

Onderzoek backfillzand

Fundamenteel onderzoek naar optimalisatie van backfillzanden

24 april 2020

Patrick de Vries



Wiertsema & Partners

RAADGEVEND INGENIEURS

Raadgevend Ingenieursbureau
Wiertsema & Partners B.V.
Feithspark 6, 9356 BZ Tolbert
Postbus 27, 9356 ZG Tolbert
Tel.: 0594 51 68 64
Fax: 0594 51 64 79
E-mail: info@wiertsema.nl
Internet: www.wiertsema.nl

Onderwerp: Onderzoek backfillzand
Opleiding: Built Environment – Hanzehogeschool Groningen
Geschreven door: Dhr. P. de Vries
Studentnummer: 331232
Docentbegeleider: Dhr. D. Ernten
Tweede lezer: Dhr. F. de Boer
Bedrijfsbegeleider: Dhr. Y. Houthuesen
Datum: 24 april 2020

Versie	Datum	Omschrijving
1	24 april 2020	Definitief inlevermoment 24 april 2020

Voorwoord

Voor u ligt het rapport van het onderzoek “Optimalisatie thermische geleidbaarheid backfillzand” dat geldt als afstudeerproduct, ook wel bekend als beroepsproduct, ter afsluiting van de bachelor Built Environment aan de Hanzehogeschool te Groningen. Het onderzoek heeft plaatsgevonden van januari 2020 tot en met april 2020 bij Ingenieursbureau Wiertsema & Partners B.V. te Tolbert.

Middels dit voorwoord wil ik Ingenieursbureau Wiertsema & Partners bedanken voor de mogelijkheid tot realisatie van een relevant beroepsproduct en een afstudeerplek ter ontwikkeling van het civiel ingenieurschap. Tevens wil ik de laboratoriummedewerkers van Ingenieursbureau Wiertsema & Partners bedanken voor de voorziening van meetapparatuur, laboratoriumruimte en hulp gedurende de laboratoriumwerkzaamheden.

Daarnaast wil ik Vos Zand & Grind, Sanders & Geraedts en Van Der Wiel bedanken voor de beschikbaar gestelde materialen, de kennis en kunde van zandwinningen en de gelegenheid tot locatiebezoeken.

Ten slotte wil ik Dhr. Yuri Houthuesen en Dhr. Dirk Ernsten bedanken voor de gedeelde kennis, adviezen en begeleiding gedurende het gehele afstudeertraject, met in het bijzonder dit onderzoek in het kader van het beroepsproduct.

Tolbert, april 2020

Inhoudsopgave**blad**

Voorwoord	3
Begrippenlijst.....	6
1 Inleiding.....	8
1.1 Aanleiding.....	8
1.2 Probleemstelling	8
1.3 Doelstelling	9
1.4 Hoofd- en deelvragen.....	9
1.5 Leeswijzer	9
2 Theoretische achtergrond	10
2.1 Componenten backfillzand uitgediept.....	10
2.2 Modelontwikkeling.....	11
2.3 Model Lu (2007).....	12
2.4 Herzien model door Tarnawski en Leong (2009)	13
2.5 Model Lu (2014).....	14
2.6 Model KEMA.....	15
2.7 Toepassing modellen binnen Wiertsema & Partners.....	15
3 Projectopzet.....	17
3.1 Methodiek en werkwijze	17
3.1.1 Monsternamen en monsterbeschikbaarheid.....	17
3.1.2 Bepaling verschil thermische geleidbaarheid van leem- en zandfractie	17
3.1.3 Bepaling invloed leem en dichtheid t.o.v. thermische geleidbaarheid.....	18
3.1.4 Bepaling optimale korrelverdeling.....	18
3.1.5 Analyse mogelijkheid tot voorspellen thermische geleidbaarheid o.b.v. literatuur	19
4 Resultaten	20
4.1 Verschillen leem- en zandfractie.....	20
4.1.1 Vos 250-500 zand	21
4.1.2 Sanders & Geraedts leem	21
4.1.3 Vos Spoelzand Remix “Zeer fijn” en Van Der Wiel leem	22
4.1.4 Interpretatie van data.....	22
4.2 Invloed leem en dichtheid t.o.v. thermische geleidbaarheid.....	23
4.2.1 Invloed verschillend leemgehalte.....	24
4.2.2 Invloed verschillende dichtheid	25
4.2.3 Verschillen metingen gemiddeld en hoog vermogen	26
4.3 Optimale korrelverdeling	28
4.3.1 Fullerkromme	28
4.3.2 Beschikbare componenten Vos Zand & Grind	28
4.3.3 Theoretisch mengproces.....	29
4.3.4 Uitkomsten mengproces MM4	29

4.3.5	Uitkomsten mengproces MM5	31
4.3.6	Leemgehalte vs. dichtheid	31
4.4	Mogelijkheid tot voorspellen λ -waarde	32
4.4.1	Vergelijking vier modellen	32
4.4.2	Beschouwing λ -waarde in droge toestand	35
5	Conclusie	37
6	Discussie.....	39
7	Aanbevelingen	40
8	Verantwoording	41
8.1	Betrouwbaarheid.....	41
8.2	Bruikbaarheid en draagvlak.....	41
	Literatuurlijst	42

Bijlagen:

1	Monsterlijst Vos Zand & Grind, Sanders & Geraedts en Van Der Wiel
2	Overzicht gegevens van materialen: karakteristieken en resultaten thermische metingen
3	Resultaten korrelverdelingen Vos Zand & Grind en Wiertsema & Partners
4	Mengpaneel zeefproces
5	Vergelijking van thermische geleidbaarheidsmodellen
6	Grafieken vergelijking modellen

Begrippenlijst

Begrip	Verklaring
Backfill/backfillzand	Zand dat wordt gebruikt als grondverbetering bij ondergrondse midden- en hoogspanningskabels. Het dient voldoende thermische geleidend, makkelijk te verdichten en voldoende vochthoudend te zijn.
Bodemstructuur	Samenhang van de vaste gronddeeltjes.
Bulkdichtheid	Het gewicht per eenheid van een materiaal (met inbegrip van lucht en/of water).
Dichtheid	Het gewicht per eenheid volume van een materiaal.
Empirisch model	Model waarmee, op basis van eigen waarnemingen en ervaringen, een fenomeen verklaard wordt.
Ex-situ	Behoudt van de bestanddelen van het monster buiten de oorspronkelijke locatie (bijvoorbeeld in het laboratorium).
Fullerkromme	Een kromme, bekend uit de betonindustrie, die aan de hand van een maximale korrelgrootte de optimale samenstelling van korrels weergeeft. De kromme leidt tot een maximale dichtheid van minerale mengsels, waarbij alle poriën tussen de grovere korrels optimaal worden gevuld door kleinere korrels.
G-waarde	Reciproque van de λ -waarde, ofwel thermische geleidbaarheid, en geeft de thermische weerstand aan. De eenheid is mK/W.
Geotechniek	Toegepaste wetenschap die zich bezig houdt met bouwen op en in de grond.
In-situ	Zoals het zich in de oorspronkelijke plaats/locatie bevindt.
Kerstengetal	Een genormaliseerde notatie om de thermische geleidbaarheid van een materiaal uit te drukken.
Klei	Grondsoort waarvan de samenstelling wat betreft de grootte van de grind-, zand-, silt- en lutumfractie aan bepaalde grenzen is gebonden. Klei bestaat uit zogeheten kleiplaatjes met een grootte kleiner 2 μm , ofwel lutumdeeltjes.
Korrelverdeling	De mate waarin de korrels voorkomen in verschillende fractiegroottes, worden weergegeven middels een korrelverdelingsdiagram, ook wel zeefkromme genoemd.
Korrelvorm	Karakterisering van de hoekigheid of rondheid en eventueel oppervlakteruwheid van de korrel.
Kwarts	Een vorm van siliciumoxide, SiO_2 , en één van de meest voorkomende mineralen in de aardkorst. Zand bestaat voor een groot deel, zo niet volledig, uit kwarts.
Lambda-waarde (λ)	Symbool waarmee de thermische geleidbaarheid wordt aangeduid. De eenheid is W/mK en de lambda-waarde is de reciproque van de g-waarde.
Leem	Grondsoort waarvan de samenstelling wat betreft de grootte van de grind-, zand-, silt- en lutumfractie aan bepaalde grenzen is gebonden. Het aandeel van de siltfractie is in leem het grootst. In dit onderzoek wordt met leemfractie het aandeel < 63 μm aangeduid.
Massapercentage	Massa van een onderdeel uitgedrukt in het percentage van het geheel.
Maximum Proctordichtheid	Waarde voor maximaal haalbare droge dichtheid (MPD) die voortkomt uit een Proctorproef op basis van een verdichting door een gestandaardiseerde hoeveelheid energie. In de praktijk wordt vaak een vereiste verdichtingsgraad

	geëist van een bepaald percentage ten opzichte van de MPD.
Mineraal	Vast, anorganisch materiaal met een homogene structuur, overwegend bestaande uit oxiden van silicium, aluminium en calcium.
Organische stof	Plantaardig en dierlijk materiaal en het onverharde omzettingsproduct daarvan (bestaande uit onder meer plantenresten en humusachtige bestanddelen).
Peptisator	Middel waarmee voorafgaand aan een zeefproef een grondmonster wordt klaargemaakt. Aan de hand van de peptisator worden alle korreltjes van elkaar losgemaakt, waardoor er geen 'klontjes' meer aanwezig zijn in het te zeven monster.
pF-curve	Geeft het vochtgehalte in een grond weer op bepaalde afstanden boven de grondwaterspiegel op basis van de zuigspanning, ook wel waterretentiecurve genoemd.
Poriëngetal	Volume aan poriën gedeeld door volume aan vaste stof.
Poriënvolume	Volume aan poriën gedeeld door het totale volume, ook wel poriëngehalte of porositeit genoemd.
Proctorproef	Proef om de relatie tussen de droge dichtheid en het vochtgehalte te bepalen volgens een voorgeschreven wijze van verdichten.
Residueel water	Water dat na droging nog overblijft in een monster.
RMSE	Root-mean-square-error. Een wijze van vergelijking van de afwijkingen tussen de uitkomsten van een model en uitkomsten vanuit metingen/observaties.
Sedigraaf	Apparaat dat automatisch de verdeling van de korrelgroottes bepaald die kleiner zijn dan 63 µm door middel van een sedimentatietechniek en röntgenstraling.
Soortelijke geleidbaarheid	De mate waarin een specifiek materiaal in staat is om een bepaalde component te geleiden. In dit onderzoek is deze component 'warmte'.
Soortelijke massa	Massa per eenheid van volume van een specifiek materiaal.
Thermische geleidbaarheid	De mate waarin een desbetreffend materiaal in staat is om warmte te geleiden. De reciproque van thermische geleidbaarheid is de thermische weerstand.
Thermische weerstand	De reciproque van thermische geleidbaarheid. Een hoge thermische geleidbaarheid gaat gepaard met een lage thermische weerstand en vice versa.
Verzadigingsgraad	Verhouding van het volume van het poriënwater en het totale volume van de poriën.
Vochtgehalte	Verhouding tussen het volume van het poriënwater en het totale volume van het bulkmateriaal.
Volumegewicht	Gewicht per eenheid van volume aan bulkmateriaal.
Volumieke massa	Massa per eenheid van volume.
Warmteconvectie	Het optreden van een warmtestroom binnen een grondmonster waardoor de waarde van thermisch geleidbaarheid beïnvloed wordt.
Zand	Grondsoort waarvan de samenstelling wat betreft de grootte van de grind-, zand-, silt-, en lutumfractie aan bepaalde grenzen is gebonden. Het betreft de fractie tussen de korrelgroottes 63 µm en 2 mm.

1 Inleiding

1.1 Aanleiding

Voor hoogspanningskabels van 110 en 150 kV is ondergrondse aanleg tegenwoordig normaal. Traditioneel wordt hoogspanning in Nederland door middel van lijnverbindingen (bovengronds) getransporteerd. Het verkabelen van deze verbindingen is niet efficiënt in verband met kapitaalvernietiging. Echter, worden nieuwe 110 kV- en 150 kV-verbindingen vandaag de dag bij voorkeur ondergronds aangelegd. Voor 'zwaardere' verbindingen wordt ondergrondse aanleg locatie- en project specifiek onderzocht, afhankelijk van de eisen en behoeften. Naast het versmallen van de magneetveldzones ten behoeve van de volksgezondheid, spelen landschapsbehoud en het voorkomen van ingewikkelde vergunningsprocedures evenzo mee wat betreft het maatschappelijk vlak (HoogspanningsNet, 2019).

Bij het ondergronds aanleggen van hoogspanningskabels is de situatie in de ondergrond ter plaatse van de kabel uiterst belangrijk. De dimensionering van de hoogspanningskabel dient gebaseerd te worden op de thermische eigenschappen van de bovenliggende grondlagen. In veel gevallen is er een grondverbetering nodig om de warmteafdracht van de kabel te verbeteren. Door onvoldoende warmteafdracht van de in-situ omliggende en bovenliggende grond kan gronduitdroging en oververhitting van de kabel ontstaan, hetgeen kan leiden tot ernstige schade aan de kabel. Om de warmteafdracht van de bodem te verbeteren worden kabels veelal aangelegd in een speciaal 'backfillzand'. Dit is een zand met een hoge thermische geleidbaarheid en goede vochthoudende eigenschappen om gronduitdroging te voorkomen.

1.2 Probleemstelling

De thermische geleidbaarheid of de thermische weerstand (zijnde de reciproque van de geleidbaarheid, in Nederland aangeduid als 'g-waarde') wordt vaak bepaald op basis van correlaties met de volumieke massa en het vochtgehalte aan de hand van bekende relaties uit de literatuur. Daarnaast is het mogelijk om de thermische geleidbaarheid of g-waarde van de grond in-situ of ex-situ (in het laboratorium) te meten.

In de afgelopen decennia is een keur aan correlaties voor het bepalen van de geleidbaarheid of g-waarde gepubliceerd in de internationale literatuur. Het is de vraag in hoeverre deze toepasbaar zijn op Nederlandse grond omdat de meeste van deze correlaties zijn vastgesteld op basis van proevenverzamelingen met uitsluitend niet-Nederlandse gronden. De modellen en theorieën die op dit moment gebruikt worden binnen Wiertsema & Partners, waarop in hoofdstuk 2 dieper wordt ingegaan, zijn opgesteld met grotendeels Chinese en Noord-Amerikaanse gronden. Een fundamentele controle van het model met Nederlandse gronden is op het moment van schrijven nog niet beschikbaar.

Daarnaast groeit, door de toename van de aanleg van ondergrondse hoogspanningskabels, de vraag naar backfillzanden. Voor zandleveranciers kan de backfillmarkt een interessante optie zijn, mits het materiaal dat zij kunnen leveren aan de juiste eisen voldoet. Er blijkt echter bij zandleveranciers soms onbekendheid te bestaan omtrent de benodigdheden voor een voldoende geleidend backfillmateriaal. Zandleveranciers zijn geïnteresseerd in de geschiktheid van het materiaal dat zij bezitten, wat daarin de mogelijkheden zijn en op welke wijze het backfillproduct geoptimaliseerd kan worden.

1.3 Doelstelling

Zoals bij de probleemstelling omschreven zijn er twee zaken die aandacht behoeven in het kader van dit onderzoek naar backfillzanden. Enerzijds is het doel om een gefundeerd onderzoek uit te voeren, waarbij de huidige literatuur en modellen beproefd worden op basis van Nederlandse gronden. Hieruit kan de mate van werkbaarheid van het model voor Nederlandse bodemmaterialen bepaald worden en toegepast worden bij de ontwikkeling van backfillzanden.

Anderzijds is het de bedoeling om handvatten aan te reiken om op basis van huidige en, aan de hand van Nederlandse gronden, gecontroleerde literatuur de mogelijkheid tot en de invulling van een optimaal backfillzand op te stellen voor zandleveranciers en hun desbetreffende beschikbare materialen.

1.4 Hoofd- en deelvragen

Uitgaande van de probleem- en doelstelling is een hoofdvraag opgesteld met daarbij een viertal additionele deelvragen. De hoofdvraag van het onderzoek luidt als volgt:

“Hoe kan er een optimaal backfillzand gecreëerd worden met een zo hoog mogelijke thermische geleidbaarheid?”

Om de juiste informatie te verzamelen en geground antwoord te kunnen geven op bovenstaande hoofdvraag zijn de volgende deelvragen opgesteld:

1. Wat is het verschil in thermische geleidbaarheid (λ -waarde) van de leem- en zandfractie?
2. Is het toevoegen van leem, ter verhoging van de dichtheid, strijdig met het verkrijgen van een zo hoog mogelijk thermische geleiding?
3. Wat is de optimale korrelverdeling voor het verkrijgen van een zo hoog mogelijke dichtheid?
4. Kan de thermische geleiding “voorspeld” worden op basis van dichtheid, vochtgehalte en granulaire samenstelling (zandgehalte en/of leemgehalte), naar analogie van “An Improved Model for Predicting Soil Thermal Conductivity from Water Content at Room Temperature” (Lu, Ren, Gong, & Horton, 2007)?

1.5 Leeswijzer

Na de inleiding in dit eerste hoofdstuk volgt in het tweede hoofdstuk de theoretische achtergrond omtrent thermische geleidbaarheidsmodellen die de basis vormen voor dit onderzoek. Vervolgens wordt in hoofdstuk 3 de projectopzet beschreven. In hoofdstuk 4 volgen de resultaten van het onderzoek tezamen met een toelichting, waarna in hoofdstuk 5 de conclusie van het onderzoek wordt behandeld. Tot slot staan in hoofdstuk 6, 7 en 8 respectievelijk de discussie, aanbevelingen en verantwoording.

In de bijlagen zijn de volgende componenten opgenomen:

- Monsterlijst Vos Zand & Grind, Sanders & Geraedts en Van Der Wiel
- Overzicht gegevens van materialen: karakteristieken en resultaten thermische metingen
- Resultaten korrelverdelingen Vos Zand & Grind en Wiertsema & Partners
- Mengpaneel zeefproces
- Vergelijking van thermische geleidbaarheidsmodellen
- Grafieken vergelijking van thermische geleidbaarheidsmodellen

2 Theoretische achtergrond

Door de jaren heen zijn er diverse modellen opgesteld, meermaals herzien en doorontwikkeld om de thermische geleidbaarheid van gronden te kunnen voorspellen. In hoofdstuk 2 wordt een beknopte beschrijving van de samenstelling van een backfillzand gegeven. Vervolgens wordt de ontwikkeling van relevante thermische geleidbaarheidsmodellen beschreven, waarna de toepassing van het model van Lu (2007) bij de werkzaamheden van Wiertsema & Partners toegelicht wordt.

