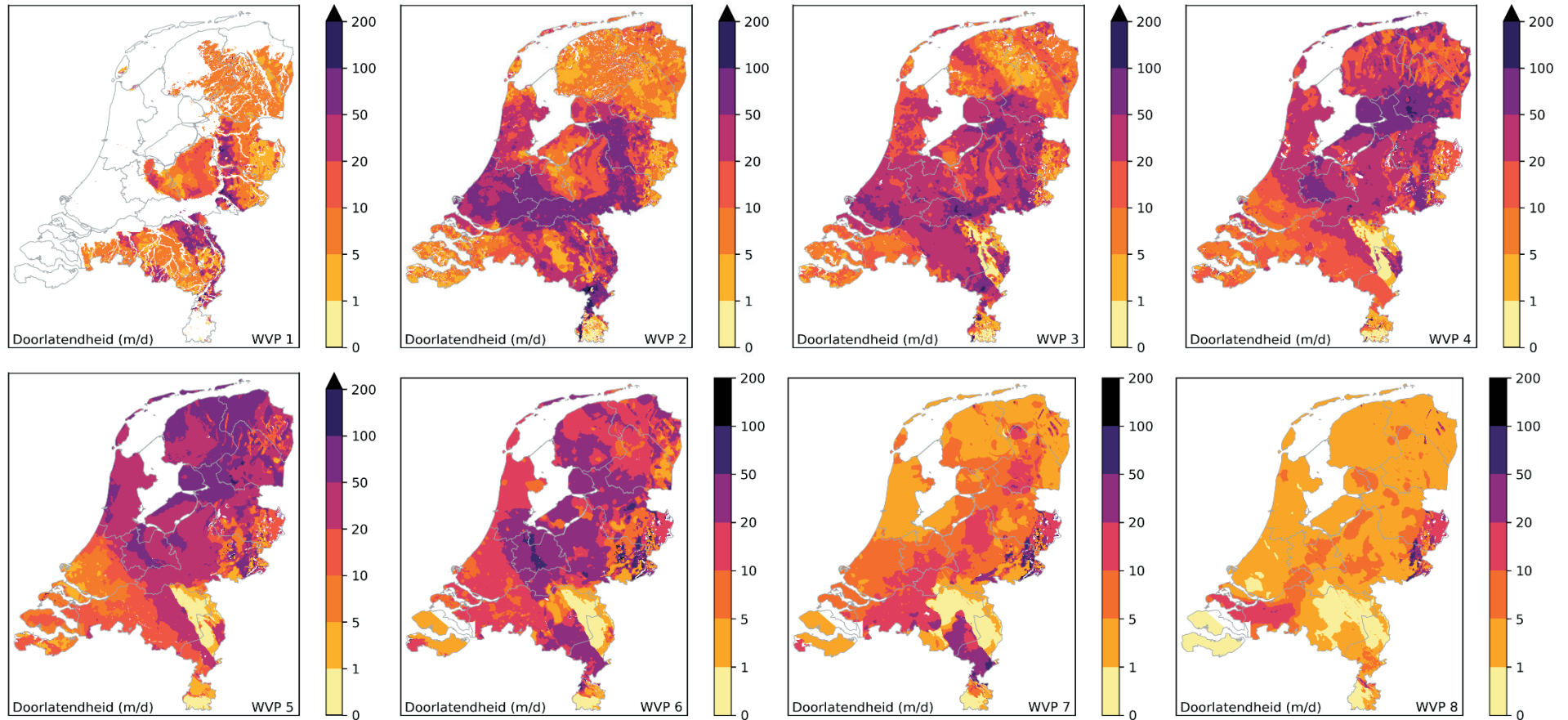
A.2 BASIS WATERVOEREND PAKKET (WVP)

Onderstaande kaarten tonen de diepteligging van de basis (ofwel onderkant) van de watervoerende pakketten (WVP 1 t/m WVP8) in meter ten opzichte van NAP. Als WVP niet voorkomt is de kleur wit.



