

TNO-rapport**TNO 2021 R10310****Karakterisering van de doorlatendheid van de
ondiepe ondergrond van Noord-Nederland****Geologische Dienst Nederland**Princetonlaan 6
3584 CB Utrecht
Postbus 80015
3508 TA Utrechtwww.tno.nl

T +31 88 866 42 56

Datum	1 februari 2021
Auteur(s)	J.T. Buma S.A.R. Bus R. Harting W.J. Zaadnoordijk
Aantal pagina's	64
Opdrachtgever	TNO Geologische Dienst Nederland (TNO-GDN)
Projectnaam	GIP 2020 Ondiepe Kartering
Projectnummer	060.43296

Alle rechten voorbehouden.

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

Indien dit rapport in opdracht werd uitgebracht, wordt voor de rechten en verplichtingen van opdrachtgever en opdrachtnemer verwezen naar de Algemene Voorwaarden voor opdrachten aan TNO, dan wel de betreffende terzake tussen de partijen gesloten overeenkomst.

Het ter inzage geven van het TNO-rapport aan direct belanghebbenden is toegestaan.

© 2021 TNO

Samenvatting

Dit rapport beschrijft de karakterisering van de doorlatendheid van grondmonsters uit de ondiepe ondergrond van Noord-Nederland. Deze karakterisering, nodig voor de hydraulische parametrisatie van de ondergrondmodellen van TNO Geologische Dienst Nederland (TNO-GDN), is gebaseerd op bepalingen van de verzadigde doorlatendheid aan 1275 grondmonsters. De monsters zijn verzameld in het kader van het boor- en meetprogramma TopIntegraal, en zijn afkomstig uit geologische eenheden in de bovenste 30 tot 50 meter van de ondergrond van Noord-Nederland. De karakterisering vond plaats volgens een geologische indeling in combinaties van door TNO-GDN geïnterpreteerde lithostratigrafische eenheden (formaties, laagpakketten en lagen) en geclassificeerde lithologieën. Hierna worden deze combinaties kortheidshalve aangeduid als lithostrat-lithoklassen.

Doordat aan alle monsters zowel lithologische als hydrologische parameters zijn bepaald, konden relaties worden gelegd tussen enerzijds de doorlatendheid en anderzijds het zandpercentage, de monstermediaan, en de spreiding van de korrelgrootte van het monster. Deze relaties verklaren een deel van de geconstateerde doorlatendheidsverschillen tussen lithostrat-lithoklassen. De resterende variatie in doorlatendheid, binnen de lithostrat-lithoklassen, is deels te verklaren met de herkomst vanuit verschillende afzettingssmilieus (lithofacies).

In de karakterisering wordt de doorlatendheid van grof zand en in mindere mate midden zand onderschat, doordat de huidige meetopstelling niet geschikt is voor grind en grindrijke zanden. Aanbevolen wordt om het ontbreken van grindige en grindhoudende monsters in de huidige dataverzameling in te vullen door middel van in situ methoden of 3D-scans van ongestoorde kernen in combinatie met numerieke stromingsmodellen.

Voor lithostrat-lithoklassen met weinig (<15) meetwaarden is geconstateerd dat het aantal monsters in de betreffende populaties waarschijnlijk te klein is voor statistische analyse. Deels betreft dit lithostratigrafische eenheden die (vrijwel) alleen in de ondiepe ondergrond van Noord-Nederland voorkomen, bijvoorbeeld het Laagpakket van Nieuwolda van de Formatie van Peelo (PENI, 'potklei'). Om deze goed te kunnen karakteriseren wordt aanbevolen om aanvullende monsters te verwerven uit Noord-Nederland, zo mogelijk door samen te werken met partijen die kwalitatief goede boringen laten uitvoeren.

De gebruikswaarde van de dataverzameling van doorlatendheidsgegevens kan worden vergroot door de bestaande kwaliteitscontroles te harmoniseren en uit te breiden, onder andere met betrekking tot de beoordeling van monsters uit het grensgebied tussen zand en klei / leem, het omgaan met uitschieters, en de beoordeling van monsterverstoring. Het integrale karakter van de dataverzameling biedt voldoende mogelijkheden om dit uit te voeren.

Onderzocht moet worden hoe informatie over het afzettingssmilieu kan worden toegevoegd aan de hydraulische parametrisatie van ondergrondmodellen. Daarbij wordt aanbevolen om de potentie te onderzoeken van sondeergegevens voor het ruimtelijk begrenzen van lithofacies-eenheden. Voor een volledig inzicht in de relatie tussen afzettingssmilieu en doorlatendheid wordt bovendien aanbevolen om

de hier voor Noord-Nederland gerapporteerde analyse nogmaals uit te voeren voor alle gebieden gezamenlijk waaruit inmiddels TopIntegraal-gegevens beschikbaar zijn.

Inhoudsopgave

	Samenvatting	2
1	Aanleiding en doelstelling	5
1.1	Aanleiding voor dit rapport.....	5
1.2	Boor- en meetprogramma TNO-GDN.....	5
1.3	Doelstellingen van dit rapport	6
1.4	Leeswijzer.....	6
2	De ondiepe ondergrond van Noord-Nederland	7
2.1	Geologische indelingen	7
2.2	Regionale indeling	7
2.3	Indeling op basis van lithologie: lithoklassen.....	8
2.4	Indeling op basis van lithostratigrafie: Lithostratigrafische eenheden	9
2.5	Indeling op basis van afzettingsmilieu: lithofacies.....	12
3	Gegevens en methodiek	14
3.1	Selectie boorlocaties.....	14
3.2	Meetmethoden	15
3.3	Analyse meetresultaten	19
4	Resultaten	22
4.1	Overzicht meetresultaten.....	22
4.2	Relaties tussen lithologische eigenschappen en doorlatendheid.....	24
4.3	Karakterisering van de doorlatendheid per lithostrat-lithoklasse	37
5	Interpretatie	44
5.1	Inleiding	44
5.2	Geologische duiding van variaties in doorlatendheid	44
5.3	Invloed methodologische aspecten op karakterisering	52
5.4	Discussie	58
6	Conclusies en aanbevelingen	60
6.1	Conclusies	60
6.2	Aanbevelingen	60
7	Ondertekening	62
8	Literatuur	63

1 Aanleiding en doelstelling

1.1 Aanleiding voor dit rapport

Om maatschappelijke vragen met betrekking tot de ondiepe ondergrond van Nederland te kunnen beantwoorden is er behoefte aan een gedetailleerde karakterisering van dat deel van de ondergrond. Onder 'ondiep' wordt hier verstaan: tot een maximale diepte van 50 meter beneden maaiveld. Om deze ondiepe lagen te kunnen karakteriseren is kennis nodig van de samenstelling en eigenschappen van de sedimenten en de zich daarin afspelende processen. Een dergelijke karakterisering vormt een belangrijke informatiebron bij beleidsontwikkeling, planning van ingrepen en een duurzaam beheer van de ondergrond. Voor het grondwaterbeheer in Nederland is met name de hydraulische karakterisering van de ondergrond van belang.

1.2 Boor- en meetprogramma TNO-GDN

De Geologische Dienst Nederland (TNO-GDN) en haar voorgangers hebben veel onderzoek gedaan naar de opbouw van de Nederlandse ondergrond, in het bijzonder van de kwartaire en neogene lagen. Binnen TNO-GDN houdt de afdeling Geomodellering zich bezig met het verzamelen, interpreteren en verwerken van ondergrondgegevens in driedimensionale ondergrondmodellen, in samenspraak met (potentiële) gebruikers (Rijks- en regionale overheden, adviesbureaus et cetera). Deze ondergrondmodellen geven de geologische of hydrogeologische opbouw weer, en een aantal modellen zijn bovendien voorzien van lithologische, hydraulische en geochemische parametrisaties. Ten behoeve van deze parametrisaties is het van belang om geologische eenheden te kunnen karakteriseren voor wat betreft hun lithologische, geochemische en hydraulische eigenschappen. Bij voldoende beschikbare gegevens kunnen statistische kengetallen voor de verschillende eenheden berekend worden.

In 2005 werd door TNO-GDN het boor- en meetprogramma TopIntegraal gestart. Het doel van TopIntegraal is om gegevens van de ondiepe ondergrond voor alle karakteriseringsdoeleinden op een uniforme manier te verzamelen, te rapporteren en beschikbaar te stellen. Het integrale karakter van de dataverzameling wordt bepaald door het feit dat op eenzelfde boormonstertraject zowel lithologische, geochemische als hydraulische eigenschappen worden bepaald.

De eerste fase van TopIntegraal werd uitgevoerd in Noord-Nederland. Daarvan zijn drie rapporten verschenen. De karakteristieke geochemische samenstelling is gerapporteerd in Klein en Griffioen (2012) en Heerdink en Griffioen (2012). De lithologische karakterisering is beschreven in Bosch et al. (2014).

Dit rapport beschrijft de karakterisering van de verzadigde doorlatendheid van de ondiepe ondergrond van Noord-Nederland.

1.3 Doelstellingen van dit rapport

De in dit rapport beschreven karakterisering heeft betrekking op de verzadigde waterdoorlatendheid in horizontale en verticale richting. De doelstellingen van dit rapport zijn:

1. Beschrijving van relaties tussen lithologische eigenschappen en doorlatendheid van sedimenten in de ondiepe ondergrond van Noord-Nederland;
2. Karakterisering van de doorlatendheid van grondmonsters afkomstig uit de geologische eenheden in Noord-Nederland.

De doelstelling van deze rapportage is *karakterisering*, niet *parametrisatie*. De hier beschreven TopIntegraal-dataverzameling is gebaseerd op bepalingen van eigenschappen aan grondmonsters met volumes variërend van tussen ca. 40 en 100 cm³. De gepresenteerde resultaten zijn dan ook niet één op één vertaalbaar naar de kentallen zoals deze in REGIS II en enkele GeoTOP-modellen worden gepubliceerd. Er zijn opschalingsprocedures nodig voor de parametrisatie van deze ondergrondmodellen. Voor een uitgebreide beschrijving van de opschalingsprocedures in REGIS II en GeoTOP wordt verwezen naar respectievelijk Hummelman et al. (2019), Vernes en Van Doorn (2005), en Stafleu en Gunnink (2016).

1.4 Leeswijzer

In Hoofdstuk 2 wordt eerst een beschrijving gegeven van de geologische indelingen waarop de karakterisering van de doorlatendheid is gebaseerd, en de plaats die Noord-Nederland daarin inneemt.

In Hoofdstuk 3 worden vervolgens de verschillende aspecten van de dataverzameling beschreven: de geselecteerde boorlocaties, de methoden van bemonstering en de toegepaste bepalingswijzen van de doorlatendheid.

In Hoofdstuk 4 worden de resultaten van de karakterisering beschreven. In de daarop volgende interpretatie van deze resultaten in Hoofdstuk 5 is veel aandacht voor geologische duiding van variaties in doorlatendheden, en de rol die het afzettingsmilieu hierin speelt.

Het rapport besluit met een aantal conclusies en aanbevelingen (Hoofdstuk 6).

2 De ondiepe ondergrond van Noord-Nederland

2.1 Geologische indelingen

Voor de karakterisering van de ondergrond van Nederland worden door TNO-GDN indelingen gehanteerd op basis van lithologie, lithostratigrafie en afzettingsmilieu. Daarnaast is er een regionale indeling van de ondiepe ondergrond van Nederland opgesteld.

2.2 Regionale indeling

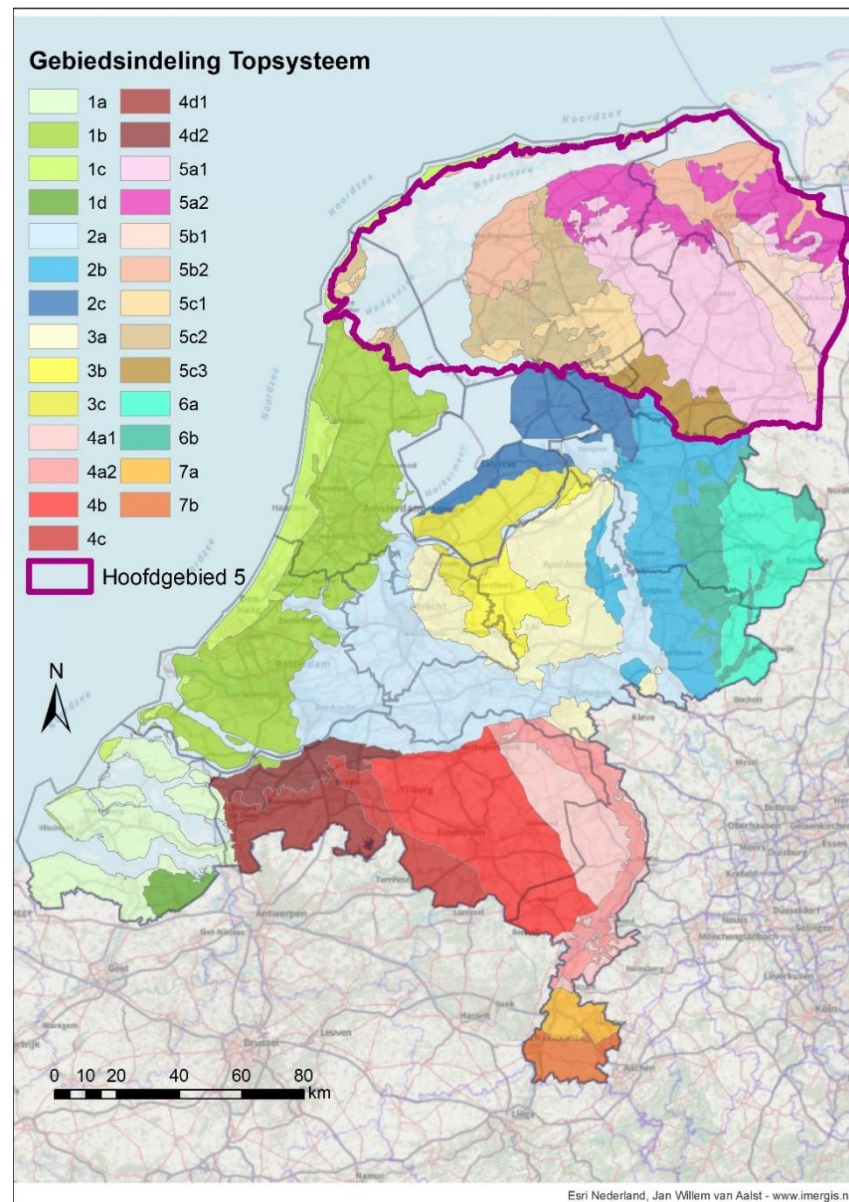
Bij aanvang van het TopIntegraal-programma is door Vermooten et al. (2005) een regionale indeling opgesteld voor de ondiepe ondergrond van Nederland. Nederland is daarin verdeeld in zeven hoofdgebieden, die weer zijn onderverdeeld in 27 deelgebieden en eventueel verder in subgebieden (Figuur 1). De regionale indeling is opgesteld op basis van diepteligging, lithologie en afzettingsmilieu van de verschillende geologische eenheden in de ondiepe ondergrond.

De karakterisering van de doorlatendheid in dit rapport betreft Hoofdgebied 5 (Noord-Nederland). Hoofdgebied 5 bestaat uit de provincies Groningen, Friesland, het grootste deel van Drenthe, enkele aangrenzende gebieden in Noord-Overijssel, Texel en Wieringen, en de poldergebieden van de Waddeneilanden. Ook de Waddenzee en het noordelijke deel van het IJsselmeer vallen onder Hoofdgebied 5, maar daar is, net als op de Waddeneilanden zelf, niet geboord in het kader van het TopIntegraal-programma.

Hoofdgebied 5 wordt aan de noord- en westkant begrensd door Hoofdgebied 1 (Kustzone), het duin- en strandgebied langs de Noordzeekust en een zone met vooral holocene lagunaire afzettingen in de kop van Noord-Holland. Aan de zuidkant ligt de begrenzing op de noordrand van het pleistocene Vechtdal, onderdeel van Hoofdgebied 2 (Rivierengebied).

Hoofdgebied 5 is onderverdeeld in drie deelgebieden, namelijk het Noord-Nederlands Platform (5a), het Hunzedal (5b) en het dal van de Proto-Rijn (5c). Deze deelgebieden verschillen van elkaar op grond van hun geologische ontstaanswijze. Voor een gedetailleerde beschrijving van deze deelgebieden en verdere onderverdeling in subgebieden wordt verwezen naar Bosch et al. (2014).

De karakterisering van de doorlatendheid is uitgevoerd voor Hoofdgebied 5 als geheel, dus zonder onderscheid te maken in deelgebieden.



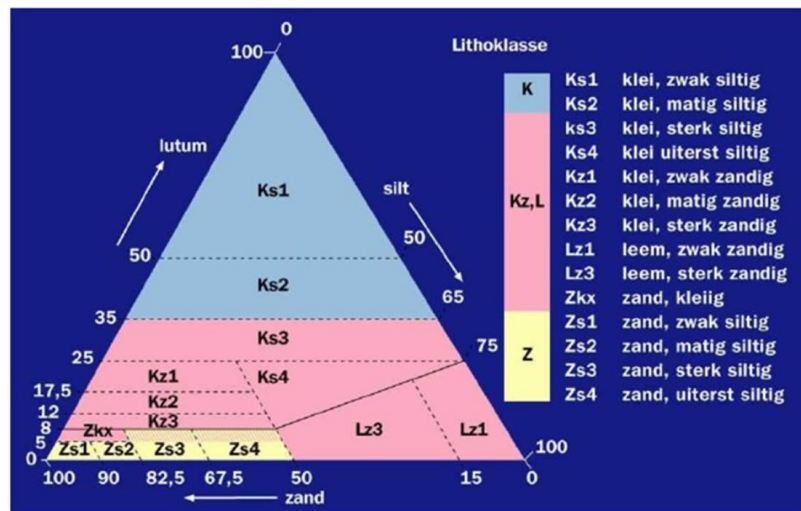
Figuur 1. De zeven TopIntegraal-hoofdgebieden, inclusief onderverdeling in deelgebieden en subgebieden (Vermooten et al., 2005).

2.3 Indeling op basis van lithologie: lithoklassen

Ten behoeve van REGIS II en GeoTOP is een specifieke indeling van lithologieën ontwikkeld op basis van zgn. lithoklassen. De lithoklassen-indeling is er op gericht om lithologieën met vergelijkbare eigenschappen te groeperen. De lithoklassen-indeling die in TopIntegraal wordt gehanteerd, is gebaseerd op de indeling die ten behoeve van REGIS II v2.1 is opgesteld met uitzondering van de uitgefaseerde lithoklasse leem. Deze indeling is in Figuur 2 weergegeven, en is gebaseerd op hoofdlithologieën en bijmengingen conform de Standaard Boor Beschrijvingsmethode, versie 5.1 (Bosch, 2000) en recentere versies, en de zandmediaan. Overigens is de indeling in lithoklassen sindsdien uitgebreid, onder andere met de klassen zand met onbekend korrelgrootte “zo” en klei met onbekende zandbijmenging “ko”.

Code	Omschrijving
g	grind (korrelgrootte $\geq 2\text{mm}$) [*]
zg	zand, grof (korrelgrootte $\geq 300\text{ }\mu\text{m}$ - $< 2\text{mm}$)
zm	zand, matig grof (korrelgrootte $\geq 150\text{ }\mu\text{m}$ - $< 300\text{ }\mu\text{m}$)
zf	zand, fijn (korrelgrootte $\geq 63\text{ }\mu\text{m}$ - $< 150\text{ }\mu\text{m}$)
l	leem [*]
kz	kleiig zand en zandige klei
k	Klei
v	veen [*]
she	schelpen [*]
gcz	glauconietzanden [*]
kas	kalksteen [*]
o	overig [*]

^{*}Lithoklasse alleen bij de hydrogeologische interpretatie van afzettingen van bepaalde lithostratigrafische eenheden onderscheiden.



Figuur 2. Indeling lithologieën in lithoklassen zoals gehanteerd in TopIntegraal, met uitzondering van de uitgefaseerde lithoklasse leem. De weergegeven indeling is opgesteld voor REGIS II v2.1 (Vernes en Van Doorn, 2005). Niet weergegeven is de alleen in GeoTOP gehanteerde lithoklasse antropogeen.

2.4 Indeling op basis van lithostratigrafie: Lithostratigrafische eenheden

De karakterisering van de doorlatendheid in Noord-Nederland is uitgevoerd voor acht geologische formaties, en daarbinnen tien laagpakketten (zie Tabel 1 en

Tabel 2). De beschrijving van deze zogenaamde lithostratigrafische eenheden is te vinden in De Mulder et al. (2003). De formele beschrijvingen zijn ook digitaal beschikbaar via DINoloket (www.dinoloket.nl/stratigrafische-nomenclator).

De in Tabel 2 weergegeven codering is conform de [Stratigrafische Nomenclator](#) d.d. januari 2021. Ten behoeve van de leesbaarheid zal in het vervolg van deze rapportage de codering van de lithostratigrafische eenheden zonder het voorvoegsel NU (een verwijzing naar de Boven-Noordzee Groep) worden gehanteerd. Monsters uit het Laagpakket van Gieten van de Formatie van Drente worden dan bijvoorbeeld aangeduid als DRGI-monsters.

Met betrekking tot de in Noord-Nederland onderscheiden lithostratigrafische eenheden worden de volgende opmerkingen gemaakt:

- De Laagpakketten van Walcheren (NAWA) en Wormer (NAWO) van de Formatie van Naaldwijk eenheden zijn gegroepeerd tot NA-ongedifferentieerd;
- Alle monsters afkomstig uit de Formatie van Urk zijn ingedeeld in het boven de Formatie van Peelo voorkomende Laagpakket van Tynje (URTY) of het onder de Formatie van Peelo voorkomende Laagpakket van Veenhuizen (URVE). Er zijn in Noord-Nederland geen monsters ingedeeld bij de Formatie van Urk ongedifferentieerd (UR);
- Eenheden die over het algemeen dieper dan 50 meter beneden maaiveld voorkomen, zoals de Formaties van Peize en Appelscha, vallen buiten de afbakening van TopIntegraal en zijn daarom niet beschouwd. De Formatie van Appelscha komt lokaal wel ondieper dan 50 m voor en is sporadisch aangeboord. Er is één zandig monster uit deze formatie aanwezig in de dataset met doorlatendheden. Dit monster wordt wel meegenomen in de monsteraantallen, maar de Formatie van Appelscha wordt verder niet beschouwd en is daarom niet weergegeven in Tabel 1 en Tabel 2;
- In de TopIntegraal-database zijn geen monsters aanwezig uit de Laag van Gasselte binnen de eenheid DRGI. Deze laag is niet aangetroffen in dikten die het nemen van monsters mogelijk maakten.

Tabel 1. Lithostratigrafische eenheden waarvoor de karakterisering van de doorlatendheid van de ondergrond van Noord-Nederland is uitgevoerd. Fm.=Formatie, Lp.= Laagpakket, Lg. = Laag. De eenheden zijn ingedeeld op basis van ontstaansmilieu (kolommen) en ouderdom (jongste eenheden bovenin). De naamgeving is conform de [Stratigrafische Nomenclator](#) d.d. januari 2021.

Chrono- stratigrafie	Glaciaal	Fluviaal	Marien	Eolisch, periglaciaal, helling	Moeras (organogeen)
Holoceen			Fm. v. Naaldwijk	Lp. v. Singraven	Lp. v. Griendtsveen Fm. v. Nieuwkoop Basisveen Lg.
Weichselien				Lp. v. Wierden Fm. v. Boxtel	
Eemien			Eem Fm.	Lp. v. Tilligte	
Saalien	Lp. v. Schaarsbergen Fm. v. Drente Lp. v. Gieten				
				Fm. v. Drachten	
Holsteinien		Fm. v. Urk ¹ Lp. v. Tynje	Fm. v. Urk Lp. v. Tynje		
Elsterien	Lp. v. Nieuwolda Fm. v. Peelo				
Cromerien		Fm. v. Urk Lp. v. Veenhuizen			

¹ Afzettingen behorende tot het Laagpakket van Tynje van de Formatie van Urk kunnen zowel in een fluviaal als in een marien milieu zijn gesedimenteerd.

Tabel 2. Codering van de lithostratigrafische eenheden waarvoor de karakterisering van de doorlatendheid van de ondiepe ondergrond van Noord-Nederland is uitgevoerd. De codering en naamgeving zijn conform de [Stratigrafische Nomenclator](#) d.d. januari 2021. De eenheden zijn stratigrafisch geordend.

NUNIGR	Formatie van Nieuwkoop, Laagpakket van Griendtsveen
NUNI	Formatie van Nieuwkoop
NUNIBA	Formatie van Nieuwkoop, Basisveen Laag
NUNA	Formatie van Naaldwijk
NUBXSI	Formatie van Boxtel, Laagpakket van Singraven
NUBXWI	Formatie van Boxtel, Laagpakket van Wierden
NUBX	Formatie van Boxtel ongedifferentieerd
NUBXTI	Formatie van Boxtel, Laagpakket van Tilligte
NUEE	Eem Formatie
NUDRSC	Formatie van Drente, Laagpakket van Schaarsbergen
NUDRGI	Formatie van Drente, Laagpakket van Gieten
NUDN	Formatie van Drachten
NUURTY	Formatie van Urk, Laagpakket van Tynje
NUPENI	Formatie van Peelo, Laagpakket van Nieuwolda
NUPE	Formatie van Peelo
NUURVE	Formatie van Urk, Laagpakket van Veenhuizen

2.5 Indeling op basis van afzettingsmilieu: lithofacies

De meeste lithostratigrafische eenheden zijn gevormd in een specifiek ontstaansmilieu (facies). Op het hoogste niveau worden de volgende ontstaansmilieus onderscheiden: glaciaal, fluviatiel, marien, eolisch / periglaciaal / helling en organogeen / moeras (zie Tabel 1). Onder het eolische / periglaciaal / hellingmilieu vallen ook kleinschalige fluviatiele sedimenten (beekafzettingen). Binnen een ontstaansmilieu komen verschillende afzettingsmilieus ofwel *lithofacies* voor. Lithofacies zijn van invloed op de lithologie. De lithologie van bijvoorbeeld riviersedimenten is afhankelijk van waar ze zijn afgezet: in geulen, op oevers, in komgebieden of in restgeulen. Voor meer uitleg over lithofacies wordt verwezen naar Schokker en Weerts, en specifiek voor Noord-Nederland naar Bosch et al. (2014). De lithofacies zijn weergegeven in Tabel 3.