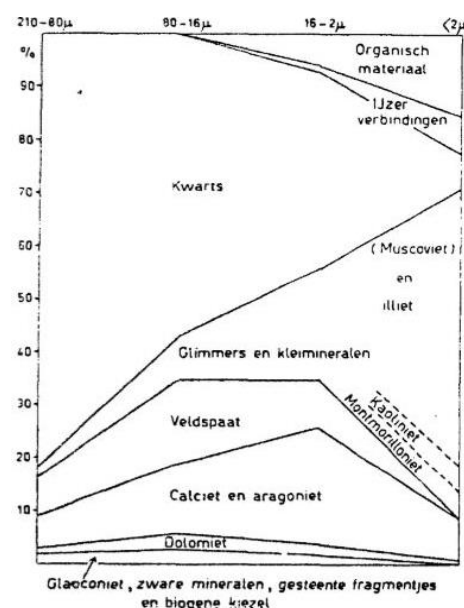
2.1 Componenten backfillzand uitgediept

Conceptueel gezien bestaat grond uit vaste bestanddelen, water en/of lucht en is te vergelijken met een bak vol knikkers. Water of lucht vullen de poriën op die ontstaan tussen de vaste bestanddelen. De hoeveelheid water of lucht in de grond is afhankelijk van de verzadigingsgraad. Bij droge grond zijn de poriën volledig gevuld door lucht en bij verzadigde grond wordt de lucht verdreven door water en zijn de poriën volledig gevuld met water. De vaste bestanddelen van een grond kunnen diverse materialen zijn, waaronder zand, klei en organische stof. De samenstelling van de grond bepaald de eigenschappen die horen bij de desbetreffende grond. Dit betreft dus ook eigenschappen die van belang zijn bij vraagstukken op het gebied van thermische geleidbaarheid.

Het is tevens van belang om de samenstelling van diverse vaste delen in gronden in kaart te brengen. De vaste delen bestaan uit verschillen mineraalsoorten. Het aandeel van de mineralen in de grond wordt bepaald door de samenstelling en de aanwezige korrelgroottes. Tabel 1 geeft een globale inschatting van de gemiddelde mineralogische samenstelling van korrelgroottefracties in Nederlandse gronden (Lochter & de Bakker, 1990). De zandfractie bevat volgens de hedendaagse indeling korrelgroottes van 63 tot 2000 μm . Tabel 1 toont dat zand voor het grootste gedeelte uit kwartsmineralen bestaat. Bekend is dat Nederlandse zanden over het algemeen tegen de bovengrens van 95% aan liggen qua kwartsaandeel. Zelfs in de fijnere fracties onder de 63 μm (toentertijd lag de grens op 50 μm) bestaat het materiaal nog voor een aanzienlijk deel uit kwartsmineralen. Ook in de kleifracie (kleiner dan 2 μm) is er nog 5 tot 10 procent kwarts aanwezig. Dit wordt bevestigd door een rapport van het Centrum voor Onderzoek Waterkeringen met een onderzoek naar de mineralogische samenstelling van Waddenzeesedimenten uit 1984 (J.A. Muijs, 1984). Figuur 1 toont het percentueel mineraalaandeel ten opzichte van de mineraalgrootte. De figuur toont het aandeel van bepaalde mineralen vanaf de korrelgrootte 210 μm en kleiner. Het betreft dus de fijnere zandfractie, siltfractie en kleifracie. Er is te concluderen dat korrels rond 210 μm nog uit ongeveer 82% kwarts bestaan. Naarmate de korrels kleiner worden, vermindert het aandeel kwarts. Echter, bestaat zelfs de fractie kleiner dan 2 μm nog voor ongeveer 7% uit kwartsmineralen.

Mineraalgroep	Massafractie [%] in korrelgroottefractie [μm]			
	50-2000	16-50	2-16	< 2
Kwarts	80-95	65	40	5-10
Veldspaten	5-10	20	20	< 5
Mica's	1-5	10	-	-
Chloriet	< 3	5	-	-
Zware mineralen	0,5	?	?	?
Kleimineralen	-	-	35	80

Tabel 1: Mineralogische samenstelling van Nederlandse zandgronden



Figuur 1: Mineralogische samenstelling Waddenzeesedimenten

De mate van thermische geleidbaarheid van de bestanddelen in grond lopen zeer uiteen. Een publicatie van De Vries uit 1963 gaat in op de thermische eigenschappen van gronden. De Vries (1963) heeft onder andere onderzoek gedaan naar de specifieke geleidbaarheid van diverse materialen. De specifieke thermische geleidbaarheid geeft de mate aan waarmee een specifiek materiaal in staat is om warmte te geleiden. De Vries heeft de specifieke thermische geleidbaarheid onderzocht van kwarts, kleimineralen, organische stof, water, ijs en lucht. De resultaten zijn weergegeven in tabel 2. Kwarts geleidt ten opzichte van de door de Vries onderzochte grondcomponenten het beste. Dit onderstreept het belang van een zo hoog mogelijk kwartsgehalte in een grondmengsel ten behoeve van de thermische geleidbaarheid. Kleimineralen geleiden veel minder dan kwarts en dat geldt in nog grotere mate voor organische stof. De opvulling van poriën tussen granulaire mengsel geschiedt door water en/of lucht. In het kader van thermische geleidbaarheid is het dus wenselijk om de poriën zoveel mogelijk met water te vullen in plaats van met lucht.

Materiaal	Thermische geleidbaarheid (W/mK)
Kwarts	8,79
Kleimineralen	2,93
Organische stof	0,25
Water	0,57
Ijs	2,18
Lucht	0,025

Tabel 2: Specifieke geleidbaarheden volgens De Vries (1963)

Een backfillzand bestaat uit een zandmengsel met een bepaald leemgehalte. Een typisch backfillzand beschikt over het algemeen over een leemgehalte tussen de 10 en 30 procent ten behoeve van een hoge dichtheid en het vochthoudend vermogen. Uit tabel 2 blijkt het belang van voldoende vochthoudend vermogen, omdat water vele malen beter geleid dan lucht. Gezien het feit dat backfillzand vaak boven de grondwaterspiegel wordt toegepast (waar dus lucht aanwezig is en uitdroging plaats kan vinden) is een voldoende leemgehalte dus zeer wenselijk voor voldoende thermische geleidbaarheid. Het vochtgehalte en de dichtheid van een backfillmengsel zijn allesbepalend voor de prestaties van het zand. Een hogere dichtheid zorgt voor een betere geleidbaarheid, doordat de porositeit vermindert en de contactoppervlakken tussen de zandkorrels vergroot worden. Het belang van een zo laag mogelijke porositeit en een optimalisatie van de contactoppervlakken verklaart evenzo het belang van een goede korrelverdeling (Lu, Lu, Horton, & Ren, 2014).

2.2 Modelontwikkeling

Diverse onderzoekers hebben zich de afgelopen decennia bezig gehouden met het ontwikkelen van thermische geleidbaarheidsmodellen voor gronden. Ondanks het beschikbaar zijn van vele verschillende modellen worden veel modellen als te complex bevonden voor de praktische toepassing. Andere modellen geven op hun beurt weer relatief grote foutmarges, waardoor de betrouwbaarheid van het theoretische model ten opzichte van de werkelijkheid niet te waarborgen is, waardoor er een beperkt aantal praktisch toepasbare modellen overblijft (Lu, Lu, Horton, & Ren, 2014).

Zoals in 2.1 beschreven is de thermische geleidbaarheid voor het grootste gedeelte afhankelijk van de dichtheid van het materiaal en het vochtgehalte. Het vochtgehalte in de grond is een parameter die sterk beïnvloedbaar is door de in-situ situatie. Het vochtgehalte wordt met name beïnvloed door tijd en diepte. Door de jaren heen zijn er diverse (semi-)empirische modellen opgesteld om de thermische geleidbaarheid te schatten aan de hand van het vochtgehalte of de verzadigingsgraad. Zo heeft de Vries (1963) een model opgesteld waarin de grond wordt gezien als een mengsel van ellipsvormige korrels in een continu medium van lucht en water. Het model van de Vries (1963) is in staat om de thermische geleidbaarheid in gronden redelijk nauwkeurig te bepalen, echter is het model omvangrijk en laat het in de droge situatie een behoorlijke onderwaardering van de thermische geleidbaarheid zien. De reden daarvoor is dat het model van de Vries (1963) aanneemt dat de korrels niet met elkaar in contact staan, waardoor Farouki (1986) een toename voor de thermische geleidbaarheid van 25% adviseerde bij droge

gronden. Tevens bracht de methode voor de bepaling van de korrelvormfactoren problemen met zich mee, die resulteerden in minder nauwkeurige thermische geleidbaarheidswaarden (λ) (Lu, Lu, Horton, & Ren, 2014).

Johansen (1975) heeft een model opgesteld met een empirische functie bij bevroren en niet-bevroren gronden. Johansen heeft tevens een genormaliseerde vorm van de thermische geleidbaarheid geïntroduceerd, het Kerstengetal (K_e). Het Kerstengetal beschrijft de relatie tussen thermische geleidbaarheid, de verzadigingsgraad en de samenstelling van de grond. Deze relatie geldt voor de gehele reeks van droge tot volledig verzadigde grond. Door de introductie van de genormaliseerde vorm van de thermische geleidbaarheid in relatie tot het vochtgehalte is de nauwkeurigheid van de λ -bepaling gegroeid. Echter, blijkt dat het Johansen-model (1975) gevoelig is voor de porositeit van de grond bij het inschatten van warmtestromen. Het Johansen-model (1975) is eerst empirisch aangepast door Côté en Konrad (2005). Dit leidde tot enige verbetering, maar het model presteerde nog steeds minder goed bij lagere vochtgehalten en in het bijzonder bij fijne gronden. Dit model is vervolgens door Lu (2007) doorontwikkeld, zodat het goed presteert in de gehele range van droog naar verzadigd en dus een kleinere foutmarge geeft (Lu, Ren, Gong, & Horton, 2007; Lu, Lu, Horton, & Ren, 2014).

Campbell (1985) en Chung en Horton (1987) hebben evenzo modellen opgesteld omtrent de relatie tussen vochtgehalte en thermische geleidbaarheid. Een nadeel van het empirische Campbell-model is dat er vijf verschillende parameters zijn die lastig te bepalen zijn. De relatie van Chung en Horton bestaat uit een polynomiale functie met een enkele set parameters voor elk zand, leem en klei. Het nadeel hiervan is dat de relatie tussen vochtgehalte en thermische geleidbaarheid niet volledig bepaald kan worden bij variërende grondtexturen en verschillende bulkdichtheden. Het model van Chung en Horton (1987) is opgesteld voor vochtgehalten tussen het 'residuele water' en volledig verzadigd. Voor vochtgehalten die onder het residuele waterniveau liggen is deze relatie niet aannemelijk en zorgt het voor afwijkende thermische geleidbaarheidswaarden (Lu, Lu, Horton, & Ren, 2014).

2.3 Model Lu (2007)

Lu (2007) heeft een simpel toe te passen model ontwikkeld om de relatie tussen vochtgehalte en thermische geleidbaarheid voor de gehele range van vochtgehalten en grondsoorten goed te kunnen beschrijven. Het model van Lu (2007) beschouwt de relatie tussen thermische geleidbaarheid en vochtgehalte als een interactie tussen korrels en water. Bij zeer lagere vochtgehalten wordt het water gehecht aan het korreloppervlak. Dunne waterlaagjes tussen de korrels groeien geleidelijk bij een toenemend vochtgehalte. Door het vochtgehalte verder te verhogen ontstaan er waterbruggen tussen de korrels en stijgt de thermische geleidbaarheid sterk door de groei van contactoppervlak. De stijging ten gevolge van een toenemend vochtgehalte wordt veroorzaakt door de verplaatsing van lucht door water. De stijging neemt bij hogere vochtgehalten steeds verder af.

Voor de bepaling van de thermische geleidbaarheid (λ) van een granulair materiaal wordt door Lu (2007) uitgegaan van een door Johansen (1975) opgestelde formule. Deze formule stelt een relatie vast tussen de thermische geleidbaarheid en het Kerstengetal (K_e), gebaseerd op λ -waarden in zowel droge als verzadigde toestand:

$$\lambda = (\lambda_{sat} - \lambda_{dry})K_e + \lambda_{dry}$$

Waarin: λ = thermische geleidbaarheid in $\text{W m}^{-1} \text{K}^{-1}$
 λ_{sat} = thermische geleidbaarheid verzadigde grond in $\text{W m}^{-1} \text{K}^{-1}$
 λ_{dry} = thermische geleidbaarheid droge grond in $\text{W m}^{-1} \text{K}^{-1}$
 K_e = Kerstengetal (-)

De bepaling van de thermische geleidbaarheid in verzadigde toestand wordt in het model van Lu (2007) op dezelfde wijze uitgevoerd als in het Johansen-model (1975) en wordt bepaald uit de specifieke geleidbaarheden van zowel de vaste gronddelen als het water, waarbij de specifieke geleidbaarheden van kwarts en de overige mineralen ‘gefitte waarden’ zijn:

$$\lambda_{sat} = \lambda_s^{1-n} \lambda_w^n$$

$$\lambda_s = \lambda_q^q \lambda_o^{1-q}$$

Waarin:
 λ_{sat} = thermische geleidbaarheid verzadigde grond in $W m^{-1} K^{-1}$
 λ_s = thermische geleidbaarheid vaste gronddelen in $W m^{-1} K^{-1}$
 λ_w = thermische geleidbaarheid water ($0,594 W m^{-1} K^{-1}$)
 n = porositeit (-)
 λ_q = thermische geleidbaarheid kwarts ($7,7 W m^{-1} K^{-1}$)
 λ_o = thermische geleidbaarheid overige mineralen ($2,0 W m^{-1} K^{-1}$ bij $q > 0,2$ en $3,0 W m^{-1} K^{-1}$ bij $q \leq 0,2$)
 q = kwartsfractie, als massapercentage van de grond (-)

Lu (2007) heeft in dit model een nieuwe functie opgesteld voor de bepaling van het Kerstengetal en een empirische lineaire relatie voor de thermische geleidbaarheid van droge grond:

$$K_e = \exp\left(\alpha(1 - S_r^{(\alpha-1,33)})\right)$$

$$\lambda_{dry} = -0,56n + 0,51$$

Waarin:
 K_e = Kerstengetal (-)
 α = structuurafhankelijke parameter (0,96 bij $q \geq 0,4$ en 0,27 bij $q < 0,4$)
 S_r = verzadigingsgraad in %
 λ_{dry} = thermische geleidbaarheid droge grond in $W m^{-1} K^{-1}$

In het model van Lu (2007) wordt het kwartsgehalte niet gemeten, maar wordt aangenomen dat het kwartsgehalte gelijk is aan het zandgehalte in een monster (Lu, Ren, Gong, & Horton, 2007).

2.4 Herzien model door Tarnawski en Leong (2009)

Tarnawski en Leong (2009) hebben onderzocht wat de invloed van het kwartsgehalte op de voorspelling van de thermische geleidbaarheid in een grond is. In dit onderzoek zijn voor diverse thermische geleidbaarheidsmodellen de empirisch bepaalde parameters opnieuw ‘gefit’ op basis van het schatten van het kwartsgehalte aan de hand van gemeten thermische geleidbaarheidsdata. In dit onderzoek is het model van Lu (2007) evenzo herzien. Tijdens het fitten van het Lu-model (2007) is uitgegaan van de volgende formule:

$$K_e = \exp\left(\alpha\left(1 - S_r^{(\alpha-\beta)}\right)\right)$$

Waarin:
 K_e = Kerstengetal (-)
 α = structuurafhankelijke parameter (0,96 bij $q \geq 0,4$ en 0,27 bij $q < 0,4$)

β = vormparameter (-) (volgens Lu (2007) vastgesteld op 1,33, bij Tarnawski en Leong (2009) variabel)

S_r = verzadigingsgraad in %

De correlatie tussen het Kerstengetal en de verzadigingsgraad is opnieuw beschouwd door Tarnawski en Leong (2009) en heeft geresulteerd in herziene waarden voor α en β . In het model van Lu (2007) worden voor α de waarden 0,96 en 0,27 gebruikt voor grovere gronden dan wel fijne gronden en hebben Tarnawski en Leong (2009) deze α -waarden ‘gefit’ op respectievelijk 0,75 en 0,38. Lu (2007) neemt daarnaast de vormparameter β aan op 1,33, terwijl Tarnawski en Leong (2009) een β -waarde vastgesteld hebben van 1,18 voor grovere gronden en 1,29 voor fijnere gronden (Tarnawski, Momose, & Leong, 2009).

2.5 Model Lu (2014)

Meerdere modellen houden rekening met de invloed van de kwartsfractie, ofwel zandfractie, op de bepaling van de thermische geleidbaarheid van gronden. Weinig modellen houden rekening met de invloed van het kleigehalte in een grond. Dit is met name van toepassing in de lagere en gemiddelde vochtgehalten. Lu (2007) heeft door middel van het onderscheiden van grovere en fijnere gronden het belang van het kleigehalte aangestipt. Daarnaast zijn er weinig onderzoeken beschikbaar die de effecten van een variërende bulkdichtheid op de thermische geleidbaarheid in acht nemen. Het model van Lu (2014) beschrijft evenzo de relatie tussen vochtgehalte en thermische geleidbaarheid. Dit model is opgesteld aan de hand van drie empirische parameters. Die parameters zijn kwartsgehalte, kleigehalte en bulkdichtheid en zijn af te leiden uit de bodemstructuur en de bulkdichtheid.

Het model van Lu (2014) gebruikt een andere exponentiële functie voor de bepaling van de thermische geleidbaarheid dan in het model van Lu (2007). Daarnaast worden de structuurafhankelijke parameters α en β bepaald door ze empirisch te fitten op de onderzochte samples binnen het model van Lu (2014). De formules die voortkomen uit het onderzoek van Lu (2014) zijn:

$$\lambda = \lambda_{dry} + \exp(\beta - \theta^{-\alpha}) \quad \theta > 0$$

$$\alpha = 0,67f_{cl} + 0,24$$

$$\beta = 1,97f_{sa} + 1,87\rho_b - 1,36f_{sa}\rho_b - 0,95$$

Waarin:

- λ = thermische geleidbaarheid in $\text{W m}^{-1} \text{K}^{-1}$
- λ_{dry} = thermische geleidbaarheid droge grond in $\text{W m}^{-1} \text{K}^{-1}$
- α = structuurafhankelijke parameter, afhankelijk van kleigehalte
- β = structuurafhankelijke parameter, afhankelijk van zandgehalte en bulkdichtheid
- θ = vochtgehalte in $\text{m}^3 \text{m}^{-3}$

De formule voor de thermische geleidbaarheid in het model van Lu (2014) is van toepassing bij vochtgehalten groter dan 0. Bij een vochtgehalte gelijk aan 0, ofwel droge grond, gebruikt Lu (2014) de formule voor de droge thermische geleidbaarheid die gehanteerd wordt in Lu (2007).

Het model van Lu (2014) geeft echter wel aan dat de toepassing van het model mogelijke beperkingen met zich mee kan brengen, omdat niet voor iedere grondsoort in alle omstandigheden een nauwkeurige benadering gegeven kan worden. De reden daarvoor is dat naast de korrelopbouw, het vochtgehalte en bulkdichtheid de thermische

geleidbaarheid evenzeer wordt beïnvloed door andere factoren als korrelvorm, minerale samenstelling, temperatuur, organische stofgehalte en grondstructuur (Lu, Lu, Horton, & Ren, 2014).