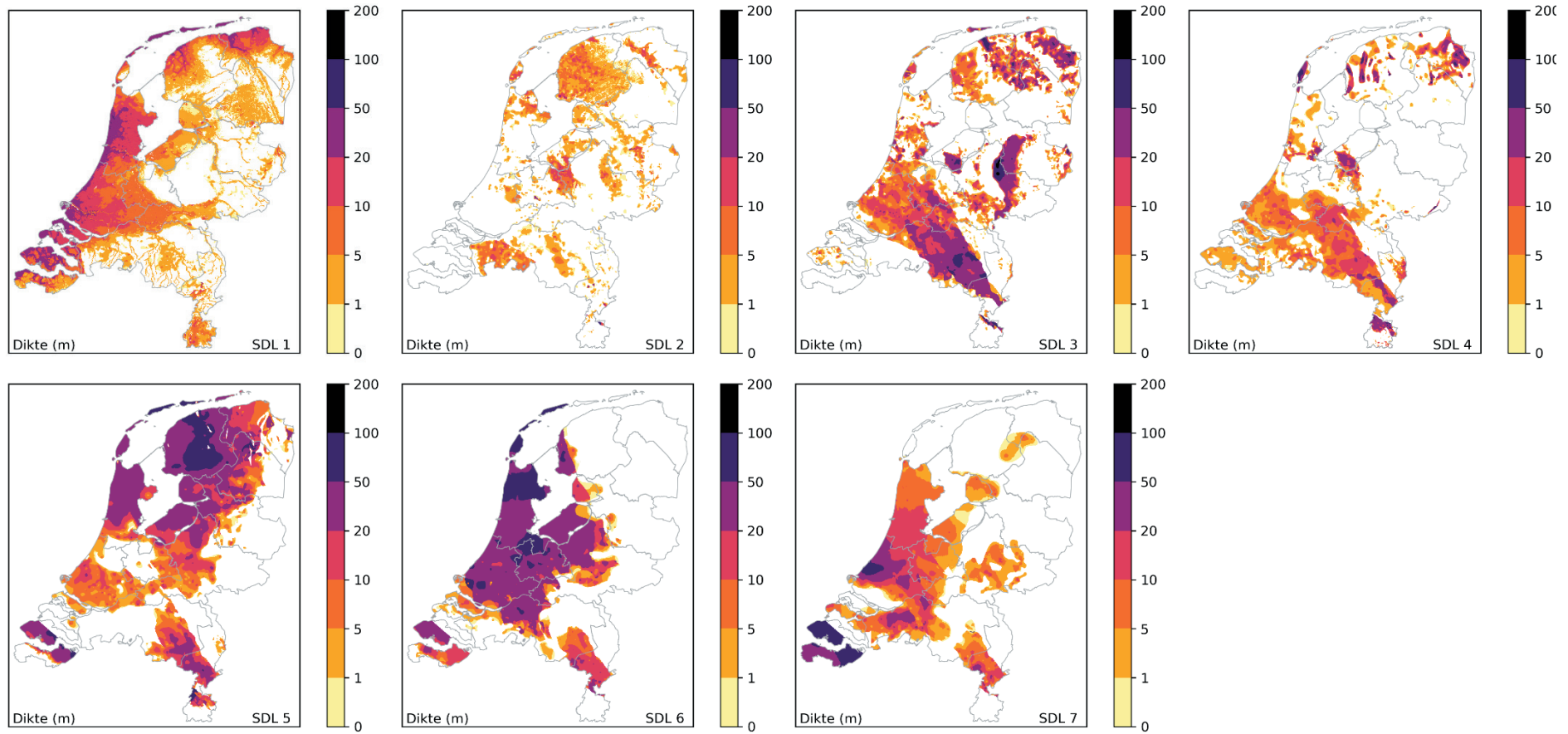
A.3 DOORLATENDHEID

Onderstaande kaarten tonen de doorlatendheid ofwel permeabiliteit in meters per dag (m/dag) voor de acht watervoerende lagen (WVP1 t/m WVP8). Als WVP niet voorkomt is de kleur wit.



