

Erodibiliteit en kans op het ontstaan van zettingsvloeiing als maat voor stabiliteit van oevers, onderwatertaluds en rivierbodem van de Lek

29 november 2011

E. Stouthamer¹, H.J. Pierik¹ en K.M. Cohen^{1,2}

¹Departement Fysische Geografie
Faculteit Geowetenschappen
Universiteit Utrecht
Postbus 80.115
3508 TC Utrecht

²Deltares
Afdeling Toegepaste Geologie & Geofysica
Postbus 85467
3508 AL Utrecht

Inhoudsopgave	
Lijst van appendices	4
Lijst van figuren	5
Lijst van tabellen	6
1 Inleiding	7
1.1 Aanleiding	7
1.2 Doelstelling	7
1.3 Leeswijzer	7
2 Werkwijze	9
2.1 Bepaling samenstelling oevers, onderwatertaluds en basis watervoerende geul	9
2.1.1 <i>Dwars- en langsprofielen</i>	9
2.1.2 <i>Zanddieptekaart</i>	10
2.2 Bepaling erodibiliteit oevers, onderwatertaluds en rivierbodem	11
2.2.1 <i>Methode</i>	11
2.3 Bepaling kans op het ontstaan van zettingsvloeiing	14
3 Lithologische opbouw oevers, onderwatertaluds en geulbasis	17
3.1 In de profielen onderscheiden lithologische eenheden	17
3.2 Overige in de profielen opgenomen informatie	18
3.3 Beschrijving van de dwarsprofielen	19
3.4 Beschrijving van de langsprofielen	31
3.4.1 <i>Opdeling langsprofielen in trajecten</i>	31
4 Erodibiliteit van oevers, onderwatertaluds en rivierbodem	35
4.1 Erodibiliteit van zand	35
4.2 Erodibiliteit van klei en veen	36
4.3 Implicaties van lithologie voor erodibiliteit van oevers, onderwatertaluds en rivierbodem	39
5 Kans op het ontstaan van zettingsvloeiing	43
6 Conclusies	45
7 Aanbevelingen voor verder onderzoek	47
Dankwoord	47
Referenties	48
Appendices	50

Lijst van appendices

- Appendix 1 Langsprofielen langs de noordoever en de zuidoever van de Lek.
Inclusief legenda op een los legendablad.
- Appendix 2 Boxplots en achterliggende data wrijvingsgetal, conusweerstand en plaatselijke weerstand van sonderingen rond de Lek.
- Appendix 3 Zanddieptekaarten van het gebied rondom de Lek.
- Appendix 4a Gemeten en berekende conusweerstand voor de boring/sondering combinaties in dijken rond de Lek.
- Appendix 4b Gemeten en berekende conusweerstand voor de boring/sondering combinaties in polders en uiterwaarden rond de Lek.

Lijst van Figuren

Figuur 1	Ligging van de rivier de Lek.	7
Figuur 2	Ligging van de dwars- en langsprofielen.	9
Figuur 3	Wijze van bepaling mediane conusweerstand, plaatselijke weerstand en wrijvingsgetal voor elke lithologische eenheid op basis van boor- en sondeergegevens, weergegeven in een boxplot.	13
Figuur 4	Relatie tussen de kritieke Shieldswaarde en de mediane korrelgrootte (Zanke, 2003, in: Kleinhans, 2005).	14
Figuur 5	Conusweerstand (q_c) uitgezet tegen de diepte van de gemeten weerstand (groene lijn), de uitgerekende weerstand op basis van een relatieve dichtheid van 33 procent (blauwe lijn) en 66 procent (roze lijn). De transparante gele vlakken geven aan waar zand is onderscheiden in de boring.	16
Figuur 6	Legenda van de dwars- en langsprofielen met daarin de lithologische klassen die worden onderscheiden.	18
Figuur 7	Informatie die in de profielen wordt weergegeven. De eenheden 'gemiddelde diepte Lekbodem' en 'erosie rivierduintop' zijn uitsluitend in de langsprofielen opgenomen.	19
Figuur 8	Lithologische dwarsdoorsnede van de Lek ter hoogte van Hagestein aan de zuidkant van de Lek (rivierkilometer 942.8, naar Gouw & Erkens, 2007, profiel D).	20
Figuur 9	Lithologische dwarsdoorsnede van de Lek ter hoogte van Hagestein aan de noordkant van de Lek (rivierkilometer 946.6, naar Berendsen, 1982 en Gouw & Erkens, 2007, profiel D).	21
Figuur 10	Lithologische dwarsdoorsnede van de Lek ter hoogte van Vianen (rivierkilometer 951.8).	22
Figuur 11	Lithologische dwarsdoorsnede van de Lek ter hoogte van Lexmond (rivierkilometer 956.3-957).	23
Figuur 12	Lithologische dwarsdoorsnede van de Lek ter hoogte van Ameide (rivierkilometer 961, naar Gouw & Erkens, 2007, profiel E).	24
Figuur 13	Lithologische dwarsdoorsnede van de Lek ter hoogte van Langerak (rivierkilometer 970.4).	25
Figuur 14	Lithologische dwarsdoorsnede van de Lek ter hoogte van Schoonhoven (rivierkilometer 972.5).	26
Figuur 15	Lithologische dwarsdoorsnede van de Lek ter hoogte van Bergambacht (rivierkilometer 975.4).	27
Figuur 16	Lithologische dwarsdoorsnede van de Lek ter hoogte van Streefkerk (rivierkilometer 979).	28
Figuur 17	Lithologische dwarsdoorsnede van de Lek ter hoogte van Opperduit (rivierkilometer 982.8).	29
Figuur 18	Lithologische dwarsdoorsnede van de Lek ter hoogte van Nieuw Lekkerland (rivierkilometer 986).	30

Figuur 19	Mediane korrelgrootteverdeling van zand voorkomend in de lithologische eenheden: beddingzand van de Lek, beddingzand van oudere holocene stroomgordels, rivierduinzand, zandige meeropvullingen en de top van de pleistocene zandlaag, uitgedrukt als percentage van de totale dikte van het zandpakket voorkomend binnen de lithologische eenheid.	35
Figuur 20	Kritisch begin van beweging voor beddingzand van de Lek, beddingzand van oudere holocene stroomgordels, rivierduinzand, zandige meeropvullingen en de top van de pleistocene zandlaag.	36
Figuur 21	Boxplots van het wrijvingsgetal, de conusweerstand en plaatselijke weerstand van de uiterwaard en de polder (zonder dijk).	38
Figuur 22	Kans op het ontstaan van zettingsvloeiing langs de Lek.	43
Figuur 23	Schematische weergave van de relatie tussen de opbouw van de ondergrond en erosie van de ondergrond door de Lek.	46

Lijst van Tabellen

Tabel 1	Aantal combinaties van locatie en diepte waarmee de gemiddelde waarde voor de conusweerstand, de plaatselijke weerstand en het wrijvingsgetal per lithologische eenheid is bepaald.	12
Tabel 2	Conversie van pakking van het zand naar kans op het ontstaan van zettingsvloeiing.	15
Tabel 3	Indicatie van de wrijvingsgetallen van verschillende grondsoorten (Handboek Geotechnisch Bodemonderzoek, www.votb.nl/ondergrond/index.html).	37
Tabel 4	Mediane conusweerstand (MPa) van klei, humeuze klei en veen aanwezig onder de dijk, in de polder en uiterwaard zonder dijk, en het verschil hiertussen.	39
Tabel 5	Berekende waarden voor de erodibiliteit van zand, zavel, klei en veen.	39
Tabel 6	Kans op het ontstaan van zettingsvloeiing en pakking van zandlagen in de boring/sondering combinaties.	44

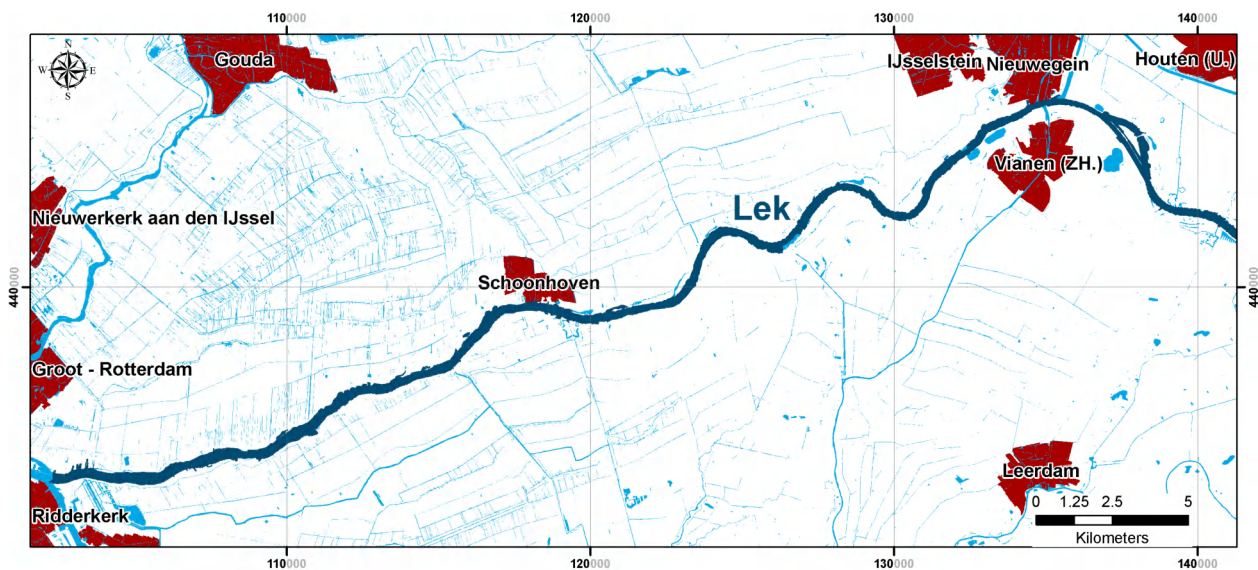
1 Inleiding

1.1 Aanleiding

In het kader van een nieuw te formuleren visie op het beheer van de bodemligging van de Lek voor de korte en lange termijn willen Rijkswaterstaat en Deltares weten hoe groot de stabiliteit van de oevers, de onderwatertaluds en de rivierbodem is. De stabiliteit wordt onder andere bepaald door de erodibiliteit en de kans op het ontstaan van zettingsvloeiing. Deltares heeft het Departement Fysische Geografie, Universiteit Utrecht opdracht gegeven om, conform de methode die voor het Spui, de Noord en de Oude Maas is ontwikkeld door Stouthamer en De Haas (2011), de erodibiliteit van oevers, onderwatertaluds en rivierbodem van de Lek en de kans op het ontstaan van zettingsvloeiing te bepalen.

1.2 Doelstelling

Het doel van dit project is om op basis van bestaande gegevens van de samenstelling van de ondergrond de erodibiliteit en de kans op het ontstaan van zettingsvloeiing te bepalen en daarmee de stabiliteit van de oevers, de onderwatertaluds en de rivierbodem van de Lek (Fig. 1) zo goed mogelijk te kwantificeren. De erodibiliteit is afhankelijk van de samenstelling van de oevers en onderwatertaluds tot op de diepte van de geulbasis en de samenstelling van het sediment waarin de basis van de riviergeul is ingesneden. De hoeveelheid erosie die daadwerkelijk optreedt is naast bovengenoemde factor ook afhankelijk van de morfologievormende afvoer, de ligging van bochten en de stroming in de geul. Deze aspecten maakten echter geen deel uit van de opdracht.



Figuur 1 Ligging van de rivier de Lek.

1.3 Leeswijzer

In het volgende hoofdstuk (hoofdstuk 2) wordt de werkwijze voor het bepalen van de lithologische samenstelling van de ondergrond, de erodibiliteit en de kans op het ontstaan van zettingsvloeiing beschreven. In hoofdstuk 3 volgt een uitgebreide beschrijving van de lithologische opbouw van de ondergrond. Vervolgens wordt de erodibiliteit van de oevers, onderwatertaluds en de geulbodem (hoofdstuk 4) en de kans op het ontstaan van

zettingsvloeiing (hoofdstuk 5) beschreven. In hoofdstuk 6 en 7 volgen respectievelijk de conclusies van dit onderzoek en aanbevelingen voor verder onderzoek.

2 Werkwijze

Om de erodeerbaarheid van de oevers, de onderwatertaluds en de basis van de riviergeul te kunnen kwantificeren en de kans op het ontstaan van zettingsvloeiing in te kunnen schatten is informatie nodig over (1) de lithologische samenstelling van de oevers en onderwatertaluds tot op de diepte van de geulbasis (de diepste geulbasis ligt op 13 m –NAP), (2) de samenstelling van het sediment waarin de basis van de riviergeul is ingesneden, (3) de erodeerbaarheid van het materiaal waaruit de oevers en de onderwatertaluds zijn opgebouwd gebaseerd op sondeergegevens, (4) de erodeerbaarheid van het materiaal waarin de geulbasis is ingesneden en 5) de relatieve dichtheid van het materiaal gebaseerd op het poriegetal, de gemiddelde conusweerstand per meter in de sondering en de verticale korrelspanning.

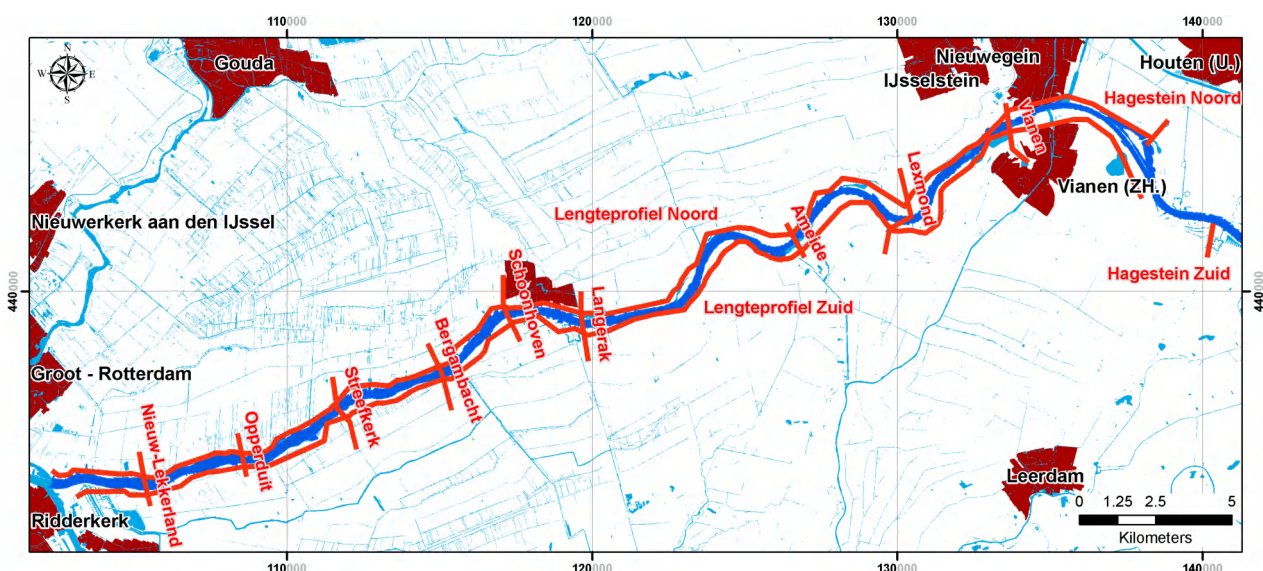
In dit hoofdstuk is beschreven hoe de samenstelling van de ondergrond waarin de riviergeulen zijn ingesneden, de erodibiliteit van dit materiaal en de kans op het ontstaan van zettingsvloeiing is bepaald.

2.1 Bepaling samenstelling oevers, onderwatertaluds en basis watervoerende geul

De lithologische opbouw van de oevers, onderwatertaluds en het materiaal waarin de basis van de watervoerende geul van de Lek is ingesneden, is bepaald in lithologische dwars- en langsprofielen. De ruimtelijke verbreiding en de diepteligging van zand in de ondergrond is daarnaast weergegeven in een zanddieptekaart.

2.1.1 Dwars- en langsprofielen

Voor het bepalen, analyseren en visualiseren van de opbouw van de oevers, onderwatertaluds en het materiaal waarin de basis van de watervoerende geul is ingesneden zijn voor 11 locaties lithologische dwarsprofielen getekend. Tevens zijn 2 lithologische langsprofielen getekend; één langs de zuidoever van de Lek en één langs de noordoever van de Lek (Fig. 2 en Appendix 3).



Figuur 2 Ligging van de dwars- en langsprofielen.

De profielen zijn gebaseerd op gearchiveerde boorgegevens van de Universiteit Utrecht (UU-LLG database), boor- en sondeergegevens uit de TNO-DINO database en

sondeergegevens van het Waterschap Rivierenland (contactpersoon: Jan Blinde, Deltares). De profielen zijn voor zover de gegevens het toelieten getekend tot een diepte van 15 meter - NAP, tot enkele meters onder de basis van de watervoerende geul. De afstand tussen de boringen en/of sonderingen varieert sterk. De beschikbaarheid van boorgegevens met een onderlinge afstand van een tiental tot honderd meters bepaalt mede waar de dwarsprofielen zijn gelegd. In de langsprofielen bedraagt de onderlinge afstand minimaal 10 meter en maximaal 1500 meter en in de dwarsprofielen maximaal 1200 meter. Behalve op basis van de beschikbaarheid van de gegevens, is de exacte ligging van de profielen bepaald op basis van geologische representativiteit van het aangesneden profiel.

Voor het bepalen van de diepteligging van de bodem van de watervoerende geul is gebruik gemaakt van mutlibeam-gegevens van Rijkswaterstaat (contactpersoon: Arjan Sieben).

De dwarsprofielen zijn als figuren (Fig. 8-18) opgenomen in dit rapport. De langsprofielen zijn opgenomen in appendix 1.

2.1.2 Zanddieptekaart

Op de zanddieptekaart is de ruimtelijke verbreiding en de diepte van de bovenkant van het zand dat voorkomt in de ondergrond in de omgeving van de Lek weergegeven (Appendix 3). De kaart is gebaseerd op (1) de ligging van zandlichamen van holocene stroomgordels en de diepteligging van de bovenkant van de zandlichamen, en (2) de diepteligging van de bovenkant van het pleistocene zand. De ligging en diepteligging van de zandlichamen van holocene stroomgordels zijn overgenomen uit Berendsen en Stouthamer (2001, aangepast met nieuwe gegevens). De bestaande kartering van Berendsen en Stouthamer (2001) is aangepast op basis van analyse van boorgegevens die na 2001 verzameld zijn, de relatieve hoogteligging van het maaiveld (AHN, Rijkswaterstaat-AGI, 2005) waaruit de ligging van de zandlichamen afgeleid kan worden (Berendsen & Volleberg, 2007) en de gegevens uit de profielen die bij dit project vervaardigd zijn. De diepteligging van het pleistocene zand is volledig gebaseerd op het digitaal hoogtemodel van de top van het pleistocene zand van TNO (het TopPleistocceenvlak uit de GeoTOP en Nederland3D geomodellen).

Op de kaart wordt de diepteligging van de zandlichamen, gevormd door holocene stroomgordels, weergegeven door de kleur (rood=ondiep, groen=diep). In de kaart staat de representatieve diepteligging van de bovenkant (in m NAP) van de zandlichamen met zwarte cijfers aangegeven. De bovenste 3 meter van de zandlichamen bestaat doorgaans uit fijn tot matig grof zand (mediaanklassen 150-210 μm en 210-420 μm). Dieper dan 3 meter onder de bovenkant van het zandlichaam komt grover zand voor (mediaanklasse 300-600 μm). De breedte van de zandige beddingafzettingen die door de Lek zijn afgezet, is gekarteerd met behulp van de informatie uit de profielen en aanvullende beschikbare boringen. Aan de zuidkant van de Lek is daarnaast gebruik gemaakt van de profielen van Waterschap Rivierenland.

De representatieve diepte van de top van het pleistocene zand (in m NAP) staat op de kaart met rode cijfers aangegeven.

2.2 Bepaling erodibiliteit oevers, onderwatertaluds en rivierbodem

2.2.1 Methode

Erodibiliteit van klei en veen

Erosie van klei en veen kan op twee manieren plaatsvinden, door:

1. “slijtage-erosie”,
2. het lostrekken van kleibrokken of afschuiven van brokken klei indien er een talud in de klei is ontstaan door een naastgelegen erosiekuil.

De kritieke schuifsterkte voor het eerste mechanisme is beduidend lager dan die voor het tweede mechanisme, maar hoger dan voor zand. Bovendien zal de erosiesnelheid in klei (en veen) veel lager zijn dan in zand. Navolgend worden beide mechanismen besproken.

(1) Kritische schuifsterkte slijtage-erosie

Volgens Hoffmans & Verheij (1997) kan de kritieke schuifsterkte voor klei ruwweg benaderd worden via de kritieke diepte-gemiddelde snelheid u_c :

$$\tau_c \approx 0,7 \cdot \rho_w \cdot (r_0 \cdot u_c)^2 \text{ [Pa]}$$

ρ_w is de dichtheid van water [kg/m^3], r_0 is de relatieve turbulentie [-] en u_c is de kritieke diepte-gemiddelde snelheid (waarbij klei erosie optreedt) [m/s].

Voor matig zachte, geconsolideerde klei kan voor u_c een waarde 0,5 m/s aangehouden worden. Met $r_0 = 0,1$ en $\rho_w = 1000 \text{ kg/m}^3$ levert dit $\tau_c = 1,8 \text{ Pa}$ op. Over de waarde van de kritieke diepte-gemiddelde snelheid (u_c) voor harde, geconsolideerde klei bestaat discussie. Pilarczyk (1990) geeft een waarde van $u_c = 1,5 \text{ m/s}$ als bovengrens voor de kritieke diepte-gemiddelde snelheid. Daarentegen worden in het CUR 96-7 handboek (1996) de volgende waarden voor klei genoemd: slappe klei 0,4 m/s, stevige klei 0,8 m/s en compacte klei 1,1 m/s. Hoffmans en Verheij (modelinge mededeling) geven aan dat 1,5 m/s als bovengrens mogelijk wat aan de hoge kant is, maar wel voor kan komen. Zij raden aan 1,2 m/s aan te houden. Indien voor harde, geconsolideerde klei voor u_c een waarde 1,5 m/s wordt aangehouden levert dit $\tau_c = 15,8 \text{ Pa}$ op. Indien een waarde 1,2 m/s wordt aangehouden levert dit $\tau_c = 10,1 \text{ Pa}$ op. De waarde $\tau_c = 15,8 \text{ Pa}$ wordt aangehouden als bovengrens voor de kritieke schuifsterkte voor de stugge, compacte klei die voorkomt onder de Lek, de waarde $\tau_c = 10,1 \text{ Pa}$ wordt aangehouden als de meest voorkomende, representatieve waarde van de kritieke schuifsterkte voor stugge, compacte klei (Laag van Wijchen).

(2) Kritische ongedraineerde schuifsterkte

Indien erosie ongedraineerd plaatsvindt doordat er onder water brokjes klei worden losgetrokken of doordat brokken klei afschuiven indien er een talud in de klei is ontstaan door een naastgelegen erosiekuil, kan de ongedraineerde schuifsterkte als maat voor de kritieke schuifsterkte worden genomen. De ongedraineerde schuifsterkte kan gerelateerd worden aan de conusweerstand en de draagvermogenfactor (ongedraineerde schuifsterkte = conusweerstand/draagvermogenfactor N_k), zie bijvoorbeeld Begemann H. (1965). De conusweerstand is afgeleid uit de sondeergegevens. Voor de draagvermogenfactor van de holocene klei is $N_k=10$ gehanteerd en voor de stugge klei behorend tot de van de Laag van Wijchen is $N_k=20$ genomen (cf. advies van G. van den Ham, Deltares)

De conusweerstand, de plaatselijke weerstand en het wrijvingsgetal van klei en de andere afzettingen is bepaald op basis van combinaties van boor- en sondeergegevens die afkomstig zijn van dezelfde locatie. Op basis van de boorgegevens is het voorkomen van de lithologische eenheden bepaald en vervolgens is met behulp van de sondeergegevens de mediane conusweerstand, de plaatselijke weerstand en het wrijvingsgetal voor elke eenheid bepaald (Fig. 3). Hierbij is een onderscheid gemaakt tussen locaties van boor- en sondeergegevens ter plekke van een dijk en locaties zonder dijk. Het gewicht van een dijklichaam bovenop de holocene afzettingen zorgt ervoor dat deze afzettingen in elkaar worden gedrukt en de conusweerstand toeneemt, waardoor ook de ongedraineerde schuifsterkte toeneemt. In totaal zijn 42 locaties waarvan boor- en sondeergegevens beschikbaar waren geanalyseerd; 23 combinaties zonder dijk en 19 combinaties met dijk. In tabel 1 is aangegeven voor hoeveel verschillende combinaties van locatie en diepte de conusweerstand, de plaatselijke weerstand en het wrijvingsgetal per lithologische eenheid is uitgerekend.

Tabel 1 Aantal combinaties van locatie en diepte waarmee de gemiddelde waarde voor de conusweerstand, de plaatselijke weerstand en het wrijvingsgetal per lithologische eenheid is bepaald.

Lithologische eenheid	Aantal combinaties
Klei	60
Klei met inschakelingen van dunne zandlagen	1
Klei behorend tot de Laag van Wijchen	21
Humeuze klei	46
Veen	63
Zavel	13
Zand met inschakelingen van dunne kleilagen	2
Zand	22
Rivierduinzand	6
Pleistoceen zand	20
Grindig zand	1

Voor de bepaling van de erodibiliteit van veen is geen correlatiefunctie met conusweerstand of wrijvingsgetal bekend. De erodibiliteit van veen wordt vooral bepaald door de lengte, de structuur en de sterkte van de vezels van de plantenresten in het veen. Gezien de overeenkomsten in riviergedrag bij veen en klei en de gelijke conusweerstand (Fig. 21), is de erodibiliteit van veen in dit onderzoek ook bepaald door de ongedraineerde schuifsterkte te berekenen en een waarde $N_k=10$ aan te nemen voor de draagvermogenfactor.

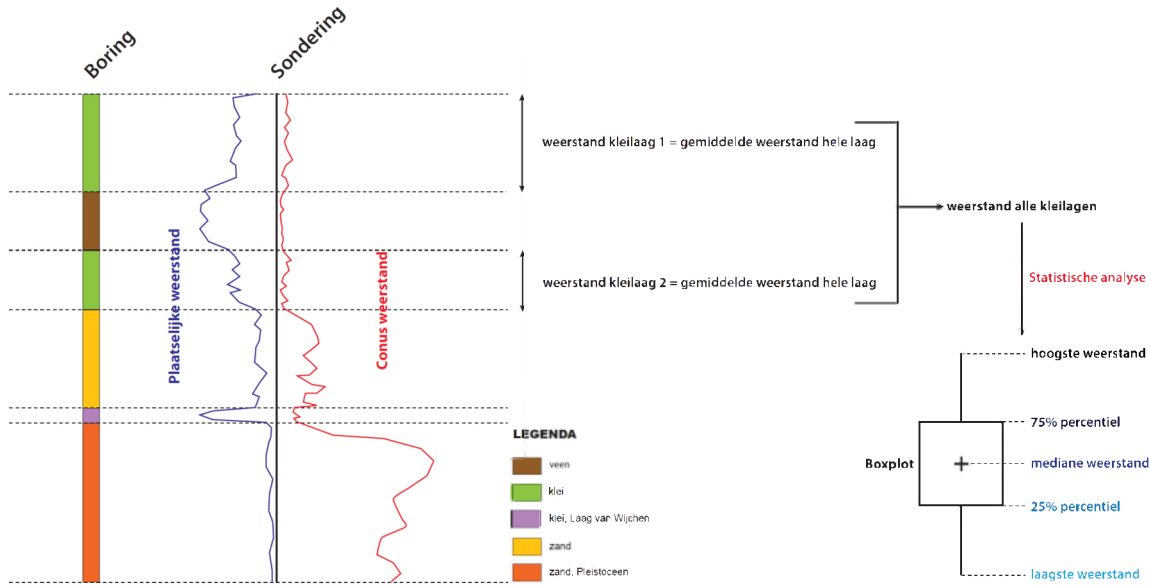
Erodibiliteit van zand

De erodibiliteit van zand is afhankelijk van de kritieke schuifspanning (τ_c). De kritieke schuifspanning is bepaald op basis van de relatie tussen de mediane korrelgrootte en de kritieke Shields waarde (θ_c). De kritieke Shields curve is opgesteld op basis van de Zanke (2003, in: Kleinhans, 2005) benaderingscurve voor korrelgrootten.

Voor korrelgrootten $0.05 < \text{mm} < 5$ geldt:

$$\theta_c = \left(0.145 \text{Re}_p^{-0.333} + 0.045 \cdot 10^{-1100 \text{Re}_p^{-1.5}} \right) \quad (1)$$

Voor korrelgrootten $> 5 \text{ mm}$ geldt $\theta_c = 0.05$.



Figuur 3 Wijze van bepaling mediane conusweerstand, plaatselijke weerstand en wrijvingsgetal voor elke lithologische eenheid op basis van boor- en sondeergegevens, weergegeven in een boxplot.

Het Reynolds nummer kan als volgt berekend worden:

$$Re_p = D_{50}^{3/2} \frac{\sqrt{Rg}}{\nu} \quad (2)$$

waarin R = relatieve ondergedompelde dichtheid (relative submerged density) ($R = (\rho_s - \rho)/\rho$), ρ = de zoetwater dichtheid (1000 kg/m^3), ρ_s = sediment (korrel)dichtheid (2650 kg/m^3), g = zwaartekracht (9.81 m/s^2), D_{50} = mediane korrelgrootte (m) and ν = kinematische viscositeit ($1.33 \cdot 10^{-6} \text{ m}^2/\text{s}$).

Met behulp van vergelijking 1 en 2 is de kritieke Shields waarde uitgerekend voor zand voorkomend in de onderscheiden lithologische eenheden. Met vergelijking 3 is vervolgens de kritieke schuifspanning τ_c (N/m^2 of Pa) berekend.

$$\theta_c = \frac{\tau_{cr}}{(\rho_s - \rho)gD_{50}} \quad (3)$$

In figuur 4 is de relatie tussen de kritieke Shieldswaarde en de mediane korrelgrootte uitgezet. De mediane korrelgrootte is in deze figuur dimensieloos. De mediane korrelgrootte (D_{50}) is als volgt omgerekend naar de dimensieloze korrelgrootte (D^*):

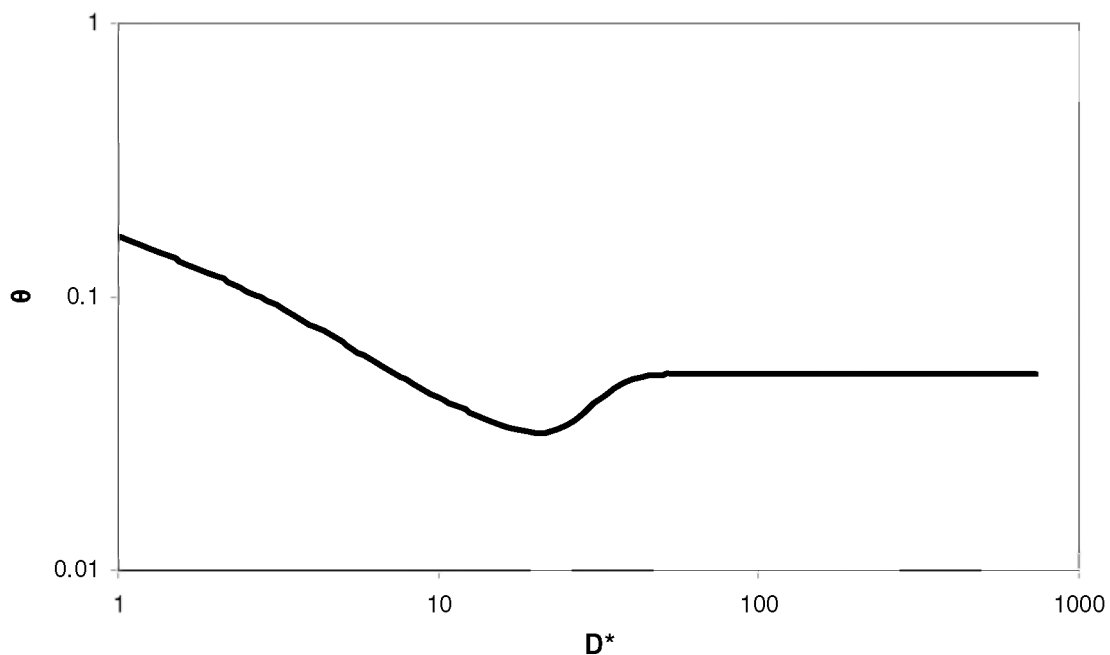
$$D^* = D_{50}^3 \sqrt{\frac{Rg}{\nu^2}} \quad (4)$$

De mediane korreldiameter van het zand is bepaald op basis van boorgegevens van de Universiteit Utrecht van locaties uit het hele onderzoeksgebied. Boorgegevens uit de TNO-DINO database, welke naast de gegevens van de Universiteit Utrecht zijn gebruikt voor het tekenen van de profielen, bevatten vaak geen gedetailleerde beschrijving van de mediane

korreldiameter van de verschillende zandlagen en zijn daarom voor het bepalen hiervan niet gebruikt.

De korreldiameter is opgedeeld in een aantal klassen conform de indeling van De Bakker & Schelling (1966, 1989). De volgende mediane korrelgrootteklassen zijn onderscheiden in het onderzoeksgebied: 105-150, 150-210, 210-300, 300-420, 420-600, 600-850 en >850 μm . Voor de lithologische eenheden beddingzand van de Lek, beddingzand van oudere holocene stroomgordels, rivierduinzand, zandige meeropvullingen en de top van de pleistocene zandlaag is de korrelgrootteverdeling bepaald en uitgezet in een histogram (Fig. 19).

De korrelgrootteverdeling per lithologische eenheid is bepaald door de dikte van alle lagen binnen deze eenheid te sommeren. Vervolgens is de totale dikte per korrelgrootteklasse binnen deze eenheid bepaald. De mediane korrelgrootteklassen zijn procentueel ten opzichte van de totale dikte van het zandpakket binnen een lithologische eenheid weergegeven.



Figuur 4 Relatie tussen de kritieke Shieldswaarde en de mediane korrelgrootte (Zanke, 2003, in: Kleinans, 2005).

2.3 Bepaling kans op het ontstaan van zettingsvloeiing

De kans op het ontstaan van zettingsvloeiing als gevolg van belasting van de oevers en onderwatertaluds van de Lek is bepaald voor de boring/sondering combinaties die ook gebruikt zijn voor de bepaling van de erodibiliteit van klei en veen. Zettingsvloeiing kan optreden op locaties waar losgepakt zand aanwezig is. Zand is losgepakt wanneer er over drie meter of meer in de verticaal zand voorkomt met een relatieve dichtheid kleiner dan 66 procent.

De kans op het ontstaan van zettingsvloeiing is met de vergelijking van Baldi (vergelijking 5) bepaald (cf. advies Geeralt van der Ham, Deltares).

$$R_e = \frac{1}{2,5} * \ln \left(\frac{q_c}{0,14(\sigma_v')^{0,6}} \right) \quad (5)$$

met $R_e = (e_{\max} - e) / (e_{\max} - e_{\min})$ = relatieve dichtheid, gebaseerd op poriegetal e (-), q_c = gemiddelde conusweerstand per meter in de sondering (MPa) en σ_v' = verticale korrelspanning (kPa). Voor de verticale korrelspanning is uitgegaan van een gewicht van grond boven water (dus boven het freatisch vlak) van ongeveer 20 kN/m^3 (1 m levert dan een verticale effectieve spanning van $20 \text{ kN/m}^2 = 20 \text{ kPa}$ op) en voor grond onder water van 10 kN/m^3 (1 m levert dan een verticale effectieve spanning van $10 \text{ kN/m}^2 = 10 \text{ kPa}$ op). De vergelijking van Baldi is omgeschreven zodat de conusweerstand kan worden uitgezet tegen diepte voor een relatieve dichtheid van 33 en 66 procent.