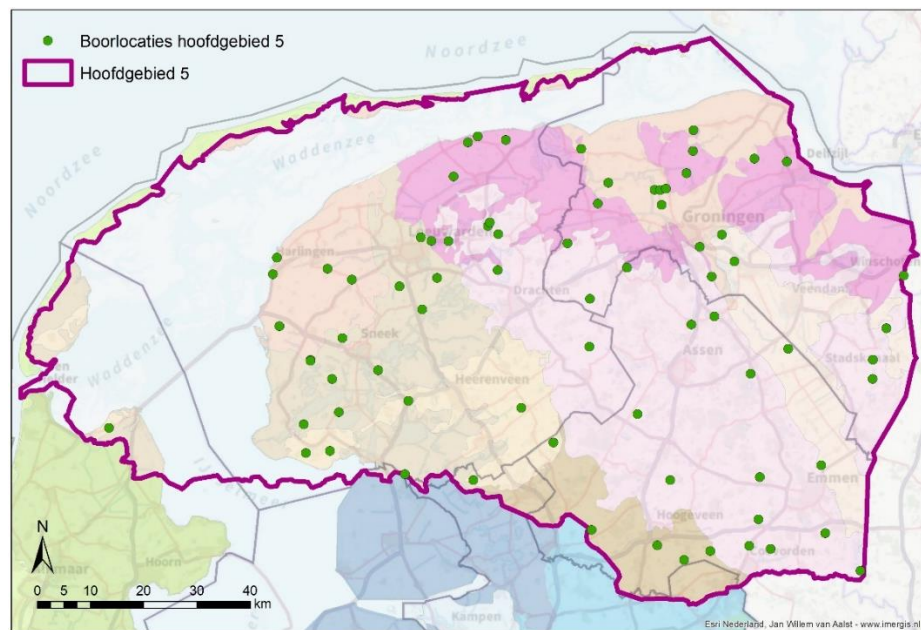
Tabel 3. Afzettingmilieus en hun lithofacieseenheden (Schokker en Weerts, 2004)

Afzettingmilieu en lithofaciescode	Omschrijving
Glaciaal milieu	
FGZFG	pradolina (ook esker en sandr)
FGLFG	sandr en kame-terras
FGZUB	smeltwateruitbraak (energierijk; grovere zanden)
FGLUB	smeltwateruitbraak (minder energie; zeer en uiterst fijn zand)
FGK	Glaciolacustrien
FGDMA	subglaciaal (homogene keileem)
FGDLA	subglaciaal (met zand gelaagde keileem)
Fluviaal milieu	
FFG	geul (energierijk; grovere zanden)
FFZ	geul (iets minder energie; matig fijn en matig grof zand)
FFL	oever en crevasse
FFKMA	Kom
FFKLA	meer en restgeul (klastische facies)
Marien milieu	
FMLGG	getijdengeul (estuarium- en wadgeul)
FMLGP	getijdenplaat (wadplaat, slik, laagwad)
FMLKW	kwelder (schor, hoogwad)
FMKLG	lagune (verdrinkingskleien)
Eolisch / periglaciaal milieu	
FEZDZ	eolisch (droog)
FEZVE	eolisch (nat / vochtig)
Hellingmilieu	
FHZ	helling
Moerasmilieu (organogeen)	
FOM	meer en restgeul (organogene facies)
FOV (FOVOL)	moeras (oligotroof)
FOV (FOVME)	moeras (mesotroof)
FOV (FOVEU)	moeras (eutroof)
Onbekend	
FNN	onbekend milieu

3 Gegevens en methodiek

3.1 Selectie boorlocaties

In het kader van TopIntegraal zijn in Noord-Nederland 75 boringen uitgevoerd. De locaties van deze boringen zijn in Figuur 3 weergegeven.



Figuur 3. Locaties van de TopIntegraal-boringen in Noord-Nederland. Voor legenda van de deel- en subgebieden zie Figuur 1.

De locatiekeuze van de boringen werd bepaald door de aanwezigheid van combinaties van lithostratigrafische eenheden, lithofacies en lithoklassen. Omdat zand in grote delen van Nederland de dominante grondsoort is, richtte de selectie zich in het bijzonder op locaties waar scheidende klei- en veenlagen goed te bemonsteren zijn.

Bij de locatiekeuze speelde informatie uit REGIS II een belangrijke rol omdat de daarin gemodelleerde scheidende lagen gebaseerd zijn op betrouwbare boringen. Hiermee konden zoekgebieden voor de boorlocaties worden geselecteerd. De uiteindelijke boorlocaties zijn vervolgens vastgesteld op basis van de bij TNO-GDN aanwezige ervaring, rekening houdend met de in DINO aanwezige boorinformatie.

De Topintegraal-boringen zijn steekboringen met een kernlengte van maximaal 1 meter en een diameter van 100 of 110 mm. Uit steekboringen kunnen zo goed als ongestoorde boorkernen en ongeroerde monsters worden verkregen. De boringen zijn overwegend als puls-boringen met steekbussen uitgevoerd. Voor nadere toelichting op de locatiekeuze, uitvoering en verwerking van de gegevens wordt verwezen naar Bosch et al. (2014).

3.2 Meetmethoden

3.2.1 Bepaling monstertrajecten

De door de boorfirma aangeleverde pvc-steekbussen met de boorkernen zijn in de beschrijfruimte van TNO opengesneden. Dit gebeurde niet symmetrisch: de ene kernhelft was circa 7 cm, de andere circa 3 cm dik. Het dunne deel werd gebruikt voor de boorbeschrijving, het fotograferen, de monsters voor lithologische en geochemische bepalingen, en het vaststellen van de monstertrajecten voor hydraulische bepalingen. Het dikke deel is gebruikt voor de hydraulische bepalingen. Deze monsternamemethode maakt het mogelijk om verschillende bepalingen op dezelfde diepte uit te voeren, in lijn met het integrale karakter van de TopIntegraal-dataverzameling.

De monstertrajecten zijn bepaald op basis van de boorbeschrijving en de lithostratigrafische en lithofacies-interpretaties van de boorkern. Daarbij is het streven voor de lange termijn om minimaal 40 monsters per combinatie van lithostratigrafische eenheid, lithofacies en lithoklasse te verkrijgen.

3.2.2 Monstername

De door de beschrijver opgegeven hoofdlithologie van het monster bepaalde de bemonsterings- en meetprocedure:

- Monsters met een geschatte hoofdlithologie 'zand' (hierna: zandmonsters) zijn in de TNO-beschrijfruimte uitgenomen in een metalen Kopecky-ring met een inhoud van 100 cm³ en een hoogte van 5,1 cm. Om verstoring te minimaliseren werd voor het uitnemen van verticale monsters een trekbeugel gelijkmatig in het monster gedrukt in de lengterichting van de boorkern. Voor horizontale monsters, loodrecht op de kern, gebeurde dit met een hefboom. Dit maakte het mogelijk om zowel verticale als horizontale doorlatendheden te bepalen. Uitgenomen monsters werden op 4°C gekoeld en in het donker bewaard totdat ze aan het laboratorium werden aangeboden voor de meting.
- Monstertrajecten met een geschatte lithologie van kleiig of siltig fijn zand, leem, klei of veen (hierna: kleimonsters) zijn schokbestendig vervoerd naar het laboratorium van Deltares (tot 2008 GeoDelft) in Delft. Daar zijn de monsters, zonodig na een periode van gekoelde opslag, uitgenomen met een ring van 2,1 centimeter hoog en een diameter van 5 centimeter.
- Er zijn geen grind- en schelpenmonsters uitgenomen, met uitzondering van een aantal fijngrindige monsters. Over het algemeen zijn hydraulische eigenschappen aan grind- en schelpenmonsters niet betrouwbaar te meten met de gebruikte Kopecky-ringen. Er zijn ook geen korrelgroottemetingen van de grindfractie van deze monsters beschikbaar, omdat die een groot monstervolume vereisen dat zelden beschikbaar is in een steekboring. Grindige boorintervallen zijn wel bewaard voor eventuele analyse in de toekomst.

3.2.3 Anisotropie zandige monsters

Een aantal zandige monstertrajecten zijn aan elkaar gepaard ten behoeve van het bepalen van anisotropie. Van het ene monster werd de horizontale doorlatendheid

bepaald en van het andere monster de verticale doorlatendheid. Beide monstertrajecten moesten in dezelfde lithostratigrafische eenheid en lithofacies zitten en dezelfde beschreven lithoklasse hebben. Omdat binnen een laaginterval subtiele variaties in gelaagdheid, grind- en siltgehaltes en dergelijke kunnen optreden, werd de keuze voor de gepaarde trajecten bovendien gebaseerd op visuele inspectie van het laaginterval, om zoveel mogelijk gelijkende monsters te verkrijgen.

3.2.4 Metingen zandmonsters

De doorlatendheid van de zandmonsters werd bepaald in de zgn. DeWit-permeameter (Eijkelkamp, 2003). Voorafgaand aan de bepaling werden de monsters langzaam van onderaf herverzadigd met ontlucht water. De metingen werden uitgevoerd tussen 2006 en 2009, door het toenmalige Geolab Utrecht, een samenwerking tussen de Universiteit Utrecht, TNO en vanaf 2008 Deltares. Aanvankelijk werd gemeten volgens het “constant head” principe, zoals vastgelegd in de Europese norm CEN ISO/TS 17892-11 (destijds gold de versie uit 2004). Naar aanleiding van minder positieve ervaringen met dit type opstelling, in het bijzonder met het constant houden van de waterstroming door de monsters, is in 2009 overgeschakeld op een meetopstelling volgens het “falling head” principe. Voor het meten van doorlatendheden met de falling head methode is ook de norm CEN ISO/TS 17892-11 van toepassing. In deze norm wordt gesteld dat de falling head methode vooral geschikt is voor kleiige en siltige grond. Om de falling head opstelling geschikt te maken voor het meten van goed doorlatende monsters werd de permeameter voorzien van twee afstandslasers. Dit maakte het mogelijk om hoogfrequent en nauwkeurig een snel afnemend stijghoogteverschil boven het monster te meten.

Zandmonsters afkomstig uit zoete grondwatersystemen werden doorstroomd met ontlucht leidingwater. Zandmonsters afkomstig uit brakke grondwatersystemen werden doorstroomd met speciaal voor de proeven geprepareerd water met een SAR-waarde (sodium adsorption ratio) van 13.

Elke meting is in duplo uitgevoerd. Als de twee meetwaarden meer dan 10% van elkaar afweken werd een derde meting uitgevoerd.

Na de laatste doorlatendheidsmeting werd het monster uitgebouwd en direct daarna werd de volumieke massa in natte toestand bepaald. Vervolgens werd het monster 24 uur in de oven gedroogd bij 105°C, conform de Europese norm CEN ISO/TS 17892-2 (destijds gold de versie uit 2004), en werd de droge volumieke massa bepaald. Op basis van het verschil tussen het natte en droge volumegegewicht is een schatting gemaakt van de totale porositeit. De aanname daarbij was dat het monster volledig verzadigd was, met andere woorden het natte volumegegewicht is gelijk aan het verzadigde volumegegewicht. Deze aanname is niet altijd realistisch, omdat met name bij goed doorlatende monsters water kan weglekken, tussen het moment van uitname uit de permeameter en het moment van natte weging. Dit kan leiden tot een onderschatting van de porositeit. De kwaliteit van de verkregen porositeitswaarden kan pas worden vastgesteld na vergelijking met de in de geotechniek gangbare methode op basis van het met een pyknometer gemeten volumieke gewicht van de vaste delen (zie paragraaf

3.2.5.). Dit is (nog) niet gebeurd voor de zandige monsters. Daarom worden de verkregen porositeitswaarden in deze rapportage niet behandeld.

Vervolgens werd het gedroogde monster gezeefd, om te bepalen of er deeltjes in het monster zaten die een gelijkmatige doorstroming konden verstoren, zoals concreties, planten- en schelpresten en grind. Op basis van het resultaat van de zieving is ook gecontroleerd of de beschrijving van het betreffende monstertraject (de geschatte lithologie) moest worden aangepast.

3.2.5 *Metingen kleimonsters*

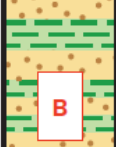
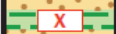
De kleimonsters zijn conform het “falling-head” principe bemeten in een aangepast samendrukkingsapparaat (oedometer met doorlatendheidsmeting) in het geotechnisch laboratorium van GeoDelft, vanaf 2008 Deltares. In het samendrukkingsapparaat is een bovenbelasting opgelegd die gelijk is aan de terreinspanning waaraan het monster onderhevig was. De terreinspanning is berekend uit soortelijke gewichten en dikten van de lithoklassen in het bovenliggende deel van de boorbeschrijving en sondeergegevens van vlak bij de boorlocatie. Er is daarbij geen rekening gehouden met overconsolidatie uit het verleden, bijvoorbeeld door bedekking met landijs.

Na de doorlatendheidsbepaling, eveneens in duplo, werd de porositeit bepaald met de gaspyknometermethode, conform de Europese norm CEN ISO/TS 17892-3 (destijds gold de versie uit 2004). Daarbij wordt van een bekend monstervolume het volume aan lucht bepaald, en zodoende kan het volumieke gewicht van de vaste delen worden bepaald. In combinatie met het droge volumieke gewicht levert dit een waarde voor de porositeit op. Naast deze methode zijn ook van elk monster het natte en droge volumieke gewicht bepaald.

Tenslotte zijn de gedroogde monsters en overige monsterresten door GeoDelft / Deltares teruggestuurd naar TNO-GDN voor een visuele nacontrole op bijzonderheden.

3.2.6 *Heterogene monsters*

Kleinschalige heterogeniteit, zoals gelaagdheid, insluitingen en bio- en cryoturbatie, is in ongeroerde monsters uit steekboringen goed te onderscheiden. Om heterogene monsters te kunnen onderscheiden van homogene monsters is aan elk uitgenomen monster een label “sublaag” toegekend. Een sublaag is een (vaak dunne) laag of structuur binnen een beschreven laaginterval met een lithologie of zandmediaan die afwijkt van de hoofdlithologie van het betreffende interval. Het label sublaag kan drie waarden hebben: “ja”, “nee” en “mix”. Monsters uit homogene laagintervallen krijgen de waarde “nee” (monsters A, C en D in Figuur 4). Is een sublaag dik genoeg om een volledig monster uit te nemen, dan krijgt dit monster de waarde “ja” (monster X). Heterogene monsters krijgen de waarde “mix” (monster B).

	Lithologische beschrijving	Sublaag- label
	Zwak siltig matig fijn zand	A Nee
	Zwak siltig matig fijn zand met een spoor kleilensjes en	B Mix
	weinig matig siltige kleilagen	X Ja
		C Nee
	Uiterst siltig matig fijn zand	D Nee

Figuur 4. Toekenning van het sublaag-label aan monstertrajecten (schematisch).

3.2.7 Kwaliteitscontrole

Voor, tijdens en na de doorlatendheidsbepaling vonden diverse kwaliteitscontroles plaats, waaruit goed- of afkeuring voor verdere analyse volgde.

Meetwaarden zijn afgekeurd in de volgende gevallen:

- Mislukte monstername of lekkage tijdens de meting.
- De beschikbare meetwaarden van doorlatendheid, omgerekend naar een temperatuur van 10°C, wijken meer dan 10% van elkaar af.
- De meetwaarde valt buiten het toepassingsgebied van de voor de beschreven meetopstellingen relevante norm. Tijdens de meetperiode was de Europese norm CEN ISO/TS 17892-11, versie 2004 van toepassing. Voor de kleiige monsters, en de zandige monsters die met de constant head opstelling werden gemeten, zijn aanvullend de Nederlandse normen NEN5123 en NEN5124 gehanteerd, omdat daarin expliciete begrenzings zijn opgenomen van de toepassingsgebieden voor respectievelijk constant head en falling head meetopstellingen. Het toepassingsgebied van NEN5123 ligt tussen doorlatendheidswaarden van 0,0864 m/d en 864 m/d. Het toepassingsgebied van NEN5124 betreft doorlatendheidswaarden kleiner dan 0,864 m/d. Zoals beschreven in paragraaf 3.2.4 is de falling head opstelling gedurende de meetperiode aangepast om ook boven zandige monsters hoogfrequent en

nauwkeurig een snel afnemend stijghoogteverschil te meten. Het wel of niet vallen binnen het voorgeschreven waardenbereik van CEN ISO/TS 17892-11 of NEN5124 is hiermee niet meer relevant;

- Tijdens of na de meting werden holten langs de ringwand, inzakkingen of opbollingen aan de top van het monster geconstateerd, die de doorstroming met water volgens de inschatting in het laboratorium onaanvaardbaar hebben beïnvloed.
- Er waren één of meer deeltjes in het monster aanwezig met afmetingen groter dan 20% van de diameter van de Kopecky-ring. Op grond van de destijds geldende ISO-norm (CEN ISO/TS 17892-11 2004) was dit reden voor afkeuring.
- Monsters waarvan de doorlatendheid met de DeWit-permeameter opstelling was bepaald, bleken na korrelgrootte-analyse een dusdanig hoog lutum- en/of siltgehalte te hebben dat ze alsnog als kleiige monsters moesten worden geclassificeerd (lithoklasse kleiig zand of klei). De veronderstelling hierbij was dat bij een als zandmonster geprepareerd kleimonster lekkages langs de wand van de Kopecky-ring doorslaggevend zijn voor het meetresultaat.
- Er is geen gepaarde lithologische bepaling (korrelgrootteanalyse en organisch stofgehalte) van hetzelfde monster beschikbaar.

Meetwaarden zijn niet afgekeurd voor verdere analyse in de volgende gevallen:

- In principe zijn sterk afwijkende meetwaarden (uitschieters) niet afgekeurd voor verdere analyse, tenzij de afwijkende waarde is toe te schrijven aan één van de bovengenoemde afkeuringscriteria. Utschieters kunnen ontstaan door fouten bij monsternamen, opslag, of analyse en representeren dan geen reële doorlatendheid. Maar ze kunnen ook de werkelijke doorlatendheid van het monster weergeven die in de staart van de doorlatendheidsverdeling van een gegeven populatie meetwaarden zit.
- In de proefopstelling voor kleimonsters is de volumeverandering van het monster bepaald bij het opleggen van de bovenbelasting voor de aangepaste oedometerproef. Een grote volumeverandering wijst op een significante ontspanning van het monster na het opboren. Een aantal monsters werd volgens het laboratorium van Deltares op basis van deze zgn. monsterverstoringsindex geklasseerd als 'matig tot slecht' of 'erg slecht'. Er zijn geen voorschriften voor het goed- of afkeuren van doorlatendheidsbepalingen aan monsters op basis van de monsterverstoringsindex. Vooralsnog zijn geen monsters met een slechte monsterverstoringsindex afgekeurd. In Hoofdstuk 5 wordt dit nader toegelicht op basis van de meetresultaten.

3.3 Analyse meetresultaten

3.3.1 Algemeen

De totale populatie goedgekeurde meetwaarden is gesplitst in een populatie horizontale doorlatendheidswaarden (kh) en een populatie verticale doorlatendheidswaarden (kv).

Alle hiernavolgende analyses van de doorlatendheid zijn uitgevoerd op logaritmisch getransformeerde meetwaarden. De oorspronkelijke (niet-

getransformeerde) meetwaarden zijn uitgedrukt in meters per dag (m/d). In de huidige parametrisatieprocedures van de ondergrondmodellen wordt gewerkt met een lognormale transformatie. In deze rapportage wordt een transformatie op basis van de 10 logaritme gehanteerd. Dat maakt het eenvoudiger om de variatie in doorlatendheid in orden van grootte uit te drukken.

Een uitzondering vormt de berekening van de anisotropie-ratio. In lijn met de gangbare werkwijze is deze berekend als het quotiënt van de niet-getransformeerde waarden van de horizontale en verticale doorlatendheid: kh/kv .

Daar waar percentielwaarden van populaties worden weergegeven, zijn dit percentielen berekend op basis van lineaire interpolatie en inclusief de hoogste en laagste waarden in de populatie.

3.3.2 *Relaties tussen lithologische eigenschappen en doorlatendheid*

Onderzocht zijn relaties tussen de doorlatendheid en de onderstaande lithologische eigenschappen:

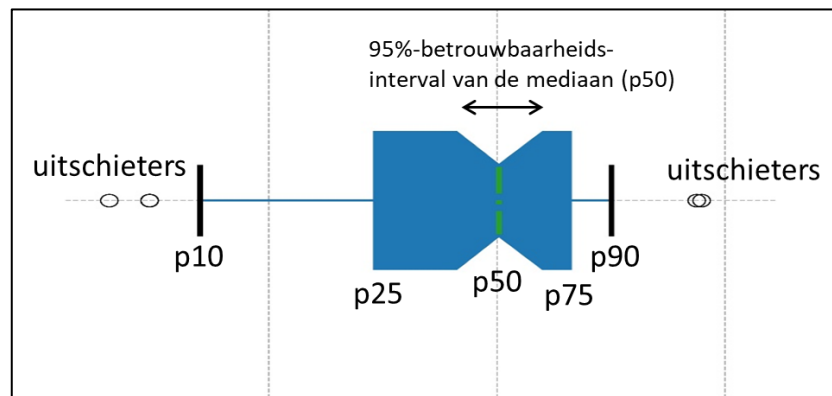
- a. lutum-, silt- en zandpercentages;
- b. mediane korrelgrootte van het monster en van de zandfractie (D50);
- c. spreiding korrelgrootte van het monster en van de zandfractie (D60/D10);
- d. lutumpercentage;
- e. lutum+silt percentage;
- f. gehalte aan organische stof;
- g. bovenbelasting (lemige, kleiige en venige monsters);

Met uitzondering van de bovenbelasting (zie voor afleiding daarvan paragraaf 3.2.5) zijn de bovengenoemde lithologische eigenschappen bepaald door middel van korrelgrootte- en geochemische analyses.

De relaties zijn gevisualiseerd met spreidingsdiagrammen, driehoeksdiagrammen en stripplots. De spreidingsdiagrammen zijn voorzien van een legenda die grotendeels in lijn is met de REGIS-kleurcodes. BXTI, DN, DRSC, PENI en URVE hebben een andere kleurcode om voldoende onderscheidend vermogen in de figuren te behouden.

3.3.3 *Karakterisering van de doorlatendheid*

De karakterisering van doorlatendheid is primair uitgevoerd op basis van een geologische indeling in combinaties van lithostratigrafische eenheden en lithoklassen, hierna aangeduid als *lithostrat-lithoklassen*. Deze indeling is gekozen omdat ze ook de basis vormt voor de modellering van de ondiepe ondergrond in REGIS II v2.2 en GeoTOP. De karakterisering is vormgegeven met box-whiskerplots. In Figuur 5 wordt uitgelegd hoe de gepresenteerde Box-Whiskerplots gelezen moet worden. Elk box-whiskerplot is voorzien van een inkeping die het 95%-betrouwbaarheidsinterval van de mediaan weergeeft.



Figuur 5. Toelichting Box-Whiskerplot, zoals toegepast bij de karakterisering van de doorlatendheid.

De lithoklasse van een TopIntegraal-monster wordt op twee manieren bepaald: de geschatte lithoklasse volgt uit de boorbeschrijving, de berekende lithoklasse uit de gemeten korrelgrootteverdeling. Ten behoeve van een zo objectief mogelijke analyse is de berekende lithoklasse het uitgangspunt voor de hier gerapporteerde karakterisering van de doorlatendheid. In Hoofdstuk 5 wordt ingegaan op de invloed die het verschil tussen berekende en geschatte lithoklasse heeft op de doorlatendheidskarakteristieken.

In de analyse zijn zowel homogene als heterogene monsters opgenomen (sublaag = "ja", "nee" en "mix"). Om een indruk te krijgen van de invloed van de heterogeniteit van het monster op de doorlatendheid, zijn bovendien de monsters met sublaag-aanduiding "ja" en "nee" (homogeen) vergeleken met monsters met sublaag-aanduiding "mix".

De karakterisering volgens de indeling in lithostrat-lithoklassen heeft geleid tot het opsplitsen van de meetwaardenpopulatie in 56 deelpopulaties. Populaties met minder dan 10 goedgekeurde doorlatendheidsmeetwaarden zijn buiten beschouwing gelaten in de karakterisatie.

3.3.4 Significantie

Waar in de tekst gesproken wordt over significante relaties tussen eigenschappen, zijn deze onderzocht door toetsing van de gevonden richtingscoëfficiënten van de lineaire regressies met een significantieniveau van 5% ($\alpha=0,05$).

Waar in de tekst gesproken wordt over significante verschillen tussen populaties, zijn deze onderzocht met de nonparametrische Mann-Whitney toets voor een significantieniveau van 5% ($\alpha=0,05$).

4 Resultaten

4.1 Overzicht meetresultaten

Uit de kernen van de 75 TopIntegraal-steekboringen zijn 1736 monsters genomen voor bepaling van hydraulische eigenschappen. Hiervan hebben 1275 monsters (73%) een goedgekeurde meetwaarde voor de doorlatendheid, verdeeld over 514 horizontale bepalingen (kh) en 761 verticale bepalingen (kv). De drie belangrijkste redenen om meetwaarden af te keuren waren (zie paragraaf 3.2.7):

- Het niet beschikbaar zijn van een gepaarde bepaling (korrelgrootteanalyse en organisch stofgehalte) van hetzelfde monster (177 monsters);
- Als zandmonsters geprepareerde kleimonsters (181 monsters);
- Mislukte monsternamen of voortijdige beëindiging van de meting wegens geconstateerde lekkage (103 monsters).

Het aantal monsters dat ondanks een monsterverstoringsindex 'matig tot slecht' of 'erg slecht' wel is meegenomen in deze analyse, bedraagt 141.

In Tabel 4 zijn per lithostrat-lithoklasse weergegeven: het aantal goedgekeurde meetresultaten en de 10-percentiel- (p10-), mediaan- en 90-percentiel (p90-) waarden van de horizontale en verticale doorlatendheid.

Gedurende het hele TopIntegraal-project, maar vooral in de eerste jaren waarin in Noord-Nederland werd geboord, zijn de bemonsterings-, uitname-, meet-, verwerkings- en controleprocedures proces geëvolueerd op basis van voortschrijdende inzichten. Het meest in het oog springende voorbeeld is de omschakeling van een constant head naar een falling head opstelling voor het meten van de doorlatendheid van zandige monsters (zie paragraaf 3.2.4). Daarbij is vanaf het begin veel aandacht besteed aan kwaliteitscontroles. Naar aanleiding van de evaluatie waarvan dit rapport het resultaat is, ontstond echter de wens om een harmonisatie door te voeren in de criteria op basis waarvan een meetresultaat wordt goed- of afgekeurd. Deze harmonisatie is deels afhankelijk van controles die nog uitgevoerd moeten worden, en die beschreven worden in paragraaf 5.3. Daarom worden de aan Tabel 4 ten grondslag liggende originele meetresultaten nog niet met dit rapport meegeleverd.