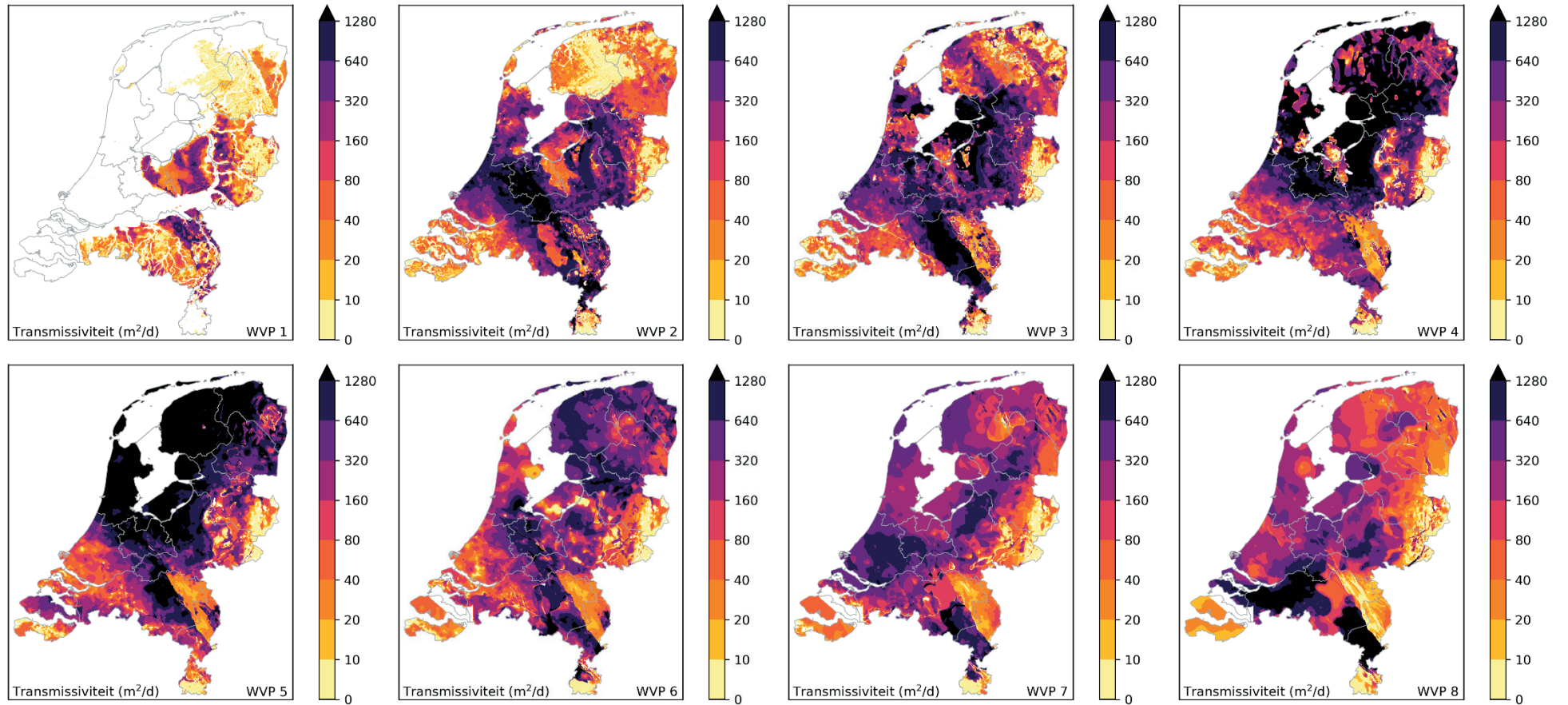
A.4 DIKTE SLECHT DOORLATENDE LAGEN

Onderstaande kaarten tonen de dikte van de slecht doorlatende lagen (SDL 1 t/m SDL7) in meters. Als SDL niet voorkomt is de kleur wit.