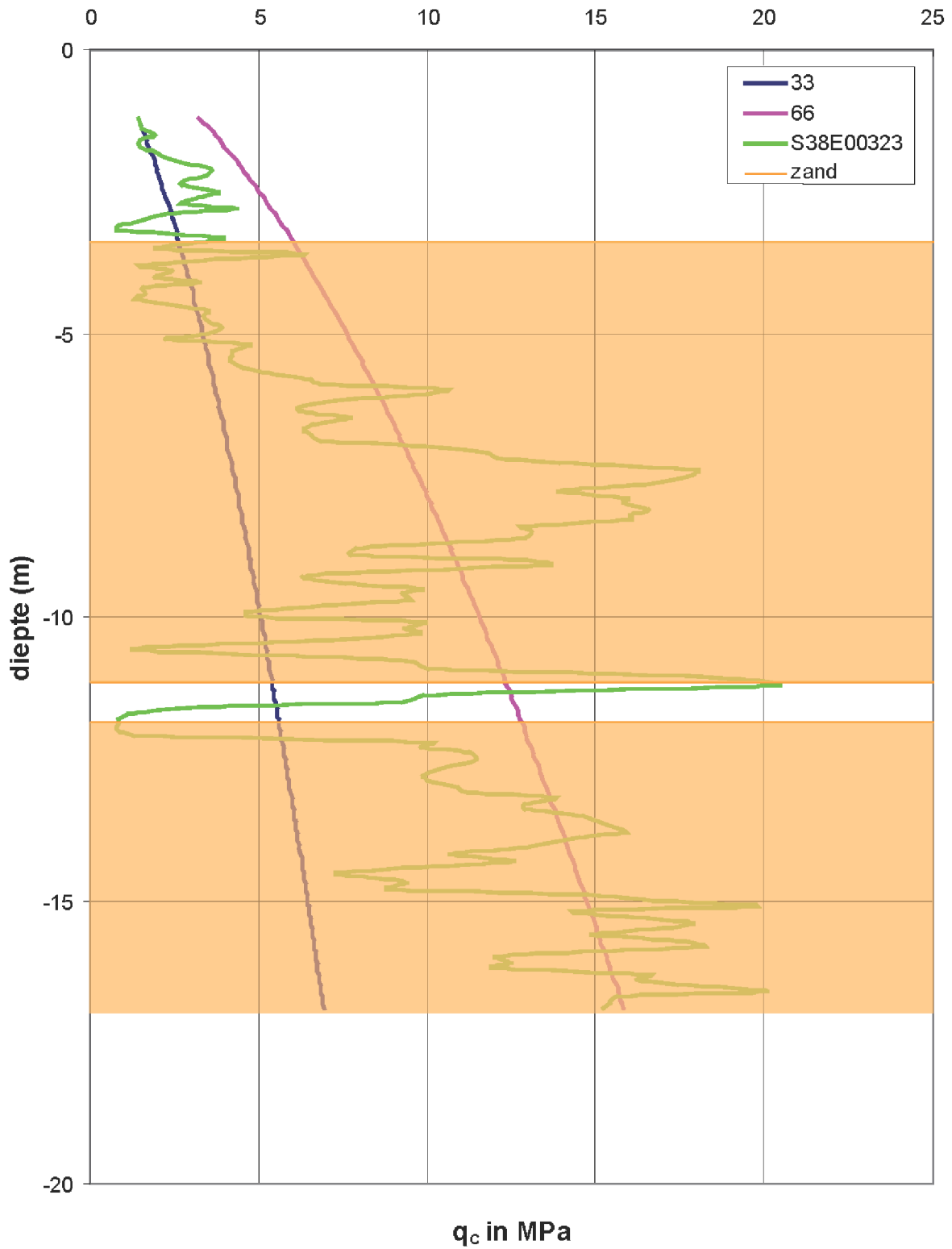
Naast de uitgerekende conusweerstand op basis van de vergelijking van Baldi (Fig. 5, roze en blauwe lijn) is ook de gemeten conusweerstand tegen de diepte uitgezet (Fig. 5, groene lijn). Om te kunnen bepalen hoe groot de kans op het ontstaan van zettingvloeiing is, zijn verder op basis van de boringen die op de zelfde locatie zijn gedaan als de sonderingen, de pakketten zand dikker dan drie meter als transparante gele laag over de berekende en gemeten conusweerstand uitgezet (Fig. 5).

Op basis van de gemaakte figuur is het zand ingedeeld in drie klassen: los (relatieve dichtheid < 33%), matig los (relatieve dichtheid = 33-66%) en vast gepakt (relatieve dichtheid > 66%). De gepaktheid van het zand is bepaald op basis van het meest los gepakte pakket zand dikker dan 3 meter voorkomend in de boring/sondering combinatie. Wanneer meer dan één zandpakket dikker dan 3 meter voorkomt in een boring/sondering combinatie, is uitgegaan van het meest los gepakte zand.

De kans op het ontstaan van zettingvloeiing is vervolgens bepaald op basis van de pakking van het zand volgens onderstaande conversietabel (Tabel 2).

Tabel 2 Conversie van pakking van het zand naar kans op het ontstaan van zettingsvloeiing.

Pakking	Kans op ontstaan zettingsvloeiing
los (relatieve dichtheid < 33%)	Hoog
matig los (relatieve dichtheid = 33-66%)	Matig
vast (relatieve dichtheid > 66%)	laag



Figuur 5 Conusweerstand (q_c) uitgezet tegen de diepte van de gemeten weerstand (groene lijn), de uitgerekende weerstand op basis van een relatieve dichtheid van 33 procent (blauwe lijn) en 66 procent (roze lijn). De transparante gele vlakken geven aan waar zand is onderscheiden in de boring.

3 Lithologische opbouw oevers, onderwatertaluds en geulbasis

In dit hoofdstuk wordt de lithologische opbouw van de ondergrond rondom de Lek beschreven aan de hand van de dwars- en langsprofielen. Hierbij wordt specifiek ingegaan op de samenstelling van de afzonderlijke lagen en de opbouw van de laat-pleistocene en holocene sequentie.

3.1 In de profielen onderscheiden lithologische eenheden

De lithologische eenheden die in de profielen zijn onderscheiden zijn gebaseerd op de indeling in textuurklassen voor klastisch sediment en de indeling op basis van het organische stofgehalte voor sediment dat organisch materiaal bevat. Boorgegevens uit de UU-LLG database zijn geclassificeerd conform de indeling van De Bakker & Schelling (1966), Verbraeck (1984) en Berendsen & Stouthamer (2001). Boorgegevens uit de TNO-DINO database zijn geclassificeerd volgens verschillende indelingssystemen en geconverteerd naar klassen conform de indeling volgens NEN 5104 (Standaard Boorbeschrijvingsmethode versie 5.1; Bosch, 2000, TNO-Rapport 00-141-A). In grote lijnen komen de indelingen met elkaar overeen, in detail verschillen ze iets van elkaar.

Voor dit project is de strikte lithologische klassenindeling aangevuld met de klassen 'Klei met zandlaagjes' en 'Zand met kleilaagjes'. Deze lagen komen voor waar ingeschakelde sublagen van enkele millimeters tot enkele centimeters dikte voorkomen in respectievelijk klei en zand, die niet individueel tussen boringen te vervolgen zijn. Voor dit project is de lithologische klassenindeling verder aangevuld met de eenheden 'Rivierduinzand' en 'Klei, Laag van Wijchen' ten behoeve van het kunnen maken van nader geologisch onderscheid en de specifieke eigenschappen van dit materiaal.

In de dwars- en langsprofielen zijn de volgende lithologische eenheden onderscheiden (Fig. 6):

Veen	Alle soorten veen zijn ingedeeld in deze klasse.
Humeuze klei	Humusrijke, zeer humeuze en matig humeuze zware en lichte klei.
Zware klei	Klei bestaande uit > 35% lutum en <65 % zand en silt.
Lichte klei	Klei bestaande uit 25-35 % lutum en 75-65 % zand en silt.
Klei met zandlaagjes	Zware en lichte klei met ingeschakelde cm dunne lagen zand.
Zavel	Mengsel bestaande uit 10-95 % zand en 8-25 % lutum en silt.
Zand	Zand, overwegend matig grof zand (korrelgroottefractie 210-600 μm), aan de top fijner (korrelgroottefractie 150-300 μm), aan de basis grover (korrelgroottefractie 420-2000 μm).
Rivierduinzand	Zandige lokale pleistocene opduikingen (rivierduinen), overwegend matig grof zand, fractie 210-420 μm .
Zand met kleilaagjes	Zand met ingeschakelde mm-tot-cm dunne lagen klei.
Grof zand	Relatief grof zand (korrelgroottefractie 420-2000 μm).
Grindig zand	Zand met bijmenging van grind (korrelgroottefractie 2-64 mm).
Grind	De korrelgroottefractie van 2-64 mm.
Klei, Laag van Wijchen	Dunne, vaak stugge, kleilaag met bijmenging van zand voorkomend boven op het pleistocene zand.

Het pleistocene zand en de basis van het holocene beddingzand wordt veelal door de klassen 'Grof Zand', 'Grindig Zand' en 'Grind' gerepresenteerd. De klasse 'Zand' representeert de

beddinggordel van de Lek en van de voorlopers van de Rijntakken uit eerdere fasen van het Holoceen in dit deel van de delta. De overige lithologische klassen representeren afzettingen in de overstromingsgebieden naast voormalige riviertakken, oever- en uiterwaardafzettingen van riviertakken, en opvullingen van verlaten geulen van de riviertakken. Nader onderscheid kan op basis van architecturale en geometrische eigenschappen van de lithologische eenheden gemaakt worden bij het lezen van de dwars- en langsprofielen. Met de term ‘rivierduin’ wordt in dit rapport bedoeld; een pleistocene landvorm die door de wind is ontstaan, en later door veenvorming en sedimentatie in de delta begraven is geraakt, en al dan niet is aangesneden door de rivier. Hiermee wordt niet een beddingvorm op de bodem van de geul van de Lek bedoeld.

In hoofdstuk 4 worden de typische korrelgrootteverdelingen binnen de onderscheiden lithologische eenheden nader gespecificeerd.

	Grind		Lichte klei		Donkzand
	Grof zand, grindig zand		Zware klei		Zand met kleilaagjes
	Zand		Klei met zandlaagjes		Humeuze klei
	Zavel		Laag van Wijchen		Veen

Figuur 6 Legenda van de dwars- en langsprofielen met daarin de lithologische klassen die worden onderscheiden. Voor de volledige legenda bij de profielen zie appendix 1.

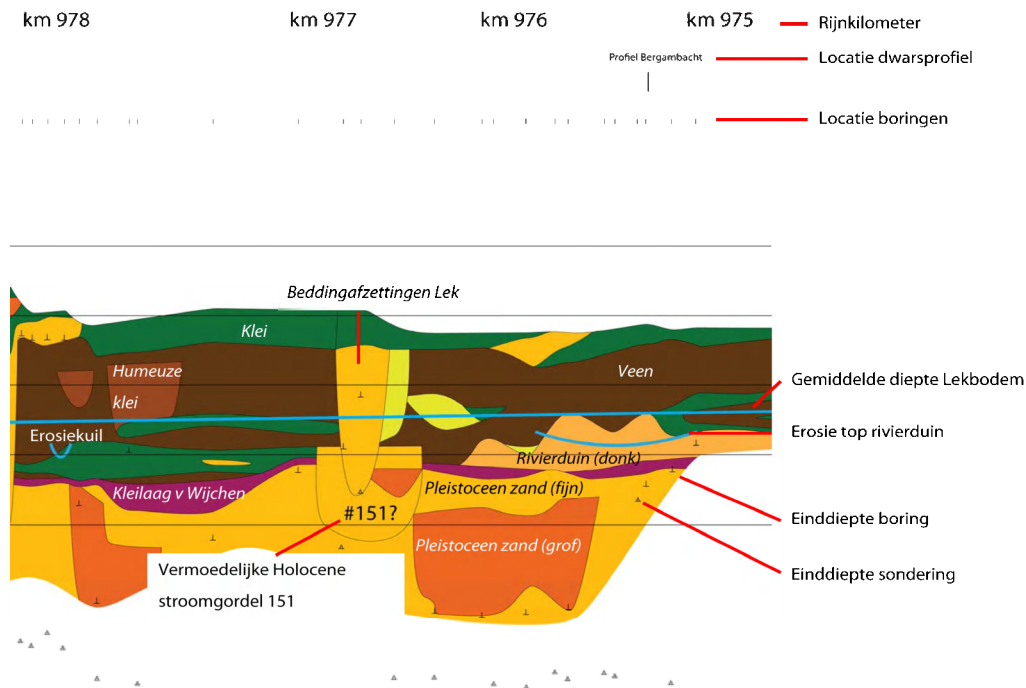
3.2 Overige in de profielen opgenomen informatie

Ten behoeve van het onderzoek naar de stabiliteit van de oevers, de onderwatertaluds en de rivierbodem van de Lek, zijn in de langsprofielen ter referentie twee diepteniveaus voor de geulbasis weergegeven, gebaseerd op multibeam gegevens verzameld door Rijkswaterstaat (contactpersoon: Arjan Sieben). Er is gebruik gemaakt van de meest recente data; gemeten in 2010 in het traject stroomopwaarts van Schoonhoven en gemeten in 2006 stroomafwaarts van Schoonhoven. Een gemiddelde bodemligging is weergegeven als een continue lijn (Fig. 7), en lokale diepere erosie is weergegeven als een onderbroken lijn daaronder (‘erosiekuil’ in Fig. 7). In de dwarsprofielen is de weergegeven bodemdiepte ook conform de multibeam data uit 2006/2010. Het hoogteverschil tussen toppen van beddingvormen en troggen is als indicatie gebruikt voor de dikte van het beddingzand in de Lek onder het waterlichaam.

In de Lek zijn drie waterstanden weergegeven volgens de Waternormalen van Rijkswaterstaat (www.waterbase.nl; http://live.waternormalen.nl/waternormalen_waterstanden.cfm). Deze waterstanden zijn respectievelijk de gemiddelde waterstand bij hoog tij, de gemiddelde waterstand bij laag tij en de getijdengemiddelde waterstand. Hierbij is uitgegaan van een gemiddelde afvoer van 2200 m³/s bij Lobith.

Als randinformatie zijn verder aangegeven: de rivierkilometrering, de locaties waar dwars- en langsprofielen elkaar kruisen, de locaties van de boringen en sonderingen waarop het profiel gebaseerd is, de diepte van de boringen en sonderingen. Waar de profielen zandlichamen van oudere rivieren aansnijden, worden deze met een nummer geïdentificeerd. Deze nummers verwijzen naar de kartering en datering van deze zandlichamen door Berendsen en Stouthamer (2001). In de langsprofielen wordt met deze nummering onderscheid gemaakt tussen die delen waar beddingzand van de Lek zelf wordt aangesneden, en die delen waar

zandlichamen van oudere stroomgordels het langspiegel kruisen. Het zand is als beddingzand van de Lek beschouwd indien in het langspiegel zand werd aangetroffen tussen enkele meters tot ongeveer 10 meter onder maaiveld en er ter plekke van deze zandvoorkomens geen stroomgordel is gekarteerd door Berendsen en Stouthamer (2001; aangepaste versie) en deze bij nadere inspectie van boringen in de omgeving ook niet werd aangetroffen.



Figuur 7 Informatie die in de profielen wordt weergegeven. De eenheden ‘gemiddelde diepte Lekbodembodem’ en ‘erosie rivierduintop’ zijn uitsluitend in de langspiegels opgenomen. Het hier afgebeelde profiel is een schematisch profiel.

3.3 Beschrijving van de dwarsprofielen

In deze paragraaf worden per profiel de volgende aspecten beschreven:

- 1) de representativiteit voor een groter en/of een vergelijkbaar opgebouwd gebied,
- 2) de lithologische en geologische opbouw,
- 3) de lithologische opbouw in relatie tot de geometrie van de watervoerende geul van de Lek.

De ligging van de profielen is weergegeven in figuur 2 en appendix 3 (inclusief zanddiepte en rivierkilometers).

Profiel Hagestein Zuid (rivierkilometer 942.8)

Representativiteit

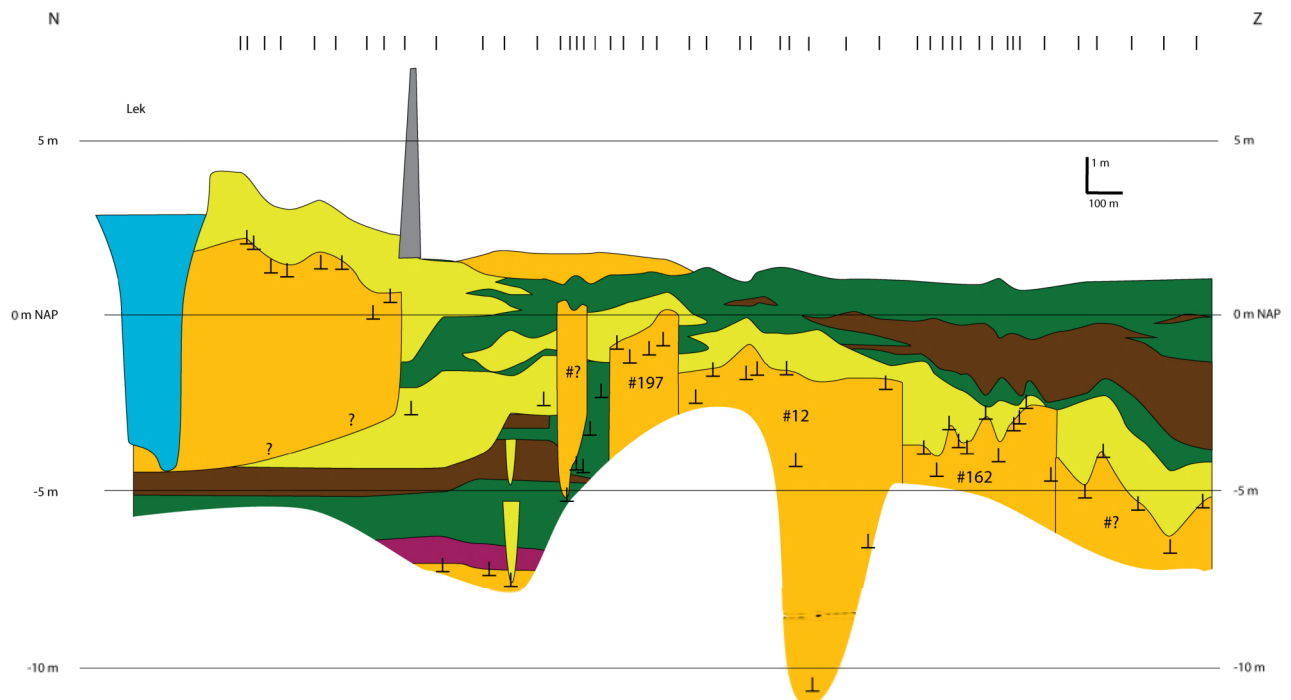
Dit profiel (Fig. 8) is representatief voor trajecten langs de Lek waar kronkelwaardruggen en –geulen voorkomen in de binnenbocht van de rivier en waar diepere zandlichamen (holocene stroomgordels) voorkomen in de nabijheid van de watervoerende geul.

Beschrijving profiel

De top van het pleistocene zand ligt in dit profiel op ongeveer -7 m NAP. Bovenop dit zand ligt de Laag van Wijchen met een maximale dikte van ongeveer 1 m. Enkele honderden meters ten zuiden van de Lek liggen zandlichamen gevormd door oudere holocene stroomgordels in de ondergrond. Vermoedelijk gaat het om vier opeenvolgende generaties stroomgordels. Van de oudste generatie ligt de top van het zand rond -5 m, van de jongste rond 0 m NAP. De zandlichamen liggen hoger naarmate ze dichterbij de Lek (noordelijker) liggen. De zandlichamen zijn bedekt met een pakket van 1 à 2 meter zavel. Deze representeren de oeverafzettingen van de stroomgordels. Tussen deze zandlichamen en de Lek liggen gecompacteerd pakketten klei en veen tussen -7 en -4 m NAP. Deze klei- en veenlagen (komafzettingen) worden op enkele plaatsen onderbroken door zavelige geullichamen (crevasse-afzettingen). Bovenop deze afzettingen ligt een pakket zavel van ongeveer 2 meter dik: dit zijn oeverafzettingen van de Lek en directe voorlopers hiervan.

De beddingafzettingen van de Lek bevinden zich onder de gehele uiterwaard. Op basis van omliggende boringen (B39A0115, B39A0114) is vast te stellen dat de onderkant van deze zandige beddingafzettingen ongeveer samenvalt met de diepte van de huidige basis van de Lekgeul (-4 m NAP bij de geul en -3 m NAP bij de dijk). De top van de beddingafzettingen ligt tussen 1 en 2 meter +NAP en worden bedekt door een uiterwaarddek van zavel.

De basis van het zandlichaam van de beddingafzettingen van de Lek komt vermoedelijk overeen met de diepte van het diepste deel van de geul. Hieronder bevindt zich vermoedelijk nog een laag veen, klei en de Laag van Wijchen van samen ongeveer 1 tot 2 meter dik.



Figuur 8 Lithologische dwarsdoorsnede van de Lek ter hoogte van Hagestein aan de zuidkant van de Lek (rivierkilometer 942.8, naar Gouw & Erkens, 2007, profiel D). Voor de ligging van het profiel zie figuur 2 en appendix 3.

Profiel Hagestein Noord (rivierkilometer N 946.6)

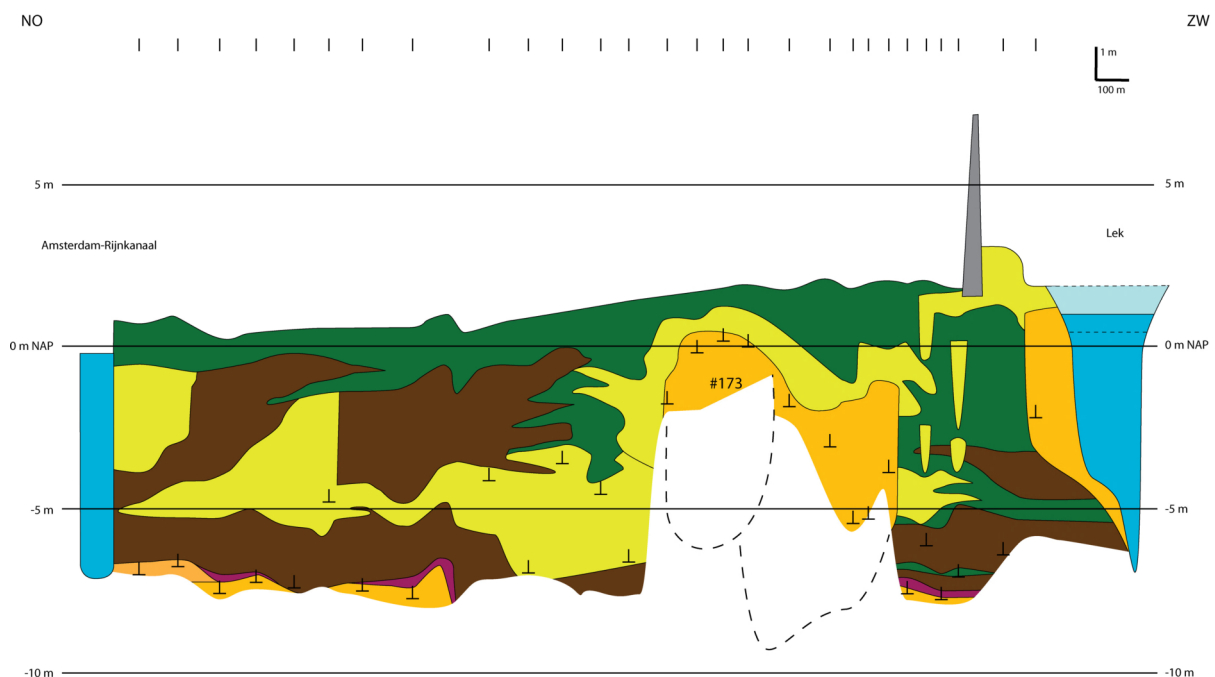
Representativiteit

Dit profiel (Fig. 9) is representatief voor de buitenbochten van de Lek, waar komafzettingen en geïsoleerde stroomgordels voorkomen in de ondergrond.

Beschrijving profiel

De top van het pleistocene zand ligt in dit profiel op ongeveer -7.5 m NAP. Bovenop dit zand ligt de Laag van Wijchen met een maximale dikte van ongeveer 0.5 m. In het noordelijk deel van het profiel ontbreekt deze laag en ligt er een halve meter eolisch zand (= dekzand; korrelgroottefractie 150-210 μm), op grofzandiger pleistocene rivierafzettingen. Tot ongeveer -5 m NAP ligt een veenlaag waarboven zich in vrijwel het gehele profiel een pakket klei en zavel van soms enkele meters dik bevindt. Ten noorden van de Lek ligt stroomgordel #173 met een diepteligging van de top van het zand variërend van -1.5 m tot +0.5 m NAP. Tussen -4 m en -1 m NAP ligt in het grootste deel van het profiel een veenlaag. Dichter bij de Lek is deze veenlaag dunner, omdat deze vertand voorkomt met klei die is afgezet door stroomgordel #173. De bovenste één à twee meter van het profiel bestaat uit een pakket klei. Dit pakket is bijna vier meter dik tussen stroomgordel #173 en de Lek. Tussen deze stroomgordels komen lokaal ook zavelige crevasse- en oeverafzettingen voor.

De lithologische opbouw van de ondergrond ter plekke van de geulbasis is niet bekend. Vermoedelijk ligt de geulbasis net als in profiel Hagestein Zuid in een pakket veen met een ingeschakelde kleilaag op -7 m NAP.



Figuur 9 Lithologische dwarsdoorsnede van de Lek ter hoogte van Hagestein aan de noordkant van de Lek (rivierkilometer 946.6, naar Berendsen, 1982 en Gouw & Erkens, 2007, profiel D). Voor de ligging van het profiel zie figuur 2 en appendix 3.

Profiel Vianen (rivierkilometer 951.8)

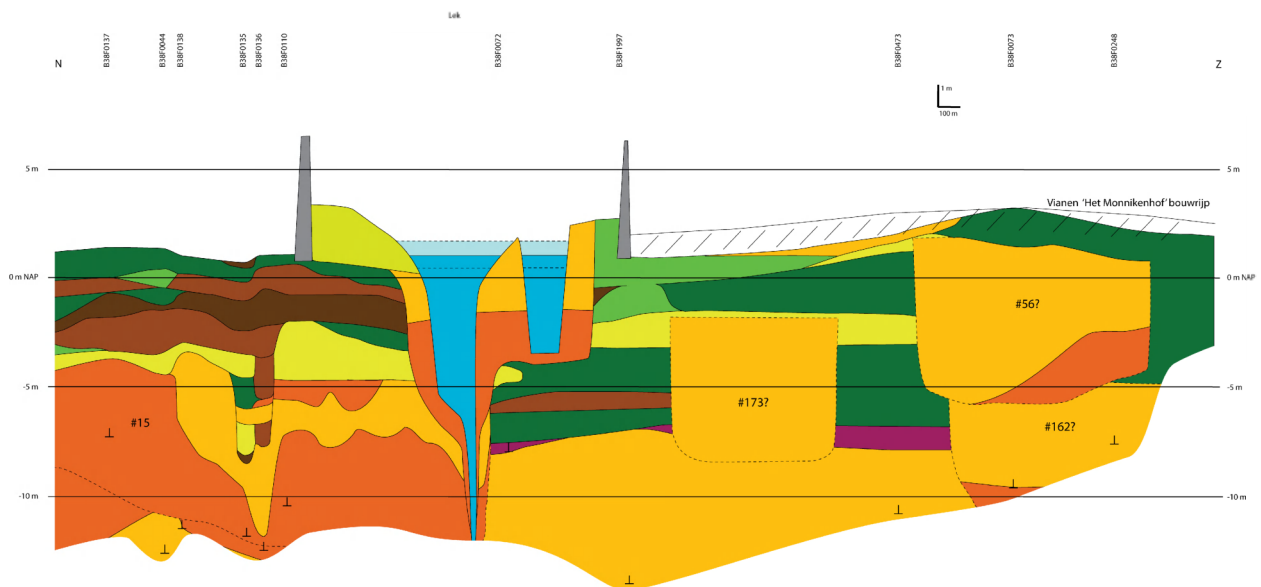
Representativiteit

Dit profiel (Fig. 10) is representatief voor trajecten waar de geul van de Lek zandlichamen van meerdere generaties oudere stroomgordels aansnijdt en de ondergrond relatief zandig is opgebouwd.

Beschrijving profiel

De top van het pleistocene zand ligt in dit profiel rond -7.5 m NAP. Daarop ligt de Laag van Wijchen van ongeveer een meter dik. Dit profiel snijdt zandlichamen van meerdere generaties stroomgordels aan, van oplopende ouderdom en diepteligging. Het oudste systeem (#15) ligt aan de noordkant van de Lek. Onder de Lek is de verbreiding van deze afzettingen niet bekend. Meest waarschijnlijk is dat het zandlichaam van stroomgordel #15 relatief breed is en onder de Lek ligt. Aan de zuidkant wordt dit zandlichaam door de Lek aangesneden. Aan de zuidkant van de rivier bevinden zich de zandlichamen van de stroomgordels #173 en #56 en vermoedelijk ook van #162 en #12. Voor dit profiel waren relatief weinig boorgegevens beschikbaar. In aanvulling zijn daarom boringen uit de wijdere omgeving op het profiel geprojecteerd, langs richtingen volgens de zandbanenkaart van Berendsen & Stouthamer (2001), in de meest actuele interne versie van UU/Deltares. De geprojecteerde stroomgordels zijn met gestippelde contouren weergegeven.

Het beddinglichaam van de Lek reikt tot een gemiddelde diepte van -5.5 m NAP. Op deze diepte bevindt zich een laag humeuze klei. Aan de geulbasis komen lokaal erosiekuilen voor, met dieptes reikend tot -6 à -7 m NAP. De basis van de erosiekuilen is ingesneden in holocene klei of raakt net de Laag van Wijchen. Bij rivierkilometer 952 ligt een zeer diepe erosiekuil tot ruim 12 m -NAP (weergegeven in Fig. 10). De basis van deze erosiekuil ligt enkele meters in het pleistocene zand.



Figuur 10 Lithologische dwarsdoorsnede van de Lek ter hoogte van Vianen (rivierkilometer 951.8). Voor de ligging van het profiel zie figuur 2 en appendix 3.

Profiel Lexmond (rivierkilometer 956.3 en 957, scheefliggend profiel)

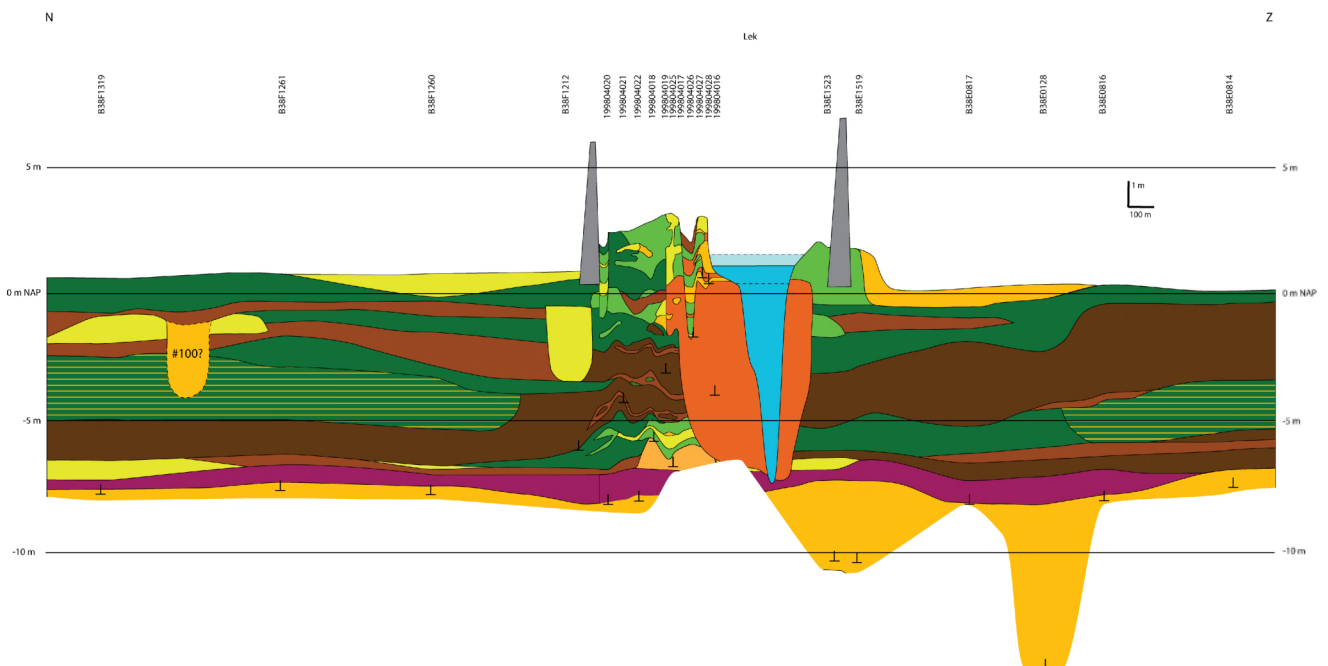
Representativiteit

Dit profiel (Fig. 11) is representatief voor trajecten langs de Lek waar relatief dikke (~7 m) komafzettingen (klei- en veenlagen) voorkomen met een dik pakket beddingafzettingen van de Lek bestaande uit grof zand in de binnenbocht in een scherpe bocht van de rivier.

Beschrijving profiel

De top van het pleistocene zand ligt in dit profiel rond -7.5 m NAP. Daarop ligt de Laag van Wijchen van ongeveer een meter dik. Op -5 m NAP bevindt zich in de uiterwaard een vroeg holocene oeverwal, op een rivierbedding (top zand op -6 m NAP, vermoedelijk #84). Zowel aan de noord- als aan de zuidkant van de Lek bevinden zich dikke komafzettingen (veen en klei). Vijfhonderd meter ten noorden en 1 kilometer ten zuiden van de Lek komt tussen -6 en -3 m NAP een zandig kleilichaam met schelpenresten voor. Soortgelijke afzettingen komen op hetzelfde niveau aan de zuidkant van de Lek voor. Naar de nieuwste karteringsinzichten betreffende het diepere deel van het pakket Holocene delta-afzettingen (Proefschriften Hijma (2009) en Bos (2010); lopende karteringsprojecten UU, TNO, Deltares: K.M. Cohen), betreft het hier een fijn-clastische meeropvulling.

Aan de noordzijde liggen langs de Lek grofzandige beddingafzettingen, over een afstand van enkele honderden meters. De dikte van deze afzettingen is ter plaatse van het profiel nog niet in boringen vastgesteld, de basis ligt tenminste beneden -4 m NAP, vermoedelijk rond -8 m NAP (dit is in overeenstemming met de geuldiepte uit de multibeam dataset). Aan de zuidzijde is in boring B38F0491 zand tot -7.5 m NAP aangetroffen. Op dit zandpakket ligt een uiterwaarddek van ongeveer 2 meter dik dat voornamelijk uit (lichte) klei en zavel bestaat. Naast de zandige beddingafzettingen aan de zuidkant van de Lek, in de buitenbocht, bevinden zich moeilijk erodeerbare komafzettingen.



Figuur 11 Lithologische dwarsdoorsnede van de Lek ter hoogte van Lexmond (rivierkilometer 956.3-957). Voor de ligging van het profiel zie figuur 2 en appendix 3.