Tabel 4. Meetresultaten van de horizontale (kh) en verticale (kv) doorlatendheid per lithostrat-lithoklasse. De lithostratigrafische eenheden zijn aangeduid met de codering uit Tabel 2, zonder het voorvoegsel NU. NB1: de weergegeven doorlatendheidswaarden gelden voor de ruimtelijke schaal van een laboratoriummonster (40 tot 100 cm³). NB2: Vanwege het ontbreken van grindige en grindrijke monsters in de database zijn de weergegeven statistieken voor de lithoklassen grof zand en mindere mate midden zand niet representatief. Zie ook paragraaf 3.2.4.

lithoklasse-lithostrat-combinatie	aantal monsters kh	p10 van $10^{\log(kh, m/d)}$	mediaan van $10^{\log(kh, m/d)}$	p90 van $10^{\log(kh, m/d)}$	aantal monsters kv	p10 van $10^{\log(kv, m/d)}$	mediaan van $10^{\log(kv, m/d)}$	p90 van $10^{\log(kv, m/d)}$
v-NIGR					7	-4.0	-3.6	-2.4
v-NI					7	-4.4	-3.6	-1.9
v-NIBA					18	-4.4	-3.5	-2.0
v-BXSI					2	-2.8	-2.5	-2.1
v-BX					3	-2.7	-2.2	-2.1
v-BXTI					4	-2.9	-2.6	-2.2
v-EE					1	-2.1	-2.1	-2.1
v-DN					1	-2.5	-2.5	-2.5
v-URTY					6	-3.6	-2.4	-2.0
v-URVE					1	-2.6	-2.6	-2.6
k-NA					1	-3.8	-3.8	-3.8
k-BXTI					3	-4.3	-4.2	-4.1
k-URTY					4	-4.6	-4.2	-3.3
k-PENI					8	-5.7	-5.3	-4.5
kz-NI					1	-4.4	-4.4	-4.4
kz-NA	3	-1.9	-1.7	-0.6	54	-5.2	-4.4	-3.5
kz-BXSI					1	-4.2	-4.2	-4.2
kz-BX					9	-4.2	-3.3	-2.8
kz-BXTI					25	-3.8	-2.8	-2.3
kz-EE					17	-4.7	-4.1	-3.2
kz-DRSC	1	-3.6	-3.6	-3.6	1	-5.3	-5.3	-5.3
kz-DRGI					60	-5.2	-4.5	-3.7
kz-DN					2	-2.7	-2.1	-1.4
kz-URTY					34	-5.3	-4.4	-3.4
kz-PENI					9	-5.7	-4.3	-3.5
kz-PE	1	-2.0	-2.0	-2.0	3	-1.9	-1.7	-1.2
kz-URVE					7	-5.2	-4.1	-3.5
zf-NA	15	-1.5	-0.2	0.4	14	-2.1	-0.3	0.0
zf-BX	6	-1.1	0.1	0.3	8	-2.0	-0.2	0.3
zf-BXTI	4	-1.2	-0.4	0.2	5	-1.2	-0.8	0.0
zf-EE	6	-0.2	0.3	1.0	6	-0.2	0.2	0.5
zf-DRSC					1	0.4	0.4	0.4
zf-DN	2	0.0	0.1	0.2	3	-0.4	0.0	0.2
zf-URTY	11	-0.7	-0.2	0.4	7	-1.0	0.0	0.4
zf-PENI	1	-0.5	-0.5	-0.5				
zf-PE	29	-0.6	0.3	0.4	30	-0.4	0.2	0.5
zf-URVE	5	-0.8	-0.1	0.3	4	-0.4	0.0	0.2
zm-NA	7	0.3	0.7	0.9	6	0.0	0.5	0.9
zm-BXWI	17	-0.7	0.2	0.5	15	-1.4	-0.2	0.5
zm-BX	80	-0.4	0.4	1.0	73	-0.7	0.3	0.8
zm-BXTI	11	-0.8	0.4	0.5	11	-1.3	0.3	0.4
zm-EE	6	-0.4	0.3	1.0	5	-0.8	0.2	0.6
zm-DRGI	7	0.3	0.6	1.0	10	0.1	0.7	1.1
zm-DRSC	8	-2.5	-1.1	-0.5	8	-4.6	-2.9	-0.1
zm-DN	50	-0.1	0.4	0.7	50	-1.1	0.2	0.6
zm-URTY	35	0.2	0.6	1.0	34	0.1	0.5	0.9
zm-PE	42	-0.4	0.5	0.8	40	-0.2	0.4	0.9
zm-URVE	19	0.0	0.6	1.0	21	-0.1	0.6	0.9
zg-NA	1	1.1	1.1	1.1	2	1.1	1.2	1.4
zg-BX	23	0.6	1.0	1.4	13	0.0	0.9	1.5
zg-BXTI	3	-0.3	0.5	1.4	2	-0.4	0.1	0.6
zg-EE	5	0.1	1.0	1.5	3	0.0	0.1	1.2
zg-DRSC	14	0.1	0.9	1.2	8	0.4	0.7	1.4
zg-DN	6	0.4	1.1	1.4	5	1.0	1.3	1.6
zg-URTY	47	0.8	1.2	1.8	43	0.7	1.2	1.8
zg-PE	24	-0.3	1.1	1.5	25	-0.1	1.1	1.5
zg-URVE	24	0.8	1.1	1.5	19	0.8	1.1	1.4
zg-AP	1	1.0	1.0	1.0	1	0.8	0.8	0.8

4.2 Relaties tussen lithologische eigenschappen en doorlatendheid

4.2.1 Zand-, lutum- en siltpercentages

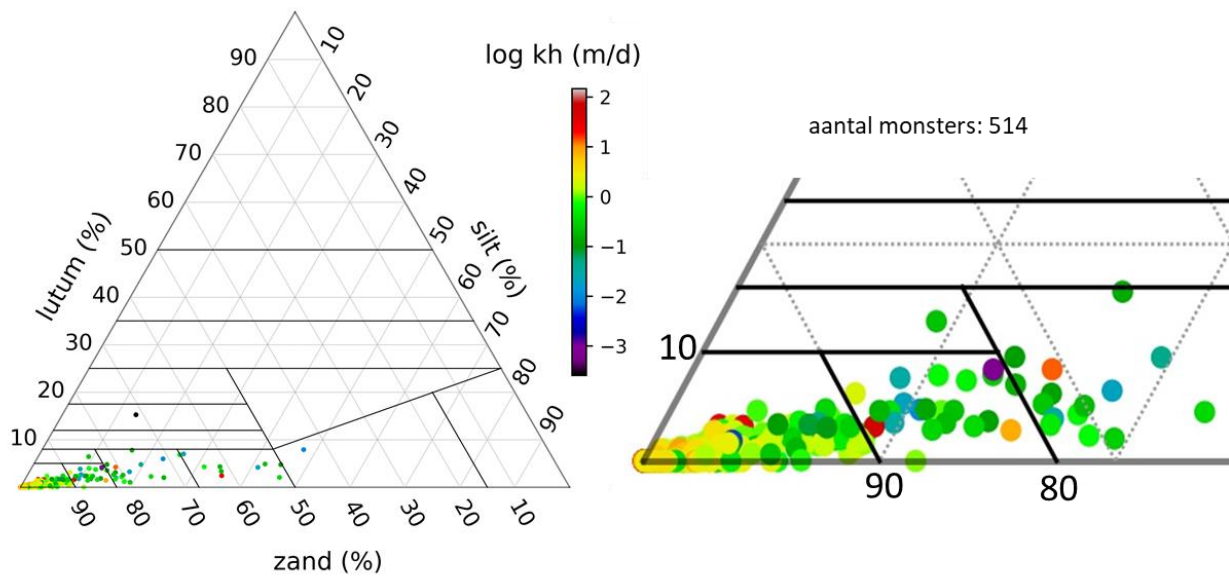
Relaties tussen de doorlatendheid en de met korrelgrootte-analyses bepaalde zand-, silt- en lutumpercentages van de bijbehorende monsters zijn als volgt weergegeven:

- In driehoeksdiagrammen (Figuur 6 en Figuur 7);
- In spreidingsdiagrammen, met op de x-as het lutumpercentage (Figuur 8 en Figuur 9);
- In spreidingsdiagrammen, met op de x-as het lutum+siltpercentage (Figuur 10 en Figuur 11).

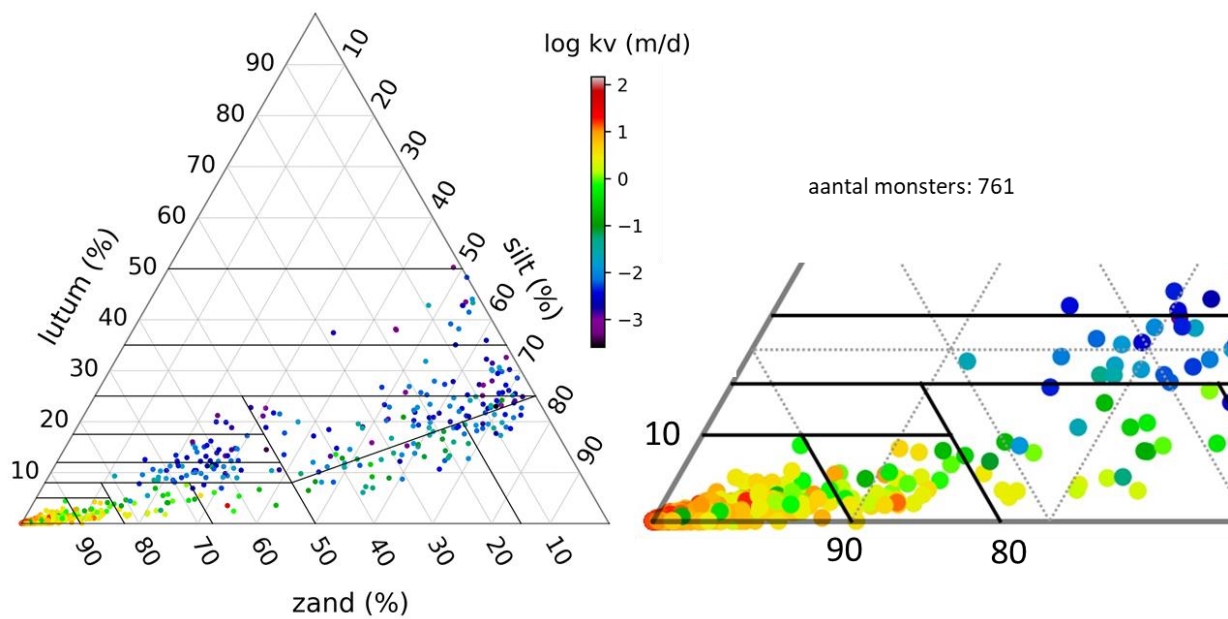
In Figuur 6 wordt de linkeronderhoek van de driehoek gedomineerd door gele en oranje punten. Dit zijn monsters met een zandpercentage hoger dan 95% en een log kh van circa 0,5 tot 1, corresponderend met een kh van circa 3 tot 10 m/d. Bij zandpercentages lager dan 95% domineren de groene punten; monsters met een log kh lager dan 0,5, c.q. een kh lager dan circa 3 m/d. De afname van kh met afnemend zandpercentage en dus toenemend lutum- en siltpercentage is ook terug te zien in zwakke, maar significante negatieve relaties in de spreidingsdiagrammen.

In Figuur 7 wordt de linkeronderhoek van de driehoek gedomineerd door oranje en rode punten. Dit zijn monsters met een zandpercentage hoger dan 95% en een log kv van 1 of hoger, corresponderend met een kh van minimaal 10 m/d. Bij vanaf 95% afnemende zandpercentages domineren achtereenvolgens gele/lichtgroene, donkergroene, donkerblauwe, wederom donkergroene en tenslotte weer donkerblauwe punten. Het eerstgenoemde cluster donkerblauwe punten, met zeer lage kv-waarden ($< 10^{-2}$ m/d) bij vrij hoge zandpercentages (55-70%) is opvallend. Uit Figuur 9 en Figuur 11 blijkt, dat dit een cluster DRGI-monsters ('keileem') betreft, die blijkbaar veel slechter doorlatend zijn dan het zandpercentage zou doen vermoeden. Met uitzondering van deze DRGI-monsters geeft Figuur 11 over het gehele zandpercentagebereik (100-0%) een dalende trend in kv te zien.

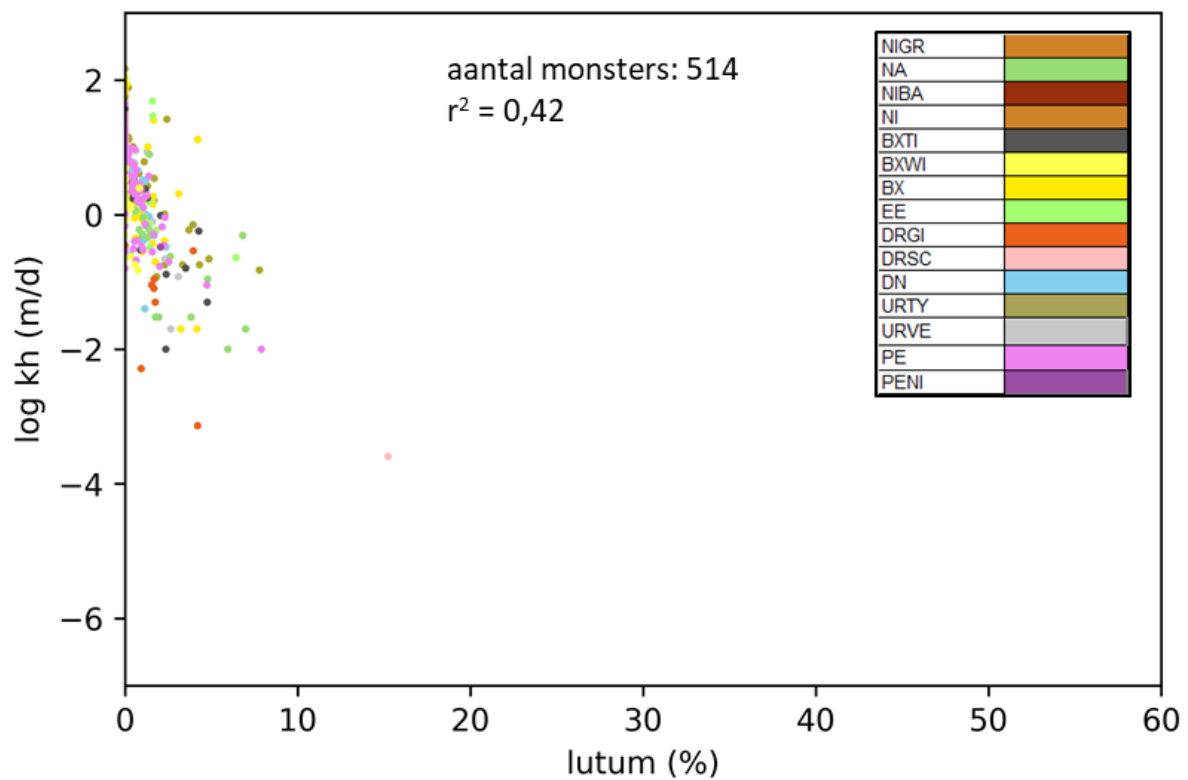
Bij lutumpercentages >10% (Figuur 9) en lutum+siltpercentages >20% (Figuur 11) valt bovendien op dat BXTI-monsters relatief goed doorlatend zijn, URTY-, URVE-, EE- en NA-monsters intermediair, en PENI-monsters ('potklei') slecht doorlatend. Dit verloop van doorlatendheden over de genoemde lithostratigrafische eenheden komt terug in alle hiernavolgende figuren waar de verticale doorlatendheid op de y-as is uitgezet.



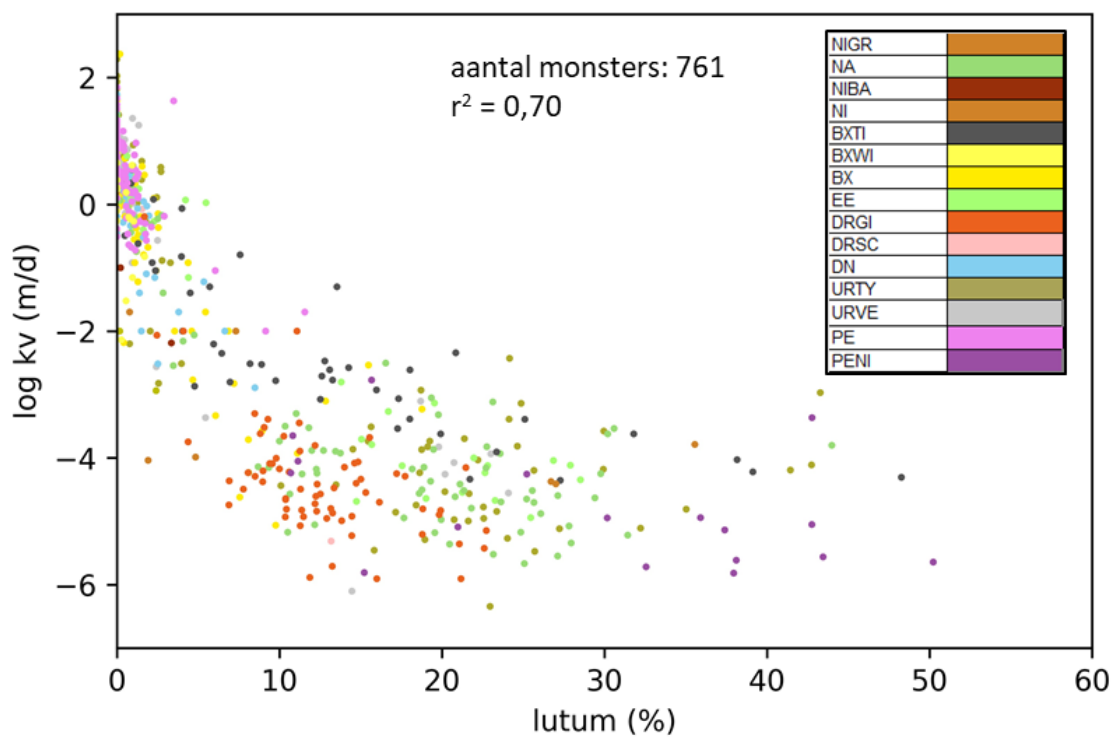
Figuur 6. Horizontale doorlatendheid (k_h) in klei-leem-zand driehoek, op basis van gemeten zand-, silt- en lutumpercentages van het corresponderende monster. Inzet rechts: detail van de linkeronderhoek.



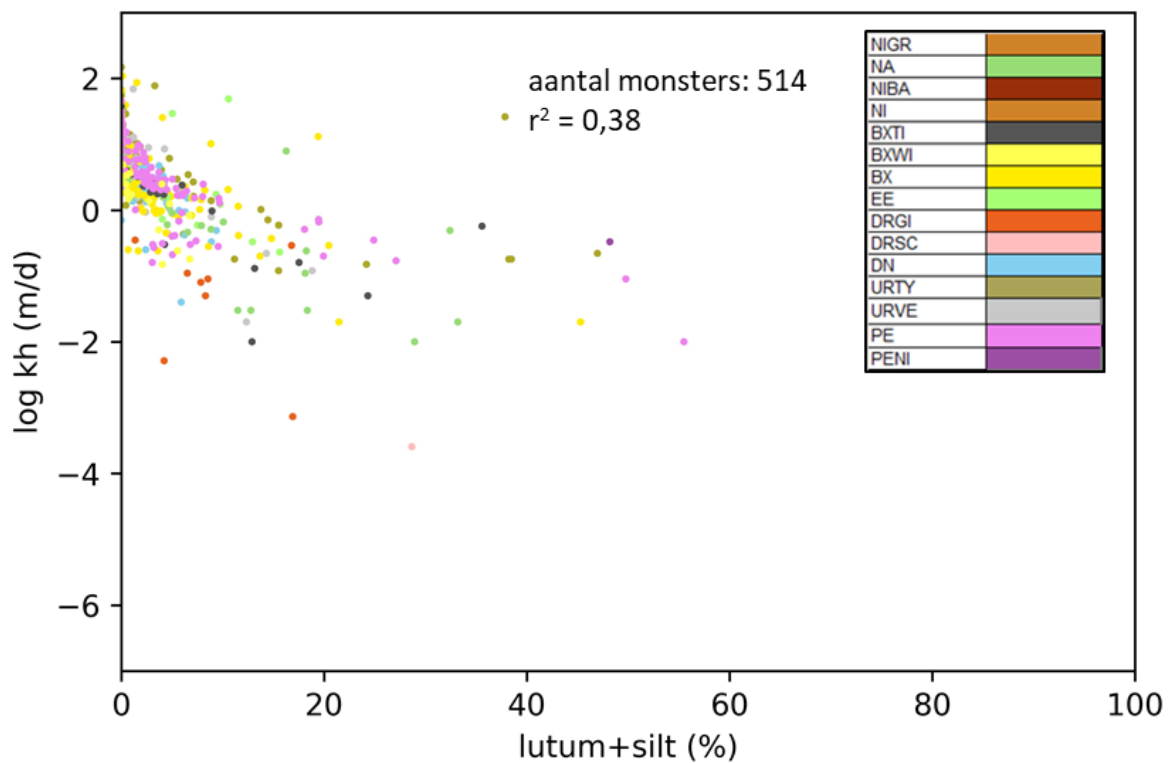
Figuur 7. Verticale doorlatendheid (k_v) in klei-leem-zand driehoek, op basis van gemeten zand-, silt- en lutumpercentages van het corresponderende monster. Inzet rechts: detail van de linkeronderhoek.



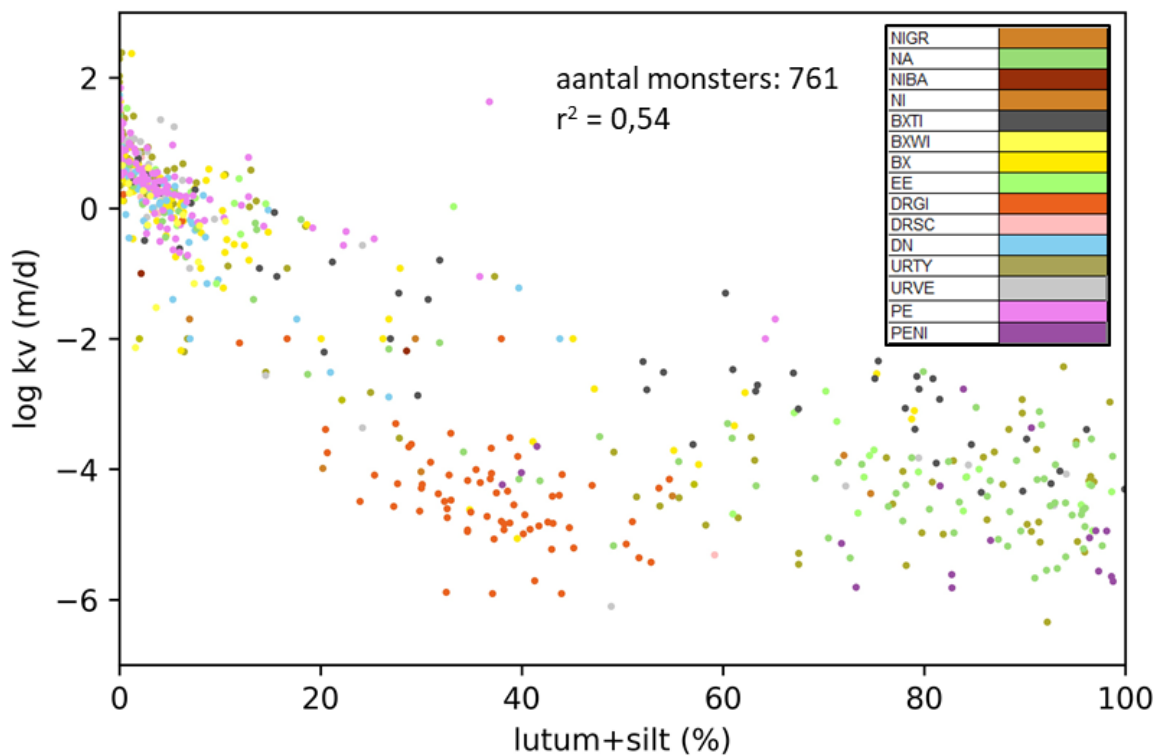
Figuur 8. Horizontale doorlatendheid (kh) uitgezet tegen het lutumpercentage van het monster. De aanduiding van de lithostratigrafische eenheden in de legenda is conform codering in Tabel 2, zonder het voorvoegsel NU.



Figuur 9. Verticale doorlatendheid (kv) uitgezet tegen het lutumpercentage van het monster. De aanduiding van de lithostratigrafische eenheden in de legenda is conform codering in Tabel 2, zonder het voorvoegsel NU.



Figuur 10. Horizontale doorlatendheid (kh) uitgezet tegen het lutum+siltpercentage van het monster. De aanduiding van de lithostratigrafische eenheden in de legenda is conform codering in Tabel 2, zonder het voorvoegsel NU.



Figuur 11. Verticale doorlatendheid (kv) uitgezet tegen het lutum+siltpercentage van het monster. De aanduiding van de lithostratigrafische eenheden in de legenda is conform codering in Tabel 2, zonder het voorvoegsel NU.

4.2.2 Mediane korrelgrootten

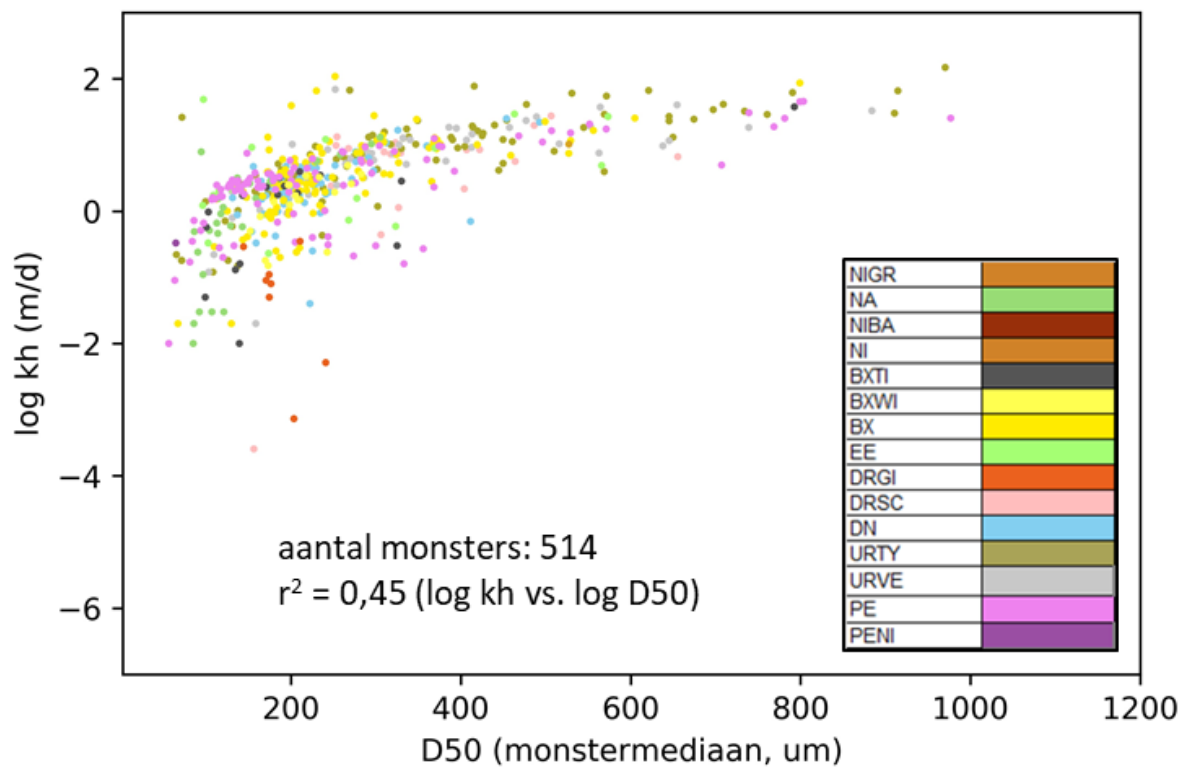
Relaties tussen de doorlatendheid en de met korrelgrootte-analyses bepaalde mediane korrelgrootten (D50) van de bijbehorende monsters zijn als volgt weergegeven:

- In Figuur 12 en Figuur 13 in spreidingsdiagrammen met op de x-as de D50 van het gehele monster (de monstermediaan);
- In Figuur 14 en Figuur 15 in spreidingsdiagrammen met op de x-as de D50 van de zandfractie ($> 63\mu\text{m}$ en $< 2000\mu\text{m}$, de zandmediaan).