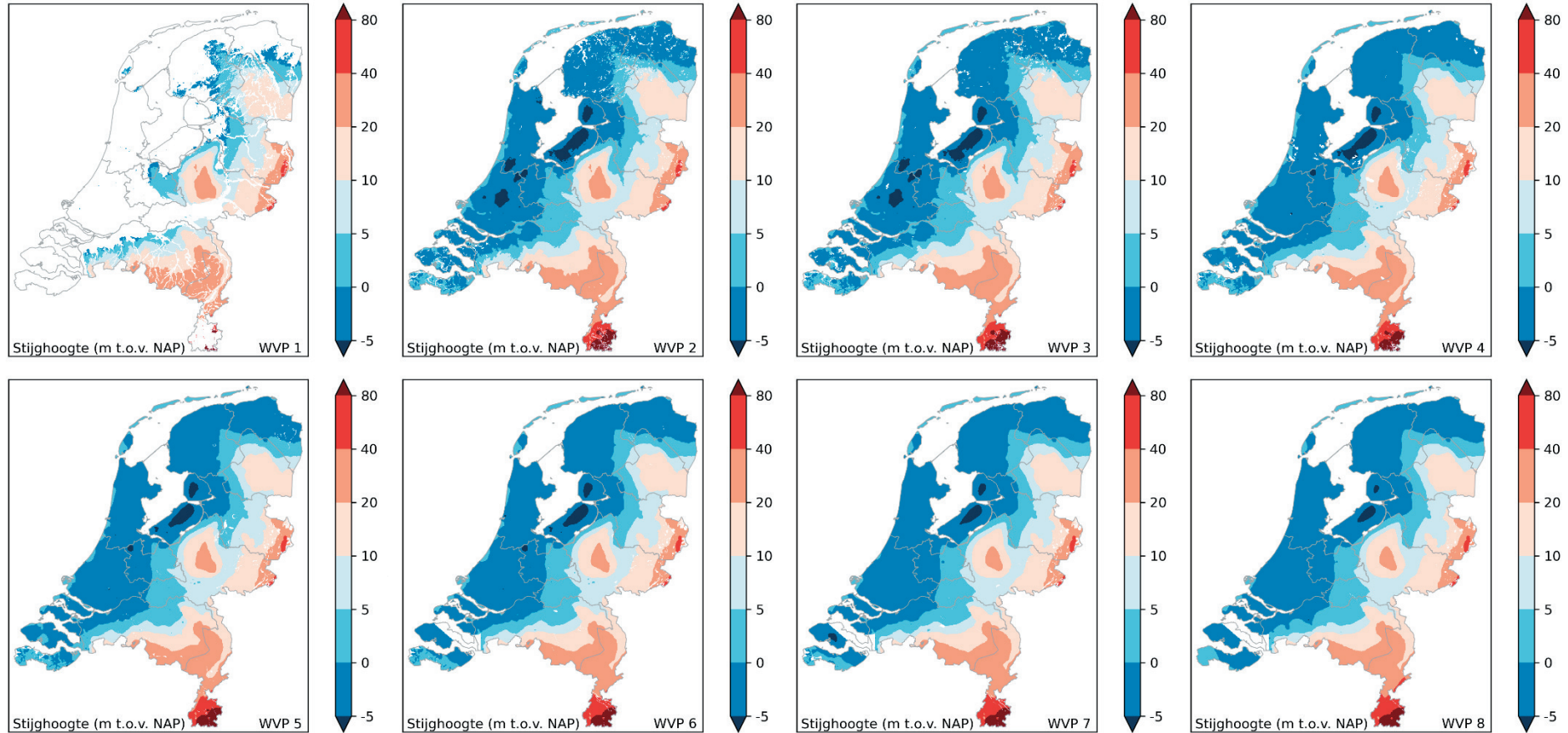
A.5 TRANSMISSIVITEIT WATERVOERENDE PAKKETTEN

Onderstaande kaarten tonen de transmissiviteit van de watervoerende pakketten (WVP1 t/m WVP8) in m²/dag; Als WVP niet voorkomt is de kleur wit.