In het binnendijkse gebied, ligt zowel aan de noord- als zuidzijde van de winterdijken een 0.5 m tot 1 meter dik zandig overslagpakket aan het maaiveld.

Het diepste punt van de watervoerende geul (~8.8 m NAP) reikt tot in de Laag van Wijchen en mogelijk tot in de top van het pleistocene zand.

Profiel Ameide (E) (rivierkilometer 961)

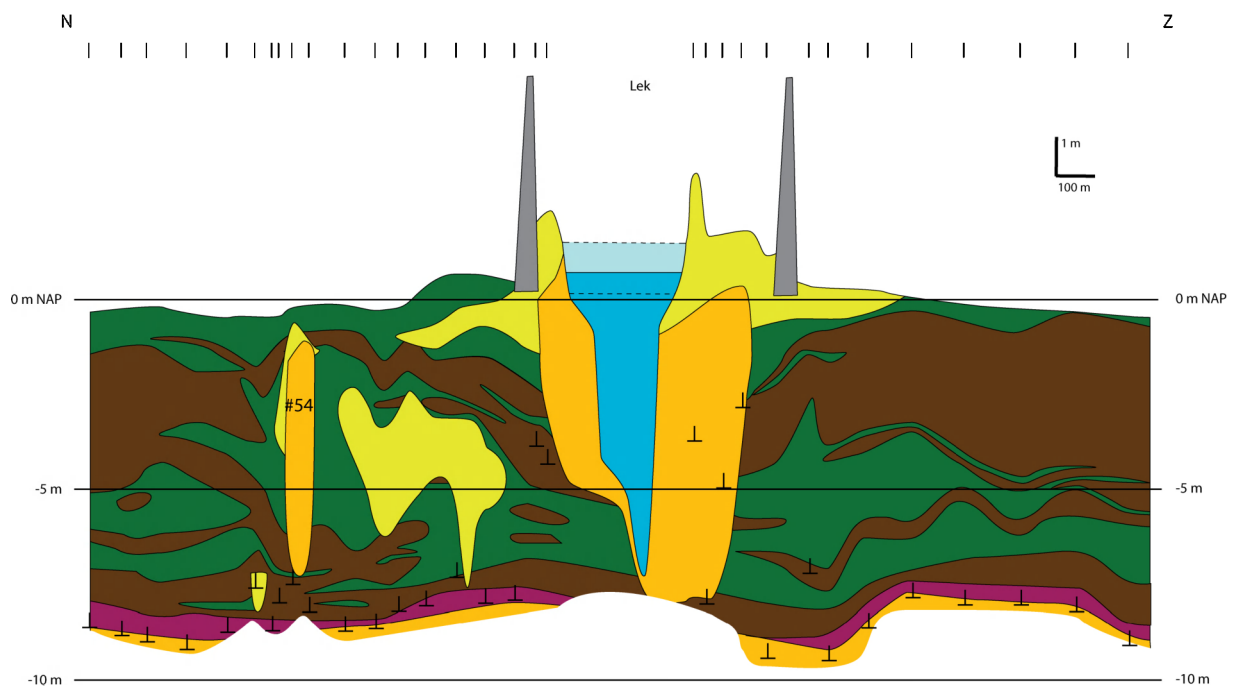
Representativiteit

Dit profiel (Fig. 12) is representatief voor trajecten waar het holocene pakket aan weerszijden van de Lek voornamelijk uit komafzettingen bestaat, dat wil zeggen uit afwisselingen van klei- en veenlagen.

Beschrijving profiel

De bovenkant van het pleistocene zandoppervlak ligt tussen de -7.5 en -9 m NAP. Op dit zand ligt de Laag van Wijchen van ongeveer een halve meter tot maximaal 1 meter dik. Hierboven bevindt zich een veenpakket dat zich vertand met kleilagen van enkele tientallen centimeters tot enkele meters dik. De dikste kleilagen bevinden zich rond -7 en rond -5 m NAP. Ten noorden van de Lek ligt tussen -7 en -3 m NAP een smal zandlichaam en een daaraan gerelateerd geullichaam voornamelijk opgebouwd uit zavel (stroomgordel #54 en flankerend crevassecomplex). Tot dicht onder maaiveld reikt een veenpakket dat bedekt wordt door een kleilaag van een meter dik (basis op circa -1 m NAP). De zandige beddingafzettingen van de Lek bevinden zich onder vrijwel de gehele uiterwaard. De basis van het zandlichaam reikt tot maximaal 7.5 m -NAP.

Het profiel bevindt zich in een bocht van de Lek, de buitenbocht ligt aan de zuidkant, hier ligt de onderkant van de geul op een diepte van maximaal -7 m NAP.



Figuur 12 Lithologische dwarsdoorsnede van de Lek ter hoogte van Ameide (rivierkilometer 961, naar Gouw & Erkens, 2007, profiel E). Voor de ligging van het profiel zie figuur 2 en appendix 3.

In de binnenbocht (noordkant) ligt de bodem rond -4 m NAP. Het diepste deel van de geul heeft zich vermoedelijk ingesneden tot de basis van het zandlichaam van de beddingafzettingen van de Lek. Hieronder bevindt zich vermoedelijk nog een laag veen en de Laag van Wijchen van samen ongeveer 1 tot 2 meter dik. Wat verder stroomafwaarts (tussen rivierkilometer 962 en 963) liggen diepe erosiekuilen tot -9 à -10 m NAP. Deze reiken zeer waarschijnlijk tot in pleistoceen zand.

Profiel Langerak (rivierkilometer 970.4)

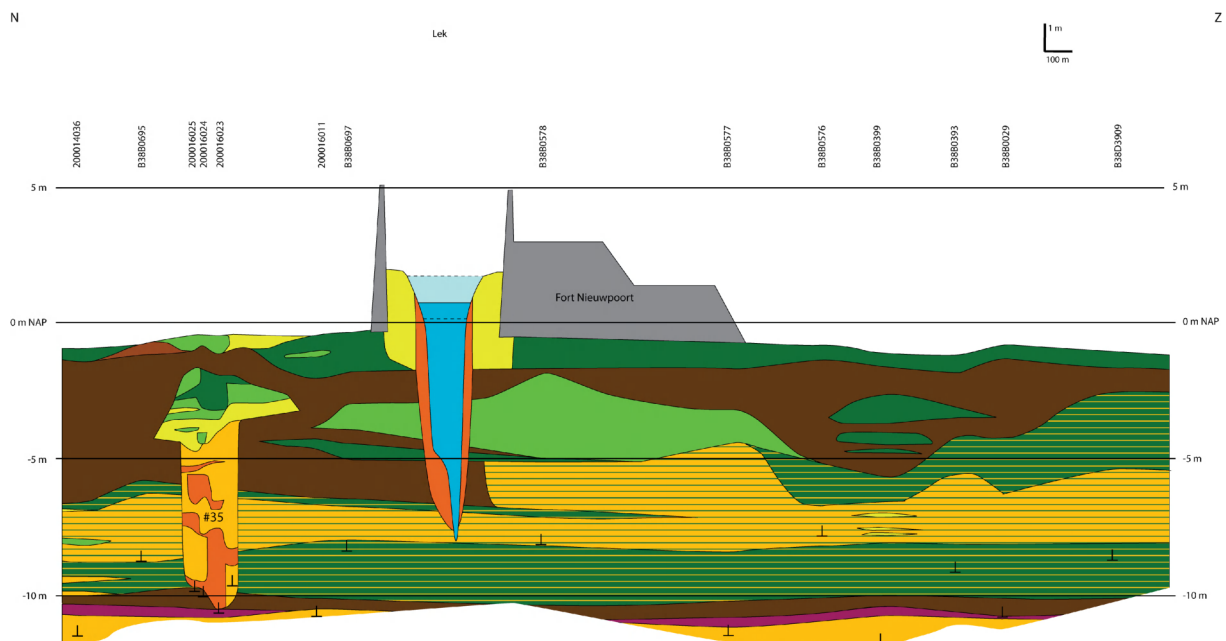
Representativiteit

Dit profiel (Fig. 13) is representatief voor trajecten langs de Lek met op diepte in het Holocene pakket uitgestrekte pakketten zandige meeropvullingen en hogerop overwegend veen- en kleipakketten (komafzettingen), doorsneden met smalle zandlichamen van oude stroomgordels.

Beschrijving profiel

De top van de zandige pleistocene afzettingen ligt in dit profiel rond -11 m NAP, daarboven ligt een dunne Laag van Wijchen van ongeveer 0.5 m dik. Tussen -10.5 en -6 m NAP bevinden zich meerafzettingen, opgebouwd uit een pakket organische meervulling (gyttja; 0.5 m dik) aan de basis, daarop een pakket lichte klei (met enkele zandige laagjes, tussen -10 en -8 m NAP) dat grover wordt naar boven toe en uiteindelijk over gaat in een pakket fijn zand met kleiige laagjes (top -6.5 m NAP). Dit type afzettingen is nabij Schoonhoven in detail beschreven door Bos (2010). De dwars- en langsprofielen uit dit project bevestigen het op uitgestrekte schaalvoorkomen van dergelijke meervullingen langs dit deel van de Lek, aan beide zijden van de rivier. Dit pakket wordt aan de noordkant doorsneden door een jongere stroomgordel (#35).

De geulbasis ligt op -5.5 à -6 m NAP. In dit traject komen veel diepere erosiekuilen voor. De meeste erosiekuilen reiken tot -8 m NAP, de diepste tot -10 m NAP.



Figuur 13 Lithologische dwarsdoorsnede van de Lek ter hoogte van Langerak (rivierkilometer 970.4). Voor de ligging van het profiel zie figuur 2 en appendix 3.

Rondom de Lek ontbreken boorgegevens, maar op basis van de multibeam gegevens waaruit de diepte van de watervoerende geul van de Lek is afgeleid, is het onwaarschijnlijk dat het beddinglichaam tot diep in of onder de meeropvullingen reikt. Het bovenste zandige pakket meeropvulling lijkt door aan de geulbasis te zijn omgewerkt. Dieper liggende kleiiger pakketten uit de meeropvulling lopen naar verwachting onder de Lek door. De diepste erosiekuil reikt niet tot de diepte van het Pleistocene zandoppervlak.

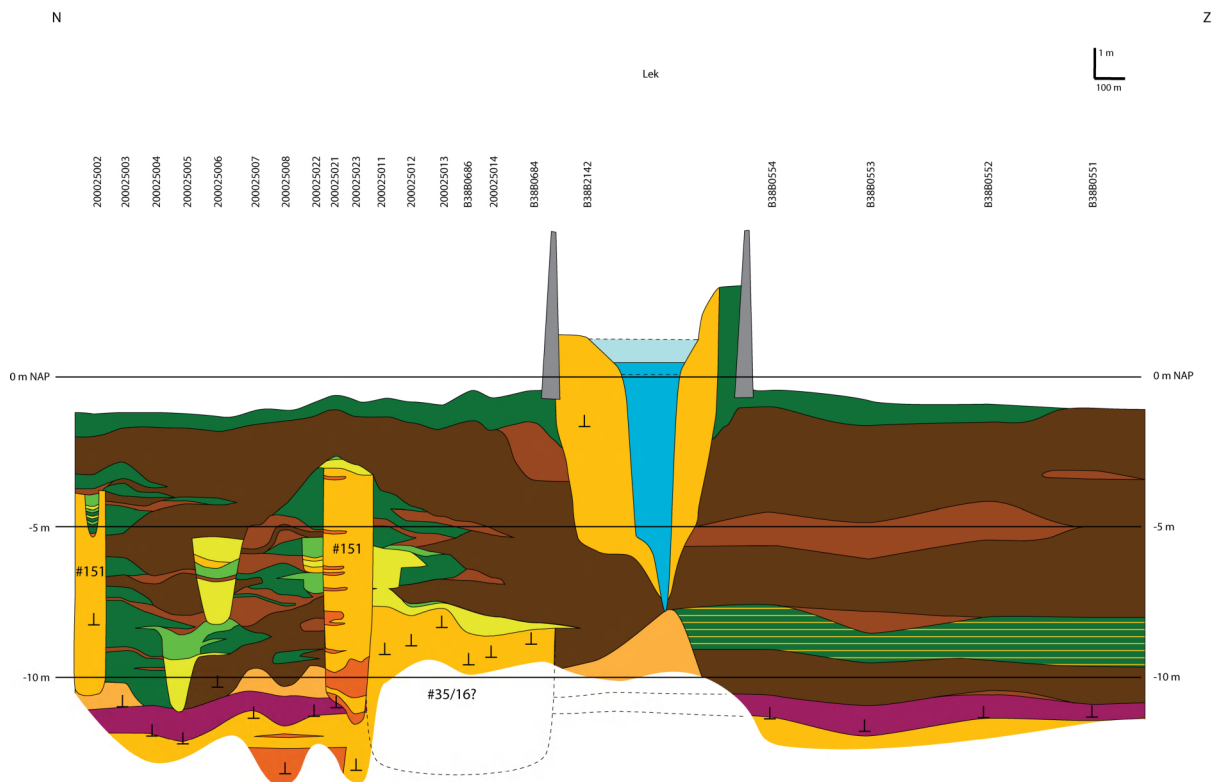
Profiel Schoonhoven (rivierkilometer 972.5)

Representativiteit

Dit profiel (Fig. 14) is representatief voor trajecten langs de Lek waar op diepte in het Holocene pakket zandige meeropvullingen voorkomen met daarboven overwegend veen. Lokaal wordt dit pakket doorsneden door smalle zandlichamen van oudere stroomgordels.

Beschrijving profiel

De top van de pleistocene zandafzettingen ligt rond -11.5 m NAP. De top van het pleistocene zand is bedekt met de Laag van Wijchen van ongeveer 1 m dik. Bovenop deze afzettingen ligt net ten noorden van de Lekgeul een rivierduin. Deze rivierduinafzettingen worden direct ten noorden van de Lek doorsneden door een zandbaan waarvan de bovenkant rond de -7 m NAP ligt. Vermoedelijk betreft het hier stroomgordel #16. Aan de zuidrand van het rivierduin bevinden zich zavelrijke afzettingen van een meeropvulling (tussen -7 en -9 m NAP). De zandige meeropvullingen (zie profiel Langerak) ontbreken hier. Kleiige en organogene meeropvullingen komen wel voor. Dit is in overeenstemming met de bevindingen van Bos (2010) en Hijma (2009). Het holocene pakket bestaat hierdoor overwegend uit relatief erosie-resistent veen en humeuze klei. Aan de noordkant komen op 2 niveaus (rond -8 m NAP en rond -6 m NAP) complexen van crevasse-afzettingen voor, bestaande uit lichte klei en zavel. Deze afzettingen worden doorsneden door twee takken van een jongere stroomgordel (#151).



Figuur 14 Lithologische dwarsdoorsnede van de Lek ter hoogte van Schoonhoven (rivierkilometer 972.5). Voor de ligging van het profiel zie figuur 2 en appendix 3.

Mogelijk snijdt deze erosiekuil de rivierduinafzettingen of een oude stroomgordel aan. Echter, er zijn geen gegevens beschikbaar van de samenstelling van de ondergrond onder of dicht bij de geul. Daarom kan niet met zekerheid vastgesteld worden of het rivierduincomplex dan wel de stroomgordel doorloopt onder de Lek.

De gemiddelde geuldiepte bedraagt -5.5 tot -6 m NAP. In dit traject komen erosiekuilen voor tot -8 m NAP. Stroomafwaarts van dit profiel komt zelfs een erosiekuil van -11 m NAP voor.

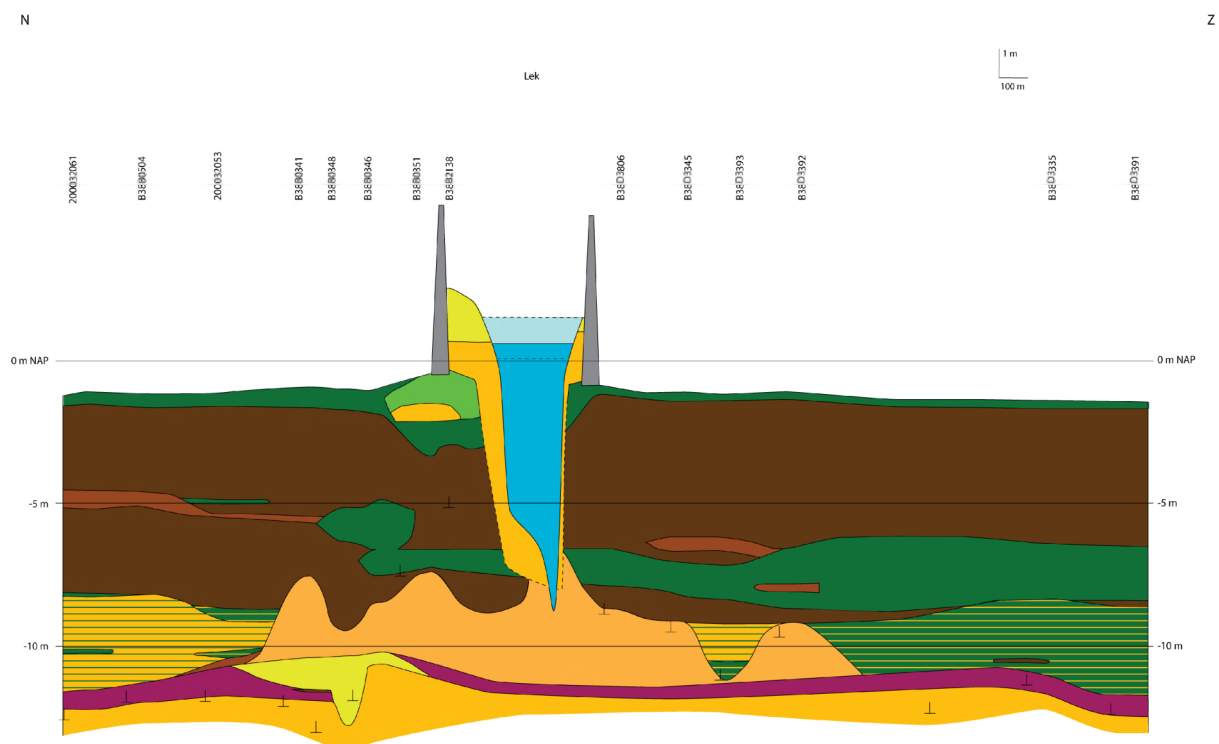
Profiel Bergambacht (rivierkilometer 975.4)

Representativiteit

Dit profiel (Fig. 15) is representatief voor trajecten van de Lek waar de geulbasis (lokaal) pleistoceen rivierduinzand aansnijdt. De Lek doorsnijdt een overwegend uit veen opgebouwd holoceen pakket met ingeschakelde kleilagen.

Beschrijving profiel

De top van het pleistocene zand bevindt zich op -12 m NAP, onder de Laag van Wijchen, hier typisch 1 m dik. In het midden van het profiel, deels onder de Lek, ligt een begraven rivierduin (zand) op de Laag van Wijchen. Aan de noordzijde bedekt dit duincomplex een zavelige geulvulling, die simultaan met de Laag van Wijchen afgezet is. Toppen van rivierduinzand reiken in het profiel tot circa -6.5 m NAP (gebaseerd op het TopPleistocene vlak uit de GeoTOP en Nederland3D geomodellen van TNO). Op diepte komen in het Holocene pakket ten noorden en ten zuiden van het rivierduincomplex tussen -12 en -7 m NAP meeropvullingen voor, opgebouwd uit zavel en klei met dunne zandlaagjes. Mogelijk zijn dit bayhead-delta complexen gevormd in zoetwater-getijdegebied, in plaats van meeropvullingen. Daarboven bevindt zich een 6 tot 7 m dik veenpakket, met ingeschakelde kleilagen.



Figuur 15 Lithologische dwarsdoorsnede van de Lek ter hoogte van Bergambacht (rivierkilometer 975.4). Voor de ligging van het profiel zie figuur 2 en appendix 3.

Het dek in de uiterwaarden is relatief dik, ~3 meter, en bestaat voornamelijk uit klei, fijn zand en zavel. De breedte van het beddinglichaam van de Lek kon niet met boringen in het profiel worden vastgelegd, en is gebaseerd op boringen verder stroomopwaarts en stroomafwaarts.

De maximale geuldiepte bedraagt -8.5 m NAP. De geulbasis is hier ingesneden tot enkele meters in het rivierduinzand. De basis van het brede stuk van de geul ligt op circa -6 m NAP en is ingesneden tot in de bovenste veenlaag.

Profiel Streefkerk (rivierkilometer 979)

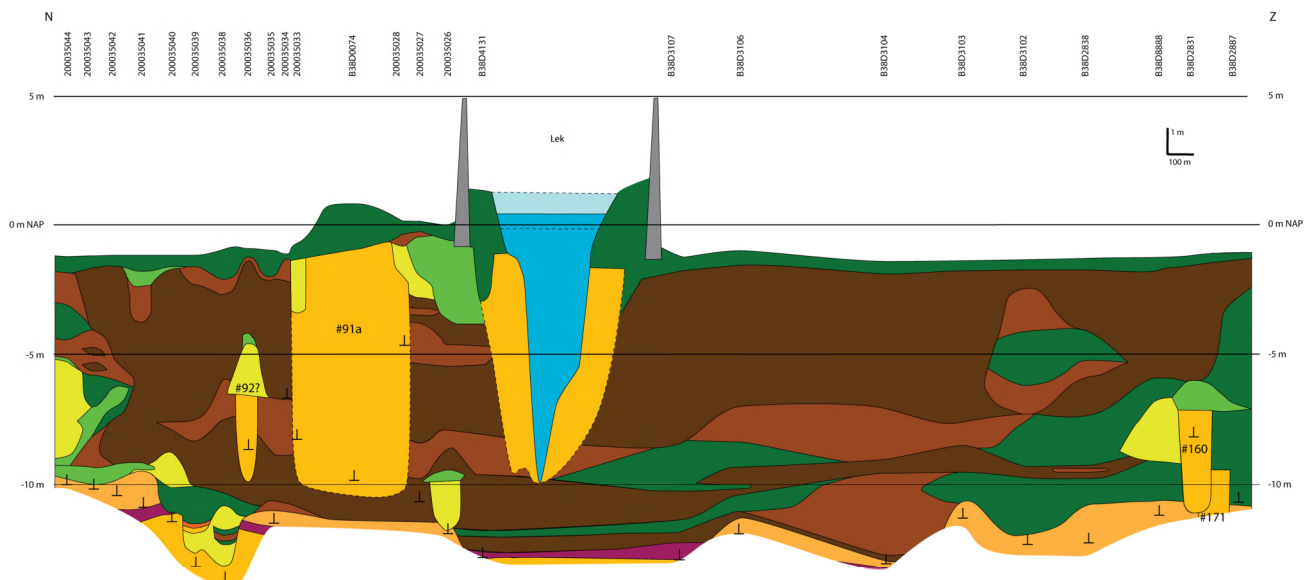
Representativiteit

Dit profiel (Fig. 16) is representatief voor plekken waar de bedding van de Lek overwegend dikke veenpakketten doorsnijdt. Enkele kleilagen en smallere stroomgordels zijn ingeschakeld. Het profiel kruist een bochtafsnijding van de Lek.

Beschrijving profiel

De bovenkant van de pleistocene rivierafzettingen ligt in dit profiel op circa -12 m NAP. Aan de noordzijde lijkt dit oppervlak iets hoger te liggen. Deze afzettingen zijn bedekt door de Laag van Wijchen (ongeveer 0.5 tot 1 m dik). Vermoedelijk loopt deze laag rond de -12 m NAP door, maar dit is in weinig boringen aangetoond. Waarschijnlijk ligt aan de noordkant van het profiel een restgeulopvulling in de pleistocene rivierafzettingen, bestaande uit een afwisseling van zavel, klei en zand. De Laag van Wijchen ontbreekt hier. Ten noorden van deze opvulling ligt de Laag van Wijchen hoger, op ongeveer -11 m NAP. Aan de noord- en zuidkant van het profiel liggen 1 tot 2 meter hoge rivierduinen op de Laag van Wijchen. Deze afzettingen zijn bedekt door een ongeveer 8 meter dik veenpakket, lokaal afgewisseld met zware en humeuze klei afkomstig van oude stroomgordels.

Het profiel kruist een bochtafsnijding van de Lek, die voor de bedijking heeft plaatsgevonden: stroomgordel #91a is een afgesneden loop van de Lek uit de Vroege Middeleeuwen.



Figuur 16 Lithologische dwarsdoorsnede van de Lek ter hoogte van Streefkerk (rivierkilometer 979). Voor de ligging van het profiel zie figuur 2 en appendix 3.

De gemiddelde diepte van de geul is in dit traject 6-7 m –NAP. De geulbasis bevindt zich op deze diepte in het veen. De maximale geuldiepte is -11 m NAP. Hier is de geulbasis ingesneden in veen, humeuze zware klei of zware klei.

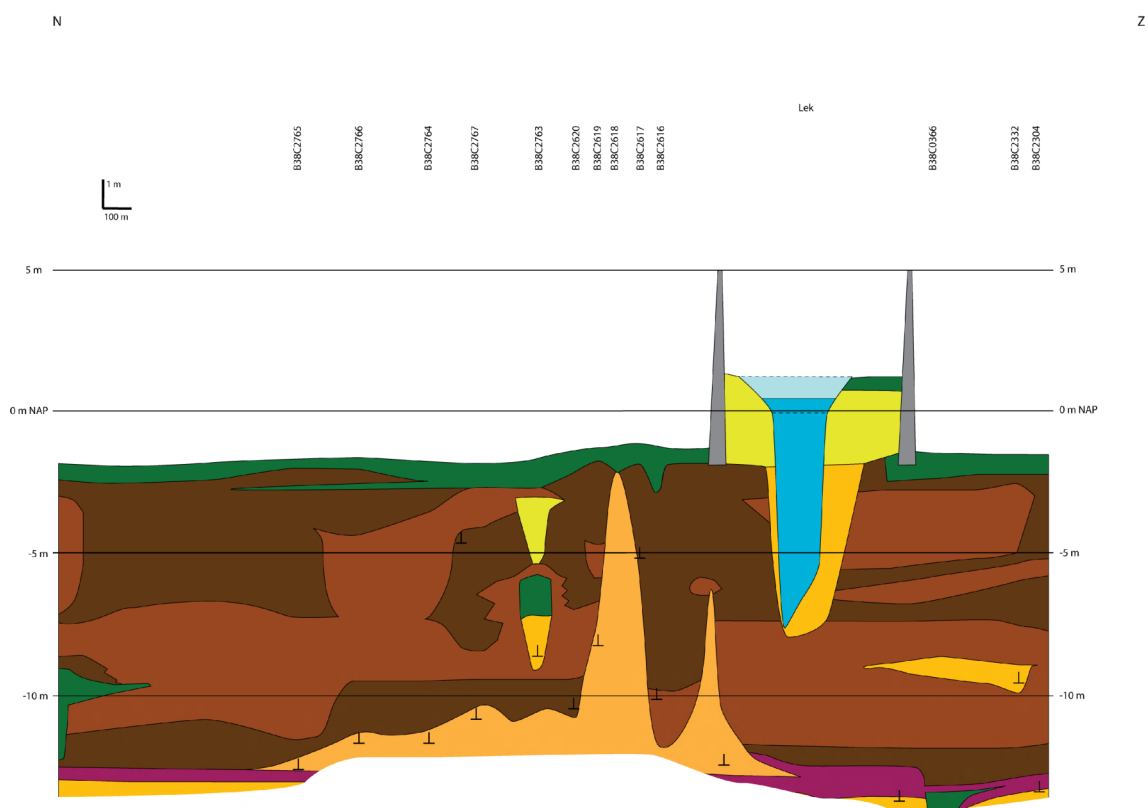
Profiel Opperduut (rivierkilometer 982.8)

Representativiteit

Dit profiel (Fig. 17) is representatief voor trajecten van de Lek waar de geulbasis lokale pleistocene opduikingen (rivierduinzand) erodeert. De Lek doorsnijdt een relatief dik, overwegend venig Holoceen pakket met ingeschakelde kleilagen en smalle zandlichamen van oudere stroomgordels.

Beschrijving profiel

De bovenkant van de zandige pleistocene rivierafzettingen ligt rond -13.5 m NAP. Ter hoogte van de geul van de Lek is de Laag van Wijchen ongeveer 1 meter dik en intern opgebouwd uit een ouder en een jonger deel. Direct aan de noordkant van de geul bevindt zich een uitgesproken rivierduincomplex. De hoogste toppen van het rivierduinzand reiken tot dicht onder maaiveld. Op basis van de beschikbare gegevens is niet te zeggen of de geulbasis van de Lek rivierduinzand aansnijdt. Indien het complex niet wordt aangesneden ligt de basis van de geul in veen en/of slappe humeuze klei dat veel houtresten bevat. Aan de zuidkant van de Lek bevindt zich rond -9 m NAP een zandlens van ongeveer een meter dik.



Figuur 17 Lithologische dwarsdoorsnede van de Lek ter hoogte van Opperduut (rivierkilometer 982.8). Voor de ligging van het profiel zie figuur 2 en appendix 3.

Stroomopwaarts van het profiel, bij rivierkilometer 982 kruist de rivier wel een rivierduinzand-voorkomen (zie langsp profielen), en zijn plaatselijk erosiekuilen aanwezig tot -

11 m NAP. De afwezigheid van zulke erosiekuilen in de nabijheid van dit dwarsprofiel kan worden opgevat als aanwijzing dat hier geen contact is tussen beddingzand en het rivierduinzand.

De gemiddelde diepte van de watervoerende geul bedraagt -6.5 m NAP. De basis van het diepere deel van de geul bevindt zich op -8.5 m NAP.

Profiel Nieuw-Lekkerland (rivierkilometer 986)

Representativiteit

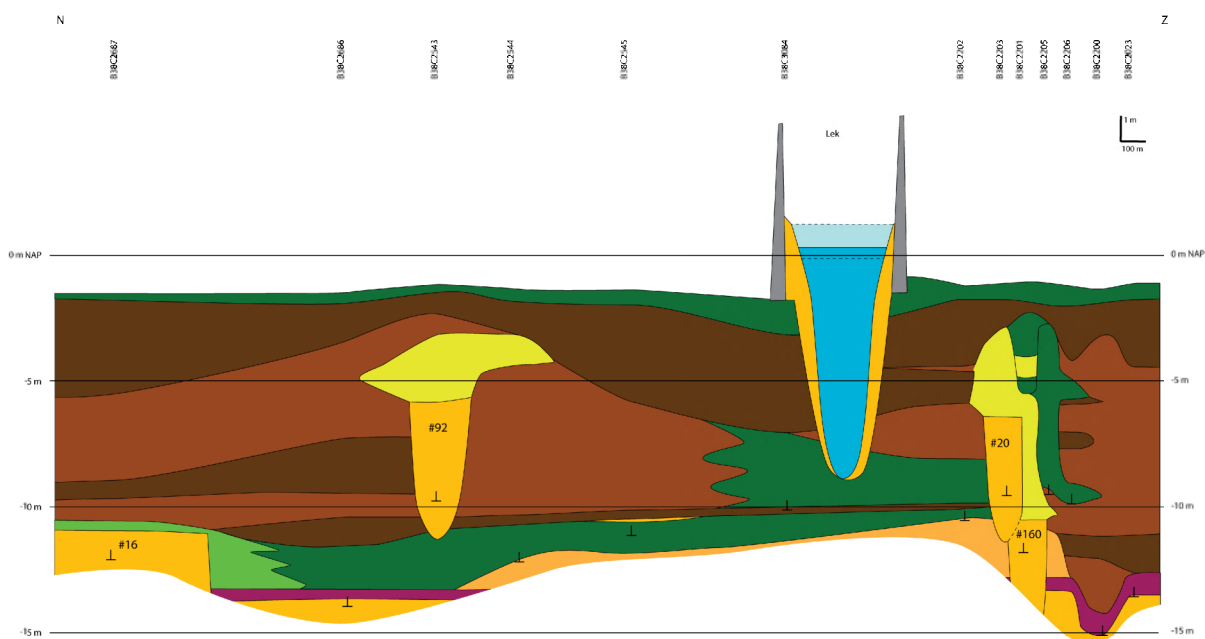
Dit profiel (Fig. 18) is representatief voor locaties waar de Lek is ingesneden in een circa 11 meter dik pakket bestaande uit veen, humeuze zware klei en/of zware klei of een afwisseling daarvan.

Beschrijving profiel

De bovenkant van het pleistocene rivierzand ligt rond -13.5 m NAP. De Laag van Wijchen is 0.5 m dik. De onderste meters van het Holocene pakket zijn van complexe opbouw ten gevolge van de aanwezigheid van een vroeg-holoceen riviersysteem (#16); tussen -11 m en -13 m NAP komt een kleilaag voor, daarbovenop ligt een dik pakket humeuze klei met daarbovenop een veenlaag in dikte variërend van circa 5 m. Dit pakket wordt door drie kleine stroomgordels doorsneden (#160, #20 en #92). Waarschijnlijk is de geul van de Lek ongeveer even breed als het beddinglichaam, waardoor er direct naast de geul weinig tot geen zand aanwezig is in de ondergrond (conform Gouw & Berendsen, 2007).

Op de locatie van het profiel, waar de rivier vrij recht is, heeft de geul een vrij symmetrische doorsnede. De gemiddelde geuldiepte bedraagt -6 m NAP. Zowel 1 kilometer stroomopwaarts als ook 1 kilometer stroomafwaarts komen geuldieptes tot -8 m NAP voor.

Ter plekke van het profiel snijdt de geul de top van de kleilaag aan die op circa -7 m NAP begint.



Figuur 18 Lithologische dwarsdoorsnede van de Lek ter hoogte van Nieuw-Lekkerland (rivierkilometer 986). Voor de ligging van het profiel zie figuur 2 en appendix 3.

3.4 Beschrijving van de langspromielen

Het langspromiel langs de zuidoever loopt van rivierkilometer 988 tot rivierkilometer 946 (Appendix 1) en is gebaseerd op lithologische gegevens verzameld door Waterschap Rivierenland (contactpersoon: Jan Blinde, Deltares) aangevuld met boorgegevens uit de TNO-DINO database. In dit profiel waren gemiddeld 5 tot 7 lithologische boorbeschrijvingen per kilometer beschikbaar. Deze gegevens zijn aangevuld met sondeergegevens. De beschikbare boringen bereikten in de meeste gevallen het pleistocene zand. Waar dit niet het geval was, bereikten de sonderingen deze diepte wel. Het Waterschap Rivierenland heeft op zodanige wijze boringen en sonderingen verzameld, dat voor het leggen van de profiellijn langs de zuidoever de keuze bestond uit 'het profiel buitendijks', 'binnendijks' of 'onder de kruin van de dijk'. Voor de laatste optie is niet gekozen omdat bekend is dat een dijklichaam aanzienlijke lokale compactie (zetting) van onderliggende klei- en veenlagen veroorzaakt. Zouden deze lagen in hun gecompacteerde, diep weggezakte positie onder de dijk worden weergegeven, dan geeft dit een verkeerd beeld van de diepte waarop de lithologische eenheden in de overige delen van uiterwaard en polder voorkomen. Langs het grootste deel van de Lek is voor het binnendijkse (polderzijde) profiel gekozen, omdat hier meer gegevens beschikbaar waren. Bovendien was aan de binnendijkse zijde de kans het kleinst dat het profiel werd verstoord door de beddingafzettingen van de Lek, zodat een zo goed mogelijk beeld van de afzettingen waarin de Lek is ingesneden kon worden verkregen. Op sommige locaties werden de profielen van Waterschap Rivierenland over een afstand van een aantal kilometer onderbroken. Hier is het profiel aangevuld met boringen uit de TNO-DINO database, de nummers van deze boringen zijn in het profiel aangegeven.