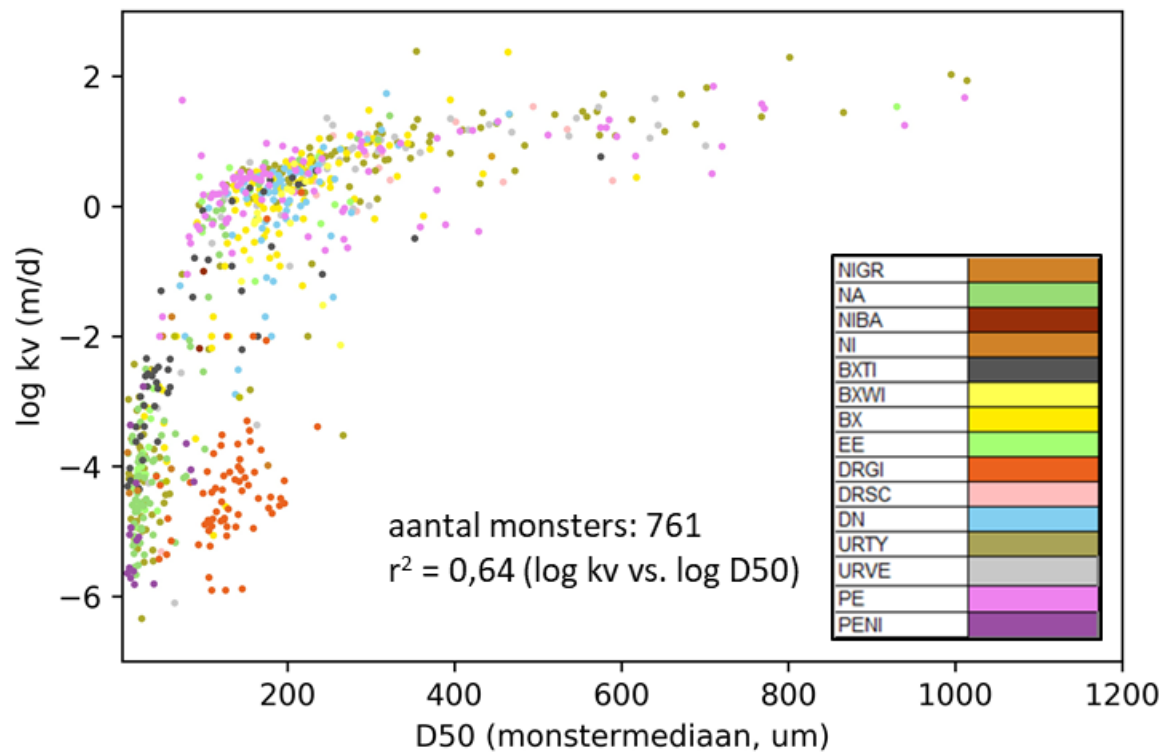
De in deze figuren weergegeven determinatiecoëfficiënt (r^2) is bepaald op basis van $^{10}\log kv$ en $^{10}\log D50$. Voor de leesbaarheid is echter de D50 steeds met normale, niet-getransformeerde waarden op de x-as weergegeven.

Er zijn zwakke, maar significante, positieve relaties tussen de D50 en de doorlatendheid. Deze relaties zijn sterker bij de D50 van het monster dan bij de D50 van alleen de zandfractie. Dit wordt verklaard doordat bij monsters met hoofdgrondsoort klei de D50 van de zandfractie niet representatief is voor de korrelgrootteverdeling. In Figuur 15 is daarom bij lage kv-waarden de relatie tussen doorlatendheid en zandmediaan veel zwakker dan bij hogere waarden ($>0,1\text{ m/d}$). Bij de kh-waarde speelt dit niet omdat deze vrijwel alleen aan zandmonsters is bepaald. De monstermediaan ligt bij deze monsters dichtbij de zandmediaan.

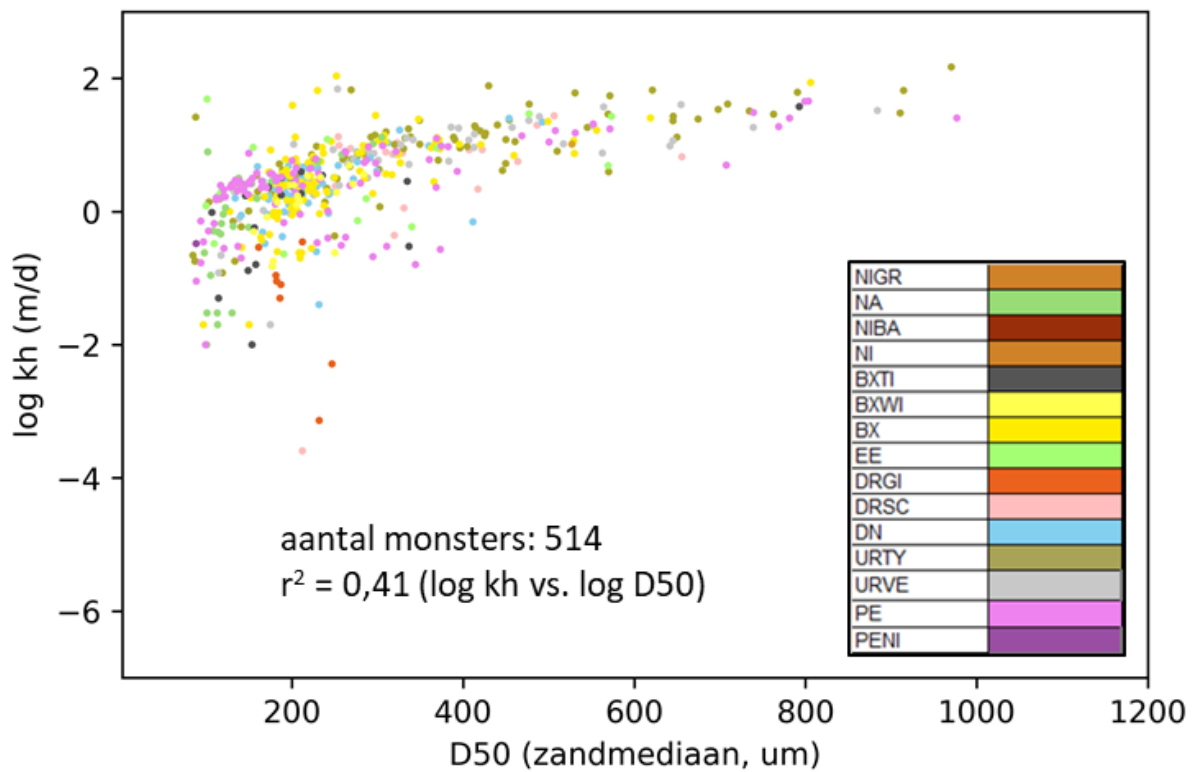
In Figuur 13 en Figuur 15 vallen de DRGI-monsters weer op met veel lagere doorlatendheden dan verwacht zou worden op basis van de korrelgrootte-kenmerken. Als deze monsters buiten beschouwing worden gelaten, wordt de relatie tussen kv en monstermediaan sterker en neemt r^2 toe van 0,64 naar 0,80 op basis van 693 monsters.



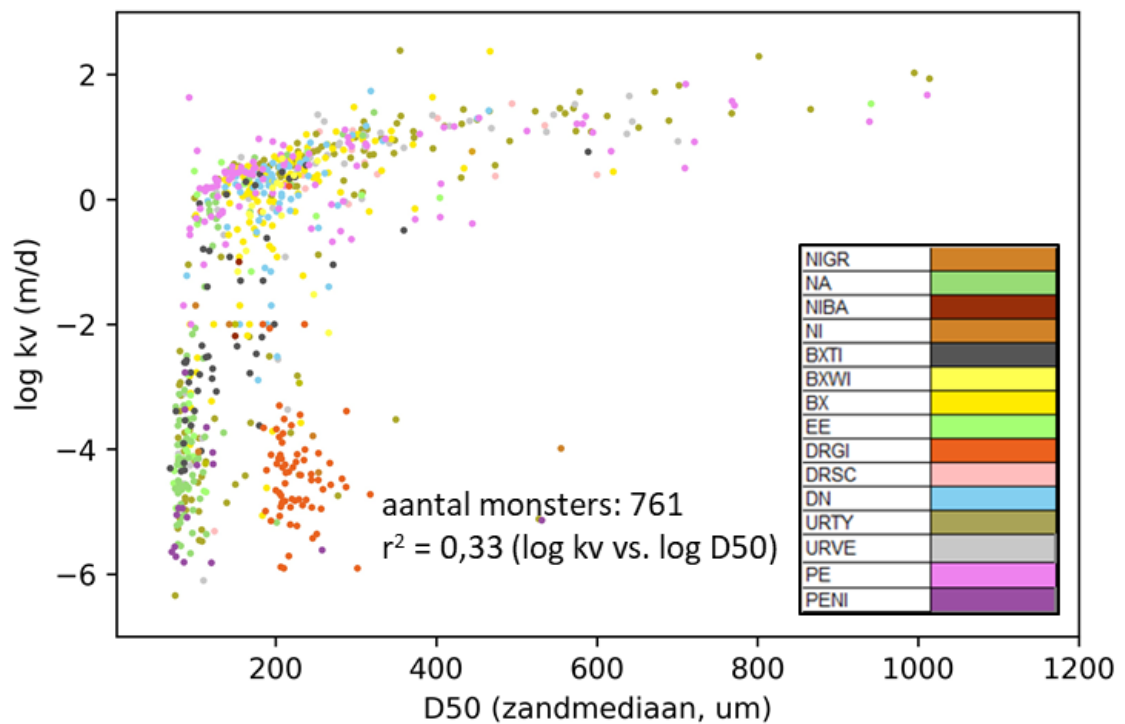
Figuur 12. Horizontale doorlatendheid (kh) uitgezet tegen de mediane korrelgrootte van het monster. De aanduiding van de lithostratigrafische eenheden in de legenda is conform codering in Tabel 2, zonder het voorvoegsel NU.



Figuur 13. Verticale doorlatendheid (kv) uitgezet tegen de mediane korrelgrootte van het monster. De aanduiding van de lithostratigrafische eenheden in de legenda is conform codering in Tabel 2, zonder het voorvoegsel NU.



Figuur 14. Horizontale doorlatendheid (kh) uitgezet tegen de mediane korrelgrootte van de zandfractie van het monster. De aanduiding van de lithostratigrafische eenheden in de legenda is conform codering in Tabel 2, zonder het voorvoegsel NU.



Figuur 15. Verticale doorlatendheid (kv) uitgezet tegen de mediane korrelgrootte van de zandfractie van het monster. De aanduiding van de lithostratigrafische eenheden in de legenda is conform codering in Tabel 2, zonder het voorvoegsel NU.

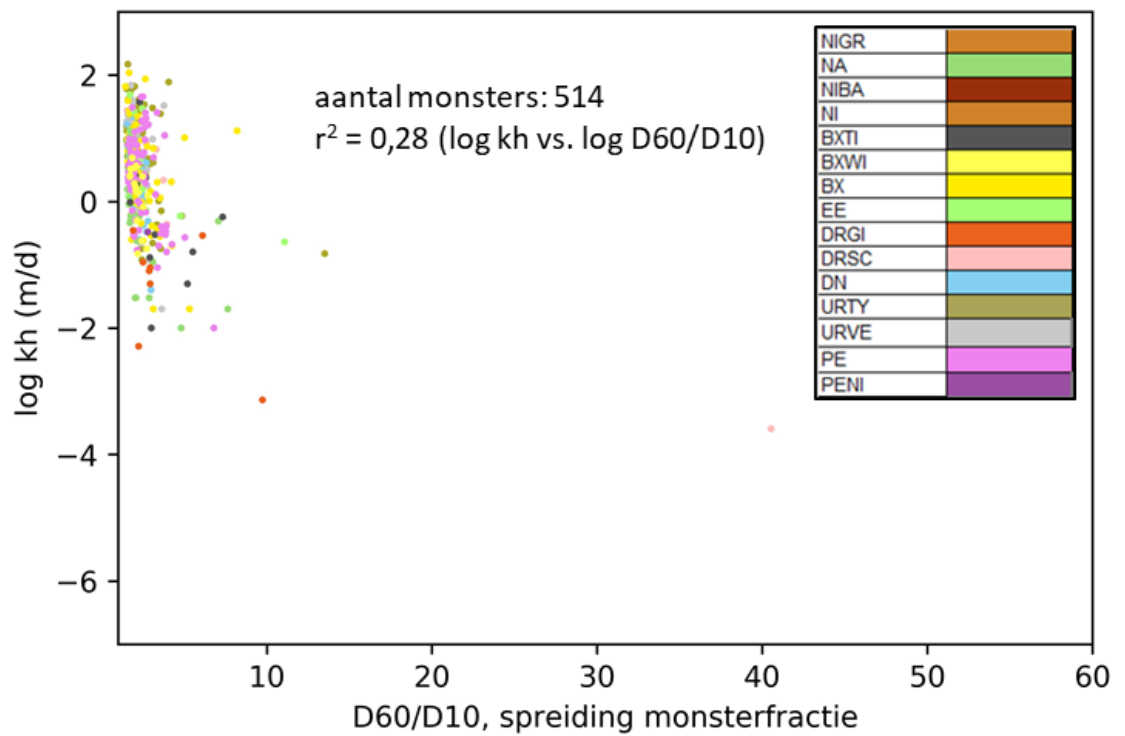
4.2.3 Spreiding korrelgrootte (sortering)

De spreiding van de korrelgrootte wordt vaak aangeduid met de waarde van D_{60}/D_{10} , de verhouding tussen de 60- en 10-percentielwaarden van de korrelgrootteverdeling. Hoe hoger D_{60}/D_{10} , hoe groter de spreiding van de korrelgrootte. Relaties tussen de doorlatendheid en de D_{60}/D_{10} -waarden, zijn als volgt weergegeven:

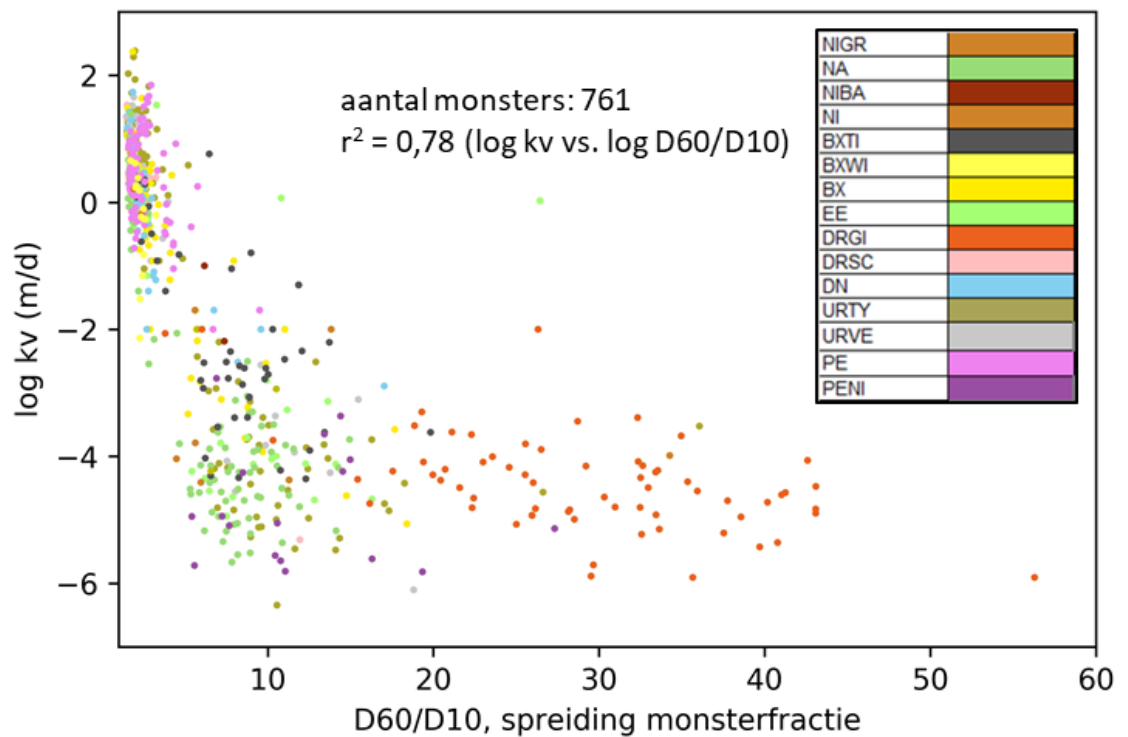
- In Figuur 16 en Figuur 17 in spreidingsdiagrammen met op de x-as de D_{60}/D_{10} van het gehele monster (de monsterspreiding);
- In Figuur 18 en Figuur 19 in spreidingsdiagrammen met op de x-as de D_{60}/D_{10} van de zandfractie ($> 63\mu\text{m}$ en $< 2000\mu\text{m}$, de zandspreiding).

Er is een zwakke (kh) tot vrij sterke (kv) significante relatie tussen doorlatendheid en monsterspreiding. Er is geen relatie tussen de doorlatendheid en de zandspreiding op basis van de volledige monsterverzameling. Voor afzonderlijke lithostrat-lithoklassen is deze bevinding te nuanceren. In Figuur 19 is bijvoorbeeld te zien dat een clustertje van circa 10 monsters uit de Formatie van Peelo (PE) aan de rechterkant van de puntenwolk een grote zandspreiding heeft en aanmerkelijk lagere horizontale doorlatendheden vertoont dan de overige monsters uit deze lithostratigrafische eenheid.

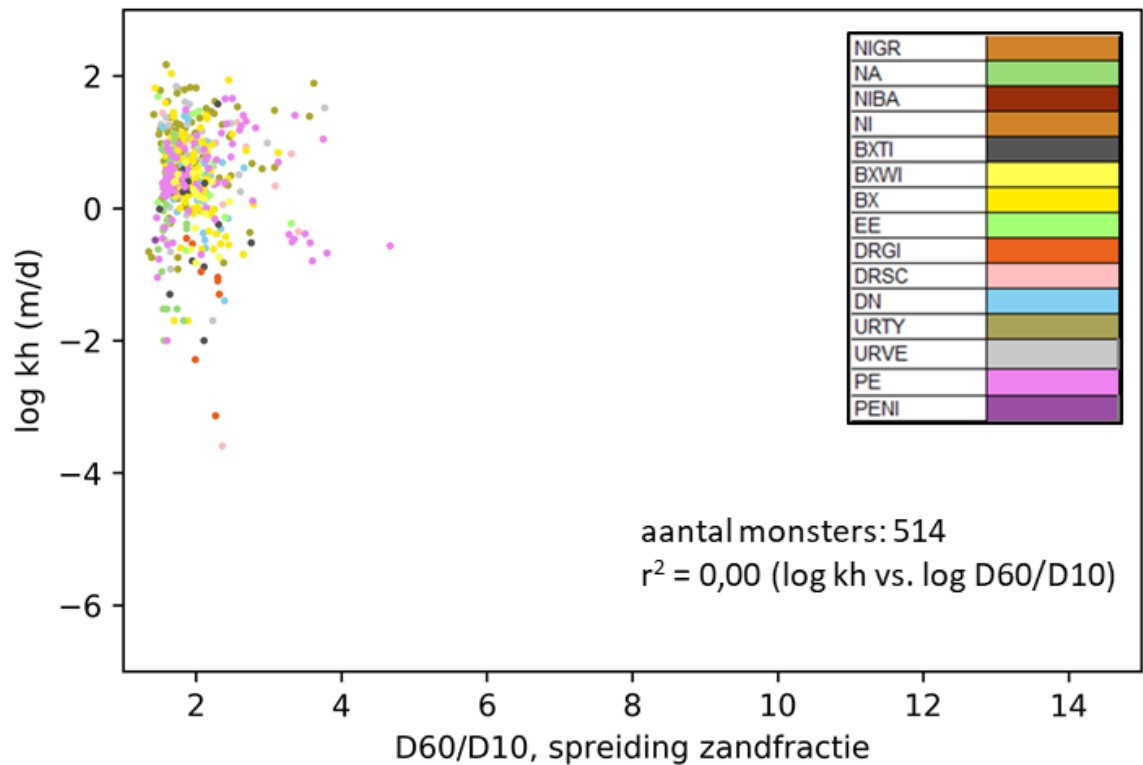
De afwijkende clustering van DRGI-monsters in Figuur 17 en Figuur 19 is weer opvallend.



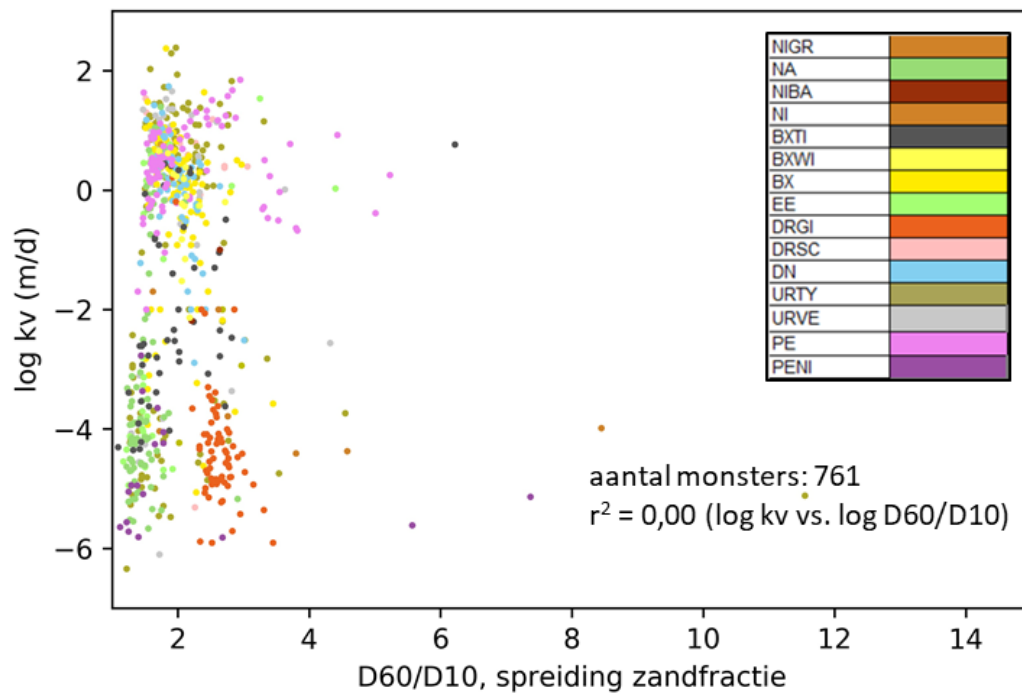
Figuur 16. Horizontale doorlatendheid (kh) uitgezet tegen de D60/D10 (de monsterspreiding). De aanduiding van de lithostratigrafische eenheden in de legenda is conform codering in Tabel 2, zonder het voorvoegsel NU.



Figuur 17. Verticale doorlatendheid (kv) uitgezet tegen de D60/D10 (de monsterspreiding). De aanduiding van de lithostratigrafische eenheden in de legenda is conform codering in Tabel 2, zonder het voorvoegsel NU.



Figuur 18. Horizontale doorlatendheid (kh) uitgezet tegen de D60/D10-waarde van de zandfractie van het monster (de zandspreiding). De aanduiding van de lithostratigrafische eenheden in de legenda is conform codering in Tabel 2, zonder het voorvoegsel NU.

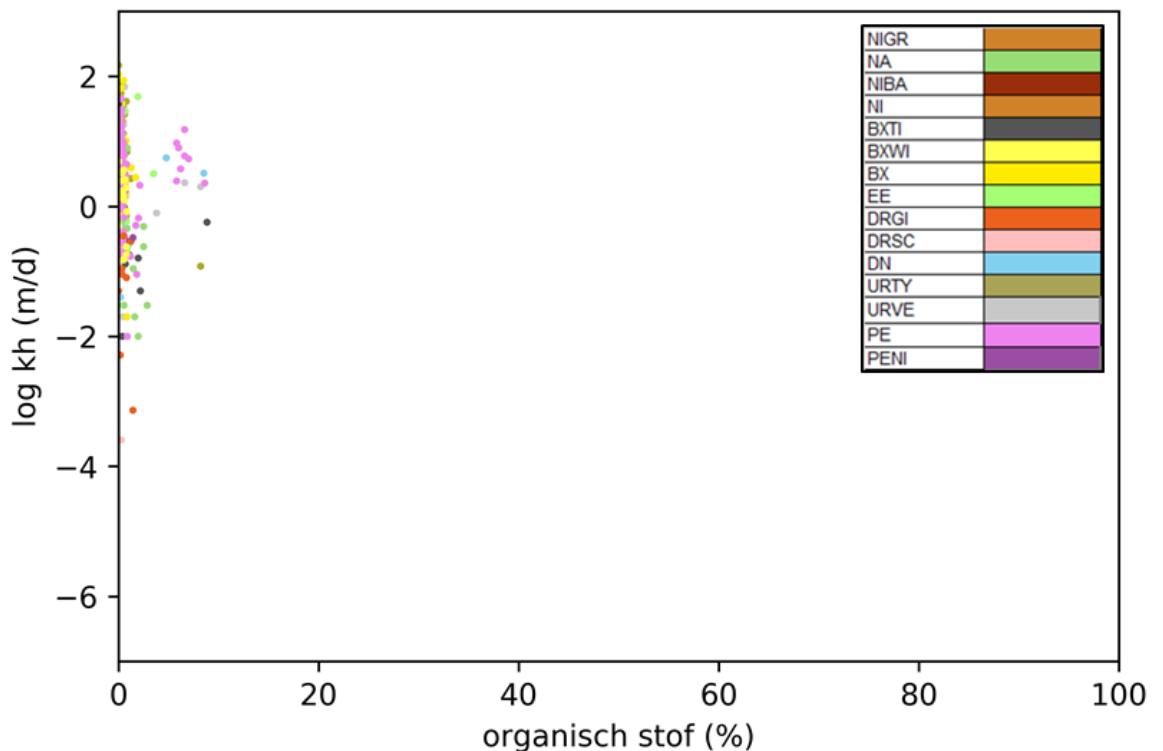


Figuur 19. Verticale doorlatendheid (kv) uitgezet tegen de D60/D10-waarde van de zandfractie van het monster (de zandspreiding). De aanduiding van de lithostratigrafische eenheden in de legenda is conform codering in Tabel 2, zonder het voorvoegsel NU.