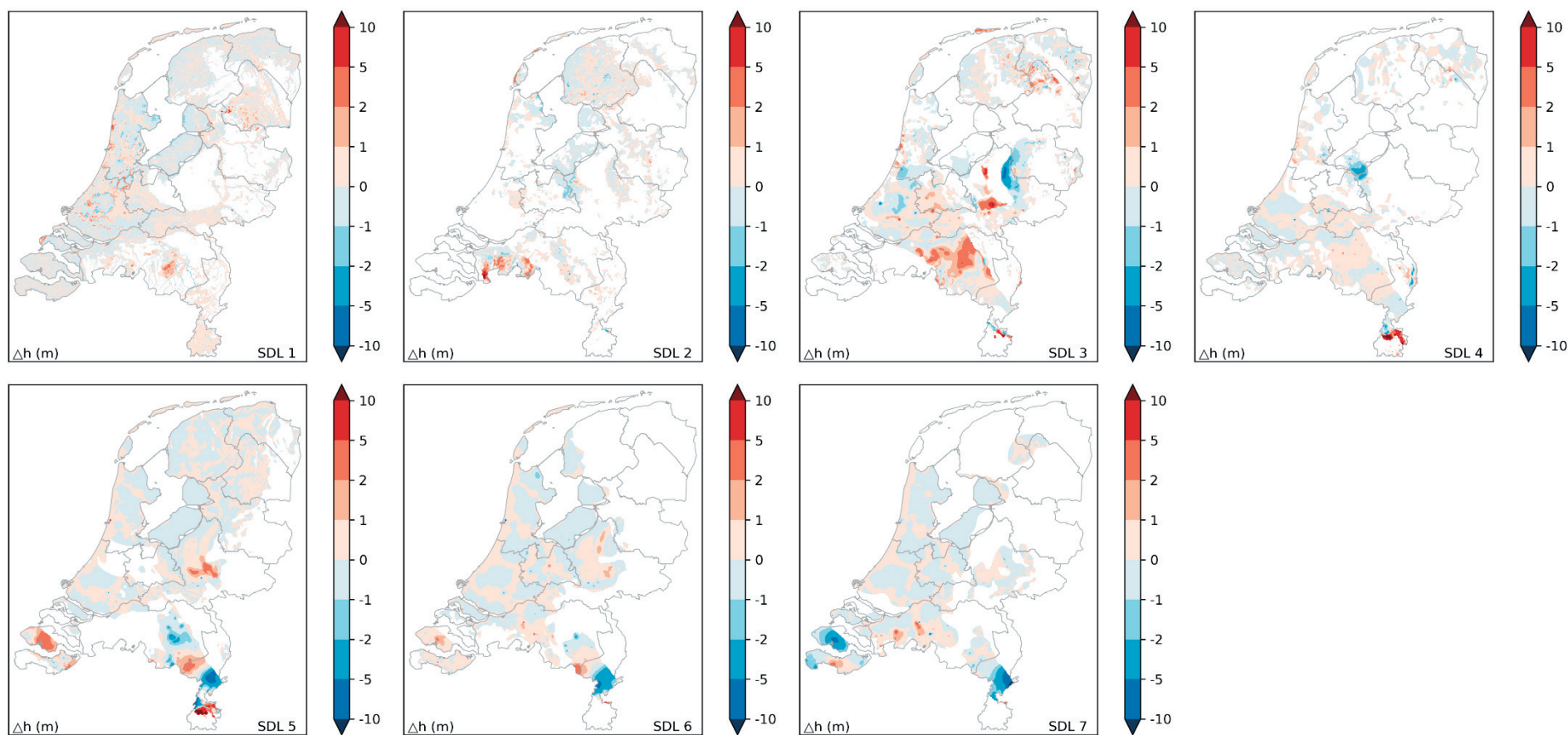
A.6 STIJGHOOGTEN WATERVOERENDE PAKKETTEN

Onderstaande kaarten tonen de gemiddelde stijghoogten van 2011-2018 voor de watervoerende pakketten (WVP1 t/m WVP8) in m t.o.v. NAP. Als WVP niet voorkomt is de kleur wit.