2.6 Model KEMA

In Nederland wordt veelvuldig gebruik gemaakt van een model dat ontwikkeld is door KEMA als het gaat om zanden. Tot op heden is voor zanden van Sanders & Geraedts evenzo het KEMA-model gebruikt voor de bepaling van de g-waarde. Bij het KEMA-model wordt gebruik gemaakt van een volledig theoretisch model met als input het vochtgehalte en de droge dichtheid. Het theoretische model is gefit op een monsterverzameling met dichtheden van minimaal 1375 kg/m³ tot maximaal 1835 kg/m³ en is de relatie op basis van correlaties opgesteld. Het model wordt door KEMA zonder te meten toegepast. De thermische weerstand, ofwel g-waarde, wordt bepaald met behulp van de onderstaande formule (Groeneveld, Snijders, Koopmans, & Vermeer, 1984). Deze formule is de door KEMA toegepaste temperatuuronafhankelijke variant en gaat uit van een basistemperatuur van 20 graden Celsius:

$$\log_{10} \gamma = (g_1 - g_2 \rho_d) + \frac{g_3}{(g_4 + \theta_l)}$$

Waarin: γ = thermische weerstand in mK/W

$g_1 = 1,350$

$g_2 = 0,00115$

$g_3 = 0,017$

$g_4 = 0,0179$

ρ_d = droge dichtheid in kg/m³

θ_l = vochtgehalte in m³ m⁻³

2.7 Toepassing modellen binnen Wiertsema & Partners

In de huidige praktijk wordt bestaande literatuur toegepast bij diverse thermische geleidbaarheidsprojecten van Wiertsema & Partners. De praktische toepassing van de literatuur is van belang bij de keuze voor een bepaald model. Zo moet de praktische uitvoerbaarheid voldoende zijn en geen tijdrovende handelingen in beslag nemen. Momenteel wordt gebruik gemaakt van het model van Lu (2007) dat zeer gebruiksvriendelijk is en een wezenlijke nauwkeurigheid vertoont. Met behulp van een goedwerkend en nauwkeurig model kan een g-waardenonderzoek effectief aangepakt worden.

Bij g-waardenprojecten worden diverse boringen uitgevoerd waarbij het aantal afhankelijk is van de omvang van het te onderzoeken traject. Gedurende de boringen worden op vooraf bepaalde diepten grondmonsters gestoken. De gestoken monsters worden in het laboratorium van Wiertsema & Partners op voorgeschreven wijze beproefd. Bij een omvangrijk project is het niet rendabel om alle gestoken grondmonsters te meten. Om effectief de thermische geleidbaarheid (en daarbij horende g-waarde) te bepalen wordt een representatieve monsterselectie gemaakt. De geselecteerde monsters worden volgens de gehanteerde norm ASTM D5334-14 (ASTM International, 2014) in drievoud gemeten. Daarnaast wordt van alle gestoken monsters het veldvochtige en droge volumegewicht bepaald en worden ze beschreven. Tevens worden er een aantal afgeleide karakteristieken van de monsters bepaald, zoals het poriëngetal en de verzadigingsgraad. Na verwerking van de thermische geleidbaarheidsmetingen worden de λ -waarden omgezet naar een g-waarde, ofwel de reciproque van de λ -waarde. Door op zoek te gaan naar de correlatie tussen de gemeten g-waarden en droge dichtheden kunnen de niet-gemeten monsters op basis van de reeds bepaalde droge dichtheid ingeschat worden. Dit wordt gedaan door het kwartsgehalte (ook wel zandgehalte) op basis van het model van Lu (2007) te ‘fitten’ op de monsterselectie. Er wordt gezocht naar het kwartsgehalte waarbij de afwijking van de gemeten g-waarden minimaal is ten opzichte

van de theoretische g-waarde volgens Lu (2007). Over het algemeen is het model van Lu (2007) in staat om de g-waarde op basis van een gevonden relatie met een acceptabele afwijking van ten hoogste 0,1 mK/W. Door gebruik te maken van deze relatie kan op een nauwkeurige, maar tijd- en kostenefficiënte wijze een g-waardenadvies opgesteld worden voor een opdrachtgever.

3 Projectopzet

Om antwoord te kunnen geven op de in hoofdstuk 1 benoemde hoofd- en deelvragen dienen gegevens verzameld te worden ten behoeve van gegevensanalyse. In hoofdstuk 3 is de projectopzet van het onderzoek beschreven. Hierin worden de methodieken en werkwijze van de gegevensverzameling en –analyse nader toegelicht.

3.1 Methodiek en werkwijze

3.1.1 Monsternamen en monsterbeschikbaarheid

In het kader van dit onderzoek is door een drietal bedrijven materiaal beschikbaar gesteld ter analyse. Deze bedrijven bewegen zich allen op de zandwinmarkt en zijn gevestigd op drie verschillende locaties in Nederland. Op deze manier kunnen gedurende het onderzoek de verschillen en/of overeenkomsten tussen materialen uit diverse locaties in Nederland tevens inzichtelijk gemaakt worden. In bijlage 1 is een monsterlijst opgesteld met daarin de beschikbaar gestelde monsters puntsgewijs opgenomen. De monsters zijn op de verschillende locaties in overleg en gezamenlijk met de desbetreffende partij op zorgvuldige wijze genomen. Het drietal bedrijven betreft:

- Vos Zand en Grind te Ellertshaar, Drenthe
- Sanders & Geraedts te Koningsbosch, Limburg
- Van Der Wiel te Nij Beets, Friesland

3.1.2 Bepaling verschil thermische geleidbaarheid van leem- en zandfractie

Om de verschillen in thermische geleidbaarheid, ofwel λ -waarde, te bepalen worden thermische metingen uitgevoerd. Deze thermische metingen zijn uitgevoerd middels de zogeheten naaldmethode. Met de naaldmethode wordt de thermische geleidbaarheid conform ASTM D5334-14 gemeten (ASTM International, 2014). Bij de proef wordt elk monster ten minste drie maal gemeten teneinde de reproduceerbaarheid van de metingen en de variatie van de thermische geleidbaarheid/g-waarde in één monster inzichtelijk te maken.

Om de thermische geleidbaarheid van de monsters te meten worden deze in lagen opgebouwd in een speciaal ontworpen bakje (figuur 2). Het bakje heeft een vaste inhoud (0,5 liter) waarin het monster, met een vooraf bepaalde dichtheid, laag voor laag wordt opgebouwd. De monsters worden op basis van de te beproeven dichtheid gereed gemaakt door een berekende hoeveelheid droog materiaal te mengen met de benodigde hoeveelheid water om een bepaalde verzadigingsgraad te behalen. Om een monster in verzadigde toestand te meten wordt het monster opgebouwd in een bakje met gaatjes aan zowel de boven- als onderzijde. De gaatjes zijn afgedicht door filterpapier. Het monster wordt gedurende langere tijd onder water geplaatst om een verzadigde toestand te verkrijgen. Na de monsterpreparatie en -opbouw wordt met de thermische naald op voorgeschreven wijze (ASTM D5334-14) het minimale aantal van drie metingen verricht. Tijdens deze meting



Figuur 2: Metingen onverzadigd en verzadigd

wordt er door de naald, na een temperatuurstabilisatiefase, een hittepuls afgegeven en de warmteafdracht in het omliggende medium gemeten. Na de metingen wordt de vochtige inhoud van het meetbakje gewogen en nadien gedroogd in een oven om het werkelijke vochtgehalte te bepalen. De ruwe data uit van het meetsysteem wordt ten slotte, gezamenlijk met de karakteristieken van het gemeten medium, geanalyseerd en uitgewerkt.

Teneinde de veranderingen van de warmtegeleiding ten gevolge van een veranderend vochtgehalte in een grondmonster inzichtelijk te maken wordt een monster gemeten in droge toestand, verzadigde toestand en diverse tussenliggende vochtgehalten (5%, 10%, 20%, 50% en 75% verzadigingsgraad). Waar nodig worden aanvullende metingen uitgevoerd. Deze reeks wordt uitgevoerd op één puur zandmonster en een drietal monsters die bij de desbetreffende zandwinners toentertijd als het ‘fijnste materiaal’ aangemerkt werden en een (relatief) hoog leemgehalte bevatten. Na uitwerking worden de uitkomsten geanalyseerd en vergeleken ten opzichte van elkaar en met betrekking tot bestaande literatuur.

3.1.3 Bepaling invloed leem en dichtheid t.o.v. thermische geleidbaarheid

Zoals in hoofdstuk 2 benoemd heeft de dichtheid, samen met het vochtgehalte, de meeste invloed op de thermische geleidbaarheid. Het toevoegen van leem kan ervoor zorgen dat de dichtheid toeneemt, doordat de fijnere delen de poriën tussen de grovere korrels opvullen. Volgens dit principe zou het verstandig zijn om een aanzienlijke hoeveelheid leemfractie toe te voegen om de poriën te vullen. Het verlagen van de porositeit, dan wel het verhogen van de dichtheid en daarmee het contactoppervlak tussen de korrels kan evenzo verkregen worden door een materiaal met meer kracht en druk te verdichten. Dit zou vervolgens eveneens moeten leiden tot een verbetering van de thermische geleidbaarheid.

Daartegenover staat dat op basis van de bestaande theorie, beschreven in hoofdstuk 2, de thermische geleidbaarheid zou kunnen afnemen als het leemgehalte toeneemt. Dit kan toe te schrijven zijn aan het feit dat de kwartsfractie afneemt en het aantal overige mineralen stijgt. De soortelijke geleidbaarheid van de overige mineralen is aanzienlijk lager dan van kwarts, waardoor de overige mineralen een negatieve invloed kunnen hebben op de thermische geleidbaarheid van een mengsel.

Om de invloeden van een wisselend leemgehalte en dichtheidsvariatie in kaart te brengen zijn aan de hand van materialen afkomstig van Sanders & Geraedts meetreeksen voor de thermische geleidbaarheid uitgevoerd. Om te beginnen is een tweetal meetreeksen opgesteld. De materialen van deze meetreeksen bevatten een verschillend leemgehalte. Vervolgens is één van de meetreeksen opnieuw uitgevoerd met eenzelfde materiaal, maar bij een hogere dichtheid om de effecten op de thermische geleidbaarheid te analyseren.

3.1.4 Bepaling optimale korrelverdeling

Eén van de factoren die een aanzienlijke invloed heeft op de g-waarde is de dichtheid van het materiaal. Bij granulaire materialen is een juiste korrelverdeling uiterst van belang, zodat de aanwezige poriën tot een minimum beperkt blijven en de korrels optimaal in elkaar passen. Om de ideale korrelkromme te bepalen wordt gebruik gemaakt van de zogeheten Fuller-relatie en bijbehorende Fuller-kromme, die als volgt luidt:

$$Y = \sqrt{\frac{d}{D}}$$

Waarin: d = maaswijdte van een willekeurige zeef in mm

D = maximale korrelgrootte van de granulaten in mm ($= D_{\max}$)

Y = doorval door de zeef met maaswijdte d (te vermenigvuldigen met 100 om het resultaat in % te verkrijgen), de zeefrest op de zeef is gelijk aan $100-Y$

Diverse materialen worden in het laboratorium van Wiertsema & Partners gezeefd. Het grondmonster wordt eerst in een 'peptisator'-vloeistof voorbereid. Deze vloeistof scheidt de klontjes binnen het monster, waardoor alle deeltjes los van elkaar komen. Vervolgens wordt het mengsel met peptisator uitgespoeld op een $63\text{ }\mu\text{m}$ -zeef met een vastgestelde hoeveelheid gedemineraliseerd water. De overgebleven delen op de $63\text{ }\mu\text{m}$ -zeef worden gedroogd en daarna in een zeeftoestel gedurende een vooraf in te stellen aantal minuten gezeefd middels hoogfrequente trillingen. Naderhand worden de zeefresten gewogen en wordt het aandeel dat alsnog door de $63\text{ }\mu\text{m}$ zeef komt toegevoegd aan het reeds uitgespoelde mengsel. Het overgebleven mengsel met uitsluitend deeltjes kleiner dan $63\text{ }\mu\text{m}$ wordt geprepareerd voor beproeving met een sedigraaf. De sedigraaf detecteert door middel van röntgenstraling de aandelen van de verschillende fijnere fracties (silt- en kleifractie). De resultaten van het zeeftoestel en de sedigraaf worden ten slotte aan elkaar gekoppeld en geven de fractieverdeling in een grondmonster weer.

Op basis van de korrelverdelingen van de afzonderlijk beschikbare materialen kan op theoretische wijze een mengsel geproduceerd worden met een bijbehorende theoretische zeefkromme. Om een optimale korrelverdeling te verkrijgen voor het theoretische backfillmengsel wordt verwacht dat de theoretische zeefkromme van het mengsel het verloop van de Fullerkromme zo dicht mogelijk dient te benaderen. Hoe kleiner de verschillen met de Fullerkromme, hoe 'idealer' de korrelverdeling van het theoretische mengsel. Volgens het principe van een Fullerkromme moet dit leiden tot een hogere dichtheid. Bij het bepalen van een theoretisch mengsel wordt de praktische produceerbaarheid in acht genomen.

3.1.5 Analyse mogelijkheid tot voorspellen thermische geleidbaarheid o.b.v. literatuur

Op basis van de resultaten voortkomend uit de uitgevoerde proeven, zoals beschreven in subhoofdstuk 3.1.1 tot en met 3.1.4, kan bestudeerd worden of de uitkomsten corresponderen met de waarden die gegenereerd worden aan de hand van bestaande modellen. Indien de gemeten en theoretische waarden overeenkomen met een gepaste nauwkeurigheid kan de mogelijkheid om de thermische geleidbaarheid te voorspellen op basis van eenvoudig te verkrijgen factoren onderzocht worden. De gemeten λ -waarden worden vergeleken met de modellen uit hoofdstuk 2 en de prestaties van de modellen wordt geanalyseerd en toegelicht.

4 Resultaten

In het kader van gegevensverzameling is met behulp van de methodieken en werkwijzen uit hoofdstuk 3 een grote hoeveelheid data verzameld door middel van laboratoriumproeven. In hoofdstuk 4 worden de resultaten van de verschillende proeven besproken en worden de uitkomsten geïnterpreteerd en geanalyseerd.

4.1 Verschillen leem- en zandfractie

Om inzicht te krijgen in de verschillen in geleidbaarheid van een puur zandmateriaal en materialen met een groot leemaandeel zijn volgens de methode uit 3.1.2 meetreeksen opgesteld met thermische geleidbaarheidsmetingen. Hierbij zijn de materialen op een bepaalde dichtheid (gebaseerd op een haalbare hoeveelheid droge stof) ingebouwd bij verschillende oplopende vochtgehalten. De dichtheden waarbij de verschillende monsters zijn ingebouwd liggen allen rondom 1600 kg/m^3 , waarbij het verschil tussen laagste en hoogste dichtheid slechts 49 kg/m^3 bedraagt.. Aan de hand van deze meetreeksen van volledig droog naar volledig verzadigd kunnen de onderlinge verschillen gecontroleerd worden, tezamen met een toetsing aan bestaande modellen.

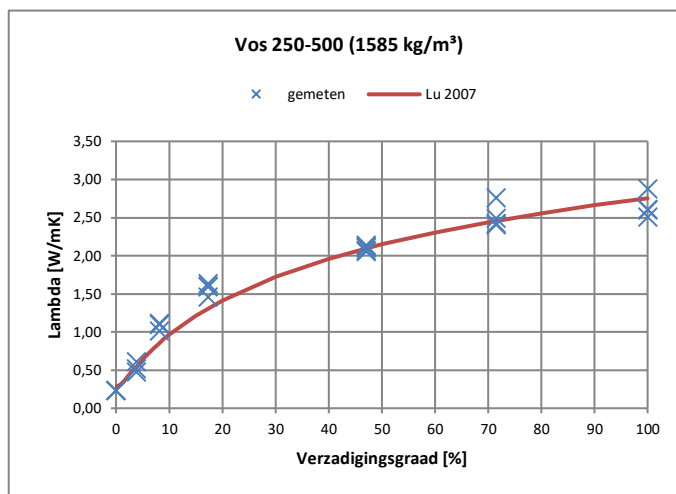
Het inzichtelijk maken van de verschillen in thermische geleidbaarheid van de leem- en zandfractie is gedaan aan de hand van de volgende monsters:

- Vos 250-500 zand (puur zandmonster met 0,4% kleiner dan $63 \mu\text{m}$);
- Vos Spoelzand Remix “zeer fijn” (fijnste mengsel Vos Zand & Grind met een leemgehalte van 34%);
- Sanders & Geraedts leem (fijnste mengsel Sanders & Geraedts met een leemgehalte van 84,7%);
- Van Der Wiel leem (fijnste mengsel afkomstig van locatie Nij Beets met een leemgehalte 45,1%).

De meetreeksen zijn opgesteld door thermische geleidbaarheidsmetingen uit te voeren bij een bepaalde dichtheid en oplopende vochtgehalten. De dichtheden zijn bepaald op basis van de hoeveelheid droge stof die in het meetbakje opgebouwd kan worden. Om het verschil tussen de verschillende monsters te achterhalen is er gemeten bij verzadigingsgraden van 0%, 5%, 10%, 20%, 50%, 75% en 100%. Op die manier wordt duidelijk hoe een puur zandmengsel en sterk leemhoudende mengsels reageren op een verandering in vochtgehalte. De metingen worden vergeleken met de theoretische waarden volgens Lu (2007), omdat dat model momenteel gebruikt wordt bij werkzaamheden binnen Wiertsema & Partners. In 4.4 wordt verder ingegaan op de vergelijking van metingen met overige literatuur. In bijlage 2 is een overzicht bijgevoegd met alle karakteristieken van de gemeten monsters tezamen de meetwaarden.

4.1.1 Vos 250-500 zand

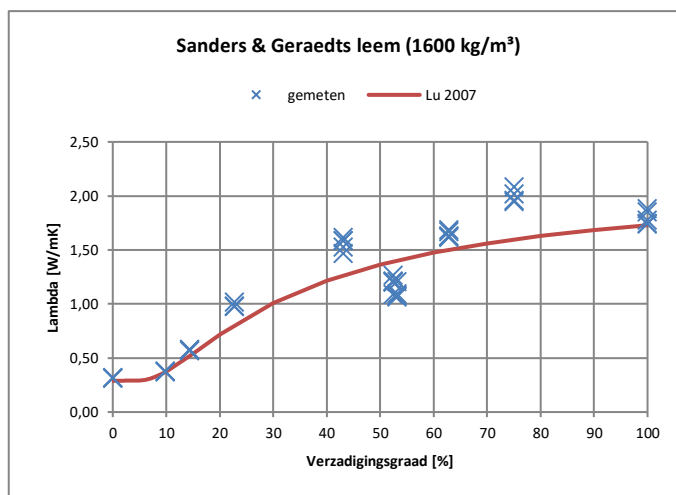
Om de verschillen tussen zand en leem en de invloed van een veranderend vochtgehalte in kaart te brengen voor een puur zandmonster is gebruik gemaakt van Vos 250-500 zand. Het monster is op een gemiddelde dichtheid van 1578 kg/m^3 ingebouwd. De resultaten van de individuele metingen zijn weergegeven in figuur 3. De gemeten waarden laten een paraboolverloop zien die karakteristiek is voor een pure zandgrond gezien de theoretische lijn volgens Lu (2007). Het model van Lu (2007) weet de thermische geleidbaarheid vrij nauwkeurig te voorspellen. Het parabolische verloop laat zien dat in de eerste 30 à 40 procent verzadigingsgraad de thermische geleidbaarheid van het monster gevoelig is voor veranderingen in vochtgehalte, terwijl deze invloed bij een steeds verder groeiende verzadigingsgraad verder afneemt.