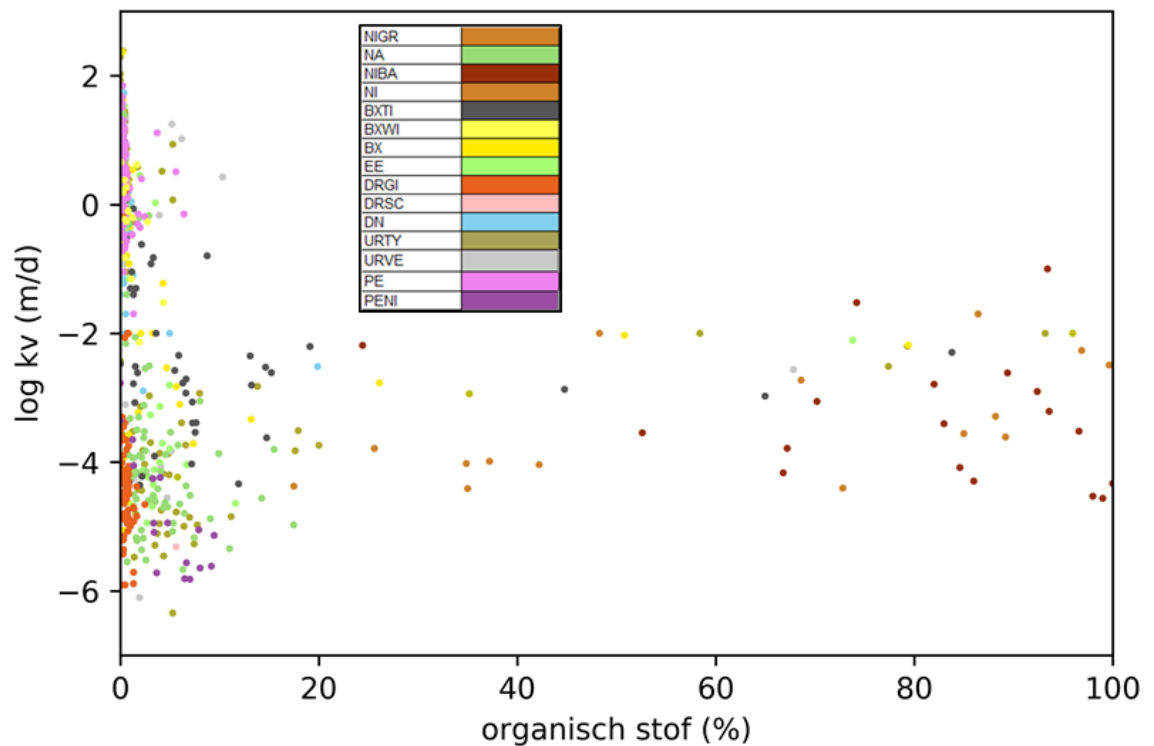
4.2.4 Gehalte aan organische stof

In Figuur 20 en Figuur 21 zijn de kh- en kv-meetwaarden uitgezet tegen het organisch stofgehalte. Er zijn geen relaties zichtbaar.

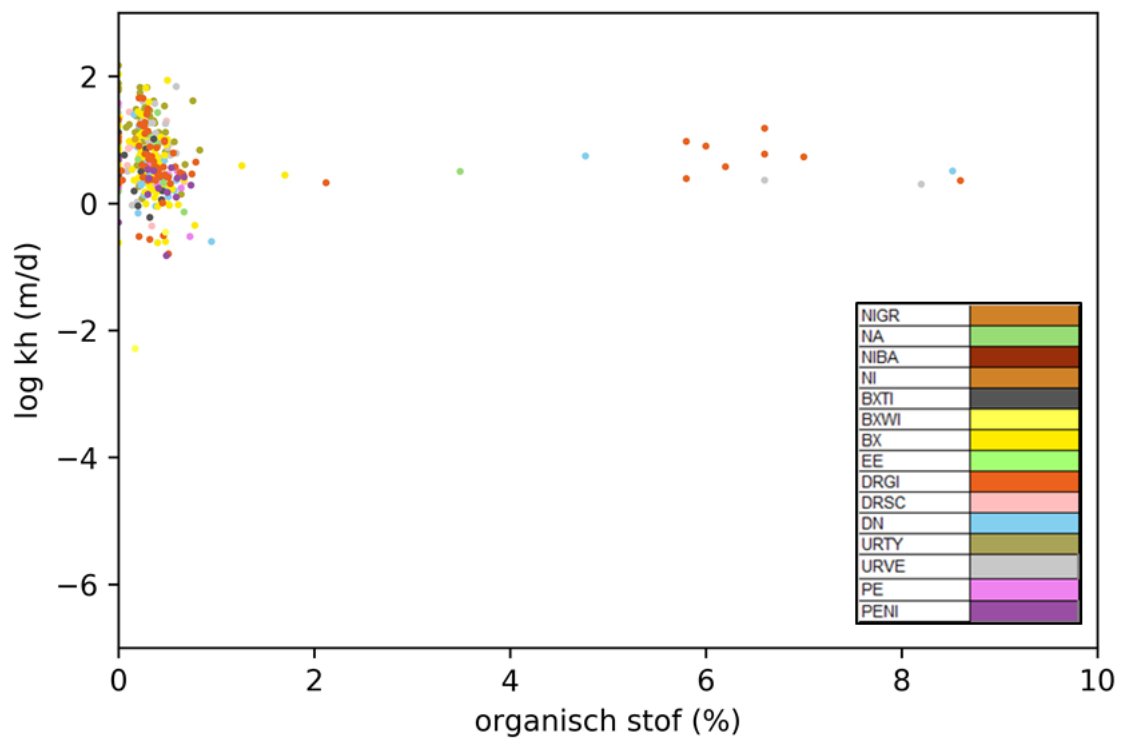
Om mogelijke correlatie tussen het organisch stofgehalte en de lutum- en siltpercentages uit te sluiten, is in Figuur 22 en Figuur 23 hetzelfde gedaan voor een selectie van de monsters met een beperkt aandeel lutum- en siltfractie (bijmenging lutum en silt <5%) waardoor de grondsoorten klei en leem buiten de selectie gebleven zijn. De monsters binnen de selectie zijn dan ook zandig of juist sterk organisch (veen/detritus) met een beperkt aandeel lutum en/of silt. Ook dan is geen relatie zichtbaar tussen organisch stofgehalte en doorlatendheid. Er is geen nader onderscheid gemaakt in type organisch materiaal (veen, detritus, gyttja).



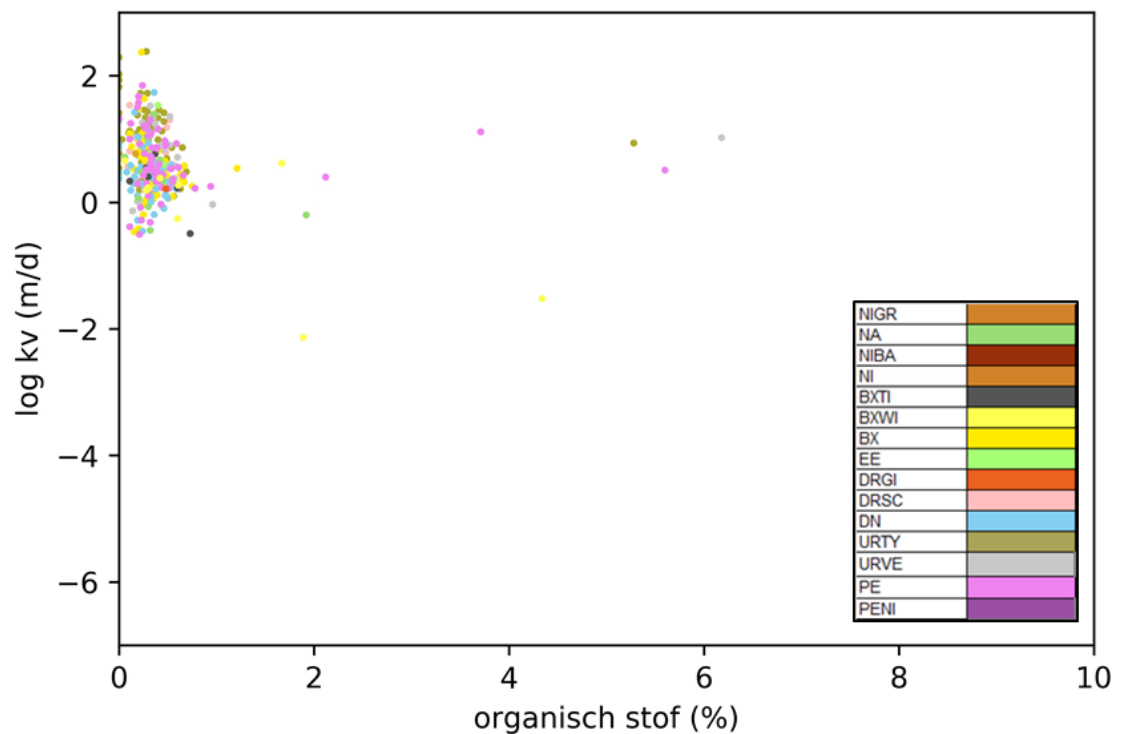
Figuur 20. Horizontale doorlatendheid (kh) uitgezet tegen het organische-stofpercentage van het corresponderende monster. De aanduiding van de lithostratigrafische eenheden in de legenda is conform codering in Tabel 2, zonder het voorvoegsel NU.



Figuur 21. Verticale doorlatendheid (kv) uitgezet tegen het organische-stofpercentage van het corresponderende monster. De aanduiding van de lithostratigrafische eenheden in de legenda is conform codering in Tabel 2, zonder het voorvoegsel NU.



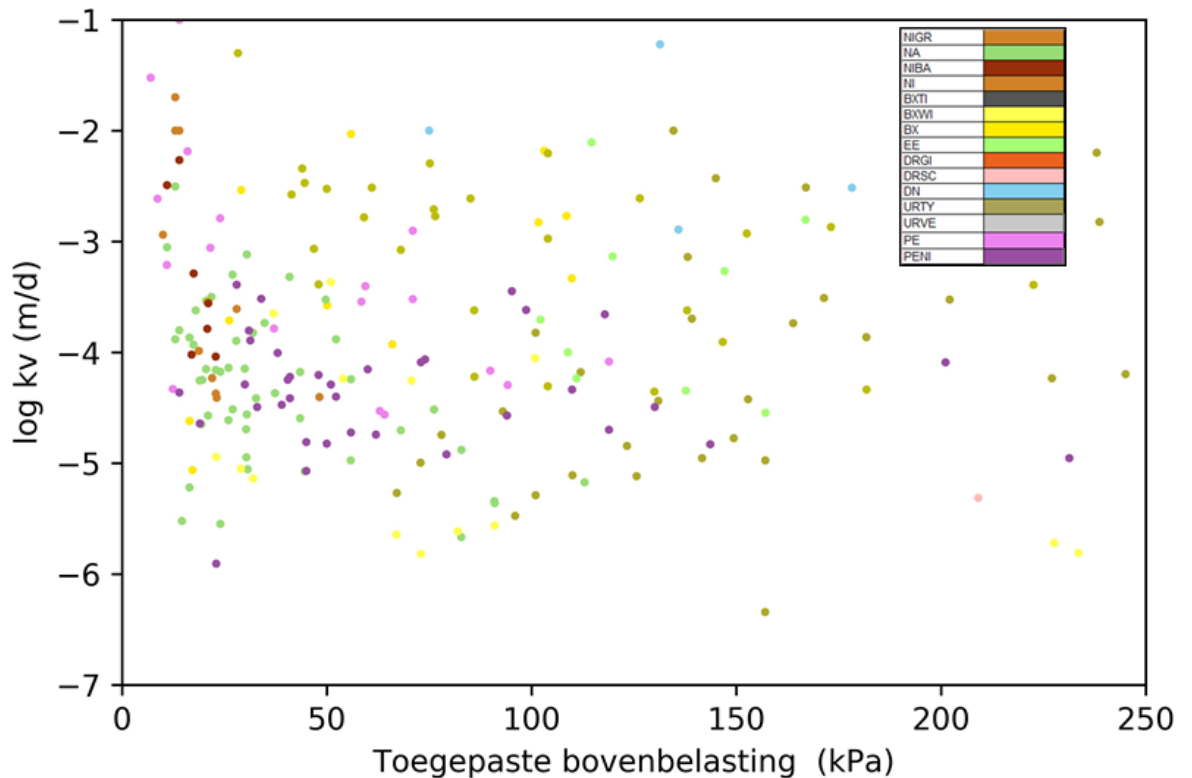
Figuur 22. Horizontale doorlatendheid (kh) uitgezet tegen het organische-stofpercentage van het corresponderende monster; alleen zandige monsters. Let op: schaal x-as verschilt van Figuur 20. De aanduiding van de lithostratigrafische eenheden in de legenda is conform codering in Tabel 2, zonder het voorvoegsel NU.



Figuur 23. Verticale doorlatendheid (kv) uitgezet tegen het organische-stofpercentage van het corresponderende monster; alleen zandige monsters. Let op: schaal x-as verschilt van Figuur 21. De aanduiding van de lithostratigrafische eenheden in de legenda is conform codering in Tabel 2, zonder het voorvoegsel NU.

4.2.5 Bovenbelasting

In Figuur 24 zijn de kv-meetwaarden die met de oedometer-opstelling zijn bepaald weergegeven in relatie tot de bij de proef toegepaste bovenbelasting. Er is geen relatie zichtbaar tussen de kv-waarde en de toegepaste bovenbelasting. Voor de oudere lithostratigrafische eenheden (in de legenda van Figuur 24: vanaf DRGI naar beneden) is een mogelijke verklaring dat deze bedekt zijn geweest door landijs. De bovenbelasting door landijs kan niet worden gekwantificeerd, en is daarom niet meegenomen in de berekening van de toe te passen bovenbelasting. Ook de jongere eenheden vertonen echter geen relatie.



Figuur 24. Verticale doorlatendheid (kv) uitgezet tegen de bovenbelasting (eigenlijk alzijdige druk) die tijdens de kv-bepaling met de oedometer is toegepast. De aanduiding van de lithostratigrafische eenheden in de legenda is conform codering in Tabel 2, zonder het voorvoegsel NU.

4.3 Karakterisering van de doorlatendheid per lithostrat-lithoklasse

4.3.1 Horizontale doorlatendheid (kh)

Zoals beschreven in paragraaf 3.3.3 heeft de karakterisering van de horizontale doorlatendheid betrekking op lithostrat-lithoklassen met minimaal 10 goedgekeurde doorlatendheidsmeetwaarden.

De verdelingen van kh-waarden per lithostrat-lithoklasse combinatie zijn grafisch weergegeven in Figuur 25. Per combinatie zijn ook weergegeven de populatiegrootte en de mediaanwaarden van de zandpercentages, de zandmedianen en de zandspreidingen binnen de populatie.

Gezien de bevindingen in paragraaf 4.2. is de trend naar hogere kh-waarden bij hogere zandpercentages en zandmediaanwaarden niet verrassend. Wel is de kh voor grof zand en midden zand in het algemeen aan de lage kant. Dit wordt veroorzaakt doordat grindige monsters vooralsnog niet zijn gemeten (zie uitleg in paragraaf 3.2.2). Doordat grindige monsters naar verwachting de hoogste doorlatendheden hebben, is de gepresenteerde karakterisering voor deze lithoklassen waarschijnlijk een onderschatting. Bij midden zand speelt ook mee dat de ondergrens van deze lithoklasse is gelegd bij een zandmediaan van 150 μm . Midden zand is dus niet hetzelfde als de SBB-klasse matig grof zand, maar omvat ook matig fijn zand.

Er zijn ook verschillen te zien tussen en binnen lithostratigrafische eenheden, waarvan de onderstaande het meest opvallen:

- PE fijn zand heeft een hogere kh dan URTY en NA fijn zand.
- DRSC en PE grof zand hebben enkele zeer lage uitschieters in de kh.

Er zijn vier populaties met 15 of minder monsters. In al deze gevallen eindigt de inkeping van de mediaan aan één of beide zijden buiten de box. Dit is een aanwijzing dat de onzekerheid rond de mediaan relatief groot is (zie ook de toelichting in Figuur 5).

4.3.2 Verticale doorlatendheid (kv)

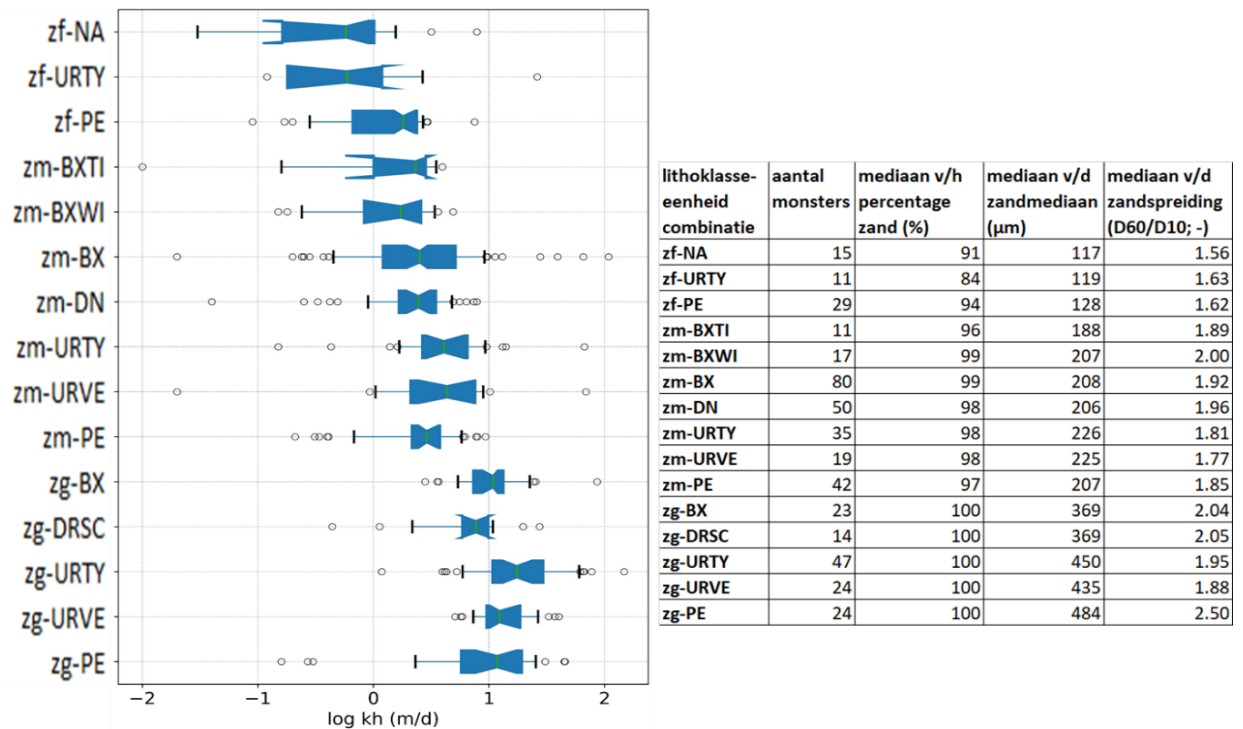
Zoals beschreven in paragraaf 3.3.3 heeft de karakterisering van de verticale doorlatendheid betrekking op lithostrat-lithoklassen met minimaal 10 goedgekeurde doorlatendheidsmeetwaarden.

De verdelingen van kv-waarden per lithostrat-lithoklasse combinatie zijn grafisch weergegeven in Figuur 26. Per combinatie zijn ook weergegeven de populatiegrootte en de mediaanwaarden van de zandpercentages, de monstermedianen en de monsterspreidingen binnen de populatie.

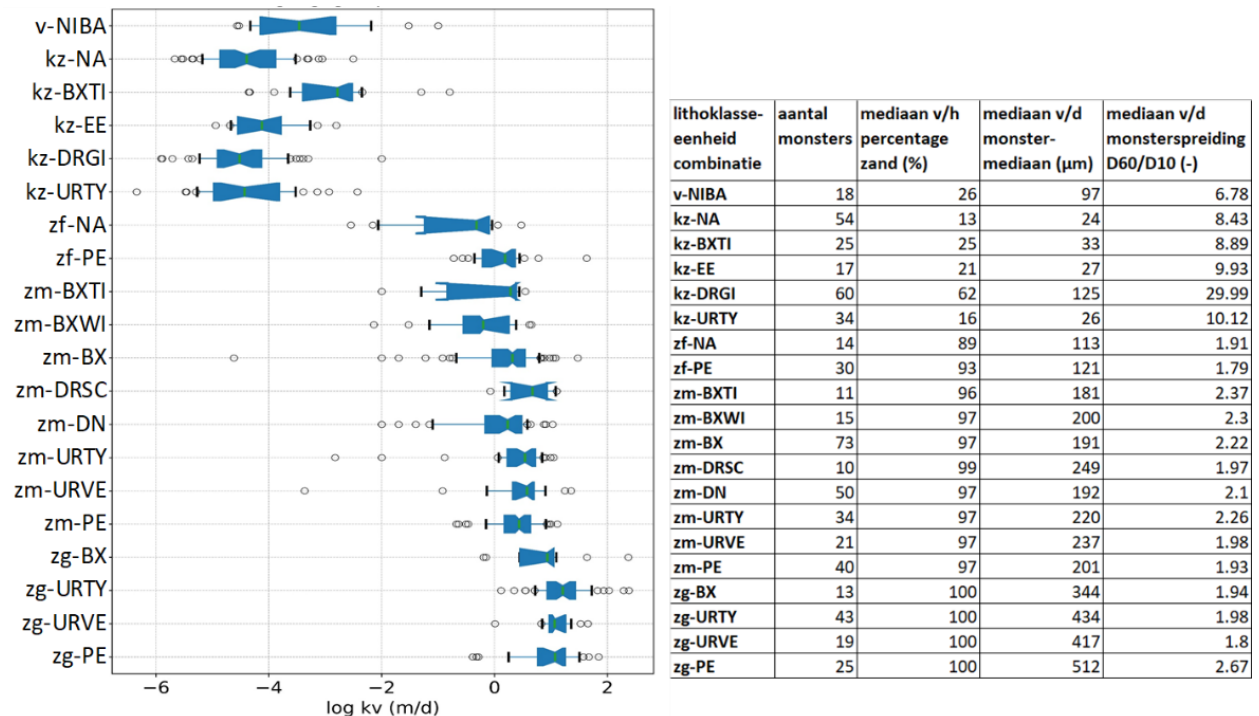
Gezien de bevindingen in paragraaf 4.2. is ook hier de trend naar hogere kv-waarden bij hogere zandpercentages, hogere monstermediaanwaarden en een lagere monsterspreiding, niet verrassend. Wat wel opvalt is het vrijwel ontbreken van meetwaarden in de orde van grootte 10^{-3} en 10^{-2} m/d in de lithoklassen kleiig zand (kz) en/of fijn zand (fz). Verder zijn er enkele opvallende verschillen tussen en binnen lithostratigrafische eenheden:

- De kv van BXTI kleiig zand is twee orden van grootte hoger dan van de andere kleiig zand lithostrat-lithoklassen.
- DRGI (keileem) valt op met een voor kleiig zand hoge monstermediaan en een extreem hoge monsterspreiding.
- De verticale doorlatendheid van PE fijn zand is hoger dan van NA.

Ook bij kv is de onzekerheid rond de mediaan relatief groot bij populaties met minder dan 15 monsters, getuige de inkepingen die buiten de boxen eindigen.



Figuur 25. Box-Whiskerplot met karakterisering kh-waarden per lithostrat-lithoklasse met minimaal 10 goedgekeurde doorlatendheidsmeetwaarden. Voor een toelichting op dit type grafiek, zie Figuur 5.

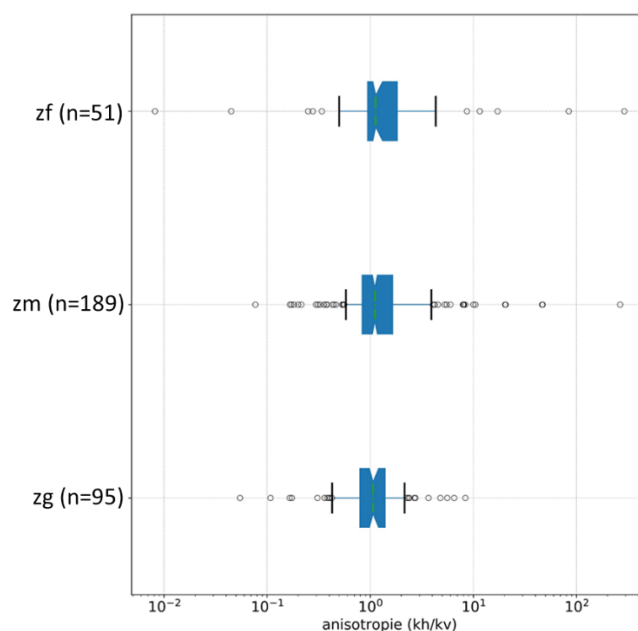


Figuur 26. Box-Whiskerplot met karakterisering kv-waarden per lithostrat-lithoklasse met minimaal 10 goedgekeurde doorlatendheidsmeetwaarden. Voor een toelichting op dit type grafiek, zie Figuur 5.

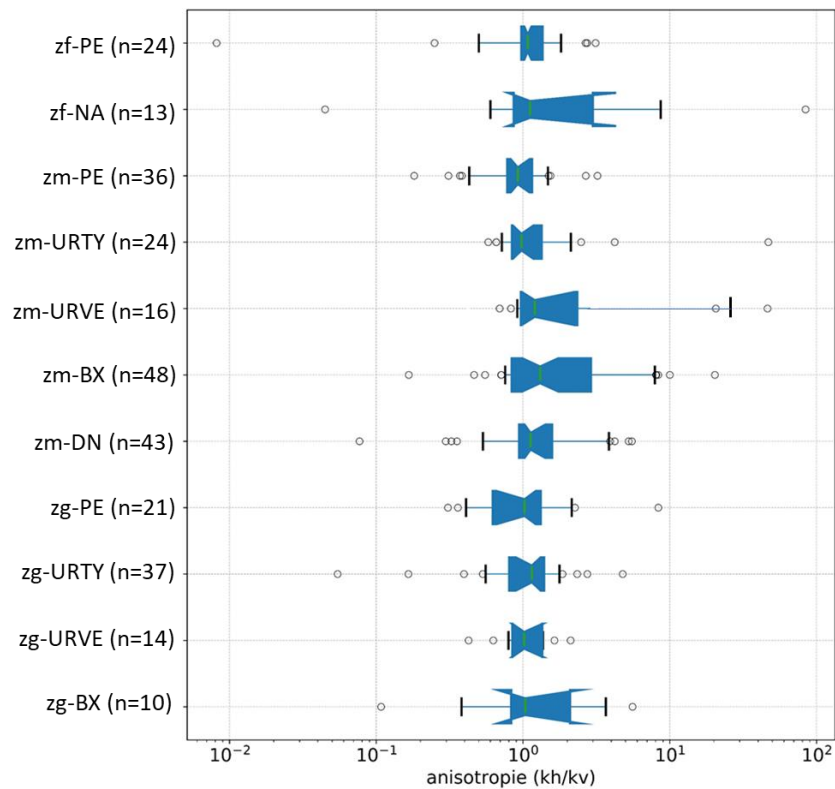
4.3.3 Anisotropie

Zoals aangegeven in paragraaf 3.3.1 is anisotropie berekend als het quotiënt van de horizontale en verticale doorlatendheid: k_h/k_v . Van 335 monsterparen kon de anisotropie worden bepaald op basis van goedgekeurde k_h - en k_v -waarden. Bij 205 paren is de anisotropie groter dan 1, bij 128 paren kleiner dan 1 en bij 2 paren exact gelijk aan 1. De mediaan van alle 335 berekende anisotropiewaarden is 1,11. De resulterende statistieken voor anisotropie zijn weergegeven in Figuur 27 voor lithoklassen en in Figuur 28 voor lithostrat-lithoklassen, in beide gevallen met meer dan 10 anisotropiewaarden. Om lage anisotropiewaarden (<1) goed te kunnen onderscheiden en uitschieters naar boven te kunnen weergeven zijn de anisotropiewaarden in beide figuren op een $^{10}\log$ getransformeerde schaal weergegeven.