Het langspromiel langs de noordoever van de Lek loopt van rivierkilometer 990 tot rivierkilometer 947 (Appendix 1) en is gebaseerd op boorgegevens uit de UU-LLG en TNO-DINO databases. Gedeelten van het profiel lopen net binnendijks, andere gedeelten net buitendijks – afhankelijk van de beschikbaarheid van boringen van de gewenste diepte. Anders dan in het zuidoeverprofiel, waren voor het noordoeverprofiel gemiddeld slechts 3 tot 5 lithologische boorbeschrijvingen per kilometer beschikbaar. Er is geprobeerd zo diep mogelijke boringen te selecteren, zo dicht mogelijk bij de Lek. Dit was afwisselend net binnen en net buitendijks het geval en heeft er toe geleid dat de profiellijn de dijk veelvuldig kruist.

3.4.1 Opdeling langspromielen in trajecten

De totale dikte van het holocene pakket is stroomafwaarts langs de Lek aanzienlijk groter dan stroomopwaarts. Daarmee samenhangend verschilt ook de typische opbouw van het holocene pakket. Om deze reden worden in de beschrijving van de langspromielen drie trajecten onderscheiden en in aparte paragrafen besproken.

Traject 1: stroomafwaarts van rivierkilometer 977.

Hier komt een relatief dik pakket humeuze klei en veen voor, lokaal afgewisseld met rivierduinzand. Het pleistocene zand dat komt voor op een diepte variërend van -11 m NAP bij km 977 en dieper dan -15 m NAP vanaf km 990. Het zuidelijk profiel sluit ter hoogte van km 988 aan op het langspromiel voor de Noord uit het rapport Stouthamer en De Haas (2011). De dwarsprofielen Streefkerk, Opperduit en Nieuw Lekkerkerk kruisen de langspromielen in dit traject.

Net stroomafwaarts, ter hoogte van km 992 kruist ook dwarsprofiel A-A' van Hijma (2009).

Traject 2: tussen rivierkilometer 977 en rivierkilometer 962.

Hier zijn meeropvullingen aanwezig in de ondergrond die vaak zandig van samenstelling zijn. Pleistoceen zand komt voor op een diepte van circa -10 m NAP. De dwarsprofielen Langerak, Schoonhoven en Bergambacht kruisen de langsprofielen in dit traject.

Traject 3: stroomopwaarts van rivierkilometer 962.

Hier kruist de Lek oudere stroomgordels. Het pleistocene zand komt voor op een diepte variërend van -7 m NAP bij km 947 tot -10 m NAP bij km 962. De dwarsprofielen Hagestein Noord, Hagestein Zuid, Vianen, Lexmond en Ameide kruisen de langsprofielen in dit traject.

Langsprofielen traject 1 (rivierkilometer 990-977)

Representativiteit

- De top van het pleistoceen zand wordt ruim beneden -10 m NAP aangetroffen. Het beddinglichaam van de Lek is niet tot deze diepte ingesneden, behalve in lokale extreem diepe erosiekuilen.
- Het holocene pakket is relatief dik en bestaat overwegend uit humeuze klei en veen.
- De Lek kruist enkele zones met pleistocene rivierduinencomplexen en snijdt daar de toppen van het rivierduinzand aan.
- De gordel van beddingafzettingen van de Lek is hier relatief smal. De Lek heeft zich hier sinds haar ontstaan (in de eerste eeuwen na Chr.) nauwelijks lateraal verplaatst: het is een 'rechte rivier'.

Beschrijving profielen

In traject 1 ligt de top van het pleistocene zand tussen -15 m (km 990) en -11 m NAP (km 977). De helling in stroomafwaartse richting representeert het dalverhang van de Rijn aan het eind van het Pleistoceen. Op een drietal locaties wordt de top van het pleistocene zand 1 à 2 m dieper aangetroffen: tussen km 991 en 989, tussen km 985 en 983 en tussen km 980 en 977 in het noordelijke langsprofiel, en op vergelijkbare positie ook in het zuidelijke langsprofiel (984-983 km en 978-977 km). Het betreft hier aansnijdingen van vroeg holocene geulen. Vrijwel overal is het pleistocene zand bedekt door de Laag van Wijchen, met een dikte van circa 1 m.

Nabij km 983 en km 980 is de Laag van Wijchen relatief dun en plaatselijk afwezig. Rivierduinzand komt lokaal voor, overwegend op relatief hoog gelegen delen van het pleistocene zandoppervlak. De grootste rivierduinzandcomplexen zijn te vinden bij km 988-986 (zuidprofiel), km 983-981 (noordprofiel) en km 981-980 (zuidprofiel). Op de eerste locatie is geen direct contact tussen het rivierduinzand en het zandlichaam van de Lek (dwarsprofiel Nieuw Lekkerland), op de laatste locatie heeft de geul van de Lek het rivierduinzand wel aangesneden. Het pakket holocene afzettingen is opgebouwd uit veen, zware klei en veel humeuze klei. Op een dunne laag veen (enkele decimeters dik), volgt veelal een kleilaag van midden holocene riviersystemen (1 à 2 m dik) bedekt door een dunne laag veen. Hierboven bevindt zich een tweede pakket rivierafzettingen (-11 en -7 m NAP), een slappe humeuze klei met veel houtresten (in boorbeschrijvingen van betere kwaliteit). Het betreft hier rivierafzettingen die in zeer natte verdrinkende zoetwater-getijde komgebieden zijn afgezet (Hijma et al., 2009; 'Terbregge Laagpakket'), welke aansluiten op afwisselend zand-klei gelaagde pakketten van estuariene oorsprong op vergelijkbare diepte stroomafwaarts onder Rotterdam (Wormer Laagpakket, in profielen van Stouthamer & De Haas, 2010). Ook in even oude pakketten verder stroomopwaarts komen meer zandige inschakelingen voor (opvullingen van meren, zie traject 2). In het traject km 990-977 bevat het Holocene pakket

tussen -7 en -11 m NAP relatief weinig zandige inschakelingen. Het zandlensje bij km 982 (zie langsprofiel zuidoever en dwarsprofiel Opperduit) vormt hierop een uitzondering. Boven -7 m NAP komt veen voor. Bij de Lek is deze veenlaag met ongeveer 2 m klei bedekt.

Op een aantal plekken kruisen de zandlichamen van Holocene stroomgordels de langsprofielen (bijvoorbeeld: km 976-977), maar dat is in dit traject relatief zeldzaam. Veel vaker schampt het zandlichaam van de Lek zelf het profiel (top van het zand in de regel rond 2 m –NAP).

Langsprofielen traject 2 (rivierkilometer 977-962)

Representativiteit

Kenmerkend voor dit traject zijn:

- De top van het pleistoceen zand wordt rond -10 m NAP aangetroffen. Het beddinglichaam van de Lek is niet tot deze diepte ingesneden, behalve in lokale extreem diepe erosiekuilen.
- Het holocene pakket is relatief dik en bestaat overwegend uit humeuze klei, klei en veen.
- De Lek kruist enkele zones met pleistocene rivierduinencomplexen en snijdt daar de toppen van het rivierduinzand aan.
- In de ondergrond komen meeropvullingen voor die vaak zandig van samenstelling zijn en door de Lek worden aangesneden.
- In dit traject zijn een aantal zeer scherpe bochten aanwezig in de watervoerende geul van de Lek, met erosiekuilen in de buitenbocht. De diepte van erosiekuilen op deze plaatsen lijkt het gevolg van de afwijkende stromingscondities in de scherpe bocht te zijn, en niet te wijzen op lokale afwijkingen in de samenstelling van de ondergrond.
- Tussen km 966 en 961 liggen zandlichamen van afgesneden meanderbochten van de Lek (# 91a).

Beschrijving profiel

In traject 2 ligt de top van het pleistocene zand ligt in deze sectie tussen de -12 m NAP (bij km 977 in het noordprofiel) en -9 m NAP. De helling in stroomafwaartse richting representeert het dalverhang van de Rijn aan het eind van het Pleistoceen. Vrijwel overal zijn deze afzettingen bedekt door de Laag van Wijchen, met een dikte van circa 1 m.

Op de Laag van Wijchen komt lokaal rivierduinzand voor. De grootste rivierduincomplexen komen voor bij km 977-974 (noord- en zuidprofiel), 973-972 (zuidprofiel), 972-971 (noordprofiel). Op de eerste lokatie (dwarsprofiel Bergambacht) is de geulbasis ingesneden tot enkele meters in het rivierduinzand. Op de tweede lokatie (dwarsprofiel Schoonhoven) is dit mogelijk ook het geval, maar dit is door het gebrek aan gegevens niet met zekerheid vast te stellen. Het pakket holocene afzettingen is opgebouwd uit veen, zware klei en humeuze klei. Op een dunne laag veen (enkele decimeters dik), ligt tussen -11 en -5 m NAP veelal een pakket meeropvullingen. De lithologische opbouw van de het pakket meeropvullingen is op pagina 25 (dwarsprofiel Langerak) in detail beschreven. Op de meeropvullingen bevindt zich een pakket veen (tussen -7 à -8 m NAP en -1.5 à -2 m NAP). Lokaal wordt de veenlaag onderbroken door zandlichamen, zavel- en kleilagen die zijn afgezet door midden holocene riviersystemen (zie bijvoorbeeld km 973-971 noord- en zuidprofiel). De veenlaag wordt bedekt door een laag klei tot (lokaal) 3 m dikte (km 968 zuidprofiel). Deze klei is afgezet door de Lek. De hoger gelegen zandlichamen worden beschouwd als beddingafzettingen van de Lek (bijvoorbeeld tussen 969 en 966 in het noordelijke profiel). Tussen 966 en 962 ligt aan de

zuidkant van de Lek een aantal afgesneden bochten (#91a). Rond 962 bevindt zich ook een dergelijke afgesneden bocht in het noordprofiel. De basis van deze afzettingen reikt gemiddeld tot -8 m NAP, grotendeels boven het pleistocene oppervlak. Op km 970.5, 972 (noordprofiel) en rond km 966 en 968 (zuidprofiel) liggen ondiepe kleiige zavelige lichamen. Vermoedelijk zijn dit crevasse-afzettingen.

Langsprofielen traject 3 (rivierkilometer 962-946)

Representativiteit

- De top van het pleistocene zand ligt boven -10 m NAP (variërend van -7 tot -10 m NAP).
- De Lek kruist meerdere oudere stroomgordels die als zandbanen aanwezig zijn in de ondergrond.
- De gordel van beddingafzettingen van de Lek is hier relatief breed. De Lek heeft zich hier sinds haar ontstaan lateraal verplaatst. In dit traject komen scherpe en matige scherpe rivierbochten voor.

Beschrijving profiel

In traject 3 ligt de top van het pleistocene zand tussen -10 m NAP (bij km 962 in het noordprofiel) en -6.5 m NAP (tussen km 954-953 in het noordprofiel). De helling in stroomafwaartse richting representeert het dalverhang van de Rijn aan het eind van het Pleistoceen. Vrijwel overal is het pleistocene zand bedekt door de Laag van Wijchen. Waar het pleistocene zand lager ligt, is de Laag van Wijchen ongeveer een meter dik, op de hogere delen is deze laag dunner. Dit is vooral goed te zien in het noordelijke profiel. Bij km 961 komt in beide profielen een bescheiden rivierduincomplex voor. In het zuidelijk profiel ligt de bovenste top van deze rivierduinen op circa -4 m NAP.

Het pakket holocene afzettingen bestaat uit een afwisseling van klei- en veenlagen van meestal enkele meters dik. Deze lagen worden doorsneden door zandlichamen van oudere stroomgordels. Veen komt in dit traject duidelijk minder vaak voor dan stroomafwaarts. Op de Laag van Wijchen ligt een laag veen benedenstrooms van 956 en bovenstrooms van 950. Ook ligt er een veenlaag aanwezig tussen -5 en -2 m NAP.

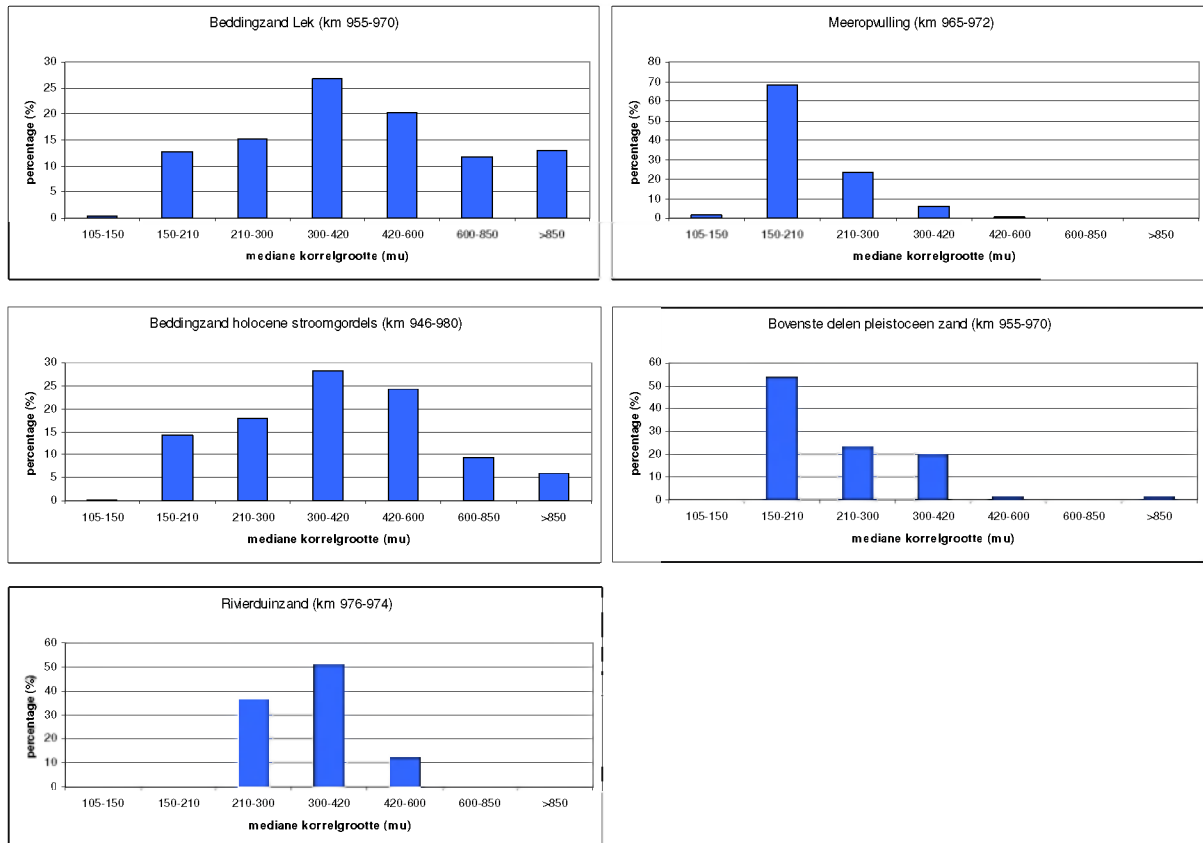
In dit traject komen relatief veel zandlichamen voor, zowel van de Lek als van oudere stroomgordels. Nabij Vianen is een breed zandlichaam van het Benschop systeem aangetroffen (#12 en #15). Deze afzettingen zijn ook in het dwarsprofiel Vianen gevonden aan de noordzijde van de Lek. Deze stroomgordel ligt in het zuidprofiel tussen km 949 en 951 en in het noordprofiel tussen km 949 en 952. De huidige Lek snijdt deze afzettingen aan tussen km 949 en 951. Verder komen op de volgende locaties zandlichamen van oude stroomgordels voor: in het zuidprofiel tussen km 955 en 952, en ter hoogte van km 957. , in het noordprofiel tussen km 960-961. #54 (km 961 noordprofiel) #3 (km 960 zuidprofiel) en #35 (km 960 en 961 noordprofiel). Het is mogelijk dat als gevolg van de soms beperkte dichtheid van de boor- en sondeergegevens relatief smalle stroomgordels gemist zijn, met name in het noordelijke deel. De vermoedelijke ligging van de stroomgordels is met een stippellijn ingetekend. De basis van deze zandlichamen ligt vrijwel altijd onder de bovenkant van het pleistocene zand, deze zandlichamen zijn dus gefundeerd.

Zandlichamen van de Lek zelf komen voor in het noordprofiel bij km 962 (afgesneden bocht #91a), bij km 954, tussen km 953 en 952 en tussen km 949 en 948 (beddingafzettingen van de huidige Lek). In het zuidprofiel komen zandlichamen voor bij km 959 (afgesneden bocht #91a), bij km 959 en tussen km 953 en 951 (beddingafzettingen van de huidige Lek).

4 Erodibiliteit van oevers, onderwatertaluds en rivierbodems

4.1 Erodibiliteit van zand

De erodibiliteit van zand is vastgesteld op basis van de relatie tussen de mediane korrelgrootte en de kritieke Shields waarde (zie §2.2.1). De mediane korrelgrootteverdeling van zand dat voorkomt in de lithologische eenheden: beddingzand van de Lek, beddingzand van oudere holocene stroomgordels, rivierduinzand, zandige meeropvullingen en de top van de pleistocene zandlaag is weergegeven in figuur 19.

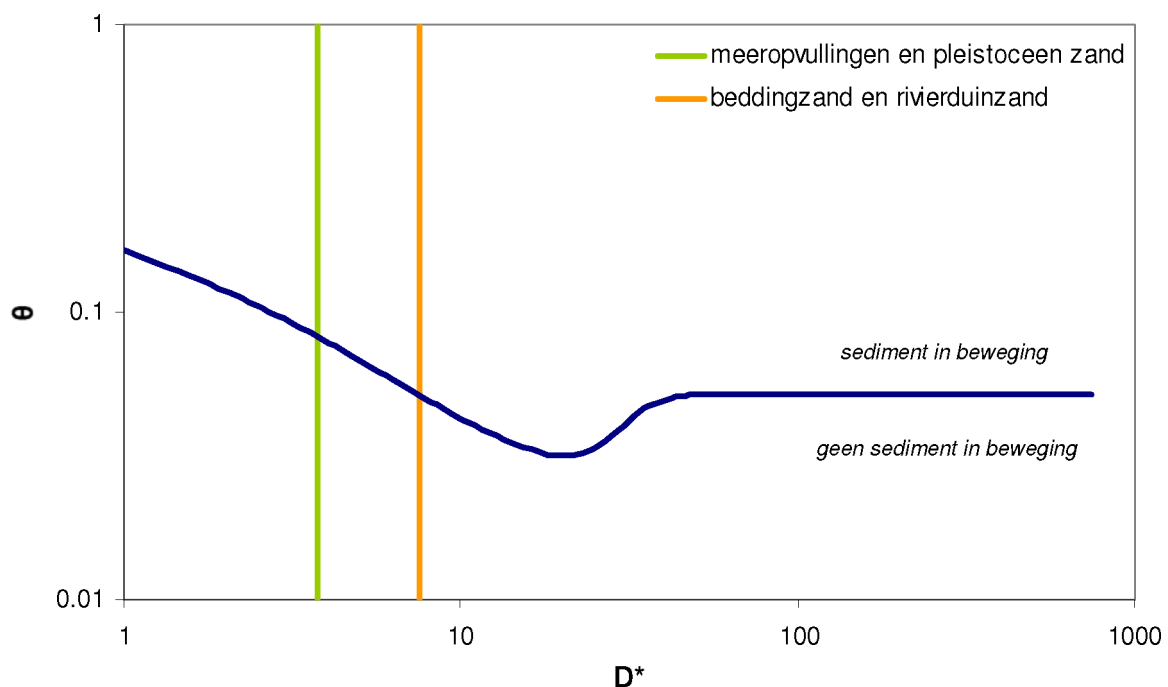


Figuur 19 Mediane korrelgrootteverdeling van zand voorkomend in de lithologische eenheden: beddingzand van de Lek, beddingzand van oudere holocene stroomgordels, rivierduinzand, zandige meeropvullingen en de top van de pleistocene zandlaag, uitgedrukt als percentage van de totale dikte van het zandpakket voorkomend binnen de lithologische eenheid.

De mediane korrelgrootte van het beddingzand van de Lek en oudere stroomgordels en rivierduinzand is vergelijkbaar en bedraagt 300-420 μm . De mediane korrelgrootte van meeropvullingen en de top van het pleistocene zand is fijner en bedraagt 150-210 μm . Als maat voor de erodibiliteit van de beddingafzettingen van de Lek en oudere stroomgordels en rivierduinzand is van een mediane korrelgrootte van 360 μm uitgegaan. Voor de erodibiliteit van het pleistocene zand en het zand in de meeropvullingen is uitgegaan van een mediane korreldiameter van 180 μm . Dit is voor het pleistocene zand een conservatieve schatting. De korrelgrootteverdeling van de top van het pleistocene zand is bepaald in boringen die reikten tot enkele centimeters in de top van het pleistocene zand. De top van de pleistocene afzettingen fijnkorreliger is dan de diepere pleistocene afzettingen. Dit betekent dat het grootste deel van het pleistocene zand significant grover is dan 180 μm . Vanaf enkele

tientallen centimeters onder de top van de pleistocene afzettingen neemt de korrelgrootte significant toe tot maximaal 1000 μm (Busschers et al., 2007).

De relatie tussen de mediane korrelgrootte en de kritieke Shields waarde (begin van beweging) is weergegeven in figuur 20. De groene lijn geeft positie van de gemiddelde mediane korreldiameter van het zand behorend tot de meeropvullingen en de top van het pleistocene zand op de Shields curve weer. De gele lijn geeft de positie van de beddingafzettingen van de Lek en oudere stroomgordels en rivierduinzand op de Shields curve weer. De kritieke Shields waarde voor erosie van de meeropvullingen en de top van het pleistocene zand is $\theta_c = 0.075$, de kritieke Shields waarde voor erosie van beddingafzettingen van de Lek en oudere stroomgordels en rivierduinzand is $\theta_c = 0.053$. Dit correspondeert met een kritieke schuifspanning voor het zand in meeropvullingen en de top van het pleistocene zand van $\tau_c = 0.22$ Pa en voor beddingafzettingen van de Lek en oudere stroomgordels en rivierduinzand van $\tau_c = 0.31$ Pa.



Figuur 20 Kritisch begin van beweging voor beddingzand van de Lek, beddingzand van oudere holocene stroomgordels, rivierduinzand, zandige meeropvullingen en de top van de pleistocene zandlaag.

4.2 Erodibiliteit van klei en veen

Zoals in paragraaf 2.2 aangegeven kunnen bij erosie van klei twee mechanismen onderscheiden worden:

1. “slijtage-erosie”, en
2. erosie door lostrekken van kleibrokken of afschuiven van brokken klei indien er een talud in de klei is ontstaan door een naastgelegen erosiekuil.

Kritische schuifsterkte slijtage-erosie

Voor de kritische schuifsterkte voor slijtage-erosie kan volgens de vergelijkingen in paragraaf 2.2 voor matig zachte, geconsolideerde klei $\tau_c = 1,8$ Pa worden aangehouden. Voor harde,

geconsolideerde klei (klei behorend tot de Laag van Wijchen) geldt $\tau_c = 15,8$ Pa bij $u_c = 1,5$ m/s en $\tau_c = 10,1$ Pa bij $u_c = 1,2$ m/s .

Kritische ongedraineerde schuifsterkte

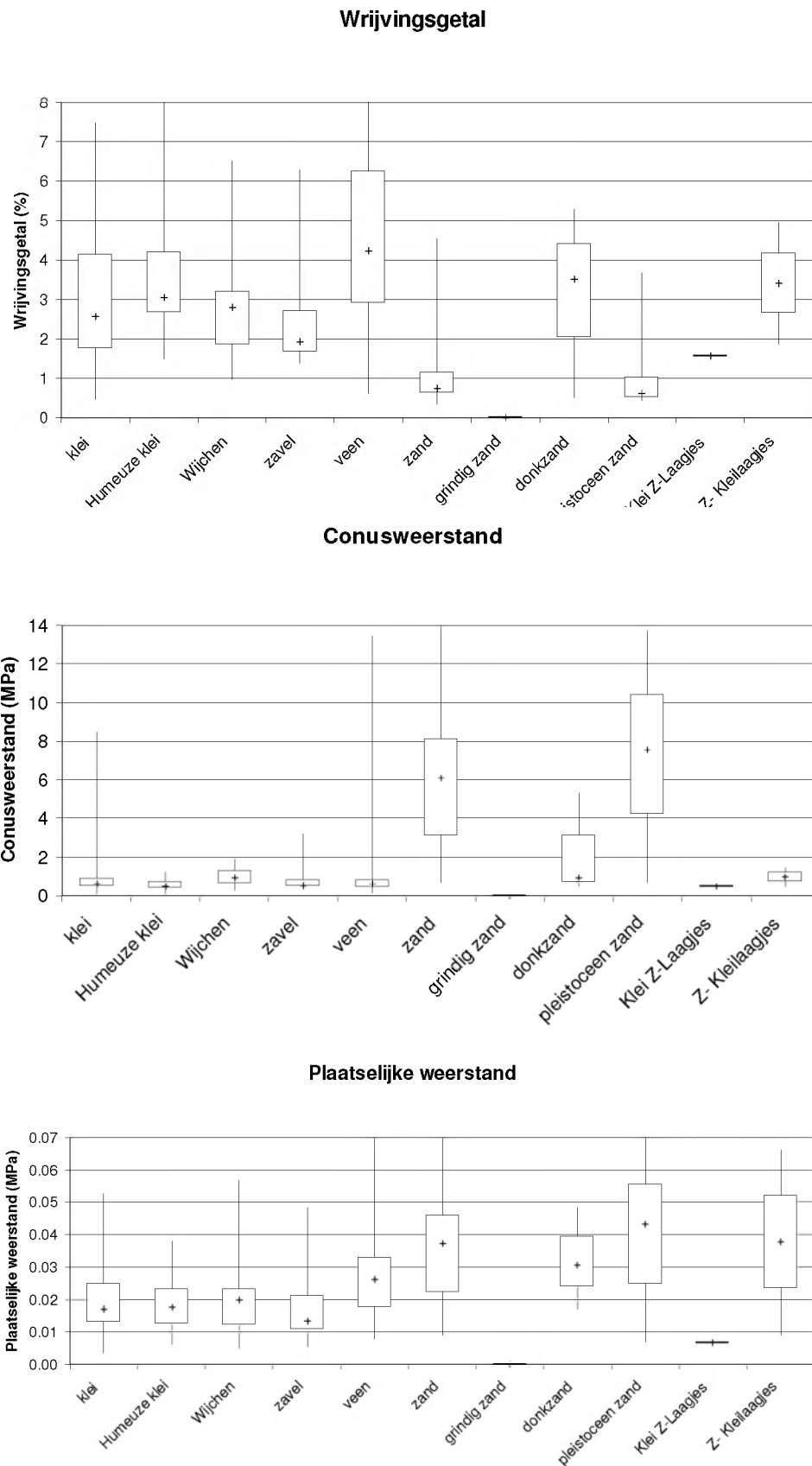
De ongedraineerde schuifsterkte kan gerelateerd worden aan de conusweerstand via de draagvermogenfactor (§2.2.1). Boxplots van de conusweerstand, plaatselijke weerstand en het wrijvingsgetal van alle geanalyseerde lithologische lagen, die niet onder een dijklichaam liggen, zijn afgebeeld in figuur 21. De conusweerstand, plaatselijke weerstand en het wrijvingsgetal van de locaties die waar geen dijk aanwezig is, is representatief voor de oevers van de Lek. De mediane conusweerstand van klei en veen is ongeveer even groot, respectievelijk 0,64 en 0,62 MPa. De mediane conusweerstand van holoceen beddingzand is 6.1 MPa, de mediane conusweerstand van het pleistocene zand is 7.6 MPa. De plaatselijke weerstand is het kleinst voor zavel en klei, respectievelijk 0.01 MPa en 0.02 MPa. De plaatselijke weerstand van pleistoceen zand is het hoogst; 0.04 MPa. Voor een volledig overzicht van de conusweerstand en de plaatselijke weerstand van de onderscheiden lithologische eenheden wordt verwezen naar appendix 2.

Het mediane wrijvingsgetal voor veen, klei, zand, en pleistoceen zand is respectievelijk 4.22, 2.58, 0.75, en 0.61%. Deze waarden zijn vrij goed te vergelijken met de indicatie van de wrijvingsgetallen voor deze grondsoorten uit het Handboek Geotechnisch Bodemonderzoek (www.votb.nl/ondergrond/index.html) (Tabel 3). Het mediane wrijvingsgetal voor zand ligt dicht bij de ondergrens van het bereik aangegeven in tabel 3. Het wrijvingsgetal van het pleistocene zand ligt verder beneden de ondergrens van het aangegeven bereik, dit illustreert dat zowel het holocene beddingzand als het pleistocene zand “schoon” zijn en niet tot nauwelijks worden afgewisseld met kleilagen. Het mediane wrijvingsgetal van klei ligt in het bereik van leem in tabel 3, een mogelijke verklaring hiervoor is dat de klei vaak slap en/of humeus is. Het mediane wrijvingsgetal van veen ligt net onder het bereik zoals aangegeven in tabel 3, dit impliceert relatief veel bijmenging van klei.

Tabel 3 Indicatie van de wrijvingsgetallen van verschillende grondsoorten (Handboek Geotechnisch Bodemonderzoek, www.votb.nl/ondergrond/index.html).

Grondsoort	Wrijvingsgetal [%]
Zand	0,8 - 1,2
Leem	1,2 - 3,0
Klei	3,0 - 6,0
Veen	> 6,0

In appendix 2 zijn de conusweerstand, de plaatselijke weerstand en het wrijvingsgetal weergegeven voor (1) de locaties in de uiterwaard en de polder, zonder dijk, (2) de locaties onder de dijk en (3) alle locaties, met en zonder dijk. In het algemeen is de conusweerstand van klei, humeuze klei en veen hoger onder de dijk dan in de uiterwaard en in de polder (Tabel 4). Dit is te verklaren door de samendrukbaarheid van dit materiaal indien hier een belasting, zoals een dijklichaam, op wordt aangebracht. Wanneer het materiaal wordt samengedrukt neemt de conusweerstand toe. Het verschil tussen de conusweerstand van het materiaal in de uiterwaard en de polder (zonder dijk) en onder de dijk is weergegeven in tabel 4.



Figuur 21

Boxplots van het wrijvingsgetal, de conusweerstand en plaatselijke weerstand van de uiterwaard en de polder (zonder dijk). Het plus-teken is de mediaan, de box geeft het bereik aan wat 50 % van waarden bevat. De lijn geeft het totale bereik aan. Voor achterliggende gegevens, zie appendix 2

Tabel 4 Mediane conusweerstand (MPa) van klei, humeuze klei en veen aanwezig onder de dijk, in de polder en uiterwaard zonder dijk, en het verschil hiertussen.

	dijk	polder/uiterwaard	verschil
klei	0.89	0.64	0.26
humeuze klei	0.91	0.51	0.40
veen	1.08	0.62	0.46

De mediane conusweerstand van klei, humeuze klei en veen dat onder een dijk ligt is hoger dan van hetzelfde materiaal dat niet onder een dijk ligt. Het verschil hiertussen is het grootst bij veen en het kleinst bij klei; veen kan meer worden samengedrukt dan klei.

Klei uit de Laag van Wijchen blijkt een hogere conusweerstand, plaatselijke weerstand en wrijvingsgetal te hebben dan de ondieper liggende kleilagen. Het mediane wrijvingsgetal is 2.79 %, dit is tegen de ondergrens van het bereik van klei zoals aangegeven in tabel 3. Mogelijke verklaringen hiervoor zijn bijmenging van zand en/of de stugheid van de kleilaag waardoor de wrijving tussen de conus en de klei van de Laag van Wijchen afneemt. Het mediane wrijvingsgetal van de overige klei is 2.58 %. Het feit dat de conusweerstand hoger is voor de klei behorend tot de Laag van Wijchen dan voor de later gevormde klei impliceert dat de Laag van Wijchen minder erosief is dan de later gevormde klei.

Tabel 5 geeft een overzicht van de berekende kritieke schuifspanning (zand) en de kritieke schuifsterkte (zavel, klei, veen) voor de in de dwars- en langsp profielen onderscheiden lithologische eenheden.

Tabel 5 Berekende waarden voor de erodibiliteit van zand, zavel, klei en veen.

Lithologische eenheid	Kritieke schuifspanning (Pa)	Lithologische eenheid	Kritieke schuifsterkte slijtage-erosie (Pa)	Kritieke schuifsterkte (kPa)
zand: meeropvulling	0.218	klei	1.8	79
zand: pleistoceen	0.218	humeuze klei		75
zand: stroomgordel	0.308	klei met dunne zandlagen		47
zand: rivierduin	0.308	klei: Laag van Wijchen	10.1	58
		zavel		84
		veen		81

4.3 Implicaties van lithologie voor erodibiliteit van oevers, onderwatertaluds en rivierbodem

In deze paragraaf zijn de implicaties van de lithologische opbouw van de ondergrond voor erosie van de oevers, de onderwatertaluds en de geulbodem van de Lek beschreven aan de hand van de langsp profielen (§ 3.4 en Appendix 1) en de zanddieptekaarten (Appendix 3).

Traject 1 (rivierkilometer 990-977)

Rivierkilometer 988-989

Grote diepe erosiekuilen bevinden zich vooral aan de noordkant van de Lek. In het profiel langs de noordoever ligt hier op diepte weliswaar rivierduinzand, waarvan de bovenkant -11

m NAP bereikt, maar aangezien de erosiekuil slechts tot deze diepte reikt is dit rivierduinzand waarschijnlijk niet de oorzaak.

Rivierkilometer 988-987

Rivierduinzand-toppen reiken hier tot -6 m NAP en de Lekbedding lijkt dit rivierduinzand lokaal aan te snijden. Er worden hier erosiekuilen met een langwerpige vorm en een steile rand aangetroffen. Vermoedelijk markeert deze steile rand de overgang van cohesief materiaal (veen-/kleilaag) naar een uitgeërodeerde opduiking van rivierduinzand.

Rivierkilometer 984-985

Hier zijn erosiekuilen tot -11 m NAP aangetroffen en komt in de ondergrond een rivierduincomplex voor. De top van het duin ligt echter vermoedelijk op dezelfde diepte en hoeft niet de oorzaak van de erosiekuil te zijn.

Rivierkilometer 980 -981

Ook op deze locatie snijdt de Lek een rivierduinzand-complex aan, dat tussen km 980 en 981 de rivier kruist. De langspromen liggen enkele honderden meters van de as van de geul. In de profielen vallen de locaties van de erosiekuilen daardoor niet exact samen met het rivierduinzand. In dit kilometervak zijn er wel erosiekuilen tot ongeveer -10 m NAP. De toppen van de rivierduinen liggen tussen -4 en -10 m. De basis van de rivierduinen ligt rond -13 m NAP.

Rivierkilometer 978-979

Aan de noordkant van de Lekgeul komen erosiekuilen tot -11 m NAP voor. In de profielen zijn geen aanwijzingen gevonden voor makkelijk erodeerbaar materiaal op deze diepte. De erosie wordt toegeschreven aan de positie in de buitenbocht van de Lekgeul.

Rivierkilometer 975-976

Op deze locatie snijdt de Lek een rivierduinzand-complex aan. In de buitenbocht (zuidkant) van de geul is de bedding over ongeveer een kilometer verdiept tot -8 m NAP, juist waar de rivier het rivierduinzand aansnijdt. De overgang naar het verdiepte deel is abrupt, net als bij km 988-987. Dit duidt er op dat het rivierduinzand vermoedelijk alleen in de buitenbocht tot hoogtes boven -7 m NAP reikte, en daar is uitgeërodeerd. Deze interpretatie is in overeenstemming met de lokale grote variatie in de positie van de top van de rivierduinen.

Traject 2 (rivierkilometer 977-962)

Rivierkilometer 973

In de buitenbocht (noordkant) treedt erosie op tot een diepte van -10 m NAP. In het noordprofiel is op deze plek een rivierduin aangetroffen, waarvan de bovenkant van het rivierduinzand ligt op -10 m NAP. Mogelijk ligt dit duin op de lokatie van de geul hoger dan in het profiel is aangegeven.