Figuur 3: Meetreeks Vos 250-500 zand

4.1.2 Sanders & Geraedts leem

Het monster bestaat uit 64,6% silt en wordt gecomplementeerd door 20,1% kleifracie en 15,3% zandfractie. De meetreeks voor Sanders & Geraedts leem is weergegeven in figuur 4. Door de geringe aanwezigheid van de zandfractie (korrels tussen $63 \mu\text{m}$ tot 2 mm) en een flinke hoeveelheid kleifracie verliep het inbouwen van de monsters bij een verzadigingsgraad vanaf circa 40 à 45 procent moeizaam. In eerste instantie is het monster ingebouwd bij ongeveer 50 en 75 procent, wat tot fikse afwijkingen bij die verzadigingsgraden leidt. Nadien is het monster bij 40 en 60 procent verzadiging voorzichtig ingebouwd, waarbij de inbouwkwaliteit merkbaar hoger was. Wat

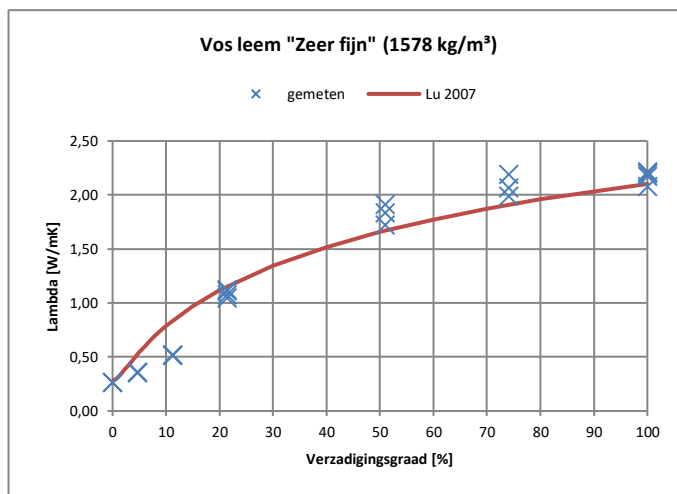


Figuur 4: Meetreeks Sanders & Geraedts leem

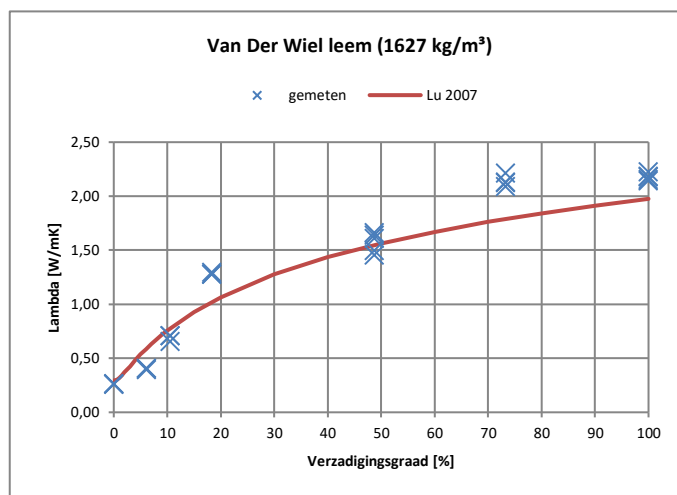
opvalt is dat bij een sterk leemhoudend materiaal het eerste gedeelte van de curve, ook volgens Lu (2007), 'achterblijft' en pas later een stijgend verloop laat zien. Dit is te verklaren door de absorptie van het water door kleimineralen, zoals beschreven in de literatuur. Hierin zit een wezenlijk verschil ten opzichte van de lijn die een pure zandgrond laat zien, aldus getoond in figuur 3. Tevens geleidt leem duidelijk slechter dan zand bij volledige verzadiging, conform de theorie. Het zandmonster laat een λ -waarde van ongeveer $2,75 \text{ W/mK}$ zien in verzadigde toestand, terwijl de λ -waarde bij het leemmonster beduidend minder is met circa $1,75 \text{ W/mK}$.

4.1.3 Vos Spoelzand Remix “Zeet fijn” en Van Der Wiel leem

Bij 4.1.1 en 4.1.2 zijn de resultaten van de twee ‘uitersten’ van de beschikbare monsters getoond en toegelicht. Hieruit is gebleken dat een wezenlijk verschil bestaat tussen het verloop van de thermische geleidbaarheid bij zowel bij de theoretische als gemeten λ -waarden. De monsters ‘Vos Spoelzand Remix “Zeet fijn”’ en ‘Van Der Wiel leem’ vallen op basis van het aandeel van de korrels kleiner dan $63\ \mu\text{m}$ tussen de twee uiterste mengsels in. Voor beide mengsels is wederom een meetreeks voor λ -waarden opgesteld. De meetreeksen van ‘Vos leem “Zeet fijn”’ en ‘Van Der Wiel leem’ zijn weergegeven in respectievelijk figuur 5 en 6. In beide figuren valt op dat de meetwaarden niet het karakteristieke zuivere paraboolverloop hebben zoals bij een puur zandmonster. In het droge deel tot circa 10 à 15% verzadigingsgraad blijft het verloop van de thermische geleidbaarheid wat achter en heeft het toenemende vochtgehalte beperkt invloed. Deze ‘terughoudendheid’ is echter niet zo groot als bij het monster ‘Sanders & Geraedts leem’. Opmerkelijk is dat de theoretische thermische geleidbaarheid volgens Lu (2007) enkel een minimale tot bijna geen knik laat zien. In dit gebied overschat het theoretische model de thermische geleidbaarheid van de monsters. Verder valt op dat bij ‘Van Der Wiel’ leem de gemeten λ -waarde bij 18%, 73% en 100% stevig hoger liggen dan theoretisch wordt berekend.



Figuur 5: Meetreeks Vos leem "Zeet fijn"



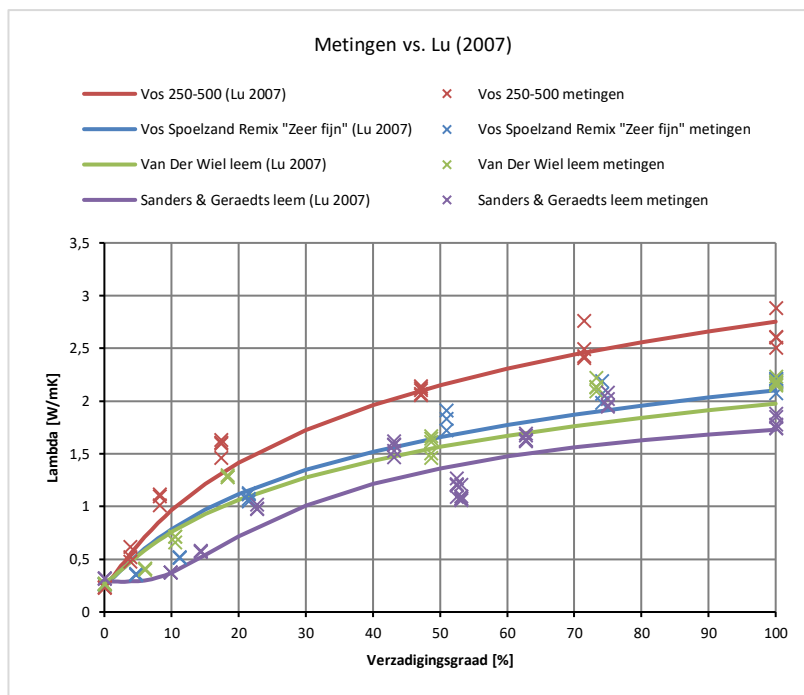
Figuur 6: Meetreeks Van Der Wiel leem

Opmerkelijk is ook dat het achterblijven van de meetwaarden bij ‘Van Der Wiel’ leem minder is dan bij ‘Vos Spoelzand Remix “Zeet fijn”’, terwijl dit monster beschikt over een groter aandeel $< 63\ \mu\text{m}$ dan Vos leem “Zeet fijn”. Daartegenover staat dat het aandeel kleimineralen in het leemmonster van Vos, ondanks het lagere leemgehalte, hoger is. Dit verklaart het achterblijven van de λ -waarde bij lage vochtgehalten (als gevolg van het sterke waterbindend vermogen van klei).

4.1.4 Interpretatie van data

In figuur 7 zijn individuele meetresultaten van de vier absolute meetreeksen met het theoretische verloop volgens Lu 2007 weergegeven, zodat de verschillen tussen de vier materialen inzichtelijk zijn. Met behulp van figuur 7 is te concluderen dat de absolute λ -waarde van een pure zandgrond (Vos 250-500) hoger ligt dan van een sterk leemhoudend mengsel (Sanders & Geraedts leem). De andere twee mengsels plotten tussen de ‘grensgevallen’ in.

Zoals beschreven bij 4.1.3 valt op dat bij 'Van Der Wiel leem' en 'Vos Spoelzand Remix "Zeer fijn"' de theoretische lijn volgens Lu (2007) meer neigt naar de zandcurve, terwijl de meetresultaten duidelijk het verloop van een leemhoudend mengsel volgen. Daardoor overschat het theoretische model de thermische geleidbaarheid van deze mengsels. Uit de vier meetreeksen is tevens op te maken dat hoe meer leem het mengsel bevat, hoe minder effect het water heeft in de lagere verzadigingsgraden. Dit is toe te schrijven aan het feit dat fijnere mengsels een groter korreloppervlak bevatten, waardoor er meer water benodigd is voor de vorming van zogeheten waterbruggen tussen de korrels onderling, en door waterabsorptie door kleimineralen.



Figuur 7: Individuele metingen vs. Lu (2007)

Door dit viertal meetreeksen is duidelijk dat het 'speelveld' van de thermische geleidbaarheid van grond afgebakend wordt door een 'zandcurve' en een 'leemcurve' en dat de 'mengselcurves' daartussen plotten. Tevens is te concluderen dat de mate van het vochtgehalte met name van belang is in het traject van droog tot een verzadigingsgraad van ongeveer 40%. Dit uiteraard in combinatie met de samenstelling van de grond. Waar een oplopend vochtgehalte bij een overwegend zandmonster direct effect heeft, zal het effect bij een hoger leemgehalte in het begintraject geringer zijn. Aangezien backfillzand een zandmengsel is met een bepaald leemgehalte zal er rekening gehouden moeten worden met dit effect.

4.2 Invloed leem en dichtheid t.o.v. thermische geleidbaarheid

In navolging van de meetreeksen in hoofdstuk 4.1 is er een drietal vergelijkbare meetreeksen opgesteld met materialen van Sanders & Geraedts om de invloeden van zowel leemverandering als dichtheidsvariatie inzichtelijk te maken. Mengsels van Sanders & Geraedts bestaan eenvoudig gezien uit een sterk leemhoudend materiaal dat gemengd wordt met een grover zand met een bijmenging van grind. Door de relatief simpele wijze van mengen met een tweetal componenten kan eenvoudig bestudeerd worden wat de invloeden zijn van een verandering in leemgehalte of dichtheid. De meetreeksen zijn opgesteld voor de volgende mengsels:

- S&G Koningsbosch NR100 (leemgehalte van 18,5%)
- S&G Koningsbosch NR104 (leemgehalte van 29,7%)
- S&G Koningsbosch NR100 98% MPD (leemgehalte van 18,5%, ingebouwd op 98% MPD)

Alvorens de monsters zijn ingebouwd voor de thermische meetreeksen, zijn ze beproefd middels de Proctorproef. Na uitvoeren van de Proctorproeven voor zowel monster NR100 als NR104 is de MPD bepaald op respectievelijk 1992 en 1996 kg/m³. Voor de bepaling van invloed van een verschillend leemgehalte zijn de monsters NR100 en

NR104 ingebouwd op basis van een haalbare hoeveelheid droge stof door ‘gemiddeld te verdichten’. Voor monster NR100 houdt dit 1806 kg/m^3 in en voor NR104 is 1765 kg/m^3 , wat een verschil is van slechts 41 kg/m^3 . Voor beide monsters is wederom een meetreeks met oplopende vochtgehalten opgesteld. Hierbij is gekozen om de nadruk te leggen in de lagere verzadigingsgraden, aangezien de effecten van het water in dat gebied groter zijn dan richting de verzadigde toestand. Voor deze reeks is gekozen verzadigingsgraden van 0, 5, 10, 20, 40 en 100%. Tevens zijn de meetreeksen ‘in duplo’ uitgevoerd om het effect van verschillende meetvermogens in kaart te brengen.

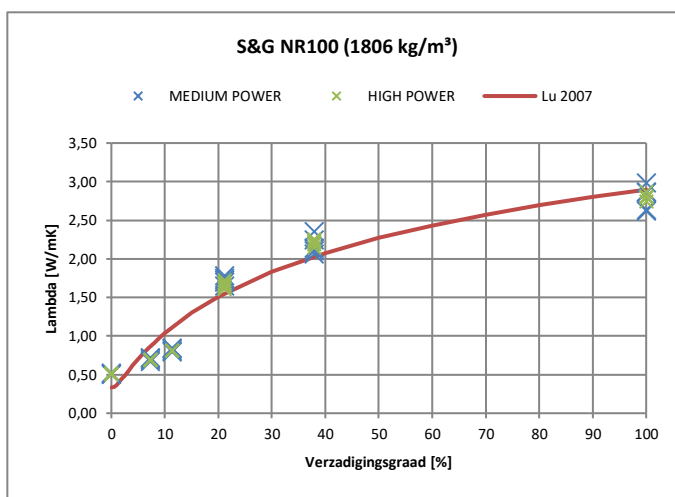
4.2.1 Invloed verschillend leemgehalte

Eerst wordt het verschil in leemgehalte tussen de monsters NR100 en NR104 beschouwd. Monster S&G Koningsbosch NR100 bevat een leemgehalte van 18,5% en S&G NR104 ligt met ruim 10% hoger op 29,7%. Beide mengsels zijn aangevuld met het bij Sanders & Geraedts gebruikelijke ‘Groevezand’. Hierdoor zijn overige toevallige invloeden op de thermische geleidbaarheid tot een minimum beperkt.

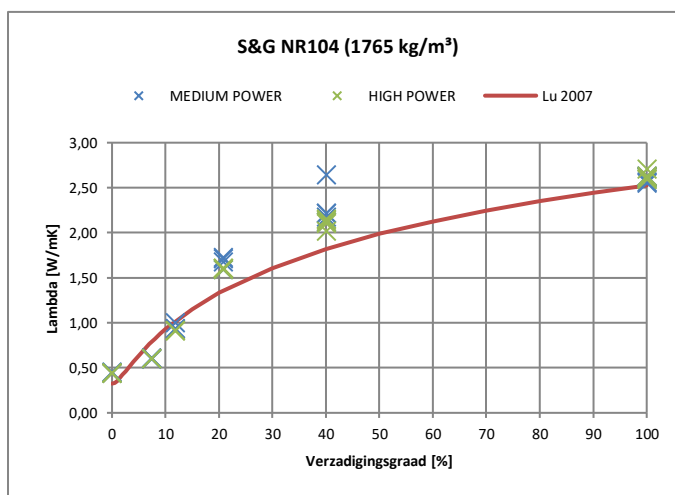
In figuur 8 en 9 zijn de resultaten van de meetreeksen voor NR100 en NR104 weergegeven. Hierin zijn de individuele metingen tezamen met de theoretische waarden volgens Lu (2007) gepresenteerd. De effecten op de metingen ten gevolge van het meten met een hoger vermogen worden later apart behandeld in 4.2.4.

Ondanks dat monster NR100 relatief weinig leem bevat (18,5%), vergeleken met het monster van ‘Sanders & Geraedts leem’ laten de metingen een terughoudendheid zien tot ongeveer 20 procent verzadigingsgraad. In dit traject laat de meetreeks een ander verloop zien dan de theoretische waarden volgens Lu (2007) en op vergelijkbare wijze als bij de materialen in 4.1.3. Vanaf 20% lijkt de meetreeks het theoretische verloop te volgen waarbij de theorie de λ -waarde enigszins onderschat. De terughoudendheid in het beginstadium van de meetreeks is interessant, omdat backfillzanden zich vaak bevinden in die range van verzadigingsgraden. De ‘terughoudendheid’ in effect door het vochtgehalte in leemgronden heeft dus zeker een effect in backfillmengsels.

In figuur 9 is de meetreeks van S&G NR104 weergegeven. Ook dit monster laat een



Figuur 8: Meetreeks S&G NR100

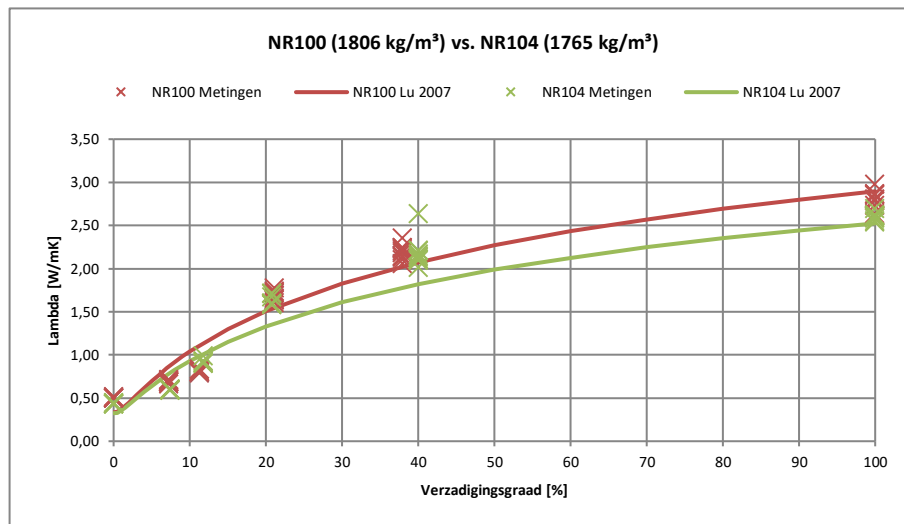


Figuur 9: Meetreeks S&G NR104

terughoudendheid zien in de eerste 15 à 20 procent. Vervolgens ‘schiet’ de meetreeks door de theoretische lijn van Lu (2007) heen en vlakt ten slotte af richting een verzadigde λ -waarde van ongeveer $2,50 \text{ W/mK}$. Net als bij

monster NR100 verschilt het verloop van de meetreeks met de theoretische lijn. Het terughoudende deel in de eerste procenten van verzadiging is een terugkerend fenomeen en is dus een belangrijk gegeven in het kader van de productie van backfillzanden.