Bij alle lithoklassen ligt de mediane anisotropie rond de waarde 1,1. Bij de lithostrat-lithoklassen met fijn zand en midden zand is er iets meer differentiatie. Relatief veel hoge anisotropieën komen voor bij NA-, URVE- en BX-monsterparen. Dit past bij de verwachting dat fijn- en middenzandige afzettingen uit (kleinschalig) fluviatiele en mariene milieus over het algemeen een vrij hoge anisotropie zullen hebben, als gevolg van gelaagdheid met fijner zand, silt en klei. Daarbij moet wel worden opgemerkt dat NA en URVE een laag aantal monsterparen hebben, en dat de anisotropie van de eveneens fluviatiele URTY-monsterparen hierbij achterblijft.



Figuur 27. Karakterisering anisotropie per lithoklasse. Voor een toelichting op dit type grafiek, zie Figuur 5.



Figuur 28. Karakterisering anisotropie per lithostrat-lithoklasse. Voor een toelichting op dit type grafiek, zie Figuur 5.

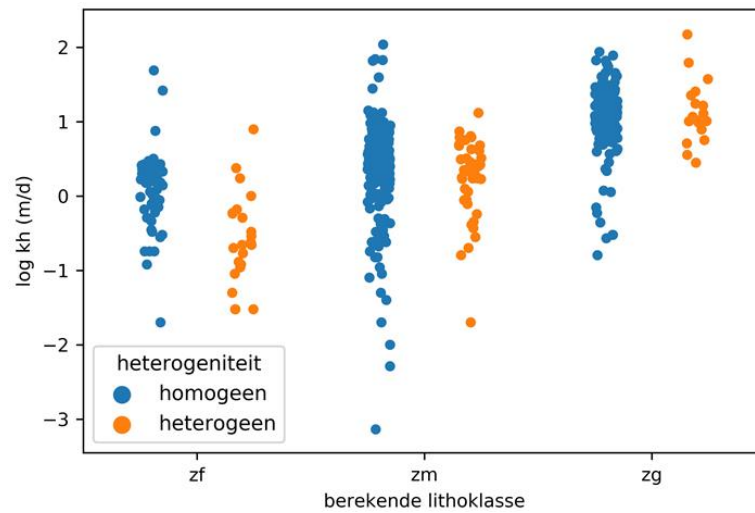
4.3.4 Heterogeniteit van het monster

In Figuur 29 en Figuur 30 zijn de kh- en kv-meetwaarden per berekende lithoklasse weergegeven in relatie tot de heterogeniteit van het corresponderende monster. In Figuur 31 en Figuur 32 zijn de kh- en kv-meetwaarden per lithostrat- (berekende) lithoklasse weergegeven in relatie tot de heterogeniteit van het corresponderende monster. Zoals in paragraaf 3.3.3 beschreven zijn de monsters met sublaag-aanduiding “ja” en “nee” (homogeen) hiertoe vergeleken met monsters met sublaag-aanduiding “mix” (heterogeen).

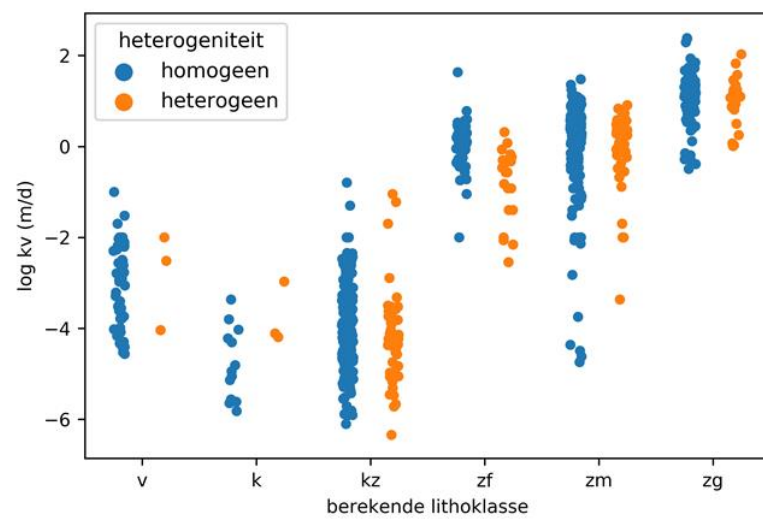
Op lithoklasseniveau is alleen voor de kv van fijn zand een significant verschil gevonden tussen doorlatendheid en heterogeniteit. De heterogene monsters in deze lithoklasse zijn duidelijk minder verticaal doorlatend dan de homogene monsters. Op lithostrat-lithoklasseniveau is dit significant het geval bij NA fijn zand monsters en BXTI kleig zand monsters.

Bij deze resultaten moet worden opgemerkt, dat de voor TopIntegraal Noord-Nederland bemeten monsters een beperkte monsterhoogte hadden, variërend van 2,1 cm bij kleimonsters tot 5,1 cm bij zandmonsters (zie ook paragraaf 3.2.2). Deze beperkte monsterhoogte beperkte ook de mate van heterogeniteit die in een monster gevat kon worden, tot vooral zand met fijnere silt- of zandlaagjes. De meer uitgesproken heterogeniteit in de vorm van zand-klei gelaagdheid is in veel mindere mate vertegenwoordigd. In latere fasen van TopIntegraal zijn

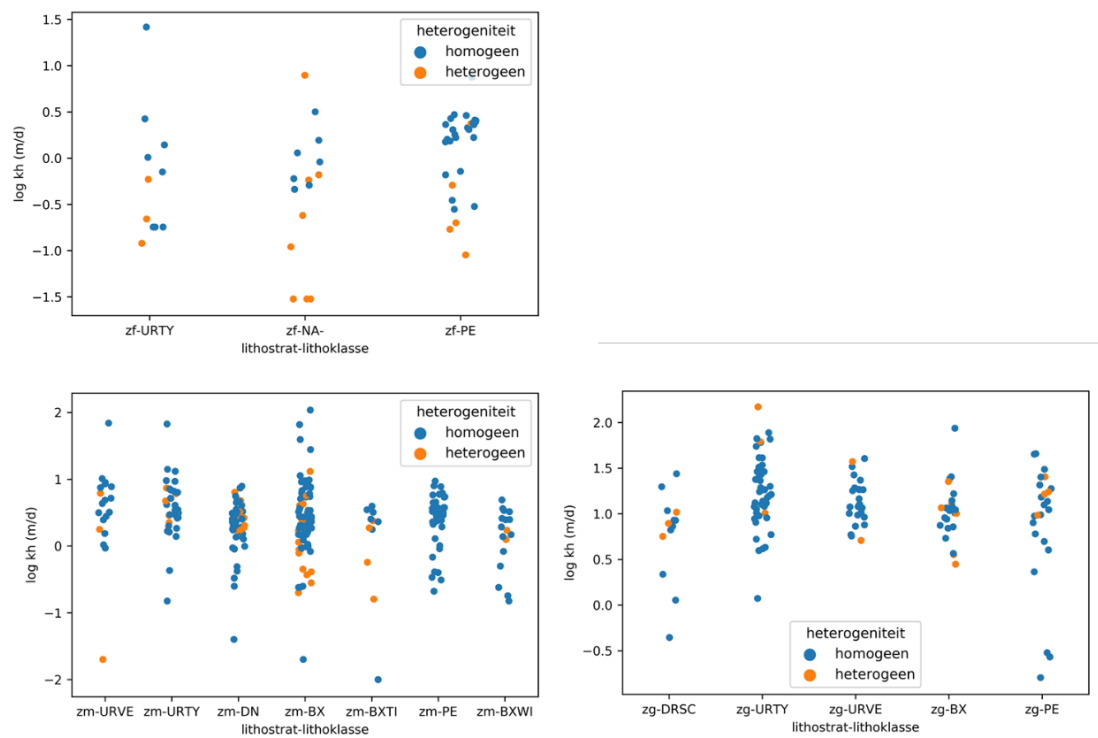
doorlatendheden van dergelijke gelaagde monsters wel gemeten, in een triaxiaalcel bij monsterhoogten van maximaal 10 cm.



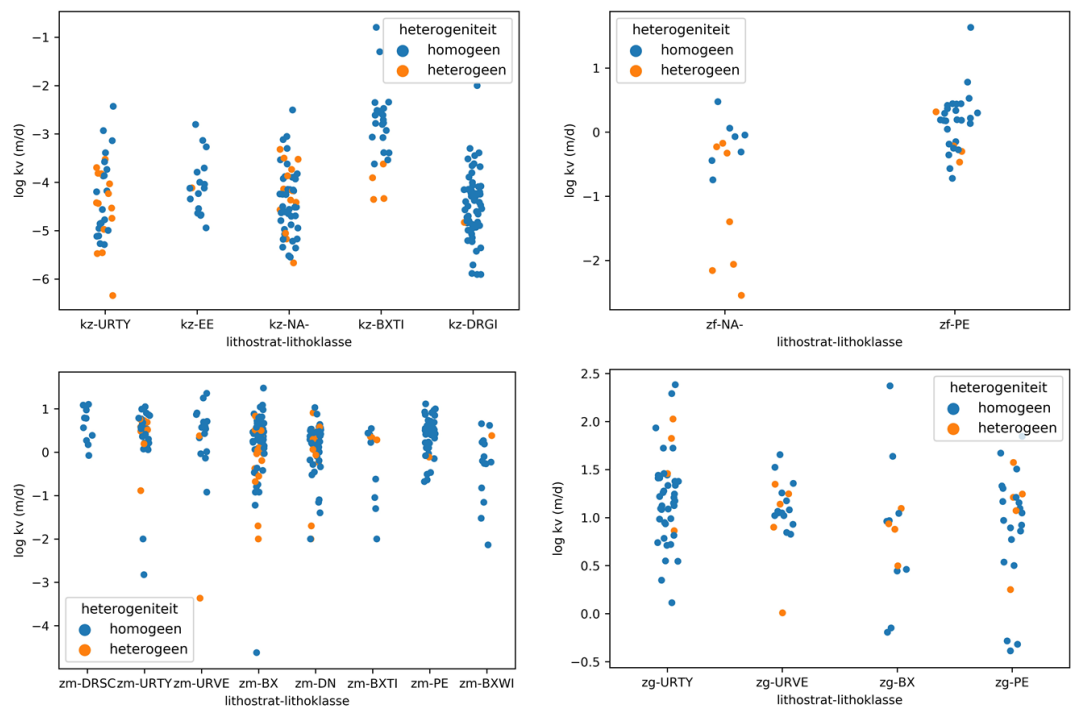
Figuur 29. Horizontale doorlatendheid (kh) van heterogene en homogene monsters, gegroepeerd per berekende lithoklasse.



Figuur 30. Verticale doorlatendheid (kv) van heterogene en homogene monsters, gegroepeerd per berekende lithoklasse.



Figuur 31. Horizontale doorlatendheid (kh) van heterogene en homogene monsters, gegroepeerd per lithostrat-lithoklasse met 10 of meer monsters: zf (linksboven), zm (linksonder) en zg (rechtsonder).



Figuur 32. Verticale doorlatendheid (kv) van heterogene en homogene monsters, gegroepeerd per lithostrat-lithoklasse met 10 of meer monsters: kz (linksboven), zf (rechtsboven), zm (linksonder) en zg (rechtsonder).

5 Interpretatie

5.1 Inleiding

In hoofdstuk 4 zijn zwakke tot vrij sterke significante relaties gevonden tussen de doorlatendheid en (1) het zandpercentage c.q. het bijmengingspercentage met lutum en silt, (2) de monstermediaan, en (3) de spreiding van de korrelgrootte van het gehele monster - de monsterspreiding. Deze relaties worden weerspiegeld in doorlatendheidsverschillen tussen lithostrat-lithoklassen. Bij enkele lithostrat-lithoklassen heeft ook de heterogeniteit van het monster invloed op de doorlatendheid. Bij (kleinschalig) fluviatiele en mariene zanden (BX, NA, URVE) lijkt dit verband te houden met een relatief hoge anisotropie: horizontale gelaagdheid met (uiterst) fijn zand, silt of klei leidt tot lagere kv-waarden.

Tegelijkertijd zijn er nog wel variaties in doorlatendheid *binnen* lithostrat-lithoklassen waarneembaar. In paragraaf 5.2 worden daarom een aantal voorbeelden van geconstateerde variaties in doorlatendheid in een meer geologische context geplaatst. Daarbij wordt specifiek aandacht besteed aan het afzettingmilieu. Uitgelicht worden enkele lithostratigrafische eenheden die voornamelijk in Noord-Nederland voorkomen, en daarbuiten beperkt of op grotere diepten (dit geldt niet voor het Laagpakket van Schaarsbergen, DRSC). De analyse berust ten dele op vergelijkingen met de nonparametrische Mann-Whitney toets, die ook geschikt is voor toepassing op kleine populaties. Voor deze analyse is het criterium “voldoende” monsters versoepeld van $n \geq 10$ naar $n \geq 4$ per lithostrat-lithoklasse.

In sommige gevallen heeft de bepalingprocedure van de doorlatendheid invloed op de gepresenteerde karakterisering. Daarom wordt in paragraaf 5.3 aandacht besteed aan een aantal methodologische aspecten van de wijze waarop de doorlatendheid is bepaald.

5.2 Geologische duiding van variaties in doorlatendheid

5.2.1 *Formatie van Drente, Laagpakket van Schaarsbergen*

De lage uitschieters van een aantal fluvioglaciale monsters (FGZFG) uit het Laagpakket van Schaarsbergen van de Formatie van Drente zijn te verklaren door een grote monsterspreiding. Binnen dit afzettingmilieu komen ook hogere doorlatendheden voor (tot 35 m/d). De slecht doorlatende fluvioglaciale monsters (< 5 m/d) zijn afkomstig uit twee boringen B06F0161 (Kommerzijl) en B23A0455 (Erica), die beide direct aan de rand van het Drents Plateau staan, zie Figuur 33. Het betreft nogal rommelig ogende trajecten, met diverse siltig ogende laagjes, die enigszins aan hellingafzettingen doen denken. De twee goed doorlatende monsters zijn afkomstig uit boring B07A152 (Groot Wetsinge), en beide trajecten ogen veel gelijkmatiger.



Figuur 33. Zichtbare verschillen tussen fluvioglaciale grove zanden: rommelig en relatief slecht doorlatend in boring B06F0161 (Kommerzijl, Gr.), gelijkmatig en goed doorlatend in boring B07A0152 (Groot Wetsinge, Gr.).

5.2.2 *Formatie van Drente, Laagpakket van Gieten*

In paragraaf 4.2. is geconstateerd dat de DRGI kleig zand (keileem-)monsters slecht doorlatend zijn ondanks een vrij hoog zandpercentage en vrij hoge zandmediaan. Deze monsters vormen duidelijk losstaande clusters in veel van de gepresenteerde spreidingsdiagrammen. Figuur 17 en Figuur 19 geven de verklaring: zowel de monster- als de zandspreiding van DRGI-monsters is zeer groot. Dit is verklaarbaar vanuit de herkomst van deze monsters: materiaal dat door het landijs is getransporteerd en omgewerkt, zonder onderscheid naar deeltjesgrootte, met als resultaat een veelal massief glaciaal sediment (diamict). Bij een grote spreiding in de korrelgrootte vullen de kleinere deeltjes de poriën tussen de grotere deeltjes, en dit verlaagt de doorlatendheid. Daarnaast speelt een sterke verdichting onder het gewicht van het landijs waarschijnlijk een rol.

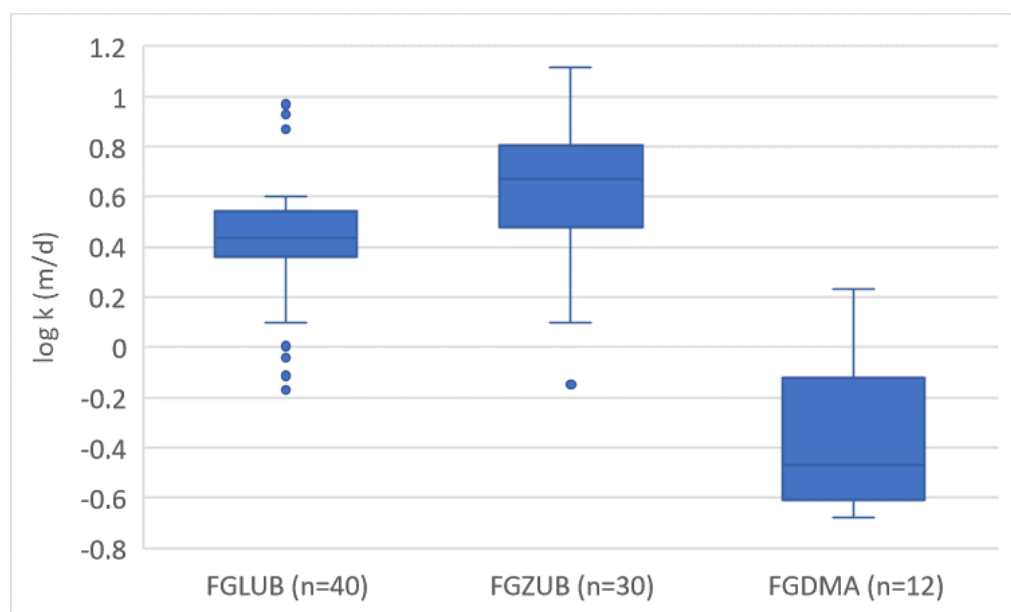
5.2.3 *Formatie van Peelo*

Van de Formatie van Peelo zijn in de lithoklasse kleig zand de doorlatendheden uit de afzettingsmilieus glaciaal meer (FGK, n=9) en smelwateruitbraak met lage energie (FGLUB, n=4) vergeleken. De FGLUB-monsters zijn twee orden van grootte doorlatender, dit verschil is significant ondanks de lage monsteraantallen. De grens tussen deze afzettingsmilieus valt samen met de grens tussen de lithostratigrafische eenheden PENI (FGK) en PE (FGLUB). Met andere woorden de lithostratigrafische eenheid PENI, beter bekend als potklei, is monofaciel.

De relatief hoge kh- en kv-waarden van PE fijn zand, vergeleken met NA en URTY, lijken verklaarbaar vanuit een hoger zandpercentage. PE fijn zand is relatief “schoon” met weinig bijmenging van lutum en silt. Het mediane zandpercentage van PE is 5 à 10% hoger dan van NA en URTY, en ligt bovendien zeer dicht tegen de waarde van circa 95% waarboven de doorlatendheid snel

toeneemt zoals te zien is in Figuur 6 en Figuur 7. Het hoge zandpercentage in combinatie met de afwezigheid van siltige en kleiige gelaagdheid kan ook het isotrope karakter van PE zanden verklaren. Naast minder bijmenging heeft PE fijn zand ook een iets hogere zandmediaan dan NA en URTY. Beide lithologische kenmerken worden mogelijk verklaard door de herkomst van de beschouwde PE-monsters uit smeltwateruitbraakzanden (lithofacies FGLUB).

In de lithoklasse midden zand zijn de doorlatendheden uit de afzettingsmilieus subglaciaal (FGDMA, n=12), smeltwateruitbraak met lage energie (FGLUB, n=40) en smeltwateruitbraak met hoge energie (FGZUB, n=30) vergeleken. Het resultaat is weergegeven in Figuur 34. De FGZUB-monsters zijn een orde van grootte doorlatender dan FGDMA, en FGLUB zit er tussenin. Alle verschillen zijn significant.

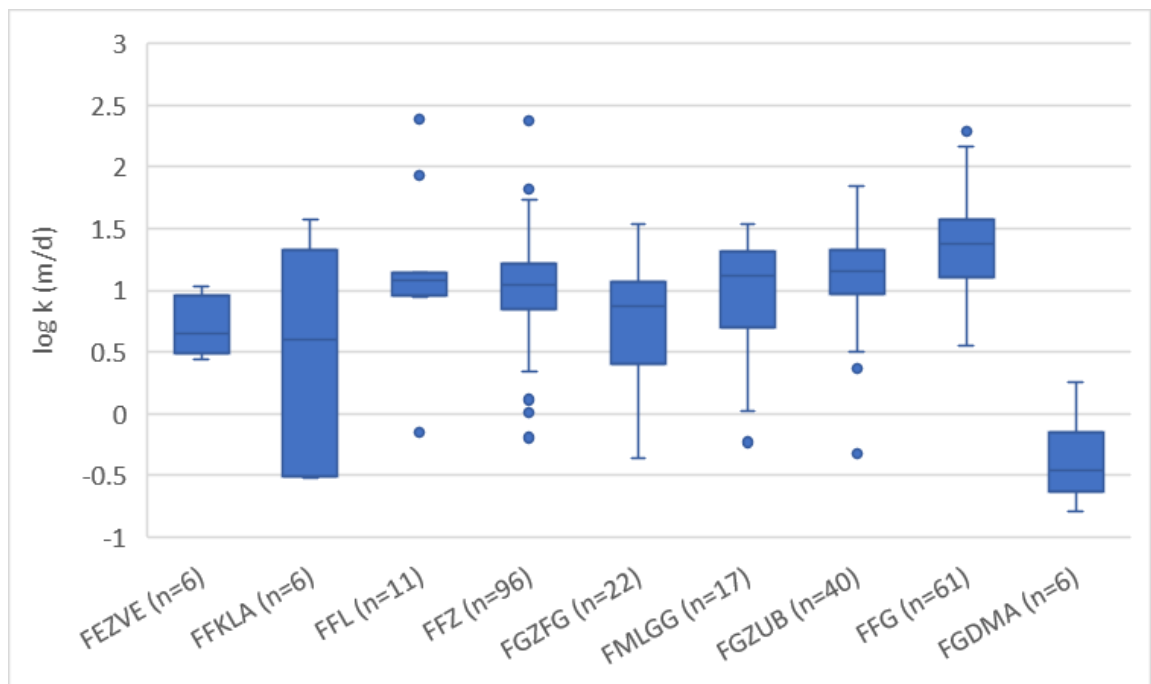


Figuur 34. Verdeling k-waarden (zowel k_h als k_v) in de Formatie van Peelo, lithoklasse midden zand, gegroepeerd naar afzettingsmilieu. Voor een toelichting op dit type grafiek, zie Figuur 5. Voor de codering van de afzettingsmilieus zie Tabel 3.

In de lithoklasse grof zand zijn de doorlatendheden uit het subglaciale afzettingsmilieu (FGDMA, n=6) vergeleken met monsters uit het afzettingsmilieu smeltwateruitbraak met hoge energie (FGZUB, n=40). Monsters van de grove uitbraakzanden (FGZUB) zijn meer dan een orde van grootte doorlatender (significant). Deze zanden zijn onder snel stromend water afgezet, zijn redelijk tot zeer goed gesorteerd, en schoon. De zes subglaciale monsters zijn massief glaciaal sediment (diamict) en daardoor vergelijkbaar met DRGI-keileem, maar dan met minder silt en zonder lutum. Belangrijkste karakteristiek is de zeer slechte sortering.

De afwijkende doorlatendheid van de subglaciale grofzandige PE-monsters blijkt ook uit Figuur 35. Uit deze figuur, die overigens betrekking heeft op grofzandige monsters uit alle lithostratigrafische eenheden, blijkt ook dat afzettingsmilieus met snel stromend water zoals FGZUB (smeltwateruitbraak) en FFG (grindige

rivierbedding) relatief hoge doorlatendheden te zien geven, en restgeul-/meeropvulling (FFKLA) en nat eolisch (FEZVE) relatief lage doorlatendheden.



Figuur 35. Verdeling k-waarden (zowel k_h als k_v) in de lithoklasse grof zand, alle lithostratigrafische eenheden, gegroepeerd naar afzettingsmilieu. De afzettingsmilieus zijn geordend op basis van toenemend energieniveau. Voor een toelichting op dit type grafiek, zie Figuur 5. Voor de codering van de afzettingsmilieus zie Tabel 3. NB: Vanwege het ontbreken van - waarschijnlijk vooral hogere - meetwaarden van grindige en grindrijke monsters in de database, zijn de weergegeven statistieken voor de lithoklasse grof zand niet representatief. Zie ook paragraaf 3.2.4.

5.2.4 Formatie van Urk, Laagpakketten van Tynje en Veenhuizen

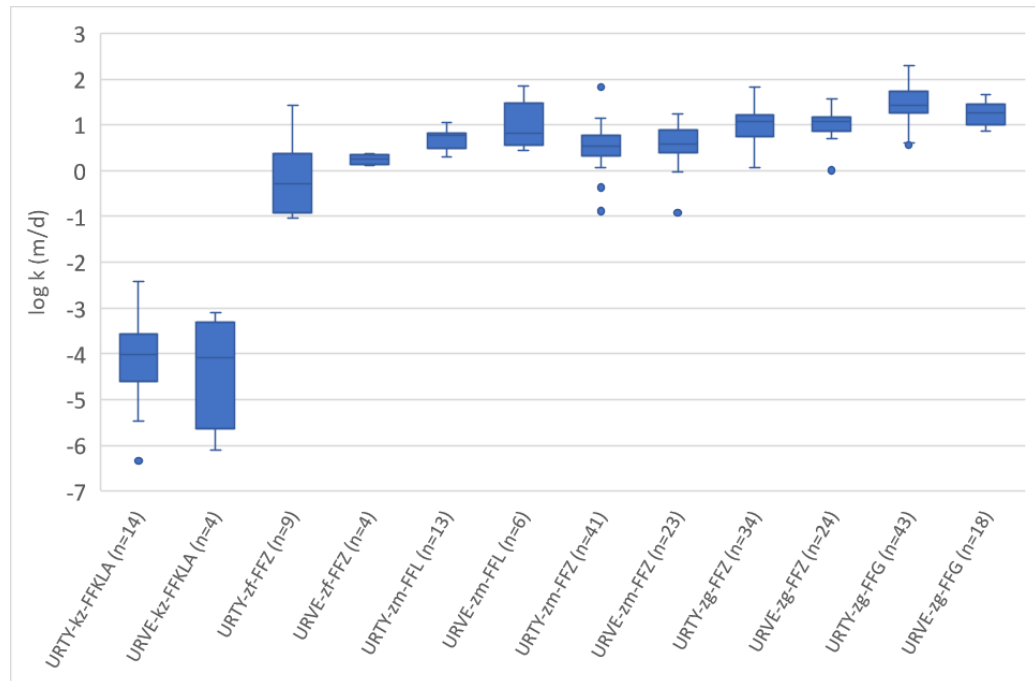
Allereerst is onderzocht of de Laagpakketten van Tynje (URTY) en Veenhuizen (URVE) onderling verschillen voor wat betreft doorlatendheid. Beide eenheden zijn grotendeels afgezet in een fluviatiel ontstaansmilieu, maar het Laagpakket van Tynje bevat een belangrijk aandeel estuariene en kustnabije sedimenten. Het Laagpakket van Tynje is bovendien na het Elster-glaciaal afgezet in het proto-Rijndal, terwijl het Laagpakket van Veenhuizen eerder dan het Elsterien is afgezet en mogelijk (ook) een meer oostelijk herkomstgebied heeft (Bosch et al., 2014).