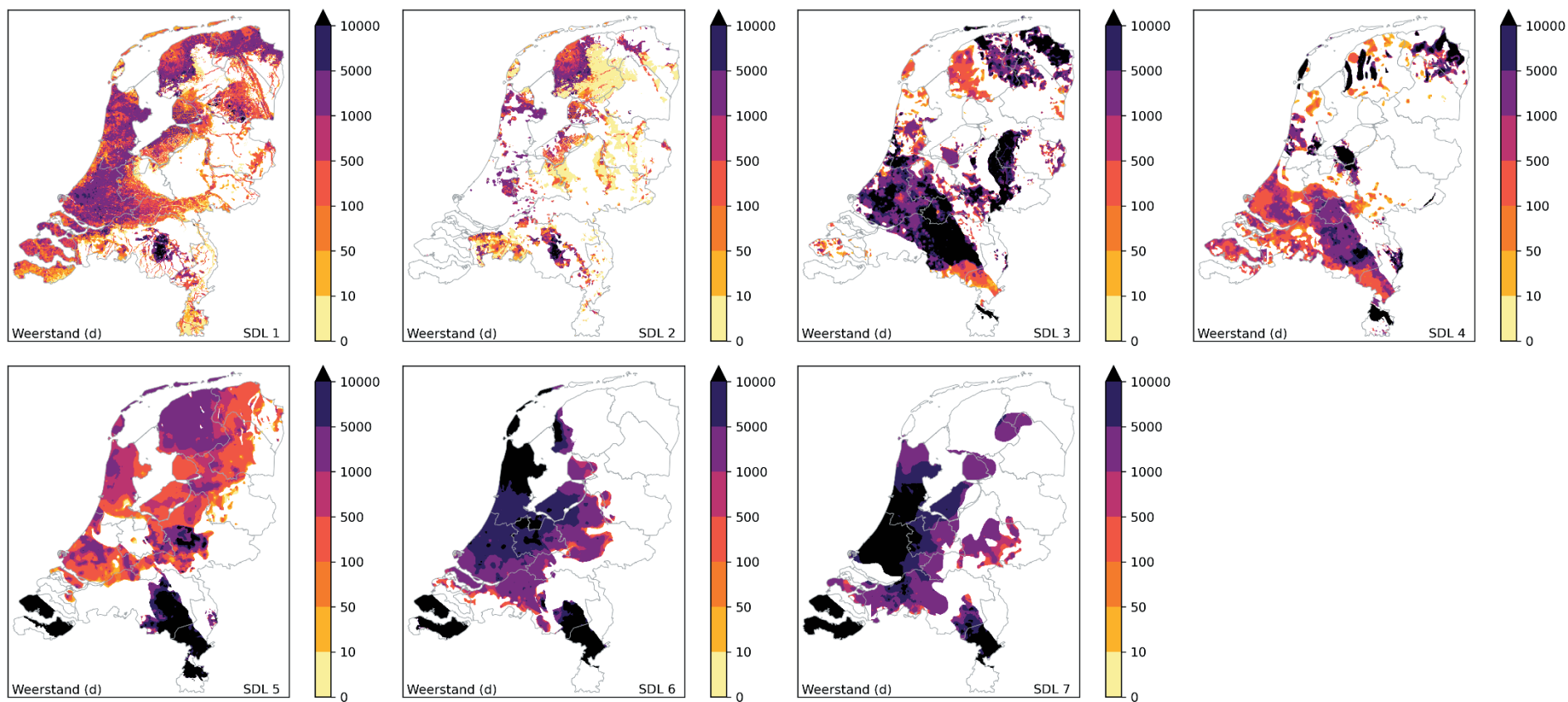
►► BIJLAGE B STIJGHOOGTEVERSCHILLEN

Onderstaande kaarten tonen het stijghoogteverschil (m) over de verschillende slecht-doorlatende lagen. Een positieve waarde (rood) duidt op een hogere stijghoogte boven de laag dan er onder, terwijl bij een negatieve waarde (blauw) de diepere stijghoogte juist hoger is dan de ondiepere (kwel). Als SDL niet voorkomt is de kleur wit. In de gebieden waar WVP1 ontbreekt, maar wel stijghoogteverschillen over SDL1 wordt berekend, wordt gebruik gemaakt van freatische grondwaterstanden.