Door de meetreeksen van beide mengsels in één afbeelding te plotten zijn de verschillen beter zichtbaar. In figuur 10 zijn de individuele metingen van beide mengsels getoond, waarbij geen onderscheid meer is gemaakt tussen metingen met gemiddeld en hoog vermogen. Vergelijken met de theorie uit Lu (2007) wordt voor beide mengsels de λ -waarde licht overschat, terwijl vanaf

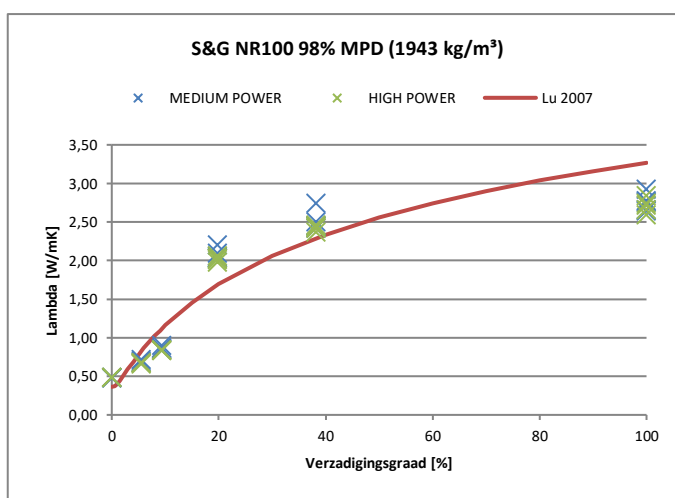


Figuur 10: Vergelijking NR100 en NR104

ongeveer 20% de thermische geleidbaarheid onderschat wordt door de theorie. Met name de metingen van monster NR104 bij 11,8% en 20,8% verzadigingsgraad liggen een stuk hoger dan de theoretische lijn volgens Lu (2007). Tevens is er één grote 'outlier' te zien bij de meting bij 40,1% verzadigingsgraad ten opzichte van de overige metingen bij dezelfde verzadigingsgraad. De relatief grote verschillen met de theorie zouden mogelijk te maken kunnen hebben met de inbouw van het monster. Door het monster meermaals in te bouwen kunnen toevallige fouten voorkomen worden. Kijkend naar de verzadigde metingen laat NR104 duidelijk minder hoge λ -waarden zien. Dit is toe te schrijven aan het hogere leemgehalte en dus een grotere hoeveelheid overige mineralen, die een lagere soortelijke geleidbaarheid hebben dan kwartskorrels.

4.2.2 Invloed verschillende dichtheid

Naast de samenstelling (kwartsgehalte en overige mineralen) en het vochtgehalte in een monster is ook de dichtheid van het monster een bepalende factor voor de thermische geleidbaarheid van een monster. Om het effect van een hogere dichtheid inzichtelijk te maken is aan de hand van monster S&G NR100 een meetreeks opgesteld bij verschillende verzadigingsgraden. Middels een vijf punts Proctorproef is de MPD van monster NR100 vastgesteld op 1992 kg/m³. Het monster NR100 uit hoofdstuk 4.2.1 is ingebouwd en beproefd bij een dichtheid van 1806 kg/m³ en komt neer op ongeveer 90,7% van de MPD. Om de vergelijking te maken met een andere dichtheid

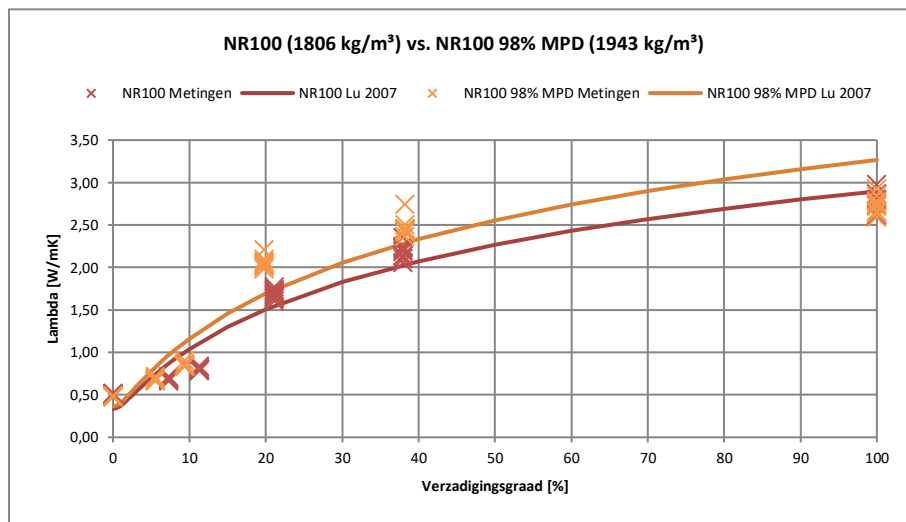


Figuur 11: Meetreeks S&G NR100 98% MPD

is eenzelfde meetreeks gemaakt waarbij een dichtheid van 98% van de MPD, oftewel 1952 kg/m^3 , gepoogd is te behalen. Na terugwegen van de vochtige monsters is gebleken dat een gemiddelde dichtheid van 1943 kg/m^3 is behaald met slechts een beperkte spreiding.

Figuur 11 geeft de resultaten van de individuele metingen weer van het monster 'NR100 98% MPD', tezamen met de theoretische lijn volgens Lu (2007). Wederom is het terughoudende verloop in de metingen tot circa 10 à 15% te zien. Dit verloop komt eveneens niet overeen met de theoretische lijn volgens Lu (2007). Dit fenomeen komt ook bij de voorgaande mengsels naar voren. Verder laten de metingen bij 19,8% verzadigingsgraad een forse overschrijding zien en onderschat het Lu-model uit 2007 de thermische geleidbaarheid op basis van deze meetreeks behoorlijk. Dit kan voortkomen uit toevallige fouten of een mogelijke afwijkende inbouw ten opzichte van de theorie en kan gecontroleerd worden door het monster meermaals in te bouwen. De metingen bij 38,2% verzadigingsgraad hebben een geringe afwijking op één outlier na. Ten slotte valt op dat de verzadigde metingen voor het 98% MPD-monster een stuk lager gemeten zijn ten opzichte van de theorie. In de voorgaande meetreeks is gebleken dat de verzadigde meting in veel gevallen vrij accuraat gemeten worden ten opzichte van de theorie van Lu (2007). Deze grote afwijking trekt daarom de aandacht en zou, net als met de meting bij 38,2% verzadigingsgraad, opnieuw ingebouwd kunnen worden ter controle en het uitsluiten van toevallige fouten.

Figuur 12 laat de reeksen van de monsters NR100 en NR100 98% MPD zien. Hierin is duidelijk te zien dat de λ -waarde voor monster NR100 dat met een hogere dichtheid is gemeten sneller oploopt dan het reguliere NR100-monster. De waarden voor de 98%-reeks vallen hoger uit en dat is toe te schrijven aan het feit dat er bij een hogere dichtheid meer contactoppervlakken zijn tussen de korrels. Een



Figuur 12: Vergelijking NR100 en NR100 98% MPD

opvallende zaak is dat de verzadigde meting van beide monsters op ongeveer hetzelfde punt uitkomt. Volgens de theorie wordt verwacht dat ook de verzadigde meting hoger uit zou moeten komen bij een hogere dichtheid. Door de verzadigde meting meermaals uit te voeren kan de mogelijkheid tot toevallige fouten gecontroleerd worden. Een andere mogelijkheid is dat het niet 98% MPD-monster niet volledig verzadigd is geraakt en is evenzo te controleren door meermaals de proef uit te voeren.

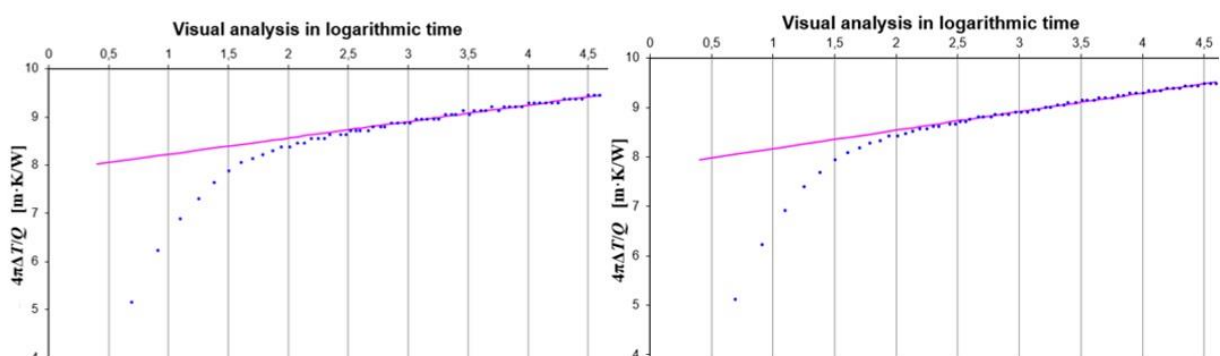
4.2.3 Verschillen metingen gemiddeld en hoog vermogen

Gedurende het onderzoek ontstond het vermoeden dat de thermische metingen in goed geleidende materialen (bijv. zand) een minder accurate waarde produceerden bij het gebruik van een gemiddeld vermogen. De reden daarvoor is de verwachting dat in goed geleidende materialen de warmtepuls van de naald 'te snel' in het monster verdwijnt. Door het snelle wegtrekken van de warmte in het monster worden in het latere stadium van de meting zeer weinig warmteverschillen waargenomen waardoor de meting 'stagneert'. Om dit vermoeden te controleren

zijn de metingen behorend bij hoofdstuk 4.2 in duplo gemeten, zowel bij gemiddeld vermogen als bij hoog vermogen. In figuur 13 zijn twee metingen verwerkt van het volledig verzadigde monster van ‘NR100 98% MPD’, waarbij de ruwe datapunten op een logaritmische tijdschaal zijn weergegeven. Daarin geeft de linker grafiek de meting bij gemiddeld vermogen (circa 2,49 W/m) weer en de rechter grafiek toont de uitkomst bij een meting met hoog vermogen (circa 4,23 W/m). De blauwe punten zijn de individuele meetpunten die om de halve seconde zijn bepaald door het meetsysteem. Hoe nauwkeuriger de punten op de roze lineaire trendlijn liggen, hoe accurater de bepaling van de thermische geleidbaarheid. De thermische geleidbaarheid en g-waarde worden bepaald door de richtingscoëfficiënt van de roze raaklijn. In de linker grafiek is te zien dat de blauwe meetpunten op een bepaald moment met 4 à 5 meetpunten op een horizontale lijn liggen. Doordat de warmtepuls van de meting bij een goed geleidend materiaal snel in het monster verdwijnt vinden in het latere deel van de meting weinig wisselingen in temperatuur plaats. Dit verklaart de waarneming van diverse horizontale delen in het verloop van de meetpunten. Echter, is de uiteindelijke λ -waarde en g-waarde sterk afhankelijk van het gekozen tijdsinterval van de metingen. De kans is daardoor sterk aanwezig dat er een interval wordt gekozen waarbij afwijkende punten net wél of net níet binnen het gekozen interval liggen, waardoor de uitkomsten minder nauwkeurig zijn.

De rechter grafiek bevat een meting met een hoger vermogen. Dat betekent dat er meer warmte afgegeven wordt door de naald. Hierdoor duurt het langer voordat alle warmte in het monster is doorgedrongen, waardoor er ook in het latere stadium temperatuurverschillen te meten zijn. Dit resulteert in een nauwkeurigere thermische geleidbaarheidsmeting. Dit is terug te zien in het feit dat er in de rechter grafiek minder ‘horizontale puntenreeksen’ te zien zijn. De afwijkingen van de meetpunten ten opzichte van de roze lineaire trendlijn zijn kleiner en maakt de meting betrouwbaarder.

Daartegenover staat wel dat per monster ingeschat moet worden of het meten met een hoger vermogen invloed heeft op de samenstelling van het monster. Een hoger vermogen leidt tot meer warmte en dat zou mogelijk uitdroging van het monstermateriaal rondom de naald kunnen veroorzaken. Een droger monster leidt daaropvolgend tot een lagere thermische geleidbaarheid door de kleinere hoeveelheid water in het monster. In de beproefde monsters binnen in dit onderzoek is er geen noemenswaardig effect ondervonden ten gevolge van meten met een hoger vermogen. De absolute temperatuur van de monsters gedroeg zich op eenzelfde manier als bij de metingen met gemiddeld vermogen. Daarnaast is er ook geen aflopende trend te zien in de uitkomsten van de thermische geleidbaarheidsmetingen ten gevolge van uitdroging van het monster. In het kader van backfillzanden is met inachtneming van de nauwkeurigheid van de metingen het meten met een hoger vermogen te overwegen. Het gebruik van een hoger vermogen bij bijvoorbeeld klei- en veengronden dient nader onderzocht te worden.



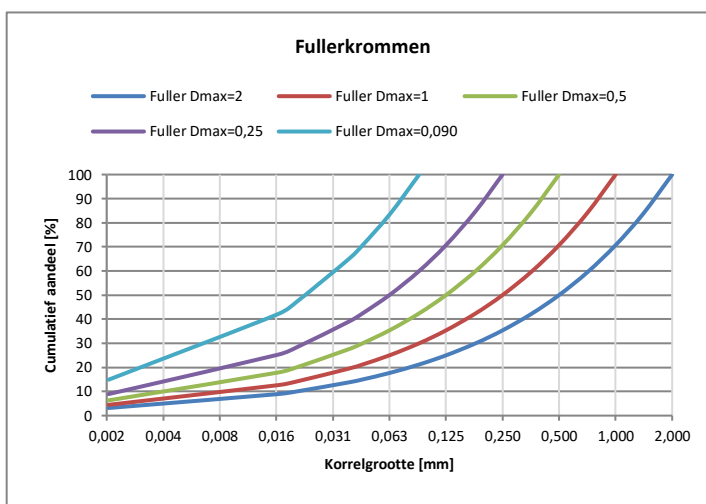
Figuur 13: Metingen gemiddeld vermogen (links) en hoog vermogen (rechts)

4.3 Optimale korrelverdeling

4.3.1 Fullerkromme

Zoals eerder benoemd is de dichtheid een bepalende factor voor de thermische geleidbaarheid van gronden. Een hogere dichtheid zorgt voor meer contactoppervlak tussen de korrels en dus een positief effect op de thermische geleidbaarheid. Het is daarom van belang dat de korrels van een backfillmengsel zo perfect mogelijk in elkaar passen. In de betontechnologie wordt voor de dichtheid gebruik gemaakt van de Fuller-relatie. Deze beschreven is in hoofdstuk 3.1.4. Volgens die relatie wordt het poriënvolume gereduceerd tot minimaal op basis van een maximale korrelgrootte in een mengsel. De verwachting is dat bij een benadering van een Fullerkromme de dichtheid van mengsel te maximaliseren is.

In figuur 14 zijn de Fullerkrommen bij maximale korrelgroottes van 2, 1, 0,5, 0,25 en 0,090 millimeter weergegeven. Het is van belang een Fullerkromme aan te houden die de eigenschappen van een backfillzand kunnen volgen. Op manier is geprobeerd een mengsel te creëren met een hoge dichtheid aan de hand van materialen van Vos Zand & Grind. Door gebruik van een gedetailleerd classificeersysteem zijn vele fracties los beschikbaar en kan er ook mee gemengd worden. Ten eerste dient er onderzocht te worden in welke verhoudingen de verschillende fracties beschikbaar zijn.



Figuur 14: Fullerkrommen bij diverse maximale korrelgroottes

4.3.2 Beschikbare componenten Vos Zand & Grind

Na gesprekken met Vos Zand & Grind is aangegeven dat het huidige fijne product “Vos Spoelzand Remix “Zeer fijn” niet het maximale is dat men kan verkrijgen. Na het gesprek is gewerkt aan een nog fijner product dat op structurele schaal te winnen is. Dit is verkregen door de fijne delen in het water van het spoelzanddepot meer kans te geven om te sedimenteren. Dit mengsel is “Vos Spoelzand Remix nieuw” genoemd en bevat volgens de zeving bij Wiertsema & Partners een fractieaandeel van 63,1% kleiner dan 63 μm . In het kader van het produceren van een mengsel zijn van Vos Zand & Grind de volgende fracties gezeefd en in kaart gebracht, waarbij de uitkomsten zijn opgenomen in bijlage 3:

1	Vos Spoelzand Remix nieuw	6	Vos 0-250 zand
2	Vos fijnzand depot begin	7	Vos 250-500 zand
3	Vos fijnzand depot midden	8	Vos 500-1000 zand (o.b.v. zeving Vos)
4	Vos fijnzand depot eind	9	Vos 0-2 zand (o.b.v. zeving Vos)
5	Scheprad zand	10	Vos 1-6 (o.b.v. zeving Vos)

Tabel 3: Materialen Vos Zand & Grind

De materialen 2 t/m 7 zijn bij zowel Vos Zand & Grind op locatie als bij Wiertsema & Partners gezeefd. Dit is gedaan omdat bij Vos Zand & Grind de fracties kleiner dan 63 μm niet gemeten worden in verband het niet voorhanden zijn van een sedigraaf. In het kader van het mengproces is het van belang om de verdeling van de fijnere fracties van de materialen 2 t/m 7 inzichtelijk te maken. Uiteindelijk is gebleken dat het aandeel van de

fijnere fracties ($< 63 \mu\text{m}$) hoger ligt bij de zeefproef bij Wiertsema & Partners. Dit is toe te schrijven aan het gebruik van een ‘peptisator’ voorafgaand aan het zeven bij Wiertsema & Partners. Het ‘losweken’ van de klontjes heeft zeker invloed op de uitkomsten van een zeefreeks. Het aandeel van de fijne fracties in de monsters stijgt over het algemeen altijd door het niet aanwezig zijn van de klontjes. Hierbij dient rekening te worden gehouden met eventuele afwijkingen binnen een monster. Doordat er ongeveer 100 gram monster gebruikt wordt voor een zeefprocedure is het van belang een gehomogeniseerd monster aan te bieden. Met dit inzicht is het, zeker bij materialen met veel fijne fractie, aan te raden om een zeefprocedure mét ‘peptisator’ uit te voeren.

4.3.3 Theoretisch mengproces

Aan de hand van de korrelverdelingen van de materialen in tabel 3 (zie bijlage 3) kan op theoretische wijze een mengsel opgesteld worden. Door bepaalde percentages van de afzonderlijke materialen uit tabel 3 te mengen tot een theoretisch mengsel is te berekenen wat de aandelen van de verschillen fracties in het mengsel zullen zijn. Om op eenvoudige wijze te mengen is een mengpaneel opgesteld met daarin alle afzonderlijke materialen opgenomen (bijlage 4). Zo kan er bijvoorbeeld 50% van materiaal ‘A’ en 50% van materiaal ‘B’ toegevoegd worden en wordt berekend wat de theoretische afzonderlijke fractieaandelen zullen zijn. De theoretische korrelverdeling kan vervolgens vergeleken worden met het verloop van een Fullerkromme en, zo nodig, gefinetuned worden. In het kader van het produceren van een theoretisch mengsel is rekening gehouden met de praktische uitvoerbaarheid van de productie en daarom geprobeerd zo min mogelijk verschillende materialen te gebruiken en het slechts te houden bij 2 à 3 inputmaterialen.