Vergelijkingen tussen URTY en URVE zijn gemaakt voor de onderstaande combinaties van lithoklasse en (fluviatiel) afzettingsmilieu:

- restgeul- en meerafzetting (FFKLA) in de lithoklasse kleig zand (URTY n=14 en URVE n=4);
- zandige geul (FFZ) in de lithoklasse fijn zand (URTY n=70 en URVE n=21);
- oever en crevasse (FFL) in de lithoklasse midden zand (URTY n=139 en URVE n=51);
- zandige geul (FFZ) in de lithoklasse midden zand (URTY n=41 en URVE n=23);

- zandige geul (FFZ) in de lithoklasse grof zand (URTY n=34 en URVE n=24);
- grindige geul (FFG) in de lithoklasse grof zand (URTY n=43 en URVE n=18).

De resultaten zijn weergegeven in Figuur 36. Met uitzondering van de combinatie FFG-grof zand werden geen significante verschillen in doorlatendheid gevonden tussen URTY- en URVE-monsters. Het verschil bij FFG-grof zand monsters bedraagt een factor 1,6 tussen de beide mediane k-waarden.

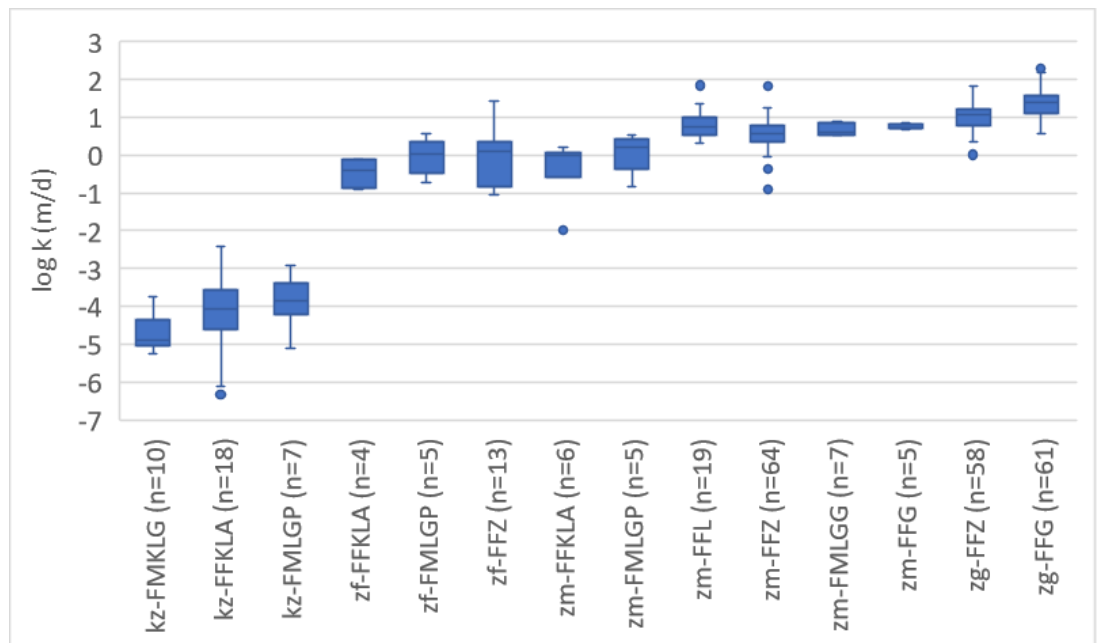


Figuur 36. Verdeling k-waarden (zowel k_h als k_v) in de Laagpakketten van Tynje en Veenhuizen (URTY en URVE) van de Formatie van Urk, gegroepeerd naar lithoklasse-lithofaciescombinatie. De afzettingssmilieus zijn geordend op basis van toenemend energieniveau. Voor een toelichting op dit type grafiek, zie Figuur 5. Voor de codering van de afzettingssmilieus zie Tabel 3. NB: Vanwege het ontbreken van - waarschijnlijk vooral hogere - meetwaarden van grindige en grindrijke monsters in de database, zijn de weergegeven statistieken voor de lithoklasse grof zand niet representatief. Zie ook paragraaf 3.2.4.

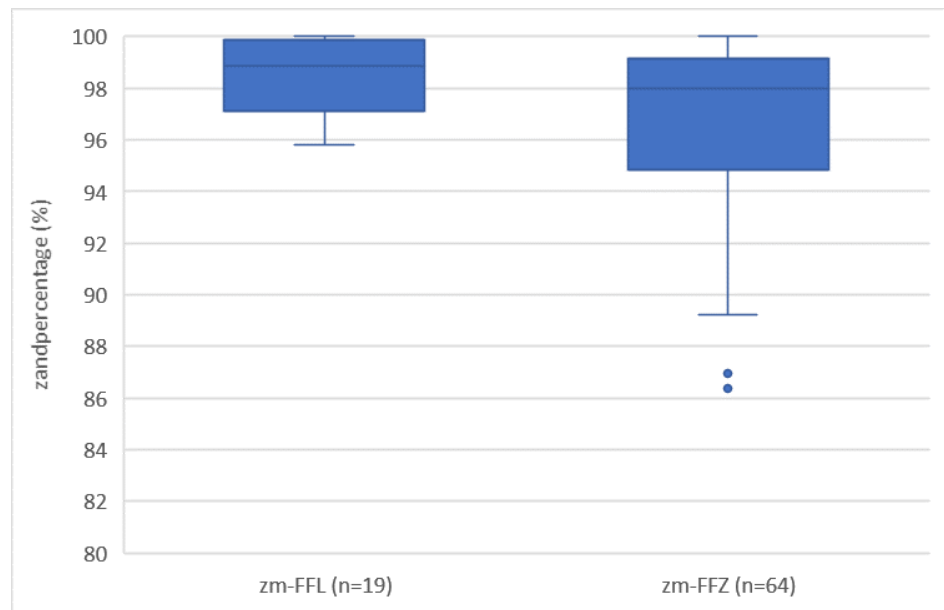
Op basis van deze resultaten is besloten om de URTY- en URVE-monsters samen te nemen voor de analyse van de relatie tussen afzettingssmilieu en doorlatendheid. De vergelijking tussen samengenomen URTY- en URVE-monsters uit verschillende afzettingssmilieus heeft geleid tot de onderstaande resultaten (Figuur 37):

- In de lithoklasse *kleinig zand* zijn monsters uit de afzettingssmilieus restgeul en meer (FFKLA, n=18) en getijdenplaat (FMLGP, n=7) allebei een orde van grootte doorlatender dan lagunaire monsters (FMKLG, n=10). De FFKLA-monsters zijn gemiddeld zandiger dan FMKLG-monsters en dit kan het verschil tussen beide verklaren, maar dit geldt niet voor FMLGP-monsters die ongeveer even zandig zijn;
- In de lithoklasse *fijn zand* zijn monsters uit de afzettingssmilieus restgeul en meer (FFKLA, n=4), zandige geul (FFZ, n=13), getijdenplaat (FMLGP, n=5) en getijdengeul (FMLGG, n=13) vergeleken. Er zijn geen significante verschillen in doorlatendheid gevonden.
- In de lithoklasse *midden zand* is een driedeling gevonden:

- Monsters uit zandige geulen (FFZ, n=64) en getijdegeulen (FMLGG, n=7) zijn doorlatender dan monsters uit meren en restgeulen (FFKLA, n=6) en getijdeplaten (FMLGP, n=5). Het verschil tussen de mediane doorlatendheidswaarden is bijna een factor 5;
- Monsters uit grindige geulen (FFG, n=5) en oever- en crevassemilieus (FFL, n=19) zijn op hun beurt doorlatender dan monsters uit zandige geulen en getijdegeulen. Het verschil tussen de mediane doorlatendheidswaarden is bijna een factor 2 en significant. De hogere doorlatendheid van oever/crevassemonsters dan van zandige geulmonsters is hierbij opvallend. Uit nadere analyse blijkt dat het zandpercentage van de FFL-monsters significant hoger is. Het verschil tussen de mediane zandpercentages van FFL- en FFZ-monsters is klein, maar binnen de FFZ-monsters treden meer uitschieters naar beneden op (zie Figuur 38);
- In de lithoklasse *grof zand* zijn monsters uit grindige geulen (FFG, n=61) significant doorlatender dan monsters uit zandige geulen (FFZ, n=58). Het verschil tussen de mediane doorlatendheidswaarden is ongeveer een factor 2,5.



Figuur 37. Verdeling k-waarden (zowel k_h als k_v) in de samengenomen Laagpakketten van Tynje en Veenhuizen (URTY en URVE) van de Formatie van Urk, gegroepeerd naar lithoklasse-lithofacies combinatie. De lithoklassen en afzettingsmilieus zijn geordend op basis van toenemend energieniveau. Voor een toelichting op dit type grafiek, zie Figuur 5. Voor de codering van de afzettingsmilieus zie Tabel 3. NB: Vanwege het ontbreken van - waarschijnlijk vooral hogere - meetwaarden van grindige en grindrijke monsters in de database, zijn de weergegeven statistieken voor de lithoklasse *grof zand* niet representatief. Zie ook paragraaf 3.2.4.

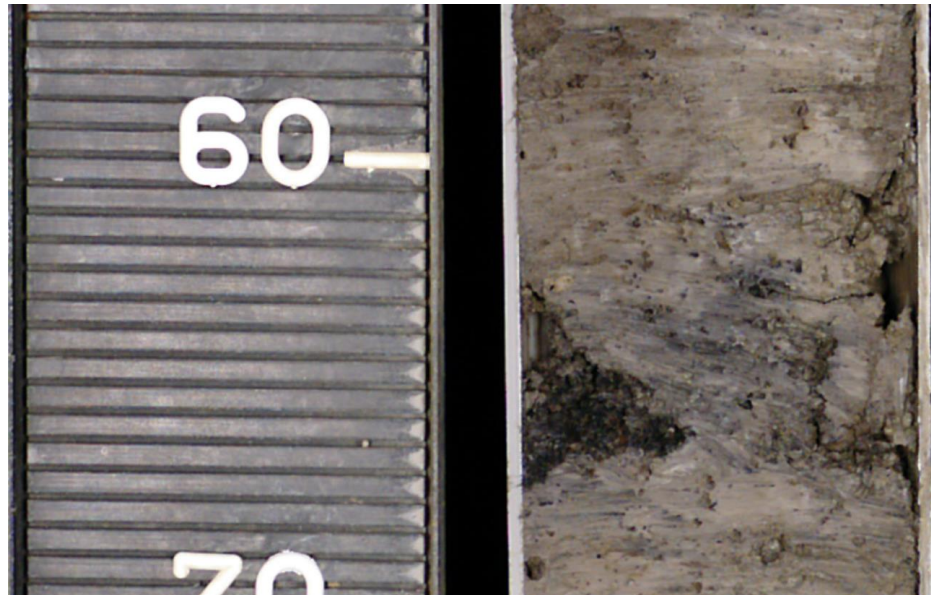


Figuur 38. Verdeling zandpercentages van URTY- en URVE-monsters, lithoklasse midden zand, afzettingsmilieus oever en crevasse (FFL) en zandige geul (FFZ).

5.2.5 *Formatie van Bختel, Laagpakket van Tilligte, kleig zand: relatief goed doorlatend*

In paragraaf 4.3.2. is geconstateerd dat de verticale doorlatendheid van BXTI kleig zand twee orden van grootte hoger is dan van kleig zand uit de eenheden EE, NA, PENI, URTY en URVE. De meeste BXTI-monsters zijn afkomstig uit restgeul- en meeropvullingen (lithofacies FFKLA). Deze monsters zijn significant doorlatender dan kleig zand FFKLA-monsters in de andere genoemde eenheden, die op hun beurt juist *niet* significant verschillen van monsters uit andere afzettingsmilieus (voornamelijk kustlagunes, getijdeplaten en gletsjermeren). Het afzettingsmilieu kan de veel hogere doorlatendheid van BXTI kleig zand monsters dus niet verklaren.

De BXTI restgeulmonsters hebben een groter aandeel zand en organisch materiaal dan de restgeulmonsters uit de andere eenheden en zijn ook minder gelaagd met silt en klei. Het zandigere karakter van BXTI is mogelijk een gevolg van erosie van stroomopwaarts liggend materiaal op de flanken van stuwwallen en het Drents Plateau. Niettemin lijken deze lithologische verschillen te klein om twee orden van grootte in kv te verklaren. Steekproefsgewijs zijn nog enkele boorfoto's bekeken, die een mogelijke doorlatendheidsverhogende invloed van graafgangen of doorworteling suggereren (zie voorbeeld in Figuur 39). De steekproef is echter te beperkt om dit statistisch te onderbouwen.



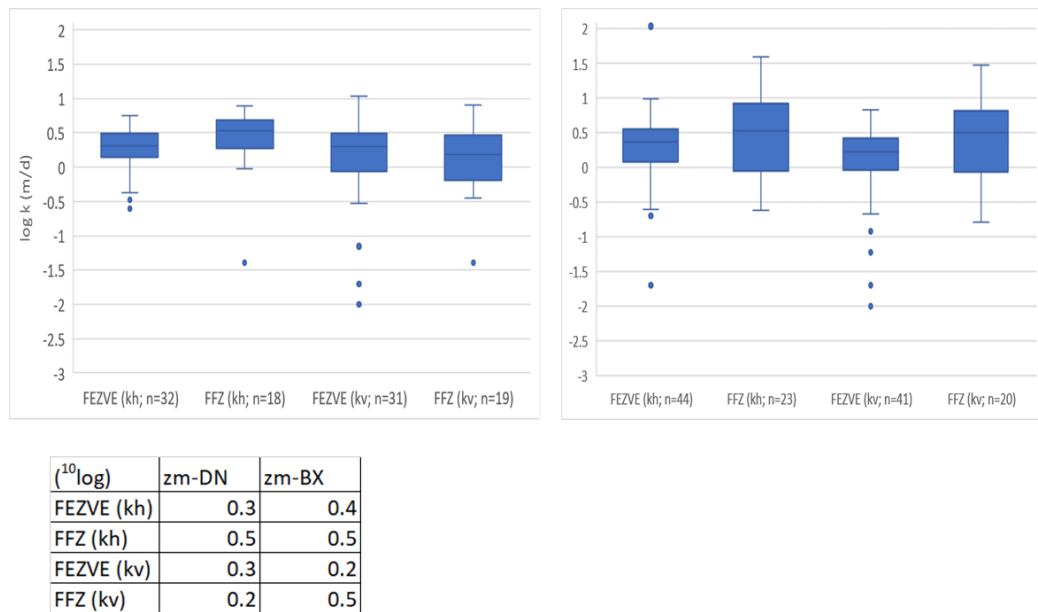
Figuur 39. Detail van een BXTI kleig zand monstertraject tussen 561 en 563 cm -mv met duidelijke sporen van bodemleven, boring B10G1236 (Greonterp, Frl.). Aan het betreffende monster is een kv van 0,001 m/d bepaald.

5.2.6 *Formatie van Drachten*

In de lithoklasse midden zand zijn monsters uit de afzettingen milieu zandige geul (FFZ) en nat eolisch (FEZVE) vergeleken. Het resultaat is weergegeven in Figuur 40. De kh van zandige geul monsters (n=18) is significant hoger dan van nat-eolische monsters (n=32). De kv is juist groter bij de nat-eolische monsters, maar dit verschil is niet significant (FFZ n=31, FFZ n=19). De lage uitschieters in kv bij de FEZVE-monsters worden veroorzaakt door relatief veel bijmenging van lutum en silt.

Ter vergelijking is dezelfde analyse uitgevoerd met monsters uit de Formatie van Bortel, die het zelfde ontstaan milieu heeft als de Formatie van Drachten (zie Tabel 1). Het resultaat is ook weergegeven in Figuur 40. In tegenstelling tot bij de Formatie van Drachten is de kv van de zandige geul monsters juist hoger dan van de nat-eolische monsters (significant).

Dit voorbeeld toont aan dat verschillen in doorlatendheid kunnen optreden tussen monsters met dezelfde lithoklasse en uit eenzelfde afzettingen milieu; de lithostratigrafische eenheid maakt hier het verschil. In dit voorbeeld wordt dit mogelijk veroorzaakt door verschillen in lithologische samenstelling van de onderliggende formaties.



Figuur 40. Verdeling k-waarden (zowel kh als kv) in de lithoklasse midden zand, gegroepeerd naar afzettingsmilieu. Links de Formatie van Drachten, rechts de Formatie van Boxtel, onder de getabelleerde mediaanwaarden van $^{10}\log$ kh en kv. Voor een toelichting op dit type grafiek, zie Figuur 5. Voor de codering van de afzettingsmilieus zie Tabel 3.

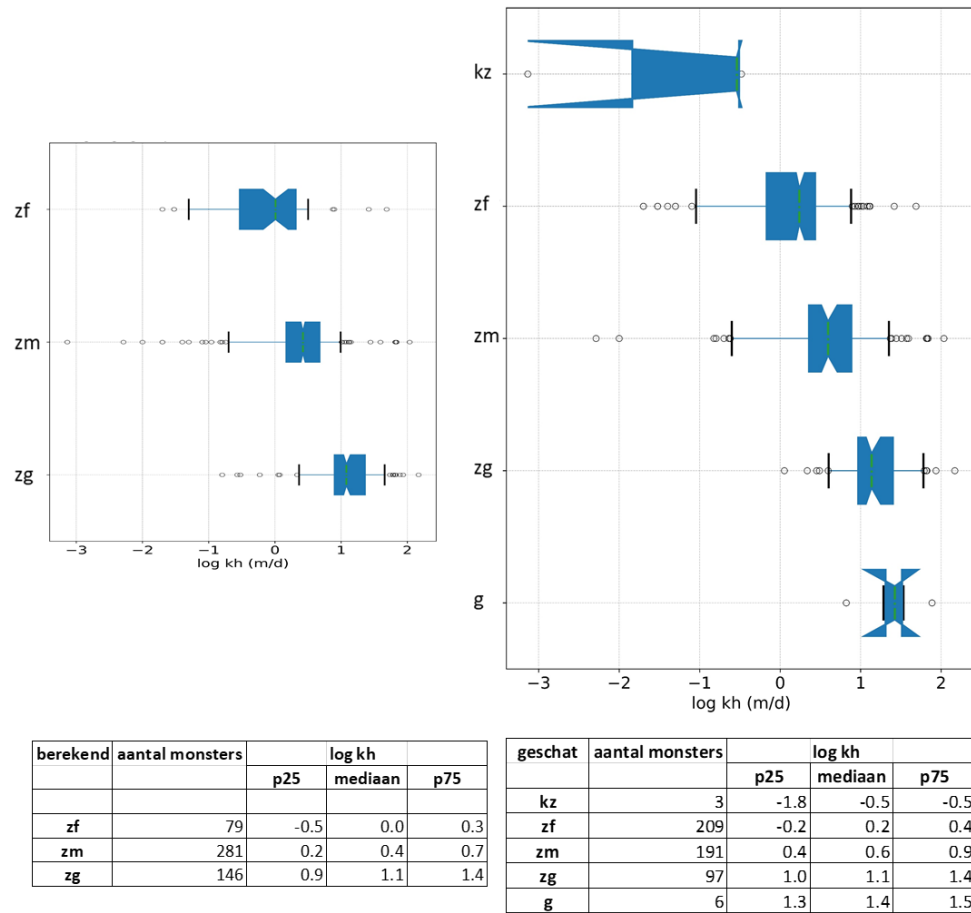
5.2.7 Samenvatting

Samenvattend kan worden gesteld dat bij een aantal onderzochte lithostrat-lithoklasse combinaties significante verschillen in doorlatendheid zijn gevonden tussen monsters uit verschillende afzettingsmilieus. Deze verschillen variëren in grootte van een factor 1,5 à 2 tot meer dan een orde van grootte, en zijn geologisch plausibel: hoe hoger het energieniveau van het afzettingsmilieu, hoe hoger de doorlatendheid.

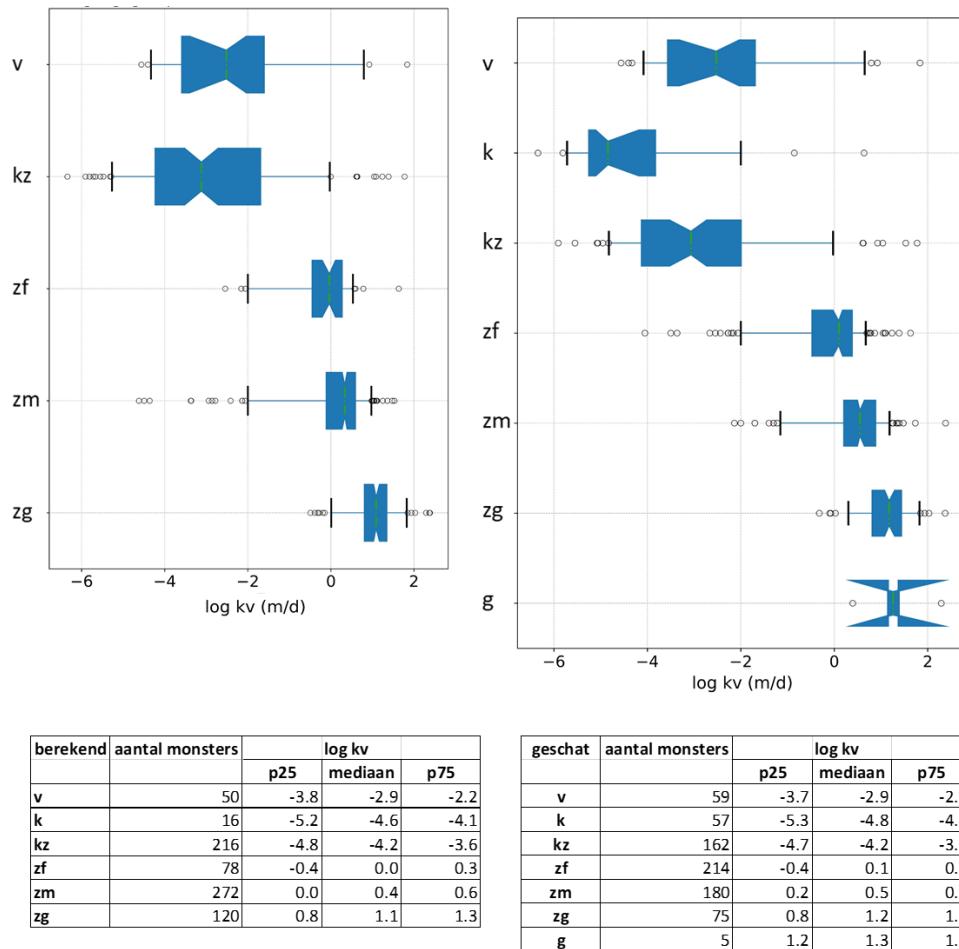
5.3 Invloed methodologische aspecten op karakterisering

5.3.1 Invloed geschatte of gemeten lithoklasse op karakterisering doorlatendheid

De invloed van de bepalingwijze van de lithoklasse op de karakterisering van doorlatendheid (schatting door de boorbeschrijver of berekend op basis van korrelgrootteanalyse) is onderzocht. De resultaten zijn grafisch weergegeven in Figuur 41 voor kh en Figuur 42 voor kv. In de figuren zelf zijn de verschillen subtiel, daarom zijn de karakteristieken in de tabellen eronder toegevoegd. Daarin vallen vooral de grote verschuivingen in monsteraantallen op. Deze hebben iets hogere doorlatendheden voor fijn en midden zand tot gevolg als wordt ingedeeld volgens de berekende lithoklasse: tot circa 0,2 verschil tussen de $^{10}\log$ -waarden en derhalve een factor 1,5 tussen de niet-getransformeerde doorlatendheden.



Figuur 41. Verdelingen kh-waarden, op basis van indeling naar berekende (links) en geschatte (rechts) lithoklasse. Voor een toelichting op dit type grafiek, zie Figuur 5.



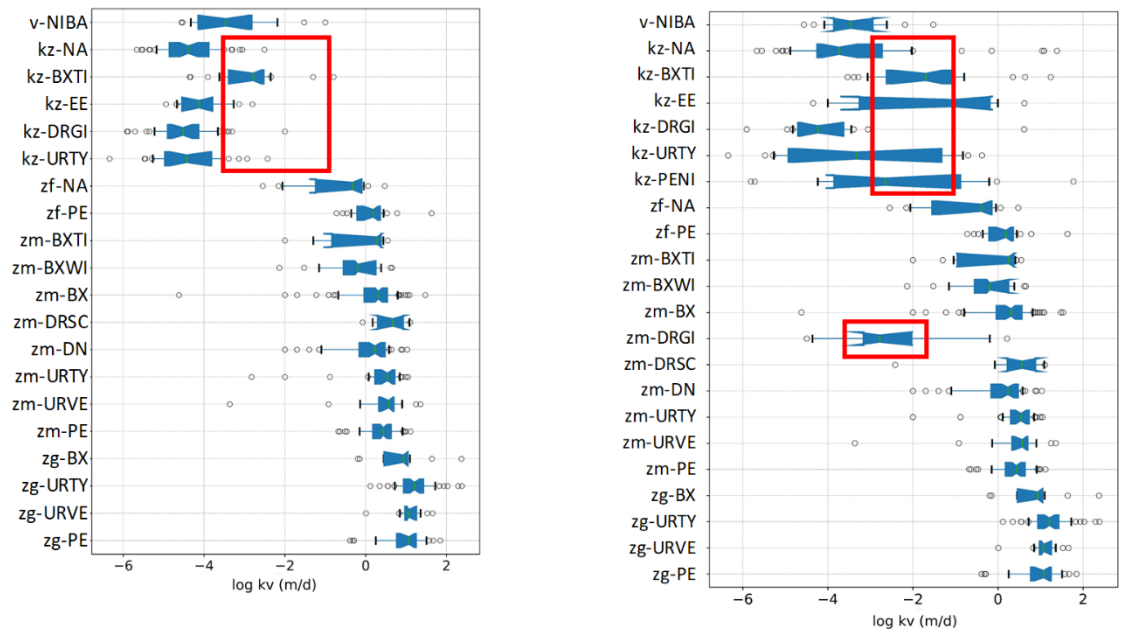
Figuur 42. Verdelingen kv-waarden, op basis van indeling naar berekende (links) en geschatte (rechts) lithoklasse. Voor een toelichting op dit type grafiek, zie Figuur 5.