Rivierkilometer 971 -969

Op dit traject komen achter iedere krib aan beide kanten van de rivier erosiekuilen voor in een relatief recht stuk van de rivier. De verbreding en diepte van deze kuilen valt samen met de positie van de zandige meeropvullingen (-7.5 tot -9.5 m NAP). Onder de meeropvullingen ligt een dunne laag veen (basisveen) en/of klei (Laag van Wijchen).

Rivierkilometer 967

Op deze locatie is de gehele buitenbocht (zuidkant) geërodeerd tot op -9 à -10 m NAP. De geulbasis is ingesneden tot in de zandige meerafzettingen en snijdt vermoedelijk de Laag van Wijchen aan. Onder de Laag van Wijchen, die hier 0.5-1 m dik is, bevindt zich pleistoceen zand.

Rivierkilometer 966-965

In dit traject komen stroomafwaarts van de kribben enkele erosiekuilen tot een diepte van -9.5 m NAP voor in een relatief recht stuk van de rivier. In de ondergrond komen zandige beddingafzettingen van een afgesneden bocht van de Lek (#91a) voor. De diepte van de erosiekuilen komt overeen met de diepte van de basis van deze beddingafzettingen in het zuidprofiel.

Rivierkilometer 963-965

Hier bevindt zich een scherpe buitenbocht aan de noordkant van de geul. De noordzijde van de geul is hier over een lengte van bijna twee kilometer ingesneden tot -9 à -8 m NAP. Net als bij km 967 aan de zuidkant is deze insnijding dieper dan de basis van de zandige meeropvullingen tot in de veenlaag en/of de klei (Laag van Wijchen). Vermoedelijk wordt hier zelfs het pleistocene zand aangesneden.

Rivierkilometer 961-963

Hier bevindt zich een scherpe buitenbocht aan de zuidkant van de geul. De diepte van de geul in de buitenbocht is -9 à -8 m NAP. De geul snijdt in dit traject verschillende zandlichamen in de ondergrond aan. De geuldiepte wordt in dit geval bepaald door de positie in de buitenbocht (dominante factor) in combinatie met de zandige samenstelling van de ondergrond (secundaire factor).

Traject 3 (rivierkilometer 962-946)

Rivierkilometer 960

Op deze plek kruist de Lek een zandlichaam van een oude stroomgordel (vermoedelijk stroomgordel #35). De top van dit zandlichaam ligt op circa -4 m NAP, de basis van de erosiekuil aan de noordkant van de geul ligt op -7 m NAP.

Rivierkilometer 958- 959

De noordzijde van de watervoerende geul is hier over een lengte van bijna twee kilometer ingesneden tot -7 m NAP in de buitenbocht. De oever bestaat uit veen en klei. Op de diepste punten in de watervoerende geul, ligt de basis in de Laag van Wijchen. De geul lijkt deze laag niet volledig geërodeerd te hebben.

Rivierkilometer 955-952

In dit traject zijn de bochten in de Lek flauw. Stroomafwaarts van de kribben zijn ondiepe erosiekuilen gevormd tot op ongeveer -6 à -7 m NAP diepte. Op deze locatie snijdt de Lek diverse stroomruggen die aanwezig zijn in de ondergrond aan. Ter plekke van deze aansnijdingen bestaat de oever en de rivierbodem uit zand.

Rivierkilometer 948-952

In dit traject vertoont de bodem een zeer onregelmatig patroon. De erosiekuilen liggen niet alleen stroomafwaarts van de kribben, maar lijken willekeurig verspreid. Ze bereiken een diepte tot ongeveer -7.5 m NAP. In dit traject worden oudere stroomgordels aangesneden. Op

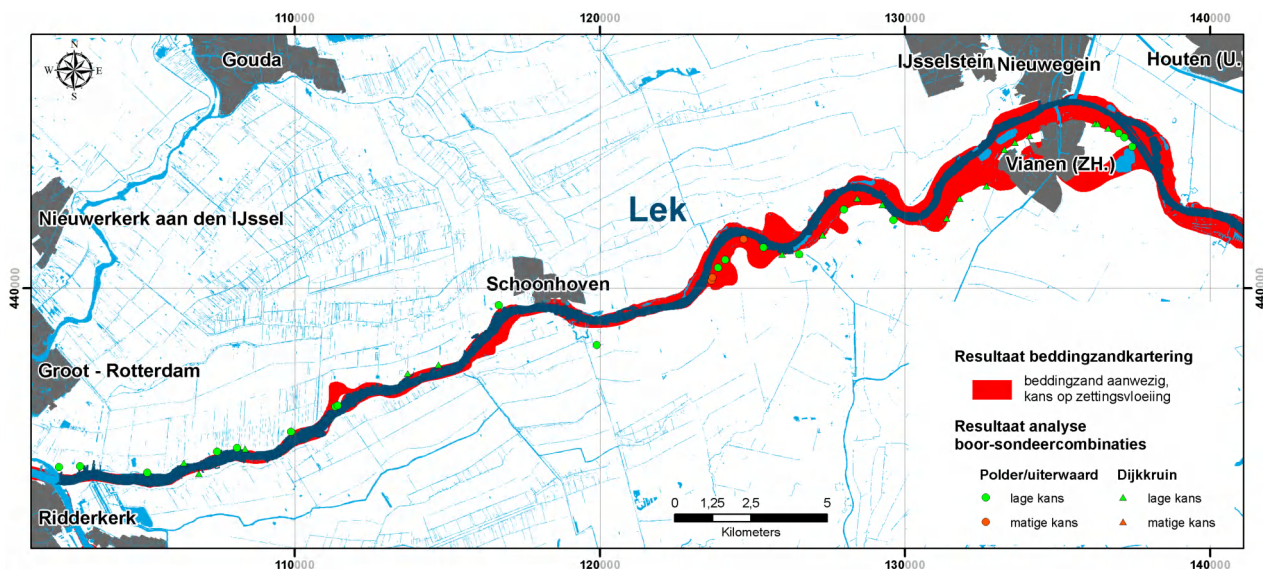
een diepte > -4 m NAP zal de oever en de rivierbodem zandig van samenstelling zijn. Door de geulen van de oudere stroomgordels is veelal de Laag van Wijchen weggeërodeerd. De oudere stroomgordels zijn hier gefundeerd in het pleistocene zand.

5 Kans op het ontstaan van zettingsvloeiing

In dit hoofdstuk wordt het resultaat van de analyse van de kans op het ontstaan van zettingsvloeiing beschreven. In appendix 4 zijn de figuren opgenomen waarin de conusweerstand is uitgezet tegen de diepte van de gemeten weerstand en de uitgerekende weerstand op basis van een relatieve dichtheid van 33 procent en 66 procent. Deze figuren zijn per boring/sondeer combinatie gemaakt om de kans op het ontstaan van zettingsvloeiing te bepalen. De indeling van boring/sondering combinaties in pakkingsklassen en kans op het ontstaan van zettingsvloeiingsklassen is opgenomen in tabel 6.

Uit de boring/sondering combinaties blijkt dat het beddingzand (11 keer aangetroffen) van de Lek meestal los gepakt is en soms matig los tot vast. Het in drie combinaties aangetroffen rivierduinzand is in alle gevallen los gepakt. Eenmaal is in de boring/sondering combinaties zand met dunne kleilagen aangetroffen. Dit zand is los gepakt.

In de meeste gevallen bleken de zandpakketten in de boring/sondering combinaties niet dikker te zijn dan drie meter, waardoor de kans op het ontstaan van zettingsvloeiing op deze locaties in het algemeen laag is (Fig. 22). Alleen daar waar de Lek zandlichamen aansnijdt, die ter plekke van de aansnijding meer dan 3 meter dik zijn, is de kans op het ontstaan van zettingsvloeiing groter (deze boring/sondering combinaties zijn geclassificeerd als matige kans). Om aan te geven waar de Lek haar eigen zandige beddingafzettingen aansnijdt, zijn deze met rood weergegeven in figuur 22.



Figuur 22 Kans op het ontstaan van zettingsvloeiing langs de Lek.

Wij wijzen erop dat de pakking van het zand slechts op een beperkt aantal locaties bepaald kon worden in verband met de beschikbare data. Met name waar de geul van de Lek haar eigen beddingafzettingen aansnijdt kan de kans op het ontstaan van zettingsvloeiing afwijken van wat de stippen en driehoeken in figuur 22 suggereren.

Tabel 6 Kans op het ontstaan van zettingsvloeiing en pakking van zandlagen in de boring/sondering combinaties. XCO = x-coördinaat, YCO = y-coördinaat, Z = hoogteligging maaiveld ten opzichte van NAP, Dijk = aanwezigheid dijk, Pakking = pakking zandkorrels, Z-dikte > 3 m = dikte van de zandlaag, Kans = kans op het ontstaan van zettingsvloeiing.

Sondering	Boring	XCO	YCO	Z	Dijk	Pakking*	Z-dikte>3m	Kans
S38C01714	B38C3078	102285	434135	-1.28	nee	-	nee	laag
S38C01695	B38C3074	102972	434156	-1.38	nee	-	nee	laag
S38C01767	B38C3192	105172	433945	3.04	nee	los	nee	laag
S38C00756	B38C3058	106377	434264	4.45	ja	los	nee	laag
S38C00561	B38C3196	106864	433913	3.48	ja	los	nee	laag
S38C01689	B38C3193	107460	434635	-1.09	nee	-	nee	laag
S38C00733	B38C3039	108104	434762	-1.06	nee	-	nee	laag
S38C00644	B38C3012	108383	434726	5.25	ja	-	nee	laag
S38C00642	B38C3014	109878	435289	0.78	nee	los	nee	laag
S38D01179	B38D4220	111331	436115	0.44	nee	-	nee	laag
S38D01175	B38D4222	111405	436147	0.09	nee	los	nee	laag
S38D00237	B38D4001	113706	437190	4.96	ja	-	nee	laag
S38D00229	B38D4000	114717	437481	5.21	ja	-	nee	laag
S38B00581	B38B0663	116688	439434	-1.2	nee	-	nee	laag
S38B00386	B38B2151	119900	438125	-0.61	nee	los	nee	laag
S38E00364	B38E1577	123658	440242	1.58	nee	matig los	ja	matig
S38E00393	B38E1603	123688	440345	1.04	nee	matig los	ja	matig
S38E00405	B38E1590	123876	440668	2.27	nee	matig los	nee	laag
S38E00407	B38E1585	124110	440920	2.29	nee	vast	ja	laag
S38E00323	B38E1551	124714	441598	3.53	nee	matig los	ja	matig
S38E00368	B38E1586	125366	441333	1.36	nee	-	nee	laag
S38E00337	B38E1556	125983	441103	6.24	ja	-	nee	laag
S38E00294	B38E1602	126542	441110	1.78	nee	matig los	nee	laag
S38E00490	B38E1823	126547	441110	6.97	ja	-	nee	laag
S38E00498	B38E1827	127311	441730	6.85	ja	-	nee	laag
S38E00452	B38E1831	127997	442563	2.81	nee	-	nee	laag
S38E00457	B38E1833	128447	442924	7.37	ja	-	nee	laag
S38E00463	B38E1835	129275	442716	7.35	ja	-	nee	laag
S38E00061	B38E1483	129626	442216	1.605	nee	-	nee	laag
S38F02309	B38F1740	131372	442272	6.65	ja	-	nee	laag
S38F02316	B38F1990	131808	442923	7.43	ja	-	nee	laag
S38F02371	B38F1992	132685	443331	7.22	ja	los	nee	laag
S38F02329	B38F1996	133273	444519	7.61	ja	-	nee	laag
S38F02331	B38F1997	133611	444748	7.34	ja	-	nee	laag
S38F02320	B38F2000	134100	444972	4.18	ja	-	nee	laag
S38F02327	B38F2004	134100	444972	4.18	ja	-	nee	laag
S38F02332	B38F2007	136241	445371	7.99	ja	-	nee	laag
S38F02113	B38F1849	136322	445370	7.2	ja	-	nee	laag
S38F02115	B38F1874	136665	445219	7.5	ja	-	nee	laag
S38F02128	B38F1868	137009	445063	2.13	nee	-	nee	laag
S38F02103	B38F1839	137194	444931	3.05	nee	-	nee	laag
S38F02107	B38F1828	137459	444621	2.14	nee	vast	ja	laag

* Alleen zand boven pleistocene oppervlak is beschouwd.

6 Conclusies

Er zijn voor de Lek 11 lithologische dwarsprofielen en twee langspromen gemaakt op basis van beschikbare boor- en sondeergegevens die informatie geven over de samenstelling van de ondergrond. Op basis van deze gegevens was het mogelijk om de volgende lithologische eenheden te onderscheiden: zand in meeropvullingen, zand in stroomgordels, zand in rivierduinen, pleistoceen beddingzand, zavel, klei, humeuze klei, klei met dunne zandlagen, klei behorend tot de Laag van Wijchen en veen.

De erodibiliteit van zand is gekwantificeerd op basis van de kritieke schuifspanning, de erodibiliteit van klei, zavel en veen op basis van de kritieke schuifsterkte. De kritieke waarden voor erosie zijn:

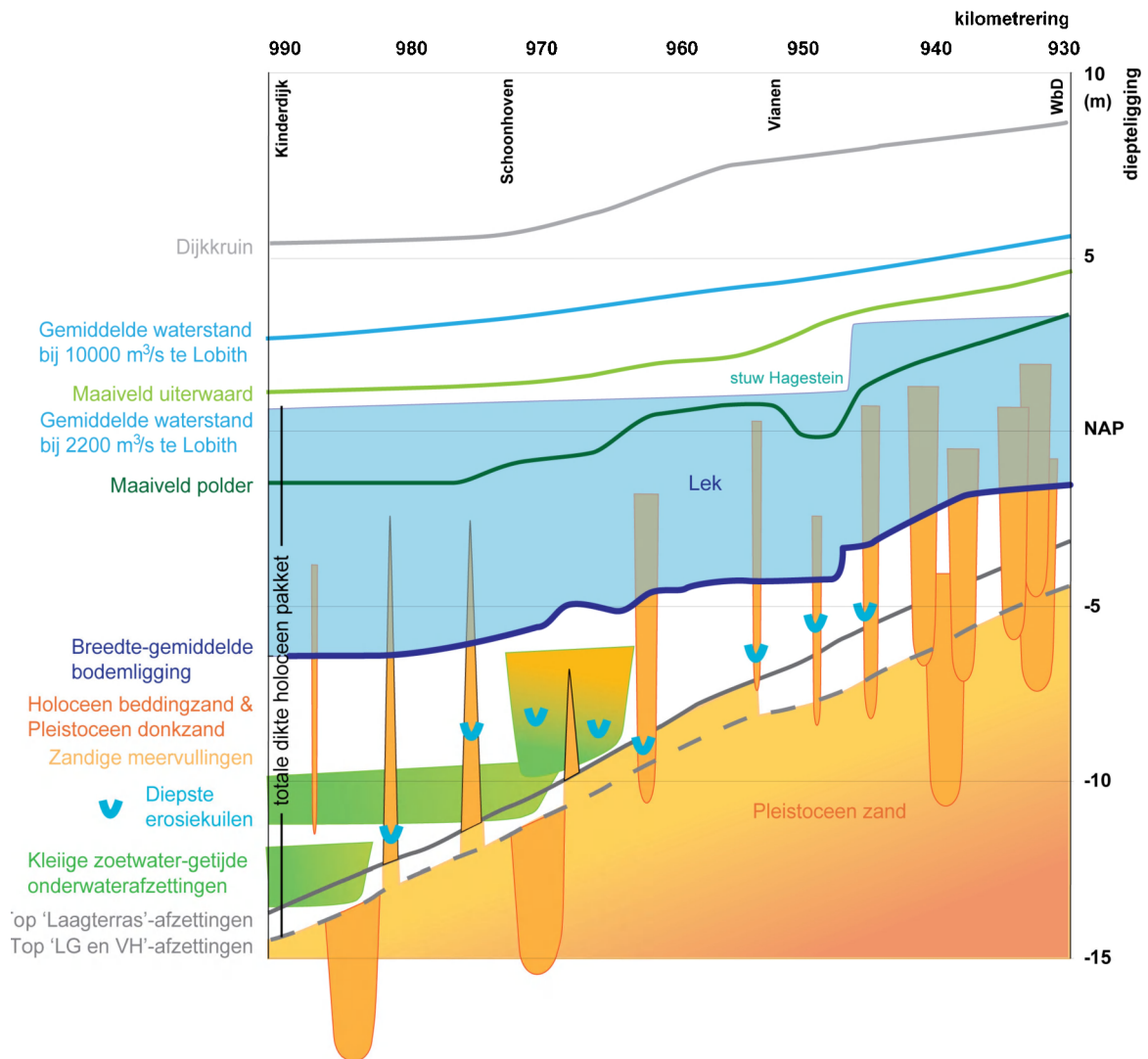
Lithologische eenheid	Kritieke schuifspanning (Pa)	Lithologische eenheid	Kritieke schuifsterkte slijtage-erosie (Pa)	Kritieke schuifsterkte (kPa)
zand: meeropvulling	0.218	klei	1.8	79
zand: pleistoceen	0.218	humeuze klei		75
zand: stroomgordel	0.308	klei met dunne zandlagen		47
zand: rivierduin	0.308	klei: Laag van Wijchen	10.1	58
		zavel		84
		veen		81

De erodibiliteit van zand is significant hoger dan de erodibiliteit van klei en veen. De erodibiliteit van klei en veen is vergelijkbaar. Indien de holocene klei dunne zandlagen bevat neemt de erodibiliteit toe (makkelijker erodeerbaar). De door compactie en bodemvorming beïnvloedde klei van de Laag van Wijchen heeft een lagere erodibiliteit (moeilijker erodeerbaar) dan de holocene klei .

Er bestaat een relatie tussen de diepte van erosiekuilen in de bedding van de Lek, en de lithologische samenstelling van de ondergrond. De diepste erosiekuilen komen voor waar de beddinggordel relatief fijnzandige (korrelgroottefracties 150 – 420 µm) elementen in de ondergrond aansnijdt en waar de hydraulische omstandigheden (bijvoorbeeld door extra turbulentie door kribkoppen en stroming in scherpe bochtgedelen) erosiekuilen vormen. De erosiekuilen zijn met name aanwezig waar de bedding van de Lek gebieden met rivierduinzand, zandige meeropvullingen en zandbanen van stroomgordels van voorlopers van de Lek uit het Holoceen kruist. Er zijn ook diepe erosiekuilen (met name in de scherpste bochten in het traject) waarvan de diepte door de hydraulische randvoorwaarden bepaald lijkt te zijn, omdat de samenstelling van de ondergrond niet afwijkt van die van de bredere omgeving.

In stroomafwaartse richting, van km 948 (Hagestein) naar km 989 (samenvloeiing van de Lek met de Noord) kan gesteld worden dat de opbouw van de pleistocene ondergrond steeds minder van belang is, en dat zandpakketten met een laterale verbreding in de onderste meters van het holocene pakket van steeds groter belang worden ('meeropvullingen'). Kruisingen van de Lekgeul met zandbanen van oudere stroomgordels komen frequent voor in het bovenstroomse traject. In stroomafwaartse richting wordt dit een steeds lokaler verschijnsel. Daarnaast zijn voorkomens van rivierduinzandcomplexen over korte deeltrajecten in het meest stroomafwaartse deel van belang.

In figuur 23 is schematisch, in longitudinale richting, de relatie tussen de opbouw van de ondergrond en erosie van de ondergrond door de Lek samengevat.



Figuur 23 Schematische weergave van de relatie tussen de opbouw van de ondergrond en erosie van de ondergrond door de Lek. In stroomafwaartse richting neemt de diepte van de pleistocene afzettingen, voornamelijk bestaande uit zand, toe en wordt het verschil in diepte met de gemiddelde bodemligging van de Lek groter. In het stroomopwaartse deel kruist de Lek veelvuldig oudere holocene stroomgordels. Stroomafwaarts van Vianen neemt dit significant af. Stroomopwaarts van Schoonhoven worden zandige meeropvullingen aangesneden. In het meest stroomafwaartse gedeelte kruist de Lek enkele grote rivierduincomplexen.

7 Aanbevelingen voor verder onderzoek

- Zettingsvloeiingen worden vaak gezien als het enige faalmechanisme voor oevers en onderwatertaluds, samen met bloksgewijze afschuiving, dat voor dijkvallen verantwoordelijk wordt geacht. Dit ondanks het feit dat de korrelpakking van zand bijna altijd te dicht is om liquefactie mogelijk te maken. Alleen lokaal kan zand in oevers bezwijken door vloeïng, maar dan is er sprake van fluïdisatie en geen liquefactie. Het leidend mechanisme is bressen (cf. Van den Berg et al., 2002; Mastbergen & Van den Berg, 2003), en tijdens het bressen kunnen wellicht ook enkele lagen even gaan vloeien, zeker als ze ingesloten zijn tussen zand. In dit onderzoek is niet gekeken naar bressen. Voor een betere inschatting van het risico op falen van oevers en onderwatertaluds zouden bressen ook in beschouwing genomen moeten worden.
- Het huidige onderzoek is gebaseerd op dwars- en langsprofielen en zanddiepte kaarten. Om een goed 3D, continu, beeld te krijgen van de samenstelling van de ondergrond en de stabiliteit van oevers, onderwatertaluds en riviergeulbasis zouden de in dit rapport gepresenteerde methoden, idealiter aangevuld met of vervangen door bovenstaande aanbevelingen, moeten worden toegepast op het GeoTopmodel dat op dit moment wordt gebouwd voor het rivierengebied door TNO. Contactpersonen bij TNO hiervoor zijn Dr. Jan Stafleu en Dr. Freek Busschers.

Dankwoord

Wij danken Dr. Freek Busschers van TNO Geologische Dienst Nederland voor het ter beschikking stellen van het TopPleistoceen vlak uit de GeoTOP en Nederland3D geomodellen van TNO. Dr. Ane Wiersma (Deltares) heeft de voor dit project benodigde boor- en sondeergegevens uit de TNO-DINO database gehaald en deze aangeleverd aan de Universiteit Utrecht. Jan Blinde (Deltares) heeft de Universiteit Utrecht de lithologische gegevens van Waterschap Rivierenland aangeleverd die zijn gebruikt in het langsprofiel van de zuidoever van de Lek. Dr. Gijs Hoffmans, Dr. Henk Verheij en Dr. Geeralt van den Ham (allen Deltares) hebben ons geadviseerd met betrekking tot de bepaling van de kritische schuifsterkte van klei.

Referenties

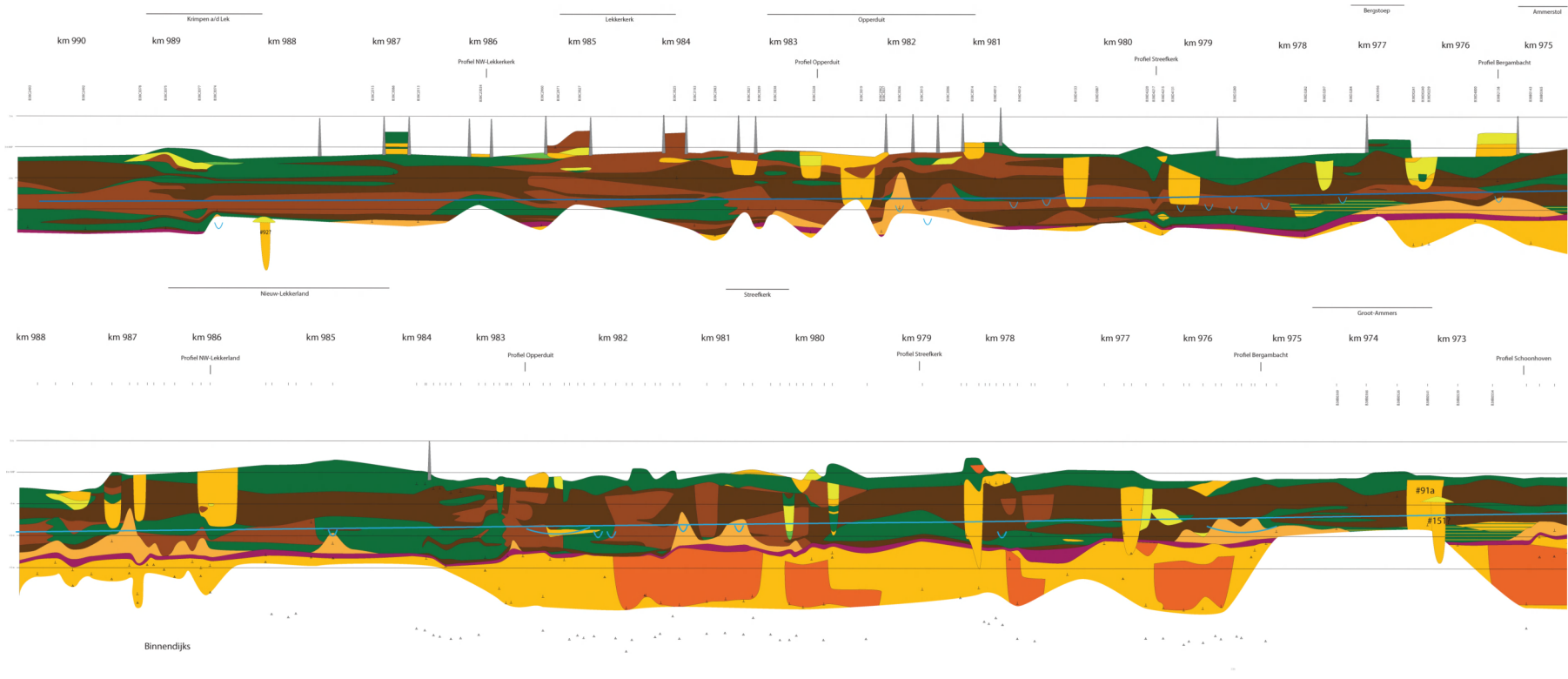
- Bakker, H. de & J. Schelling (1966). *Systeem van Bodemclassificatie voor Nederland*. Pudoc, Wageningen.
- Bakker, H. de & J. Schelling (1989). *Systeem van Bodemclassificatie voor Nederland*. Pudoc, Wageningen.
- Begemann H. (1965). The friction jacket cone as an aid in determining soil profile. Proc. 6th. In. Conf. SMFE.
- Berendsen, H.J.A. & E. Stouthamer (2001). Palaeogeographical development of the Rhine-Meuse delta, The Netherlands. Assen: Koninklijke Van Gorcum, 268 p.
- Berendsen, H.J.A. (1982). De genese van het landschap in het zuiden van de provincie Utrecht, een fysisch-geografische studie. Dissertatie, Utrechtse Geografische Studies 25: 256 pp.
- Berendsen, H.J.A. & K.P. Volleberg (2007). New prospects in geological and geomorphological mapping of the Rhine-Meuse delta: application of detailed digital elevation measurements based on laseraltimetry. *Geologie en Mijnbouw/Netherlands Journal of Geosciences* 86-1, pp. 311-318.
- Bos, I.J. (2010). Distal delta-plain successions. Architecture and lithofacies of lake fills and organics in the Holocene Rhine-Meuse delta, The Netherlands. Fac. Geowetenschappen, Utrecht University, Published PhD-thesis, 208 pp.
- Bosch, J.H.A. (2000). Standaard Boorbeschrijvingsmethode versie 5.1. TNO-Rapport 00-141-A
- Busschers, F.S., C. Kasse, R.T. van Balen, J. Vandenberghe, K.M. Cohen, H.J.T. Weerts, J. Wallinga, C. Johns, P. Cleveringa & F.P.M. Bunnik (2007). Late Pleistocene evolution of the Rhine in the southern North-Sea Basin: imprints of climate change, sea-level oscillations and glacio-isostasy. *Quaternary Science Reviews* 26, p. 3216-3248.
- Gouw, M.J.P. & H.J.A. Berendsen (2007). Variability of fluvial sand body dimensions and the consequences for alluvial architecture: Observations from the Holocene Rhine-Meuse delta (The Netherlands) and Lower Mississippi Valley. *Journal of Sedimentary Research* 77 (2), p. 124-138.
- Gouw, M.J.P. & G. Erkens (2007). Architecture of the Holocene Rhine-Meuse delta (the Netherlands) – A result of changing external controls. *Netherlands Journal of Geosciences / Geologie en Mijnbouw* 86 (1), p. 23-54.
- Hijma, M.P. (2009). From river valley to estuary. The early-mid Holocene transgression of the Rhine-Meuse valley, The Netherlands. Ph.D. thesis. KNAG/Faculty of Geographical Sciences, Utrecht University, Netherlands Geographical Studies 389, 192 p.
- Hijma, M.P., K.M. Cohen, G. Hoffmann, A.J.F. van der Spek & E. Stouthamer (2009). From river valley to estuary: the evolution of the Rhine mouth in the early to middle Holocene. *Netherlands Journal of Geosciences*, 88, p. 13-53.
- Hoffmans, G.J.C.M. & Verheij, H.J. (1997). *Scour manual*. Balkema Rotterdam.
- Kleinhans, M.G. (2005). Flow discharge and sediment transport models for estimating a minimum timescale of hydrological activity and channel and delta formation on Mars, *J. Geophys. Res.*, 110, E12003, doi:10.1029/2005JE002521
- Mastbergen, D. & Van den Berg, J.H. (2003). Breaching in fine sands and the generation of sustained turbidity currents in submarine canyons. *Sedimentology* 50, p. 625-637.
- Rijkswaterstaat (2005). *Actueel hoogtebestand van Nederland (AHN)*. AGI-ICT.
- Stouthamer, E. & De Haas, T. (2011). Erodibiliteit en risico op zettingsvloeiing als maat voor stabiliteit van oevers, onderwatertaluds en rivierbodems van de Noord, de Oude Maas en het Spui. Rapport Dept. Fysische Geografie, Universiteit Utrecht, 105 pp.

- Van den Berg, J.H., Van Gelder, A. & Mastbergen, D. (2002). The importance of breaching as a mechanism of subaqueous slope failure in fine sand. *Sedimentology* 49, p. 81-95.
- Verbraeck, A. (1984). Toelichtingen bij de geologische kaart van Nederland, blad Tiel West (39 W) en Tiel Oost (39 O). Haarlem: Rijks Geologische Dienst, 335 pp.
- Zanke, U.C.E. (2003). On the influence of turbulence on the initiation of sediment motion, *Int. J. Sediment Res.*, 18(1), 1– 15.

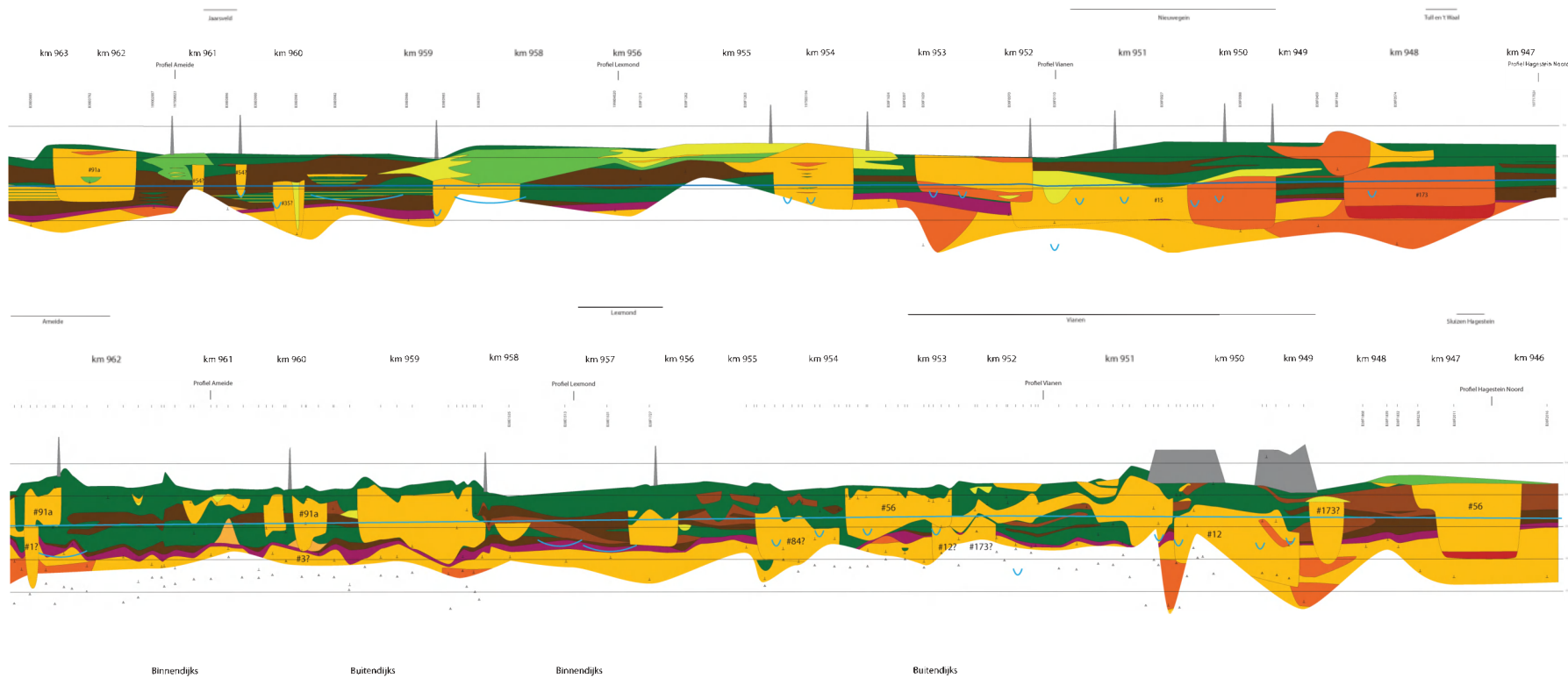
Appendix 1

**Langsprofielen langs de noordoever en de zuidoever van de Lek.
Inclusief legenda op een los legendablad.**

Traject 1 (rivierkilometer 990-977)



Traject 3 (rivierkilometer 962-946)



Binnendijks

Buitendijks

Binnendijks

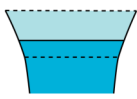
Buitendijks

Legenda dwars- en langsprofielen

	Grind		Donkzand
	Grof zand, grindig zand		Zand met kleilaagjes
	Zand		Klei met zandlaagjes
	Zavel		Laag van Wijchen
	Lichte klei		Humeuze klei
	Zware klei		Veen



Dijk



Lek (dwarsdoorsnedes)

----- Gemiddelde hoogwaterstand
 ----- Gemiddelde waterstand
 ----- Gemiddelde laagwaterstand



Lek (langsdoorsnedes)

Gemiddelde waterdiepte Lek



Scour hole



Diepe erosie over langer traject

B38E1513

Numer TNO-boring

S38E1513

Numer TNO-sondering

200110016

Numer UU-boring

└

Einddiepte boring

△

Einddiepte sondering

#84

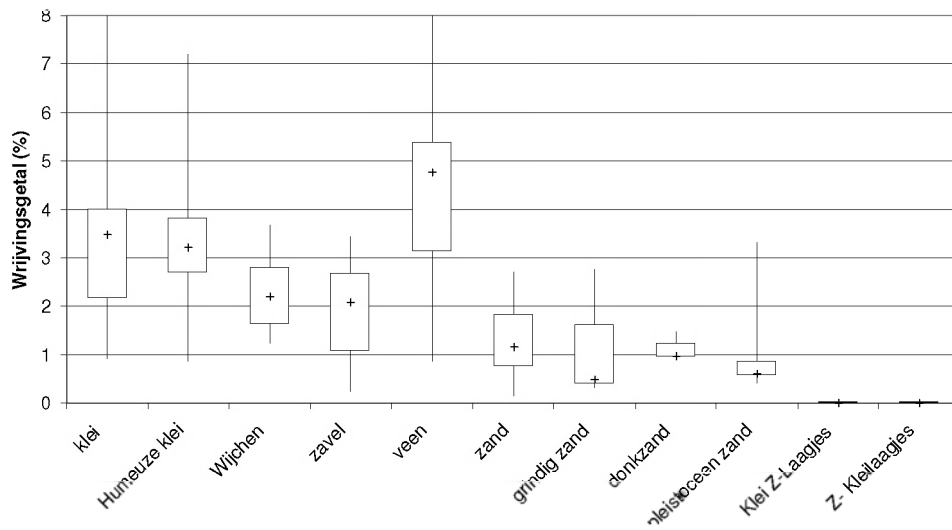
Numer stroomgordel

Appendix 2

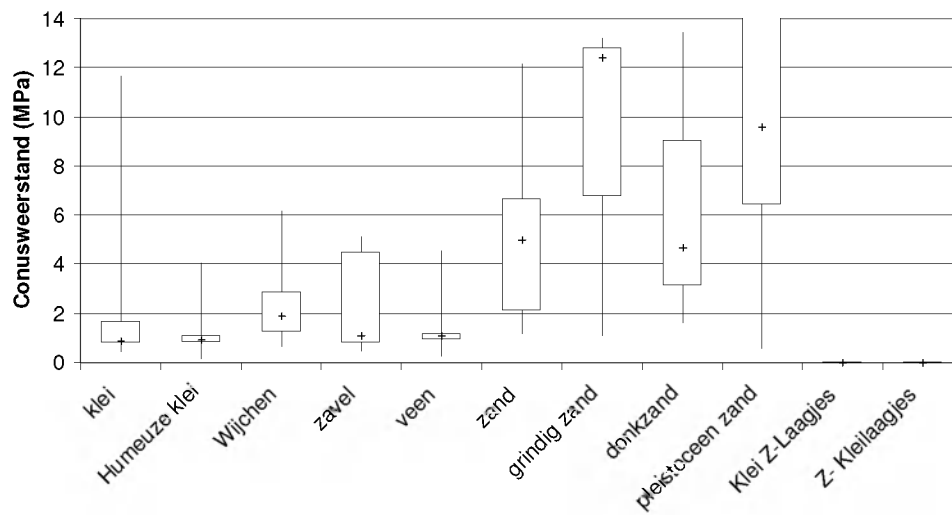
Boxplots en achterliggende data wrijvingsgetal, conusweerstand en plaatselijke weerstand van sonderingen rond de Lek.