Voorafgaand aan een bespreking met Vos Zand & Grind omtrent de eerste resultaten, zijn drie mengmonsters opgesteld (MM1 t/m MM3) aan de hand van ‘Vos Spoelzand depot Remix eind’ en Vos 0-2 zand. Na het uitvoeren van Proctorproeven in verhoudingen van 30:70, 40:60 en 50:50 bleek uit de controlekorrelverdeling dat het aanwezige leemgehalte vele malen lager was dan op basis van de theoretische bepaling. Hierdoor is ervoor gekozen om het monster ‘Vos Spoelzand depot Remix eind’ ter controle nogmaals tweemaal te zeven. Het werkelijke percentage van het aandeel van deeltjes kleiner dan $63 \mu\text{m}$ bleek rond de 22% zijn en dus niet 57,3%. Dit verklaarde waarom de mengmonsters MM1 t/m MM3 niet naar verwachting presteerden. De uitkomsten van MM1, MM2 en MM3 zijn wel meegenomen in 4.3.6, maar zullen verder niet behandeld worden.

4.3.4 Uitkomsten mengproces MM4

Op aangeven van Vos Zand & Grind werd duidelijk dat op structurele basis veel fijner materiaal te verkrijgen is door het fijne materiaal meer tijd te geven om te bezinken. Het nieuwe uitgangspunt waarmee gewerkt wordt, is “Vos Spoelzand Remix nieuw”. Dit materiaal is sterk leemhoudend (63,1% fractieaandeel kleiner dan $63 \mu\text{m}$) en daarmee kan het leemgehalte in een mengsel relatief eenvoudig opgevoerd worden. Daaropvolgend zijn de mengmonsters MM4 en MM5 opgesteld.

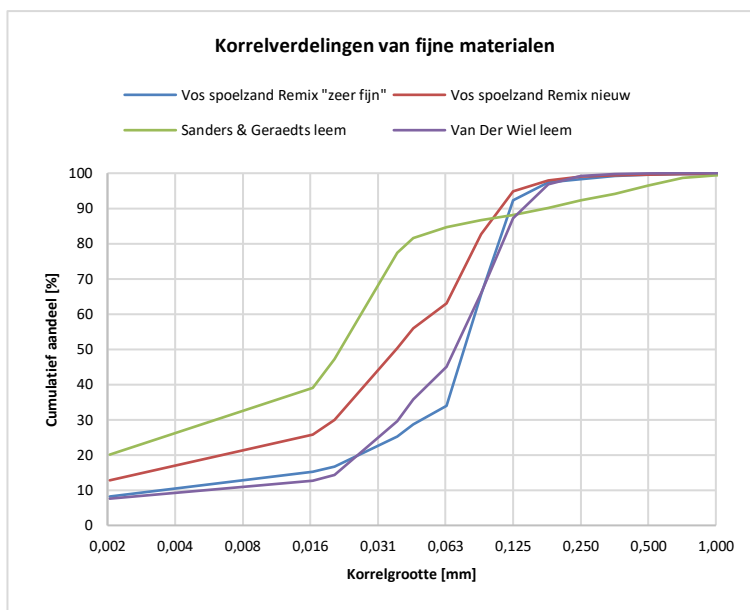
Na het uitproberen van verschillende mengselverhoudingen is gebleken dat het theoretische mengsel met 40% “Vos Spoelzand Remix nieuw” en 60% Vos 0-2 zand een goede fit heeft met een Fullerkromme. De lichtblauwe lijn in figuur 16 geeft de theoretische korrelverdeling van MM4 weer op basis van een mengverhouding van 40:60. Op basis van het theoretische mengsel zou het leemgehalte 25,3% moeten bedragen. De aanzet van de theoretische MM4-curve loopt in het beginstadium licht onder de Fullerkromme van $D_{\text{max}} = 1$, waarna de theoretische curve aansluit op diezelfde Fullerkromme en terecht komt op een cumulatieve waarde van 25,3% op de $63 \mu\text{m}$ -grens.

Het fenomeen dat de kromme in de siltfractie (2-63 μm) eerst geleidelijk stijgt en vervolgens ‘omhoog schiet’ is op basis van eerdere ervaringen bekend. Dit is hiernaast te zien in figuur 15, waarin de korrelverdelingen van een viertal fijne materialen zijn geplot. Hier stijgt het cumulatieve aandeel van het materiaal geleidelijk tot ongeveer 0,020 mm en schiet daarna omhoog. Dit fenomeen treedt onafhankelijk van de locatie in Nederland op en verklaart het verloop van de theoretische korrelverdeling in de fijnere fracties van MM4 (figuur 16).

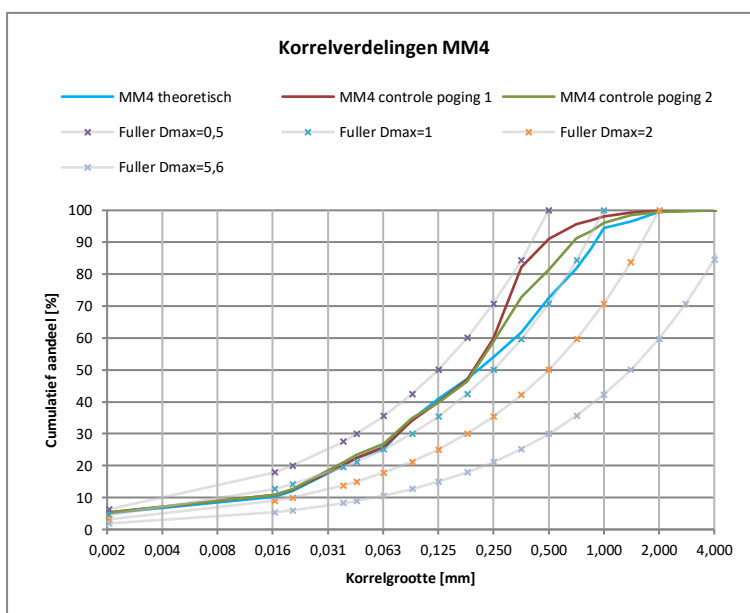
De theoretische korrelverdeling van MM4 volgt vanaf de 63 μm -grens het verloop van de Fuller-kromme van $D_{\text{max}} = 1$ vrij nauwkeurig. De MM4-lijn buigt ten slotte af vanaf een korrelgrootte van 1 mm. Er is dus op productieschaal een mengsel te produceren die het verloop van een Fuller-kromme benadert. Er zijn in totaal twee Proctorproeven uitgevoerd op monsters volgens het ‘MM4-recept’ om de dichtheid te bepalen. Bij beide proeven is een controlezeving gedaan om de samenstelling van het monster te controleren.

De uitkomst van de eerste Proctorproef op mengmonster MM4 gaf als uitkomst een MPD van 1862 kg/m^3 . Uit de controlezeving bleek het aandeel van materiaal kleiner dan 63 μm met 0,6% hoger te liggen dan de theoretische waarde, te weten 25,9%. De donkerrode lijn in figuur 16 toont de bijbehorende korrelverdeling. Deze lijn laat een accuraat verloop zien ten opzichte van de theoretische MM4-lijn, maar vanaf ongeveer de korrelgrootte van 0,2 mm stijgt de kromme zeer sterk. Kijkend naar het theoretische mengsel heeft MM4 ‘poging 1’ een fors overschot van korrels in de fractie tussen circa 0,2 en 1 mm. Door de relatief grote afwijking ten opzichte van de theoretische kromme is besloten om de Proctorproef nogmaals uit te voeren voor MM4.

Voor de tweede Proctorproef op MM4 is een grotere hoeveelheid van mengmonster samengesteld. De controlezeving is in figuur 16 getoond middels de groene lijn. De korrelverdeling van MM4 ‘poging 2’ verloopt wederom vrijwel identiek aan de theoretische MM4-lijn en de lijn van poging 1. Op praktisch hetzelfde punt stijgt



Figuur 15: Korrelverdeling van fijne materialen



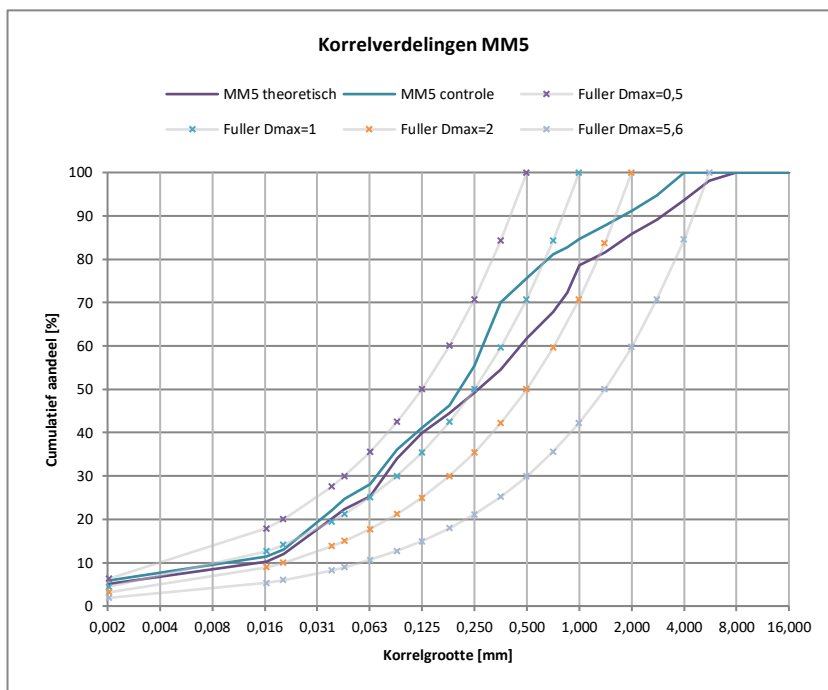
Figuur 16: Korrelverdelingen MM4

de korrelverdelingskromme van MM4 'poging 2' omhoog. Echter, zwakt de stijging af en is de afwijking in de fractie tussen circa 0,2 en 1 mm veel minder bij poging 2. De uitkomst van de tweede Proctorproef op MM4 is 1894 kg/m^3 bij een leemgehalte van 26,8%. Hieruit is te concluderen dat hoe beter de korrelverdeling het verloop van een Fuller-kromme benadert, hoe hoger de dichtheid.

4.3.5 Uitkomsten mengproces MM5

Het monster MM4 bestaat uit een samenvoeging van een fijn uitgangsmateriaal met Vos 0-2 zand. De grootste korreldiameter die voorkomt in het mengsel is 2 mm. Gelet op de ervaring met backfillmengsels afkomstig van Sanders & Geraedts, die in de sector bekend staan als 'hoogwaardig backfill zand', bevatten ze altijd grovere delen tot in de grindfractie aan toe. Dit doet vermoeden dat het toevoegen van grovere delen een positief effect zou moeten hebben op de dichtheid. Om dit te beproeven is de samenstelling van MM4 aangepast naar een 40:40:20 verhouding waarbij het aandeel Vos 0-2 zand is teruggebracht tot 40% en aangevuld met 20% Vos 1-6. Dit materiaal bevat korrels in de grootte 1 mm tot 6 mm. Het mengsel is benoemd tot MM5.

Op het mengsel van MM5 is ook een Proctorproef met controlezeving uitgevoerd. De paarse lijn in figuur 17 geeft de theoretische korrelverdeling van MM5 weer en de blauwe lijn toont de controlezeefreeksen. Het blijkt wederom dat tot een korrelgrootte van circa 0,2 mm het mengsel redelijkerwijs volgens de theorie te produceren is. Daarboven loopt de controlelijn steiler omhoog dan de theoretische lijn. Ten opzichte van de Fuller-krommen lijkt de samenstelling van MM5 verre van ideaal. Dit komt dan ook terug in het feit dat de Proctorproef voor MM5 uitkomt op slechts 1648 kg/m^3 met een leemgehalte van



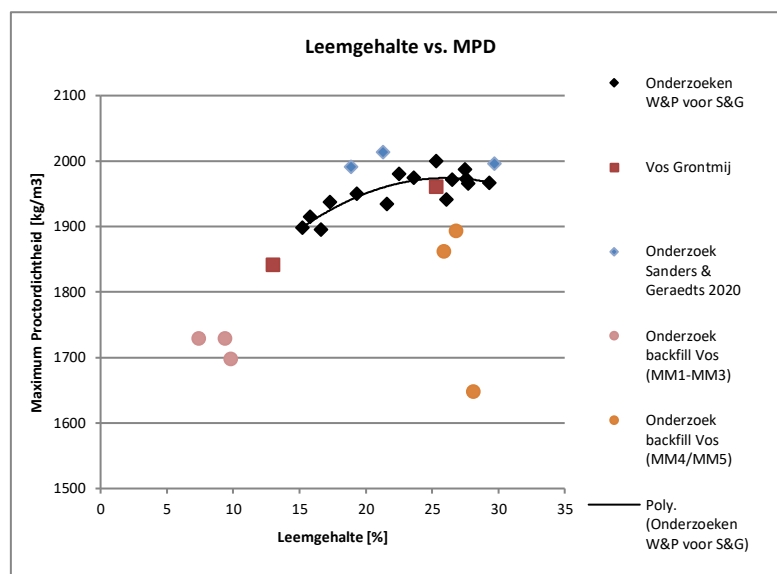
Figuur 17: Korrelverdelingen MM5

28,1%. Dit is toe te schrijven aan het feit dat het Vos 1-6-materiaal met name veel korrels bevat bovenin de fractie tussen 1 en 6 mm. Dit verklaart het 'slechte' verloop van de korrelverdelingskromme.

4.3.6 Leemgehalte vs. dichtheid

Gedurende het onderzoek zijn er diverse Proctorproeven uitgevoerd met verschillende backfillmaterialen. Het leemgehalte in backfillmateriaal vult de holle ruimtes tussen de grovere korrels op. Het vermoeden was dat er een mogelijk 'optimaal leemgehalte' bestaat. Te veel fijne delen zorgt er namelijk weer voor dat ze de grovere korrels 'in de weg zitten'. Om te bekijken of er een verband is tussen het leemgehalte in een mengsel en de droge dichtheid zijn MPD's uitgezet tegen het bepaalde leemgehalte van diverse Proctorproeven. Figuur 18 is hiervan het resultaat. Alle punten in figuur 18 zijn verkregen als resultaat van Proctorproeven. Alle datapunten betreffen allen mengsels van Vos Zand & Grind en Sanders & Geraedts, ook vanuit andere onderzoeken. De figuur toont

een parabolische trend waarbij er een top ligt rond een leemgehalte van 20 à 25 procent. Bij hogere leemgehalten neemt de Maximale Proctordichtheid weer af. Backfillzanden worden meestal geproduceerd met leemgehalten tussen de 10 en 30 procent, waardoor het interessant is om verdiepend onderzoek te doen naar een potentieel optimum leemgehalte. Voor het behalen van de hoogste dichtheid ligt het optimum leemgehalte rond 20-25%. De vraag is of ook het optimum leemgehalte is in het kader van thermische geleidbaarheid. Dit vanwege de lagere geleidbaarheid van de lemige fracties ten opzichte van zand. Om dit te onderzoeken is nader onderzoek benodigd.



Figuur 18: Leemgehalte vs. Maximum Proctordichtheid

Tevens valt op dat de monsters van Vos binnen dit onderzoek duidelijk lager uitvallen dan de waarden van Sanders & Geraedts. Verder onderzoek is benodigd om vast te stellen of dit ligt aan de aanwezigheid van grovere fracties bij mengsels van Sanders & Geraedts. De beproefde mengsels van Vos Zand & Grind in dit onderzoek bevatten grotendeels korrels met een diameter van ten hoogste 'slechts' 2 mm. De proevenverzameling voor Vos Zand & Grind is daarnaast te klein om een duidelijk parabolisch verloop vast te stellen. Het materiaal van Vos & Zand & Grind lijkt het verloop van Sanders & Geraedts te volgen, maar de curve ligt op een lager niveau. Dit is waarschijnlijk te verklaren door het ontbreken van grove korrels in het Sanders & Geraedts zand.

4.4 Mogelijkheid tot voorspellen λ -waarde

4.4.1 Vergelijking vier modellen

In de afgelopen decennia zijn er diverse onderzoekers geweest die gepoogd hebben modellen op te stellen om een inschatting te maken van de thermische geleidbaarheid c.q. thermische weerstand van gronden. Het merendeel van de modellen is zuiver empirisch of semi-empirisch opgesteld of sluitend gemaakt. In het kader van dit onderzoek is een omvangrijk aantal thermische geleidbaarheidsmetingen uitgevoerd. De vele thermische geleidbaarheidsmetingen zijn gebruikt om de prestaties van een viertal modellen te toetsen. De volgende vier modellen zijn getoetst aan de meetwaarden:

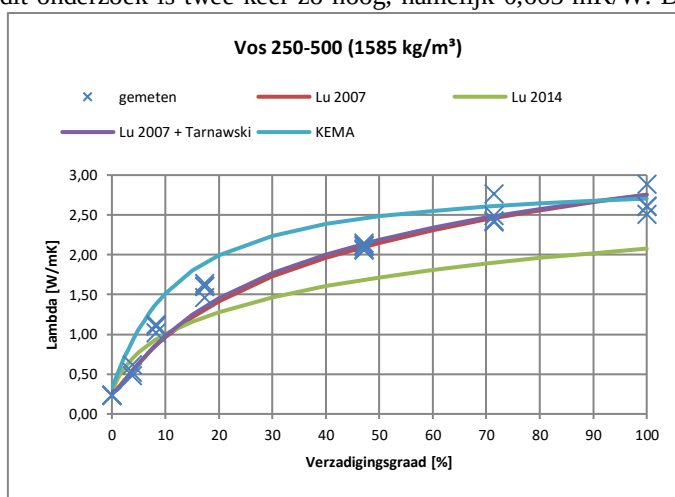
1. Lu 2007 (Lu, Ren, Gong, & Horton, 2007) – huidig toegepaste model binnen Wiertsema & Partners;
2. Tarnawski 2009 (Tarnawski, Momose, & Leong, 2009) – opnieuw gefitte coëfficiënten voor het Lu (2007) model;
3. Lu 2014 (Lu, Lu, Horton, & Ren, 2014) – aangepast model met vernieuwde formule voor de λ -waarde;
4. KEMA-model (Groeneveld, Snijders, Koopmans, & Vermeer, 1984) – door KEMA gebruikte relatie om g-waarden van gronden te berekenen.