►► BIJLAGE C WEERSTAND VAN SCHEIDENDE LAGEN (C-WAARDEN)

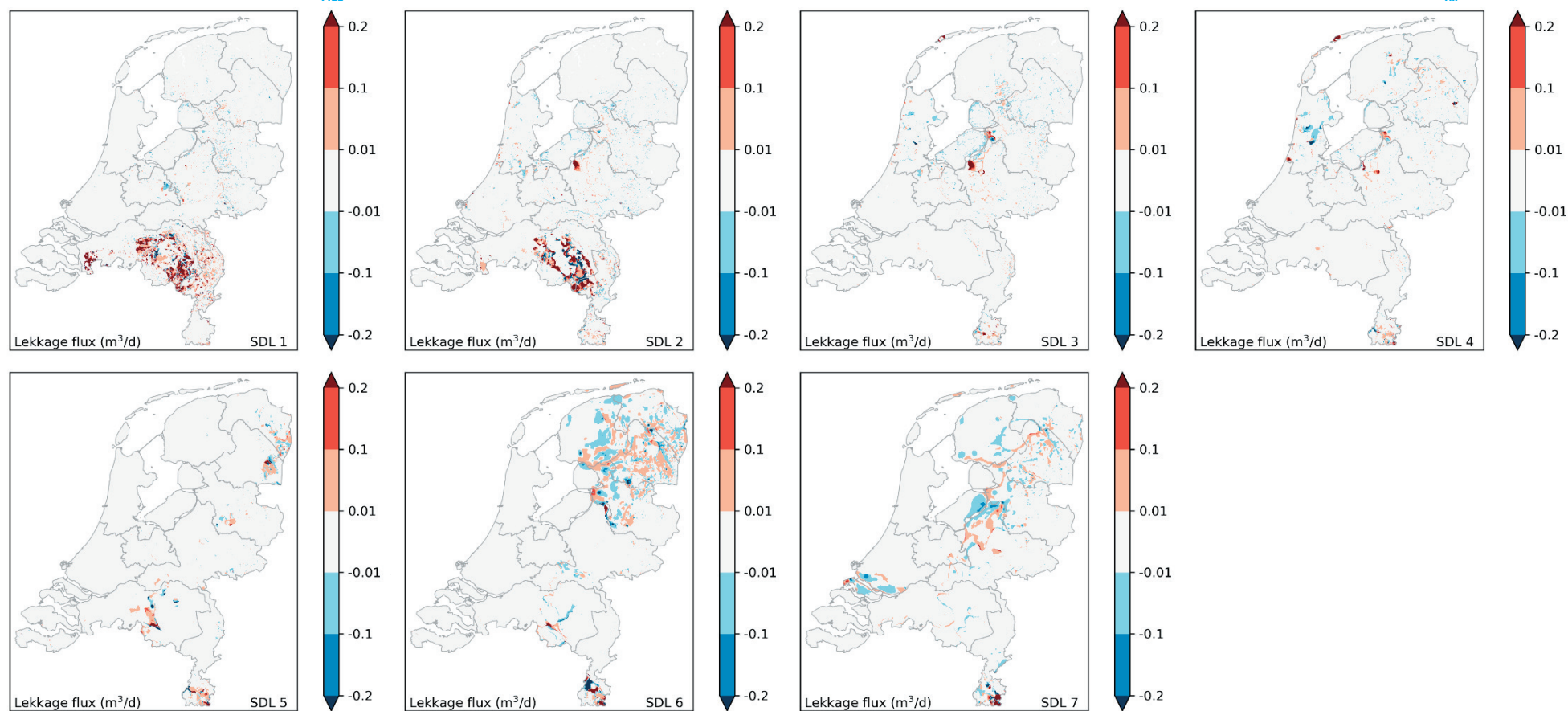
Onderstaande kaarten tonen de c-waarden (dagen) over de verschillende slecht-doorlatende lagen. Als SDL niet voorkomt is de kleur wit.