Onder de dijk

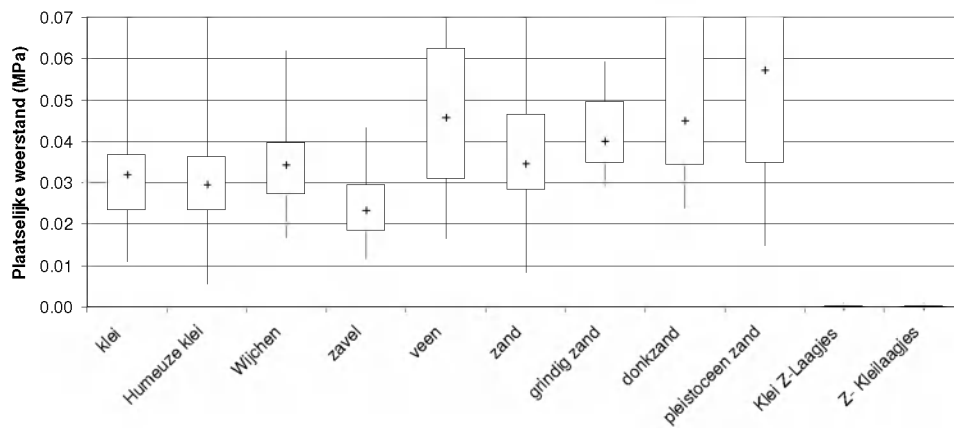
Wrijvingsgetal



Conusweerstand

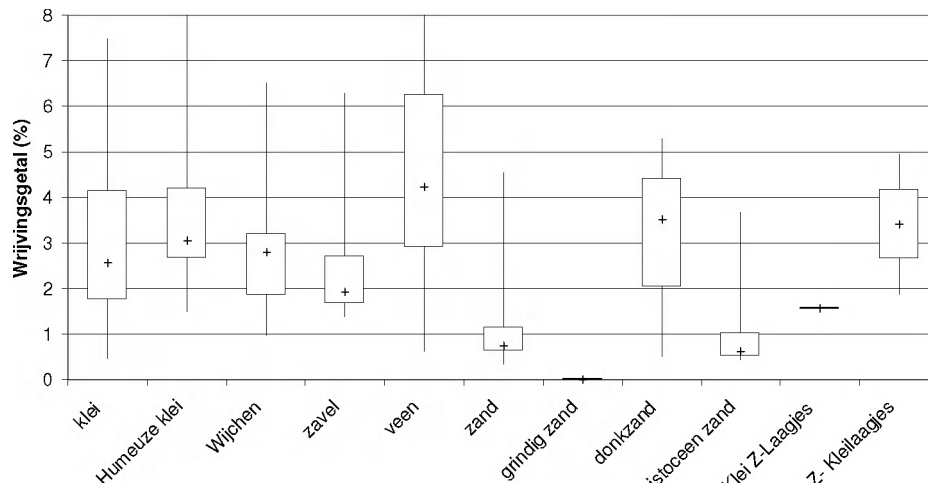


Plaatselijke weerstand

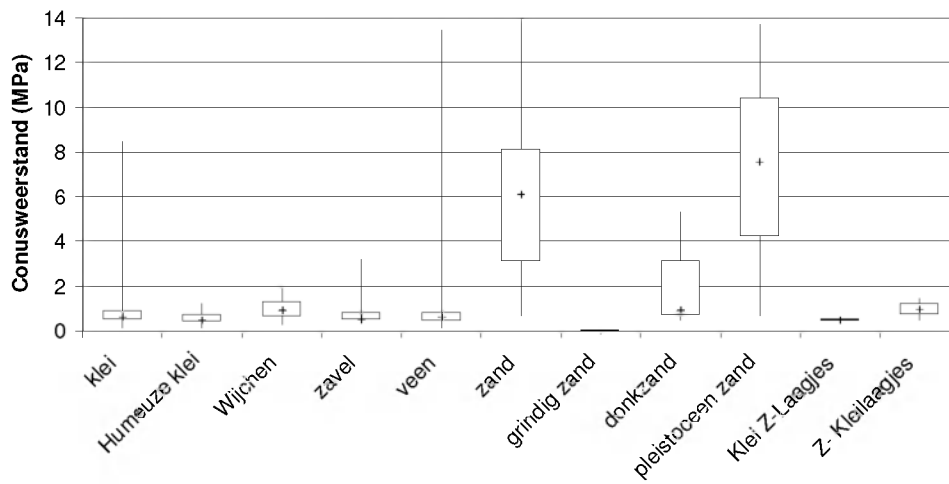


Uiterwaard en polder

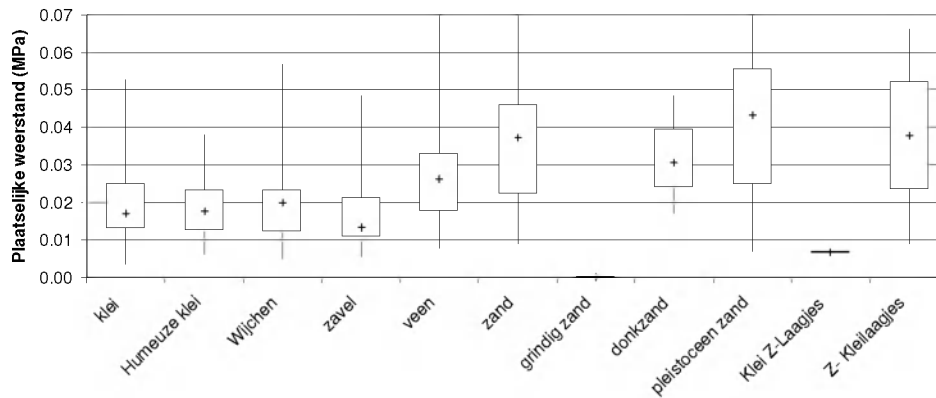
Wrijvingsgetal



Conusweerstand

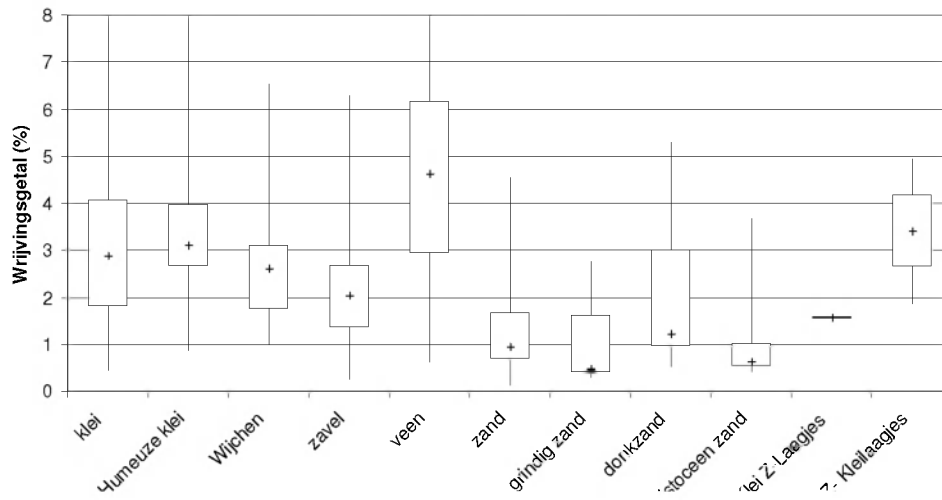


Plaatselijke weerstand

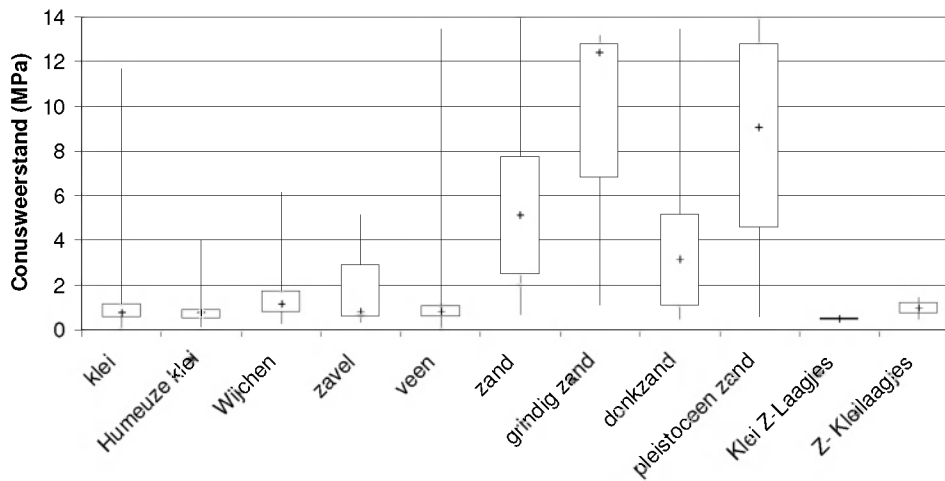


Totaal

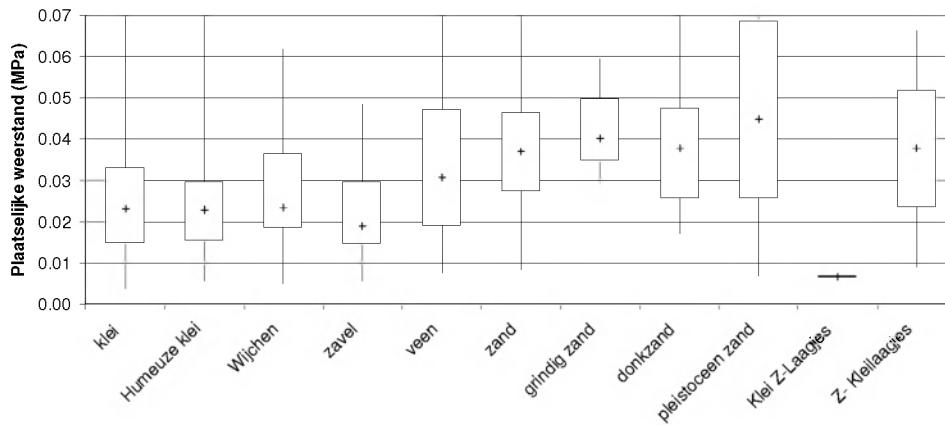
Wrijvingsgetal



Conusweerstand



Plaatselijke weerstand



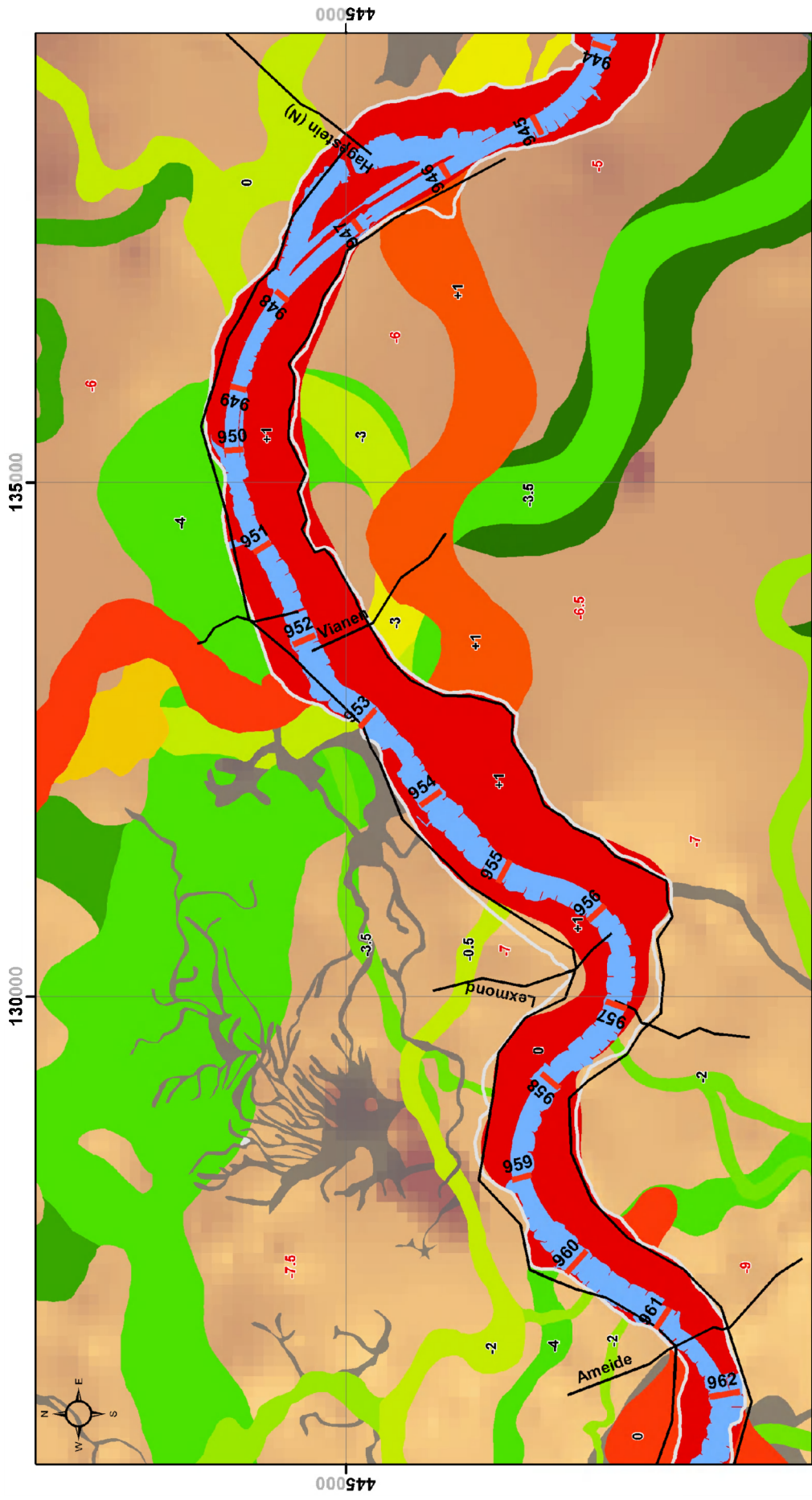
DIJK											
	Wrijvingsgetal (%)										
	klei	humeuze klei	L. v. Wijchen	zavel	veen	zand	grindig zand	donkzand	pleistoceen zand	klei met z-laagjes	zand met k-laagjes
mediaan	3.48	3.21	2.21	2.09	4.77	1.15	0.48	0.97	0.61	-	-
0.25-percentiel	2.15	2.69	1.62	1.07	3.12	0.76	0.39	0.94	0.54	-	-
minimum	0.93	0.86	1.23	0.25	0.87	0.13	0.30	0.92	0.42	-	-
maximum	8.25	7.20	3.68	3.42	8.02	2.72	2.76	1.48	3.32	-	-
0.75-percentiel	4.02	3.82	2.80	2.68	5.39	1.83	1.62	1.23	0.88	-	-
	Conusweerstand (mPa)										
	klei	humeuze klei	L. v. Wijchen	zavel	veen	zand	grindig zand	donkzand	pleistoceen zand	klei met z-laagjes	zand met k-laagjes
mediaan	0.89	0.91	1.88	1.10	1.08	4.98	12.42	4.67	9.58	-	-
0.25-percentiel	0.77	0.82	1.23	0.80	0.92	2.13	6.76	3.16	6.42	-	-
minimum	0.42	0.18	0.67	0.49	0.28	1.21	1.10	1.65	0.57	-	-
maximum	11.66	4.06	6.18	5.14	4.56	12.13	13.20	13.44	19.94	-	-
0.75-percentiel	1.67	1.12	2.88	4.50	1.17	6.65	12.81	9.05	15.29	-	-
	Plaatselijke weerstand (mPa)										
	klei	humeuze klei	L. v. Wijchen	zavel	veen	zand	grindig zand	donkzand	pleistoceen zand	klei met z-laagjes	zand met k-laagjes
mediaan	0.03	0.03	0.03	0.02	0.05	0.03	0.04	0.04	0.06	-	-
0.25-percentiel	0.02	0.02	0.03	0.02	0.03	0.03	0.03	0.03	0.03	-	-
minimum	0.01	0.01	0.02	0.01	0.02	0.01	0.03	0.02	0.01	-	-
maximum	0.08	0.09	0.06	0.04	0.10	0.08	0.06	0.11	0.13	-	-
0.75-percentiel	0.04	0.04	0.04	0.03	0.06	0.05	0.05	0.08	0.08	-	-

POLDER/UI TERWAARD											
	Wrijvingsgetal (%)										
	klei	humeuze klei	L. v. Wijchen	zavel	veen	zand	grindig zand	donkzand	pleistoceen zand	klei met z-laagjes	zand met k-laagjes
mediaan	2.58	3.05	2.79	1.93	4.22	0.75	-	3.53	0.61	1.56	3.41
0.25-percentiel	1.74	2.66	1.85	1.67	2.90	0.62	-	2.02	0.52	1.56	2.64
minimum	0.46	1.49	0.97	1.39	0.63	0.34	-	0.51	0.44	1.56	1.87
maximum	7.49	12.55	6.52	6.27	9.47	4.54	-	5.28	3.67	1.56	4.95
0.75-percentiel	4.16	4.22	3.20	2.72	6.25	1.14	-	4.40	1.02	1.56	4.18
	Conusweerstand (mPa)										
	klei	humeuze klei	L. v. Wijchen	zavel	veen	zand	grindig zand	donkzand	pleistoceen zand	klei met z-laagjes	zand met k-laagjes
mediaan	0.64	0.51	0.91	0.54	0.62	6.10	-	0.90	7.56	0.47	0.96
0.25-percentiel	0.46	0.40	0.63	0.49	0.44	3.11	-	0.68	4.19	0.47	0.72
minimum	0.15	0.16	0.29	0.34	0.12	0.68	-	0.47	0.66	0.47	0.48
maximum	8.45	1.20	2.01	3.20	13.49	23.12	-	5.35	13.70	0.47	1.43
0.75-percentiel	0.91	0.71	1.30	0.81	0.84	8.13	-	3.13	10.39	0.47	1.19
	Plaatselijke weerstand (mPa)										
	klei	humeuze klei	L. v. Wijchen	zavel	veen	zand	grindig zand	donkzand	pleistoceen zand	klei met z-laagjes	zand met k-laagjes
mediaan	0.02	0.02	0.02	0.01	0.03	0.04	-	0.03	0.04	0.01	0.04
0.25-percentiel	0.01	0.01	0.01	0.01	0.02	0.02	-	0.02	0.02	0.01	0.02
minimum	0.00	0.01	0.00	0.01	0.01	0.01	-	0.02	0.01	0.01	0.01
maximum	0.05	0.04	0.06	0.05	0.08	0.14	-	0.05	0.09	0.01	0.07
0.75-percentiel	0.02	0.02	0.02	0.02	0.03	0.05	-	0.04	0.06	0.01	0.05

TOTAAL												
	Wrijvingsgetal (%)											
	klei	humeuze klei	L. v. Wijchen	zavel	veen	zand	grindig zand	donkzand	pleistoceen zand	klei met z-laagjes	zand met k-laagjes	
mediaan	2.88	3.10	2.60	2.04	4.62	0.95	0.48	1.23	0.61	1.56	3.41	
0.25-percentiel	1.78	2.66	1.74	1.33	2.93	0.67	0.39	0.93	0.53	1.56	2.64	
minimum	0.46	0.86	0.97	0.25	0.63	0.13	0.30	0.51	0.42	1.56	1.87	
maximum	8.25	12.55	6.52	6.27	9.47	4.54	2.76	5.28	3.67	1.56	4.95	
0.75-percentiel	4.06	3.97	3.10	2.68	6.17	1.66	1.62	3.01	1.02	1.56	4.18	
	Conusweerstand (mPa)											
	klei	humeuze klei	L. v. Wijchen	zavel	veen	zand	grindig zand	donkzand	pleistoceen zand	klei met z-laagjes	zand met k-laagjes	
mediaan	0.79	0.75	1.16	0.84	0.81	5.12	12.42	3.16	9.07	0.47	0.96	
0.25-percentiel	0.53	0.47	0.75	0.58	0.56	2.45	6.76	1.09	4.56	0.47	0.72	
minimum	0.15	0.16	0.29	0.34	0.12	0.68	1.10	0.47	0.57	0.47	0.48	
maximum	11.66	4.06	6.18	5.14	13.49	23.12	13.20	13.44	19.94	0.47	1.43	
0.75-percentiel	1.18	0.90	1.75	2.89	1.08	7.75	12.81	5.18	12.80	0.47	1.19	
	Plaatselijke weerstand (mPa)											
	klei	humeuze klei	L. v. Wijchen	zavel	veen	zand	grindig zand	donkzand	pleistoceen zand	klei met z-laagjes	zand met k-laagjes	
mediaan	0.02	0.02	0.02	0.02	0.03	0.04	0.04	0.04	0.04	0.01	0.04	
0.25-percentiel	0.01	0.02	0.02	0.01	0.02	0.03	0.03	0.03	0.03	0.01	0.02	
minimum	0.00	0.01	0.00	0.01	0.01	0.01	0.03	0.02	0.01	0.01	0.01	
maximum	0.08	0.09	0.06	0.05	0.10	0.14	0.06	0.11	0.13	0.01	0.07	
0.75-percentiel	0.03	0.03	0.04	0.03	0.05	0.05	0.05	0.05	0.07	0.01	0.05	

Appendix 3

Zanddiepte kaarten van het gebied rondom de Lek.

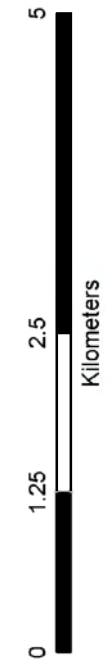


Legenda

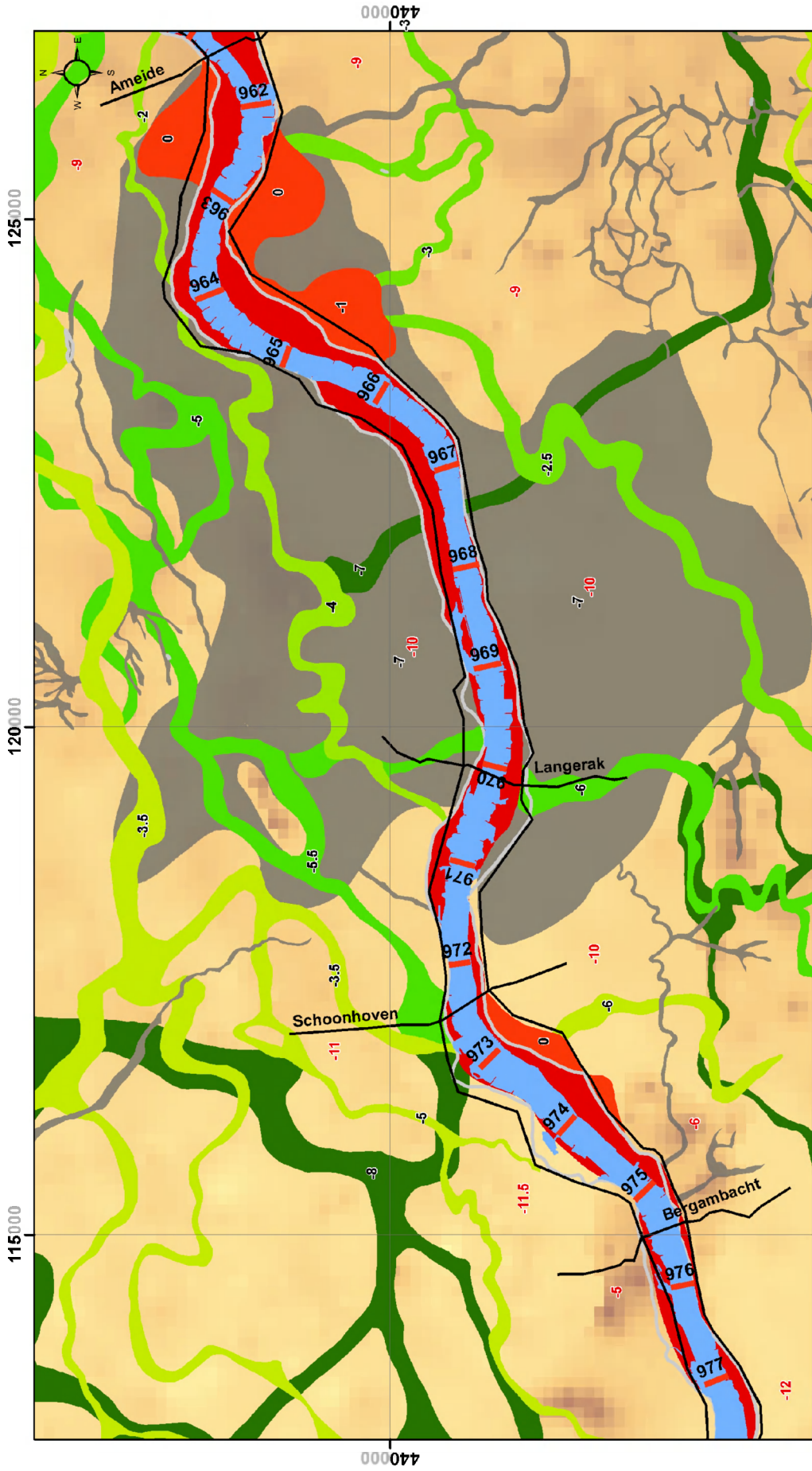
- Ouderdome holocene stroomgordels**
- 0 - 500 BP
 - 500 - 1000 BP
 - 1000 - 1500 BP
 - 1500 - 2000 BP
 - 2000 - 2500 BP
 - 2500 - 3000 BP
 - 3000 - 3500 BP
 - 3500 - 4000 BP
 - 4000 - 4500 BP
 - 4500 - 5000 BP

- Top Pleistoceen (m NAP)**
- 5000 - 5500 BP
 - 5500 - 6000 BP
 - 6000 - 8000 BP
 - zandige crevasse of zandige meervulling
 - +7
 - 14

- Randinformatie**
- Dijken
 - Profielen
 - Diepteligging bovenkant van holocene zandbanen
 - 6
 - 6



Universiteit Utrecht



Legenda

Ouderdome holocene stroomgordels

0 - 500 BP	2500 - 3000 BP
500 - 1000 BP	3000 - 3500 BP
1000 - 1500 BP	3500 - 4000 BP
1500 - 2000 BP	4000 - 4500 BP
2000 - 2500 BP	4500 - 5000 BP

Top Pleistocene (m NAP)

5000 - 6500 BP	17
5500 - 6000 BP	
6000 - 8000 BP	
zandige crevasse of zandige meervulling	-14

Randinformatie

- Dijken
- Profielen

Diepteigging bovenkant van holocene zandbanen

- 6
- 6

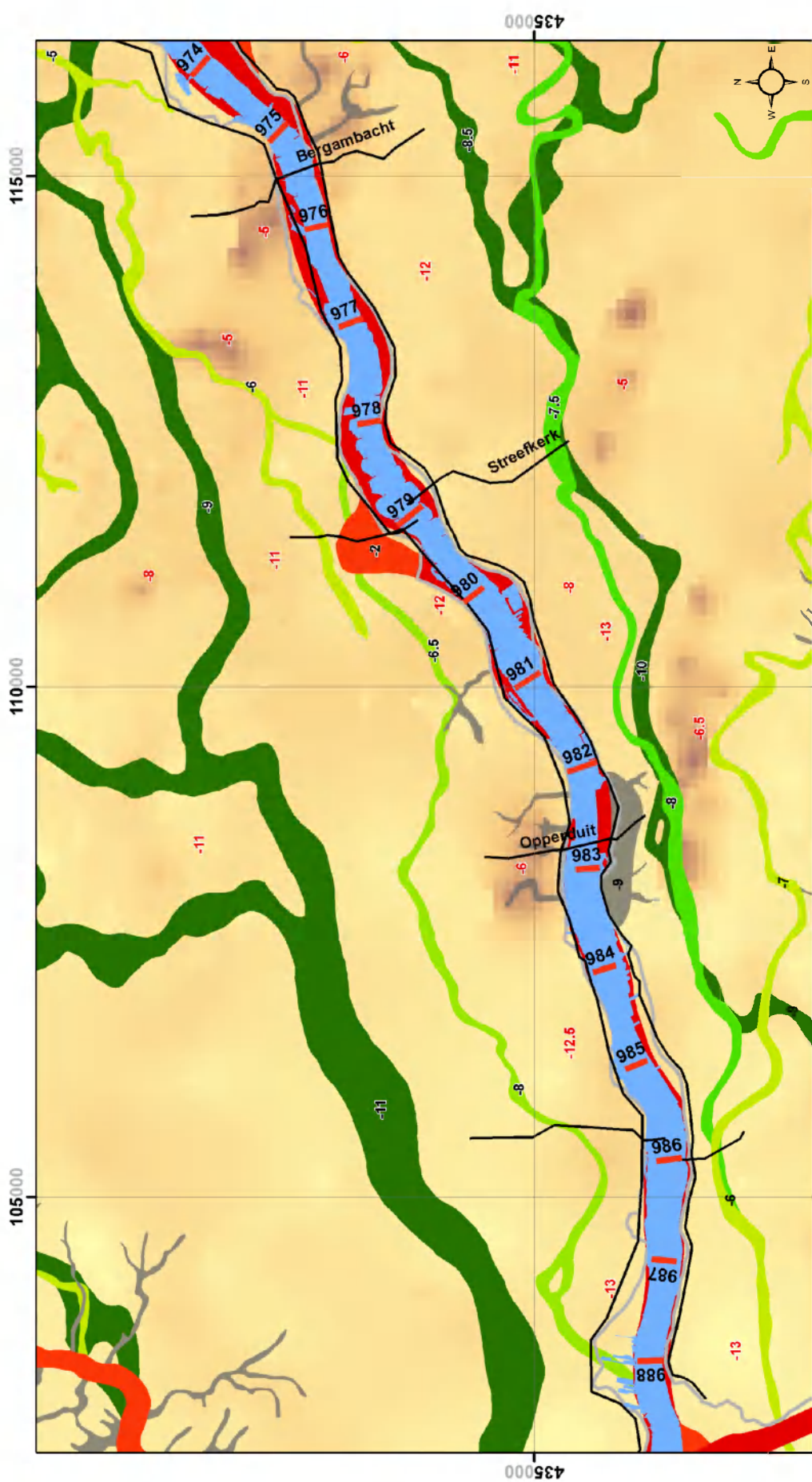
Diepteigging van het pleistocene oppervlak

- 6
- 6

Kilometers

0 1.25 2.5 5

Universiteit Utrecht



Legenda

	0 - 500 BP		zandige crevasse of zandige meervulling
	500 - 1000 BP		5000 - 5500 BP
	1000 - 1500 BP		5500 - 6000 BP
	1500 - 2000 BP		6000 - 8000 BP
	2000 - 2500 BP		zandige crevasse of zandige meervulling
	2500 - 3000 BP		Top Pleistoceen (m NAP)
	3000 - 3500 BP		17
	3500 - 4000 BP		14
	4000 - 4500 BP		
	4500 - 5000 BP		

Randinformatie

- Dijken
- Profielen
- Diepteligging bovenkant van holocene zandbanen
- Diepteligging van het pleistoceen oppervlak

Top Pleistoceen (m NAP)