In hoofdstuk 2 zijn de bovenstaande vier modellen beschreven en toegelicht. Ieder model is 'gefit' op de eigen verzameling van beproefde testmonsters binnen die onderzoeken. Echter, is het belangrijk dat modellen algemeen

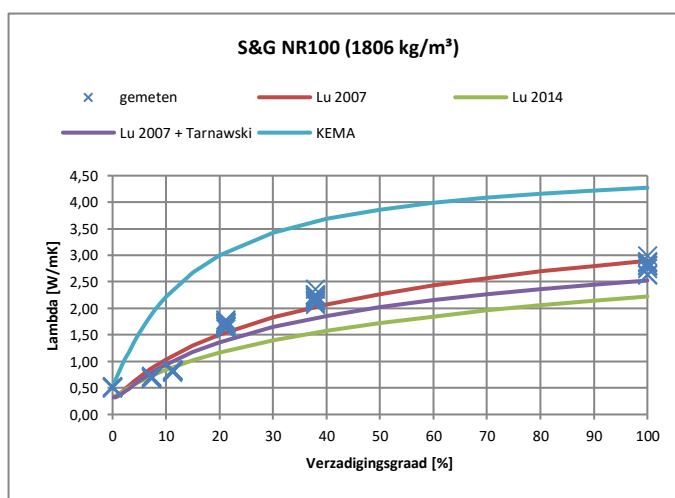
toepasbaar zijn, zodat ze een aanvaardbare fit geven bij ieder project om effectiever g-waardenonderzoek uit te voeren. Aan de hand van de tijdens de diverse thermische geleidbaarheidsmetingen bepaalde karakteristieken zijn de λ -waarden c.q. g-waarden bepaald van de beproefde monsters van dit onderzoek met behulp van de vier modellen. De volledige cijfermatige modelvergelijking is opgenomen in bijlage 5 en de volledige bijbehorende verzameling van grafieken voor alle monsters is weergegeven in bijlage 6.

Uit de vergelijking van de modellen is gebleken dat het model van Lu (2007) en de nieuwe modelfit door Tarnawski (2009) het beste presteren ten opzichte van de monsterselectie van dit onderzoek met een RMSE van de g-waarde van gemiddeld 0,317 mK/W. Uit de modelvergelijking is duidelijk geworden dat bij het ene monster Lu (2007) iets beter presteert en dat bij het andere monster de parameters van Tarnawski (2009) een nauwkeuriger resultaat geven. Het gaat daarentegen in veel gevallen slechts om enkele honderdsten. Het aanpassen van de modelvariabelen α en β in die modellen levert dus geen bepalende verschillen op. Het Lu (2014) model presteert duidelijk iets minder met een gemiddelde RMSE op de g-waarde van 0,340 mK/W. Hierbij gaat het wederom om een verschil van slechts 0,023 mK/W. De relatie die door KEMA wordt toegepast presteert wel overduidelijk minder goed dan de andere drie modellen en sluit ronduit slecht aan bij de meetwaarden. De gemiddelde RMSE van de g-waarde bij de monsterverzameling van dit onderzoek is twee keer zo hoog, namelijk 0,665 mK/W. De kleine individuele verschillen tussen de modellen Lu (2007) en Tarnawski (2009) zijn toe te schrijven aan de aanpassingen van de parameters α en β voor de 'fit' op de gekozen monsterverzameling. Op een grotere monsterverzameling als bij dit onderzoek heeft de vernieuwde 'fit' dus een minimaal effect. De afwijkingen van Lu (2014) worden naar alle waarschijnlijkheid ook veroorzaakt door de 'afstelling' op een bepaalde monsterselectie. De grote afwijking van het KEMA-model wordt veroorzaakt door het feit dat het model is afgestemd op gronden met dichtheden van 1375 tot 1835 kg/m³. Een aantal beproefde monsters ligt qua dichtheid boven de maximale waarde van 1835 kg/m³. De monsters die opgebouwd zijn met een hoge dichtheid, wat tevens mengsels zijn, geven zeer forse afwijkingen met het KEMA-model ten opzichte van zowel de andere modellen als de gemeten waarden.

In figuur 19 en 20 zijn twee van de acht grafieken weergegeven van de modelvergelijking ter indicatie. Het betreft de monsters 'Vos 250-500 zand' en 'S&G NR100'. De zojuist beschreven oorzaken van de afwijkingen van het KEMA-model zijn hierin wederom goed te zien. De grafiek van Vos 250-500 laat een duidelijk afwijking zien van de



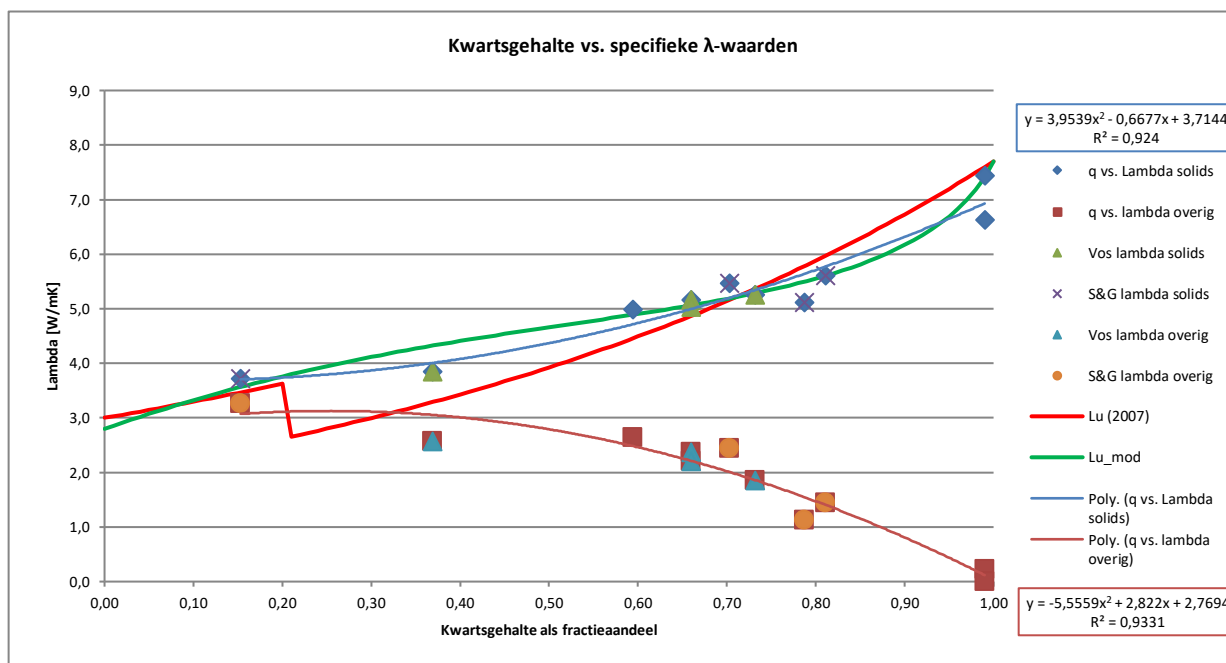
Figuur 19: Modelvergelijking Vos 250-500



Figuur 20: Modelvergelijking S&G NR100

KEMA-lijn. Het KEMA-model overschat de thermische geleidbaarheid in het beginstadium van verzadigingsgraden fors. Relatief gezien plot de KEMA-lijn bij Vos 250-500 netter dan de andere grafieken. Dit is toe te schrijven aan het feit dat het Vos 250-500-monster uit puur zand bestaat. Het mengsel 'S&G NR100' is een voorbeeld voor de slechtere prestaties van het KEMA-model bij niet-pure zanden. Hier geeft het KEMA-model een nog forsere afwijking. Het klakkeloos toepassen van het KEMA-model zal dus leiden tot grote overschattingen van de thermische geleidbaarheid en een 'te gunstige' inschatting. Er is dus te concluderen dat het Lu (2007) model in de Nederlandse praktijk het beste presteert. Dit ligt in lijn met de ervaringen van g-waardenonderzoek binnen Wiertsema & Partners bij het onderzoeken van in-situ boormonsters.

Dat het Lu (2007) model in de Nederlandse praktijk naar behoren werkt wordt evenzo duidelijk uit de volgende beschouwing. Op basis van de gemeten verzadigde thermische geleidbaarheid is de waarde voor de thermische geleidbaarheid van de overige mineralen herleid en gecontroleerd aan de oorspronkelijke Lu (2007) waarde (figuur 21). De herleidde λ -waarden van zowel de kwartsmineralen en de overige mineralen zijn in de figuur uitgesplitst. In het model van Lu (2007) is de λ -waarde van de overige mineralen afhankelijk van het kwartsgehalte in de grond. Wanneer de kwartsfractie groter is dan 0,2 dan wordt een λ -waarde van 2,0 W/mK aangehouden en bij een kwartsfractie van gelijk of kleiner dan 0,2 wordt een waarde van 3,0 W/mK aan de overige mineralen toegekend. Dit is door Lu gedaan om het model sluitend te krijgen. Uit de herleiding van de λ -waarde van de overige mineralen op basis van de verzadigde meetwaarden blijkt dat de λ -waarden van de overige mineralen van monsters van Vos Zand & Grind en Sanders & Geraedts inderdaad tussen 2,0 en 3,0 W/mK liggen. Dit geeft aan dat Lu (2007) een grote stap in de juiste richting heeft gezet om een eenduidige relatie te leggen tussen de λ -waarden van de vaste kwartsmineralen en de overige mineralen. Echter, lijkt de abrupte overstap voor de waarde van de overige mineralen van 2,0 naar 3,0 W/mK bij de 0,2-grens van het kwartsgehalte genuanceerder te liggen. De rode lijn geeft het theoretische verloop van de specifieke λ -waarde van de kwartsmineralen weer en het omslagpunt is duidelijk te zien. De blauwe polylijn geeft de trend weer tussen het kwartsgehalte en de λ -waarde van de vaste delen. Vanaf ongeveer het fractieaandeel kwarts van 0,2 onderschat het Lu (2007) model de geleidbaarheid van de kwartsmineralen behoorlijk. Als de uitkomsten van de reguliere berekening van de λ -waarde van de vaste delen en de herleidde waarden op basis van de verzadigde metingen met elkaar vergeleken worden leidt dit dan ook tot een RMSE van 0,847 W/mK. Het omslagpunt van de λ -waarde van de overige mineralen dient gezien de herleidde waarden dus meer geleidelijk te gaan. De rode polylijn geeft de trend tussen de λ -waarden van de overige



Figuur 21: Relatie kwartsgehalte en specifieke geleidbaarheid van afzonderlijke mineralen

mineralen op basis van de verzadigde metingen weer. Door de bijbehorende formule te gebruiken voor de berekening van de λ -waarde van de vaste delen in plaats van de reguliere relatie volgens Lu (2007) wordt de bepaling nauwkeuriger:

$$\lambda_s = \lambda_q^q \times (-5,5559q^2 + 2,822q + 2,7694)$$

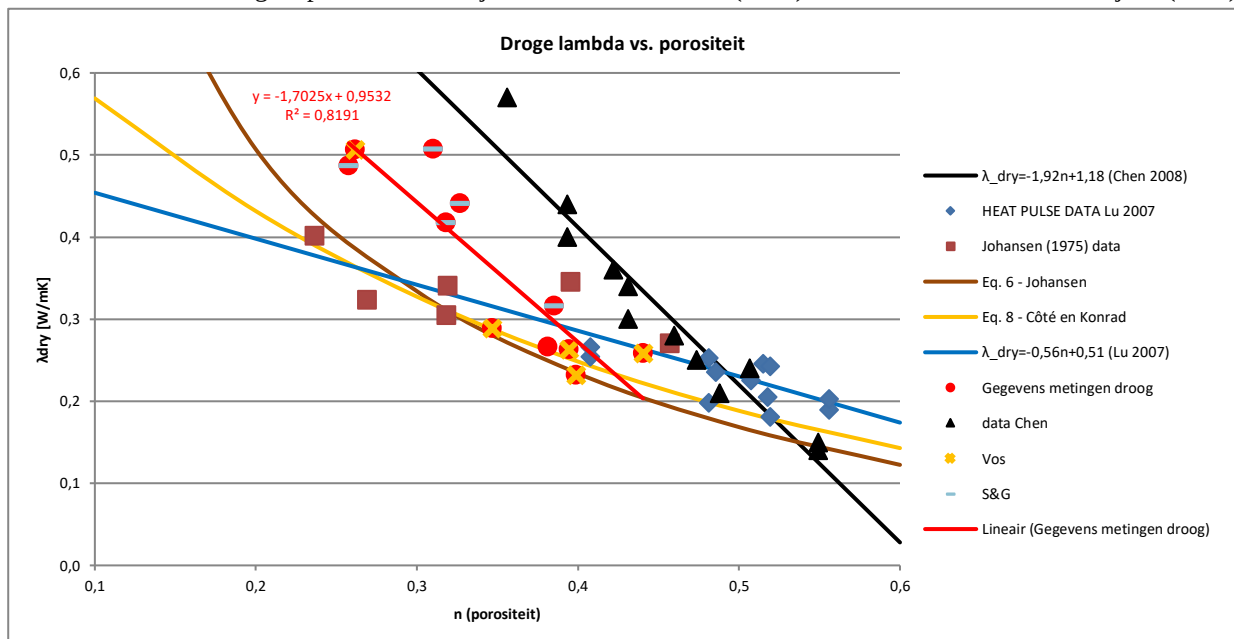
Het resultaat van de gemodificeerde relatie is de groene lijn (Lu_mod) en leidt tot een RMSE van 0,778 W/mK. Deze relatie is weliswaar 'gefit' op de meetwaarden binnen dit onderzoek, maar geeft genoeg aanleiding om te constateren dat de omslag van 2,0 naar 3,0 W/mK voor de λ -waarde van de overige mineralen bij het Lu (2007) model té abrupt is. Om het model van Lu (2007) nog passender te maken dan momenteel het geval is dient verdiepend onderzoek uitgevoerd te worden naar het omslagpunt voor de overige mineralen.

4.4.2 Beschouwing λ -waarde in droge toestand

Naast de specifieke thermische geleidbaarheden van de verschillende mineralen van het Lu (2007) model op basis van de verzadigde meetwaarden is er ook gekeken naar de prestaties van de Lu (2007)-relatie voor de droge λ -waarden. Lu (2007) heeft een eenvoudige lineaire relatie tussen de droge thermische geleidbaarheid en de porositeit van een grond opgesteld, namelijk:

$$\lambda_{dry} = -0,56n + 0,51$$

De blauwe lijn in figuur 22 geeft deze relatie weer. De bruine en gele lijnen geven de relatie weer van respectievelijk de modellen Johansen (1975) en Côté en Konrad (2005). De rode punten tonen de droge thermische geleidbaarheidsmetingen binnen dit onderzoek en laten overduidelijk een ander verloop zien. Het Lu (2007) model geeft bij niet-droge monsters een aardige inschatting van de thermische geleidbaarheid, maar de relatie volgens Lu (2007) voor droge monsters wordt door dit onderzoek dus niet bevestigd. De reden van de afwijkende resultaten zijn enigszins te verklaren doordat de metingen binnen dit onderzoek hebben plaatsgevonden bij een hogere dichtheid en dus een lagere porositeit dan bij het onderzoek van Lu (2007). De onderzochte monsters bij Lu (2007)



Figuur 22: Relatie droge thermische geleidbaarheid en porositeit

hadden allen een porositeit van minimaal 0,4, terwijl binnen dit onderzoek de monsters beschikten over een porositeit tussen ongeveer 0,25 en 0,45.

Daarentegen heeft er in 2008 een onderzoek plaatsgevonden naar de thermische geleidbaarheid van zanden (Chen, 2008). In dit onderzoek hebben ook diverse droge metingen plaatsgevonden. De relatie is weergegeven middels de zwarte lijn. Een groot verschil tussen dit onderzoek en het onderzoek van Chen (2008) is dat in dit onderzoek diverse mengsamenstellingen onderzocht zijn en bij Chen (2008) uitsluitend zanden. Hierdoor valt te verklaren dat de Chen-relatie in de grafiek verder naar rechts geplaatst is. Echter, is het opvallend dat de relatie die Chen (2008) heeft vastgesteld een vrijwel identieke richtingscoëfficiënt heeft als de relatie binnen dit onderzoek. Bij een porositeit vanaf 0,35 presteert de Lu (2007) relatie naar behoren, maar bij een lagere porositeit c.q. hogere dichtheid lijken de meetwaarden een richtingscoëfficiënt aan te houden die vergelijkbaar is met Chen (2008). Om een nauwkeurige inschatting te maken voor een gehele range aan droge λ -waarden dient de huidige Lu (2007)-relatie uitgebreid te worden met monsters met een lagere porositeit. Dit is zeker wenselijk in het kader van backfillzanden, omdat die zanden onder hoge dichtheid worden toegepast.

5 Conclusie

Op basis van de resultaten en interpretaties in hoofdstuk 4 kan antwoord gegeven worden op het viertal deelvragen en afsluitend de hoofdvraag. Als eerste is gekeken naar de verschillen in thermische geleidbaarheid van de leem- en zandfractie. Waar de thermische geleidbaarheid bij een zandmengsel direct reageert op een oplopend vochtgehalte door de ontstane waterbruggen, blijft het effect bij een oplopend leemgehalte in eerste instantie uit. Bij lage vochtgehalten heeft het water bij leemhoudende mengsels minder effect, doordat kleimineralen water absorberen en het daardoor langer duurt voordat er waterbruggen ontstaan. Dit verklaart het verschil in gedrag van thermische geleidbaarheid bij lage vochtgehalten van de leem- en zandfractie. Het verschil in de mate van thermische geleidbaarheid tussen zand en leem wordt veroorzaakt door het verschil in kwartsaandeel. De specifieke geleidbaarheid van kwartsmineralen is hoger dan van de overige mineralen, waardoor er bij een lager kwartsaandeel een negatief effect optreedt met het oog op de thermische geleidbaarheid. De grootte van het verschil is afhankelijk van de hoeveelheid zand c.q. leem. Het terughoudende gedrag dat veroorzaakt wordt door het leem is een belangrijke component om rekening mee te houden. Het toevoegen van leem kan echter niet voorkomen worden in verband met de goede waterhoudende eigenschappen van dat materiaal en voor opvulling van het korrelskelet. Vocht vasthouden betekent een hogere verzadigingsgraad en kan een positieve uitwerking op de thermische geleidbaarheid, tenzij het water geabsorbeerd wordt door de kleimineralen (negatieve werking). Verder is gebleken dat er geen verschil is tussen het gedrag van gronden afkomstig van verschillende locaties in Nederland. De materialen uit Drenthe, Friesland en Limburg gedroegen zich allen op een overeenkomstige manier, afhankelijk van de samenstelling.

Daarnaast is er geprobeerd te achterhalen wat de effecten zijn van een hoger leemgehalte en een hogere dichtheid op de thermische geleidbaarheid van een backfillmengsel en of het toevoegen van leem om de dichtheid te verhogen strijdig is met het verkrijgen van een optimale thermische geleiding. Geconcludeerd kan worden is dat een hoger leemgehalte (bij gelijkblijvende dichtheid en vochtgehalte) een negatieve invloed op de thermische geleidbaarheid en heeft een hogere dichtheid (bij gelijkblijvend leem- en vochtgehalte) een positieve invloed op de thermische geleidbaarheid. De negatieve invloed door het hogere leemgehalte wordt veroorzaakt door de lagere soortelijke thermische geleidbaarheid van onder andere de kleimineralen. Aan de andere kant zorgt een grotere hoeveelheid contactoppervlakken tussen de korrels ten gevolge van een hogere dichtheid voor een hogere thermische geleidbaarheid. Hierdoor ontstaat als het ware een soort van 'spagaat' waarin enerzijds overwogen moet worden om fijne fracties (leem) toe te voegen, zodat zowel het vochthoudend vermogen als de dichtheid op peil komt, maar het toevoegen van leem kan niet oneindig in verband met de lagere specifieke geleidbaarheid van niet-kwartsmineralen. Gedurende het onderzoek is evenzo gebleken dat het basisproduct, oftewel het sterk leemhoudende materiaal, in voldoende mate aanwezig moet zijn. De momenteel gehanteerde leem-richtlijn voor backfillzand ligt op circa 15-25 procent.