5.3.2 Leemte in doorlatendheden

Zoals beschreven in paragraaf 4.3.2, vertoont kv een opvallende leemte in het bereik van 0,001 tot 0,1 m/d. In dit bereik zijn veel meetwaarden afgekeurd omdat ze gemeten zijn aan als zandmonsters geprepareerde kleimonsters. Bij deze monsters is de veronderstelling dat lekkages langs de wand van de Kopecky-ring doorslaggevend zijn (paragraaf 3.2.7).

Als deze meetwaarden wel worden meegenomen, wordt de leemte opgevuld, en daardoor wordt de bandbreedte van kv-waarden in de lithoklasse kleilig zand heel groot (Figuur 43). Juist bij kleilig zand mag een grote bandbreedte van de doorlatendheid worden verwacht, door de grote variaties in lithologie en gelaagdheid. In Figuur 43 is ook de verdeling van DRGI midden zand er aan de rechterkant bijgekomen, als gevolg van toevoeging van vijf monsters die wel een berekende lithoklasse midden zand hebben, maar bij de beoordeling toch het label “als kleimonster geprepareerd zandmonster” hebben gekregen. De voor midden zand zeer lage DRGI-doorlatendheden zijn te herleiden tot hoge bijmengingspercentages met lutum en silt, en een zeer grote monsterspreiding, dezelfde eigenschappen die ook zijn beschreven bij de keileemmonsters in paragraaf 5.1.2. De indeling in lithoklassen voorziet niet in het herkennen van dergelijke monsters in het zandige bereik.

Het voorbeeld van de DRGI midden zand meetwaarden leidt tot de conclusie dat het zonder meer afkeuren van “als zandmonster geprepareerde kleimonsters” niet in alle gevallen terecht is. Hieruit volgt de aanbeveling om al deze monsters in de dataverzameling individueel te beoordelen en hier objectieve criteria voor te formuleren. In Noord-Nederland gaat het om 181 monsters, ofwel ruim 10% van het huidige aantal beschikbare monsters (inclusief de niet goedgekeurde).

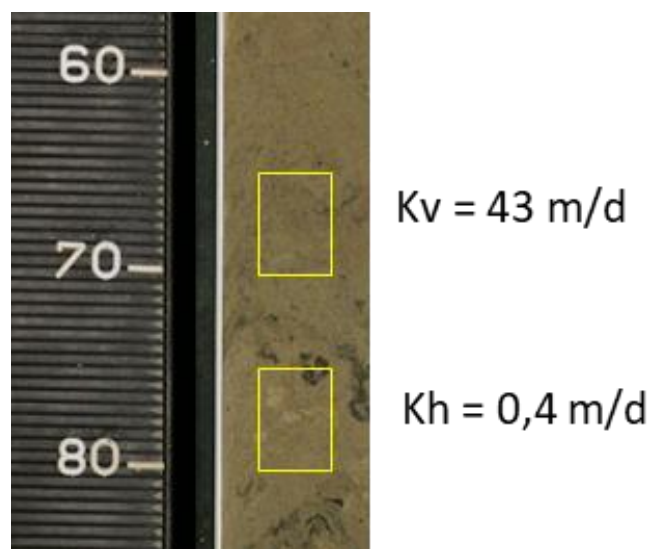


Figuur 43. Verdeling kv-waarden per lithostrat-lithoklasse combinatie. Links is identiek aan Figuur 26, rechts is het resultaat van dezelfde bewerking, maar dan op een dataverzameling waaruit de als zandmonster geprepareerde kleimonsters niet zijn verwijderd. Voor een toelichting op dit type grafiek, zie Figuur 5.

5.3.3 Omgaan met uitschieters

In paragraaf 3.2.7. is beschreven dat uitschieters in doorlatendheidswaarden niet worden afgekeurd, tenzij deze toe te schrijven zijn aan bijvoorbeeld lekkages of verstoringen van het monster tijdens de meting. Deze werkwijze maakt het mogelijk dat niet alleen mediane waarden en gemiddelden, maar ook de extremere karakteristieken van de waarschijnlijkheidsverdelingen kunnen veranderen met het beschikbaar komen van meer meetwaarden. Dat deze werkwijze plausibel is, wordt geïllustreerd door de eerder beschreven voorbeelden waarin zeer lage doorlatendheden van PE en DRSC grof zand monsters konden worden gerelateerd aan specifieke afzettingsmilieus. Het gevolg is wel dat in sommige gevallen toch twijfelachtige meetwaarden door de selectie komen. Als voorbeeld hiervan wordt een in 2007 bemeten Peelo fijn zand monster uit boring B07F0336 (Holwierde, Gr.), diepte 2865 tot 2870 cm – mv getoond, zie Figuur 44. Ten behoeve van anisotropiebepaling is dit monster gepaard aan een eveneens fijnzandig monster op iets grotere diepte, 2875 tot 2580 cm -mv. In het diepere monster is een kh bepaald van 0,4 m/d, in het ondiepere monster een kv van 43 m/d. Er is dus sprake van een zeer grote omgekeerde anisotropie. De kh

meetwaarde is goedgekeurd, de kv meetwaarde is weliswaar geclassificeerd als uitschieter maar niet afgekeurd, met vermelding dat de meting goed verlopen is. Weliswaar is PE fijn zand relatief goed doorlatend (paragraaf 5.1.1), maar een kv van 43 m/d ligt wel erg ver boven de andere meetwaarden, die overwegend in het bereik liggen tussen 0,1 en 3,5 m/d met een op één na hoogste waarde van 7,5 m/d. Op de boorfoto zijn in het monstertraject ook geen verschijnselen te zien die duiden op voorkeursstroming via bijvoorbeeld graafgangen. Er is, kortom, reden om deze meetwaarde alsnog af te keuren. Meer in het algemeen volgt hieruit de aanbeveling om alle als uitschieters aangemerkte meetwaarden in de dataverzameling individueel te beoordelen en hier objectieve criteria voor te formuleren. In Noord-Nederland gaat het om 59 van de 1275 goedgekeurde monsters ofwel 4,6% van het totaal.

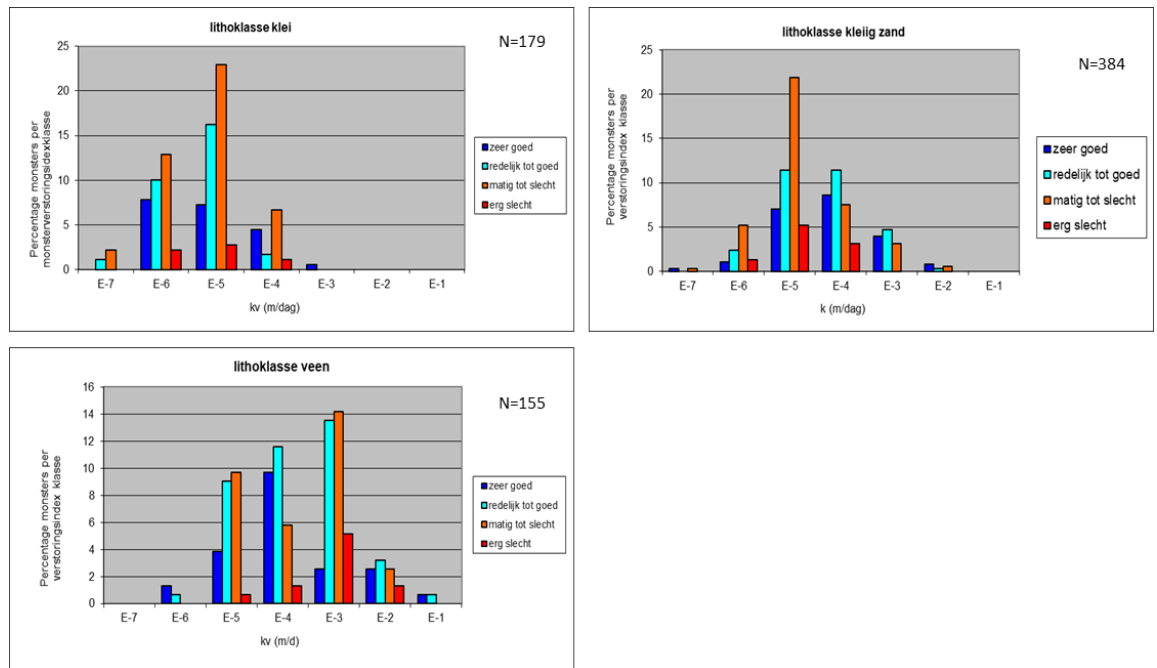


Figuur 44. Detail boorfoto B07F0336 (Holwierde, Gr.), traject tussen 2860 en 2880 cm -mv.

5.3.4 Monsterverstoringsindex

Zoals beschreven in paragraaf 3.2.7. is een slechte monsterverstoringsindex geen criterium voor afkeuring geweest. Een slechte monsterverstoringsindex betekent dat het monster relatief sterk is vervormd bij het op terreinspanning brengen voorafgaand aan de doorlatendheidsmeting. Omgekeerd betekent dit dat het monster sterk moet zijn ontspannen sinds het moment dat het werd opgeboord. De veronderstelling is dat deze ontspanning een verstoring van het monster tot gevolg kan hebben gehad die leidt tot een te hoge gemeten doorlatendheid. Dit is in 2011 onderzocht voor de 718 op dat moment beschikbare kv-meetwaarden aan kleiige en venige monsters, niet alleen uit Noord-Nederland. Het resultaat is weergegeven in Figuur 45. Als deze veronderstelling klopt, zouden de oranje (matig tot slecht) en rode staafjes (erg slecht) meer aan de rechterkant van de weergegeven histogrammen moeten staan dan de blauwe staafjes (zeer goed). Bij de lithoklassen klei en kleig zand lijkt dit niet het geval, bij veen wel. Dit laat zich mogelijk verklaren doordat bij het steken van het monster plantenresten mee worden getrokken waardoor de doorlatendheid toeneemt. Er zijn geen voorschriften voor het goed- of afkeuren van testresultaten op basis van de monsterverstoringsindex. Omdat het aantal monsters zonder (duidelijke) relatie tussen doorlatendheid en monsterverstoringsindex veruit in de meerderheid is, is

besloten om monsters met een slechte monsterverstoringsindex niet uit te sluiten van de onderhavige analyse. Mogelijk leidt dit tot een overschatting van de doorlatendheid van de lithoklasse veen. Hieruit volgt de aanbeveling om het onderzoek naar de invloed van monsterverstoringsindex op doorlatendheid te herhalen met de huidige, grotere dataverzameling, met speciale aandacht voor de venige monsters. Verder is een analyse gewenst van eventueel aanwezige verbanden tussen een slechte monsterverstoringsindex en andere monsterkenmerken, zoals diepte beneden maaiveld, ijsbelasting, ouderdom of afzettingsmilieu.



Figuur 45. Verticale doorlatendheid (kv) gegroepeerd op basis van orde van grootte en monsterverstoringsindexklasse. Omdat het een al in 2011 uitgevoerde analyse betreft, is kv op de x-as niet weergegeven op basis van de 10-logaritme, maar de natuurlijke logaritme met grondtal e (bv. E-4 = e^{-4} m/d).

5.3.5 Benodigd aantal monsters

In paragrafen 4.1 en 4.2 werd bij een aantal boxplots geconstateerd dat de onzekerheid rond de mediaan relatief groot is. Dit duidt er op dat het aantal monsters in de populatie te klein is voor statistische analyse, of dat de verdeling scheef is (McGill et al., 1978). Het betreft steeds populaties met 15 of minder meetwaarden. Dit suggereert dat de minimale populatiegrootte voor statistische analyse van de doorlatendheid in ieder geval hoger ligt dan 15 meetwaarden. Het voor parametrisatie benodigde aantal meetwaarden is afhankelijk van de vorm van de werkelijke verdeling, en de mate waarin deze getransformeerd kan worden tot een benadering van een normale verdeling. De reden om in deze analyse toch populaties met 10 tot 15 meetwaarden te beschouwen, is dat zo een breder beeld kon worden gegeven van de doorlatendheidskarakteristieken van de verschillende lithostrat-lithoklassen.

5.3.6 *Onderschatting als gevolg van ontbreken grind en grindrijke zanden*

Zoals beschreven in paragrafen 3.2.2 en 4.3.1 zijn doorlatendheden gemeten in grof zand, en in mindere mate ook midden zand, vooral beschikbaar in het grind-armere, fijnere deel van deze lithoklassen. In het grindrijke, grovere deel van deze lithoklassen zijn er nauwelijks monsters beschikbaar en daardoor vertonen deze lithoklassen als geheel een verwachte vertekening naar lagere doorlatendheden.

5.4 **Discussie**

5.4.1 *De invloed van het afzettingsmilieu op de doorlatendheid*

Op basis van paragraaf 5.2 kan worden geconcludeerd dat veel variatie in doorlatendheid binnen lithostrat-lithoklassen te verklaren is met de herkomst vanuit verschillende afzettingsmilieus. De door het afzettingsmilieu verklaarbare variatie in doorlatendheid is binnen zandige lithostrat-lithoklassen een factor 1,5 à 2, maar kan bij kleiig zand oplopen tot meer dan een orde van grootte. Een uitzondering is BXTI kleiig zand, waar (nog) geen bevredigende verklaring werd gevonden voor de hoge doorlatendheden. Mogelijk kan een analyse met gegevens uit een groter deel van Nederland meer duidelijkheid hierover geven.

5.4.2 *Praktische bruikbaarheid van TopIntegraal-data*

Bij de huidige hydraulische parametrisatie van de ondergrondmodellen van TNO-GDN wordt gebruik gemaakt van populaties van doorlatendheden per lithostrat-lithoklasse. Op basis van de voorgaande analyse kan worden geconcludeerd dat een verder onderscheid naar afzettingsmilieu in een aantal gevallen zinvolle informatie over de doorlatendheid kan toevoegen. Dit geldt vooral waar afzettingsmilieus ruimtelijk of stratigrafisch duidelijk te onderscheiden zijn binnen een modelgebied. Om het toevoegen van deze aanvullende informatie in het parametrisatieproces mogelijk te maken, moeten nog wel enkele uitdagingen worden aangegaan.

- Ten eerste leidt een verder onderscheid naar afzettingsmilieu tot een nog groter aantal, nog kleinere populaties. Grotere populaties kunnen worden verkregen door het verder uitbouwen van de dataverzameling met meetwaarden uit nieuwe boringen. Daarnaast is een analyse van de doorlatendheid op basis van meetwaarden uit heel Nederland een mogelijkheid. De regionale indeling in zeven hoofdgebieden die bij aanvang van het TopIntegraal-programma door Vermooten et al. (2005) is opgesteld voor de ondiepe ondergrond, is hoofdzakelijk ingegeven vanuit de geochemie. Om de hydraulische parametrisatie te verbeteren is deze indeling niet noodzakelijk en kunnen gegevens uit meerdere hoofdgebieden worden gecombineerd.
- Ten tweede moeten de afzettingsmilieus van waaruit extra informatie over de doorlatendheid kan worden toegevoegd, ruimtelijk kunnen worden begrensd. De TopIntegraal-dataverzameling is gebaseerd op metingen aan monsters uit steekboringen. Steekboringen leveren veel hoogwaardige informatie over lithologie, stratigrafie en afzettingsmilieu, maar zijn in de praktijk een zeldzaamheid vanwege de hoge kosten. Voor het ruimtelijk begrenzen van afzettingsmilieus is de ruimtelijke dichtheid van steekboringen dan ook veel te laag. Uit de gepresenteerde resultaten wordt geconcludeerd dat informatie uit

andere typen boringen dan steekboringen over het algemeen niet erg geschikt is voor het beschrijven en ruimtelijk begrenzen van afzettingssmilieus. Dit kan worden geïllustreerd met een recent voorbeeld uit de praktijk van TNO-GDN. Daarbij is een met een luchtliftboring verkregen geroerd monster vergeleken met een steekkern uit hetzelfde diepte-interval. Het geroerde monster bestond volledig uit klei-aggregaten in de monsterbak, terwijl de steekkern uit een gelaagde zand-klei-afwisseling bleek te bestaan, waarbij de verhouding tussen zand en klei 70-30 was. Afhankelijk van de boormethode kan dit worden beschreven als een massieve lagunaire klei, danwel een gelaagd kleiig zand uit een getijdengeul. Dit zijn twee afzettingssmilieus die sterk van elkaar verschillen voor wat betreft doorlatendheidskarakteristieken. Meer potentie wordt gezien in het gebruik van sondeergegevens en gegevens uit boorgatmetingen, in het bijzonder het daaruit afleiden van lithostratigrafie en afzettingssmilieu met behulp van patroonherkenningstechnieken. Met name sonderingen zijn in groten getale beschikbaar in de ondiepe ondergrond. Daarbij kan onderzocht worden of daarbij gebruik kan worden gemaakt van reeds bestaande methoden om doorlatendheden te schatten uit sondeergegevens, bijvoorbeeld de empirische methode van Edelman (2016).

Afwijkingen tussen de uit steekboringen geschatte en uit korrelgrootteanalyse berekende lithoklassen leiden bij fijn en midden zand tot verschillen in doorlatendheden in de orde van grootte van een factor 1,5 (paragraaf 5.3.1).

De gebruikswaarde van de dataverzameling van doorlatendheidsgegevens kan verder worden verhoogd door de bestaande kwaliteitscontroles te harmoniseren en uit te breiden, met speciale aandacht voor de als zand geprepareerde kleimonsters (paragraaf 5.4.2.), het omgaan met uitschieters (paragraaf 5.4.3) en monsterverstoring (paragraaf 5.4.4). Het integrale karakter van de dataverzameling biedt hiertoe voldoende mogelijkheden, in de vorm van gepaarde lithologische metingen en opmerkingen die genoteerd zijn tijdens verschillende fasen van het bemonsterings- en meetproces.

Het opheffen van de onderschatting van doorlatendheden in de karakterisering van de lithoklassen grof zand en midden zand is van groot belang, maar ook een uitdaging. Voor een representatieve lithologische karakterisering en voor het uitvoeren van betrouwbare doorlatendheidsmetingen is veel monstermateriaal nodig. Er moet ook een veel grotere meetopstelling gebouwd worden, waarvan de haalbaarheid geenszins vaststaat. Het schaarse recente onderzoek op dit gebied richt zich juist daarom primair op in situ proeven (Diem et al., 2009). Van de reeds uitgevoerde steekboringen zijn alle grindige trajecten bewaard als geroerde monsters. Dit maakt een globale inschatting op basis van korrelgrootteverdeling mogelijk, mits de hoeveelheid materiaal per monstertraject dit toelaat. Naar verwachting zal dit voor een deel van de bewaarde trajecten het geval zijn.

6 Conclusies en aanbevelingen

6.1 Conclusies

De doorlatendheid van de ondiepe ondergrond van grondmonsters uit Noord-Nederland wordt op monsterniveau voornamelijk beïnvloed door het zandpercentage, de monstermediaan en de spreiding van de korrelgrootte van het monster.

Deze invloeden verklaren doorlatendheidsverschillen tussen lithostrat-lithoklassen. Een voorbeeld is de relatief hoge doorlatendheid van schone en isotrope fijne zanden in de Formatie van Peelo. Andere voorbeelden zijn de relatief lage doorlatendheden van kleiig zand van de Formatie van Drente (Laagpakket van Gieten, keileem) en een deel van de grove zanden in de Formaties van Peelo en Drente (Laagpakket van Schaarsbergen), beide als gevolg van een zeer grote monsterspreiding.

In de karakterisering wordt de doorlatendheid van grof zand en in mindere mate midden zand onderschat, doordat de huidige meetopstelling niet geschikt is voor doorgaans beter doorlatende grinden en grindrijke zanden.

Voor lithostrat-lithoklassen met 15 of minder meetwaarden is geconstateerd dat het aantal monsters in de betreffende populaties waarschijnlijk te klein is voor statistische analyse.

Ondanks de relaties die gelegd konden worden met lithologische eigenschappen is er sprake van een restvariatie in doorlatendheid binnen lithostrat-lithoklassen. Deze variatie, die kan oplopen tot meer dan een orde van grootte, is deels te verklaren met de herkomst vanuit verschillende afzettingmilieus.

6.2 Aanbevelingen

Aanbevolen wordt om het ontbreken van grindige en grindhoudende monsters in de huidige dataverzameling in te vullen door ontwikkeling van een alternatieve bepalingmethode. Mogelijke opties zijn in situ methoden of 3D-scans van ongestoorde kernen in combinatie met numerieke stromingsmodellen.

Om voor Noord-Nederland typische lithostrat-lithoklassen met weinig meetwaarden goed te kunnen karakteriseren wordt aanbevolen om aanvullende monsters te verwerven, zo mogelijk door samen te werken met partijen die kwalitatief goede boringen laten uitvoeren. Een voorbeeld is het Laagpakket van Nieuwolda van de Formatie van Peelo (PENI, 'potklei'). Door deze te analyseren op doorlatendheid kunnen de populaties meetwaarden zodanig worden vergroot dat ze alsnog geschikt worden voor statistische analyse. Dit is van belang voor een goed onderbouwde parametrisatie van de ondergrondmodellen van TNO-GDN waarvoor het programma TopIntegraal is opgezet.

De gebruikswaarde van de dataverzameling van doorlatendheidsgegevens kan verder worden verhoogd door de bestaande kwaliteitscontroles te harmoniseren

en uit te breiden, onder andere met betrekking tot de beoordeling van monsters uit het grensgebied tussen zand en klei / leem, het omgaan met uitschieters, en de beoordeling van monsterverstoring. Het integrale karakter van de dataverzameling biedt voldoende mogelijkheden om dit uit te voeren.

Aanbevolen wordt om de potentie te onderzoeken van sondeer- en boorgatmeetgegevens voor het verkrijgen van ruimtelijke informatie over lithofacies. Met name sonderingen zijn in groten getale beschikbaar in de ondiepe ondergrond.

Om grotere monsteraantallen per lithostrat-lithoklasse te verkrijgen wordt aanbevolen om de hier voor Noord-Nederland gerapporteerde analyse nogmaals uit te voeren, voor alle gebieden gezamenlijk waaruit inmiddels TopIntegraal-gegevens beschikbaar zijn. Bij het moment van schrijven van dit rapport zijn dit voornamelijk het Westelijk kustgebied (inclusief Zeeland), Noord-Brabant en Noord- en Midden-Limburg, en in mindere mate het Rivierengebied (exclusief het IJsseldal). Een dergelijke uitgebreidere analyse leidt ook tot een vollediger inzicht in relaties tussen afzettingssmilieu en doorlatendheid.

Tenslotte biedt de TopIntegraal-dataset een unieke mogelijkheid om bestaande, empirische relaties tussen korrelgrootteverdelingen en doorlatendheden te valideren en onderling te vergelijken.

7 Ondertekening

Naam en paraaf tweede lezer

Ir. R.W. Vernes

Ondertekening

Autorisatie vrijgave

Drs. J.T. Buma
Auteur

Drs. D. Maljers
Research Manager

8 Literatuur

Bosch, J.H.A., 2000. Standaard Boor Beschrijvingsmethode, versie 5.1. TNO-rapport NITG 00-141-A, 269 pp.

Bosch, J.H.A., R. Harting en J.L. Gunnink, 2014. Lithologische karakterisering van de ondiepe ondergrond van Noord-Nederland (Topsysteem hoofdgebied 5). TNO-rapport TNO2014-R10680, 269 pp.

Box, G. E. P. en D. R. Cox, 1964. An Analysis of Transformations. Journal of the Royal Statistical Society. Series B (Methodological), Vol. 26, No. 2 (1964), pp. 211-252. Published by: Wiley for the Royal Statistical Society

De Mulder, E.F.J., M.C. Geluk, I. Ritsema, W.E. Westerhoff en Th.E. Wong, 2003. De ondergrond van Nederland. Geologie van Nederland, deel 7. NITG TNO, 379 pp.

Diem, S., T. Vogt en E. Hoehn, 2009. Räumliche Charakterisierung der hydraulischen Leitfähigkeit in alluvialen Schotter-Grundwasserleitern: Ein Methodenvergleich. Grundwasser – Zeitschrift der Fachsektion Hydrogeologie (2010) 15: 241–251. DOI 10.1007/s00767-010-0153-6.

Edelman, D (2016) Doorlatendheid notitie: Ondergrondinformatie uit sondeergrafieken. www.rvde.nl (laatst bezocht 07-09-2020).

Eijkelpark Agriseach Equipment, 2003. Operating instructions: 09.02 Laboratory permeameters. 14 pp.

Heerdink, R. en J. Griffioen, 2012. Geochemische karakterisering van de geotop van Noord-Nederland (hoofdgebied 5). Gehaltes en associaties van hoofd- en sporenelementen. TNO Energie, rapportno. TNO2012-R10136, 227 pp.

Hummelman, J., D. Maljers, A. Menkovic, R. Reindersma, R. Vernes en J. Stafleu, 2019. Totstandkomingsdocument Hydrogeologisch Model (REGIS II). TNO-rapport R11654.

Klein, J. en J. Griffioen, 2012. Geochemische karakterisering van de geotop van Noord-Nederland (hoofdgebied 5). De reactiecapaciteit van afzettingen in de geotop van Noord-Nederland. TNO Geological Survey of the Netherlands, rapportno. TNO-034-UT-2010-01286, 165 pp.

McGill, R., J.W. Tukey en W.A. Larsen, 1978. Variations of Box Plots. The American Statistician Vol. 32, No. 1 (Feb., 1978), pp. 12-16.

Schokker, J. en H.J.T. Weerts, 2004. Afzettingssmilieus en facieseenheden van de Tertiaire en Kwartaire lithostratigrafische eenheden in de ondergrond van Nederland. TNO-rapport NITG 03-194-A, 31 pp.

Stafleu, J. en J.L. Gunnink, 2016. Hydraulische parameterisering van GeoTop Zeeland. TNO-rapport 2016 R11068, 74pp.

Vermooten, J.S.A., L. Vasak, J. Griffioen, G.T. Klaver, R.W. Vernes en H.J.T. Weerts, 2005. Afbakening van het topsysteem voor de kartering van de reactiviteit van de Nederlandse ondergrond. TNO-rapport NITG 05-121-A, 83 pp.

Vernes, R.W. en Th.H.M. van Doorn, 2005. Van gidslaag naar hydrogeologische eenheid. Toelichting op de totstandkoming van de dataverzameling REGIS II. TNO-rapport NITG 05-038-B, 69 pp.