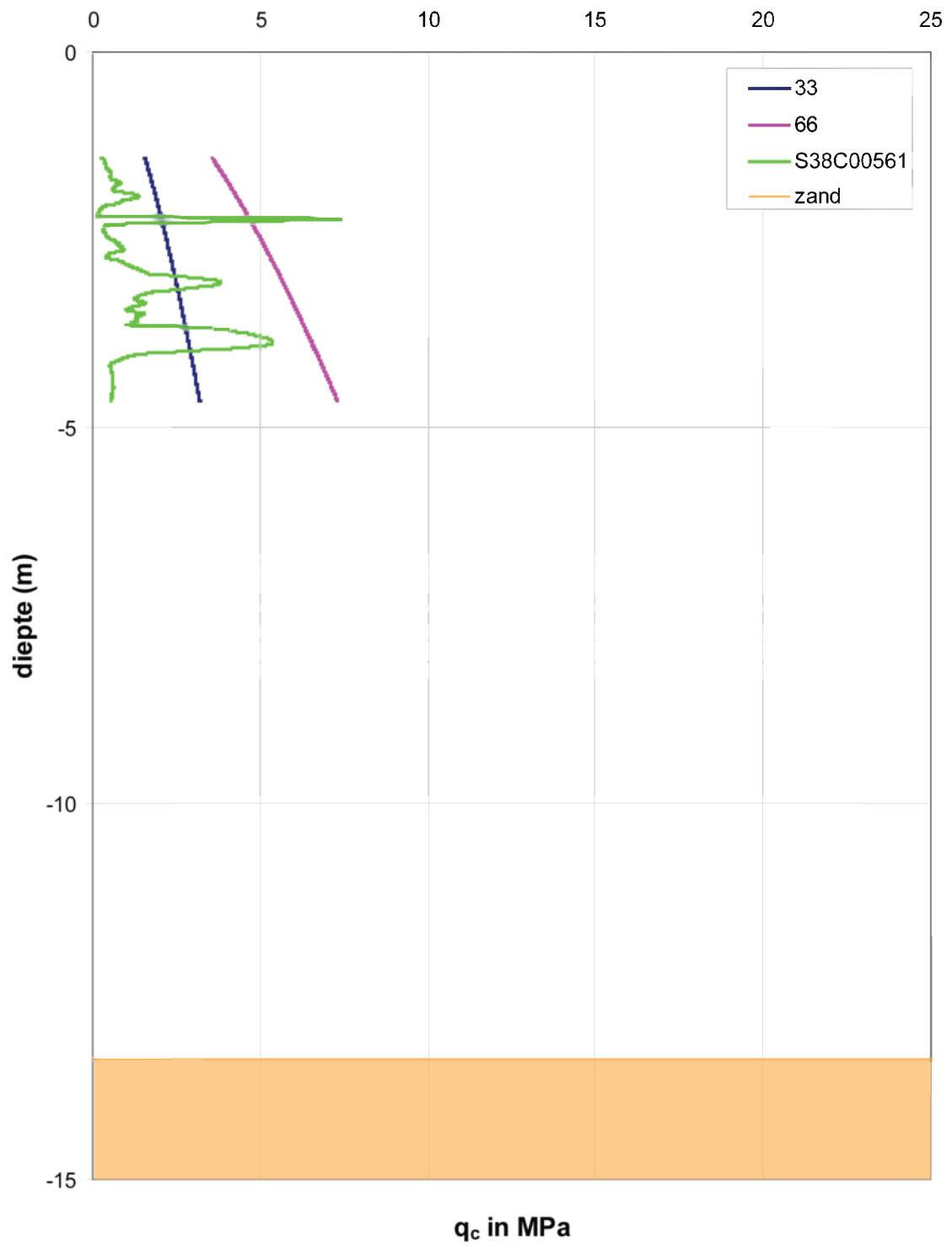
Kilometers

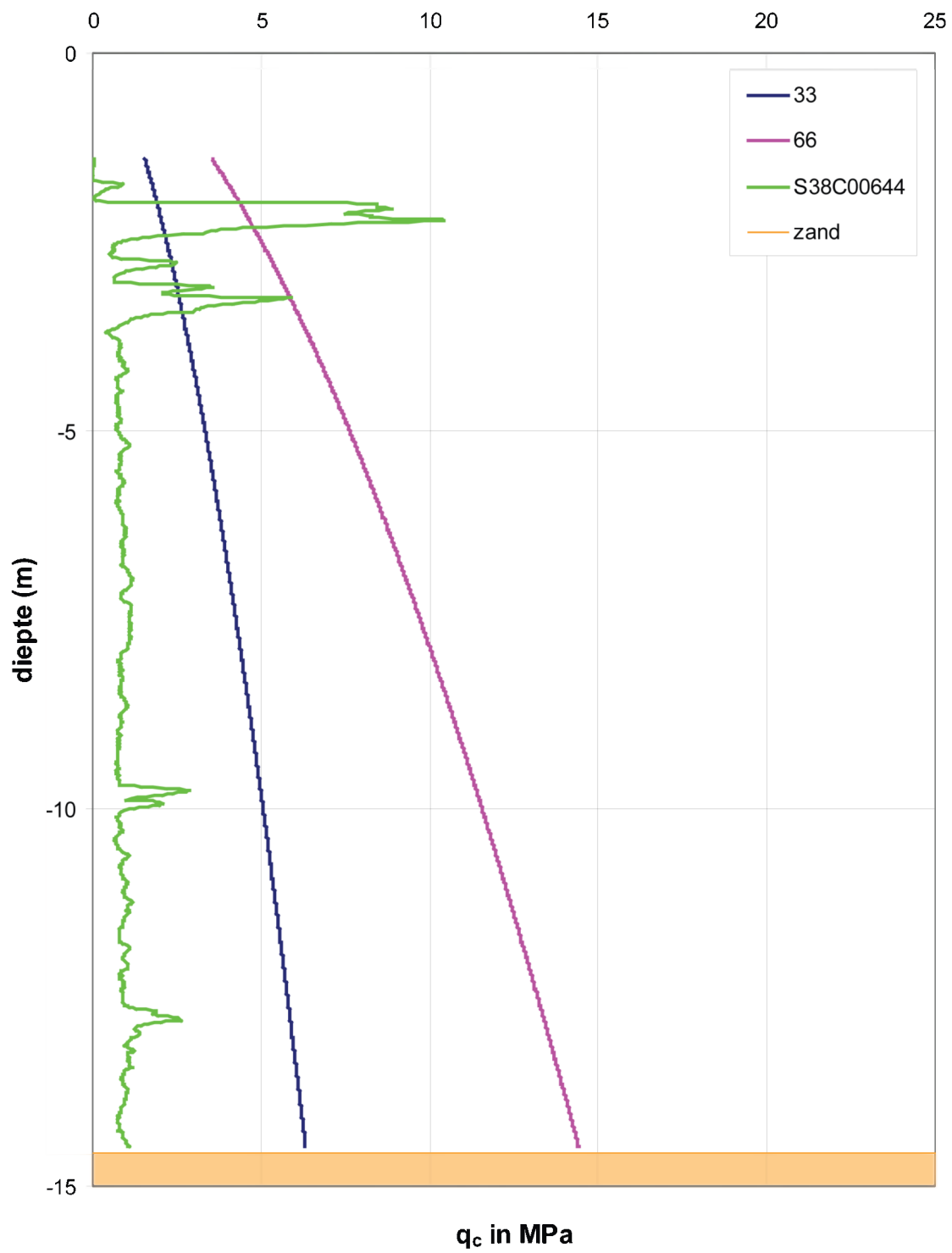
0 1.25 2.5 5

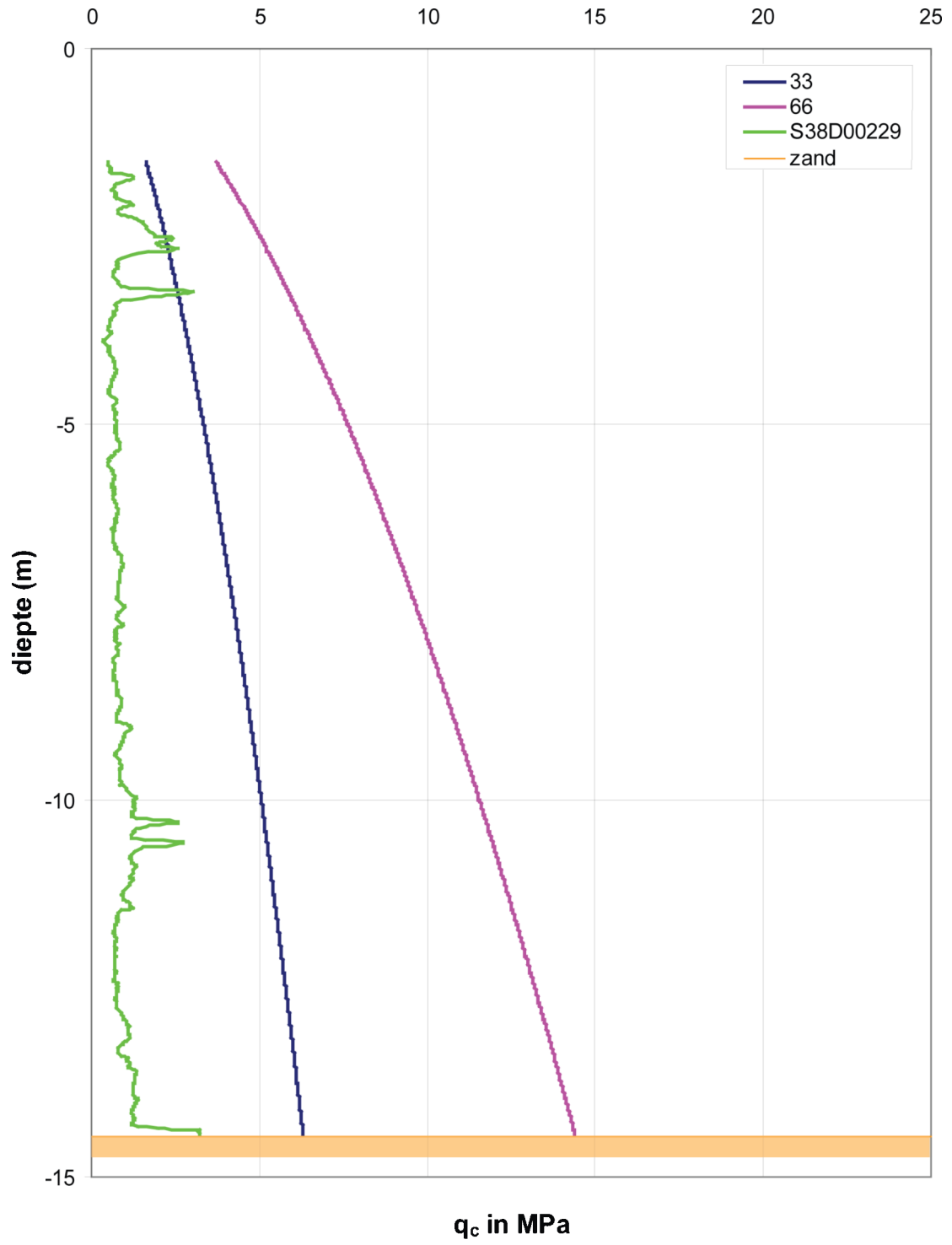
Universiteit Utrecht

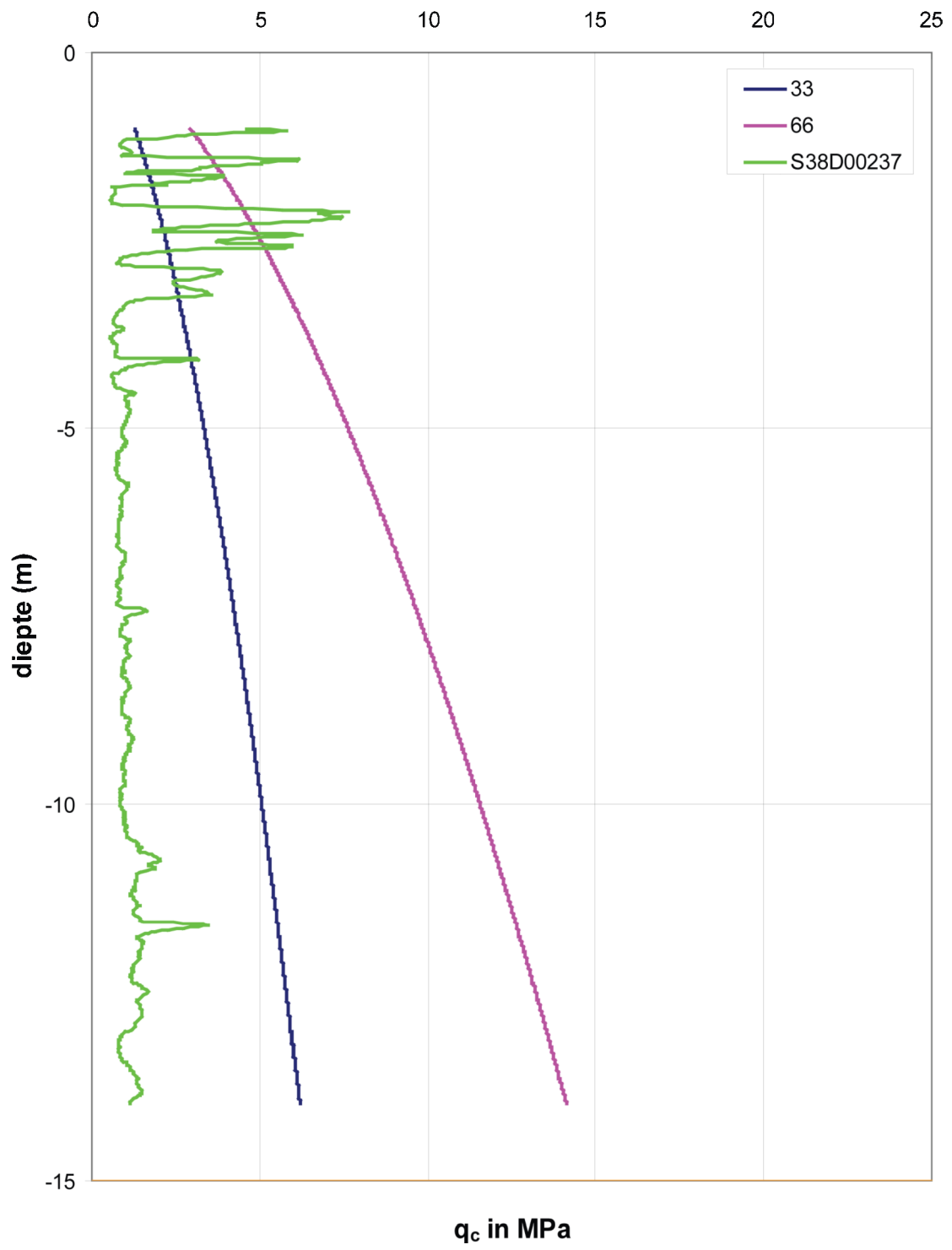
Appendix 4a

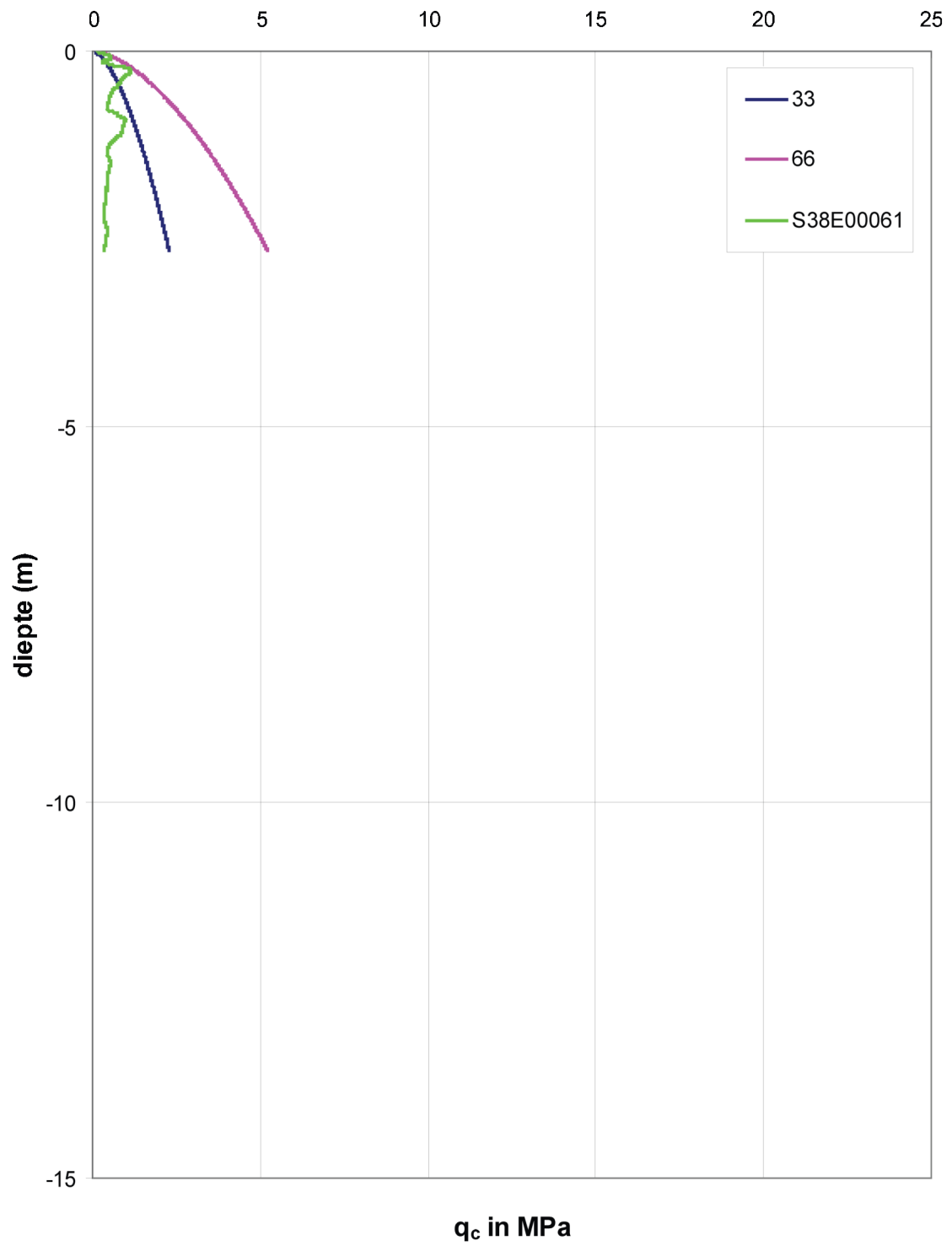
Gemeten en berekende conusweerstand voor de boring/sondering combinaties in dijken rond de Lek.