Ook is getracht te achterhalen op welke manier een zo hoog mogelijke dichtheid behaald kan worden. Vanuit de betontechnologie gaat men uit van een korrelverdeling volgens de Fuller-relatie. Een minimaal poriënvolume betekent meer kwart- en overige mineralen en minder water of lucht en dat komt de thermische geleidbaarheid ten goede. Verwacht is dat een korrelverdeling van een backfillmengsel die een Fullerkromme benadert, een zo hoog mogelijk dichtheid zou behalen. De korrelverdeling die het verloop van een Fullerkromme het beste volgt geeft een hogere dichtheid. Dit doet enigszins vermoeden dat daar mogelijkheden liggen in het creëren van een backfillmengsel met een hoge dichtheid. Het toevoegen van grovere fractie is tot nu toe niet wenselijk gebleken op basis van de dichtheid. Echter, het gedrag van mengsels met verschillende samenstelling is vanwege de geringe tijd niet uitvoerig beproefd. Er zijn daarentegen wel aanknopingspunten voor verdiepend onderzoek omtrent de

relatie tussen dichtheden, mengselsamenstellingen en Fullercurven. Zo is op basis van een proevenverzameling te concluderen dat het optimale leemgehalte in het kader van dichtheidsoptimalisatie rond de 20 procent ligt. Echter, is dit onderzoek niet toereikend genoeg om te achterhalen of een leemgehalte rond 20 procent ook optimaal is kijkend naar de thermische geleidbaarheid. Een te hoog leemgehalte verlaagt de dichtheid van een backfillmengsel, maar als ten gevolge van dit hogere leemgehalte het vochthoudend vermogen (en dus verzadigingsgraad) groter wordt dan kan dat mogelijk een positiever effect hebben dan een hogere dichtheid. Om meer grip te krijgen op deze afweging en het gedrag bij lage vochtgehalten is nader onderzoek benodigd.

De data van dit onderzoek is tevens getoetst aan een viertal modellen om te mogelijkheden tot het voorspellen van de thermische geleidbaarheid te inventariseren. Uit de modelvergelijking is voortgekomen dat het model van Lu (2007) over het algemeen goede resultaten geeft. Het model presteert beter dan de andere drie modellen en is daarnaast toepasbaar op alle grondsoorten in tegenstelling tot bijvoorbeeld het KEMA-model. Het KEMA-model is bovendien ongeschikt gebleken, terwijl dit model in Nederland wel veel gebruikt wordt. Het KEMA-model schiet tekort doordat het niet getest is op hoge dichtheden en alleen op basis van zanden is opgesteld. Het Lu (2007) model zit daarom conceptueel beter in elkaar én is toepasbaar in de Nederlandse praktijk.

Het Lu (2007) model laat echter nog wat tekortkomingen zien. Zo heeft het model moeite met het voorspellen van de thermische geleidbaarheid in droge situaties bij hogere dichtheden, terwijl het bij lagere dichtheden, waarop het model 'gefit' is, tot voldoende resultaat leidt. Hier is nog enige aandacht benodigd. Bovendien is het omslagpunt voor de specifieke thermische geleidbaarheid van de overige mineralen van 2,0 naar 3,0 W/mK rondom een kwartsfractie van 0,2 in het Lu (2007) model zeer abrupt bevonden. Op basis van dit onderzoek is duidelijk geworden dat deze overgang vloeiender is en behoeft daarom gelijkerwijs extra aandacht. Ten slotte is geconcludeerd dat het Lu (2007) model afwijkend gedrag vertoont bij verzadigingsgraden van circa 20 procent en lager. Bij pure zand- of leemgronden geeft het model accurate inschattingen, maar bij mengsels heeft het model moeite met datzelfde lage verzadigingsgebied.

Resumerend geeft dit onderzoek duidelijke handvatten voor verdiepend onderzoek naar de optimalisatie van backfillzanden. Fundamentele parameters als vochtgehalte en dichtheid, die bepalend zijn voor de prestaties van het backfillzand, zijn uitgelicht en er is meer grip verkregen op deze materie. Tevens zijn een aantal ongunstigheden in het momenteel gebruikte model gevonden. Zodra deze gebreken zijn verholpen kan op theoretische wijze met bepaalde input van een opdrachtgever redelijkerwijs een optimaal backfillzand gecreëerd worden op basis van beschikbare materialen. Het optimum leemgehalte voor een backfillzand ligt op basis van dit onderzoek tussen de 15 en 25 procent. Wat betreft de dichtheid ligt het optimale leemgehalte rond de 20 procent, maar of dit evenzo geldt in het kader van de thermische geleidbaarheid moet nader onderzocht worden. De korrelverdeling van een ideaal backfillzand lijkt daarnaast het verloop van een Fullercurve te moeten benaderen, maar om daar meer grip op te krijgen is additioneel onderzoek benodigd.

6 Discussie

Het op fundamentele wijze onderzoek doen naar de bepalende eigenschappen van backfillzand, namelijk samenstelling (aandeel kwarts- en overige mineralen), dichtheid en vochtgehalte, heeft diverse interessante inzichten en vermoedens opgeleverd waarop voortgeborduurd kan worden om enerzijds beter en maatgevender gegevens advies aan te bieden en anderzijds verdiepend onderzoek naar backfillzandproductie op basis van theoretische modellen. In dit hoofdstuk worden een aantal zaken omtrent dit onderzoek bediscussieerd.

Naast het Lu (2007) model dat momenteel gebruikt wordt binnen Wiertsema & Partners zijn de metingen ook aan andere modellen getoetst. Op basis van de metingen binnen dit onderzoek geeft het Lu (2007) model de beste resultaten van de getoetste modellen. Echter, zijn er nog wat haken en ogen aanwezig in het model. Zo heeft het model moeite met het voorspellen van de thermische geleidbaarheid van droge gronden bij hoge dichtheden en dat het een te abrupte overgang gebruikt voor de waarde van specifieke geleidbaarheid voor de overige mineralen. Tevens heeft het model moeite met het voorspellen van de thermische geleidbaarheid bij een verzadigingsgraad van 20 procent en lager.

Gedurende het onderzoek is naar verwachting gebleken dat op fundamentele wijze onderzoek doen naar backfillzanden en het verwerken en interpreteren van de data een zeer tijdrovende klus is. Gezien het tijdsbestek waarin dit onderzoek heeft plaatsgevonden zijn de meeste monsters eenmaal ingebouwd. Om toevallige fouten zoveel mogelijk te elimineren zouden de monsters meermaals ingebouwd en gemeten moeten worden. Bij de proeven binnen dit onderzoek zijn de kwaliteit als kwantiteit van de monsters uitermate belangrijk. De monsters zijn bij alle metingen zorgvuldig ingebouwd, maar er kunnen zich altijd kleine gebreken voordoen bij de inbouw of bij metingen. Door meerdere metingen op één monster uit te voeren is de diversiteit van metingen in een monster inzichtelijk gemaakt. Meetreeksen zouden bijvoorbeeld tweemaal of vaker opgesteld kunnen worden. Dit geldt voor zowel thermische metingen, zeefreeksen en Proctorproeven. Bepaalde monsters waren bijvoorbeeld lastig in te bouwen bij hogere verzadigingsgraden, wat de kwaliteit van de thermische geleidbaarheidsmeting niet ten goede komt.

Door dit onderzoek is een eerste handreiking opgesteld waarmee verder gewerkt kan worden in onderzoek naar backfillzand. Tevens is er in verband met de relatief korte periode slechts een begin gemaakt met het onderzoeken van de relatie tussen de Fullerkrommen en de dichtheid. Hier geldt evenzo dat meer proeven op verschillende mengsel een beter inzicht zullen geven. Daarnaast dienen er meer mengsels ingebouwd te worden om op die manier de effecten van mengselveranderingen in kaart te brengen. Daarvoor is de huidige proevenverzameling te klein en daardoor kan er momenteel geen eenduidige uitspraak gedaan worden omtrent de relatie tussen de Fullerkromme en de Maximum Proctordichtheid.

7 Aanbevelingen

Om de thermische geleidbaarheid c.q. g-waarde van gronden juist in te schatten dienen een aantal zaken nader onderzocht te worden. Zo zal het omslagpunt voor de specifieke geleidbaarheid van de overige mineralen verder geanalyseerd moeten worden om nauwkeurigere resultaten te geven rondom het omslagpunt van een kwartsfractie van 0,2. Daarnaast wordt verdiepend onderzoek aangeraden op het gebied van droge gronden. Het Lu (2007) model is op basis van de door hen onderzochte monsterverzameling niet toereikend genoeg. Zo zal er bekeken moeten worden wat de effecten zijn bij een hogere dichtheid. De huidige relatie voor de thermische geleidbaarheid in droge toestand is niet nauwkeurig bij hogere dichtheden. Verder is opgevallen dat het Lu (2007) model moeite heeft om in mengsels de juiste thermische geleidbaarheid c.q. g-waarde te voorspellen bij een verzadigingsgraad van circa 20 procent en lager. Er wordt geadviseerd om nader onderzoek te doen naar gronden die in die range van verzadigingsgraden liggen. Het gebied tussen volledig droog en een verzadigingsgraad van ongeveer 20 procent is namelijk juist bij backfillzanden van belang. Backfillzanden worden veelal boven de grondwaterspiegel toegepast, omdat de thermische geleidbaarheid van het in-situ materiaal niet voldoende is. Daarnaast kan een kabel in een bed van backfillzand zorgen voor uitdroging van de omliggende grond. Hierdoor zal een backfillzand vaak in het eerder genoemde verzadigingsgebied terecht komen. Het is dus in het kader van de inschatting van de thermische geleidbaarheid van belang dat de λ -inschatting in het lagere verzadigingsgebied accuraat is.

In het kader van de optimale korrelverdeling van een backfillmengsel dient aanvullend onderzoek uitgevoerd te worden. Momenteel heerst het vermoeden dat een korrelverdeling een Fullerkromme zal moeten benaderen voor een optimale dichtheid. Desondanks is de proevenverzameling te smal om daar een eenduidige uitspraak over te doen. Daarom wordt aanbevolen om in het kader van een optimale korrelverdeling voor backfillzanden aanvullend onderzoek te doen. Daardoor zal eveneens meer grip verkregen worden op een potentieel optimaal leemgehalte.

Om het optimale leemgehalte qua thermische geleidbaarheid te bepalen is nader onderzoek benodigd, zoals ook beschreven in de conclusie. Een hoger leemgehalte zorgt voor een beter vochthoudend vermogen en aangezien backfillzanden boven de grondwaterspiegel geplaatst worden is het vochthoudend vermogen door het leemgehalte in de grond dus van belang. Het uiteindelijke vochtgehalte van gronden boven de grondwaterspiegel wordt onder andere bepaald door de zuigspanning ten aanzien van de grondwaterspiegel. Om een beter beeld te krijgen van de vochthuishouding in een grond zijn pF-curves nodig. Deze curves geven het vochtgehalte in een grond op een bepaalde afstand van de grondwaterspiegel. Vocht speelt in het kader van de thermische geleidbaarheid een belangrijke rol in de prestaties van backfillzanden. Het wordt daarom aanbevolen om voor backfillzanden specifieke pF-curves op te laten stellen, zodat de vochthuishouding zeer nauwkeurig bepaald wordt. Hierdoor kunnen de prestaties van een backfillzand en de thermische geleidbaarheid ten gevolge van het vochtgehalte nauwkeuriger ingeschat worden. Momenteel wordt namelijk gebruik gemaakt van 'algemene' pF-curves van gronden die lijken op het desbetreffende backfillmengsel. Het kan daardoor voorkomen dat een mengsel een ongunstige pF-curve toegewezen krijgt ten opzichte van de werkelijke pF-curve van dat mengsel. Door specifieke pF-curves op te stellen wordt naast een nauwkeurige inschatting van de g-waarde voorkomen dat een partij backfillzand mogelijk ten onrechte wordt afgekeurd.

Ten slotte is er een algemene aanbeveling in het kader van thermische geleidbaarheidsmetingen. Er wordt aanbevolen om, mits toelaatbaar, metingen uit te voeren met een hoger vermogen in plaats van gemiddeld. Zeker in goed geleidende materialen als zand worden de metingen daardoor nauwkeuriger. De effecten in veen- en kleigronden dienen nog verder uitgezocht te worden. De metingen mogen uiteraard geen uitdroging van de grond veroorzaken, hetgeen leidt tot afwijkende, niet-realistische waarden.

8 Verantwoording

8.1 Betrouwbaarheid

De resultaten op basis van de methodieken en werkwijzen zijn betrouwbaar, doordat er beproefd is volgens de voorgeschreven normen en procedures. Zo zijn de thermische metingen uitgevoerd conform de meetmethode als beschreven in de ASTM D-5334. Gedurende de thermische geleidbaarheidsmetingen zijn telkens minimaal drie metingen uitgevoerd op hetzelfde monster met waar nodig additionele metingen. Daarnaast zijn de zeefcurves op een herhaalbare manier uitgevoerd en zijn de Proctorproeven uitgevoerd volgens de voorgeschreven methode uit de RAW. Tevens zijn de beproefde monsters, de samenstellingen ervan en de locaties waarvan ze afkomstig zijn bekend. Omwille van de voorgaande zaken is het onderzoek dus herhaalbaar.

Daarentegen is het belangrijk in ogenschouw te nemen dat de monsterpreparatie veel zorg draagt. Het niet zorgvuldig samenstellen en prepareren van monsters voor diverse proeven kan afwijkende waarden met zich meedragen. Bovendien zijn er nog gebeurtenissen die in sommige gevallen niet altijd vermeden kunnen worden. Een voorbeeld daarvan is het optreden van warmteconvectie in een monster, waardoor de mate van thermische geleidbaarheid beïnvloed wordt. Dit maakt de interpretatie van de data een belangrijk gegeven. In het kader van dit onderzoek is het daarnaast aan te raden om diverse proeven nogmaals uit te voeren om toevallige fouten te achterhalen en uit te sluiten. Alle proeven meermaals uit te voeren én te interpreteren was gezien de beschikbare tijd van ‘slechts’ 16 weken zeer lastig. Dit onderzoeksrapport biedt een sterke basis voor vervolgonderzoek in het kader van backfillproductie met daarin adviezen richting het vervolgtraject.

8.2 Bruikbaarheid en draagvlak

Zoals bij 8.1 beschreven vormt dit onderzoeksrapport een sterke basis voor vervolgonderzoek naar backfillproductie. Door op fundamentele wijze de bepalende componenten van backfillzanden te onderzoeken en de effecten van veranderingen binnen die componenten te analyseren is er een betere feeling ontstaan met die zanden. Echter, is gebleken dat het vele onderzoek doen naar backfillzanden een omvangrijke en tijdrovende klus is. Dit onderzoek biedt diverse aanknopingspunten en mogelijkheden tot zowel verbredend als verdiepend onderzoek. Zo kan enerzijds de bestaande dataverzameling uitgebreid worden, waardoor de resultaten eenduidiger worden en toevallige fouten eruit gehaald worden. Anderzijds zijn er onderdelen die nog meer verdieping nodig zijn en werden er andere zaken gedurende het onderzoek opgemerkt die de aandacht trokken.

De momenteel gebruikte theorieën en modellen waren tot op heden onderzocht aan de hand van grotendeels gronden afkomstig uit Noord-Amerika en Azië. Door dit onderzoek is deze theorie getoetst aan de hand van metingen die zijn uitgevoerd op een voor de sector representatieve wijze.

De bevindingen in dit rapport kunnen gebruikt worden bij advisering omtrent g-waardenonderzoek binnen Wiertsema & Partners, zowel bij in-situ onderzoeken als bij backfilltoepassingen. Tevens geeft het backfillproducenten meer inzicht in de fundamentele eigenschappen van hun producten. Door onderzoek te doen naar de basiscomponenten van backfillzand, is meer grip verkregen op de mogelijkheden om met die onderdelen te ‘spelen’ in het kader van optimalisatie van backfillzanden. Door de stijgende hoeveelheid projecten omtrent kabelwerken ten gevolge van energietransitie, zal de vraag naar backfillzand toenemen. Dit onderzoek draagt bij aan het beter op maat aan kunnen bieden van diensten in het kader van backfillzandproductie.

Literatuurlijst

- ASTM International. (2014). *Standard Test Method for Determination of Thermal Conductivity of Soil and Soft Rock by Thermal Needle Probe Procedure*. West Conshohocken, United States.
- Belgische BetonGroepering. (2020). *BBG: Formulen Betonsamenstelling*. Opgehaald van Betonica: http://www.betonica.net/media/nuttige_links/NL_Samenstelling_formules_betontechnol_BBG_Betonica.pdf
- Chen, S. (2008). Thermal conductivity of sands.
- de Vries, D. (1963). *Thermal properties of soils, chapter 7*. Wageningen: Laboratory of Physics and Meteorology of the Agricultural University of Wageningen.
- Groeneveld, G., Snijders, A., Koopmans, G., & Vermeer, J. (1984). Improved method to calculate the critical conditions for drying out sandy soils around power cables. *IEEE Proceedings*.
- HoogspanningsNet. (2019). *Kan alles niet ondergronds?* Opgehaald van HoogspanningsNet: <https://www.hoogspanningsnet.com/over-hoogspanningsmasten/luchtlijnen-grondkabels/kan-alles-niet-ondergronds/>
- HoogspanningsNet. (2020). *Kan alles niet ondergronds?* Opgehaald van HoogspanningsNet: <http://www.hoogspanningsnet.com/over-hoogspanningsmasten/luchtlijnen-grondkabels/kan-alles-niet-ondergronds/>
- J.A. Muijs. (1984). *Klei, bestekseisen t.b.v. constructie en uitvoering, overzicht huidige kennis en onderzoeksvoorstel, S-81.023*. Centrum voor Onderzoek Waterkeringen.
- Lochter, W., & de Bakker, H. (1990). *Bodemkunde van Nederland, Deel 1 Algemene bodemkunde*. Den Bosch: Malmberg.
- Lu, S., Ren, T., Gong, Y., & Horton, R. (2007). An Improved Model for Predicting Soil Thermal Conductivity from Water Content at Room Temperature. *Soil Science Society of America Journal*.
- Lu, Y., Lu, S., Horton, R., & Ren, T. (2014). An Empirical Model for Estimating Soil Thermal Conductivity from Texture, Water Content, and Bulk Density. *Soil Science Society of America Journal*.
- Tarnawski, V., Momose, T., & Leong, W. (2009). Assessing the impact of quartz content on the prediction of soil thermal conductivity. *Géotechnique* 59, No 4, 331-338.