►► BIJLAGE D - LEKKAGE FLUX

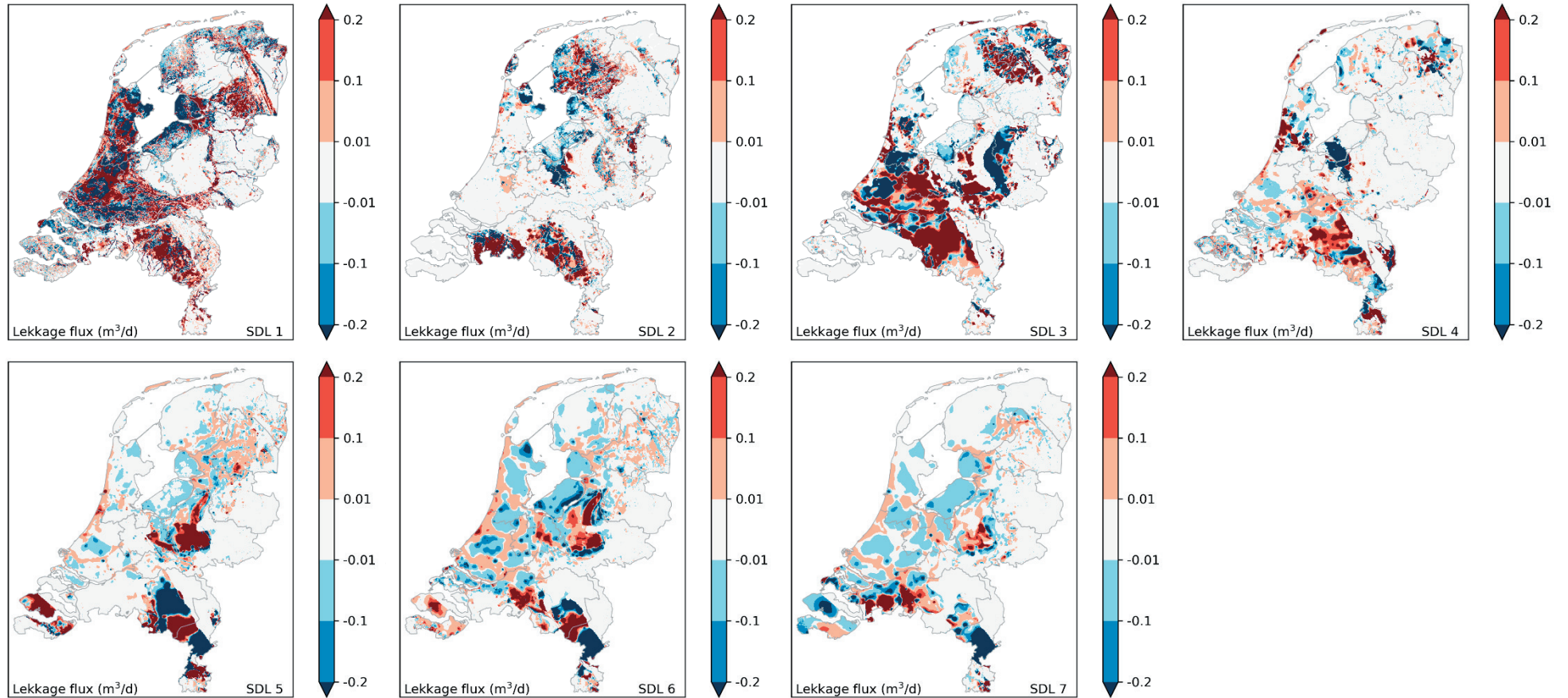
Onderstaande kaarten geven de lekkage flux tussen watervoerende pakketten weer. Een positieve lekkage flux staat voor een flux van het bovenliggende watervoerende pakket naar het onderliggende watervoerende pakket en is weergegeven in rood. Een negatieve flux is dus een flux van het onderliggende pakket naar het bovenliggende pakket waarvoor een blauwe kleur gebruikt is.

D.1 LEKKAGE FLUX OP BASIS VAN $K_{\text{FILL}}=1$ - Onderstaande kaarten geven de potentiële lekkage flux (m^3/dag) bij een afdichting met een relatief lage doorlatendheid (k_{fill}) van 1 m/d.



D.2 LEKKAGE FLUX OP BASIS VAN $K_{\text{FILL}}=1000$

Onderstaande kaarten geven de potentiële lekkage flux (m^3/dag) bij een afdichting met een extreem hoge doorlatendheid van 1000 m/d.





Kennisimpuls
WATERKWALITEIT