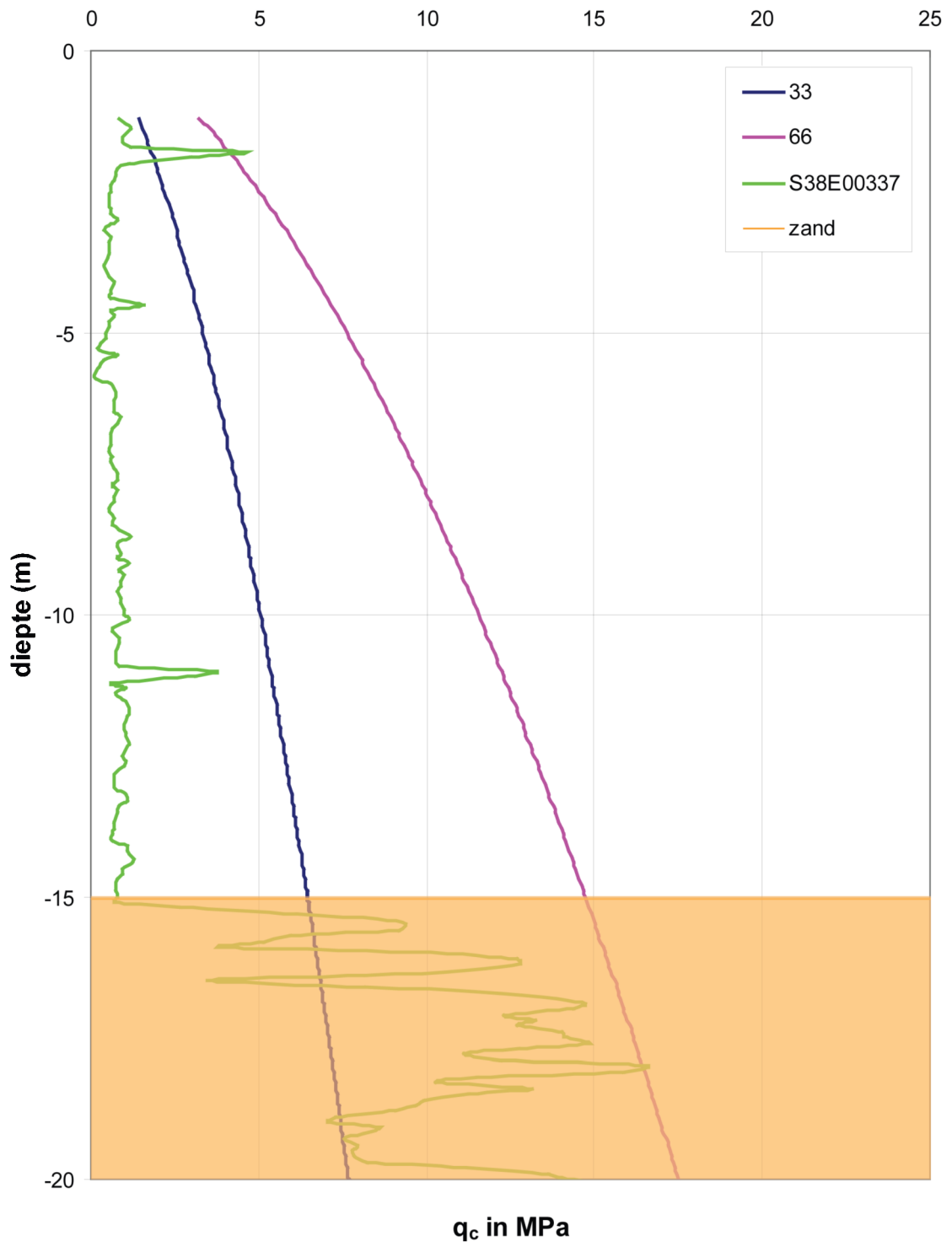


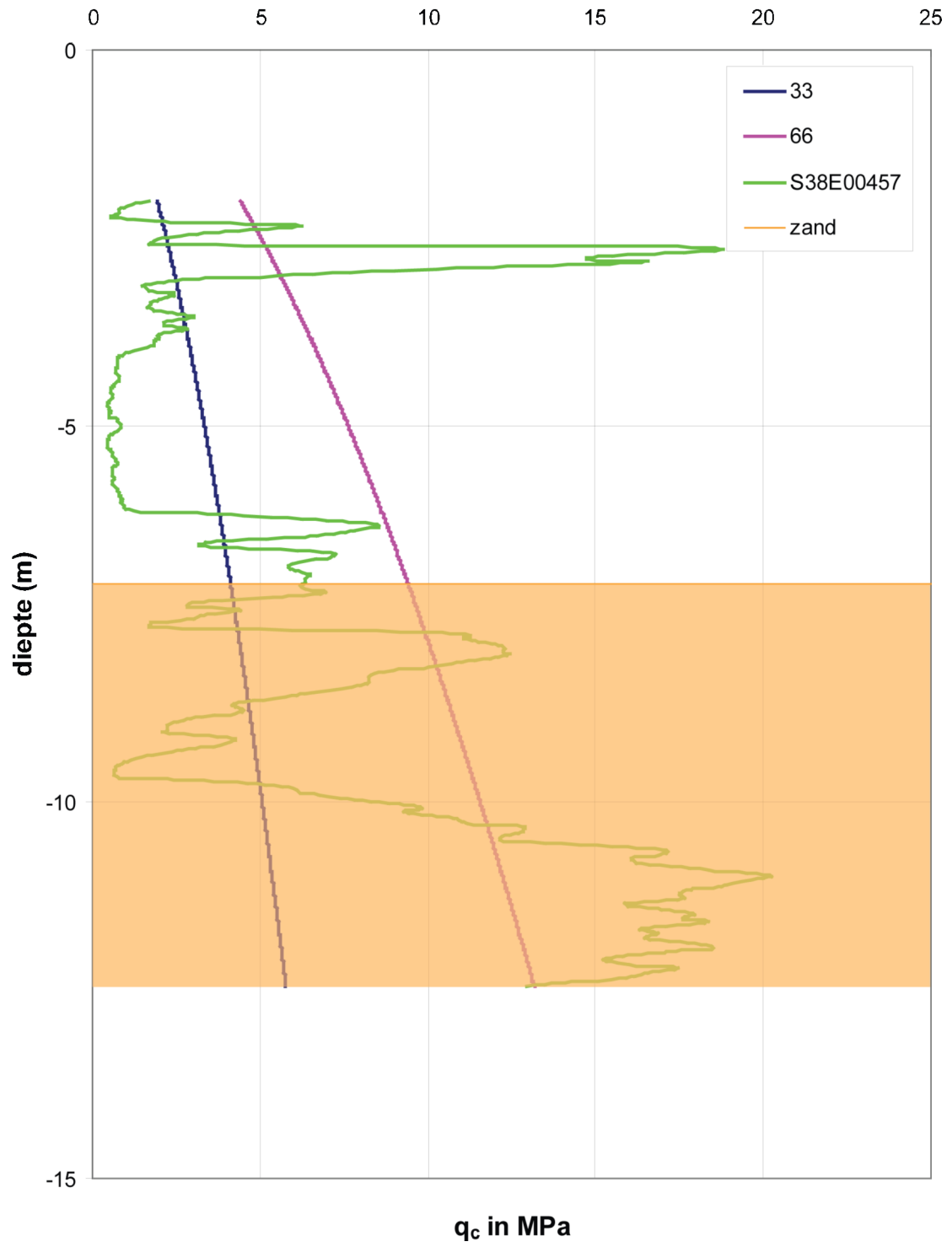


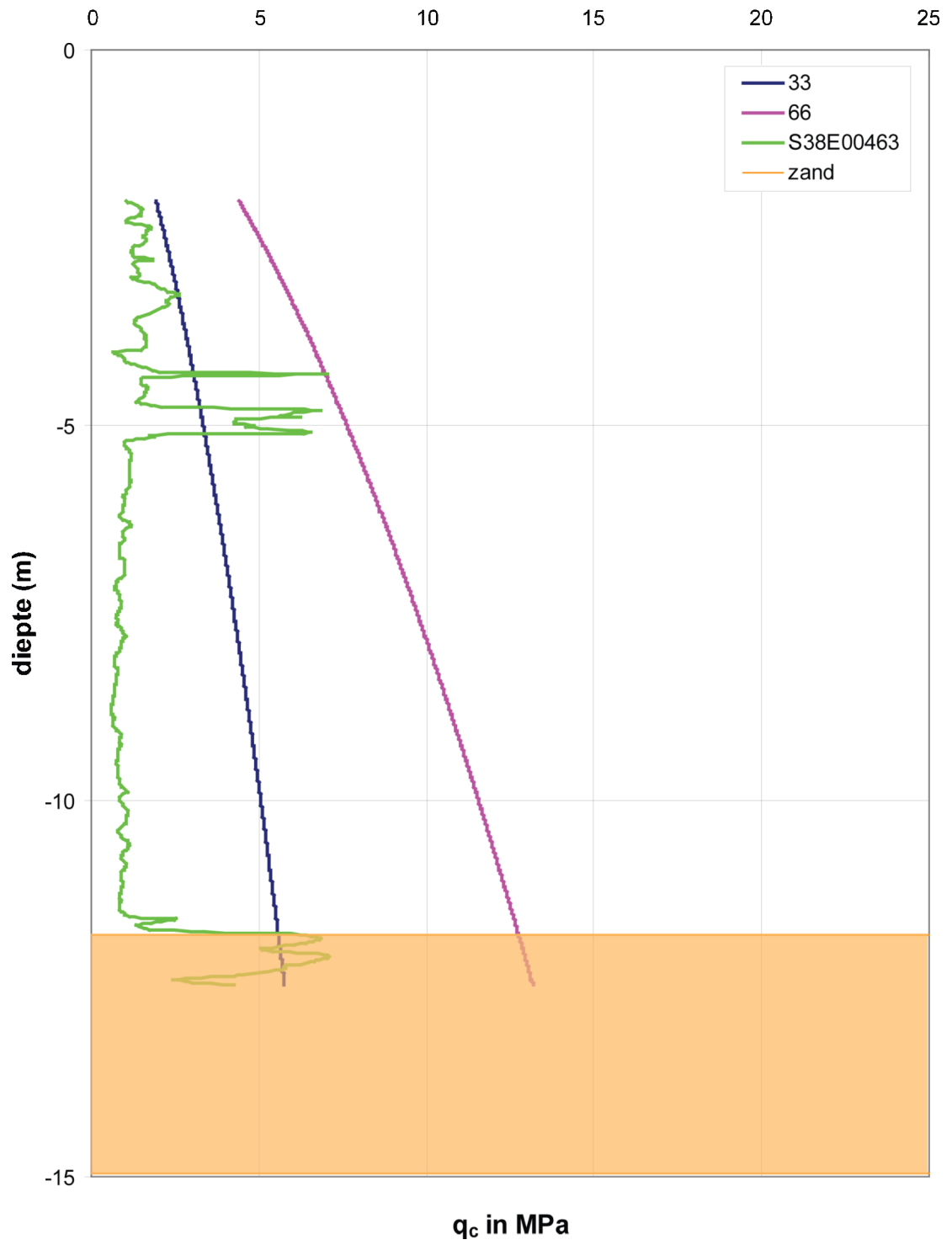


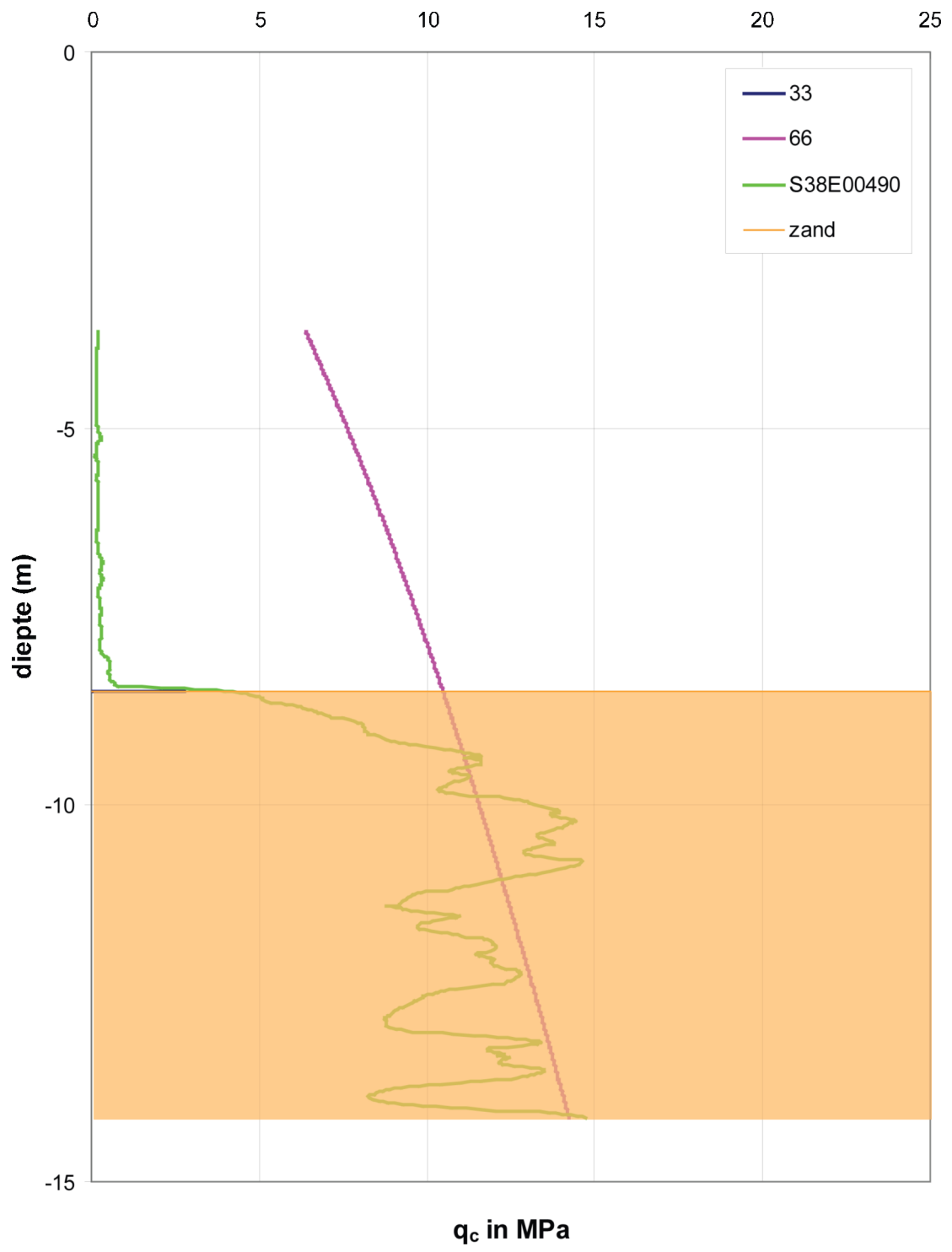


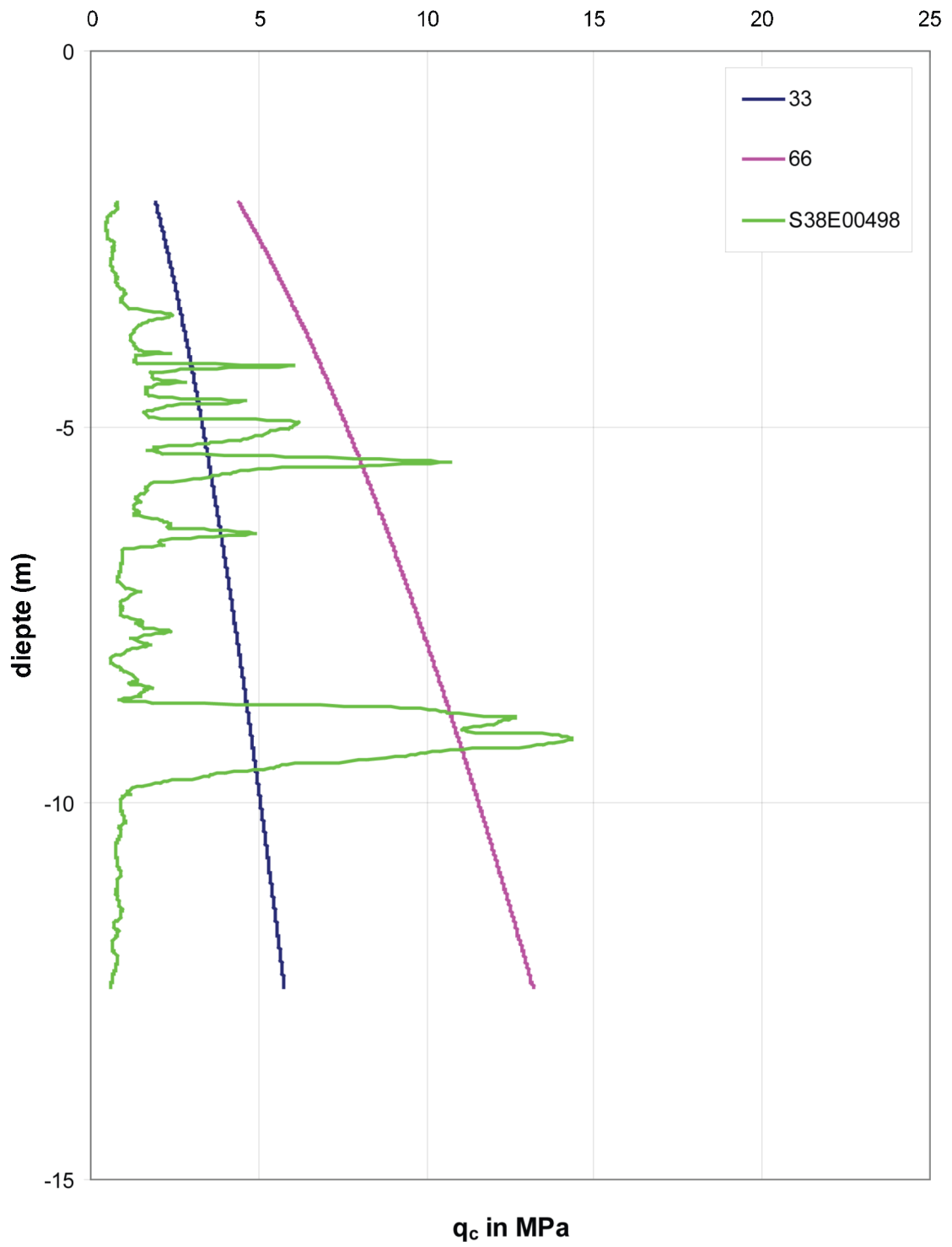


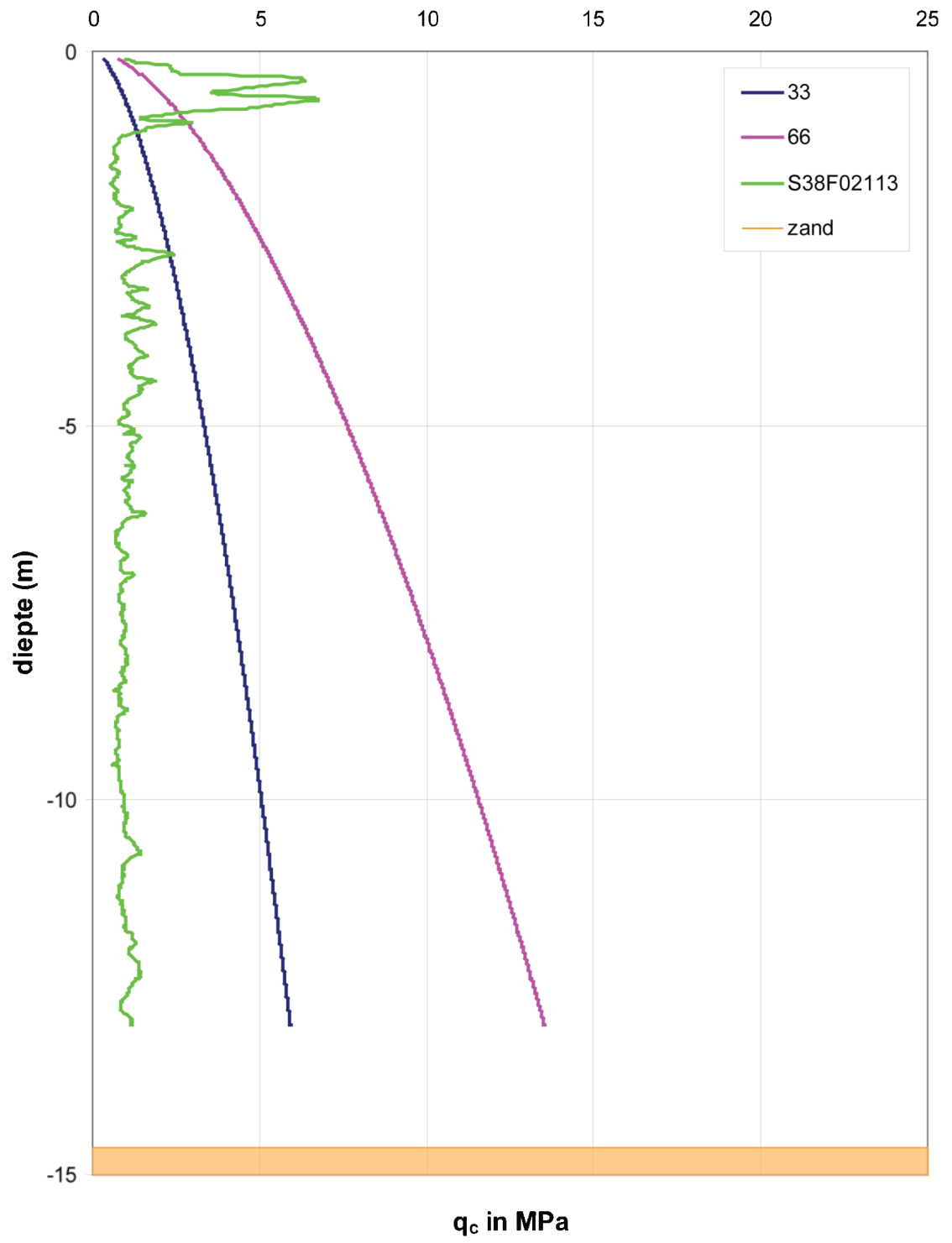


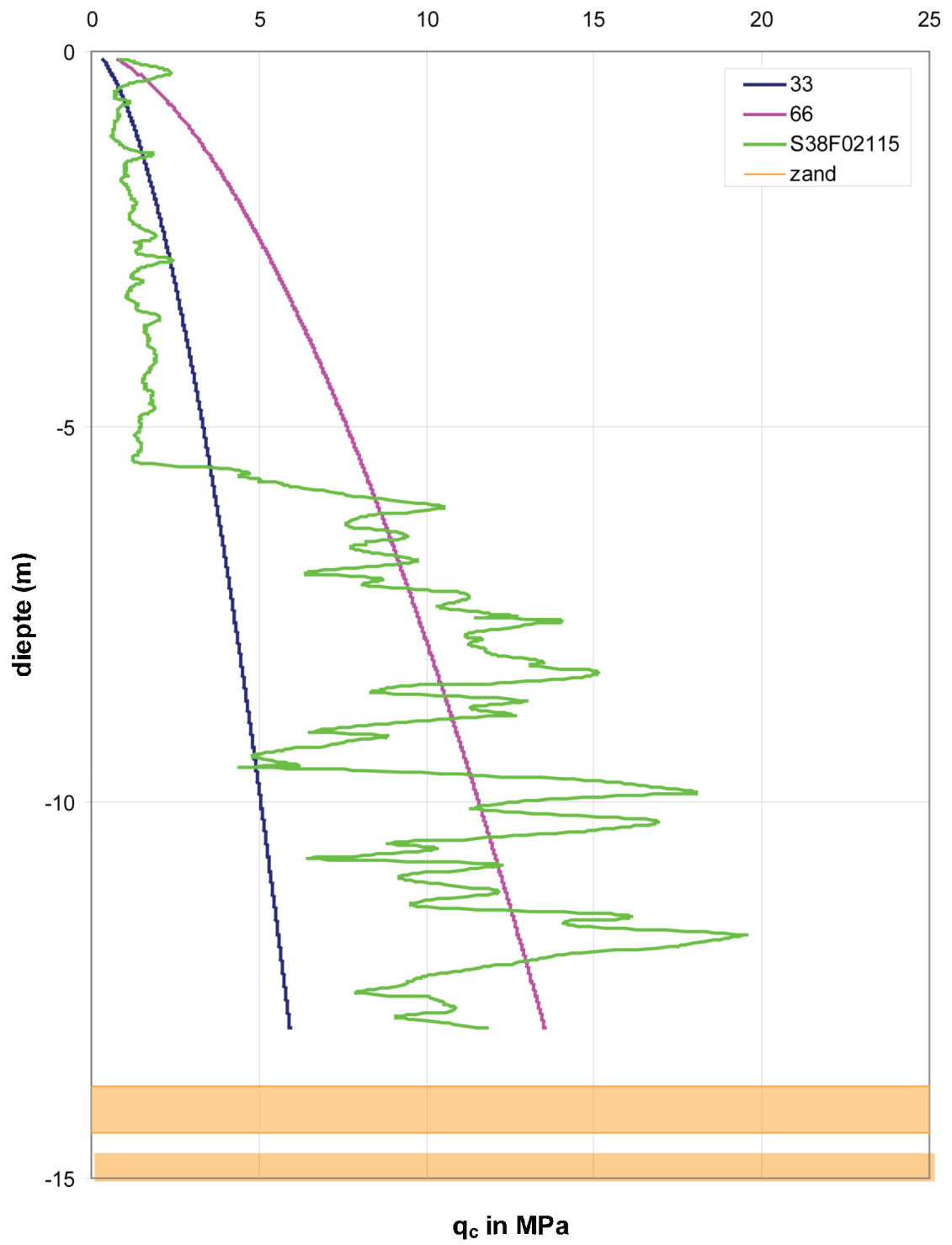


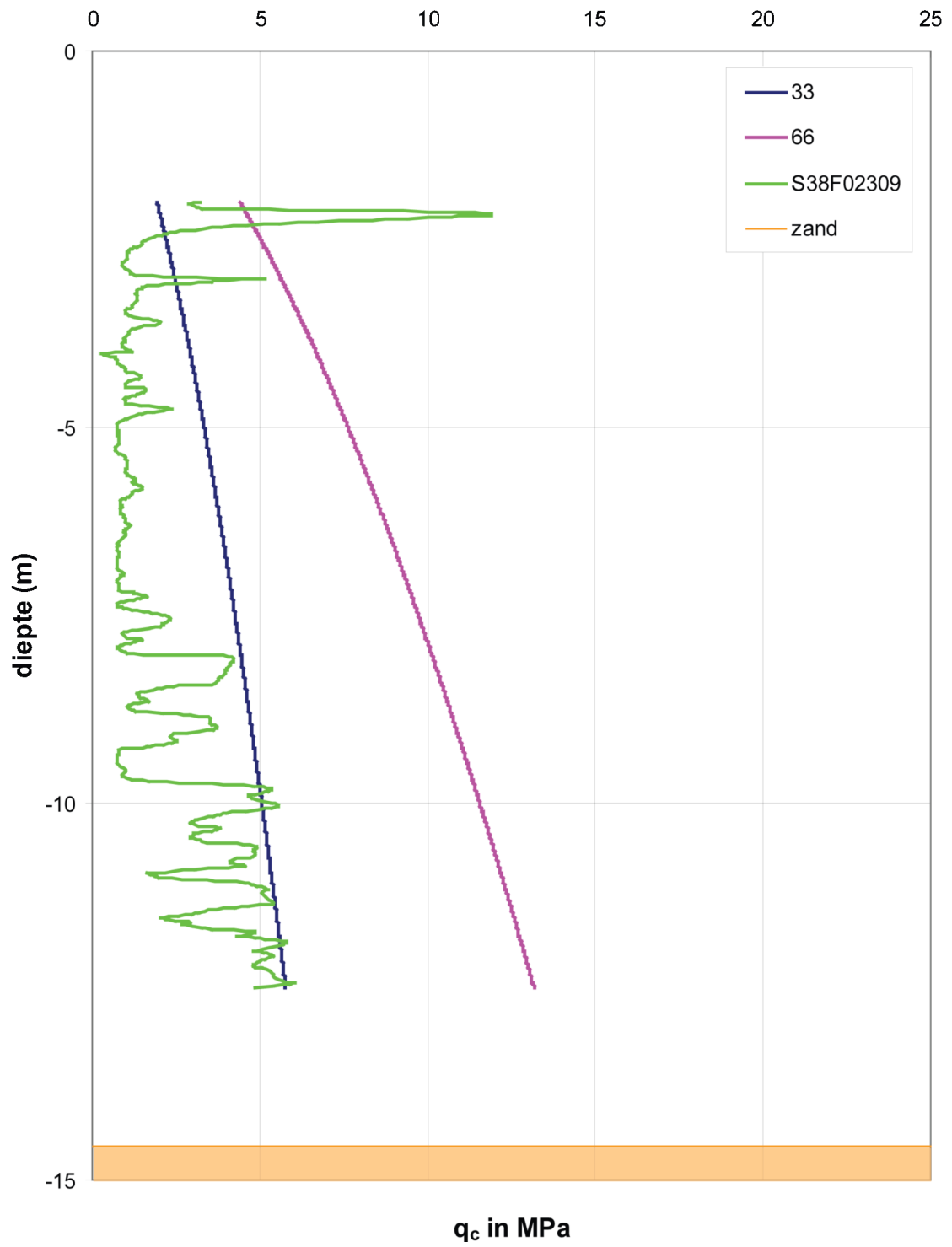


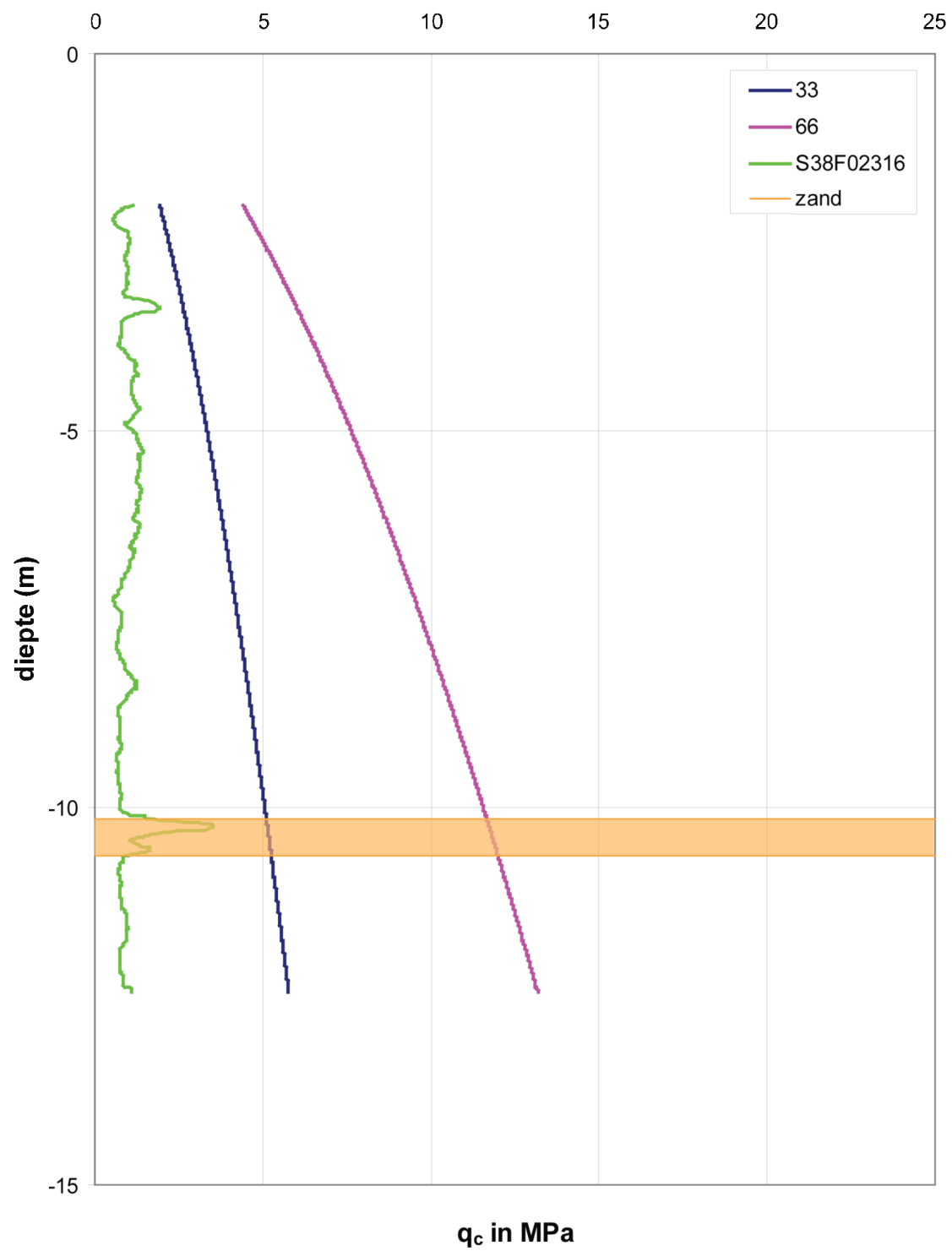


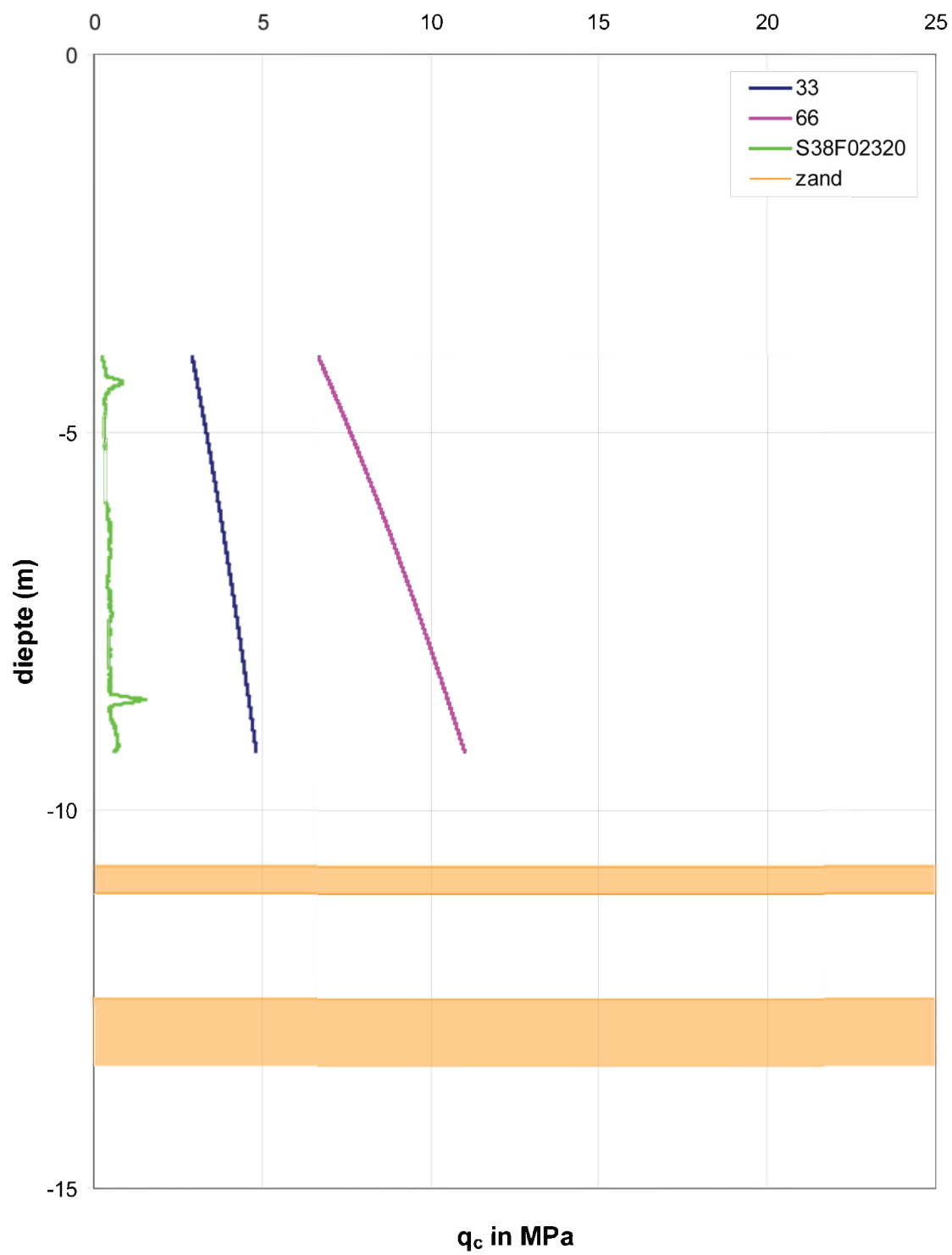


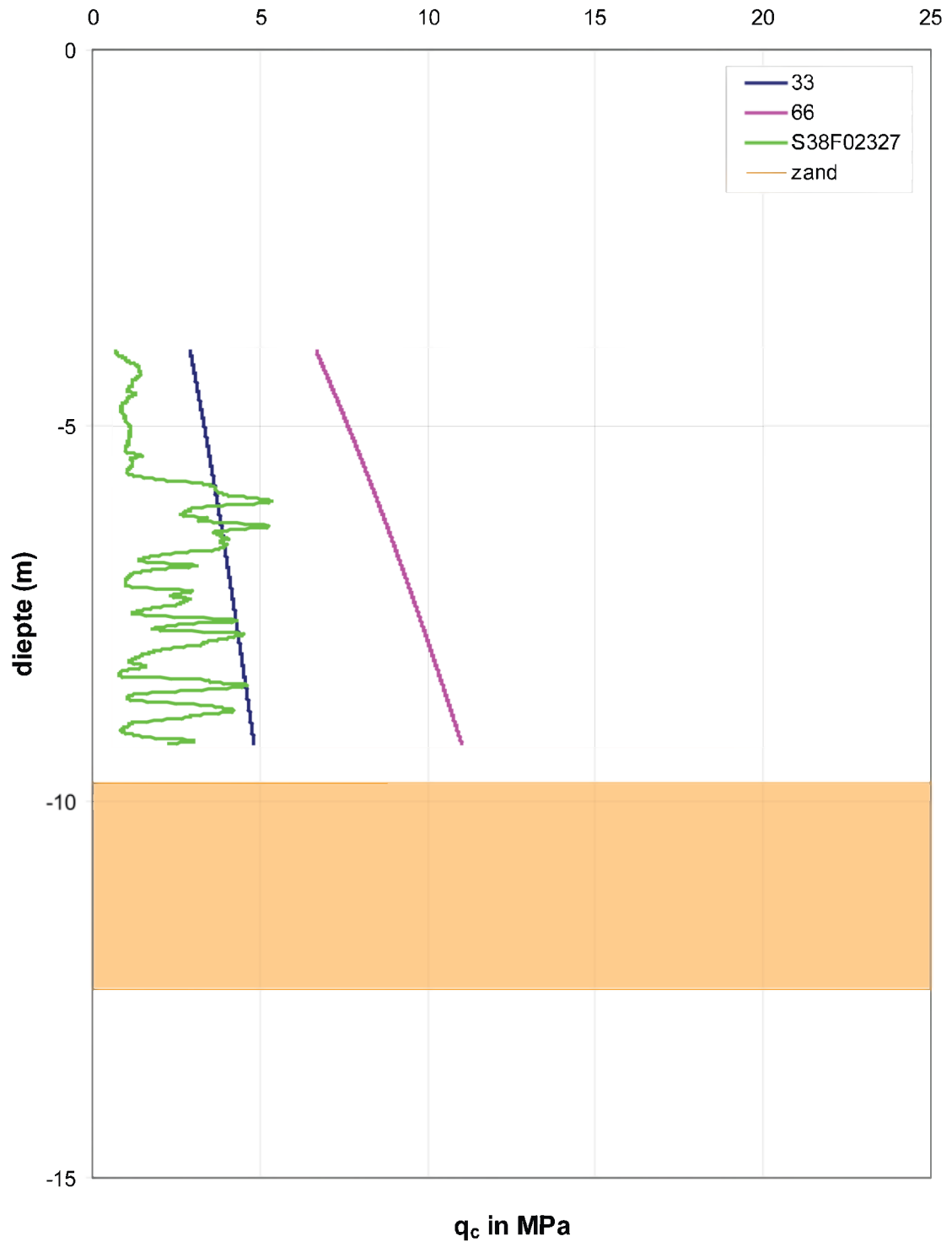


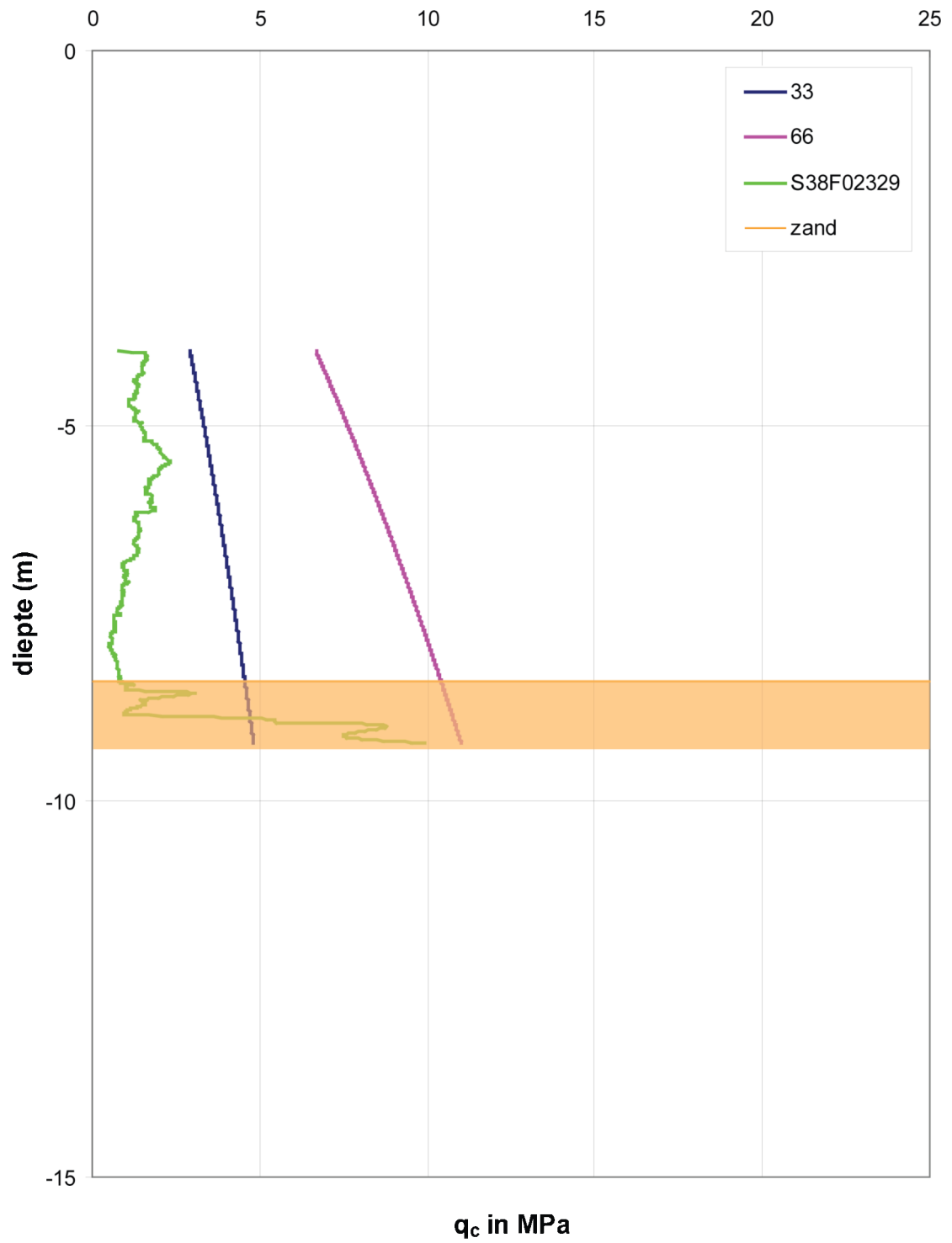


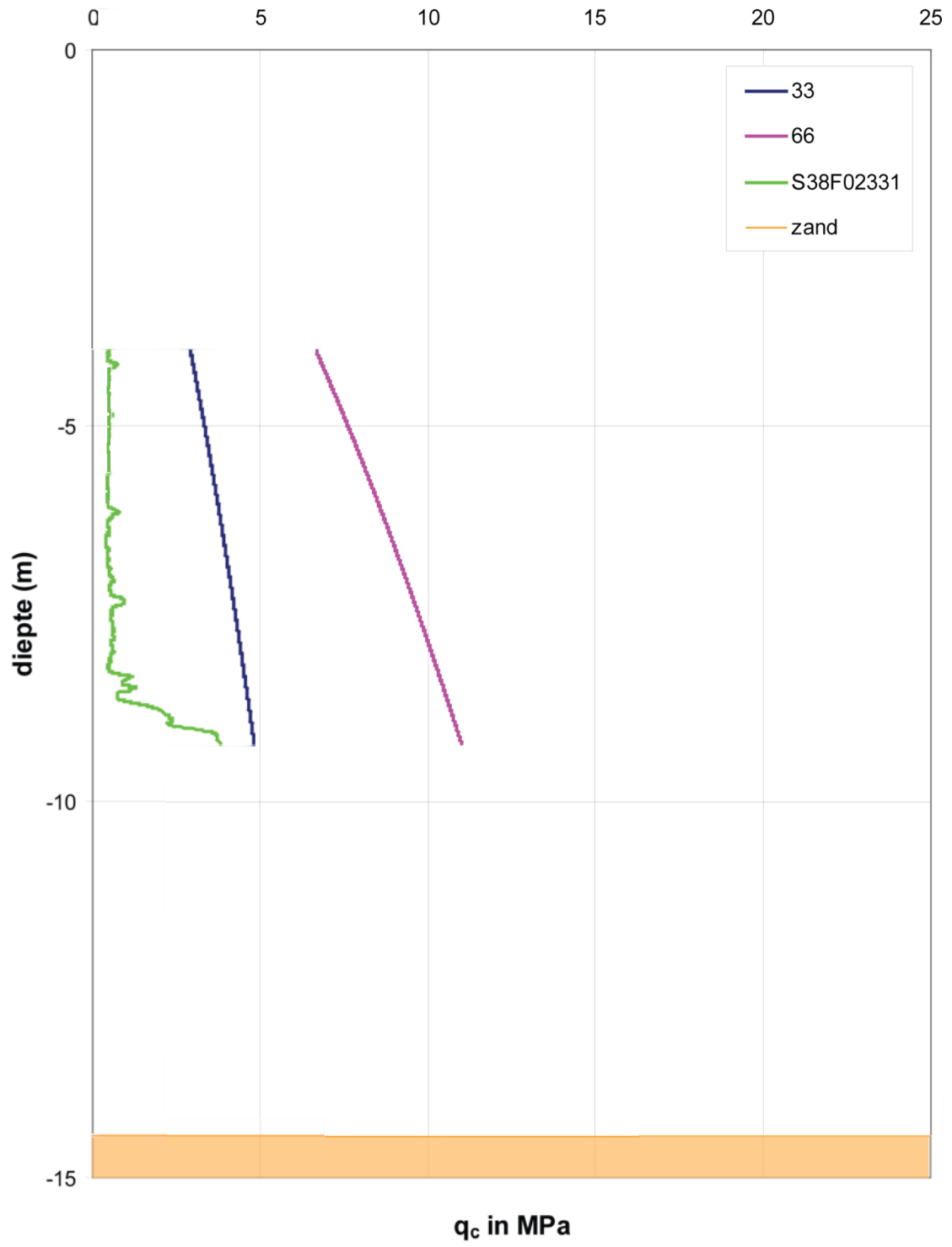


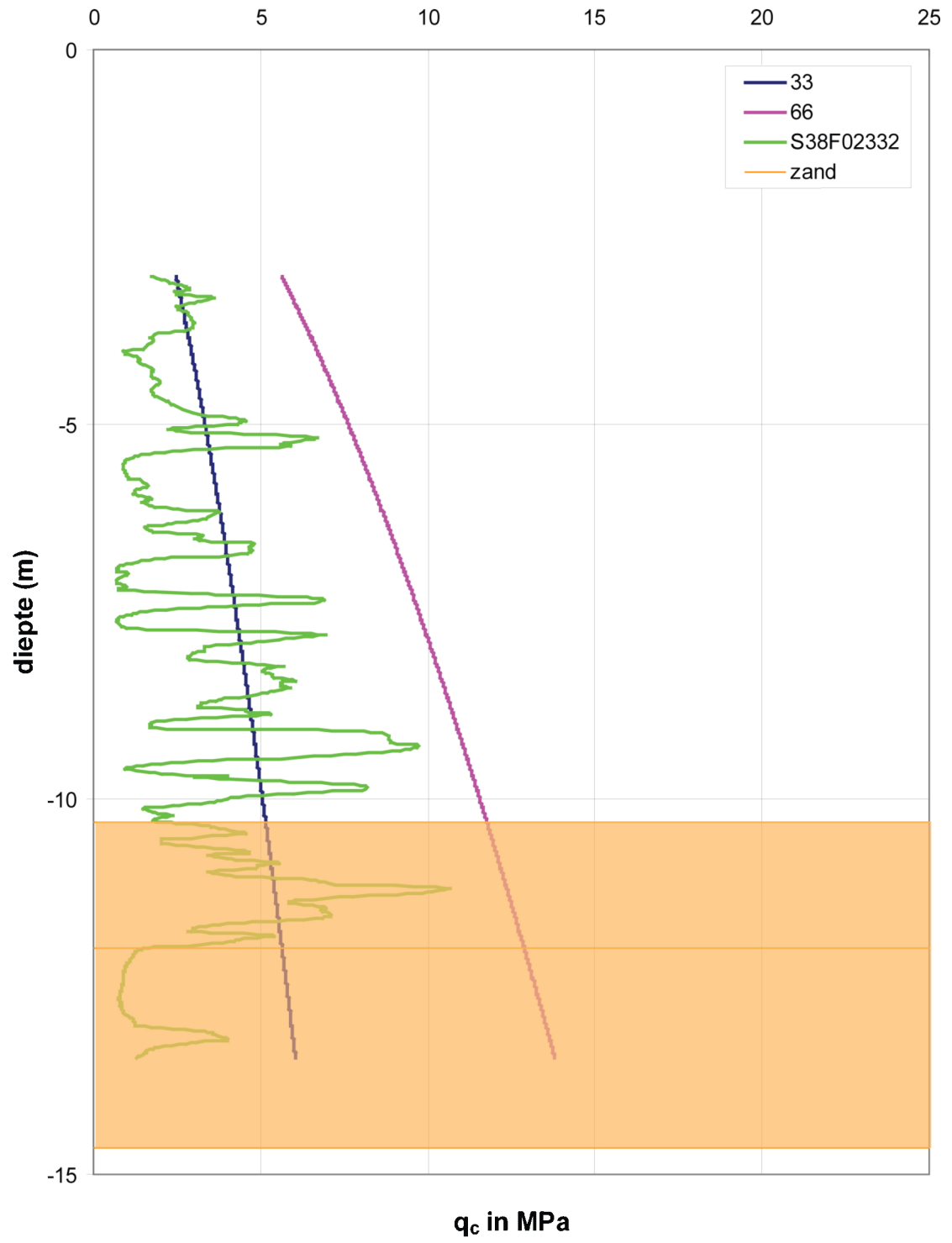


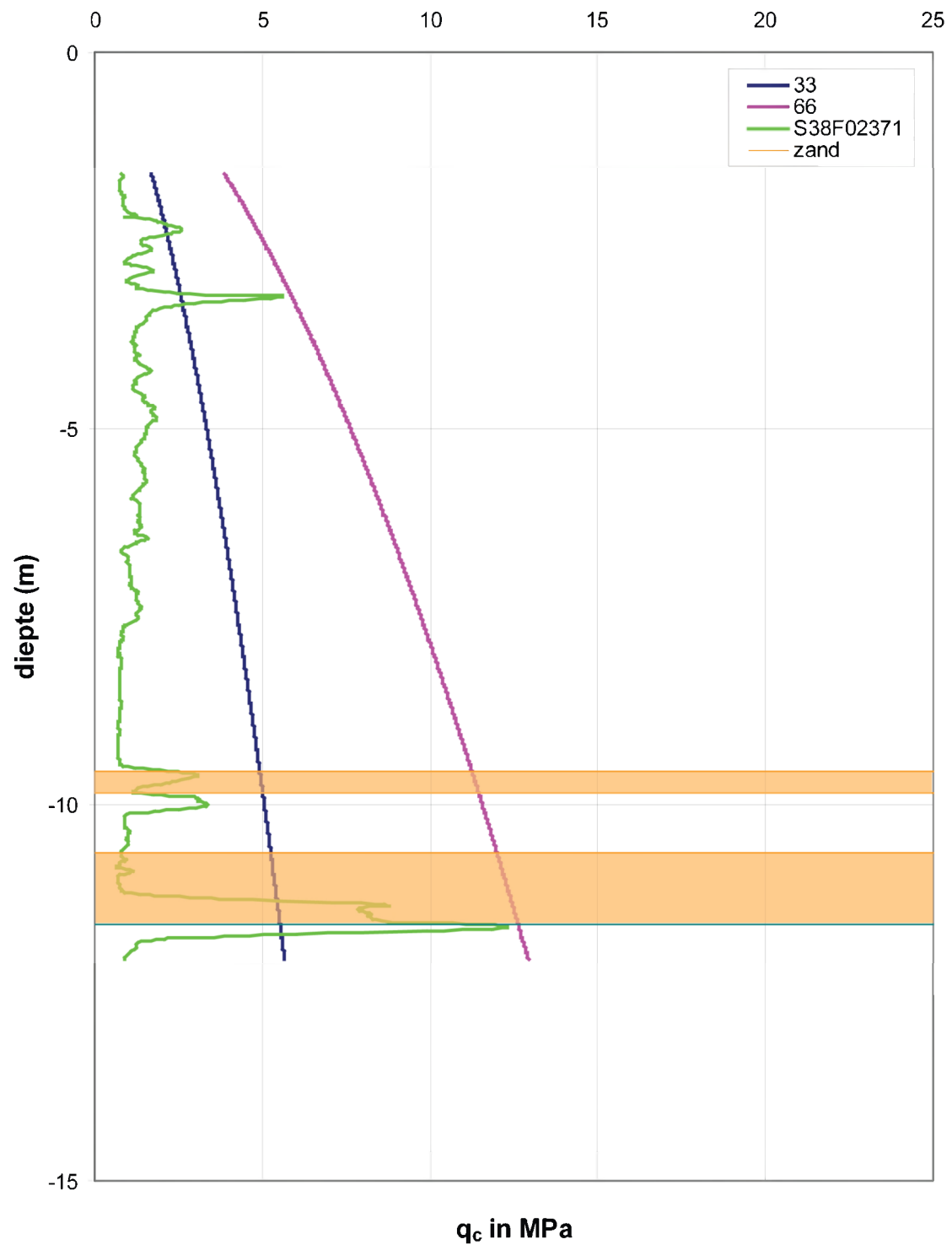












Appendix 4b

Gemeten en berekende conusweerstand voor de boring/sondering combinaties in polders en uiterwaarden rond de Lek.

